

발간등록번호

11-1543000-003685-01

자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단

2021년 10월 05일

주관연구기관 (주)대동
협동연구기관 동양물산기업(주)
협동연구기관 국제기계(주)
협동연구기관 (주)긴트

농 립 축 산 식 품 부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단”(개발기간 : 2018. 07. ~ 2021. 06.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021년 10월 05일

주관연구기관명 : (주)대동

김준식, 원유현



협동연구기관명 : 동양물산기업(주)

김희용



협동연구기관명 : 국제기계(주)

김희용



협동연구기관명 : (주)긴트

김용현



주관연구책임자 : (주)대동

감병우

협동연구책임자 : 동양물산기업(주)

강무상

협동연구책임자 : 국제기계(주)

황선국

협동연구책임자 : (주)긴트

김용현

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

최종보고서							보안등급						
							일반[], 보안[]						
중앙행정기관명				사업명		사업명		첨단생산기술개발사업					
전문기관명 (시 작성)				내역사업명 (시 작성)									
공고번호				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)									
				연구개발과제번호									
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0801	40%	LB0804	30%	EA0506	30%						
	농림식품과학기술분류	RC0103	100%										
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문											
		영문											
연구개발과제명		국문		자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단									
		영문		Commercialization of autonomous tractor R&D Project									
주관연구개발기관		기관명		(주)대동		사업자등록번호		514-81-06690					
		주소		대구광역시 달성군		법인등록번호		191111-0000104					
연구책임자		성명		김병우		직위		상무					
		연락처		직장전화		휴대전화		-					
				전자우편		국가연구자번호		-					
연구개발기간		전체		2018. 07. 31 - 2021. 06. 30 (36개월)									
		단계 (해당 시 작성)		1단계		-							
				n단계		-							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비		기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금		합계		연구개발 비 외 지원금			
		현금		현금		현금		현금		현금			
		현물		현물		현물		현물		현물			
		합계		합계		합계		합계		합계			
총계		1,200,000	300,000	500,000	-	-	-	1,500,000	500,000	2,000,000	-		
1단계		2,400,000	600,000	1,000,000	-	-	-	3,000,000	1,000,000	4,000,000	-		
2년차		2,400,000	600,000	1,000,000	-	-	-	3,000,000	1,000,000	4,000,000	-		
3년차		6,000,000	1,500,000	2,500,000	-	-	-	7,500,000	2,500,000	10,000,000	-		
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명		책임자		직위		휴대전화		전자우편		비고	
												역할	
												기관유형	
공동연구개발기관		동양물산기업(주)		강무상		부소장		-		-		수요	
		국제종합기계(주)		황선국		연구소장		-		-		수요	
		(주)긴트		김용현		대표이사		-		-		수요	
위탁연구개발기관		충남대학교		김용주		부교수		-		-		위탁	
		서울대학교		김학진		정교수		-		-		위탁	
		한국로봇융합연구원		오장석		선임		-		-		위탁	
연구개발담당자 실무담당자		성명		박종수		직위		부장					
		연락처		직장전화		휴대전화		-					
				전자우편		국가연구자번호		-					

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021 년 8 월 31 일
연구책임자: 김 병 우 (인)

주관연구개발기관의 장: (주)대동 김준식, 원유현 (인) 공동연구개발기관의 장: 동양물산기업(주) 김희용 (인)

공동연구개발기관의 장: 국제종합기계(주) 김희용 (인) 공동연구개발기관의 장: (주)긴트 김용현 (인)

농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)				연구개발과제번호			
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0801	40 %	LB0804	30 %	EA0506	30%
	농림식품 과학기술분류	RC0103	100 %				
총괄연구개발명 (해당 시 작성)							
연구개발과제명	자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단						
전체 연구개발기간	2018. 07. 31 - 2021. 06. 30 (36개월)						
총 연구개발비	총 10,000,000 천원 (정부지원연구개발비: 6,000,000 천원, 기관부담연구개발비 : 4,000,000 천원, 지방자치단체: - 천원, 그 외 지원금: - 천원)						
연구개발단계	기초[<input type="checkbox"/>] 응용[<input type="checkbox"/>] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[<input type="checkbox"/>]			기술성숙도 (해당 시 기재)	착수시점 기준() 종료시점 목표()		
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							

연구개발 목표 및 내용	최종 목표	자율주행 트랙터 핵심모듈 개발 및 통합시스템을 적용한 자율주행 트랙터 개발	
	전체 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자율주행 핵심 모듈 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 경제형 GPS를 사용한 선진사 제품 동등수준의 위치인식 모듈 개발 - 선진 제품 도입 및 최적화한 조향 제어 모듈 개발 - 국내 작업 환경 및 지형 등에 최적화된 경로 생성 및 추종 시스템 개발 - 센서 융합 기술을 통한 작업환경 인식 시스템 기술 개발 ○ 통합 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 국내 트랙터 업계 공용 사용 가능한 CAN 통신 기반 통합 시스템 개발 - 이상 징후 및 고장 등을 진단할 수 있는 자가진단 시스템 개발 ○ 자율주행 트랙터 상용화 및 실증 <ul style="list-style-type: none"> - 자율주행 핵심모듈 및 통합시스템을 적용한 자율주행 트랙터 상용화 기술개발 - 개발된 트랙터를 활용한 현장 실증 및 기술 보완 	
	목표	<ol style="list-style-type: none"> 1. 조향 제어 모듈 개발 2. 작업환경 인식 모듈 개발 3. 자율주행 성능 평가 방안 검토 4. 농작업별 최적 경로 선정 5. 최적 경로 선정 및 생성을 위한 측정 시스템 개발 6. 위치-자세 인식모듈 센서부품 선정 및 모듈 H/W설계 7. 자율주행 트랙터를 위한 위치-자세 인식모듈 개발 8. 자율주행 모듈 및 트랙터 제어모듈 통신 프로토콜 분석 및 제어기 사양 선정 9. 동역학 모델 개발을 위한 주요 인자 도출 및 모델링 10. 트랙터 경운 경로 수학적 모델 개발 및 경로생성 프로그램 개발 11. 가상현실 자율주행 농용차량 주행모델 설계 12. 가상 작업환경 시뮬레이터를 활용한 추종 알고리즘 검증 13. GPS, IMU, Encoder, Magnetometer 데이터 수집 및 사전조사 관련 기술 자료 및 융합 알고리즘에 대한 기술 분석 	
	1차년도	내용	<ol style="list-style-type: none"> 1. 조향제어 모듈 선진사 제품 분석 및 국내 작업 환경을 고려한 고정밀 제어 알고리즘 개발, 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장, 유압 시스템 설계 및 시제품 제작 2. 작업환경인식 센서류 사양조사 및 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 3. 자율주행, 실작업 평가 방안 수립 완료 4. 정밀 농업이나 농기계 무인 자동화와 관련하여 농작업 최적 경로 연구 자료 조사, ISO 및 ASABE 규격 조사 5. 포장 경운 작업 순서 및 선회 유형 분석 및 실 작업경로 데이터 로깅 시스템 개발 6. 위치-자세 인식모듈 센서부품 선정 및 모듈 H/W 설계 GPS, IMU GPS안테나의 성능을 평가하여 제품을 선정하고 H/W설계를 함. 7. 자율주행 트랙터를 위한 위치-자세 인식모듈 개발 GPS모듈은 1m 간격을 갖는 두 개의 GPS안테나를 배치하고 내부에 GPS수신기, IMU, 제어기를 수용하도록 설계. 트랙터 캐빈 루프에 위치-자세 인식모듈을 탑재하기 위하여 각사로부터 제공 받은 설계자료를 이용하여 탑재설계 수행. 8. 트랙터 제어기 모듈, 자율주행 모듈 프로토콜 취합, 분석 및 중계 모듈 통합시스템 기획 및 하드웨어 사양 선정 9. Multi-body dynamics 시뮬레이션 모델의 부하 조건의 반영을 위하여 트랙터 부하계측시스템을 개발, 실제 필드시험을 통하여 작업 부하 데이터 수집. 10. 새머리 선회유형을 포함한 포장 내 경운 작업 경로 분석 11. 직교형 포장에서 트랙터 자율주행 운행정보와 작업정보를 포함한 자율주행 경로생성 프로그램 개발 12. 외란을 고려한 주행 모델기반 알고리즘 개발 13. 동일한 센서 제품들의 연동되는 파라미터 확인하여 융합 적용 방안 검토 <p>다중 센서들의 오차 보정 알고리즘 확인 및 센서들의 융합 적용 방안 검토</p> <p>Kalman Filter, Particle Filter, Dead-Reckoning 등의 예측 알고리즘 적용 방안 검토</p>

연구개발 목표 및 내용	2차년도	<p>목표</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 제어 모듈 최적화 개발 2. 작업환경 인식 모듈 개발 3. 조향제어 모듈 및 환경인식모듈 성능평가 4. 플랫폼 자율주행을 위한 경로 생성 및 추종 알고리즘 개발 5. 작업부하 계측 및 경로 추종 오차 계측 시스템 구성 6. 위치-자세 인식모듈 시스템 개발 7. 위치-자세 인식모듈 성능시험 및 자율주행 트랙터 적용시험. 8. 모듈 통합 시스템 개발용 PCB,하우징 설계 및 제작 9. 농작업에 따른 트랙터 작업 안정성 분석 10. 경로생성 및 추종 알고리즘 모듈화 11. 경사지 환경에서 경로 추종 알고리즘 검증실험 12. 다중센서를 융합한 시스템 설계 <p>경제형 GPS 및 센서 정보 융합한 위치 추정 알고리즘 개발</p>
		<p>내용</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 조향제어를 위한 모터/유압식 조향 시스템 최적화설계 및 CAN프로토콜 정립, 인터페이스 개발 완료 2. 작업환경 인식 모듈 전장시스템 최적화 설계, 핵심모듈 자가진단 알고리즘 개발을 위한 DATA 수집 3. 조향제어 시스템 반응시간 평가, 작업환경인식을 및 인식 업데이트 속도 평가 4. 경로 추종 알고리즘의 안전성 향상 및 GUI 최적화 5. 작업부하에 따른 경로 추종성 정확도 분석을 위하여 작업부하 및 경로 추종 오차 계측 시스템 구축 6. 위치-자세 인식모듈을 4대분 제작하여 국제,대동, 동양 각 1대씩 제공하고 1대는 시험용으로 사용. IMU를 통한 자세 및 속도정보를 이용하여 GPS의 위치를 확인하고 보정하는 알고리즘을 적용. 7. 위치-자세 인식모듈 성능시험은 ISO 17123-8규격에 의한 정지위치 오차 측정시험을 통해 2차년도 목표값인 10cm미만을 만족하는 결과를 얻음. 트랙터 탑재 시험을 위해 위치-자세 인식모듈을 GPS신호 수신에 방해되지 않도록 트랙터 지붕에 탑재하여 트랙터와 GPS모듈간의 CAN통신 성능시험 및 평가를 진행함. 8. PCB회로 설계 및 제작, 핵심 모듈 I/O테스트 수행 및 모듈 하우징 설계 및 제작, 모듈간 통신 프로토콜 협의 및 신규개발 9. MBD기술 활용으로 작업 안정성 분석 수행. 시뮬레이션을 수행을 위한 조향 제어 모델을 구성. 10. 직교형 포장에서 C형 새머리 선회기반의 경로생성, 농작업 토양 슬립을 고려한 경로 추종 모듈개발 11. 시뮬레이션 환경에서 경로생성 및 추종 모듈 기초 검증 수행 12. 다양한 위치에서 측정 가능한 지그 설계 및 제작 <p>경제형 GPS 성능 테스트 및 다중 센서 융합 알고리즘 개발</p>

연구개발 목표 및 내용	3차년도	목표	<ol style="list-style-type: none"> 1. 조향제어 모듈 개선 개발 2. 작업환경 인식 모듈 개선 개발 3. 자율주행트랙터 시작품 개발 4. 자율주행을 위한 트랙터 제어 알고리즘개발 5. 플랫폼을 이용한 실차 성능 평가 6. 위치-자세 인식모듈 실증평가 및 최종 개선품 제작 7. 위치-자세 인식모듈 성능평가 및 공인평가시험 8. 통합모듈 상용화를 위한 양산 기술 개발 9. 동역학 모델을 이용한 제어 모델 성능평가 및 자율주행 농업기계의 성능 검정 방안 도출 10. 자율주행 경로생성 및 추종 개선 알고리즘 개발 및 모듈화 11. 자율주행 트랙터 경로생성 및 추종 알고리즘 현장 요인 및 신뢰성 성능평가 12. 자율주행 통합 시스템과 연동 가능한 모듈형 인터페이스 개발 및 고정밀 위치 인식개발
		내용	<ol style="list-style-type: none"> 1. 경사지에서의 제어 알고리즘 최적화를 위해서 자세 보정 알고리즘을 개발 2. 작업환경 인식 카메라-Lidar 융합 기능을 개발함. 3. 각 제조사별 시작품트랙터 개발함. 4. Robust Control 알고리즘을 추가 및 속도제어 알고리즘을 경로 추종 프로그램에 추가 개발하여 경로 추종시 슬립을 최소화 하였음 5. 직진 및 선회, 포장지 내 자율주행 오차와 미경작지를 시험하여 경로 생성시간 및 경로추종오차, 작업오차, 작업정확도 시험을 완료함. 6. 위치-자세 인식모듈 실증평가 및 최종 개선품 제작 트랙터에 탑재하여 직진, 평탄농지, 실제농지에서의 성능평가시험 함. 공인인증시험과 별도로 정량적 목표 항목의 자체 평가방법으로 RTK가 Fix 고정되어 안정화 된 이후 1시간동안 1분 간격으로 데이터를 수집하여 최대 측정위치 오차가 전체 평균값을 중심으로 2cm를 반경으로 원안에 위치하여야함. 위치-자세인식모듈의 RTK고정 방식을 DMB사용에서 LTE 통신으로 대체 7. 위치-자세 인식모듈 성능평가 및 공인평가시험 ISO 17123-8에 의거하여 농업기술실용화 재단에서 정지오차 2cm미만을 만족하기위한 인증시험을 진행하여 검정성적서 발급하였음.(정지오차1.1cm) 8. 통합모듈 양산화를 위한 내환경 테스트, 트랙터 통합 모듈 기능을 확인함. 9. 동역학 모델을 개발하기 위해 계측 시스템을 구성, 실증 데이터를 수집함. 수집 된 데이터를 기반으로 조향 제어 동역학 모델 시뮬레이션을 수행하였으며, RMS 분석을 통해 작업안정성 분석을 수행하였음. 10. 후진이 포함된 개선 회경 모델 제안 및 시뮬레이션 기초 검증 11. 직교형 농지에서 자율주행 모듈 현장 요인 및 신뢰성 평가를 수행 함. 12. 자율주행 통합 시스템과 연동 가능한 모듈형 인터페이스를 개발함. 다중의 GPS들의 위치 보정 알고리즘과 센서들을 이용한 위치 보정 알고리즘 개발

<p>연구개발성과</p>	<p>국내 작업 환경 및 지형을 고려하여 트랙터에 적합한 센서를 선정하고 센서 융합 최적화를 통해 영상인식 카메라, Lidar센서, 초음파센서를 사용하여 저비용 고효율의 경쟁력있는 작업 환경 인식모듈 개발하였다</p> <p>경제형 GPS에 고정밀 위치인식기술을 적용하여 고가의 정밀 GPS와 동등 수준의 기능을 확보하여 저가형의 자율주행 트랙터 개발을 위한 기반을 확보하였다.</p> <p>트랙터 자율주행에 관련된 핵심 모듈 및 기존 제어 모듈의 통신 프로토콜의 상이함으로 인한 문제점을 제거하고 추가적으로 고장에 대한 진단 내용의 전송도 가능하게하였다.</p> <p>본 연구를 통해서 자율주행 트랙터 제어 모델 성능평가를 수행할 수 있는 동역학 모델을 개발하였고, 관련 노하우 및 모델링 방안을 도출하였으며, 차후 모델 변화에 따라 새로운 모델링을 개발할 때도 적용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 성능검정 관련 문헌들을 수집하였으며, 본 연구의 결과물로 성능검정 방안을 제시하였다.</p> <p>트랙터생산업체 3社の 협력을 통해 농기계 자율주행 기술의 산업화에 기여하는 자율경운 경로생성 및 추종 모듈을 개발하였다.</p> <p>경로 생성 추종 모듈은 다수의 현장 요인평가를 통한 안정성 및 성능을 검증하여 실제적인 농작업 수행이 가능하며 선진사 수준의 경운 작업정확성 달성이 가능한 자율주행 기술을 확보하였다.</p>
<p>연구개발성과 활용계획 및 기대 효과</p>	<p>각 참여기업에서 개발한 자율주행 모듈 및 기술을 공유하여 사용가능하도록 통합시스템을 개발하여 자율주행 플랫폼을 국내 농기계 제조사가 공동으로 사용할 수 있도록 하여 국내에서 불필요한 중복 투자를 줄일 수 있게 되었다.</p> <p>자율주행, 작업에 적합한 주요 농작업 실증 시험을 통해 자율주행 성능시험 및 최적화 개발로 실사용 환경에 적합한 자율주행 트랙터가 개발되어 농업 종사자 인구감소에 대한 중요한 기술적 대안이 될 것으로 기대된다.</p> <p>향후 자율주행 트랙터가 발전함에 따라, 관련된 다양한 제품군이 파생될 것으로 예상되며, 이 제품들이 서로 다른 통신 프로토콜을 가지고 하나의 시스템으로 구성되어 트랙터에 장착될 때 프로트콜의 상이함으로 생기는 문제를 본 통합제어 모듈을 통해서 해결할 수 있을 것으로 기대한다.</p> <p>본 과제에 참여한 농기계 업체들과의 협업을 통해 자율주행 트랙터와 관련된 연구를 지속적으로 수행할 예정이며, 이에 따라 본 연구에서 개발된 동역학 모델이 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 조사하고 제시한 방안을 기반으로, 실용화재단과 차후 논의를 통해서 문제점을 찾아 수정방안을 도출할 수 있을 것으로 판단되며 이에 따라 국내 자율주행 농업기계의 상용화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.</p> <p>수도작 환경에서 전 영역 작업 경로 계획 기술 및 농지 환경 대응 지능형 경로 최적화 기술 그리고 주행 환경 대응 경로 탐색 기술 확보를 통한 데이터 기반의 디지털 농업 실현으로 기존의 경험 기반 영농기법보다 향상된 작업 효율 달성이 가능한 자율주행 트랙터 기술개발 기초 연구로써 활용가능하다.</p> <p>수도작 환경에 적용 가능한 경로 계획, 추종 제어, 작업기 제어기술 등의 자율주행 트랙터 시스템 제어와 센싱 기술의 원천 기술을 확보함으로써 자율주행 농기계 분야의 Fast follower로써 첨단기술 확보로 해외 선진사와의 격차 완화 및 국내 농업기계 기술 활성화를 유도하였다.</p> <p>수도작 포장 영농환경이 비슷한 국가 및 신시장 (동남아 등)에 자율주행 트랙터 기술 선진국 역량을 확보하였다.</p> <p>기술개발을 통하여 국내 농지 환경에 적합한 자율주행 기술을 확보하고, 해당 기술의 기술 이전 시, 농기계회사의 개발 역량 향상으로 인한 고품질 지능형 농기계 생산 및 유사 산업 확대 적용 가능하다.</p> <p>산업적 기술의 적용으로 보완 개발하여 선진사 제품 대비 동등 이상 성능을 확보하여 상용화 수준의 기술개발에 기초 연구로써 활용 가능하다.</p> <p>자율 농기계 원천기술 개발로 무인·자율농기계의 최적 작업을 위한 데이터를 생산하는 전방 산업 및 무인·자율농기계 시스템 제작에 요구되는 주요 구성품 시장을 창출하는 후방 산업을 견인할 수 있는 경제적 원동력을 제공가능하다.</p>
<p>연구개발성과의 비공개여부 및 사유</p>	

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 ·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
11		7										
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	트랙터		자율주행		자율작업		경로탐색		자가진단			
영문핵심어 (5개 이내)	Agricultural tractor		Autonomous drive		Autonomous operation		Path tracking		Self-diagnosis			

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	
1) 농업기계 시장 현황 -----	9
2) 국내외 기술 수준 및 시장 현황 -----	9
3) 연구개발 목표 및 내용 -----	10
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	
1) 1차년도 수행 결과 -----	11
2) 2차년도 수행 결과 -----	128
3) 3차년도 수행 결과 -----	291
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	
1) 연구수행 결과 -----	421
(1) 정성적 연구개발성과	
(2) 정량적 연구개발성과	
(3) 세부 정량적 연구개발성과	
(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항	
2) 목표 달성 수준 -----	430
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) -----	431
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 -----	432
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 -----	433

별첨 자료 (참고 문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 농업기계 시장 현황

현재 농촌인구의 고령화는 도시보다 훨씬 빠르게 진행되고 있고 농촌인구 중에서 65세 이상의 고령농가가 차지하는 비율이 급속도로 증가하고 있다.

농업기계분야에서는 농촌 인력의 고령화 및 여성화로 농촌 인력을 대체할 수 있는 지능형 농업기계의 필요성이 대두되고 있으며, 전 세계 농기계시장에서 기종별로 활용가치가 큰 농용트랙터는 시장규모가 갈수록 성장 할 것으로 전망하고 있다.

국내 농기계 수출 현황을 살펴보면 연간 농업기계 수출이 2015년 891백만불로 나타났으며, 트랙터의 수출은 556백만불로 농업기계 수출 현황 비중의 62.4%로 압도적으로 많은 것으로 나타났다.

농촌인구의 감소와 고령화로 농작업의 생산성을 향상시킬 수 있는 자동화 기술, 작업자를 대체할 수 있는 무인화, 지능화, 로봇 기술, 4차 산업시대에 주요한 기술인 자율주행에 대한 요구가 증가하고 반드시 필요한 기술로 부각되고 있다.

자율주행의 기술 단계는 트랙터 자동화 적용 범위에 따라 총 5개 Level로 분류되며 미국 등 선진국은 자율작업이 가능한 level 3~4 단계 도달하였으나, 국내는 level 1~2 단계로 기술격차가 많이 발생하는 실정이다.

국내 농업의 열악한 노동환경과 다양한 농업 환경 대비, 자율주행 연구가 상대적으로 미진하므로, 자율주행트랙터 기술개발 및 사업화를 통한 효과가 매우 클 것으로 예상되며, 첨단 정밀 농업 기술 개발을 통해 국내 농업기계 시장을 활성화시키며, 나아가 해외 현지에 적합한 시스템, 인프라 구축을 통해 국내 기술 홍보 및 수출 향상, 시장 선점 등의 높은 경제적 효과를 가져다 줄 것으로 예상된다.

2) 국내외 기술 수준 및 시장 현황

국내에서는 자율주행 트랙터의 상용화된 사례는 전무한 실정이며, 논문·특허 등 기초 연구 기반의 연구만 이루어졌으며, 국내 농기계 제조사에서 자율주행 트랙터를 과제로 진행하였으나 상용화하지는 않고 직진과 회전 자율주행이 가능한 Level2 수준의 자율주행 기능만 개발되었다.

지식재산권 현황은 현재까지 자율주행 트랙터에 관한 특허는 주로 해외 선진사에서 상용화 제품에 적용하기 위한 분석 연구가 일부 진행되었으나 국내 자율주행 트랙터에 관한 연구 사례는 미비하고, 국내 농업기계 자율주행 기술에 대한 표준화현황은 현재 전무하며 성능 시험 및 방법에 대한 표준화된 규격은 없는 실정이다.

해외 선진사는 자율주행시스템을 적용한 농업기계에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 미국의 John Deere는 반 자율주행 트랙터를 이미 전 세계에 판매하여 약 20만대 이상 가동하고 있음. 개발내용으로는 GPS 추적 모듈을 내부에 갖추고 있어 밭 전체의 씨앗 분포에 대한 정보 등을 고려해 루트를 설정한 후 자동으로 이동하는 등 고효율 농작업 실현이 가능하도록 지원함
일본 구보다는 유인 통제하에 무인 운전이 가능한 level 2단계의 제품을 개발하였음. 개발 내용으로는 트랙터가 영농 지원 시스템과 연계해 경작지의 외곽을 주행하고, GPS를 이용해 최적의 작업 경로를 계산해 작업을 하며, GPS를 사용해 위치를 파악하고 미리 지정된 범위내에서 자동으로 경작할 수 있는 무인 트랙터를 개발함

그 외에도 다수의 농기계 선진사에서 자율주행 기능에 다양한 추가기능을 갖춘 트랙터를 개발 완료하였다.

3) 연구개발 목표 및 내용

가. 최종목표

- ㉓ 자율주행 트랙터 적용을 위한 경제성과 범용성을 가진 핵심 모듈 개발
 - 위치인식 모듈 개발
 - 조향 제어 모듈 개발
 - 경로 생성 및 추종 시스템
 - 작업환경 인식 모듈 개발
- ㉔ 핵심모듈을 이용한 자율주행 구현을 위한 CAN통신 기반 통합 시스템 개발
- ㉕ 자율주행 핵심 모듈과 통합시스템을 적용한 자율주행 트랙터 상용화 개발

나. 단계별 목표

- ㉓ 1단계 : 자율주행 핵심 모듈 개발
 - 경제형 GPS를 사용한 선진사 제품 동등수준의 위치인식 모듈 개발
 - 선진 제품 도입 및 최적화한 조향 제어 모듈 개발
 - 국내 작업 환경 및 지형 등에 최적화된 경로 생성 및 추종 시스템 개발
 - 센서 융합 기술을 통한 작업환경 인식 시스템 기술 개발
- ㉔ 2단계 : 통합 시스템 개발
 - 국내 트랙터 업계 공용 사용 가능한 CAN 통신 기반 통합 시스템 개발
 - 이상 징후 및 고장 등을 진단할 수 있는 자가진단 시스템 개발
- ㉕ 3단계 : 자율주행 트랙터 상용화 및 실증
 - 자율주행 핵심모듈 및 통합시스템을 적용한 자율주행 트랙터 상용화 기술개발
 - 개발된 트랙터를 활용한 현장 실증 및 기술 보완

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 1차년도 수행 결과

가. 주관기관 (대동공업(주))

㉔ 조향 제어 모듈 개발

㉑ 선진사 제품 분석

㉒ 해외 선진사 조향 제어 KIT 사양 비교 분석

① 모터구동식

㉑ TRIMBLE 조향 제어 시스템 EZ-STEER KIT



< TRIMBLE 조향 제어 시스템 EZ-STEER KIT >

사양	Motor	Controller
크기	127×101×259mm	227×136×37mm
사용 온도	-20~60 °C	-20~60 °C
중량	4.1 Kg	0.55 Kg
방수 및 방진	IP 40	-
사용 전압	12~16V	12~16V
사용 전류	-	5A peak <2A average

< EZ-STEER KIT사양 조사 >

㉒ TOPCON 조향 제어 시스템 X25 KIT



< TOPCON 조향 제어 시스템 X25 KIT >

사양	콘솔	사양	조향	사양	수신기
크기	226×185 ×53mm	크기	380×380 ×210mm	크기	270×270 ×80mm
화면 사이즈	8.5인치 터치패널 화면	전압	12V	IMU	3축 가속도계 3축 자이로 디지털 컴퍼스
중량	2.0Kg	-	-	중량	2.4Kg
방수 및 방진	IP 67	-	-	방수 및 방진	IP 6K9K
사용 전압	9~36V	-	-	사용 전압	7~26V
인터페이스	RS232×4 CAN×4 USB×1 Ethernet×1 Rader×1	-	-	-	-

< X25 사양 조사 >

② 유압 구동식

㉠ 자동조향제어모듈 기능 분석

- 자동조향제어모듈은 기존 유압식 스티어링 시스템(파워스티어링유니트&스티어링 실린더)구조에서 주행조건에 대한 조향제어 알고리즘에 따라 자동으로 조향각을 제어 하는 기능이다. 작업차량의 다양한 주행조건에 따른 조향제어를 위해 제어밸브는 정밀제어가 가능한 전자비례제어밸브 또는 솔레노이드밸브로 구성되어있다.
- 자동조향제어모듈 구성시 스티어링 wheel 수동조작을 인식하는 방식은 스티어링 wheel에 별도의 Angle 센서를 부착하여 이를 인식하는 방식과 스티어링유니트의 로드센싱포트를 이용하여 작동압력으로 인식하는 방식이 있다.

구분		E社	D社
		EH-Steering Valve	EHI-Steering Valve
MAX. PRESSURE	P PORT	250 bar	250 bar
	T PORT	30 bar	25 bar
MAX. STEERING FLOW		23 lpm	20 lpm
PROPORTIONAL VALVE	SUPPLY VOLTAGE	12 VDC	12 VDC
	MAX. CURRENT	1.50 A	1.32 A
	COIL RESISTANCE	4.72 Ω	-
STEER REIEF VALVE SETTING PRESSURE		145 bar	155 bar
Deactivating the electrohydraulic steering type		유압식 Load Sensing valve 이용	전기식 Angle Sensor 이용

<자동조향제어밸브 사양 비교>

㉔ 국내작업 환경 분석을 통한 요구사항 도출

㉕ 주요 목표 농작업 및 작업 분포

- 100HP급 트랙터의 국내 주요 농작업은 쟁기 작업, 그레플 작업, 로더 작업, 로타베이터 작업, 트레일러 견인 작업 등이 있다.

쟁기 작업	그레플 작업	로더 작업
		
로타리 작업	운반 작업	
		

<100HP급 트랙터 국내 주요 농작업>

- 주요 농작업에 대한 작업 분포는 다음 표와 같다.

Kind of Works	Works(%)	항 목
Heavy Traction	20	트레일러 견인작업
Front End Loader	35	로더 작업, 그레플
Heavy Rotary Tillage	5	로터베이터 작업
Rotary Tillage	25	로터베이터 작업
Paddy Harrowing	5	쟁기
Others	10	베일러, 램핑, 배토기, 모어작업
합계	100	

<100HP급 트랙터 농작업 분포>

㉖ 조향 성능 시험

㉗ 조향 시험 방법

- 주요 농작업에 대하여 조향 성능을 시험한 결과 전방 로더에 최대 부하가 실리고 정차 상태에서 조향을 할 때 가장 큰 조향 토크가 요구된다. 따라서 조향 차륜에 최대 부하를 부착하고, 후륜에 밸런스 웨이트를 부착한 상태에서 엔진 회전수별 핸들 회전수 및 조향토크를 측정하였다. 조향 성능 시험 방법은 '75/321 EEC Steering Equipment'에 준하여 성능 시험을 실시하였다.
- 조향성능 시험 장비는 조향각과 조향토크를 측정할 수 있도록 제작한 조향력 시험기를 사용하였다. 차량 시험 조건은 첫째 차량 단독 상태와 두번째 전방 로더에 부하를 싣고 후방 3점부에 로터베이터를 장착한 상태로 시험을 진행하였다.



< 조향력 측정기 장착 사진 >

㉔ 조향 시험 결과

- 100HP 트랙터의 조향 시험 결과 밋션 오일 온도 60°C, 엔진 정격 회전수 2200rpm에서 시계방향 핸들회전수는 2.63회이고 조향토크는 0.1kgfm이다. 시계 반대방향 핸들 회전수는 2.62회이고 조향 토크는 0.2kgfm이다.

엔진 회전수		CW		CCW		온도
	rpm	핸들 회전수 (rev)	조향력 (kg.m)	핸들 회전수 (rev)	조향력 (kg.m)	°C
IDLE MAX	2350	2.67	0.10	2.66	0.20	60±5°C
정격 회전수	2200	2.63	0.10	2.62	0.20	
2000 rpm	2000	2.42	0.10	2.44	0.20	
IDLE MIN	975	2.38	0.10	2.36	0.20	

<운전자 조향 성능 시험 결과>

㉕ 조향 제어 요구 사항

- 트랙터 조향 성능 시험 결과 엔진 정격 회전수에서 조향 토크가 0.2kgfm이므로 자율주행 조향 제어 모듈은 운전자의 조향 토크보다 큰 값을 가져야한다. 따라서 조향 제어 모듈 요구 사항으로 조향 토크 목표 사양을 0.3kgfm이상으로 설정했다.

항 목	단위	운전자 조향 성능 측정값	자율주행 조향제어 모듈 목표 사양
조향 토크	kgfm	0.2	0.3이상

㉔ 국내 사업환경을 고려한 고정밀 제어 알고리즘 개발(훗카이도대학 공동연구)

㉕ 연구 배경

- ① 농촌 인구의 감소로 농기계의 대형화 및 자동화를 요구
- ② 다양한 농작업에서 높은 생산성 확보가 가능하고 편리한 기계 조작이 가능한 자동화 기술에 대한 요구가 급속히 증가
- ③ 경로 추종을 위한 위치 보정 기술이 자율주행의 성능, 안전성과 연관되는 매우 중요한 사항

㉖ 연구 동향

① 해외 연구 동향

㉗ Hameed 등(2012) - An object-oriented model for simulating agricultural in-field machinery activities

- 작업시간과 비용의 측면에서 작업효율성이 높은 경로 계획 방법을 연구
- 작업 시나리오의 평가를 위해 시뮬레이션 모델을 이용하여 핵심 운용 매개변수를 결정하는 것이 필수적임을 제시
- 시뮬레이션 모델을 사용해 CTF 시스템을 도입

㉘ Matsuo 등(2012) - Enhanced Adaptability of Tilling Robot

- 검출 및 자동 추적 측량 장치 XNAV를 이용하여 트랙터 제어부를 개조해 자율주행 트랙터를 개발
- 개발한 트랙터는 소프트웨어 제어기를 통해 경로 계획이 가능하였으며 로봇 트랙터를 제어할 수 있도록 연구

㉙ Gonzalez-de-Soto 등(2015) - Reducing fuel consumption in weed and pest control using robotic tractors

- 헨 위치 데이터에 따른 포장 기하정보 및 지형 높이 정보와 드론으로 찍은 잡초 위치정보를 이용하여 최소 연료 소비를 위한 최적경로 생성 알고리즘을 연구
- 잡초 위치정보를 따라 로봇 트랙터의 출발 위치와 주행 방향을 변경하여 연료소모량이 감소하는 것을 확인

㉚ Hameed 등(2016) - Side-to-side 3D coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths

- 쟁기작업 시 3D 환경으로 인해 발생하는 미작업 면적을 최소화하기 위한 경로 생성 방법을 연구
- 경로 계획 알고리즘은 디지털 고도 모델(DEM) 정보를 이용하여 경로를 생성

② 국내 연구 동향(대한민국)

㉛ 정선옥 등(1999) - 소구획 경지에서의 벼 수확량 지도 작성

- 무인트랙터 농작업 경로계획에서 직사각형의 포장에서 작업하는 최적 작업경로를 계획
- Brute-force 알고리즘의 계산횟수에 대한 개발된 알고리즘의 계산 횟수비로 평가

㉜ 서일환(2010) - 자율주행 트랙터 경운경로 생성시스템

- 경운경로를 생성하기 위하여 포장의 작업순서를 결정
- 왕복작업 경로를 C형, C-구획형, X형 및 R형 작업 4가지로 구분하여 개발
- 경로생성 프로그램에서 생성된 주행 경로를 검증하기 위하여 검증프로그램을 개발

㉟ 류명진 등(2013) - 모워 트랙터 자율주행 경로 생성을 위한 관행 작업 경로 분석

- 모워 트랙터를 인력으로 주행하면서 GPS 및 전자나침반 데이터를 계측하고 주행 경로 특성을 분석

- 포장 3곳에서 측정된 좌표 데이터와 조향각 등을 이용하여 포장에서 총 주행, 직선 주행, 선회 주행, 중첩 주행한 거리 및 시간을 분석

㊸ 한웅철(2013) - 자율경운 농용트랙터를 위한 경로생성 및 경로추종 기술 개발

- 자율경운 작업을 진행하기 위해 3가지 경운 작업 중 C형 작업경로의 수학적 모델 개발

- 실제 포장에서의 자율 주행 경운작업을 개발된 경로생성 알고리즘과 경로추종 알고리즘으로 구현한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발

㊹ 신범수(2016) - 무인 농작업기 작업경로 생성 알고리즘

- 전체 농경지 경작을 위한 최소 비용 경로를 구명하는 연구를 수행

- 직선 주행의 속도와 곡선 주행의 속도가 다른 경우 각 속도를 고려하여 시간을 산정하여 계산

㊺ 한웅철(2017) - 다변형 포장에서의 무인 트랙터 경운작업용 경로생성 및 강인 추종 제어기 개발

- 다양한 형상의 포장 내에서 경운작업을 수행하고 자동선회가 가능한 경로생성 알고리즘과 작업경로를 최적으로 추종하는 강인 조향제어기술을 개발

- 개발 기술을 실제 농용트랙터에 탑재하여 포장에서 숙련된 작업자가 수행한 결과와 비교 개발기술의 효용성을 평가

㉠ 연구 목적

① 직진과 선회 경로를 왕복 작업을 할 수 있는 다중 경로에 대한 연구 필요

② 수학적 모델 및 경로 알고리즘, 시뮬레이션 개발에 대한 연구에 대비하여 실제 포장 시험에 대한 연구가 필요

③ 선회 경로에 대한 작업 패턴 중 C 패턴 선회에 대한 수학적 모델에 대한 연구는 있으나 그 외의 패턴 선회 작업에 대해서는 연구가 필요

④ 포장 및 트랙터의 조건을 동일할 때의 R 패턴 선회 경운작업의 총 주행거리가 최소(서일환(2010))로 R 패턴 선회의 연구 필요

⑤ GPS와 IMU를 이용한 다중경로에 대한 자율주행트랙터의 포장시험 연구가 필요

㉡ 연구 플랫폼 및 내비게이션 센서

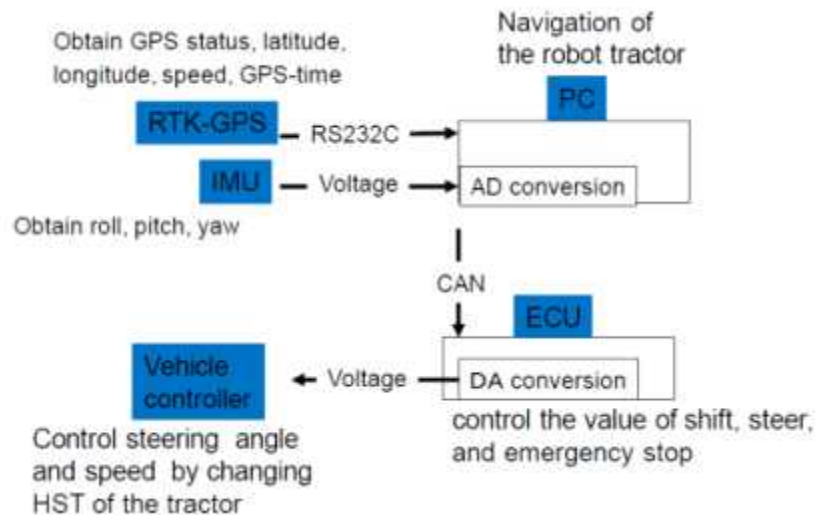
① 연구 모델 : Yanmar CT801 트랙터

Model		Specification
Model name	-	3,750
Dimensions	Overall length(mm)	3,750
	Overall width(mm)	1,950
	Overall height(mm)	2,635
	Ground clearance(mm)	380
Weight	(kg)	3,990
Engine	Model	4TNV98T
	Type	4-cycle Water-cooled diesel
	Output(kW(PS))	58.8(80)
	Displacement(cc)	3,318
	Fuel tank capacity(l)	150
Brake	-	Wet disk

< 트랙터의 제원 >

② 자율주행트랙터의 개략도

㉠ RTK-GPS와 IMU가 횡방향 오차와 주행 오차를 판단하기 위한 주행 센서로 사용, 자율주행 시스템 평가의 필수 사항(경로 알고리즘을 개발, 오차를 보정)



< 자율주행트랙터의 시스템 개략도 >

㉢ RTK-GPS의 안테나, 수신기

- 정확한 차량의 좌표를 얻기 위해서는 VRS(Virtual reference station)를 사용하여 오차범위를 ±2cm까지 보정
- Topcon 社の Legacy-E 사용



< RTK-GPS의 안테나와 수신기 >

㉔ IMU(Inertial measurement unit)

- 트랙터의 자세 정보와 roll, pitch, yaw 및 각속도 데이터를 수집
- Japan Aviation Electronics Ind., Ltd. 社の JCS-7401A
- roll, pitch angle은 45° 측정 가능하며, yaw angle은 $\pm 180^\circ$ 까지 측정 가능
- IMU 센서의 오차는 0.5 deg/hour



< IMU >

㉕ PC

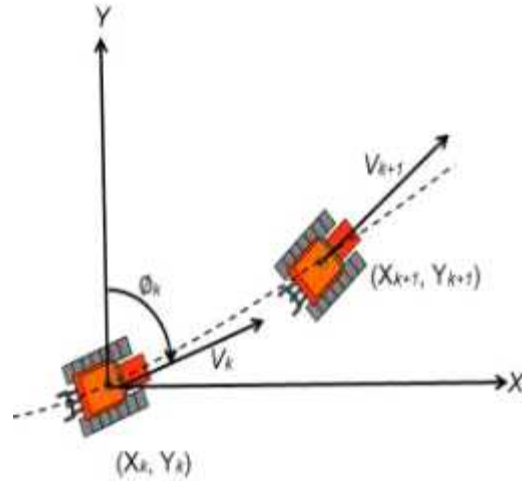
- 트랙터 내부에서 설치
- 개발된 알고리즘과 주행지도를 활용하여 자율주행 경로를 설정

㉖ ECU(Electrical control unit)

- 트랙터의 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꿔주기 위하여 사용
- CAN통신을 활용하여 PC와 통신
- 아날로그 신호를 차량의 액츄에이터에 전송
- 트랙터의 전/후진 주행시 조향각, 3점링크의 높이, 엔진 속도, PTO의 On/Off 제어

㉗ Sensor fusion

- ① 차량의 횡방향 오차를 얻기 위해 LMS(Least square method) 사용
- ② FTK-GPS와 IMU센서를 활용한 차량의 움직임을 다음의 그림과 같음



< RTK-GPS & IMU를 활용한 vehicle dynamics model >

③ 트랙터의 절대위치 (X_{k+1}, Y_{k+1}) 는 다음 식(1), (2)와 같이 구할 수 있음

$$X_{k+1} = X_k + \int_k^{k+1} V(t) \sin \phi(t) dt$$

$$\approx X_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\sin \phi_k + \sin \phi_{k+1}) \quad \text{식(1)}$$

$$Y_{k+1} = Y_k + \int_k^{k+1} V(t) \cos \phi(t) dt$$

$$\approx Y_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\cos \phi_k + \cos \phi_{k+1}) \quad \text{식(2)}$$

where :

X_{k+1}, Y_{k+1} = absolute position of the vehicle, m

V_k = travel speed, m/s

ϕ_k = absolute heading direction of the vehicle, deg

t = time, sec

④ 자율주행트랙터의 절대 주행 방향은 다음 식(3)와 같이 구할 수 있음

$$\phi_k = \phi_{IMU_k} + D_k \quad \text{식(3)}$$

Where :

ϕ_k = absolute heading direction of the vehicle, deg

ϕ_{IMU_k} = relative angle measured by the IMU, deg

D_k = correction value which compensates the drift error, deg

⑤ 트랙터의 위치 벡터는 다음 식(4), (5)와 구할 수 있음

$$e_{p_k} = \begin{pmatrix} X_{k+1} - X_k \\ Y_{k+1} - Y_k \end{pmatrix} \quad \text{식(4)}$$

$$e_{\phi_k} = \frac{V_k \Delta t}{2} \begin{pmatrix} \sin \phi_k + \sin \phi_{k+1} \\ \cos \phi_k + \cos \phi_{k+1} \end{pmatrix} \quad \text{식(5)}$$

Where :

ϕ_k = absolute heading direction of the vehicle, deg

⑥ Evaluation function to decide D_k 는 다음 식(6)을 이용하여 제한됨

$$I_k = \sum_{i=k-N}^k \|e_{p_{i-1}} - e_{\phi_{i-1}}\|^2 \quad \text{식(6)}$$

⑦ I_k 는 오차의 총합이기 때문에, 적절한 D_k 는 I_k 를 최소화하여 다음 식(7)와 같이 구할 수 있음

$$\frac{dI_k}{dD_k} = 0 \quad \text{식(7)}$$

Where :

N = number of navigation points

e_{p_k} = vector of the vehicle position sensor

e_{p_k} = vector of the vehicle position sensor and velocity sensor

⑧ 식(1), (6)을 이용하여 식(8)을 도출

$$I_k = \sum_{i=k-N}^k dX_i^2 + dY_i^2 + S_i^2 + C_i^2 - (dX_i S_i + dY_i C_i) \cos D_k + (-dX_i C_i + dY_i S_i) \sin D_k \quad \text{식(8)}$$

Where :

$$dX_i = X_i - X_{i-1} \quad \text{식(9)}$$

$$dY_i = Y_i - Y_{i-1} \quad \text{식(10)}$$

$$S_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\sin \phi_{IMU_i} + \sin \phi_{IMU_{i-1}}) \quad \text{식(11)}$$

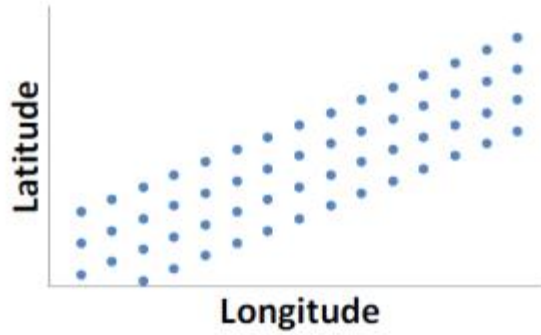
$$C_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\cos \phi_{IMU_i} + \cos \phi_{IMU_{i-1}}) \quad \text{식(12)}$$

⑨ 최종적으로, D_k 는 식(7), (8)을 이용하여 구할 수 있음

$$D_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=k-N}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=k-N}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) \quad (k > N)$$

$$D_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=0}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) \quad (k \leq N) \quad \text{식(13)}$$

Ⓜ 내비게이션 지도



< Navigation map >

- ① 위의 그림은 GIS에 의해 생성된 3차원 좌표 정보임
- ② 자율주행트랙터는 내비게이션 지도를 따라 작업 실시
- ③ 내비게이션 좌표는 식(14)와 같이 3차원 기하학적 Euclidean space E^3 로 정의 됨

$$\Omega = \omega_i | \omega_i \in E^3, 0 < i \leq N$$

$$\omega_i = (lat_i, lon_i, code_i) \quad \text{식(14)}$$

Where :

ω_i : Navigation points

N : The number of navigation points

lat_i, lon_i : Latitude and longitude of navigation points in WGS-84 coordinate

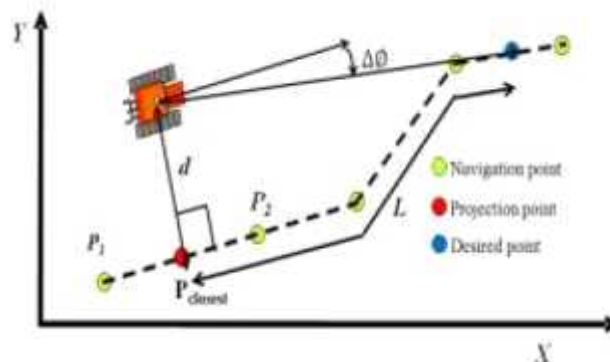
$code_i$: Codes of vehicle's jobs

⊗ 조향 컨트롤 알고리즘

- ① 자율주행트랙터는 조향각을 설정된 경로에 따라 변화함
- ② 조향각 δ 는 PID 제어를 기반으로 횡방향 오차 d 와 주행방향오차 $\Delta\phi$ 에 의해 식 (15)와 같이 같음

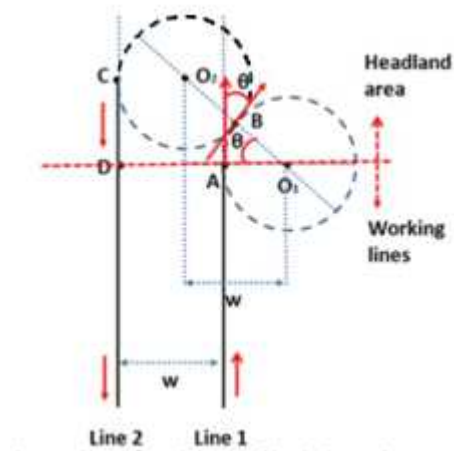
$$\delta = a_1 d + a_2 \Delta\phi \quad \text{식(15)}$$

- ③ 조향 컨트롤 알고리즘은 다음의 그림과 같음



< Steering control >

◎ R 패턴 선회



< R 패턴 선회의 개략도 >

- ① 자율주행트랙터가 직진 작업 경로 주행 후 다음 작업 경로로 진입하기 위해 R 패턴의 선회 방법 사용
- ② 선회 구간에서 자율주행트랙터는 일정한 반경으로 진행하기 때문에 토양에 대한 영향은 일정
- ③ 트랙터 진행경로는 A→B→C→D순으로 주행
- ④ θ 는 식(16)과 구할 수 있음

$$\theta = \cos^{-1}(w/2 * r) \quad \text{식(16)}$$

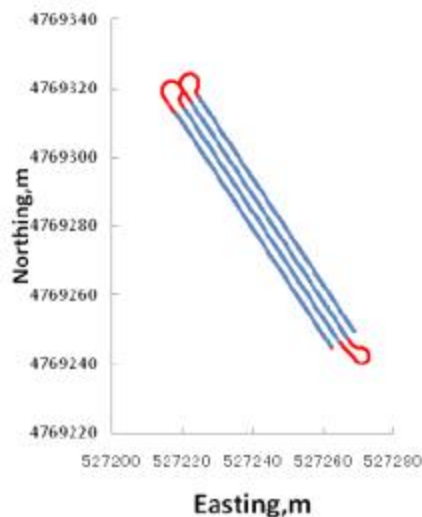
Where :

θ : turning angle from point-A to point-B

w : width between two working lines

r : turning radius

⊗ 자율 주행 시험



< 작업 경로 >

- ① 자율 주행 시험은 단일경로추정과 다중경로추정으로 나누어 실시
- ② 단일경로추정 테스트는 노지에서의 조향제어의 정확도를 시험하기 위해 실시

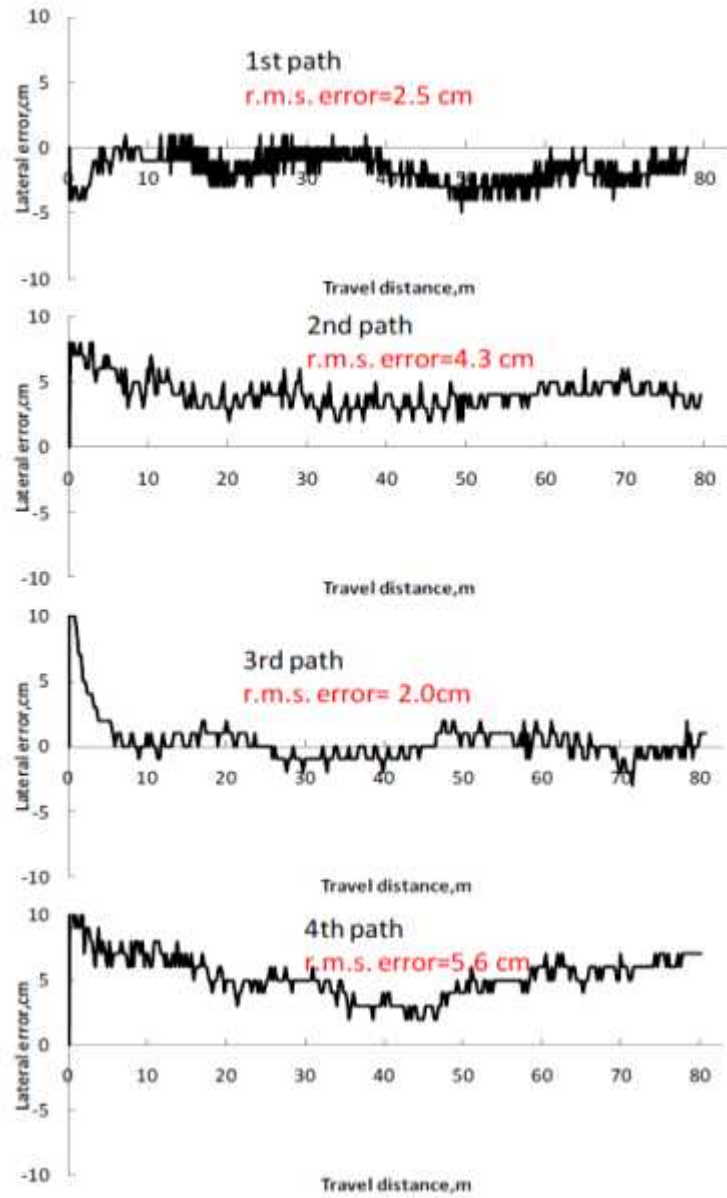
- ③ 알고리즘이 적용된 자율주행트랙터는 위의 그림과 같은 경로를 각기 다른 속도로 주행
- ④ 속도에 따라 결과값이 달라짐
- ⑤ 각기 다른 속도에서 진행방향과 횡방향 오차를 이용하여 정확도를 판단
- ⑥ 다중경로는 4개의 경로를 GIS맵 기반으로 하여 생성
- ⑦ 선회구간에서 트랙터는 위의 그림과 같이 R 패턴 선회를 실시
- ⑧ 직선구간에서는 약 1 m/s의 속도로 주행하였고, 선회구간에서는 약 0.4 m/s의 속도로 주행
- ⑨ 직선구간에 진입했을 때 주행속도 가속, 3점히치 하강, PTO 회전 실시
- ⑩ 선회구간에 진입했을 때 주행속도 감속, 3점히치 상승, PTO 정지 실시

㉞ 시험 결과

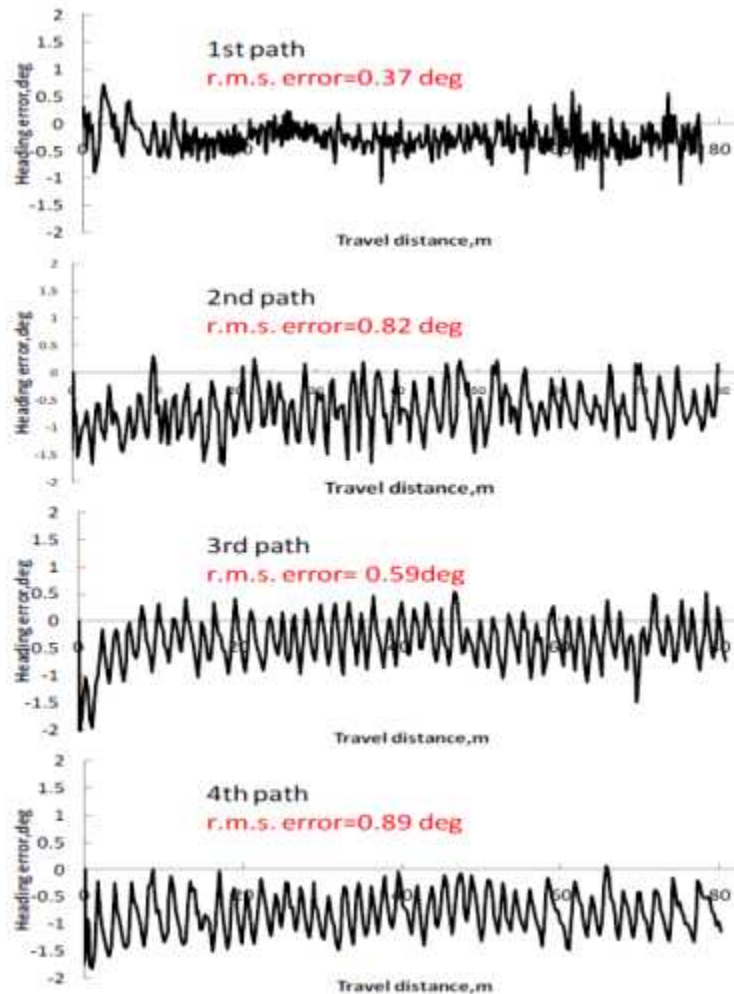
Speed (m/s)	RMS lateral error (mm)	RMS heading error (deg)
0.6	10	0.24
0.9	18	0.47
1.3	29	0.76
1.7	22.3	0.63
2	18	0.54

< 직진 경로의 정확성 >

- ① 위 표와 같이 각기 다른 속도에서 RMS 횡방향 오차와 주행방향 오차 시험을 실시
- ② 주행 및 작업 방법
 - ㉠ 자율주행트랙터는 노지에서 설정된 경로를 따라 주행
 - ㉡ 직선구간에서는 작업 실시
 - ㉢ 선회구간에서는 알고리즘에 따라 R 패턴 선회를 실시
- ③ 횡방향 오차는 약 1~3 cm, 주행방향 오차는 1 deg 이하로 나타남
- ④ R 패턴 선회 후 4~10 cm 오차범위 이내로 다음 경로에 진입
- ⑤ 각 경로의 시작점에서의 횡방향 오차는 경로를 점차 주행하면서 감소하여 수렴
- ⑥ 트랙터는 2 m/s 이하에서는 충분히 안전하고 정확한 자율주행으로 판단됨



< 횡방향 오차 >



< 주행방향 오차 >

㉞ 결론

- ① 자율주행트랙터는 제어시스템을 이용하여 설정된 경로로 주행
- ② 경로 설정은 GIS 기반으로 개발
- ③ 조향 제어 알고리즘과 R 패턴 선회 알고리즘을 개발 및 시험
- ④ 직진구간에서는 트랙터가 0.6~2 m/s로 주행하였을 때, 약 1~3 cm의 횡방향 오차 범위를 나타내고, 주행방향 오차는 1 deg 이하의 값을 나타냄
- ⑤ 다중경로 작업시 선회구간에서 R 패턴 선회를 수행하면서 주행속도, 조향각, PTO, 3점히치 등을 제어하면서 작업을 수행
- ⑥ 각 경로의 시작점에서의 횡방향 오차는 경로를 점차 주행하면서 감소하여 수렴
- ⑦ 결과값들에 의해 자율주행트랙터는 2 m/s 이하의 속도에서는 충분히 작업이 가능하다고 판단됨
- ⑧ 경로생성 및 알고리즘 개발하여 포장 시험 결과 자율주행트랙터는 R 패턴에 대하여 본 연구에서 개발한 알고리즘으로 안정적이며, 오차 범위가 작은 농작업이 가능함

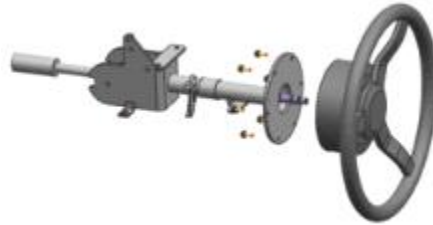
⑩ 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장/유압 시스템 설계

㉠ 모터 구동방식 장착부 레이아웃 설계 및 사양 검토

① 조향제어모듈 탑재를 위한 스티어링 조합 설계 및 개발

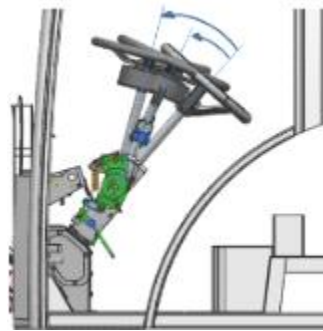
- 모터 구동방식 조향제어 모듈은 조향 핸들 위치의 스티어링 칼럼 파이프에 플랜

지형 브라켓으로 모터 하면을 견고히 조립하고, 모터측 구동부와 트랙터 조향축이 연결되어 자율주행 제어에 의한 모터의 회전이 트랙터 조향축으로 전달 되도록 하였다.



<모터와 스티어링칼럼 조립 모습>

또한 자율주행 시 운전자가 실수로 핸들을 건드림으로써 직선 농작업 경로가 흔들리는 문제를 방지하기 위하여 핸들의 틸팅각도를 증대시켜 운전자로부터 조향핸들까지의 거리를 증대시켜 자율주행 안정성을 확보하였다.



<스티어링칼럼 틸팅각도 증대 구조>

- 스티어링조합은 상부 칼럼과 하부 고정 브라켓으로 구성되고 두 부품이 연결되는 힌지축에서 각도조절이 되는 틸팅구조를 적용하였으며, 틸팅레버를 발로 밟은 상태에서 핸들을 앞뒤 방향으로 밀고 당기면서 핸들의 위치를 조정 가능하다.

조향축에는 유니버설조인트를 적용하여 핸들칼럼의 각도가 변하여도 조향력이 원활하게 전달되도록 하였다.

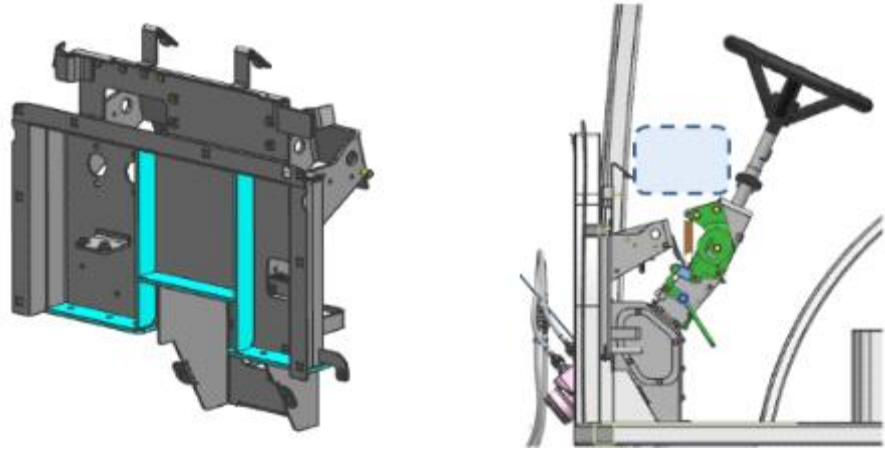


<스티어링칼럼 상, 고정브라켓 설계 형상>

② 캐빈에 스티어링조합을 탑재하기 위한 계기판 프레임 설계 및 개발

- 조향제어모듈 탑재에 의한 칼럼 부 중량증대 및 진동에 의한 조향모듈 오작동 방지를 위하여 스티어링조합을 캐빈프레임에 견고히 고정할 수 있는 구조의 계기판 프레임을 설계하였다.

또한 스티어링조합의 틸팅 각도가 증가됨에 따라 데시보드 상부를 콤팩트화하여 틸팅 공간을 확보하였다.



<계기판 프레임 강도보강 설계 형상> <틸팅 공간 확보 설계 형상>



<조향제어 차량 레이아웃 배치>

㉔ 유압 구동식 조향제어 시스템 설계 및 사양 검토

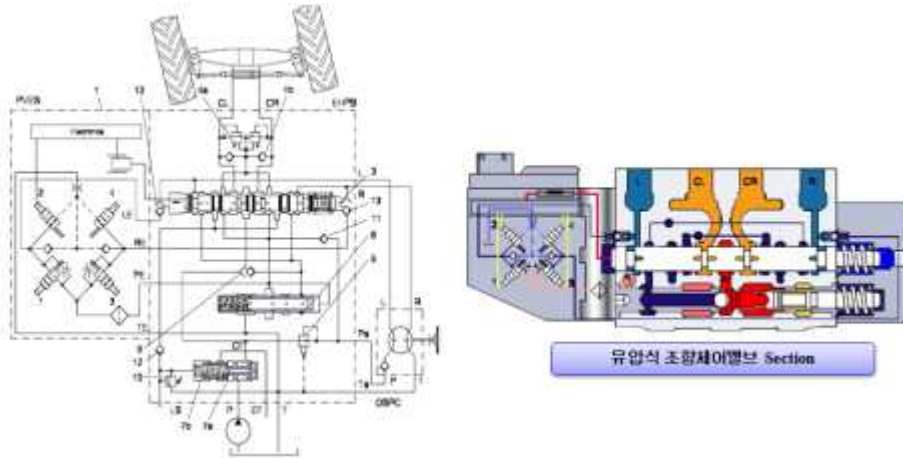
① 순환 및 조향 시스템 사양 검토

- 현재 시장에 보급되어 있는 100hp급 트랙터의 조향시스템에 필요한 정격유량은 약 20 lpm ~ 40 lpm 정도이며, 다양한 작업환경에서 작업기제어밸브 구동을 위해 사용되는 유량은 55~65lpm 정도이다. 원활한 조향 및 작업 성능 확보를 위해 대용량 유압펌프를 활용한 조향라인에 45lpm 이상, 작업기라인 70lpm 이상의 유량을 사용할 수 있도록 사양 선정이 필요하다.
- 고속 주행시 직진성 향상을 위해 Load-Reaction 타입의 파워스티어링 유닛 선정이 필요하다.
- 동일한 핸들 회전수 및 조향력 증대를 위해 양로드 복동실린더 타입의 조향실린더 선정이 필요하다.

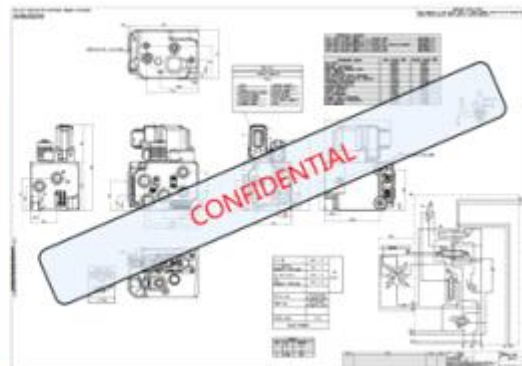
② 조향제어밸브 사양검토 및 선정

- 자율주행 트랙터에 사용되는 유압 구동식 자동조향모듈은 핸들을 조작하여 구동하는 기존 방식의 파워스티어링유닛과 조향제어 알고리즘에 따라 자동으로 좌/우 조향각을 조정하는 방식을 구현하는 조향제어밸브로 구성된다.
- 파워스티어링유닛은 조향성능 및 핸들조작성 등을 고려하여 용량이 120 cc/rev 이상의 Open center Type 파워스티어링유닛을 선정하였다.
- 조향제어밸브는 파워스티어링 유닛과 동일 유로에 연결된 사양을 선정하였으며, 정격유량은 16~24 l/min, 시스템압력은 145~150 bar(@25 l/min)로 선정하였

다.



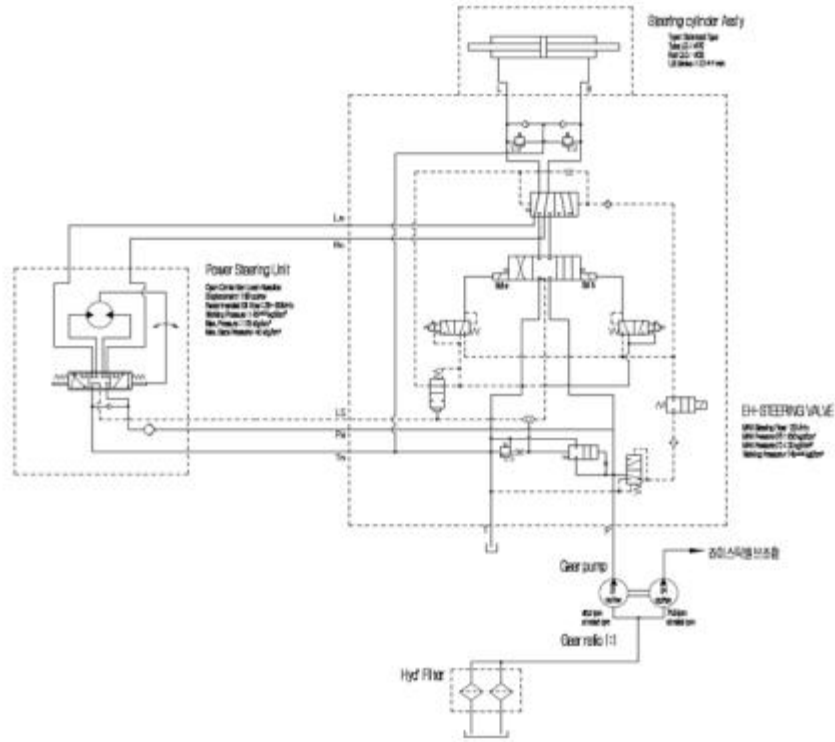
<유압식 자동조향제어시스템 개략도>



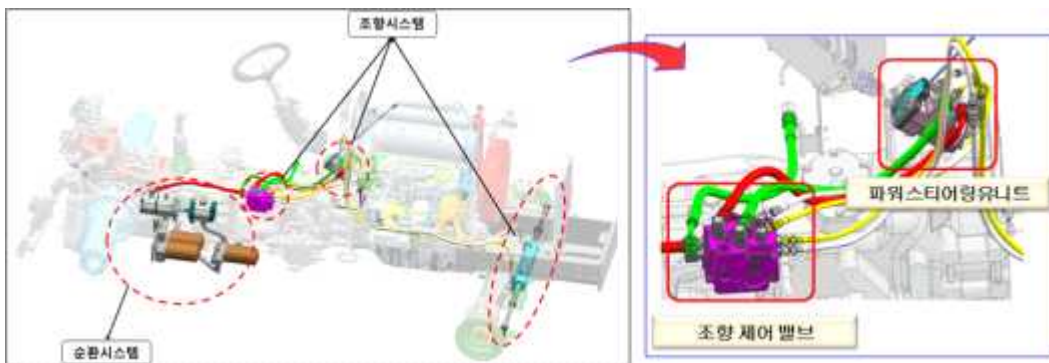
<선진사 조향제어밸브 (D社)>

③ 조향제어 시스템 Layout 설계

- 자동조향제어밸브를 포함한 유압회로를 설계하였고, 이를 바탕으로 순환 및 조향 시스템 layout을 설계 하였다.



<유압식 자동조향제어시스템 유압회로도>



<유압식 자동조향제어시스템 Layout>

㉔ 조향 제어 전장시스템 설계 및 사양 검토

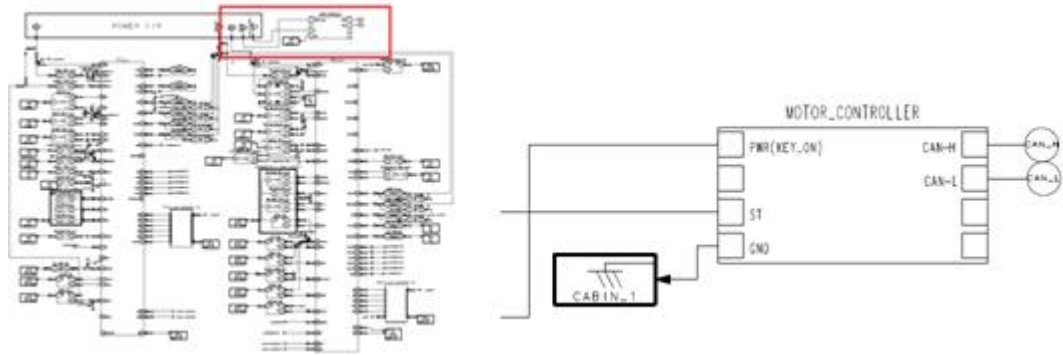
① 조향 제어 모듈 전원단 및 신호 전달 회로 설계

㉑ 모터 구동 방식 전원단 및 신호 전달 회로 설계

- 모터 구동 방식 신호 전달 회로

컨트롤러 각각의 핀 중 전원단은 배터리 전원, 컨트롤러 접지, KEY-ON 전원으로 차량 전체 회로에 연결하였고 조향 모듈의 데이터 시트를 기반으로 배터리 전원과 KEY-ON 전원은 각각 10A의 퓨즈를 사용하여 회로를 보호 할 수 있도록 설계하였다. 그리고 신호전달 회로는 모두 CAN 통신에 의한 신호

전달로 캔라인은 차량 전체 CAN라인에 연결하였고 노이즈 방지를 위하여 트위스트 배선을 사용하였다.



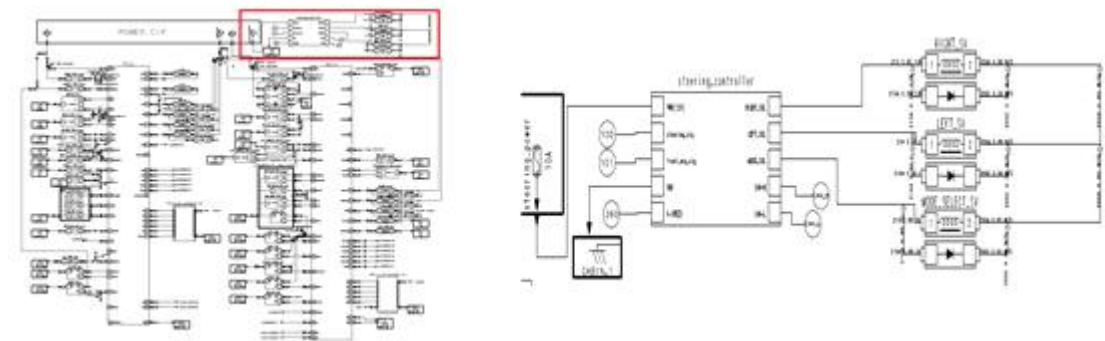
< 모터 구동 방식 회로도 >

⑥ 유압 구동식 전원단 및 신호 전달 회로 설계

- 유압 구동 방식 신호 전달 회로

유압 구동식 컨트롤러 각각의 핀 중 전원단은 KEY-ON, 밸브측 전원, 컨트롤러 접지로 차량 전체 회로에 연결하였고, 전원단 보호를 위하여 KEY-ON 전원 10A, 밸브측 전원 10A의 퓨즈를 사용하여 회로를 보호 할 수 있도록 설계하였다. RIGHT-SOLENOID, LEFT-SOLENOID, MODE-SELECT SOLENOID는 역기전력을 방지하기 위하여 다이오드를 추가하여 연기전력에 의한 솔레노이드의 이상 동작을 방지하도록 설계하였다.

또한 CAN 라인은 차량 CAN라인에 연결하였고 노이즈 방지를 위하여 트위스트 배선을 사용하였다.



< 유압 구동 방식 회로도 >

② 전원분배 및 접지 위치를 고려한 전체 시스템 회로 구성 설계

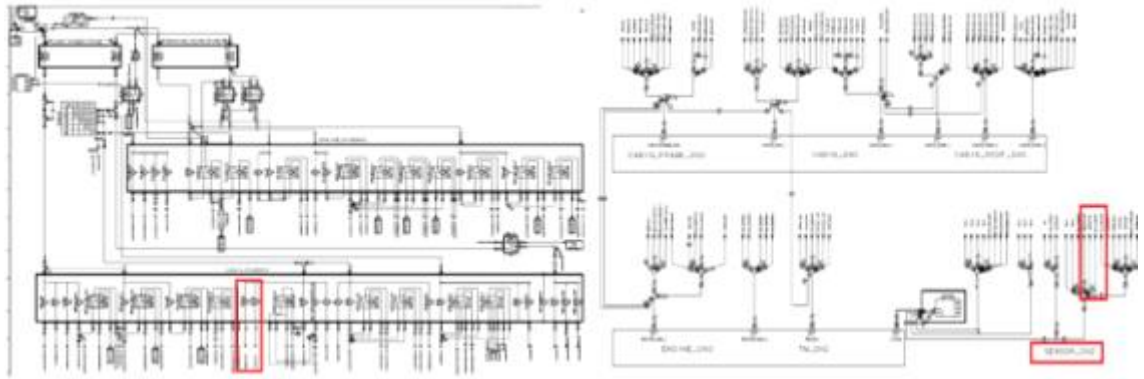
- 전원(POWER) 분배 회로

선행으로 부하 분석 및 선정된 자료를 바탕으로 전원부를 설계한다. 모터방식의 경우 B+, KEY ON 전원을 부하분석, 유압 방식의 경우 KEY ON 전원을 부하분석 을 통해 배터리나 교류발전기에서 나오는 전원에 대해 각 시스템 및 서브시스템별로 나열하고 시스템 보호를 위해 결정된 전선, 퓨즈, 릴레이 종류 및 용량에 맞는 컴포넌트들을 배치하고 서로 전선으로 연결한다. 각 시스템별로 필요 용도에 따라 이그니션(시동)시위치의 적절한 전원단(KEY ON, ACC)으로 분배한다. 이 때 전장전문설계툴인 ZUKEN CR-5000 Cabling Designer를 이용하였다. 대형트랙터에서는 전체적인 시스템의 크기가 크므로 각 회로별(전원, 접지, 컨트롤러)로 별도로 작성을 한다.

- 접지(GND) 회로

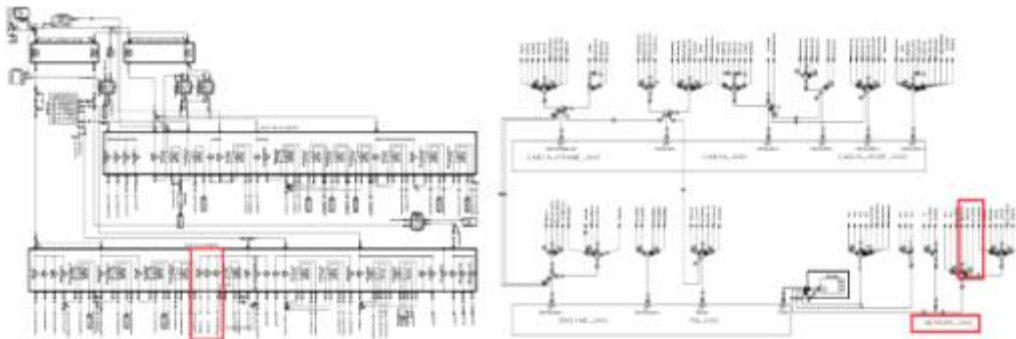
전원 회로도 와 똑같은 방식으로 각 시스템 및 서브시스템 별로 접지부를 나누었고 대략적인 접지 위치별로 각각 접지를 두었으며 서로 간에도 접지를 연결함으로써 전체적인 부하를 분산시키며 각 배선의 접지부가 단선(OPEN)되더라도 다른 배선들의 접지가 연결되어 있으므로 정상적인 동작을 하게끔 설계를 하였다. 그리고 각 컨트롤러의 민감한 센서부들은 별도로 접지(SENSOR_GND)를 두고 가장 전압 강하가 적게 일어나는 배터리(-) 단자로 직결을 하여 이상 동작을 하지 않게 설계 하였다.

① 모터 구동 방식 전체 시스템 회로 구성 설계



< 모터 구동 방식 전원 및 접지 회로도 >

② 유압 구동식 전체 시스템 회로 구성 설계



< 유압 구동 방식 전원 및 접지 회로도 >

③ 조향 제어 모듈 설계

유압 밸브의 제어를 통해 원활한 조향을 구현하기 위한 제어기는 Hardware와 Software 개발로 나누어진다.

① Hardware 개발

유압밸브를 포함하는 Actuator 및 센서의 특성(PWM 제어 주파수 및 통전 전류 등)을 고려하여 MCU 및 비례제어용 FET소자 선정을 하여야 하며 장시간 사용에 따른 소자의 발열에 대한 대책을 검토하였다.

항목	Spec.
정격전압(V)	DC 12V
동작전압범위(V)	8 ~ 16V
작동온도범위(°C)	-30 ~ 85°C
암전류	Max 4 mA

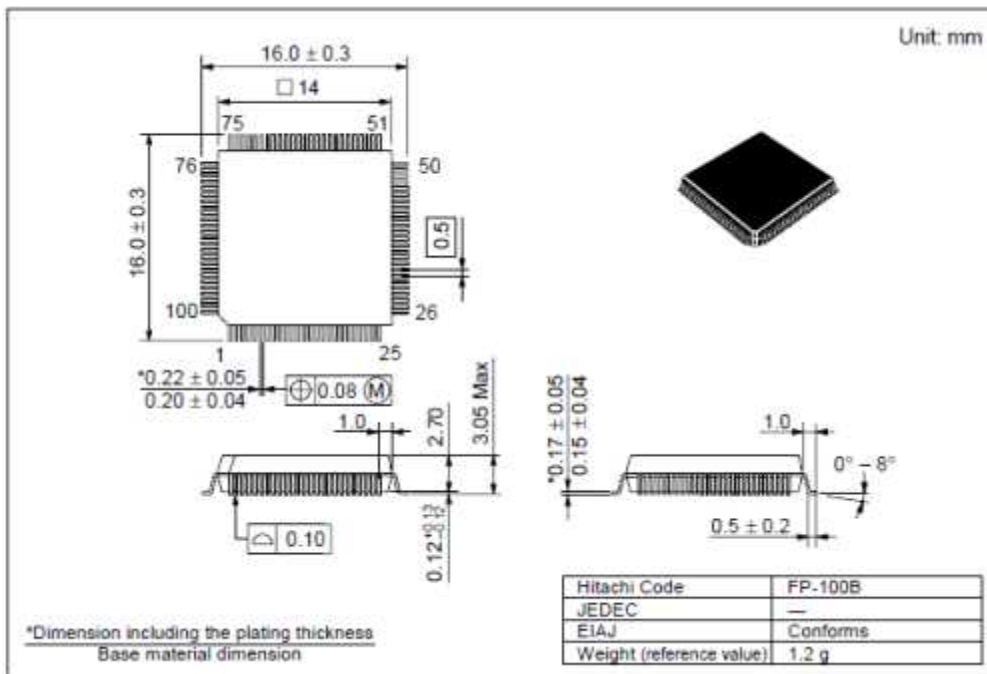
항목	부하
Solenoid 1	Max 2.0A
Solenoid 2	Max 2.0A
Solenoid 3	Max 2.0A
계기판 Pilot lamp	Max 0.3A

< 전기적 특성 및 Actuator별 부하 특성 >

- . MCU 및 커넥터 사양

조향 제어하기 위한 제어기의 MCU는 Hitachi사 H8S26262FA(J-ver.)을 선정하였으며, 본 사양은 사용 환경 및 밸브의 동작 주파수 및 센서 사양을 고려하여 MCU 사양을 결정하였다.

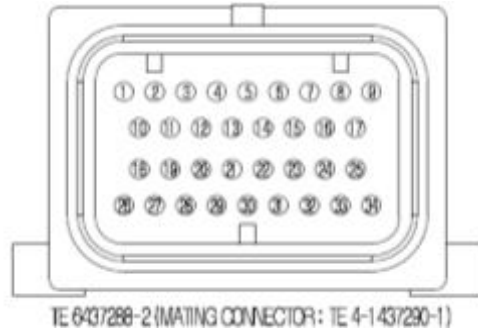
- General-register machine
 - . Sixteen 16-bit general registers
- High-speed operation suitable for realtime control
 - . Maximum operating frequency: 20 MHz
 - . High-speed arithmetic operations
- 16-Mbyte address space
 - . Program: 16 Mbytes
 - . Data: 16 Mbytes (4 Gbytes architecturally)
- CAN bus
- 16 A/D converter



< Hitachi H8S2626 외관 >

일반적인 농업용 트랙터의 물과 먼지에 노출되는 사용환경을 고려하여 IP66 등급 이상의 커넥터를 고려하였으며, Tyco사 제품을 선정하였다.

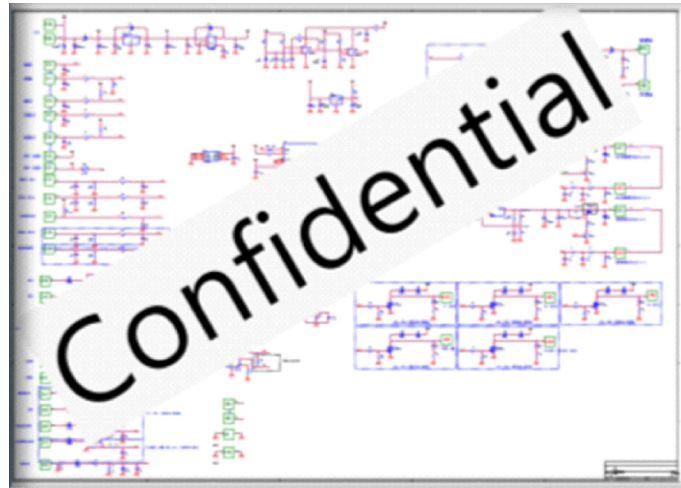
No.	Function	Input	Output	HBS 2626 IC		remarks
				PIN NO	PORT	
1	FWF 단자			67	F W F	
2	TXD2 단자			47	TXD2	
3	RES 단자			60	RES	
4	주파수 입력	○		2	TIOCA1	SUB 2626 IC
5	센서 입력	○		79	ANI	PULL UP R
6	5V 출력 (FLASH)		○	26	PD6	
7	밸브 출력(+)		○			
8	GND					
9	MD2 단자 (FLASH)			56	MD2	
10	RXD2 단자 (FLASH)			48	RXD2	
11	전류제어 SOL 2 (+)		○	81	AN3	PULL DOWN
12	전류제어 SOL 2 (-)	○		80	AN2	PULL DOWN
13	전류제어 SOL 3 (+)		○			
14	전류제어 SOL 3 (-)	○		27	PD7	
15	주파수 입력(SPARE)	○		38	TIOCB3	
16	센서 입력(SPARE)	○				
17	3V 입력 (-)	○		68	PF7	
18	솔레노이드(SPARE)		○	25	PD5	
19	12V 전원(B+)					
20	12V 전원(BN)					
21	5V 출력 (센서)		○			
22	전류제어 SOL 1 (+)		○	36	TIOCA3	
23	전류제어 SOL 1 (-)	○		83	AN5	
24	GND					
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						



< 커넥터 선정 및 PIN MAP >

⑥ PCB 및 회로 설계

전체 시스템의 출력은 3개의 비례제어 솔레노이드 밸브로 구성되며, 입력은 2개의 아날로그 센서 입력, 1개의 카운터입력 그리고 1개의 스위치 입력으로 구성된다. 통신 사양은 CAN 통신 및 RS232 통신이 가능하도록 시스템을 구성하였다

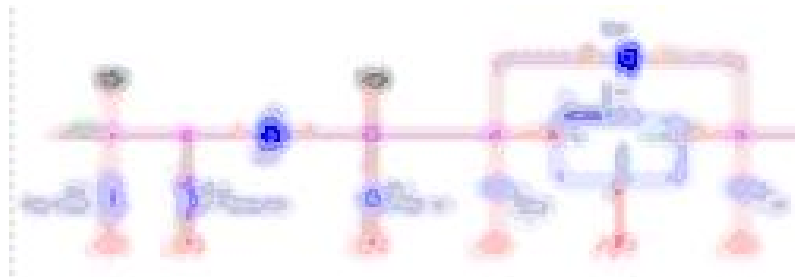


< 조향 제어기 내부 회로도 >

● 전원 공급 회로

- 12V 회로

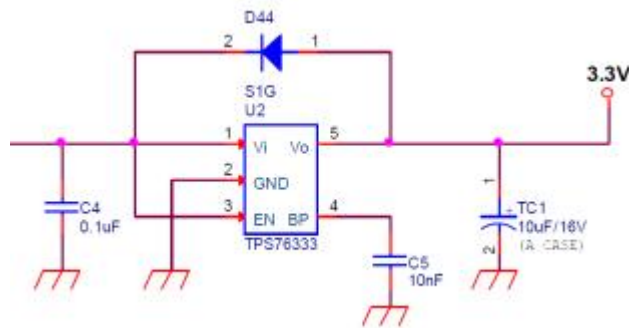
서지 입력 전원에 대한 보호 대책으로 바리스터(CVA90A270M)를 적용하였으며, 역접속 방지를 위해 다이오드를 추가하였다. 시스템 전압인 5V로 전압 변경을 위한 정전압 레귤레이터는 LOW DROPOUT 사양인 TI社 LM2940T 사양을 적용하였다.



< 12V 회로 >

- 5V 회로

5V 입력 전원을 받아 MCU(HITACHI社 H8S 26262) 동작 전압인 3.3V로 변환하기 위해 Texas Instruments社 150mA Low Dropout 레귤레이터 TPS76333 사양을 적용하였다.

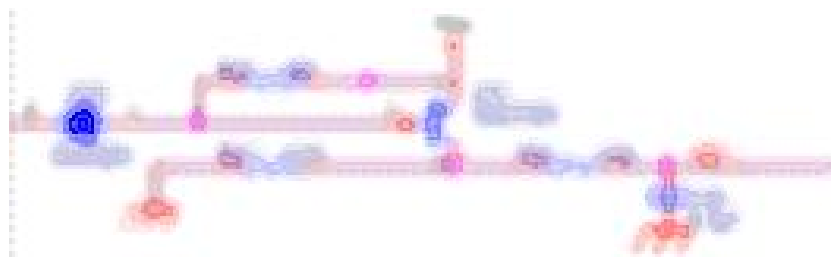


< 5V 입력 회로 >

● 입력 회로

- control 회로

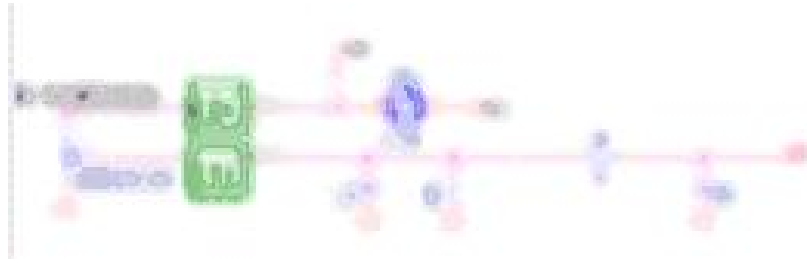
외부 연결 스위치는 Ground 회로가 되도록 시스템을 구성하고 Tr은 내부 저항이 있는 타입으로 선정하여 소손을 방지하도록 구성하였다.



<- control 회로 >

- Analogue input 회로

통상 Analogue 입력 회로는 5V전원을 사용하며, 이 전원은 콘트롤러 내부의 정전압레귤레이터를 통해 발생된다. 콘트롤러 내부의 전원단이 외부로 연결되어야 하므로 주의해서 관리되어야한다. 5V 전원단에 PTC 퓨즈를 추가하여 외부에서 쇼트가 발생하여도 콘트롤러 내부의 회로에 영향을 주지 않도록 보호 회로를 추가하였다.

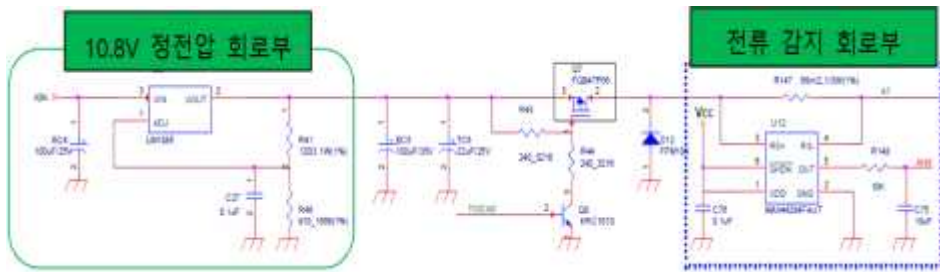


< Analogue input 회로 >

● 출력 회로

- 비례 솔레노이드 구동 회로

비례제어용 솔레노이드 구동 회로를 총 8 Port로 구성하였으며, Slip제어를 수행하는 고속 및 저속 솔레노이드 Port는 전류 Feedback제어를 수행하기 위해 전류 감지회로를 추가하였다. 나머지 회로는 전류 감지회로를 삭제하였다. 컨트롤러 내부 12V 전원을 이용해서 10.8V 정전압 레귤레이터(녹색 사각형)를 거쳐 FET구동 회로로 구성하였다. FET사양은 FAIRCHILD사 FQB47P06 부품으로 60V P-Channel MOSFET이며, 발열을 최소화하기 위해 RDS(ON) 저항을 0.026Ω으로 결정하였다. 그리고 Feedback제어를 위해 전류 감지회로를 별도로 구성하였다.



< 비례 솔레노이드 구동 회로 >

- On/Off 솔레노이드 구동 회로

향후 확장성을 고려하여 Spare 솔레노이드 구동을 위한 회로로 일반적인 On / Off를 수행하는 회로로 구성하였다. 전류 제어를 수행하기 위한 MOSFET사양은 내부 발열과 서지에 의한 부품 소손을 방지하기 위해 RDS(ON) 저항과 VDS 전압을 고려하여 International Rectifier사의 IRFZ44ES 사양을 선정하였다.

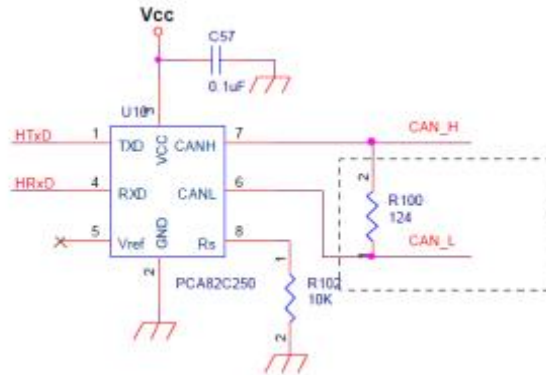


< On/Off 솔레노이드 구동 회로 >

● 통신 회로

- CAN 통신 회로

CAN통신을 위해 PCA82C250 소자를 사용하였으며, 통신 속도는 250kbps이며 CAN-H, CAN-L 2개의 회로로 구성된다.



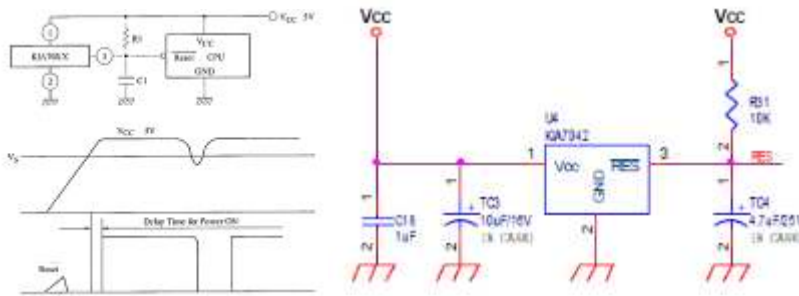
< CAN 통신 회로 >

● Reset 회로

- Reset 회로

Reset IC는 KIA7042를 사용하였으며, 리셋 회로에서 저항 R과 콘덴서 C의 정전용량은 콘덴서에 대한 충전시간을 좌우하여 결과적으로 리셋 시간을 결정한다. 이것은 RC 직렬회로이므로 여기에서의 전압방정식은 콘덴서의 충전전압 즉 다음단의 입력전압 V_{in} 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

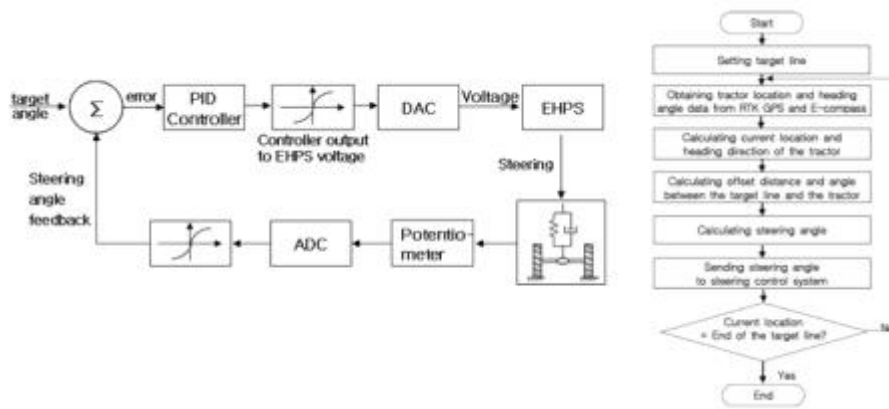
$$V_{in}(t) = 5(1 - e^{-t/RC})$$



< Reset 회로 >

© Software 개발

조향제어기는 조향각 계산 알고리즘에서 계산된 조향각에 대한 제어오차를 최소화하기 위해 비례제어밸브를 PID제어기를 통해서 제어를 수행하도록 한다. GNSS 및 IMU로부터 제공된 현재 위치 정보를 기준으로 목표 위치정보와의 차이를 최소화하기 위해 트랙터의 전륜축에 부착된 전륜각센서로부터 Feedback 된 정보를 이용해서 최종 비례제어밸브(EHPS)를 제어한다. 알고리즘 연구가 진행 중이며 2차년도 실차제작을 통해 실차 검증 시험을 진행할 예정이다.



< 알고리즘 >

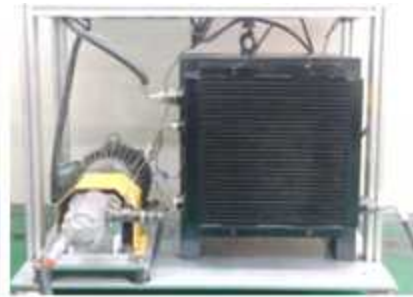
㉔ 시제품 제작 및 시험

㉔ 선진사 제품 성능시험을 위한 지그 제작

- 조향제어밸브 성능시험을 위해 스티어링실린더를 포함한 앞차축조합과 앞차축 프레임조합을 지지할 수 있는 앞차축 조향모듈 지그를 제작하였고, 오일쿨러를 포함한 유압순환 Bench를 통해 조향제어밸브에 유압오일을 공급한다.
- 앞차축 모듈조합 장착 후 조향제어밸브 성능시험 예정이다.
- 앞차축조합 및 앞차축프레임조합 : '18.12.13(限) 입고예정



앞차축 조향모듈 지그



유압순환 Bench

<조향제어시스템 지그>

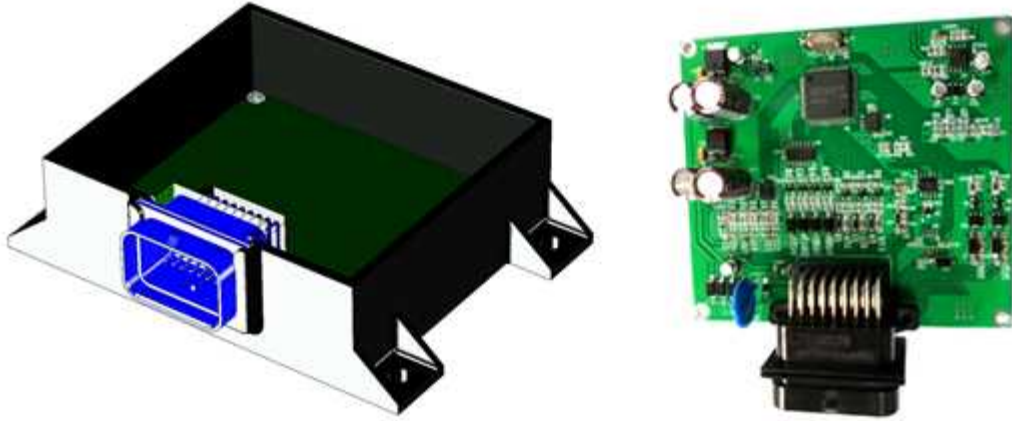
㉔ 선진사 조향제어모듈 단품 성능 시험

- 조향제어밸브 작동성 확인 시험
- 밸브 통과 유량 측정
- 밸브 시스템 구동 압력 측정
- 조향라인 작동시 구동 압력 측정

※ 조향제어모듈 단품 성능 시험을 조향제어시스템 지그 조립 및 조향제어밸브 컨트롤러 샘플 제작 후 상기 항목으로 조향제어밸브 작동성 확인 시험을 12월한 실시 예정이다.

㉔ 조향모듈 제어기 외관 Case 제작 개발

조향제어기의 외관은 농기계의 사용환경을 고려하여 IP65이상의 방수 성능 및 진동 조건을 만족하기위해 Epoxy 충전 구조로 설계를 진행하였다. 제품의 크기는 장착 공간 활용을 위해 최소 사이즈(138.0 x 98.0 x 39.0mm)로 설계를 진행하였다.








< 조향제어기 3D 모델링 및 PCB Ass'y >

㉞ 환경 인식 모듈 개발

㉠ 센서류 사양 조사

㉡ 환경 인식을 위한 센서사양 조사 및 선정(LIDAR, 카메라, 초음파 센서)

① LIDAR 센서 사양 조사 및 선정

구분	robosense (RS-LIDAR-16)	velodyne (HDL-64E)	quanergy (mark-8)	IBEO (ScaLa B2)	SICK (LD-MRS)
형상					
operating range(m)	150	120	300	150	250
laser wavelength(nm)	905	905	905	905	905
horizontal FOV(°)	360	360	360	145	85
vertical FOV(°)	30	24.8	17	3.2	3.2
power consumption(W)	9	60	-	7	8
weight(Kg)	0.84	13	1	0.51	1
dimension(mm)	H:82.7*φ:109	H:254*φ:203.2	H:76.2*φ:88.2	105*100*60	164.5*93.2*88
operating temp(°C)	-10~60	-10~50	-40~85	-40~85	-40~70

<LIDAR 센서 사양 비교>

*트랙 장착부 특성 및 차후 양산 시 가격을 고려하여 robosense 社 RS-LIDAR-16 모델을 우선 선정함.

(수평방향 360도, 수직방향 30도 16채널)

② 카메라 센서 사양 조사 및 선정

구분	Basler (Aviator)	Basler (scout)	Basler (pilot)	Allied Prosilica (GT Series)	Allied Prosilica (GE Series)
형상					
frame speed(fps)	101	70	210	33.3	59
sensor type	CCD	CCD	CCD	CCD & CMOS	CCD
resolution	1MP	VGA	VGA	IEEE802.3 1000baseT	IEEE802.3 1000baseT
인터페이스	GigE	GigE	GigE	GigE	GigE
power consumption(W)	5	3	4.5	-	-
사용 전압(V)	12	12~24	12~24	-	-
lens mount	C-MOUNT	C-MOUNT	C-MOUNT	C-MOUNT	C-MOUNT

<카메라 센서 사양 비교>

* 카메라 사양은 12월한 선정예정임.

③ 초음파 센서 사양 조사 및 선정

구분	BOSCH (generation 6)	HYDAC (HLS 528)	SENSORTEC (ST-203)	SENSORTEC (ST-206)	SENSORTEC (ST-207)
형상					
DETECTING RANGE(cm)	15~550	30~250	30~200	30~500	30~200
DETECTING ANGLE (VERTICAL)	±35°	-	90°	90°	50°±10°
DETECTING ANGLE (HORIZONTAL)	±70°	-	90°	90°	110°±10°
Frequency[kHz]	modulation	-	40	40	40
사용 전압(V)	12	9~30	8~16	8~16	9~16
operating temp(°C)	-40~85	-40~85	-40~85	-40~85	-30~75

<초음파 센서 사양 비교>

* 초음파 센서는 트랙터 작업 환경과 인식거리 및 가격을 고려하여 SENSORTEC 사 ST-206으로 선정함.

㉔ 해외 선진사 작업 환경 인식 모듈 구성 및 배치구조 분석

① 작업 환경 인식 모듈 구성



해외 선진사 작업환경 인식 모듈 구성 분석 결과 과제 최종 목표인 자율주행 3단계(자율조향, 주행속도, 작업기 작동 제어)이상을 만족하기 위해서는 LIDAR SENSOR, RADAR SENSOR, CAMERA, ULTRA-SONIC SENSOR 구성이 필요할 것으로 판단된다.

구분	John Deere	CNH	KUBOTA	YANMAR
LIDAR SENSOR	○	○	×	×
RADAR SENSOR	○	○	×	×
ULTRA-SONIC	×	○	○	○
CAMERA	○	○	○	○
LEVEL	3~4	3~4	2~3	2~3

<작업 환경 인식 모듈 구성>

② 작업 환경 인식 모듈 배치구조 분석

해외 선진사 작업환경 인식 모듈 구성 중 자율주행 3~4단계에 해당되는 John Deere와 CNH의 환경 인식 모듈 배치 구조에 대하여 검토하였으며 LIDAR SENSOR의 경우 두 차량 모두 전방 웨이트 부근에 플래시 LIDAR SENSOR를 배치하였고, RADAR SENSOR의 경우 John Deere는 전방 웨이트 부근, CNH는 전방 라이트 내부에 배치하였고, ULTRA-SONIC SENSOR의 경우 CNH는 전,후방 좌우측에 배치하고 근거리 장애물 인식용을 회피용으로 사용하였고 CAMERA의 경우에는 John Deere는 캐빈 상부에 배치하였고 CNH는 전방 라이트 내부에 배치하였다.

구분	John Deere	CNH
배치 구조		

<작업 환경 인식 모듈 배치구조>

③ 센서별 장애물 인식 기초 기술 연구

① LIDAR 센서를 이용한 장애물 인식 기술 연구

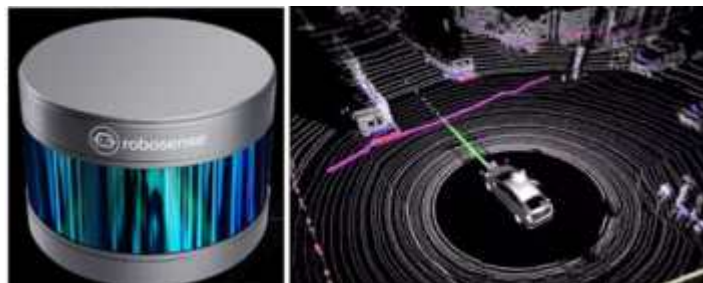
① LIDAR 센서 인식 기초 기술 연구

① 정의: Light Detection And Ranging의 준말로 전자기파를 사용하는 레이더와 달리 빛(레이저)을 이용하여 주변을 탐색하는 장치

라이다는 360도로 초당 수십만번을 돌면서 빛을 사방으로 쏘았다가 다시 돌아오는 정보를 토대로 이미지를 그려내 이 이미지 컴퓨터를 통해서 자동차와 사람을 구별하고 돌아와 건물을 식별하는 등 우리가 눈으로 보는 것보다 더 넓은 범위를 보고 파악할 수 있다.

② 종류

- 플래시 라이다: 센서가 회전하며 360도의 모든 곳을 파악해 이미지화 가능
- 스캐닝 라이다: 전방 약 120도 정도의 반경을 파악하여 앞쪽 이미지화 가능



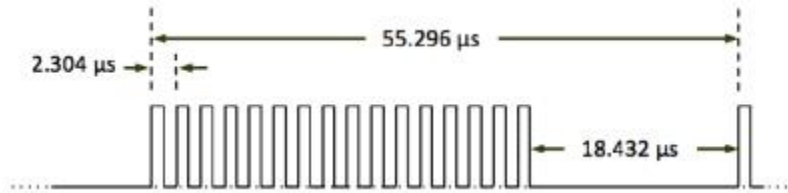
<LIDAR 센서(예시)>

③ 기본원리

- 라이다는 기본적으로 레이저 송신부, 레이저 검출부, 신호수집 및 처리, 데이터 송수신하는 부분으로 구성되어 있음
- 라이다는 레이저 신호의 변조 방법에 따라 TOF (Time Of Flight) 방식과 Phase-shift 방식으로 구분됨
- TOF 방식은 레이저가 펄스신호를 방출하여 측정범위 내에 있는 물체들로부터의 반사 펄스 신호들이 수신기에 도착하는 시간을 측정함으로써 거리를 측정

㉔ Firing Sequence

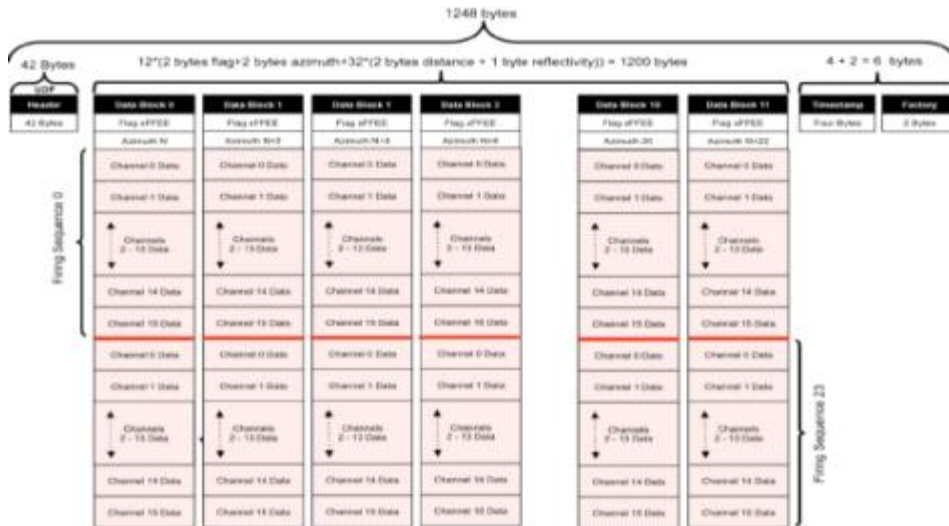
- VLP-16은 TOF 방식으로 16개의 레이저들은 55.296us 마다 펄스신호를 방출하여 물체들과의 거리를 측정
- 레이저의 방출 간격은 2.304us이며, 16개의 레이저를 방출하고 18.432us 동안 유힬상태를 가짐



<Firing Sequence Timing>

㉕ VLP-16 Single Return Mode 데이터 구성

- VLP-16은 Header(42byte)와 12개의 Data Block(1200byte)과 Time Stamp(4byte)과 Factory(2byte)로 구성
- 1개의 Data Block에는 Flag(0xFFEE), 방위각(2byte), 거리값(2byte)과 반사율(1byte)로 구성된 32개의 Channel 데이터로 구성



<VLP-16 Single Return Mode Data Structure>

㉖ VLP-16 데이터 계산방법

- Data Block의 시작 Flag (0xFFEE): 빨간색 사각형
- Data Block의 방위각: 파란색 사각형
 - 1) 방위각 값 취득: 0xAF & 0x71
 - 2) byte 값을 뒤집음: 0x71 & 0xAF
 - 3) byte 값을 합침: 0x71AF
 - 4) 10진수로 변환: 29,103
 - 5) 100으로 나눈 값이 측정된 방위각: 291.03°
- Data Block의 마지막 Firing 값 (거리, 반사율): 녹색 사각형
 - 1) 거리 취득: 0x15 & 0x59
 - 2) byte 값을 뒤집음: 0x59 & 0x15
 - 3) byte 값을 합침: 0x5915

- 4) 10진수로 변환: 22,805
- 5) 2.0mm으로 나눈 값이 측정된 거리: 11,402.5mm (11.4025m)
- 6) 반사율은 0x00

```

01b0 08 6d 62 01 00 00 07 3f 60 00 ff ee af 71 05 0a .mb....? ..q..
01c0 08 00 00 00 fc 0a 0c d9 62 01 64 0c 06 2c 56 00 ..... b.d...V.
01d0 31 0e 05 69 56 00 e8 10 05 9d 64 01 3a 15 0d 15 1...iV... .d...
01e0 52 01 ba 1b 08 00 00 02 00 00 07 73 60 00 0e 0a R.....s...
01f0 08 00 00 00 fc 0a 0b fb 62 01 60 0c 06 c9 55 01 ..... b...U.
0200 3d 0e 05 c5 52 01 ea 10 04 a2 52 01 00 00 0a 5f =...R...R...
0210 51 02 ba 1b 08 d7 69 01 00 00 07 ff ee Q.....i...Y...
0220 d8 71 0c 0a 08 00 00 00 fe 0a 0a 0f 63 01 6a 0c .q.....C..j.
0230 06 00 00 01 3e 0e 05 c3 51 01 f4 10 05 85 5a 01 .....>... Q...Z.
0240 00 00 0a 10 51 03 00 00 01 00 00 02 00 00 07 df .....0.....
0250 58 00 16 0a 08 00 00 00 00 0b 0d 25 63 01 70 0c X.....%c.p.

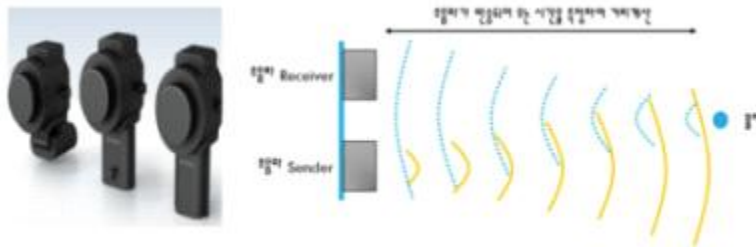
```

<Single Return Mode Packet Data Trace>

㉔ 초음파 센서를 이용한 장애물 인식 기술 연구

① 초음파 센서 인식 기초 기술 연구

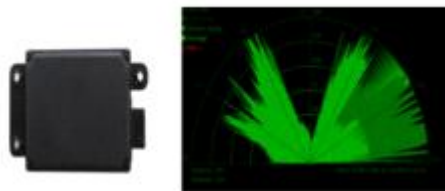
- ㉑ 정의: 대상에 초음파를 보내어 반사된 초음파를 받아 대상물의 거리, 방향을 감지하는 센서
TRIGGER로 전파신호를 보내어 반사된 신호를 ECHO로 전달받아 시간차로 거리를 측정함



<초음파 센서(예시)>

② 레이더 센서 인식 기초 기술 연구

- ㉑ 정의: Rdio Detection And Ranging(무선 탐지 거리 측정)의 준말로, 무선으로 주변 물체를 탐지하고 거리를 측정할 수 있는 센서
전자기파를 발생시켜 물체에 쏘고 다시 돌아오는 전자기파를 통해 거리, 방향, 고도를 알아내어 물체의 위치를 파악



<RADAR 센서(예시)>

㉕ 센서 융합을 위한 기초 연구

㉑ 영상인식 센서, Lidar 센서 및 기타 센서 융합을 통한 작업환경 인식 연구

① 영상인식 센서, Lidar 센서 및 기타 센서 융합 구성 검토

- 자율주행 트랙터는 주변 환경인식 능력이 필수적으로 이미지 인식 카메라, 거리, 속도, 이미지 인식 라이다, 단거리 충돌방지 초음파 센서를 융합하여 센서들의 특성상의 한계를 보완하여 적용하였다.
자동차 대비 고속 운행영역이 없으므로 고가의 라이다 센서는 미 적용하였다.



<자율주행 트랙터 시스템 센서 구성>

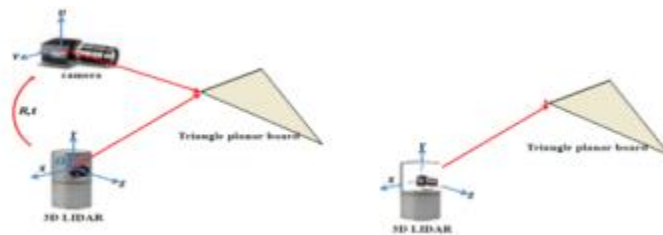
㉔ 카메라 및 Lidar센서 융합을 통한 장애물 인식 기술 연구

① Calibration의 개요

카메라의 영상은 3차원 공간의 점들을 2차원 이미지 평면에 투사함으로써 얻어진다. 핀홀(pinhole) 카메라 모델에서 이러한 변환 관계는 다음과 같이 모델링된다. 여기서 x, y, z 는 월드 좌표계상의 3D 점의 좌표이며 $[R \ 1 \ t]$ 는 월드좌표계를 카메라 좌표계로 변환시키기 위한 회전/이동변환 행렬이며 A 는 intrinsic camera matrix이다. 일반적으로 핀홀 카메라의 매개변수는 카메라행렬이라 불리는 3×4 행렬로 표현된다. 핀홀 카메라의 매개변수를 추정하는 절차를 카메라 캘리브레이션이라 부른다.

② Calibration의 정의

R, T (위치 관계를 설명해주는 회전행렬과 평행이동 행렬)을 알아내는 것이 Calibration을 진행하는 것이며 이를 통해 라이다센서와 카메라를 동일 시점에서 바라보도록 하게 할 수 있다. 따라서 아래와 같이 카메라에서 얻은 데이터들에 다시 R 과 T 의 역행렬을 곱해주어 위치를 이동시켜서 카메라와 라이다를 같은 시점에서 보게끔 한다.



<Calibration 예시>

⑩ 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장 시스템 설계

① 작업환경 인식 모듈 트랙터 장착부 레이아웃 설계

① 영상인식 센서, Lidar 센서 및 기타 센서류 탑재를 위한 레이아웃 설계

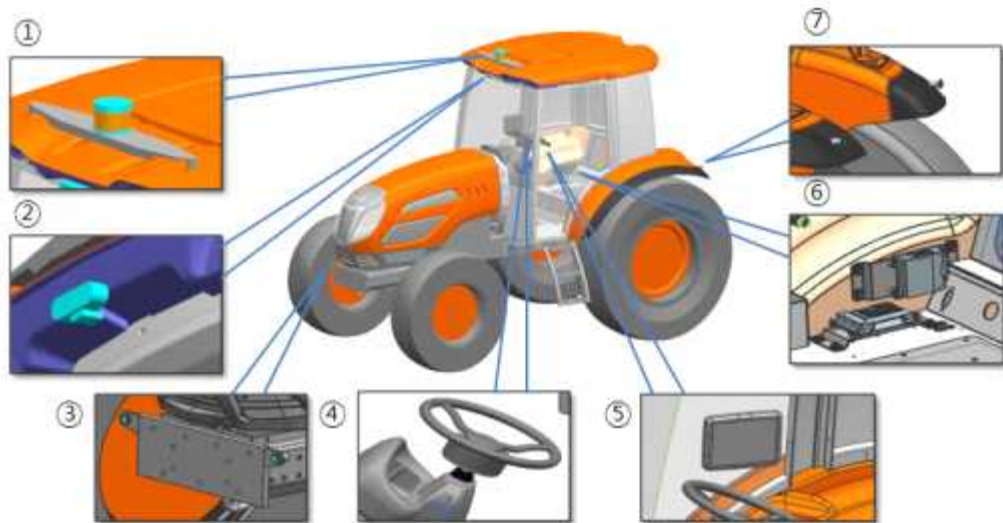
① Lidar센서와 카메라는 주행차량 주변의 장애물 인식을 위하여 차량 최상부 지붕에 장착하였고, 전방 물체 인식을 위하여 지붕 앞쪽 중앙에 브라켓으로 고정하였다.

② 초음파센서는 차량 전방 앞차축프레임 양측면, 차량 후방 펜더 양측면에 부착하여 전후방의 근거리 장애물을 감지할 수 있도록 배치하였다.

③ 모니터는 운전 우측면에 운전자와 가까운 위치에 배치하여 자율주행 경로 및 주행 정보를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

④ 조향모터는 스티어링 칼럼 상부에 핸들위치에 부착하여 핸들과 핸들축을 직접 제어하도록 하였다.

⑤ 작업환경 인식모듈, 조향제어 모듈은 운전석 우측면 실내에 별도의 방진쿠션 구조를 갖춘 브라켓으로 캐빈 프레임에 조립 되도록 하였다.

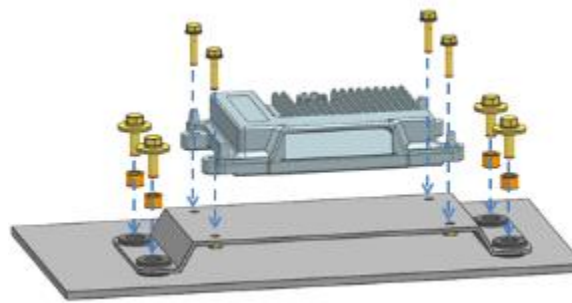


<레이아웃 설계>

- | | |
|-------------|---------------|
| 1. LIDAR센서 | 5. 모니터 |
| 2. 카메라 | 6. 작업환경 인식 모듈 |
| 3. 전방 초음파센서 | 7. 후방 초음파센서 |
| 4. 조향 모터 | |

② 작업환경 인식 모듈 장착부 설계

- 작업환경 인식 모듈은 캐빈 실내 운전석 우측하면의 캐빈프레임에 조립된다. 모듈에 고정용 브라켓을 부착하고, 브라켓에 방진 쿠션을 적용하여 농작업 중 발생하는 진동을 차단할 수 있도록 하였다.

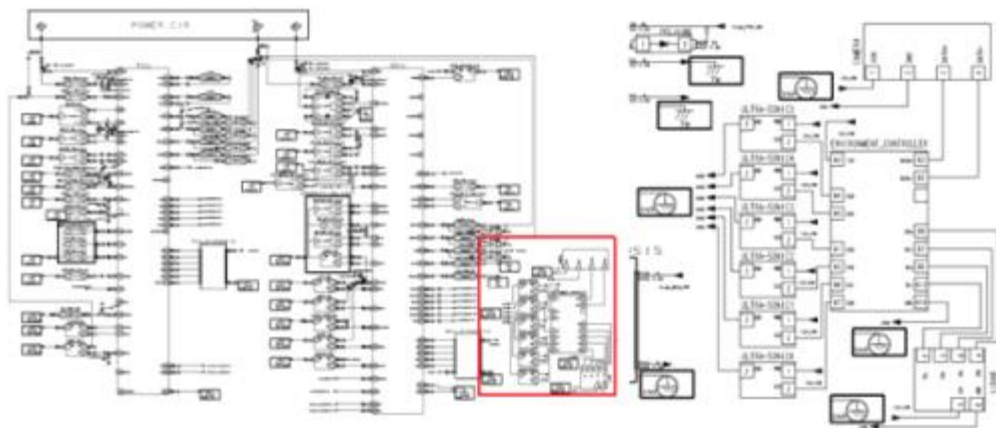


<작업환경 인식 모듈의 조립 모습>

㉠ 작업환경 인식 모듈 전장시스템 설계

① 센서류 및 작업환경 모듈 전원 회로 및 신호전달 회로 설계

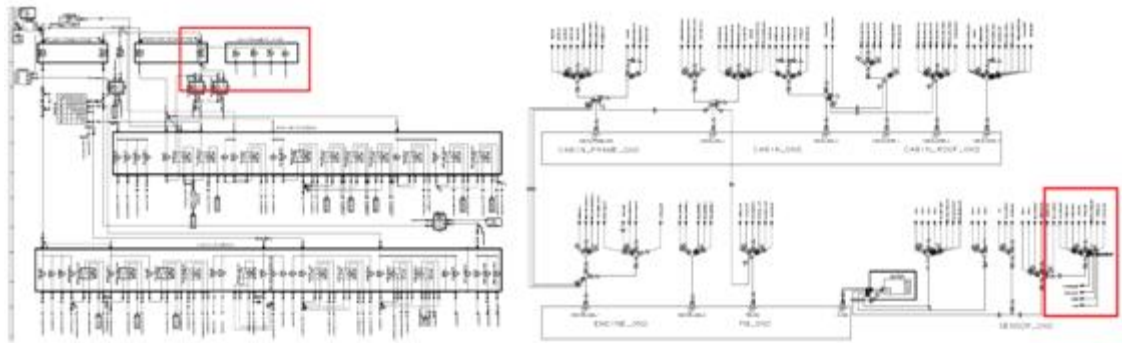
- 먼저 라이더 센서의 경우 환경인식 컨트롤러와 송수신하는 RX(+),RX(-), TX(+),TX(-) 연결하였고, 라이더 센서 전원단을 보호를 위하여 10A 퓨즈를 적용하였고, 카메라 센서의 경우 영상 신호 DATA(+), DATA(-)를 환경 인식 컨트롤러와 연결하였으며, 카메라 전원단 역시 회로 보호를 위하여 5A 퓨즈를 적용하였다. 그리고 초음파 센서는 전방 2개, 측방 2개, 후방 2개를 적용하였으며 초음파 신호는 환경인식 컨트롤러와 연결하였다. 또한 초음파 센서 전원단 역시 회로 보호를 위하여 5A 퓨즈를 적용하였다. 그리고 각각의 접지들은 전압 강하를 막기 위하여 센서 접지단으로 구분하여 연결하였으며, 배터리(-)와 직결 연결하여 전압 강하로 인한 이상 동작을 보호하도록 설계하였다.



< 환경인식 모듈 구성 회로도 >

② 전원 분배 및 접지 위치를 고려한 전체 시스템 회로 구성 설계

- 전원단 분배 회로: 환경인식 컨트롤러 및 센서들(라이다, 초음파, 카메라) 각각의 핀 중 전원단은 각각의 소모 전력 및 회로 보호를 위하여 환경인식 컨트롤러 10A, 라이다 10A, 카메라, 초음파 센서 5A로 적용하였다.
- 접지(GND) 회로: 컨트롤러 및 센서들 각각의 시스템 별로 접지부를 나누어 접지부를 설계하였으며, 컨트롤러, 센서들의 전압 강하 방지를 위하여 전압 강하가 적게 일어나는 배터리 터미널(-)에 직결로 연결하여 전압강하로 인한 컨트롤러 및 센서들의 이상 동작을 방지하도록 설계하였다.

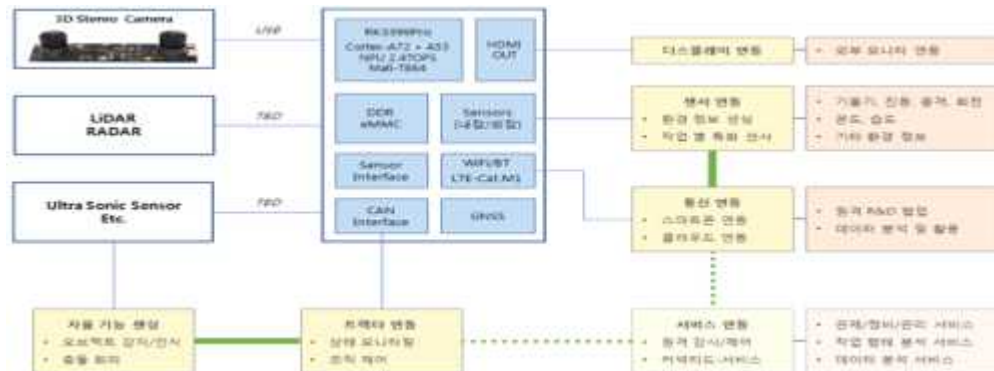


< 환경 인식 모듈 전원 및 접지 회로도 >

③ 환경인식센서(카메라, Lidar, 초음파) Fusion을 이용한 장애물 인식 기술 연구

- 전체 시스템 구성

카메라, 라이다 및 초음파 센서의 융합을 통한 환경 및 장애물 인식 시스템을 구성하였다. 각각의 센서는 장애물 감지 및 인식을 통해 트랙터와 연동되는 환경인식 제어 모듈과 연결된다. 환경인식 제어 모듈은 각 센서들의 Fusion을 통해 장애물의 크기 및 거리를 산출하여 이에 대한 정보를 트랙터 CAN 통신 라인을 통해 실시간으로 전달한다. 또한, 제어기 내부에는 기울기, 진동, 온도등을 측정할 수 있는 센서를 포함하여 차량이 사용되는 환경에 대한 정보도 제공할 수 있도록 한다.



< 환경 인식 모듈 융합 알고리즘 >

- 환경인식 제어기 사양 선정

메인 Process는 인공지능 (TensorFlow/Caffe) 및 OpenVX 기능 지원이 가능하며 또한 윈도우 및 리눅스 환경에서 작업이 가능한 RK3399pro 사양으로 선정하였으며, 향후 외부 모니터와 연결을 위해 HDMI 출력 port, 인터넷 및 근거리 통신 연결이 가능하도록 LTE, Wifi 및 Bluetooth 기능을 탑재 하도록 시스템을 구성하였다.

또한 트랙터 상태 모니터링을 위해 CAN 통신이 가능하도록 2개의 CAN 통신 포터로 구성하였으며, 외부 센서인 Lidar, Camera, Ultra-sonic센서와 인터페이스가 가능하도록 시스템을 구성하였다. 2차년도 과제를 진행하며 최종 인터페이스 사양은 확정하도록 하겠다.

분류(Category)	항목(Item)	기능(Feature)
프로세서	<ul style="list-style-type: none"> RK3399Pro <ul style="list-style-type: none"> Dual-core Cortex-A72 + Quad-core Cortex-A53 NPU up to 2.4TOPS Quad-core Mali-T864 GPU 인공지능(TensorFlow/Caffe), OpenVX 기능 지원 Linux/Android 호환 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트비전 및 인공지능 특화 프로세서 센서 입력 데이터 통합 분석 SLAM(Simultaneous Location and Mapping) 기타 응용 기능 구현 가능
디스플레이	<ul style="list-style-type: none"> HDMI-OUT 	<ul style="list-style-type: none"> 외부 HDMI 모니터 연동 가능
인터넷 통신	<ul style="list-style-type: none"> LTE-Cat.M1 	<ul style="list-style-type: none"> Cloud 연동 기능 등
근거리 통신	<ul style="list-style-type: none"> WiFi Bluetooth 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트폰 연동 가능 BLE 특화 기능 등
트랙터 인터페이스	<ul style="list-style-type: none"> CAN x 2ch 	<ul style="list-style-type: none"> 트랙터 상태 정보 수집 및 제어
전원 인터페이스	<ul style="list-style-type: none"> DC 12v 	
센서	<ul style="list-style-type: none"> 3축/6축 가속도 센서 온도/습도 센서 	<ul style="list-style-type: none"> 트랙터 기울기, 충격, 진동, 회전 작업 환경 정보 수집
센서	<ul style="list-style-type: none"> 3D Stereo Camera Ultra Sonic Sensor LiDAR 	<ul style="list-style-type: none"> 센서 종류 및 인터페이스 추후 확장

< 환경 인식 모듈 제어기 사양 >

㉔ 시제품 제작 및 시험

㉔-1 작업환경 인식 모듈 성능시험용 샘플 제작

환경인식 모듈(카메라, 초음파) 구입진행 중이며 12월한 성능시험용 샘플 제작예정.

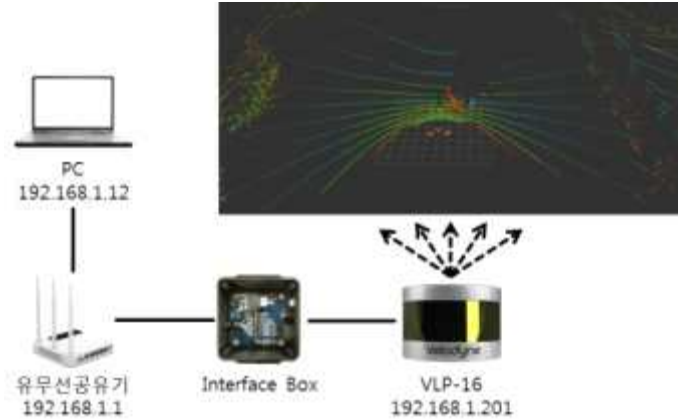
㉔-2 센서류 단품 성능 시험

㉔-2-1 작업환경 인식 모듈 성능시험

㉔ LIDAR 센서 성능 시험

- 시스템 구성

라이다를 이용한 장애물 인식시험을 위해 아래와 같이 시스템을 구성하고 사방이 Open된 개활지에서 Lidar센서를 3개소(전방웨이트상면, 본넷트상면, 캐빈지붕위)에 설치하고 3m 떨어진 거리에 위치한 사물의 인식 상태 확인



<센서 시스템 구성도>

- 사물 인식 확인을 위한 개체

총 4가지 사물에 대해 인식 여부 확인

: 소형 트랙터, 종이박스(50x50cm), 파이프 구조물(1.0x0.5m),사람(175cm)

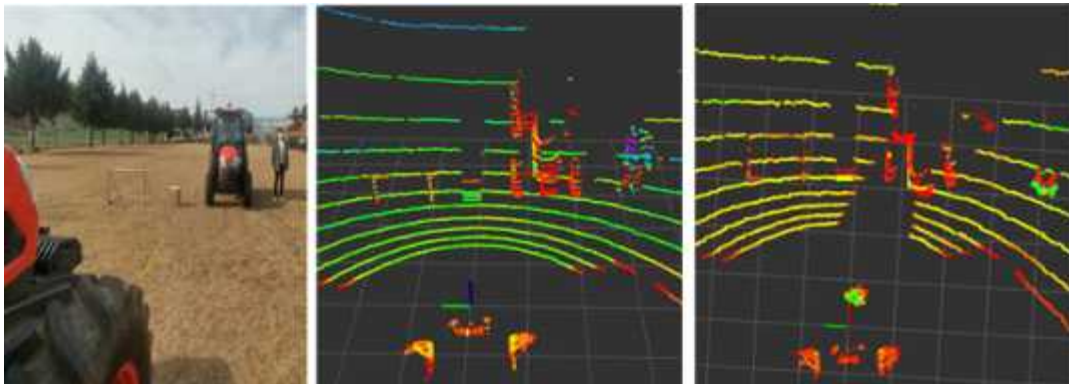


<사물 확인 개체>

- 1차년도 정량적 목표치인 환경 거리 인식 3m관련 시험 진행

실제 사물과 라이다 스캔 영상 비교 시 3m 거리에서 물체 인식이 가능한

수준으로 판단되었으며, 공인기관을 통한 정량적 목표시험은 12월 실시예정

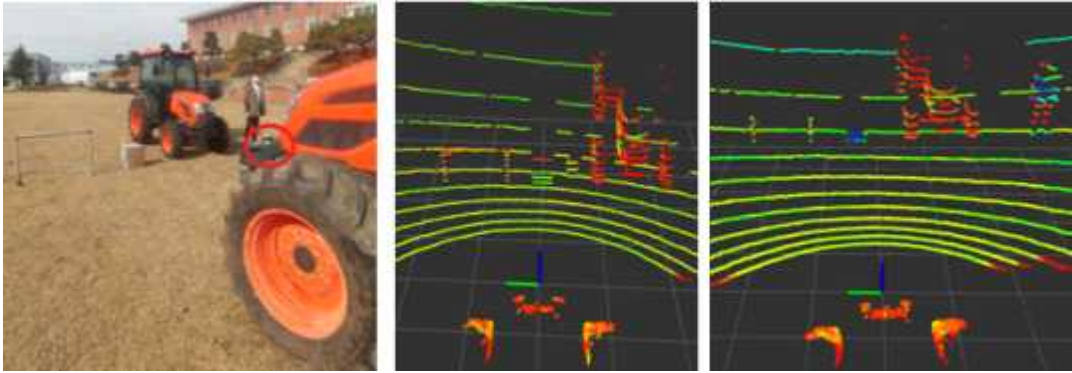


<LIDAR 센서 거리인식 시험(3m)>

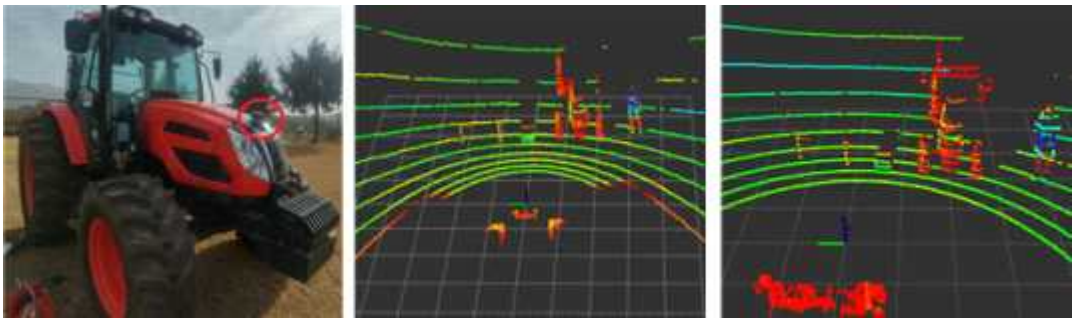
- LIDAR 센서의 부착위치 선정을 위한 시험

차량 전방 웨이트 위치, 차량 본넷트 위치, 차량 캐빈 상부 위치에 대해 각각의 라이다 센서 스캔 영상을 비교하여 본넷트> 캐빈상부> 전방 웨이트 순으로 사물인식이 우수하다고 판단된다. 그러나 취부 위치의 장단점을 비교 시 캐빈 상부

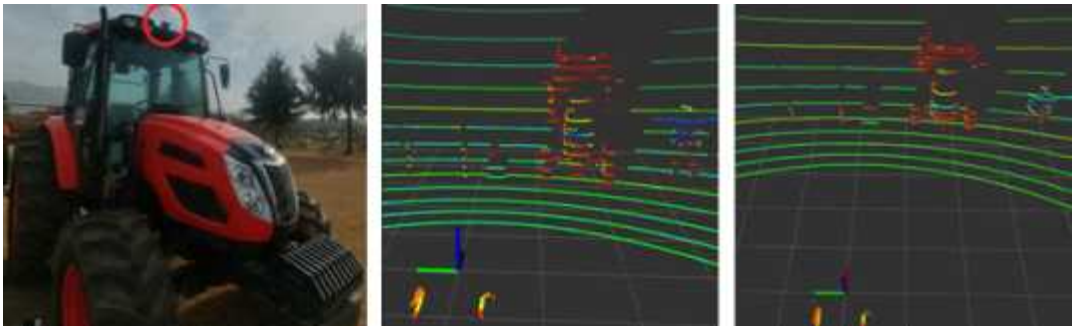
가 가장 유리하다고 판단되며 캐빈 상부 취부 시 라이다의 수직 인식 각도 약 30도를 감안해 라이다 센서 취부 시 약 10~20도의 경사를 주어 설치 필요



<LIDAR 센서 차량 전방 웨이트 위치 (3m)>

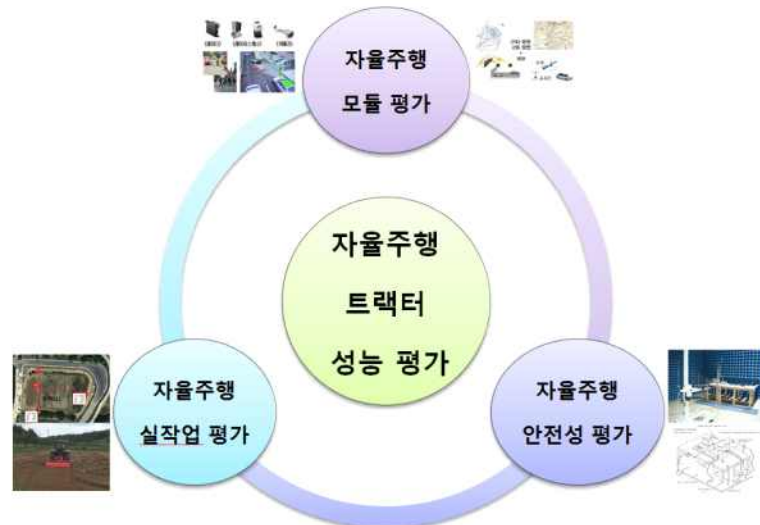


<LIDAR 센서 차량 본넷트 위치(3m)>



<LIDAR 센서 차량 캐빈 상부 위치(3m)>

㉔ 자율주행 성능 평가 방안 검토



< 자율 주행 트랙터 성능 평가 >

㉕ 자율주행 트랙터 모듈 평가

㉕-1 위치 인식 모듈 평가

- GPS신호를 수신하였을 때 정지 상태에서 측정 위치 오차를 평가한다.

㉕-2 조향 제어 모듈 평가

- 자율주행의 실시간 조향 제어를 위하여 조향 제어기 반응 시간을 평가한다.

㉕-3 경로 생성 및 경로 추정 시스템 평가

- 작업할 포장지의 자율 주행 경로를 생성하는데 걸리는 시간을 측정한다.

- 자동 조향 모드로 작동할 때 GNSS 자율주행 시스템 성능을 평가하는 것으로 차량의 위치 지점과 요구하는 궤적간의 편차를 평가한다.

㉕-4 작업환경 인식 모듈 평가

- 장애물이 존재하는 넓은 포장지 환경에서 장애물의 인식하는 자율주행 제어기의 연산 속도를 평가한다.

- 카메라와 라이다를 이용하여 존재하는 장애물을 인식하는 성능을 평가한다.

- 작업할 포장지에 장애물을 배치하고 각각의 장애물이 자율주행 트랙터로부터 떨어진 거리를 측정한다.

㉕-5 자율주행 트랙터 실작업 평가

㉕-5-1 자율 주행 작업 오차 평가

- 직진 자율 주행 계획 경로와 실제 주행 경로와의 작업 오차를 평가한다.

- 자율 주행 작업으로 경운 실작업을 실시하여 평가한다.

㉕-5-2 자율 주행 실작업 정확도 평가

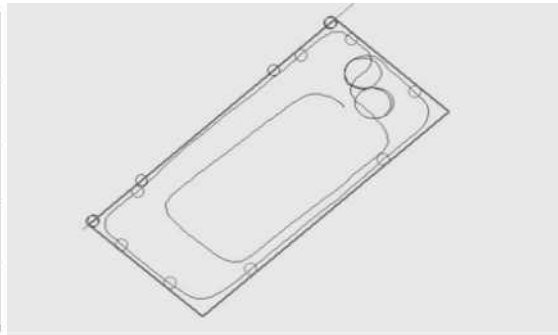
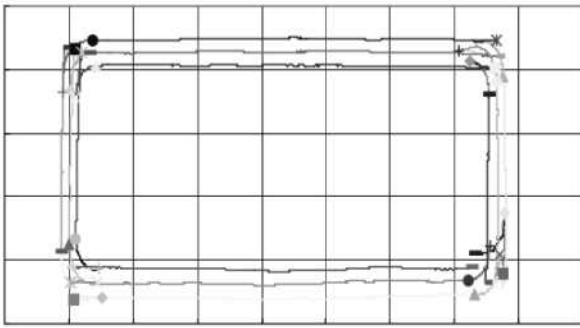
- 자율 주행 작업으로 로타베이터 실작업을 실시하여 미경작 면적을 측정한다.

㉕-5-3 트랙터 실작업을 모사하여 자율주행 작업의 반복성과 재현성을 평가

- 자율 주행 실작업을 반복적으로 실시하여 작업 오차와 작업 정확도를 평가한다.

㉕-5-4 포장지 상태(토양의 종류, 함수율 등)에 따른 자율 주행 작업 성능 평가

- 포장지 상태에 따라 트랙터 선회반경이 다르므로 다양한 종류의 포장지에서 자율 주행 실작업 성능을 측정한다.



< 자율 주행 경로와 포장지 상태에 따른 작업성 평가 예 >

㉓ 자율주행 트랙터 안전성 평가

㉔ 실작업 자율 주행 안전성 평가

- 포장지에서 발생할 수 있는 다양한 자율주행 시나리오를 도출한다.
- 다양한 자율주행 시나리오를 평가하기 위한 절차와 성능 확인 기준을 마련한다.
- 자율주행 트랙터 평가 시나리오를 테스트베드에서 구현하고 검증 평가할 수 있는 평가 시스템 구축한다.

㉕ 자율주행 시스템의 고장 안전성 평가

- 자율 주행 시스템 자가 고장 진단 항목을 트랙터에서 검증한다.
- 실작업 자율 주행시 데이터 분석을 통한 고장 안전성을 평가한다.

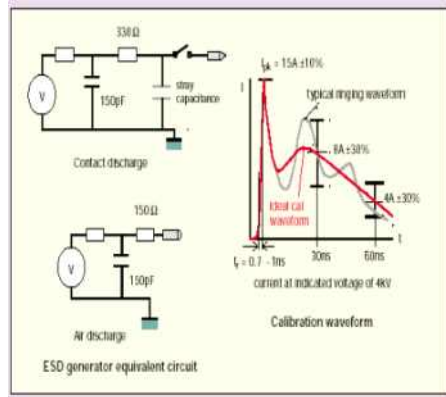
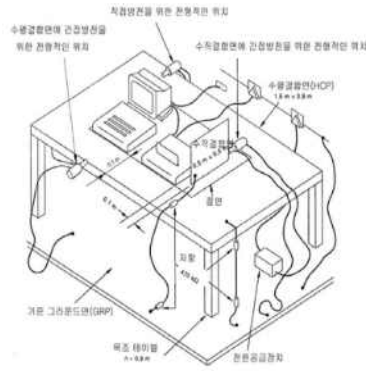
우선 순위	Error 항목	비상 주행 기능
1	위치 인식 모듈	알람을 띄우고 수동 주행 모드로 변경
2	조향 제어 모듈	알람을 띄우고 수동 주행 모드로 변경
3	경로 생성 모듈	알람을 띄우고 수동 주행 모드로 변경
4	작업 환경 인식 모듈	알람을 띄우고 수동 주행 모드로 변경
5	통합제어기 고장	출력 50%로 제한 및 수동 주행 모드로 변경

Source	ID Name	CAN ID	Signal Name	Description	Start Bit	End Bit	Length Bit	DATA TYPE	Value	Resolution	Offset	Unit
ECU (02-24-04)	ECU	0x0B0	-	Reserved	0	39	40	-	-	-	-	-
			BattVol	1.5V Battery Voltage	40	47	8	Unsigned	0-200	1	0V	
			ECUBootP	ECU Initial Sequence Fail	48	48	1	Boolean	0-1	1	0	
			ECUCANF	ECU CAN Fault	49	49	1	Boolean	0-1	1	0	
			SocGuageF	Soc Guage Fault	50	50	1	Boolean	0-1	1	0	
			RpmGuageF	Rpm Guage Fault	51	51	1	Boolean	0-1	1	0	
			PTOSW	PTO Gear SW signal	52	52	1	Boolean	0-1	1	0	
			-	Reserved	53	55	3	-	-	-	-	
			WlbrnOn	Working Inverter On Sig	56	56	1	Boolean	0-1	1	0	
			DrInOn	Driving Inverter On Sig	57	57	1	Boolean	0-1	1	0	
			BrakeSW	Brake Switch Signal	58	58	1	Boolean	0-1	1	0	
			RangeSW	SubGear Range Switch	59	59	1	Boolean	0-1	1	0	
			CruterSW	Cruter Switch Signal	60	60	1	Boolean	0-1	1	0	

< 시스템 고장 진단 항목과 데이터 분석 예 >

㉖ 정전기 방전 내성 시험 평가

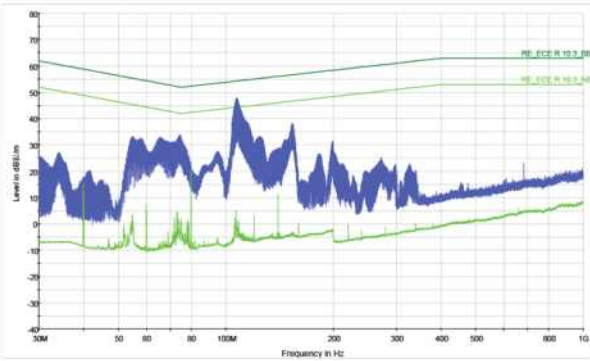
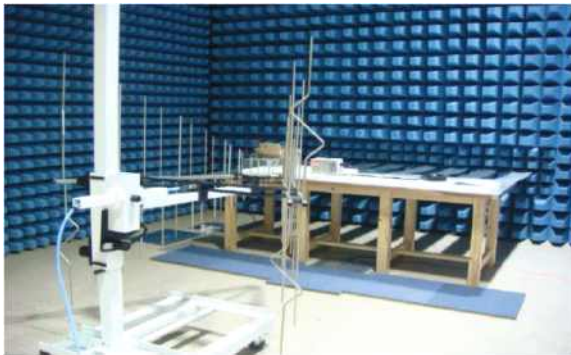
- 자율 주행 제어기가 다른 물체에 근접하거나 직접 접촉했을 때 정전기로부터 안전한지 평가한다.



< 정전기 방전 내성 시험 평가 예 >

㊸ 전자파 시험 평가

- 자율 주행 제어기가 전자파 방사 내성과 전자파 장애에 안전한지 전자파 적합성을 평가한다.



< 전자파 시험 평가 예 >

나. 협동연구기관 1 (동양물산기업(주))

㉔ 자율 주행 경로생성 기술 개발을 위한 자료 및 기술 동향

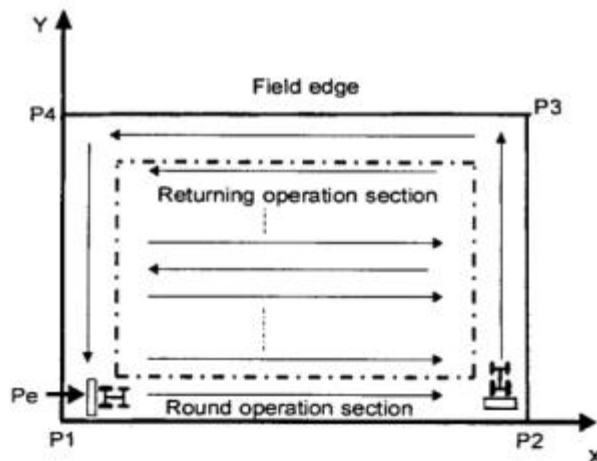
㉔ 유사 선행 개발 연구자료 및 논문자료

㉔ 경로생성 기술의 개요

자율주행 트랙터를 이용한 농작업 시 경로생성은 대부분 포장 전 구획을 작업기의 폭으로 나누어 미 작업 영역이 생기지 않도록 경로를 생성하는 것이 중점 요소이며, 포장지의 상황에 따라 최소비용(최단거리, 최단시간, 연료소모량)이 될 수 있도록 효율적인 경로생성이 필요하다.

㉔ 선행 개발 연구자료 및 논문자료

농기계의 무인자동화 연구가 점차 늘어나면서 포장 내에서 효율적인 농작업 경로를 찾는 것은 중요한 요인으로 간주되고 있으며, 정밀농업이나 농기계 무인자동화와 관련하여 농작업 최적경로를 찾고자 하는 연구는 현재도 활발하게 연구 중이다. 관련선행 논문 자료(한웅철, 2017)에 따르면 한국의 경우 농업환경이 미국, 유럽등과 많이 다르고 선진국은 대형 기계를 사용하며 경지면적이 10 ha 이상으로 재배방식과 재배환경이 다르기 때문에 외국의 자율주행 제품을 국내에 바로 적용하기에는 어려움이 있을 것 이라고 하였다. 국내에서는 정밀농업을 위한 트랙터-작업기의 최적 경로계획(정선옥,1999)이라는 제목으로 1999년도부터 국내 농업환경에 맞는 경로생성을 하기 위한 연구가 진행되었다. 최적으로 농작업을 수행하기 위해서는 작업시간을 줄이면서 작업정밀도와 작업효과를 높이는 것이 바람직하다. 이에 따라 경로계획의 기본방향으로 사용연료와 농기계에 의한 토양다짐을 줄이면서 미작업 부분이 발생하지 않고 최단시간에 작업하여 농기계의 작업능률을 높일 수 있는 경로를 생성하는 것을 목표로 연구가 진행되었다. 대부분의 경로생성은 아래 그림과 같이 규격화된 포장지를 대상으로 경로 생성하였으며, 최단거리를 갖기 위한 수학적인 알고리즘(Linker,2008) 기반으로 연구가 진행되었다. 계속적으로 작업시간과 비용의 측면에서 작업효율성이 높은 경로 계획방법이 연구되고 있으며, 시뮬레이션과 실제 자율주행실험을 진행하여 자율주행을 위한 경로생성의 효용성을 검증하는 연구가 계속 진행되고 있다.



<규격화된 포장지의 운행궤도(정선옥,1999)>

㉔ 관련 기술 자료 및 설계규격 기술 분석

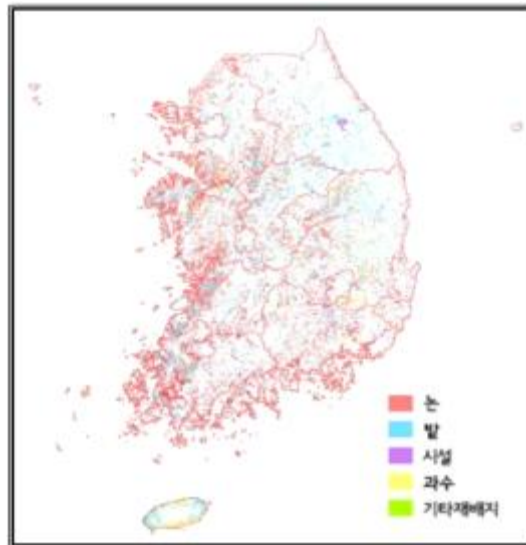
자율주행을 위한 경로생성에 필요한 설계 규격은 따로 규정하지 않고 있으며, 자율주행트랙터의 운행 및 안전 관련에 대해서만 ISO 18497에서 규정되고 있다. 추후 경로

생성에 대한 효율성 및 타당성에 대한 판단 할 수 있는 규격이 필요하다고 판단된다. 경로생성 관련 기술은 정형적인 포장형태를 가지고 있는 포장지에서 시행되고 있다. 정형화된 포장은 일반적으로 직사각형이나 정사각형처럼 직각 형태를 이루고 있는 포장을 말한다. 포장의 크기는 농림부와 농어촌진흥공사에서 제시한 표준크기를 기준하여 경지정리에서 100m X 40m의 크기가 가장 많이 제시되고 있다. 경로는 내부 경로와 외부 회경 경로를 가져야 하며 포장의 형태, 트랙터의 최소회전반경, 작업기의 크기마다 최적의 조건이 다르기 때문에 그에 따른 최적경로 생성 기술이 필요하다.

㉠ 농업 환경 및 지형에 최적화된 경로 생성을 위한 국내 농작업 환경 조사

㉠ 국내 농작업 지형 조사

자율주행을 위한 경로생성을 하기 위해서는 규격화된 포장지가 필요하다. 포장지 크기가 작고 모양이 불규칙한 일단의 경지를 한꺼번에 갈아엎어 적정한 크기로 반듯하게 구획을 정리하고 일정한 규격의 크기로 규격화 시키는 경지정리가 1940년도부터 정부 사업으로 진행되었다. 전국 경지율은 17.4%으로 지역별로 큰 차이를 보이며 전국 경지 분포도는 아래 그림과 같다. 전국 논비율은 58.2%이며 전국에서 가장 높은 논비율은 충청남도로 72.4%로 나타난다.



<전국 경지분포도 (통계청,2010)>

농경지의 지형별 분포면적은 평탄지, 선상지, 곡간지, 산록경사지, 구릉지 등으로 구분되어진다. 아래 표와 같이 우리나라의 경우 주로 곡간지와 평탄지에 농경지가 분포하고 있다. 논과 밭 모두 곡간지에서 가장 많이 분포하고 있으며, 그 뒤로 평탄지, 산록경사지로 분포 하고 있다. 국내 농경지 기준 논경지의 경우 주로 평탄지나 경지사업이 진행된 곡간지에서 재배를 하기 때문에 경사도가 비교적 낮은 곳에 분포하고 있으며, 밭은 주로 곡간지나 산록경사지에서 재배를 하기 때문에 경사지가 높은 곳에서 분포하고 있다.

지형	논		밭(과수,상전)	
	천ha	%	천ha	%
평탄지	448	39.4	61	8.4
선상지	35	3.1	54	7.5
곡간지	552	45.9	235	32.4
산록경사지	79	6.9	177	24.5
구릉지	2	0.2	120	16.5
산악지	0.5	-	28	3.9
홍적대지	45	4	15	2.1
화산회	5	0.5	33	4.5
사 구	1	0.2	1	0.1
합 계	1,138	100	724	100

<농경지의 지형별 분포면적(농림부,2003)>

경사도 (%)	논		밭(과수,상전)	
	천ha	%	천ha	%
0~2	513	45.0	70	9.6
2~7	396	34.8	209	28.9
7~15	190	16.7	277	38.2
15~30	40	3.5	146	20.2
>30	-	-	22	2.7
계	1,138	100	724	100

<농경지의 경사도별 분포면적(농림부,2003)>

⑧ 장애물 인식을 위한 장애물 영상 데이터 분석

① 장애물 인식 알고리즘 개발을 위한 선행연구 자료 수집 및 분석

- 2003년부터 2018년까지 자율주행 기술에 관한 선행 연구 자료를 아래와 같이 수집 및 분석하였으며, 본 연구에 적용가능 여부를 검토함.

- 주로 장애물 인식 관련 기술 자료를 검토하였으며, 대부분 Laser센서, LiDAR센서, SLAM, IMU, GPS 등 다양한 센서 퓨전을 자율주행 기술 적용을 위해 사용한 연구들이었으며, 이를 통해 본 연구에서도 다양한 센서 시스템을 복합적으로 적용하여, 장애물을 인식하고 것을 목적으로함.

① Brenneke 등(2003) - Using 3D laser range data for SLAM in outdoor environments

① 자율 주행에서 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나인 3D 레이저 거리 데이터를 사용하여 SLAM(위치 파악 및 맵핑) 방법을 개발.

② 레이저 데이터 수집, 데이터 처리, 장애물 분할 및 SLAM의 단계에 대해 설명.

③ 두 개의 스캔 데이터에서 동일한 물체를 인식하기 위한 알고리즘을 야외 테스트.

④ 2D 스캐너는 안정적인 인식 및 맵핑에 적합하지 않으며, 3D 포인트를 대신 이용하여 중요한 정보를 잃지 않고 데이터의 양을 줄일 수 있다고 제안.

② Manduchi 등(2005) - Obstacle detection and terrain classification for autonomous off-road navigation

① 고지 식물, 오프로드 지형에서의 자율 주행 및 장애물 감지를 위해 컬러 스테레오 카메라와 레이더를 이용한 알고리즘 연구.

- ② 레이더 시스템으로부터의 측정된 거리 데이터와 픽셀들을 혼합하여 장애물 감지 및 분류를 위한 다양한 알고리즘 제안.
- ③ Agrawal 등(2007) - Localization and mapping for autonomous navigation in outdoor terrains: a stereo vision approach
 - ① 현지에 맞게 장애물 회피할 수 있도록 스테레오 비전 알고리즘을 개발.
 - ② 관성측정장치(IMU) 및 GPS를 이용하여 자율 주행과 장애물 인식을 할 수 있도록 Visual odometry(VO)을 구현.
 - ③ RANSAC (random sample consensus) Method 사용.
 - ④ 다양한 옥외 지형에서 시험을 실시하였을 때 Visual odometry(VO)가 Vehicle odometry보다 더 나은 성능으로 수행.
- ④ Weiss 등(2011) - Monocular-SLAM - based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments
 - ① GPS 의존성을 극복할 수 있도록 단일 카메라와 관성 센서를 이용하여 Monocular SLAM Framework 발표.
 - ② 선형 최적 제어기는 실시간 Visual SLAM 알고리즘 사용.
 - ③ 헬리콥터의 자율 주행을 위해 개발.
- ⑤ Heng 등(2011) - Autonomous obstacle avoidance and maneuvering on a vision-guided MAV using on-board processing
 - ① 입체 영상 기반 장애물 회피 시스템을 연구.
 - ② 장애물 맵핑 알고리즘을 사용하여 스테레오 이미지를 분석하고, 3D맵을 이용하여 장애물과의 충돌이 없는 경로를 찾음.
- ⑥ Biswas와 Veloso(2012) - Depth camera based indoor mobile robot localization and navigation
 - ① 깊이 카메라를 활용하여 FSPF (Fast Sampling Plane Filtering)를 도입하여 장애물 회피를 위한 위치 파악 알고리즘을 개발하는 데 사용된 3D 포인트의 양을 줄임.
 - ② CPU의 16% 사용시 30% 카메라 프레임 속도로 실시간으로 실행.
- ⑦ Cheein와 Carelli(2013) - Agricultural robotics - unmanned robotic service units in agricultural tasks
 - ① 자율 농업 차량을 안내, 감지, 실행 및 맵핑의 4가지 카테고리로 분류.
 - ② LiDAR 및 레이저 센서, artificial vision sensor 및 범위 소나 센서와 같은 다양한 센서의 장점과 단점을 비교.
 - ③ odometry 기반 위치 확인 시스템, 관성 모듈 유닛(IMU), GPS 및 RTK 장치와 같은 위치 파악 시스템의 중요성을 강조.
- ⑧ Sharifi와 Chen(2015) - A novel vision based row guidance approach for navigation of agricultural mobile robots in orchards
 - ① Mean-shift 알고리즘과 Graph partitioning 이론을 활용하여 Hough transform에 맞는 농업용 로봇을 위한 내비게이션 개발.
 - ② 필드 테스트를 통하여 농업용 로봇에 유용한 기법을 보여줌.
- ⑨ Bayar 등(2015) - Localization and control of an autonomous orchard vehicle
 - ① 선회 경로 생성을 위하여 차량의 모션 모델과 휠 Side-slip 고려.
 - ② GPS 신호를 사용하는 대신 평면 레이저 스캐너와 휠 및 조향 엔코더를 사용하

여 저가의 GPS 없는 내비게이션 시스템을 개발.

⑩ Bergerman 등(2015) - Robot farmers - autonomous orchard vehicles help tree fruit production

① GPS 없는 인식 및 자율 주행 시스템이 있는 과수원 차량 개발.

② Mule, Scaffold, Pace의 3가지 모드 사용.

③ 모델 기반 컨트롤러, 장애물 감지, 교통 제어 모드 개발, 인간 요인 연구에 기반한 사용자 인터페이스 및 과수원에서 자율 차량을 안전하게 사용하기 위한 표준과 같은 기술적 과제를 제시.

⑪ Radcliffe 등(2018) - Machine vision for orchard navigation

① 다중 스펙트럼 카메라와 개인용 컴퓨터를 사용할 수 있도록 이미지에서 피쳐를 추출하여 과수원의 자율주행 내비게이션 개발.

② 시험은 실험실과 현장에서 실시되어 각각 2.4cm와 2.1cm의 RMS 오차를 산출.

⑬ 센서 퓨전을 이용한 장애물 인식 모델 개발

① 플랫폼 모델

① 플로리다대학교에서는 자율주행 트랙터를 모사할만한 플랫폼을 구비하지 않고 있지 때문에, 장애물 인식 알고리즘 개발 시 테스트 가능한 플랫폼을 선정함. 플랫폼은 아래 그림과 같이 Unmanned ground vehicle(Husky, ClearPath Robotics, Kitchener, Canada) 라고 불리는 로봇 플랫폼을 사용함.

② 로봇 플랫폼은 크기 $900(L) \times 670(W) \times 390(H)mm$, 무게 50kg의 제원을 갖으며, 최대 75kg의 무게 탑재가 가능하고 최대 속도 3.6 km/h의 속도 구현 가능.

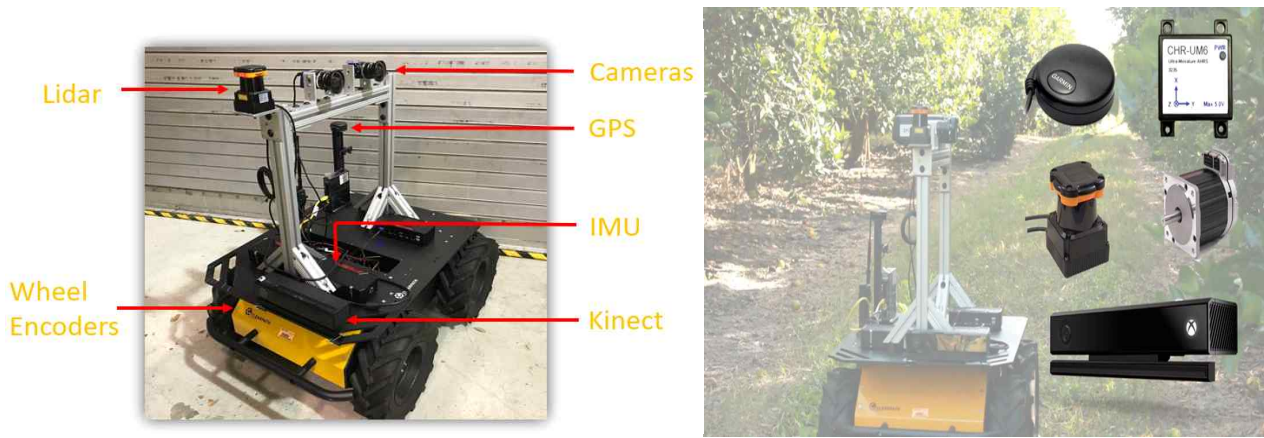


< 로봇 플랫폼 모델(ClearPath Husky) >

② 로봇 플랫폼에 장착된 센서 시스템

① 개발된 플랫폼에는 데이터 처리를 위한 미니 컴퓨터(Intel Chip-based Mini-ITX, VIA Technologies, Taipei, Taiwan)를 장착함.

② 로봇 플랫폼에 장착된 센서시스템은 GPS 수신기, IMU(Inertial measurement unit), 휠 엔코더, Lidar(UTM-30LX, Hokuyo Automatic Co., Ltd.) 및 Kinect 카메라(Kinect v2, Microsoft Co, WA, USA)이며, 외부 하드웨어는 무선 통신을 위한 WIFI 라우터와 원격제어를 위한 무선 모듈을 포함함.



< 다양한 센서 시스템이 포함된 자율주행 플랫폼 모델 >

		Specification
Color	Resolution	1920 × 1080
	fps	30 FPS * 3
Depth	Resolution	512 × 424
	fps	30 FPS
Range of Depth		0.5 ~ 8.0 m
Range of Detection		0.5 ~ 4.5 m
Angle	Horizontal	70°
	Vertical	60°

< Kinect camera(v2) 제원 >

		Specification
Power source	12 VDC ± 10% (Current consumption : Max :1 A, Normal : 0.7 A)	
Detection Range	0.1 ~30 m (White Square Kent Sheet 130mm or more), Max. 60m 270°	
Accuracy	0.1 ~ 10 m : ± 30mm under 3,000lx, White Square Kent Sheet 0.1 ~ 10 m : ± 50 mm under 100,000 lx, White Square Kent Sheet	
Interface	USB 2.0 (Full speed)	
Scan Time	25 msec/scan	
Vibration Resistance	Double amplitude 1.5mm 10 ~ 55 Hz, 2hours each in X, Y and Z direction	
Impact Resistance	196 m/s ² , 10 times each in X, Y and Z direction	

< Lidar (UTL-30LX) 제원>

③ 소프트웨어 플랫폼

① 자율주행시스템에 적용을 위한 소프트웨어 플랫폼은 ROS (Robot Operating System)을 사용함.

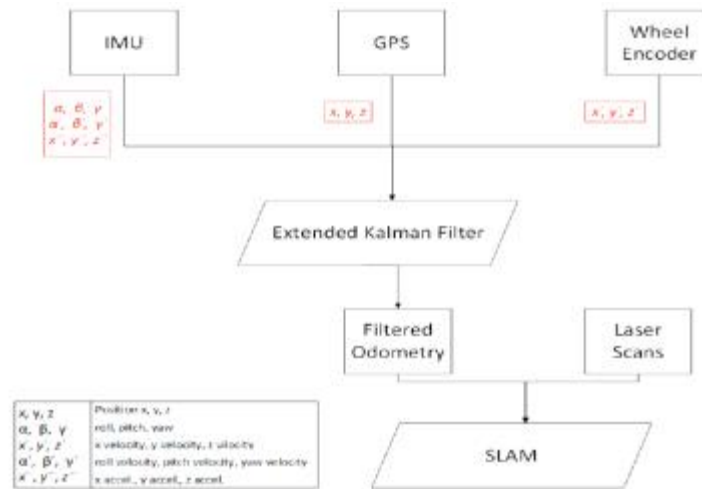
② ROS는 소프트웨어 프레임 워크를 수집하고 연결하는 운영체제와 같은 플랫폼임.

③ 로봇은 로봇 내에 위치한 컴퓨터를 기반으로, 외부 컴퓨터에 의해서 제어됨. 이 때, ROS를 기반으로 로봇의 컴퓨터와 외부 원격 컴퓨터 사이에 WIFI 라우터를 사용하였으며, 이를 이용하여 두 컴퓨터가 서로 통신하고 서로 데이터를 공유할 수 있는 네트워크를 구축함.

④ 로봇에서 컴퓨터는 센서 데이터를 수신 및 처리하고, 로봇을 제어하기 위한 네비게이션 알고리즘을 적용하였으며, 원격 컴퓨터는 필요한 경우 데이터를 저장하고 시각화하여 명령을 로봇에 보내는 역할을 수행함.

④ 센서 퓨전

- ㉑ 자율주행 시스템을 위하여 센서 퓨전 시스템은 앞서 언급한 로봇 플랫폼에 부착된 센서를 이용하여 구성됨.
- ㉒ 센서 퓨전 시스템은 두 가지 탐색 모드를 갖고 있으며, 이를 이용하여 로봇이 농장에 접근 가능한 것을 확인함.
- ㉓ 첫 번째 모드에서는 GPS, IMU, Wheel 엔코더가 확장된 칼만 필터에 통합되어 정확한 주행 정보를 제공함. 이후 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘은 주행 거리 데이터를 LiDAR 데이터와 결합하여 로봇이 경로 계획을 수립하고 레이저 스캔을 기반으로 경로를 탐색하도록 함.
- ㉔ 로봇의 위치를 시각화하고 경유지를 보내기 위해 원격 컴퓨터에서도 서버를 구축하였으며, 사용자가 지도를 오프라인으로 활용할 수 있도록 Google 지도 데이터 서버를 통해 데이터를 저장함.
- ㉕ 두 번째 모드에서는 Kinect의 RGB 센서의 비전 시스템이 추가 적용되었으며, 비전 시스템은 로봇의 상대적 위치와 방향을 연속적으로 결정하고 SLAM 알고리즘에 대한 실시간 웨이 포인트를 탐색 목표로 할당하기 위해 사용됨.



< 센서 퓨전 시스템 개략도 >

- ㉖ 또한, 두 번째 알고리즘은 로봇의 방향을 직선 방향으로 결정하기 위하여 머신 비전 시스템을 사용함.
- ㉗ 알고리즘은 주행 경로를 감지하고, 허프(Hough) 변환을 사용하여 가장자리를 따라 2개의 선을 맞추고, 상단 가장자리의 두 줄에서 행의 중심선을 계산함. 중심선의 위치와 방향에 따라 로봇의 상대적 위치와 방향을 수학적으로 결정가능하며, 자세한 단계는 아래와 같음.
 - 아래 식을 사용하여 Green_ness 이미지와 Grey_scale 이미지를 RGB 이미지로 변환

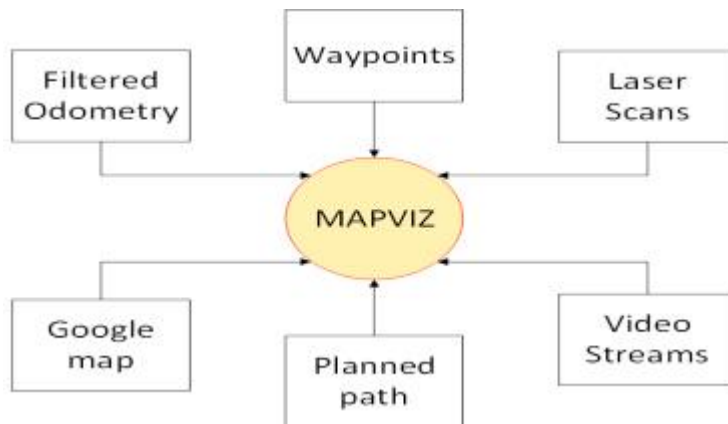
$$\text{Green_ness} = \frac{2 \times \text{Green} - \text{Blue} - \text{Red}}{\text{Blue} + \text{Green} + \text{Red}}$$

- Green_ness 임계 값과 밝기 임계 값 적용.
- 필터링 된 이미지를 맵으로 변환.
- Hough Line Transform을 적용하여 레퍼런스 라인 탐색.
- 왼쪽과 오른쪽 상단 모서리에 두 줄을 맞춤.

- 두 선과 중심선의 교점을 계산.
- 로봇의 표제와 도로의 중심선 사이의 각 계산.
- 로봇의 중심과 도로의 중심선 사이의 거리 계산.

④ Data Visualization 및 저장

- 각 센서에서 수집된 데이터는 WiFi 네트워크를 통해 실시간으로 시각화되고 저장되며, 로봇 컴퓨터와 원격 컴퓨터는 ROS를 이용하여 동기화됨.
- 본 연구에서는 모든 센서 데이터뿐만 아니라, Google 맵을 표시하기 위하여 오픈 소스 데이터 시각화 라이브러리인 MAPVIZ를 사용함.
- Raw 데이터는 향후 다양한 처리를 위해 데이터를 다시 사용할 수 있도록 ROS bagfiles에 별도로 저장함.
- 아래 그림은 MAPVIZ에서 수집되고 시각화된 데이터에 대하여 나타냄.



< MAPVIZ library를 이용한 데이터 Visualization >

⑤ Visualization

- 로봇 플랫폼을 통해 수집된 데이터는 원격 컴퓨터를 통해 무선으로 실시간 데이터 시각화 작업을 통해 아래 그림과 같이 확인 가능함.
- MAPVIZ는 Google 지도, GPS 위치(노란색 라인) 및 라이브 비디오 스트림을 아래 그림과 같이 나타냄.



< MAPVIZ 소프트웨어를 이용한 Google 지도, 위치 등 Visualization 결과 >

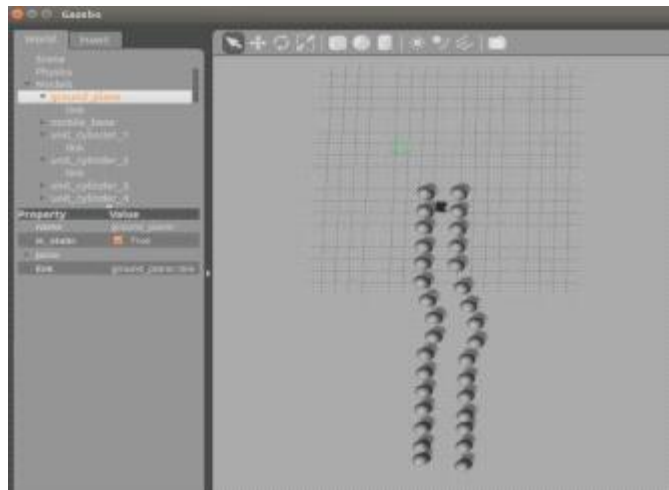
⑥ 시뮬레이션 및 필드시험을 통한 모드 성능 평가

- ① 두 가지 모드는 위치 인식 정확도, 장애물 회피 능력 및 행 수행 성능에 대해 평가함. 현지화 정확도를 테스트하기 위해 MAPVIZ를 사용하여 Google지도에서 7개의 중간 지점을 설정함.
- ② 로봇이 각 경유지에서 멈추면 50 개의 GPS 지점을 수집하고 그 평균을 실제 위치로 계산함.
- ③ 그 결과, 확장 칼만 필터를 사용하여 0.43 m의 평균 위치 파악 오차를 얻었으며, 아래 표는 7회 실행 결과를 나타냄.

	1	2	3	4	5	6	7	Mean error
Error (m)	0.27	0.41	0.38	0.49	0.56	0.29	0.61	0.43

< 확장된 칼만 필터를 사용한 로봇의 위치 정확도 >

- ④ 장애물 회피 및 경로 추종은 Gazebo라는 시뮬레이션 소프트웨어를 통하여 평가를 진행함. Gazebo에서는 로봇 플랫폼 모델과 필드시험지에 대한 단순화된 모델을 만들었으며, 시뮬레이션 소프트웨어 상에서 개발된 모드에 대한 알고리즘을 평가함.
- ⑤ 아래 그림은 시뮬레이션에서 구현된 필드조건에서 로봇 플랫폼이 주행한 결과를 나타냄.

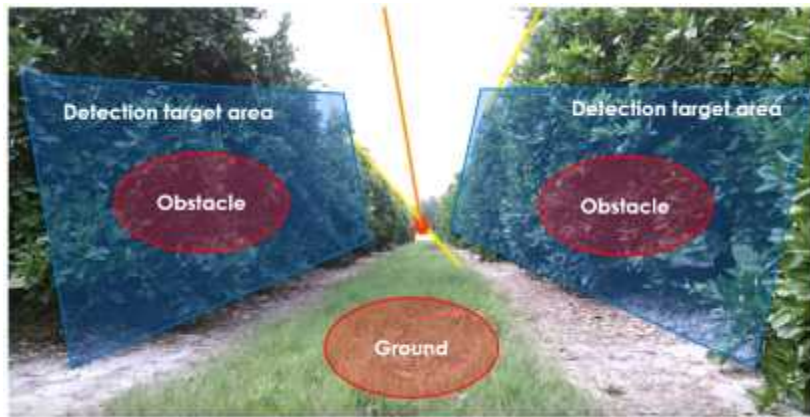


< 알고리즘을 사용한 로봇 플랫폼의 주행 시뮬레이션 결과 >

- ⑥ 필드시험은 미국 플로리다대학교 필드시험지에서 수행되었으며, 개발된 자율주행 로봇 플랫폼은 양 옆에 있는 장애물(나무)을 인식하고 장애물을 회피하여, 나무 사이의 중앙선을 따라 주행한 것을 확인함.



< 개발된 플랫폼을 이용한 필드 성능 평가 >



< 자율주행 플랫폼을 이용한 장애물(나무) 인식 결과 >

© 포장면적별 주요 사용 농기계 및 농작업기 조사

농업기계의 크기는 과대하면 기계의 여유능력이 발생하여 경제적인 손실을 초래하고, 또 과소하면 적기에 기대하는 작업을 완료할 수 없다. 일반적으로 기계의 크기는 경영면적, 경지조건, 영농형태 등을 고려하여 결정한다. 아래 표는 트랙터 출력규모에 따른 작업별 평균 대당 연간 작업면적이다. 플라우 경운작업, 로타리 경운작업, 예취작업, 베일작업, 램핑작업, 퇴비살포작업의 평균 대당 연간 작업면적은 각각 33.3, 71.5, 65.9, 125.2, 137.2, 96.5 ha로 나타났다.

Operation	Rated power class ¹⁾					Ave.	
	I	II	III	IV	V		
Plow tilling	23.7 (7)	26.5 (2)	45.5 (5)	70.0 (1)	17.0 (1)	33.3 (16)	24.2
Rotary tilling	39.6 (9)	66.3 (8)	99.5 (13)	90.0 (2)	57.1 (5)	71.5 (37)	78.9
Cutting	73.3 (3)	50.0 (1)	54.3 (5)	93.3 (3)	62.0 (5)	65.9 (17)	40.4
Baling	62.1 (8)	105.0 (6)	102.2 (18)	215.0 (4)	187.3 (11)	125.2 (47)	79.9
Wrapping	131.4 (6)	220.0 (1)	90.0 (3)	186.7 (3)	130 (1)	137.2 (14)	84.5
Manure spreading		110.0 (1)	83.0 (1)			96.5 (2)	13.5
Total average	112.6 (18)	144.8 (11)	158.9 (26)	390.0 (5)	215.6 (13)	171.3 (73)	2.1
S.D.	67.9	89.2	109.6	207.1	96.1	125.8	4.5

1) I : 75~83 kW, II : 89~94 kW, III : 98~101 kW, IV : 113 kW, V : 124 kW

2) Number in parenthesis means number of tractor surveyed.

3) Area means sum of various operation areas.

<트랙터의 평균 대당 연간 작업면적>

트랙터에서 주요 사용하는 작업기는 플라워 작업기에 의한 경운작업과 로타베이터에 의한 로타리 경운작업 및 모우어에 의한 사료작물 예취작업, 베일러에 의한 베일작업, 랩핑기에 의한 베일 랩핑작업 및 기타 퇴비살포기에 의한 퇴비 살포작업이 이루어진다. 아래 표는 주요 작업 내용에 따른 트랙터 출력규모별 조사 트랙터 분포를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 사료 작물의 예취, 베일, 랩핑작업을 전용으로 하는 트랙터는 약 47.9%, 플라워와 로타리 경운작업을 전용으로 하는 트랙터의 비율은 약 24.6%, 플라워, 로타리 경운작업과 사료 작물의 예취, 베일, 랩핑작업, 기타 퇴비 살포작업을 복합으로 하는 트랙터는 약 27.5%로 나타났다. 따라서 사료작물 수확과 경운작업에 관련된 전용 작업을 하는 트랙터의 비율이 매우 높은 것으로 분석되었다. 또한, 로타리 경운, 예취, 베일, 랩핑 작업과 같이 단일 작업만을 전용으로 하는 트랙터의 비율도 41.0%에 이르러 대형 트랙터가 주로 사료작물 수확을 대상으로 특정 작업에 전용으로 사용되고 있는 것으로 조사되었다. 한편 트랙터 출력규모에 따른 작업 내용의 차이는 없는 것으로 나타났다.

Operation	Rated power class					Total	Ratio (%)
	I	II	III	IV	V		
Rotary tilling		3	3		1	7	9.5
Cutting	1		1	1		3	4.1
Baling	3	3	6	1	3	16	21.9
Wrapping	4					4	5.4
Rotary tilling+Plow tilling	5	1	4		1	11	15.0
Rotary tilling+Baling	1	1	4		3	9	12.3
Cutting+Baling	1		3		5	8	10.9
Wrapping+Baling			2	1		3	4.1
Rotary tilling+Cutting+Baling		1	1	1		3	4.1
Rotary tilling+Baling+Wrapping	1					1	1.4
Rotary tilling+Plow tilling+Baling			1			1	1.4
Rotary tilling+Wrapping+manure spreading		2				2	2.7
Cutting+Baling+Wrapping			1			1	1.4
Cutting+Baling+manure spreading			1			1	1.4
Rotary tilling+Plow tilling+Baling+Wrapping	1					1	1.4
Rotary tilling+Plow tilling+Cutting+Baling	1					1	1.4
Rotary tilling+Plow tilling+Cutting+Baling+Wrapping				1		1	1.4
Total	18	11	26	5	13	73	100

1) I : 75~83 kW, II : 89~94 kW, III : 98~101 kW, IV : 113 kW, V : 124 kW

<작업기별 트랙터 사용 대수>

① 실수요자의 주요 작업 경로 조사

실수요자의 작업 실태를 조사하기 위해서 수요자 조사를 실시하였다. 수요자 조사는 강원도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도 5개도 10개시에서 실시하였으며, 2016년 실시한 자료와 2018년 11월 자료 총27건을 분석하였다. 조사 항목은 아래 그림과 같이 트랙터 및 작업기 보유 현황, 작업 조건, 작업 패턴이다.

수요자 조사를 한 결과 보유하고 있는 트랙터는 35kw~98kw이며, 40~60kw 트랙터가 62.5%로 가장 선호하는 출력의 트랙터였다. 작업은 쟁기, 로터리, 균평, 수확, 시비가 있었으며 쟁기 및 로터리 경우 작업이 79%로 가장 많은 비율을 차지하였다. 그리고 작업 패턴은 아래 표와 같이 C형 선회 패턴이 51.85%, R형 선회패턴이 18.52%, X형 선회 패턴이 3.70% 기타 선회 패턴이 25.92%로 C형 선회 패턴을 가장 선호하는 것으로 조사되었다. 기타 선회 패턴으로는 사이 걸러 경운법(14.81%)과 Pivot(11.11%) 등이 있다. 기존에 선행 연구에서 개발된 X형 선회 패턴은 작업 순서의 번거러움과 불편함으로 선호 하지 않으며, C형 선회 패턴을 선호하는 이유는 작업의 용이성 때문으로 조사되었다.

사용자 작업 실태 설문 조사지

성명:	연락처:	경력:	거주지역:	조사일:
		초	경주	2018.11.15

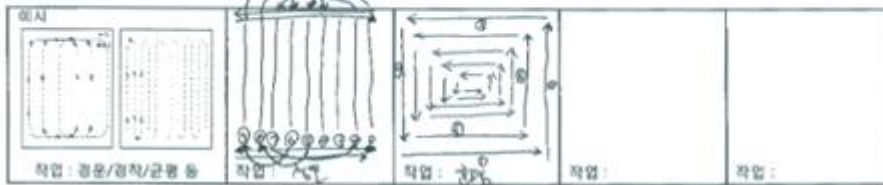
트랙터 및 작업기 보유 현황

번호	제조사	모델명	구매일자	계기판 사용 시간(트랙터)
1	농안	T720	2010년	1500
2	AG	AW-2400	11	
3	농안	270	11	
4				

작업 조건

작업 구분	작업 명칭(명)	사용 트랙터	사용 작업기	작업단수(속도)	경심(cm)	평균 작업 시간(분)
	1000	주식형	270(4배)	1-1	15	1
	11	11	외배	1-2, 1-4		2

작업 패턴



<사용자 작업 실태 조사서>

작업 경로	비율(%)
C형	51.85
R형	18.51
X형	3.70
기타	25.93

<작업 경로 선호도>

㉔ 농작업 최적 경로 선정

㉔ 실 작업경로 데이터 로깅 시스템 개발 및 경로 분석

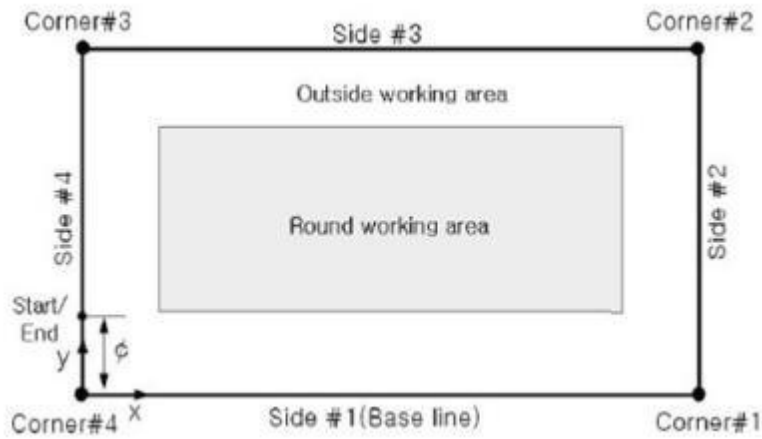
㉔ 농작업 유형 분석 - 경운 작업

농작업에서 사용되고 있는 농용 트랙터의 주요 작업내용 중 큰 부분을 차지하고 있는 것은 경운작업이다. 경운 작업은 토양을 부드럽게 하고 통기성 및 보수력을 증대시켜 줌으로써 토양의 물리성을 개선하고 작토층을 확대 및 잡초를 방지 할 수 있다. 이러한 경운작업은 작업자에 따라 작업순서와 전진 및 후진시의 작업속도가 서로 다르다. 이러한 작업자의 작업 성향은 작업자가 경운하고자 하는 포장의 작업에 적합한 기술을 적용한 것이며, 자율주행경운을 위하여 포장여건에 알맞은 표준경로를 필요로 한다. 포장에서 트랙터 경운작업을 하기 위해서는 구획크기의 제한으로 선회가 필요하며 논에서 선회 주행할 때는 트랙터와 포장구획의 조건에 의하여 선회형태가 다르다. 즉, 경지정리된 포장구획의 크기와 사용되는 트랙터의 최소회전반경에 따라 선회유형이 정의될 수 있다.

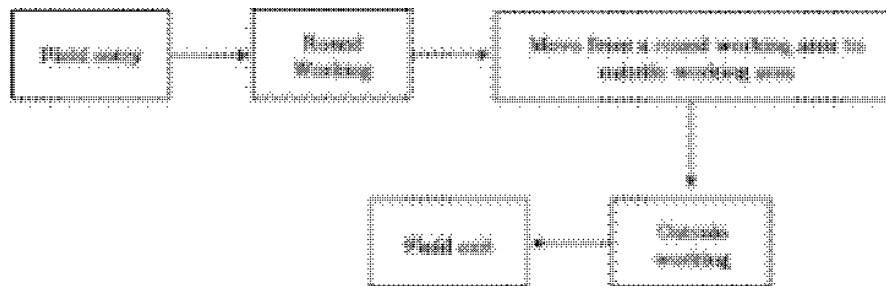
㉔ 포장 경운 작업 순서 및 선회 유형 분석

트랙터를 이용하여 포장에서 경운작업을 하기 위해서는 포장의 형태와 조건에 따른 작업순서가 다르게 된다. 포장에서의 경운작업은 포장의 진입로에서 최초 작업이 이루

어지는 지점까지 이동하는 '작업 준비'와 그리고 '포장 경운작업' 마지막으로 '작업 종료'로 구분할 수 있다. 포장 경운작업은 아래 그림에서와 같이 작업영역을 2가지로 구분할 수 있다. 즉 트랙터가 포장의 안쪽에서 왕복으로 주행하면서 경운작업을 실시하는 왕복작업부와 왕복작업부의 작업 종료 후에 경운작업이 이루어 지지 않은 포장의 외곽부를 경운하기 위한 회경 작업부로 나누어진다. 아래 그림은 포장에서의 작업순서를 나타낸 그림이다.



<경운작업 영역의 구분>



<일반적인 경운작업 순서>

트랙터가 포장에서의 경운 작업 시 작업영역은 왕복작업부와 회경작업부로 구분된다. 포장 안쪽의 왕복작업부에서는 작업의 진행방향 즉 전진작업에서 회귀작업으로 또는 회귀작업에서 전진작업으로 경로 이동 시 180도 회전하게 된다. 관련 선행연구 결과(서일환, 2010)에 따르면 다음의 3가지 형태로 구분할 수 있다.

① C형 선회 패턴

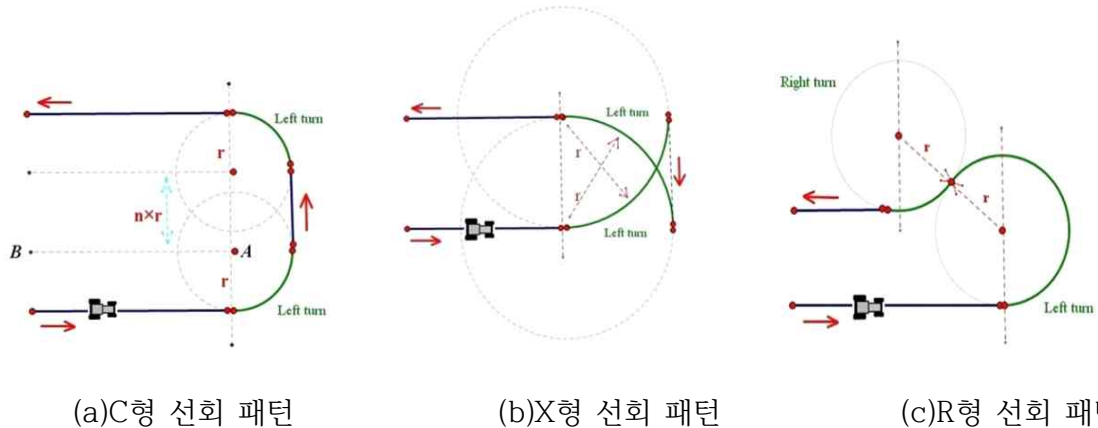
아래 그림의 (a)는 C형 경운작업 유형을 나타낸 것으로 직진 작업을 마친 뒤 선회하여 인접 새머리부를 경운하지 않고 경운 작업 폭의 몇 배로 건너뛰어 작업하면서 하나의 구역을 경운하는 방법이다. C형 작업은 포장의 회경작업 영역을 제외한 전체를 진행 부분과 회귀부분으로 나누어 작업이 이루어지며, 진행부분에서 회귀부분으로 이동 시 트랙터의 진행방향이 바뀌어 없이 연속적인 전진주행으로 작업이 이루어진다. 진행부분에서 회귀부분으로 진입 또는 회귀부분에서 진행부분으로 진입 시 내부 왕복부분의 1/2거리를 이동하여 진입하며, 작업기는 올려진 상태로 이동하고 직진 작업 시 작업기를 하강하여 작업이 이루어진다. 이러한 C형 경운작업은 진행방향이 후진이 없는 경운방법으로 연속적으로 작업이 이루어진다.

② X형 선회 패턴

작업 형태는 아래 그림의 (b)와 같이 진입 후 전진작업과 회귀작업이 서로 인접하여 이루어지는 순차경법으로 작업이 이루어지며 진행 작업부에서 회귀작업부로의 이동 방법이 X형 선회 방법으로 선회하게 된다. 새머리부에서의 선회는 좌회전 다음 후진 그리고 좌회전의 순서로 이루어지며 작업기는 상승하여 이동하게 된다. 이러한 방법은 작업자가 다른 작업 진행부로 이동하기 위하여 트랙터의 좌회전-후진-좌회전 순으로 변경해야 하는 특징이 있으므로, 작업자의 피로도를 높이는 단점이 있다.

③ R형 선회 패턴

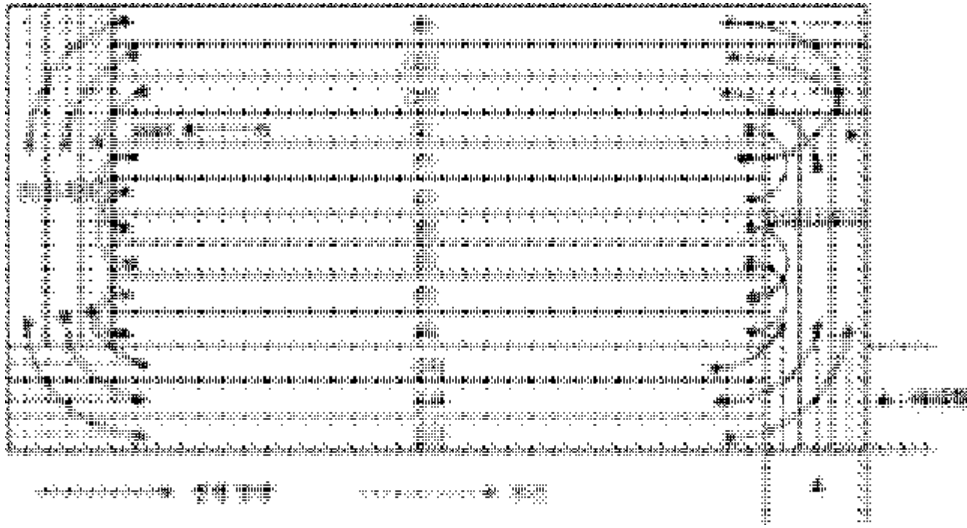
작업순서는 아래 그림의 (c)와 같이 작업 진행부분과 회귀부분이 서로 붙어있으며 X형 작업과 동일하게 순차경법으로 작업이 진행되지만 진행부분과 회귀부분간의 이동시 선회는 R형태의 선회를 실시하고 있으며 트랙터 작업의 진행방향이 바뀌지 않고 연속적인 작업이 가능하지만 선회 시 핸들을 왼쪽과 오른쪽으로 연속하여 변경하여야 하는 특징이 있다.



<경운작업 중 트랙터의 선회유형>

④ 사이 걸러 경운법

위의 선행 연구에서 제시된 3가지 경운작업 이외에 사용자 작업 실태 조사에서 확인한 사이 걸러 경운법을 본 연구에서 추가하여 분석을 실시하였다. 작업 순서는 아래 그림과 같이 R형 작업과 유사하지만 트랙터의 선회 반경을 고려하여 1열씩 건너뛰어 짝수열 작업 후 홀수열을 작업하게 된다. 작업 중에 트랙터의 진행 방향이 바뀌지 않고 연속 작업이 가능하다.



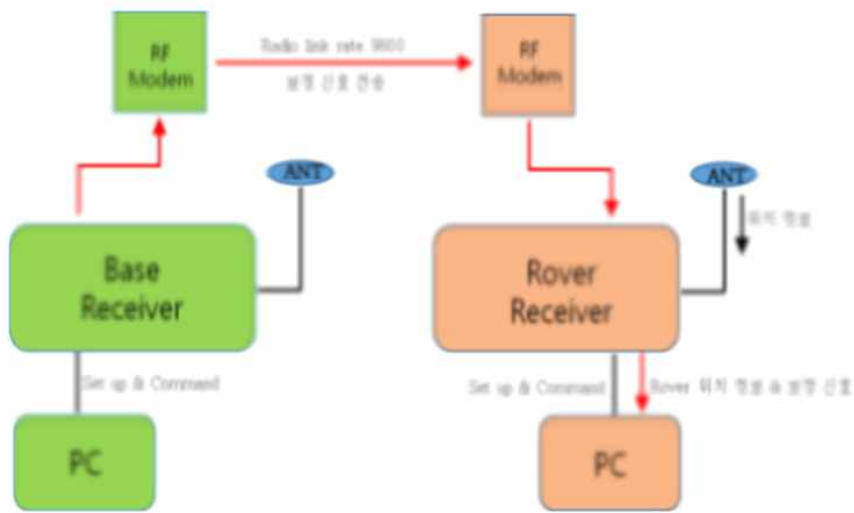
<사이 걸러 경운법>

㉔ 실 작업경로 데이터 로깅 시스템 개발

실 작업 경로를 분석하여 작업기 별 최적 경로를 선정하고 경로 생성 알고리즘을 개발하기 위해서는 위의 작업경로에 대한 특성 분석이 가능한 시스템 개발이 필요하다. 본 연구에서는 작업 경로를 분석하기 위하여 실 작업 경로 데이터를 로깅 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 트랙터의 정확한 위치정보 획득 및 제어를 위하여 GPS 기준국을 설치하였다. 기준국은 RF 모뎀을 이용하여 이동국과 통신하도록 시스템을 구성하였다. 구성 개요는 아래 그림과 같다. GPS의 이동국과 기준국 설치에 사용된 제품의 상세 사양은 아래 표와 같다. 구성된 GPS 시스템은 다음과 같은 순서로 이동국과 기준국간의 통신 설정을 수행한다.

- PC와 기준국 수신기를 연결
- 기준국 쪽의 PC에서 Connect program를 실행
- 명령어를 Connect program 커맨드 창에 입력
- 입력이 끝난 후 Connect program와 기준국 수신기의 연결을 해제
- Connect program와 이동국 수신기를 연결
- 명령어를 Connect program 커맨드 창에 입력

아래 그림은 이동국과 기준국간의 통신 상태 확인 후 트랙터에 이동국을 탑재하여 실 경운궤적을 계측하는 것을 촬영한 사진이다. 기준국은 개활지에 안테나를 설치하여 GPS 신호를 수신할 수 있도록 설치한 후 RF 모뎀과 연결하여 이동국과 통신하도록 하였다.



<작업경로 데이터 로깅 시스템 구성도>





<작업 경로 데이터 로깅 시스템>

구성 요소	제조사	상세 사양	비고
PwrPak7D	NoVatel	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal Position Accuracy: <ul style="list-style-type: none"> -Single point L1 : 1.5m -Single point L1/L2 : 1.2m -DGPS : 0.4m -RT2 : 1cm • Max Data Rate : 50Hz 	기준국 GPS
GNSS 502		L1/L2 GPS+GLONASS, BeiDou B1/B2, Galileo E1/E5b, L-band, kinematic, zero-offset antenna, TNC connector	GPS 수신 안테나
UMS-WMHX 2420	언맨드 솔루션	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency 2.410 ~ 2.48 GHz • Serial Interface : RS232 • Serial Baud Rate : 300bps ~ 230.4kbps • Link Rate : 19.2~2230.4kbps 	기준국 RF 모뎀

<데이터 로깅 시스템 구성 요소>

㉔ 실 작업 경로 별 특성 분석

트랙터 작업자의 트랙터 전·후진 및 작업기 제어에 따른 경운 작업 별 특성을 분석하기 위하여 기존 선행 연구에서는 다양한 경운궤적계측실험을 실시하였으나, 본 연구에서는 아래 그림과 같이 100m*40m 규격인 전북 부안군 지역의 동일한 규격 4개 포장에서 각각 C형, R형, X형 선회 패턴과 사이 걸러 경운법을 이랑 쟁기 및 로터베이터 2가지 작업기 별로 진행하여 총 8개의 작업 경로를 아래 그림과 같이 계측하였다.

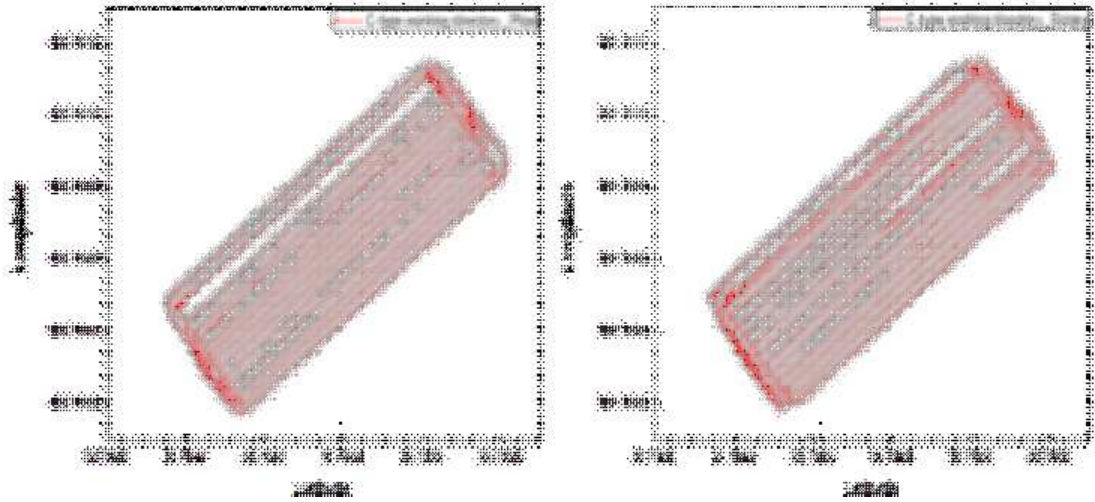


<작업 경로 별 경운궤적계측실험 포장지>

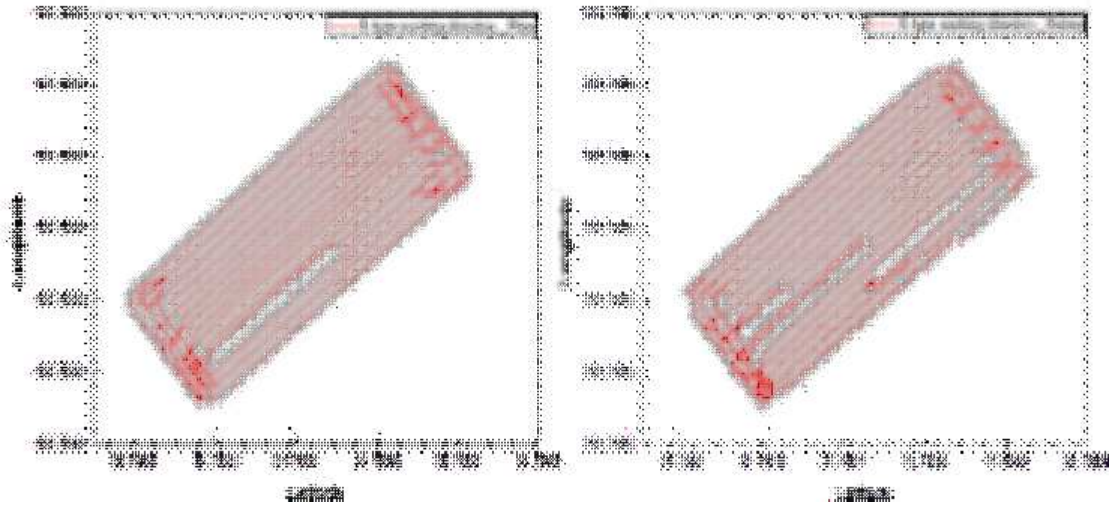
시험을 통해서 계측한 데이터를 분석한 결과 작업 시 슬립과 머리땅 작업이 경로생성 및 경로 추종 시스템 개발 시 고려되어야 할 요소임을 확인 하였다.

실제 포장에서 토양의 반력에 의해 회전 주행 시 슬립현상이 발생한다. 본 시험에서는 아래 그림과 같이 C형 선회 패턴과 사이 걸러 경운 법의 로타리 경운 작업에서 선회 시 측면으로 밀려 선회 모형을 타원형으로 발생하는 것을 확인하였다. 특히 선회 구역에서 왕복 작업구역으로 진입 시 슬립이 발생하였다. 슬립을 최소화하기 위해서는 주행 슬립 예측 기반의 동적 경로 추종 알고리즘 개발이 필요하다.

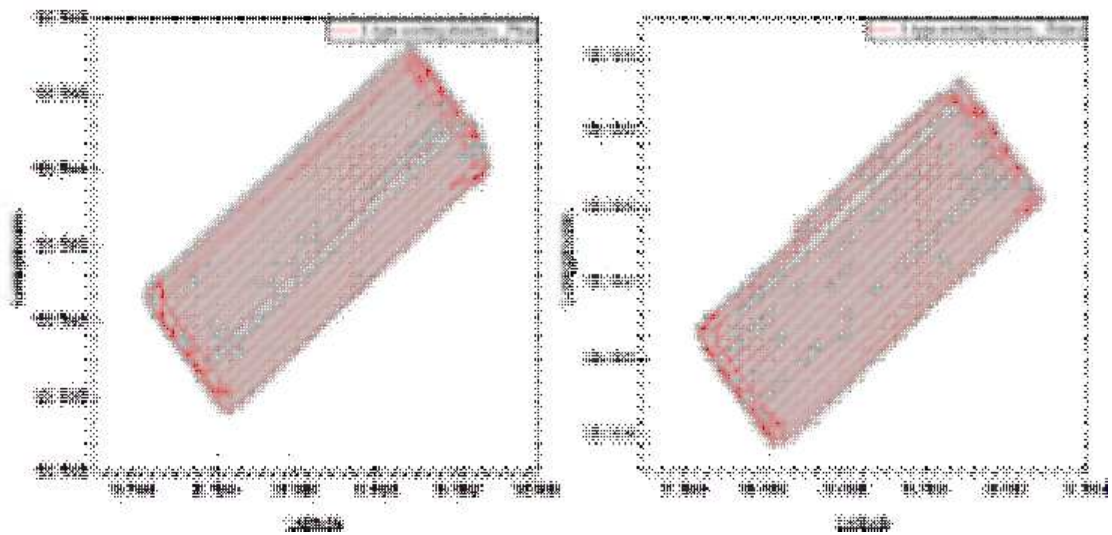
머리땅 부분의 선회 시 선회 반경으로 인한 미경작지가 많이 발생한다. 그리고 내부 작업 구간에서의 선회 시 정확한 위치에서의 작업기 제어가 필요하다. 내부 작업 경로 진입 시 작업기를 하강하고 탈출 시 작업기를 상승 시키는 시점이 불규칙하므로 머리땅 경운 시 불필요한 작업경로가 추가 되거나 미 경작지가 발생하는 것을 확인 하였다. 또한, 현재 선행 연구에서 개발된 경로생성 알고리즘은 머리땅 부분의 선회 구간에서 C형 패턴으로 작업하여 선회 반경으로 인한 미경작지가 발생하게 된다. 머리땅 경운 시 선회 구간에서 X형 패턴의 작업 경로로 개선하여야 미경작지를 최소화 할 수 있다.



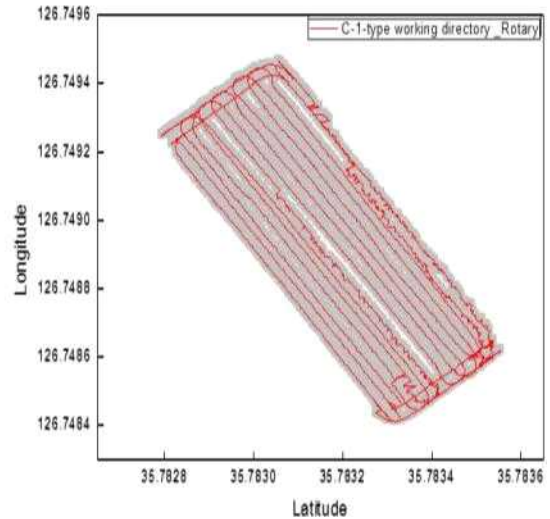
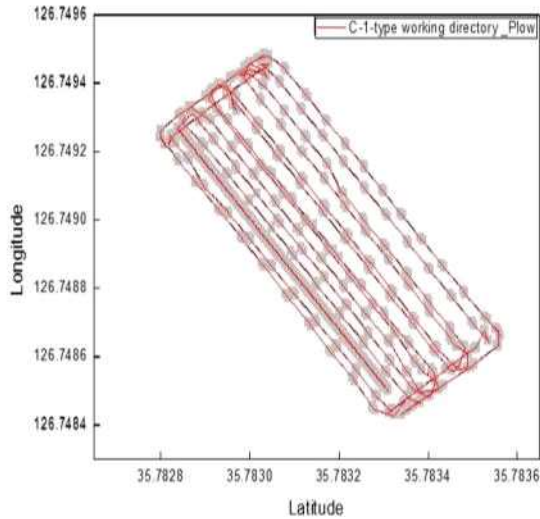
<C형 선화 패턴 실 작업 경운궤적계측 자료>



<R형 선화 패턴 실 작업 경운궤적계측 자료>



<X형 선화 패턴 실 작업 경운궤적계측 자료>



<사이 걸러 경운법 실 작업 경운궤적계측 자료>

㉔ 최적 경로 선정 및 생성을 위한 측정 시스템 개발

㉕ 작업 경로 및 작업기에 따른 효율 분석을 위한 연료 소모량 측정 시스템 개발

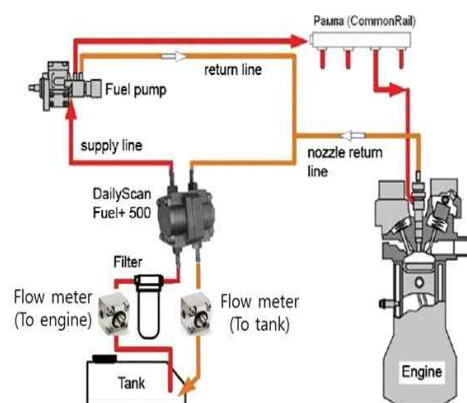
연료 소모량은 2개의 펄스 출력 유량계 및 인디케이터를 이용하여 엔진으로 유입되는 유량과 엔진에서 연료탱크로 리턴 되는 누적 유량을 각각 측정하여 그 차이로서 작업 시간 동안 사용한 연료량을 산출하였다. 아래의 표는 포장시험에서 사용된 유량계의 제원을 나타내고, 아래 그림은 트랙터의 엔진 룸 내부에 설치한 유량계와 연료 소모량을 측정하는 원리를 나타낸 개략도이다.

항 목	Specifications
Model	OG2-SS5-VHQ-B
Flow range	0.03 ~ 4.0[L/min]
Accuracy	±0.5% FSD
Repeatability	±0.1%
Make	Titan U.K

<유량계 제원>

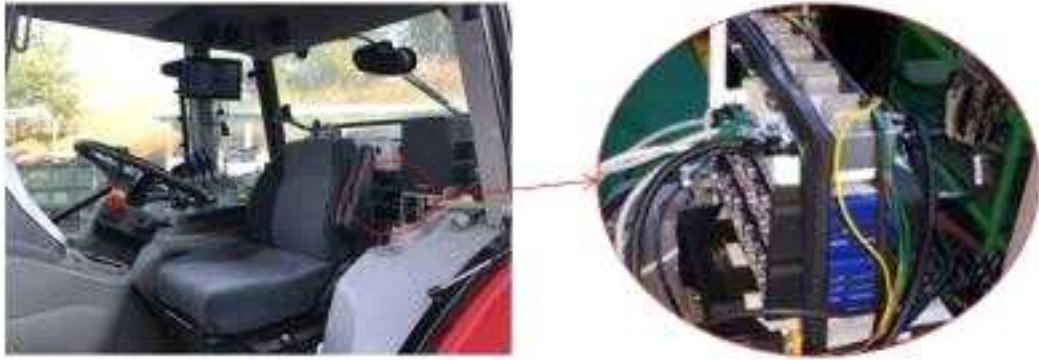


<유량계 장착 사진>



<연료 소모량 측정 개략도>

또한, 작업 경로 및 작업기에 따른 포장 실 작업율을 계산하기 위해 3점 히치의 위치 등을 측정할 수 있는 데이터 로깅 시스템을 구성하였다. 데이터 로깅 유닛은 아래 그림과 같이 HMB사의 QuantumX 840B 유닛을 사용하였다.



<데이터 로깅 유닛>

㉔ 작업 경로 및 작업기에 따른 효율 분석을 위한 농작업 시험

① 시험용 트랙터

농작업 시험에서 자사의 105마력 급 트랙터를 사용하였으며, 외경은 4,225(L) × 2,140(W) × 2,830(H) mm, 총 중량은 3,985 kg이다. 트랙터에는 기계식 변속기가 탑재되어 있고, 주변속은 동기물림식, 부변속은 상시물림식이다. 주변속의 변속단수는 4단 (1, 2, 3, 4) 및 파워시프트(High, Low)로 총 8단이며, 부변속의 변속단수는 4단(C, L, M, H)이다. 트랙터 전·후진은 파워셔틀(power shuttle)로 전진 32단, 후진 32단의 기어비를 갖는다. 아래의 그림과 표는 시험에 사용된 트랙터와 제원을 나타낸다.



<농작업 시험에 사용된 트랙터 사진>

항 목	Specifications	
L x W x H (mm)	4,225 x 2,140 x 2,830	
Weight (kg)	3,985	
Engine Power (HP)	105	
Transmission	주변속	4단 및 파워시프트(High, Low)
	부변속	4단

<트랙터 제원>

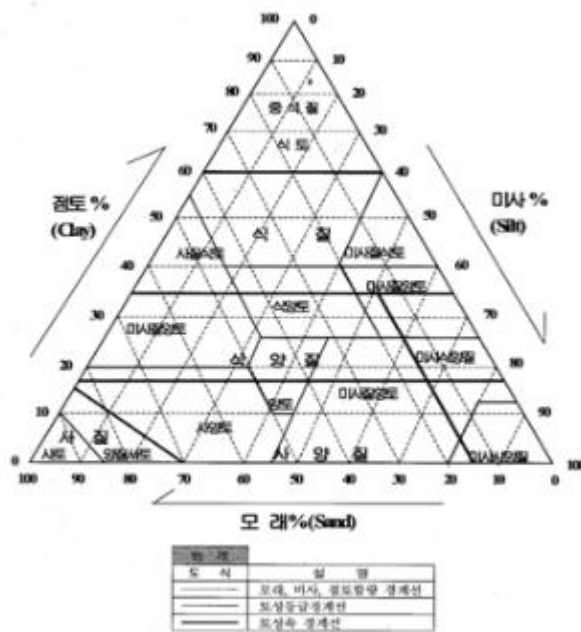
② 농작업 시험 포장지

포장시험은 전라북도 부안군 동진면에 위치한 논 토양에서 수행하였다. 포장지는 대한민국 표준 구획 크기인 100m×40m 크기의 필지 4곳을 선정하였고, 동일한 규격 및 토질 조건을 가진 포장지를 대상으로 쟁기 및 로타리 작업을 실시하였다.

시험 포장지의 토양 조건 분석은 토성, 수분 함량 그리고 원추 관입지수를 대상으로 실시하였다. 토성은 포장 시험지 각각 토양 샘플을 채취하여 미농무성(USDA)법에 따라 분석하였고, 원추 관입지수와 수분 함량은 포장지 별 임의의 9개소에서 측정을 하였다.

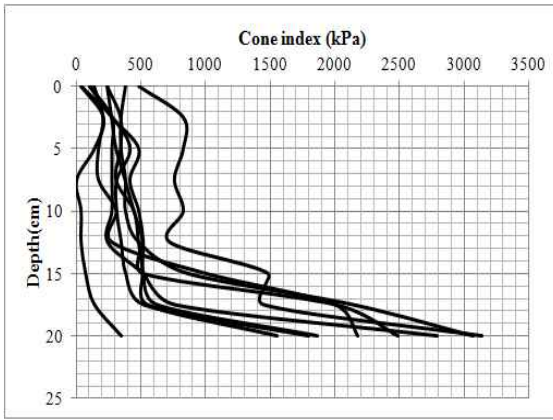
원추 관입지수는 Soil Compaction Meter(SC900, Spectrum Technology, USA)를 이용하여 0~25cm 범위에서 2.5cm 간격으로 측정하였으며, 수분 함량은 Soil Moisture Meter(TDR300, Spectrum Technology, USA)를 이용하여 측정하였다.

각 시험 포장지의 토양 샘플을 채취하여 기계적 분석으로 모래, 미사, 점토 함량을 산출하고 아래 그림과 같이 USDA(미농무성)에서 정한 토성 삼각표를 이용하여 시험 포장지의 토성을 분석한 결과 모두 양질토(loam)인 것으로 나타났으며, 수분 함량은 39.9% ~ 42.7%로 4곳의 토양 수분 함량이 유사한 것으로 나타났다.

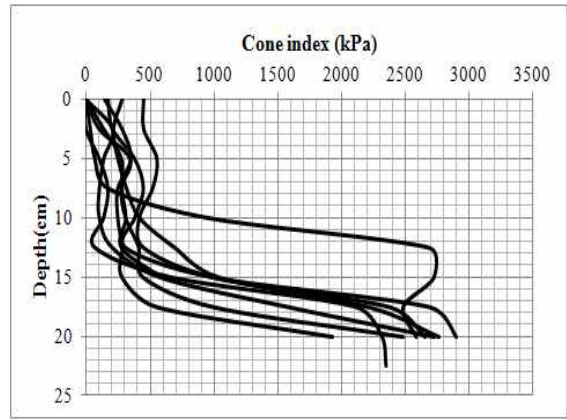


<토성 삼각표>

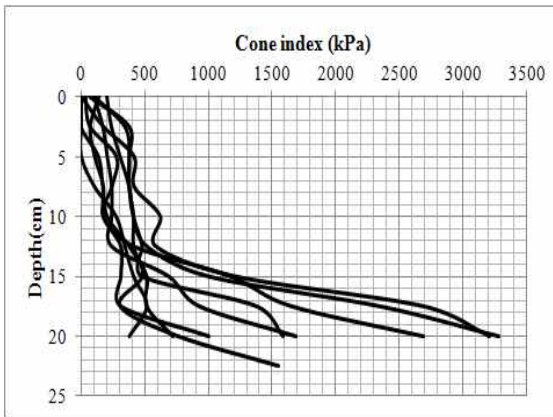
원추 관입 지수는 아래 그림과 같이 토양의 깊이 15cm 전·후로 경도(kPa)가 급격히 증가하는 경향을 나타냄으로써 시험 포장지 4곳 모두 15cm 전·후로 경반이 형성되어 있음을 확인할 수 있었으며, 원추 관입 지수 측정 결과를 토대로 농작업 시험 시 작업 기의 경심 깊이를 15cm로 설정하였다.



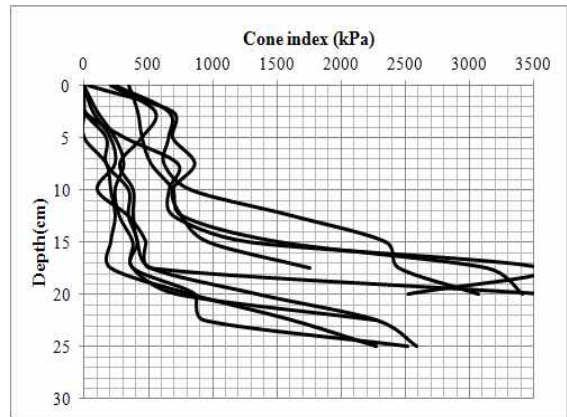
<시험포장지 #1. C형 선회 패턴>



<시험포장지 #2. R형 선회 패턴>



<시험포장지 #3. X형 선회 패턴>



<시험포장지 #4. 사이 걸러 경우>

<원추 관입 지수>

③ 농작업 시험

트랙터 경운 작업은 동양물산기업(주)의 성능시험 업무를 맡고 있는 숙련된 작업자가 수행하였다. 작업 단수는 쟁기 경운 작업의 경우 엔진 최대 회전수 기준 차속 6.5km/h (부변속 M단, 주변속 2단, 시프트 High), 로터리 경운 작업은 3.3km/h(부변속 L단, 주변속 4단, 시프트 Low)로 설정하였고, 트랙터 구동은 실제 작업자가 많이 사용하고 견인력이 높은 4륜 구동 모드로 실시하였다. 작업 경심은 원추 관입 지수 측정 결과를 토대로 15 cm를 유지하도록 3점 히치를 실시간 제어하도록 하였다. 경운 경로 별 신뢰성 있는 데이터를 수집 및 분석하기 위해 직진 작업 구간에서는 엔진 최대 회전수, 선회 및 이동 구간에서는 엔진 회전수를 1500 rpm을 유지하며 시험을 진행하였다. 쟁기 및 로터리 경운 작업에 사용된 작업기는 경폭이 280cm인 이랑쟁기 WJSP-8(웅진기계, Korea)과 경폭이 258cm인 로타베이터 E260(한국첼리, Korea)을 사용하였다. 아래 그림은 실제 쟁기 및 로터리 경운 작업 모습을 나타낸다.



<쟁기 경운 작업 사진>



<로터리 경운 작업 사진>

㉔ 작업 경로 및 작업기에 따른 효율 분석

아래의 표는 C, X, R, 사이 걸러 경운 작업 경로에 따른 쟁기 및 로터리 경운 작업 시의 시험 결과를 나타낸다. 총 작업 시간은 한 포장 내에서 작업 시작부터 완료까지의 총 소요 시간을 의미하며, 유효 작업 시간은 총 작업 시간에서 선회 및 이동에 따른 비 작업 시간을 뺀 시간을 의미한다.

실 작업율은 총 작업 시간과 유효 작업 시간과의 비율로써 산출하였고, 연료 소모량은 총 작업 시간 동안 사용한 연료량을 적산 산출하였다.

구분	총 작업시간 (sec)	유효작업시간 (sec)	실작업율 (%)	연료소모량 (liter)
C형 선회 패턴	1244.32	903.52	72.61	5.16
X형 선회 패턴	1245.39	869.99	69.86	4.88
R형 선회 패턴	1274.49	875.89	68.72	5.03
사이걸러 경운법	1292.98	938.38	72.57	4.85

<쟁기 경운작업 시험 결과 분석>

구분	총 작업시간 (sec)	유효작업시간 (sec)	실작업율 (%)	연료소모량 (liter)
C형 선회 패턴	2201.10	1718.00	78.05	13.58
X형 선회 패턴	2110.91	1629.81	77.21	12.69
R형 선회 패턴	2081.17	1634.87	78.56	12.49
사이걸러 경운법	2079.90	1681.90	80.86	12.85

<로터리 경운작업 시험 결과 분석>

위 결과에서와 같이 쟁기 경운작업의 경우 실 작업율은 C형 선회 패턴 경운법이 72.61%로 가장 높게 났으나, 연료 소모량은 사이걸러 경운법이 4.85 Liter로 가장 적게 소모되는 것으로 나타났다.

로터리 경운작업의 경우는 80.86%로 사이걸러 경운법의 실 작업율이 가장 높게 나타났고, 연료 소모량은 12.49 Liter로 R형 선회 패턴 경운법이 연료를 가장 적게 소모하는 것으로 나타났다.

㉕ 최적 경로 선정

차년도 경로 생성 및 경로 추종 시스템을 개발하기 위하여 4가지 대표 경운 작업 경로를 선정하였고, 사용자 수동 작업 모드로 작업 경로 및 작업기 별 연료 소모량과 실작업율을 산출하여 작업 별 최적 경로를 선정하고자 하였다.

아래 표는 위 시험 결과에서 작업 별로 실 작업율이 가장 높았던 작업 경로와 연료 소모량이 가장 적었던 작업 경로를 나타낸다. 쟁기 경운 작업 시에는 C형 선회 패턴 경운법 및 사이걸러 경운법, 로터리 경운 작업 시에는 사이걸러 경운법 및 R형 선회 패턴 경운법이 가장 적합한 경운 방법임을 알 수 있었다.

구분	실작업율(↑)	연료소모량(↓)
쟁기 경운 작업	C형 선회 패턴	사이걸러 경운법
로터리 경운 작업	사이걸러 경운법	R형 선회 패턴

<시험 결과 분석>

그리고 농작업 시험을 통해서 획득한 실 경운궤적을 분석한 결과 자율 주행 경로 개발 시 고려되어야 할 요소(선회 시 슬립, 머리땅 경운)를 확인 하였으며, 차년도에는 요소들을 고려하여 작업 경로를 최적화하고 강인 제어를 통한 보다 정확한 경로 추종 시스템을 개발 할 예정이다.

다. 협동연구기관 2 (국제종합기계(주))

㉔ 위치-자세 인식모듈 센서부품 선정 및 모듈 H/W 설계

자율주행 농기계에 사용되는 위치-자세 인식모듈은 정밀 GPS와 IMU 센서를 기반으로 개발되어 사용되고 있음. GPS로부터 현재의 위치정보를 취득하고 IMU를 통하여 획득된 관성측정 데이터를 이용하여 주행방향 파악 및 위치보정을 수행. 본 개발에서 GPS와 IMU 센서는 복수의 글로벌 제작사의 성능과 가격을 비교 검토하여 선정하였음.

㉕ GPS 선정 및 성능평가

GPS는 RTK 또는 VRS 기반의 위치보정 기술을 이용한 cm급 정밀도를 얻기 위하여 L1/L2 수신에 가능한 dual frequency 제품을 고려하였음. 현재까지 가장 우수한 성능을 나타내고 있으나 가격이 고가인 Novatel사의 제품을 기준으로 프랑스의 SBG, 중국의 Tersus 그리고 미국의 Ublox 제품을 비교 평가하였음.

㉖ 업체별 GPS 사양 검토

업체별 GPS 제품의 외형과 사양은 다음과 같음.



Novatel OEM615



SBG Ellipse-D



Tersus BX316



Ublox NEO-M8P

제조사별 GPS 제품

제품별 GPS 사양비교

		Novatel	SBG	Tersus	UBlox
제조국		캐나다	프랑스	중국	미국
모델명		OEM615	Ellipse-D	BX316	NEO-M8P
Signal Tracking	GPS	L1, L2, L2C	L1, L2, L2C	L1, L2	L1CA
	GLONASS	L1, L2	Option	L1, L2	L1
	BeiDou	B1	Option	B1, B2	B1
	Galileo	E1	Option	N.A	N.A
	SBAS	N.A	L1	N.A	N.A
Position Accuracy (RMS)	Single Point L1	1.5m	N.A	1.5m	2.5m
	Single Point L1/L2	1.2m	1.2m	N.A	N.A
	SBAS	0.6m	0.6m	N.A	N.A
	DGPS	0.4m	0.4m	N.A	N.A
	RTK	1cm+ 1ppm	2cm+ 2ppm	1cm+ 1ppm	2.5cm+ 2ppm
Heading Accuracy(1m Baseline RMS)		N.A	<0.2°	<0.15°	N.A
Max. Data Rate		50 Hz	200 Hz	20 Hz	8 Hz
Time to First Fix	Cold Start	<50s	<50s	<50s	<29s
	Hot Start	<35s	<35s	<30s	<1s
Signal Reacquisition	L1	<0.5s	N.A	N.A	N.A
	L2	<1.0s	N.A	N.A	N.A
Time Accuracy		20 ns RMS	N.A	20 ns RMS	30 ns RMS
Temperature	Operating	-40~85 °C	-40~75 °C	-40~85 °C	N.A
	Storage	-55~95 °C	N.A	N.A	N.A
Vibration	Random	MIL-STD 810G	MIL-STD 810G	N.A	N.A

사양비교표에서와 같이 위치오차의 정밀도는

Novatel OEM615 > Tersus BX316 > SBG Ellipse-D > Ublox Neo-M8P

순으로 나타남. SBG Ellipse-D와 Tersus BX316은 두 개의 GPS를 이용하여 True Heading을 제공하여 경로주종 제어에 유리함. BX316의 경우 Data Rate가 20 Hz로 상대적으로 낮아 고속주행의 경우 타사 제품에 비하여 제어성능 측면에서 불리할 것으로 예상됨. 트랙터가 40km/h로 주행하는 경우 초당 11.1m 진행하므로 20 Hz로 데이터를 업데이트 받는 경우 약 0.56m 간격으로 위치데이터를 받게 됨. 따라서 waypoint가 조밀하거나 곡선구간을 주행하는 경우 경로주종제어에 불리함.

GPS 구매가격의 경우

Novatel OEM615 > SBG Ellipse-D > Tersus BX316 > Ublox Neo-M8P

순으로 조사되었음. 대부분의 트랙터 작업의 경우 작업속도가 7km/hr 이내이므로 제품의 구매가격 대비 최적의 성능을 확보하기 위한 제품선정 필요.

㉔ GPS 평가

Tersus BX316의 경우 중국의 BeiDou 위성수신이 가능하여 운용 중 수신가능한 위성의 숫자 확보에 장점이 있는 반면 지금까지 검증된 연구내용이 없으므로 GPS의 실제 운용평가를 통하여 실제 성능을 검증하였음. 시험은 SBG 제품과 Tersus 제품을 동일 시간대에 동일한 조건으로 위치데이터를 수신하여 비교하였음. 위치정

밀도 향상을 위하여 VRS를 보정신호로 이용하였으며, 두 제품 모두 각각 2시간 동안 위치 데이터를 수신하여 시간에 따른 위치 변화 및 산포도를 측정하여 간접 비교하였음.



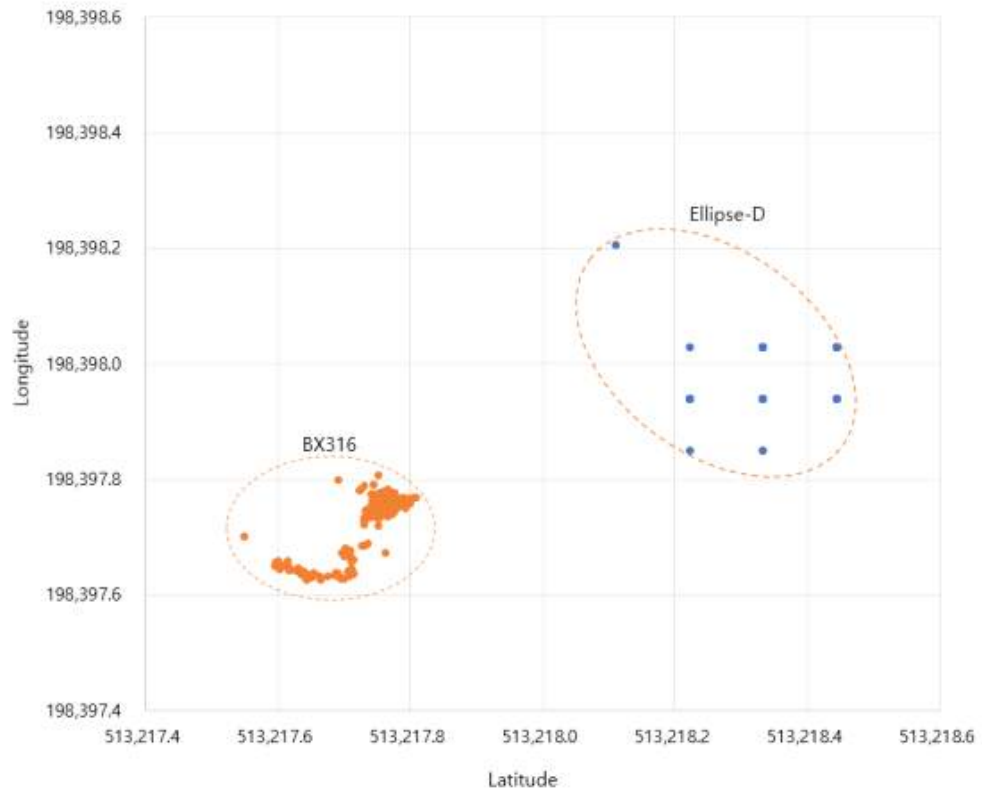
(a)

(b)

(c)

Ellipse-D와 BX316의 비교시험

위의 그림의 비교시험중인 모습(a)과 측정중인 BX316의 화면(b), Ellipse-D의 화면(c)를 각각 나타냄. 위치 데이터는 초당 1개씩 총 2시간에 걸쳐 측정하였으며 측정 결과는 다음의 그래프와 같음.



위치데이터 비교측정결과(BX316 vs Ellipse-D)

그래프에서 BX316은 2시간 측정 중 위도와 경도 모두 약 20cm 이내로 데이터가 집중되어 나타나고 있는 반면 짧은 시간 동안 지속적인 산포를 나타내는 것을 알 수 있다. Ellipse-D의 경우 짧은 시간동안의 데이터 산포는 없으나 장시간 측정 중 BX316에 비하여 큰 산포가 있음을 알 수 있음. 일반적으로 VRS를 이용하여 위치 보정을 하여 위치를 측정하는 경우 가상 기지국과 측정점간의 거리에 따라 10~30 cm 이내의 오차를 가지므로 BX316의 경우 충분한 안정성을 갖고 사양표에 제시된 성능을 잘 나타내고 있음을 알 수 있음.

㉔ IMU 선정 및 성능평가

IMU(Inertia Measurement Unit)는 가속도(accelerometer)와 자이로스코프(gyroscope)를 이용하여 물체의 각도, 속도, 가속도 등을 측정하는 센서임. 자율주행 농기계의 자세에 따른 위치보정을 위한 각도의 측정 또는 GPS 신호 수신에 불량한 경우 비교적 짧은 시간 동안 GPS를 대신하여 위치인식 및 추종을 위한 데이터를 제공받기 위하여 IMU가 사용 됨. IMU는 내부에 mems 센서 또는 fiber-optic 센서가 사용됨. mems 센서의 경우 비용대비 우수한 성능을 갖고 있으나 fiber-optic 센서에 비하여 정밀도가 낮음. fiber-optic 센서의 경우 성능이 우수하나 고가이므로 양산 제품에 적용하기 어려운 문제를 갖고 있음. 지금까지 국내 자율주행 농기계 연구에서 2011년 fiber-optic 센서 기반의 gyroscope와 mems 기반의 accelerator 센서를 사용하는 Novatel사의 SPAN 제품을 이용하여 자율주행 트랙터 개발을 성공한 사례가 있음. 이후 상대적으로 저가인 mems 센서 기반의 gyroscope와 accelerometer를 사용하는 SBG사의 Ellipse-D 제품을 이용하여 2013년 자율주행 트랙터를 이용한 자율작업에 성공하였음. 앞서 검토한 GPS 중 SBG사의 Ellipse-D의 경우 GPS와 IMU가 함께 설치된 제품인 반면 Novatel사의 OEM615, Tersus BX316, Ublox NEW-M8P의 경우 별도의 IMU를 필요로함. 따라서 제품의 성능과 제품의 가격을 고려하여 적용가능성이 높은 EPSON사의 M-G550PC2 제품과 Ellipse-D의 사양 및 성능비교를 통하여 적합성을 평가하였음.

㉕ 업체별 IMU 사양 검토

업체별 IMU 제품의 외형과 사양은 다음과 같음. 본 개발에서 IMU는 트랙터의 자세 및 주행 방향을 측정하기 위하여 사용되므로 gyroscope와 관련된 성능을 비교하였음.



SBG Ellipse-D



EPSON M-G550PC2

제품별 IMU 사양비교

		SBG	EPSON
제조국		프랑스	일본
모델명		Ellipse-D	M-G550PC2
Accuracy	Roll	<0.1	N.A
	Pitch	<0.05	N.A
	Heave	10cm or 10%	N.A
Gyroscopes	Range	± 450 °/s	± 150 °/s
	Bias Stability	± 0.2 °/s	± 0.5 °/s
	Noise density	0.18 °/√hr	0.1 °/√hr
	Bias in-run instability	8 °/h	3.5 °/h
	Alignment error	< 0.05 °	< 0.05 °
	Bandwidth	133 Hz	200 Hz
Temperature	Operating	-40~75 °C	-40~70 °C

표에서와 같이 센서의 측정 범위 및 정밀도는 Ellipse-D가 다소 우수하나 그 차이가 크지 않음. 시간에 따른 변화율은 EPSON M-G220PC2 제품이 우수.

㉠ IMU 선정 및 평가

SBG Ellipse-D와 EPSON의 M-G550PC2의 제시된 사양 확인과 실제 운용결과를 비교 예측하기 위하여 각도 측정이 가능한 지그를 이용하여 센서의 자세각도를 0도, 10도 30도로 변화하며 그 결과값을 측정하여 비교하였으며, 각각의 각도에서 2시간 동안 측정된 값의 변화를 관찰하였음. 시험에 사용된 각도 조절 지그의 정밀도는 0.1도 임. 다음의 그림은 측정에 사용된 각도 측정 지그와 지그를 이용하여 시험을 진행하고 있는 사진임.

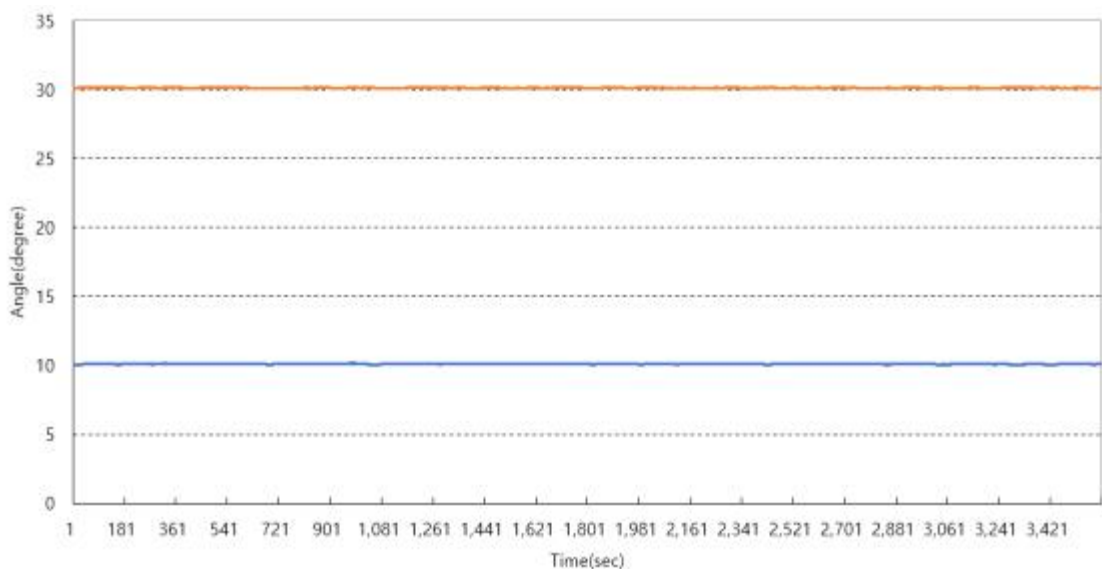


IMU 각도측정시험

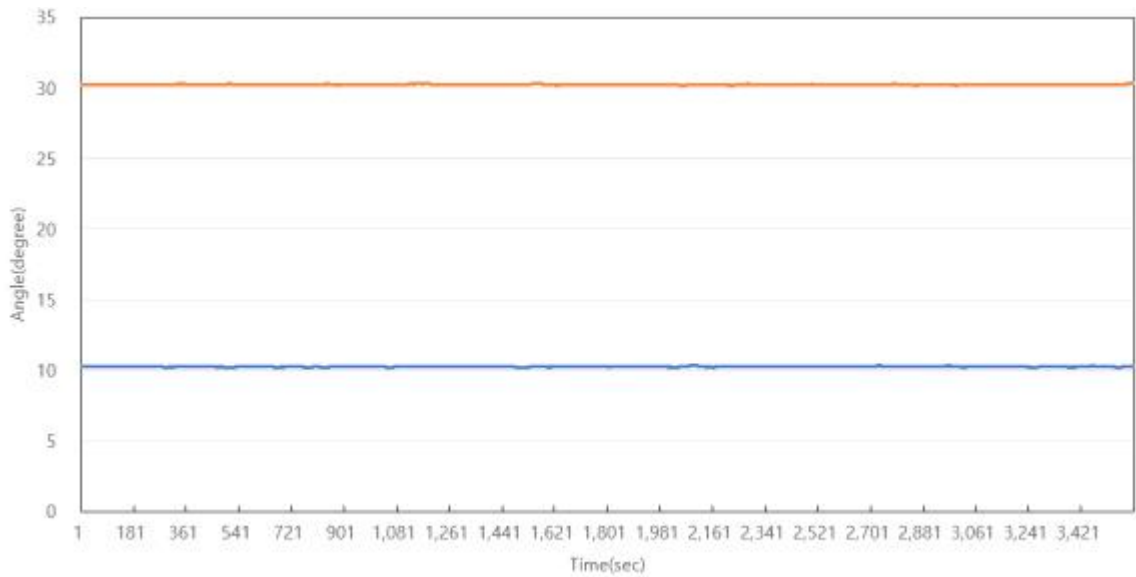


IMU가 설치된 각도조절 지그

다음의 그래프는 측정된 결과값을 나타냄.



시간에 따른 Rolling각 측정결과(Ellipse-D)



시간에 따른 Pitching각 측정결과(Ellipse-D)

각도측정 평균과 표준편차(Ellipse-D)

	Rolling 각		Pitching 각	
	10°	30°	10°	30°
평균	10.10	30.14	10.28	30.26
표준편차	0.019	0.02	0.021	0.019

측정결과 2시간 동안 rolling각과 pitching각 모두 시간에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 각도 측정의 정밀도 또한 크지 않음을 알 수 있다.

© GPS 안테나 선정

GPS 안테나는 수신하고자 하는 GNSS의 종류 및 주파수 대역에 따른 선정이 중요하다. 본 개발에서는 GPS의 L1, L2 신호와 Glonass L1, L2 신호를 수신하기 위한 안테나 선정이 필요하다. 안테나는 Dual GPS 모듈의 외형, 수신신호 주파수 대역 및 가격을 고려하여 미국 ANTCOM사의 G5Ant-42AT1-A2를 선정하였으며, 사양의 적정성 확인을 위하여 최상위 제품인 Novatel사의 dual frequency 수신안테나인 GPS-702-GG 모델의 사양과 아래의 표와 같이 비교하였음.

GPS 안테나 사양 비교

제조사		Novatel	Antcom
제조국		캐나다	미국
모델명		GPS-702-GG	G5Ant-42AT1-A2
Signal Tracking	GPS	L1, L2	L1, L2
	GLONASS	L1, L2	L1, L2
	BeiDou	N.A	N.A
	Galileo	N.A	N.A
	SBAS	N.A	N.A
3 dB Pass Band	L1	1588.5 ± 23.0 MHz	1575.42 ± 17.0 MHz
	L2	1236 ± 18.3 MHz	1227.6 ± 12 MHz
Out-of-Band	L1 ± 100 MHz	30 dBc	N.A

Rejection	L2 ± 200 MHz	50 dBc	N.A
Gain Roll-Off	L1	13 dB	N.A
	L2	11 dB	N.A
Temperature	Operating	-40~85 °C	-40~85 °C
	Storage	-55~85 °C	-55~85 °C

비교한 GPS 안테나의 외형은 다음과 같음.



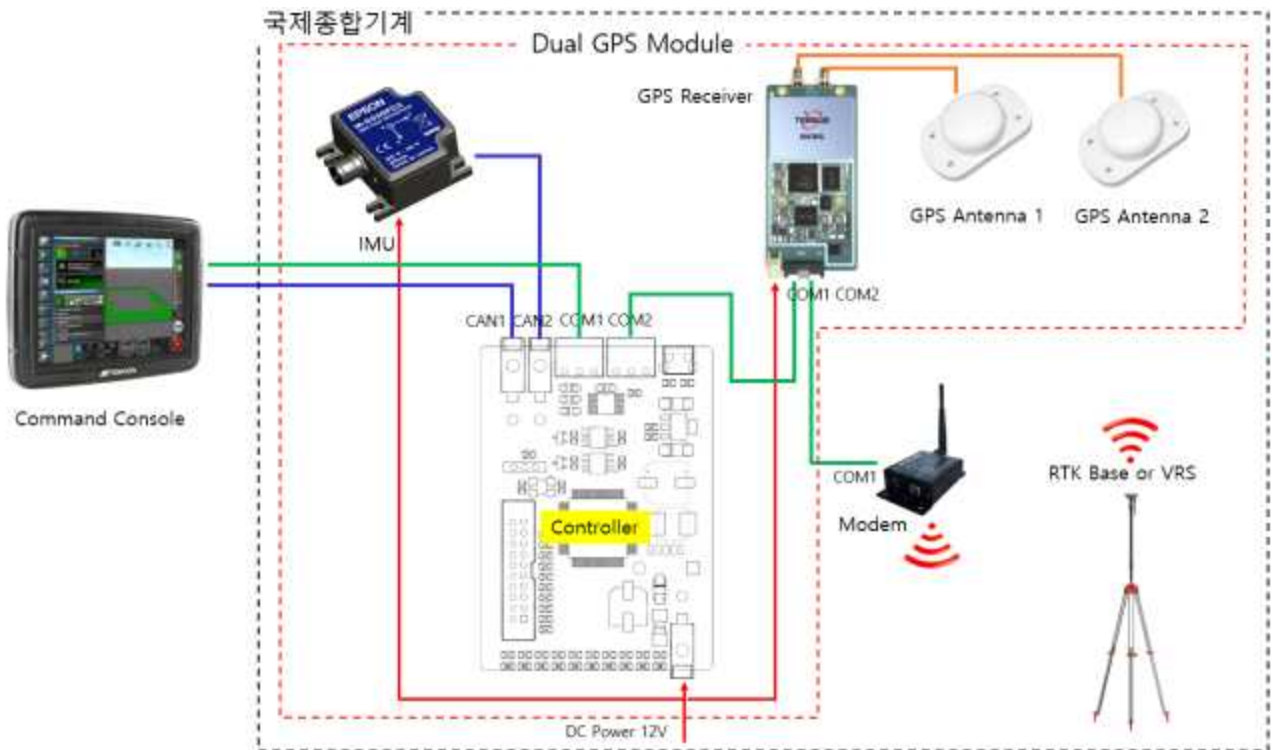
Novatel GPS-702-GG



Antcom G5Ant-42AT1-A2

④ 위치-자세 인식모듈 제어기 설계

위치-자세 인식모듈에 사용되는 제어기는 GPS로부터 위치신호를 측정하고, IMU로부터 자세신호를 측정한 후 정밀한 위치 및 자세정보를 통신을 통하여 자율주행 제어기에 제공하는 역할을 함. 따라서 제어기에는 GPS 모듈, IMU, RTK 또는 VRS와 연결을 위한 통신, 자율주행 제어기와 연결을 위한 통신 모듈이 있어야 함. 제어기와 연결되는 위치-제어 인식모듈의 시스템 구성은 다음과 같음.



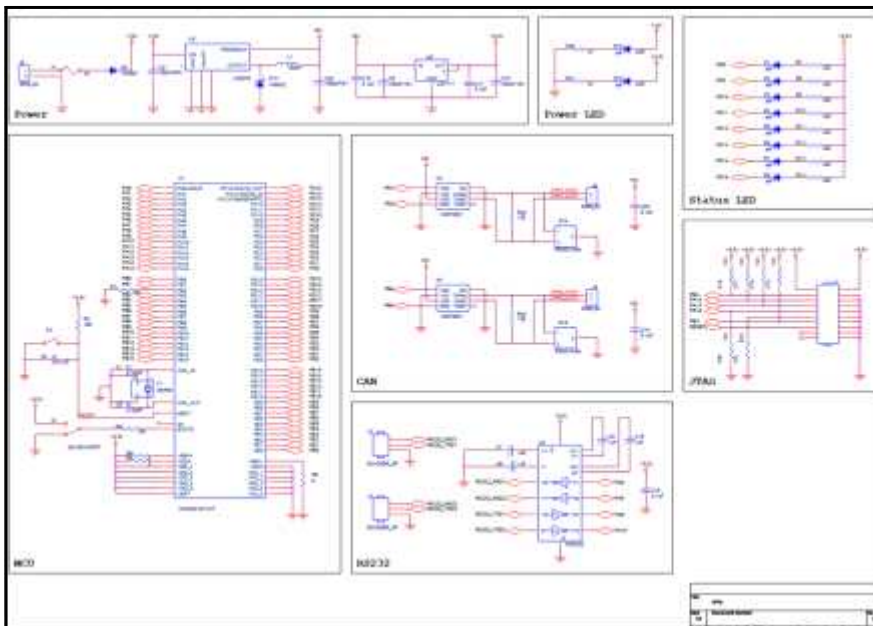
위치-자세 인식모듈 시스템 구성도

위치-자세 제어기의 개발사양은 다음의 표와 같음.

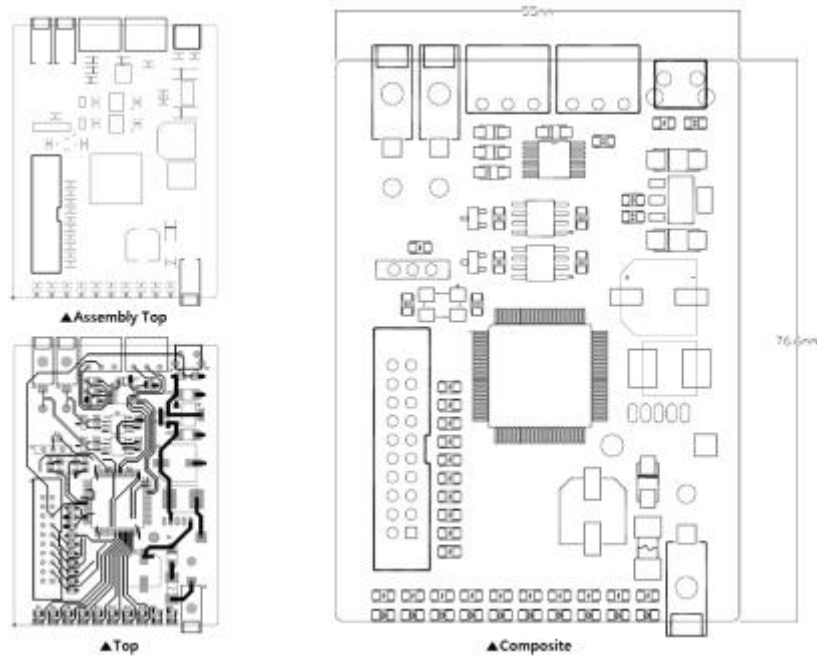
위치-자세 인식모듈 제어기 개발사양

Size	55 X 76.6 X 34 mm (include mounting)
Input Power	DC 12V
Interface	2x CAN / 2x RS232 / UART
MCU	ARM 32-bit Cortex-M3 CPU
	72MHz Maximum Frequency
	Up to 256KB Flash, 64KB SRAM
	CAN 2.0A & 2.0B (ISO 16845 Certified)
	Dual programmable serial UART
	2 x 12-bit A/D Converter (16 channels)
	2x 12-bit D/A Converters
Up to 10 timers	

제어기의 회로도와 제어보드 설계도는 다음의 그림과 같다.



위치-자세 제어기 회로도



위치-자세 제어기 보드 설계도

㉔ 위치-자세 인식모듈 센서 확정

앞서 수행한 제품의 사양의 비교분석 및 시험결과를 근거로 GPS, IMU 제품 조합에 따른 성능 및 가격우위는 다음과 같음.

성능우위(성능이 높은 순)

Ellipse-D > BX316 + M-G550PC2 > Ublox + M-G550PC2

가격우위(가격이 낮은 순)

Ublox + M-G550PC2 > BX316 + M-G550PC2 > Ellipse-D

UBlox 제품의 경우 가격의 우위는 높으나 개발하고자 하는 정량적 목표를 만족하기 위해선 L1, L2 주파수를 사용하는 dual frequency 제품이 필요하므로 다음의 조합으로 위치-자세 인식모듈 개발이 필요.

- GPS 수신기 : Tersus BX316
- IMU : EPSON M-G550PC2 IMU
- GPS 안테나 : Antcom G5Ant-42AT1-A2

㉕ 자율주행 트랙터를 위한 위치-자세 인식모듈 개발

위치-자세 인식모듈의 트랙터 탑재를 위한 설계는 사용환경을 고려한 인식모듈의 외형설계와 이를 트랙터에 탑재하기 위한 탑재부 설계로 나누어 수행하였음. 트랙터에 탑재하기 위한 탑재부의 경우 국제종합기계의 트랙터 이외에 공동 개발사인 동양물산기업, 대동공업의 트랙터에 대하여 각각 진행하였음.

㉠ 위치-자세 인식모듈 외형설계

㉡ 외형디자인 개발

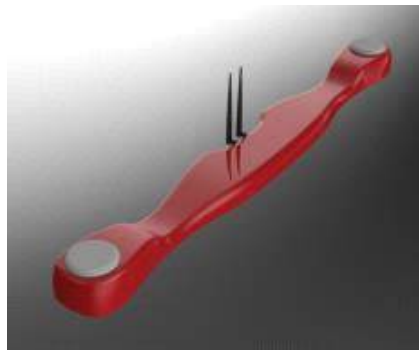
위치-자세 인식모듈을 탑재한 해외 선진사의 GPS 모듈 탑재 현황은 다음의 그림과 같음.



John Deere

Fendt

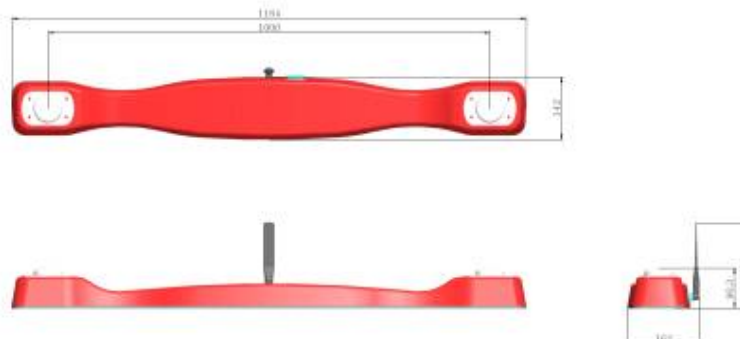
해외의 John Deere, Trimble, Topcon 등 주요 제조사의 경우 하나의 GPS 안테나를 이용한 위치인식 모듈을 사용 중. 또한 GPS 수신율을 높이기 위하여 트랙터의 가장 높은 곳인 캐빈 지붕에 설치하여 사용하고 있음. 본 과제를 통하여 개발하는 위치-자세 인식모듈의 경우 두 개의 GPS안테나를 이용하므로 모듈에 탑재되는 부품의 크기 및 트랙터 탑재 후 상품성 등을 고려하여 아래와 같이 디자인 업체를 통하여 렌더링 디자인을 개발함.



Dual GPS Module Rendering Image

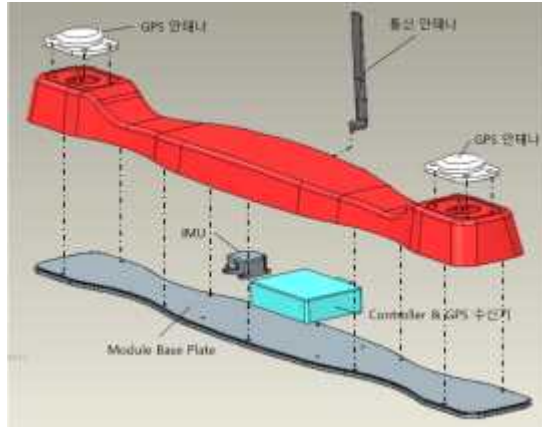
㉢ 위치-자세 인식모듈 설계

개발된 디자인 이미지를 이용하여 설계된 모듈의 외형도는 다음과 같음.



Dual GPS Module 외형도

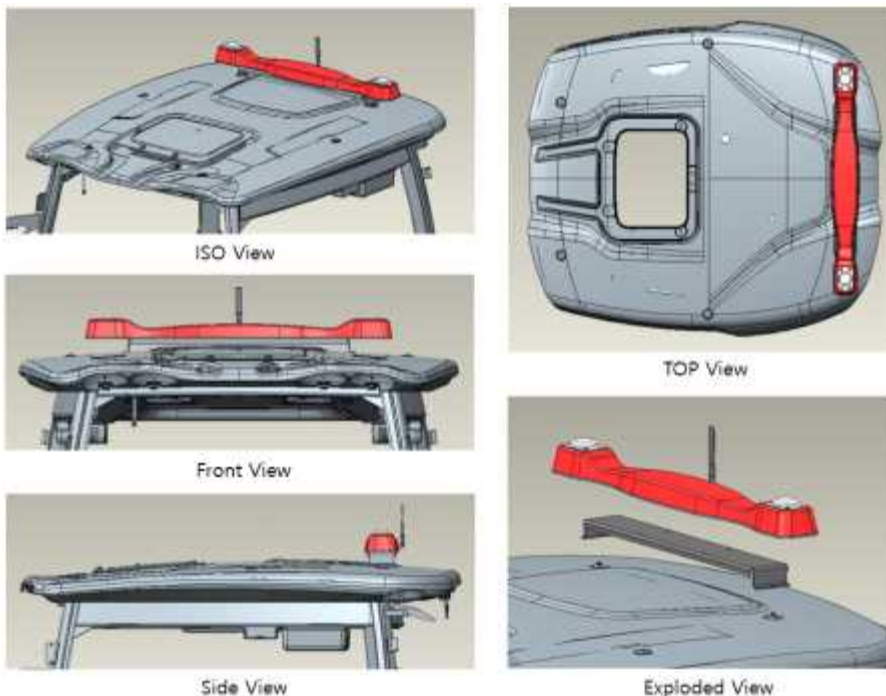
설계된 GPS 모듈은 1m 간격을 갖는 두 개의 GPS 안테나를 배치하고 내부에 GPS 수신기, IMU, 제어기를 수용하도록 설계되었음. 트랙터 및 외부와의 통신과 전원공급은 후방에 설치된 방수 커넥터를 이용하여 이루어지며, 인식모듈 전체는 트랙터의 루프 상단에 설치하여 사용됨을 고려하여 방수가 가능하도록 설계. 다음은 위치-자세 인식모듈의 주요 부품 전개도를 나타냄.



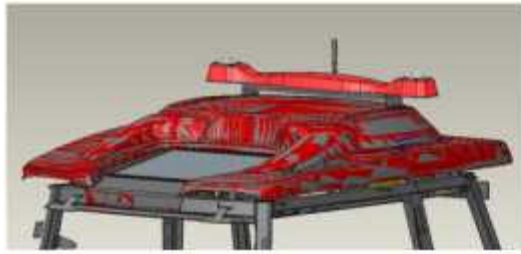
Dual GPS Module 부품 전개도

③ 트랙터 제작사별 장착부 설계

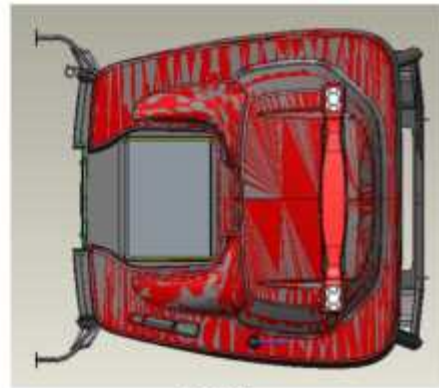
트랙터 캐빈 루프에 위치-자세 인식모듈을 탑재하기 위하여 국제종합기계 및 각사로부터 제공 받은 설계자료를 이용하여 탑재설계를 수행함. 본 개발을 위하여 국제종합기계에서는 100마력급 Luxen 트랙터를 선정하였으며, 동양물산과 대동공업의 자율주행 대상 모델에도 동일하게 적용 가능하도록 외형 및 레이아웃을 설계함. 위치-자세 인식모듈의 경우 경로추종제어 중 위치오류가 적고 정확한 제어에 유리하도록 트랙터 길이 방향 중심선에 GPS가 위치하도록 트랙터의 좌우 대칭이 되는 지점을 선택하였고, 길이 방향으로는 트랙터 후륜의 회전중심에 가깝게 설치하였음. 다음의 그림은 각사별 위치-자세 인식모듈 탑재설계 결과를 나타냄.



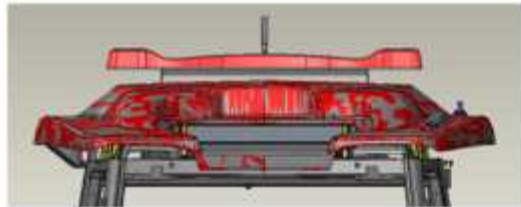
국제종합기계 트랙터 탑재설계



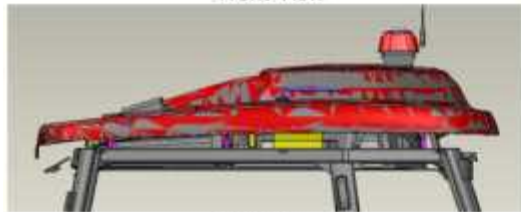
ISO View



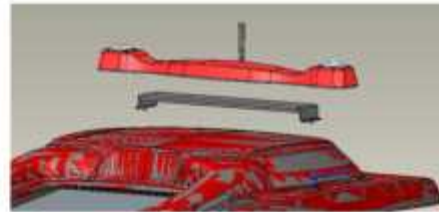
TOP View



Front View

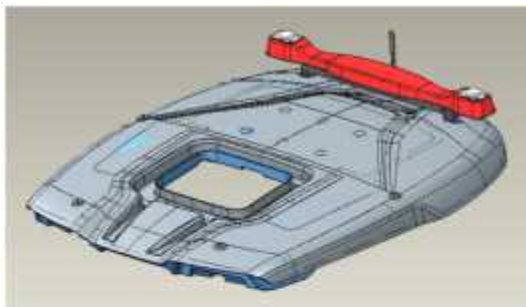


Side View

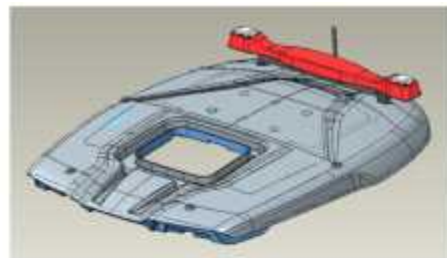


Exploded View

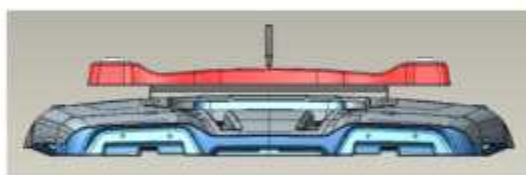
동양물산기업 트랙터 탑재설계



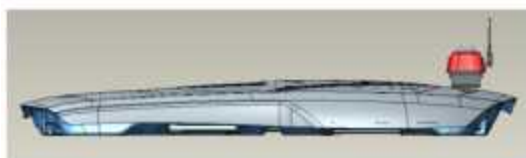
ISO View



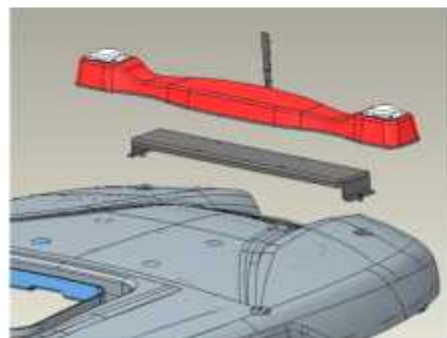
TOP View



Front View



Side View



Exploded View


대동공업 트랙터 탑재설계

라. 협동연구기관 2 ((주)긴트)

㉔ 자율 주행 핵심 모듈별 특성 분석

㉔-1 각 모듈 별 특성 분석

㉔-1-1 위치 및 자세 인식 모듈

항 목	주요 사양
	
Size	55 X 76.6 X 34 mm (include mounting)
Input Voltage	12VDC
Interface	2x CAN / 2x RS232
MCU	ARM 32-bit Cortex-M3 CPU

<위치 및 자세 인식 모듈 컨트롤러 주요 사양표>

① Dual GPS receiver

- Primary GNSS receiver와 Secondary GNSS receiver로 구성

② Antenna

- GNSS receiver의 Band 및 수집 위성에 맞는 적정 사양으로 선정되며, LNA Filter가 포함된 Active 사양 적용 예정

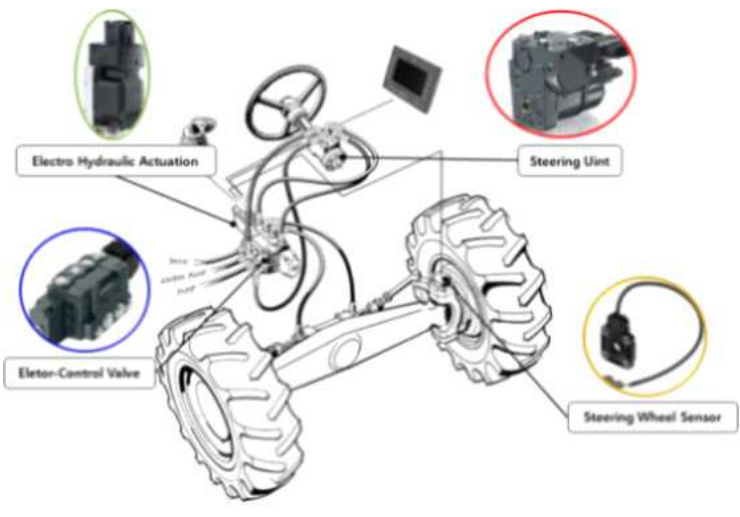
③ IMU 센서

- Magnetometer와 Gyroscope 기능을 포함하는 IMU 센서 적용

④ 모듈 컨트롤러

- IMU의 디지털 신호 처리와 위치 보정을 위한 MCU 모듈

㉔ 조향 제어 모듈

항 목	주요 사양
	
Input Voltage	12VDC
Interface	1x CAN

<조향 제어 모듈 통신 관련 주요 사양표>

- ① Electro Hydraulic Actuation
 - 조향 제어 모듈 통합 제어
- ② Electro-Control Valve
 - 전자식 유압 밸브 (조향 제어를 위한 비례식 제어 밸브 장치)
- ③ Steering Unit
 - 조향 핸들 및 통합 제어와 연동되어 사용자 핸들 입력 및 피드백
- ④ Steering Wheel Sensor
 - 트랙터 구동부 휠 조향 각도 센서

㉔ 경로생성 및 추종 모듈 (벤치마킹 제품 사양)

항 목	주요 사양
	
Input Power	9-36 VDC(nominal 12/24VDC), Max. 8A
Interface	CAN x4
	USB x2
	Stereo Audio Out x1
	RS232 x4
	Ethernet (RJ45)
	Digital x3, Analog x1
Display	8.4" (21.3 cm) touchscreen
MCU	Freescale i.MX6 dual core, 900 MHZ

<경로 생성 및 추종 모듈 주요 사양표>

① Display

- 사용자 인터페이스를 담당하는 GUI 기반의 터치 스크린으로 경로 생성 설정 및 경로 추종에 대한 시스템 피드백 정보를 그래픽화 하여 사용자에게 제공

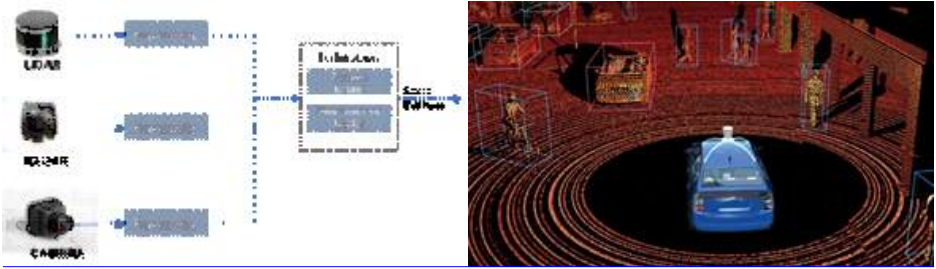
② 통신 Interface

- 자율 주행 트랙터 시스템의 경로 생성 및 추종을 위한 각종 주변 모듈과의 통신 기능 제공

③ MCU

- 자율 주행 시스템의 경로 생성/추종 연산과 영상 출력을 위한 중앙 연산을 담당
- 충분한 기능을 수행할 수 있는 연결성, 처리 속도 제공 및 리눅스 기반 OS 탑재

㉕ 작업환경 인식 모듈 (시스템 사양 미정 - 1차 년도 기초 기술 연구 단계)

항 목	주요 사양
	
Input Power (Est. Module)	12 VDC
Interface	Ethernet or CAN
Sensor (Fusion Source)	Lidar / Radar Sensor
	Camera Sensor
	Ultrasonic Sensor

<작업 환경 인식 모듈 주요 사양표>

① Sensor

- 센서 융합을 통한 작업 환경 인식을 위해 Lidar / Radar Sensor, Camera Sensor 및 Ultrasonic Sensor를 사용

② Estimation Module

- 센서 융합을 통한 작업 환경 인식을 위해 각종 센서 데이터를 효과적으로 수집하고 환경 인식 데이터를 출력하기 위한 중앙 디지털 신호 처리 모듈

③ 통신 Interface

- 자율 주행 시스템의 작업 환경에 따른 경로 추종 보정이나 안전 위험 감지를 위한 통신부로서 통합 모듈에서 지원하는 CAN 및 Ethernet 적용 설계

㉑ 각 모듈 별 통신 입/출력 분석

㉒ 핵심 모듈 <-> 통합 모듈 입/출력

① 각 핵심 모듈의 동작 특성 및 입/출력을 분석

② 핵심 모듈과 통합 모듈 간의 입출력 정의

③ 자율 주행 시스템 확장 개발 시 해당 표 기반의 추가 작업 진행 예정

순번	모듈명	핵심 모듈 <-> 통합 모듈	
1	위치 및 자세 인식 모듈	(핵심 모듈 출력) - RAW 위치 신호 (경도, 위도) - 자세 신호 (Roll, Pitch, Yaw) - 보정 위치 신호 (경도, 위도) - GPS 수신 감도 및 위성 정보 - 고장 진단 정보	(통합 모듈 출력) - Active 신호 - RTCM (Radio - Base 모듈 이용 시) - RTCM (Network - 인터넷 보정 이용 시)
2	조향 제어 모듈	(핵심 모듈 출력) - 현재 자동 조향 모드 정보 - 현재 자동 조향 감도 및 강도 정보 - 현재 스티어링 각도 - 현재 스티어링 토크 - 현재 스티어링 속도 (방향 정보 포함) - 고장 진단 정보	(통합 모듈 출력) - 자동 조향 모드 요청 정보 - 목표 조향 값 (목표 조향 방식일 경우) - 목표 스티어링 각도 (목표 스티어링 각도 방식일 경우) - 자동 조향 감도 및 강도 설정 요청 - 자체 진단 및 캘리브레이션 모드 요청
3	경로생성 및 추종 모듈	(핵심 모듈 출력) - 경로생성 및 추종 모듈 동작상태 정보 - 핵심 모듈 1,2,4 중계 전달 정보 - 트랙터 변속 동작 정보 - 트랙터 작업 동작 - 고장 진단 정보	(통합 모듈 출력) - 각 핵심 모듈 피드백 정보 (위치 및 자세, 조향, 환경 인식 정보) - 트랙터 피드백 정보 (변속, 작업기, 속도, 4WD, PTO, Q/T 등) - 각 핵심 모듈 및 트랙터 고장 진단 정보
4	작업환경 인식 모듈	(핵심 모듈 출력) - 작업 환경 인식 모드 정보 - 작업환경 위험 알림 정보 전달 - 장애물 위치 정보 (2D Plot 맵핑 또는 방위각 거리) - 작업환경 인식 정확도 및 감도 정보 - 고장 진단 정보	(통합 모듈 출력) - Active 신호 - 트랙터 위치 및 자세 정보 (필요 시) - 트랙터 속도 및 조향 정보 (필요 시) - 작업 대지 환경 정보 (필요 시)

<통신 입/출력 구성표 - 자율주행 시스템1>

- ㉠ 통합 모듈 <-> 기존 트랙터 모듈
- ① 기존 트랙터 모듈의 구성과 자율 주행을 위한 입/출력 제안 및 설계
 - ② 통합 모듈과 기존 트랙터 모듈 간의 입출력 정의
 - ③ 자율 주행 시스템 확장 개발 시 해당 표 기반의 추가 작업 진행 예정

순번	모듈명	통합 모듈 <-> 기존 트랙터 모듈	
1	트랙터 변속 제어 모듈 (트랙터 상위 제어 및 엔진 제어 포함)	(통합 모듈 출력) - 자율 주행 모드 동작 정보 - 목표 토크 - 목표 속도 - 목표 변속 단수 - 목표 트랙터 구동 모드 (4WD, Q/T 등)	(기존 트랙터 모듈 출력) - 현재 엔진, 휠 등 주요 토크 - 현재 엔진, 휠 등 주요 속도 - 현재 변속 단수 - 현재 구동 모드 (4WD, Q/T 등) - 고장 진단 정보
2	트랙터 작업 제어 모듈 (경심 제어 및 전자 유압 포함)	(통합 모듈 출력) - 자율 주행 모드 동작 정보 - 목표 작업 관련 정보 (작업제어 부분 컨셉 구체화 시 선정)	(기존 트랙터 모듈 출력) - 현재 작업 정보 (작업제어 부분 컨셉 구체화 시 선정) - 고장 진단 정보

<통신 입/출력 구성표 - 자율주행 시스템2>

㉠ 모듈 통합 시스템 하드웨어 사양 선정



<핵심 모듈 통합 개요>

㉠ 전원 및 통신 사양 선정

- ㉠ 자율 주행 시스템에서의 통합 모듈은 각 핵심 모듈의 적절한 전원 관리와 각 모듈간 정보의 중앙 처리를 중점으로 설계
- ㉡ 자율 주행 시스템에서의 구동 시나리오에 따라 전원 관리 컨셉 적용
- ㉢ 입/출력 분석을 통한 통신 사양 선정 (인터페이스 및 연결 구성)

순 번	모듈명 및 전원 관리	통신 인터페이스 및 연결 구성
1	위치 및 자세 인식 모듈 12VDC Key On / Post Drive (with warm start)	RS232 and CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(핵심 모듈 <-> 통합 모듈)
2	조향 제어 모듈 12VDC Self-Drive On	CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(핵심 모듈 <-> 통합 모듈)
3	경로생성 및 추종 모듈 12VDC Key On	CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(핵심 모듈 <-> 통합 모듈)
4	작업환경 인식 모듈 12VDC Self-Drive On	Ethernet or CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(핵심 모듈 <-> 통합 모듈)
5	트랙터 변속 제어 모듈 (트랙터 상위 및 엔진 제어 포함) 12VDC Key On (자율주행 시스템과 독립 전원 구성)	CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(통합 모듈 <-> 기존 트랙터 모듈)
6	트랙터 작업 제어 모듈 (경심 제어 및 전자 유압 포함) 12VDC Key On (자율주행 시스템과 독립 전원 구성)	CAN 1채널 (250kb/s, Extended ID)
		(통합 모듈 <-> 기존 트랙터 모듈)

<전원 및 통신 사양 선정표>

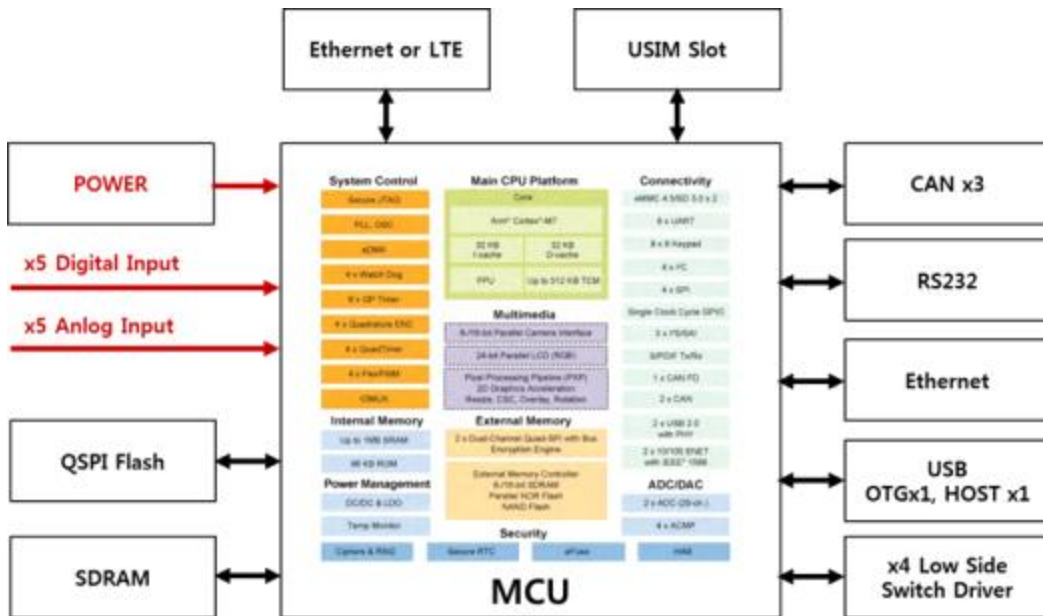
㉔ 하드웨어 개발을 위한 부품 선정

㉕ 통신 인터페이스 요구사항을 기반으로 통합 모듈의 연결성(Connectivity)에 대한 사양 설계 진행

항목	개 수	용도
High Speed CAN	2	~1Mb/s, 내부 통신
Ethernet	1	환경 인식 모듈 통신
RS232	1	위치 및 자세 제어 모듈 통신
High Speed CAN	1	~1Mb/s, 진단 및 캘리브레이션
USB	1	SW 개발 및 디버깅
Ethernet or LTE	1	인터넷 베이스 보정 시 사용
USIM Slot	1	LTE 사용 시
Digital Input	5	Spare 스위치 입력
Digital Output	4	Spare Low Side Switch
Analog Input	5	Spare 센서 입력

<통합 모듈 연결성 요구 사항 표>

㉔ 통합 모듈 연결성과 연산 처리 능력을 기반으로 한 하드웨어 다이어그램 및 주요 부품 사양 선정

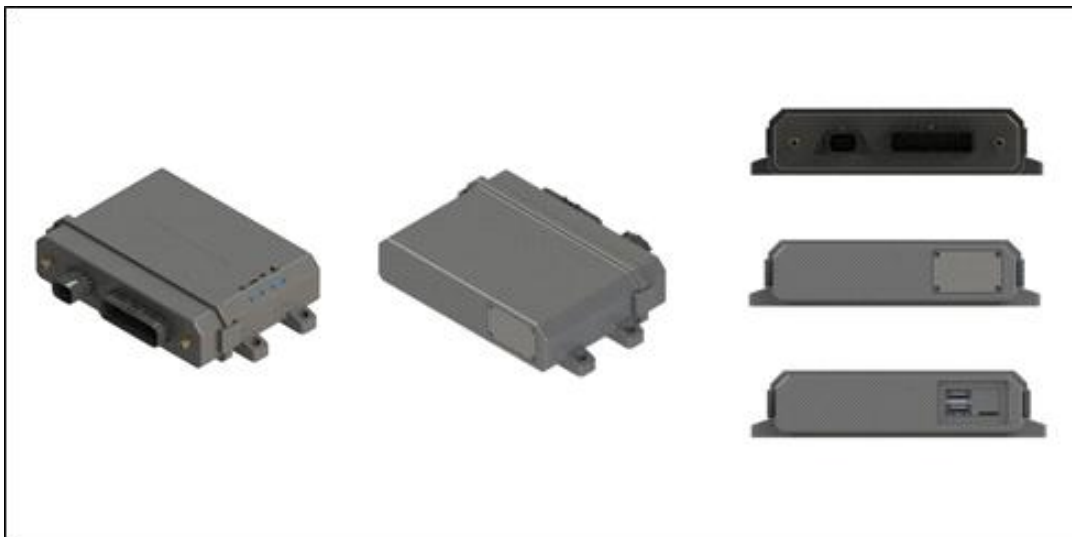


<통합 모듈 하드웨어 구성도>

항목	제조사	모델명
MCU (Micro Controller Unit)		IMXRT1060 (Arm Cortex-M7, 1MB On-Chip SRAM)
QSPI Flash		IS25LP064A
SDRAM		MT48LC16M16A2
Low Side Driver		TLE8104E
CAN Driver		TLE7250G
Ethernet Driver		KSZ8081

<주요 부품 사양 선정표>

㉔ 주요 부품 및 커넥터 선정 사양 기반 케이스 컨셉 설계 진행



<통합 모듈 케이스 컨셉 설계안>

마. 위탁연구기관 1 (충남대학교)

㉔ 트랙터 작업 안정성 분석을 위한 multi-body dynamics 모델 개발

㉔ 트랙터 작업 안정성 분석을 위한 트랙터 주요 파트의 모델링 및 인자 설정

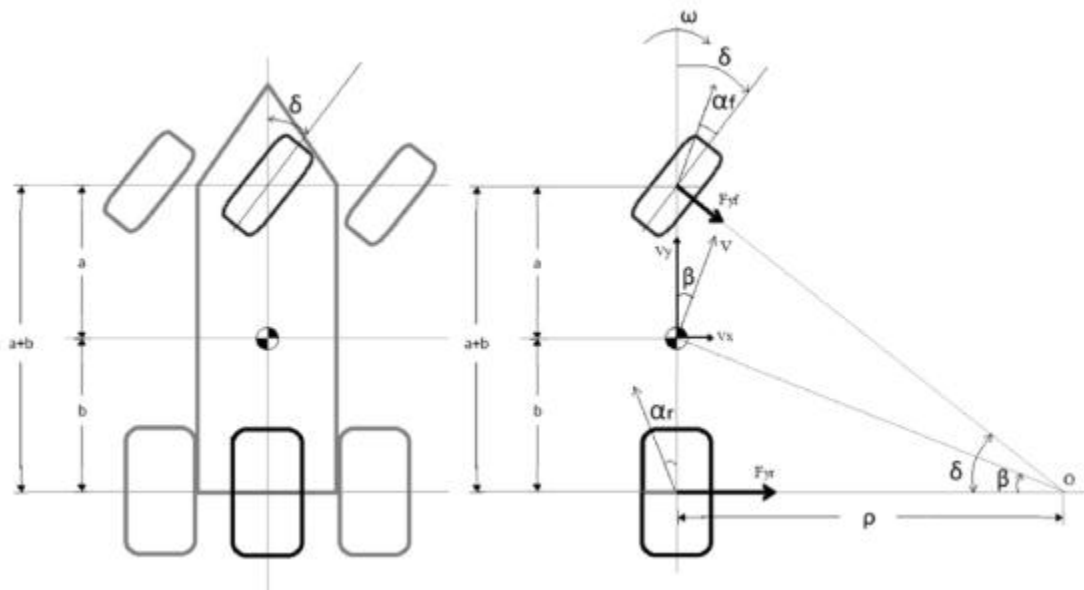
㉕ 농업차량동역학의 요소 선정

- ① 농업기계는 일반 사용차량과 달리 작업 위주의 비선형적 환경인 노외(off-road)에서 작업을 실시하기 때문에 농작업 환경에 맞는 dynamic model을 선정
- ② 토양과 타이어 간 요소들은 농업차량동역학적 관점에서 제어기 Input parameter에 따른 반응응답성에 영향을 주는 가장 중요한 요소
- ③ 토양 요소 중 마찰계수는 토양과 타이어 간 반응응답성에 가장 직접적으로 영향을 주는 요소
- ④ 이를 통해 농업작업차량 동역학 모델 및 경로추종 시스템에 활용

㉕ Dynamic 모델 개발

① Dynamic 모델의 구성

- ㉖ 이 연구에서는 차량 횡방향 동역학 측면에서의 미끄러짐을 고려할 필요가 있음
- ㉖ 4륜구동 차량을 위한 일반적으로 bicycle dynamic 모델을 사용



< Schematic of the bicycle dynamic model >

㉕ 가장 많이 쓰고 있는 일반적인 모델의 dynamic 방정식은 다음과 같음

$$\text{Dynamic model : } F_y = C_{\text{tire}} \cdot \alpha$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_f - C_r}{mV} & \frac{-aC_f + bC_r}{mV^2} \\ \frac{-aC_f + bC_r}{I_{zz}} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{I_{zz}V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mV} \\ \frac{aC_f}{I_{zz}} \end{bmatrix} \delta$$

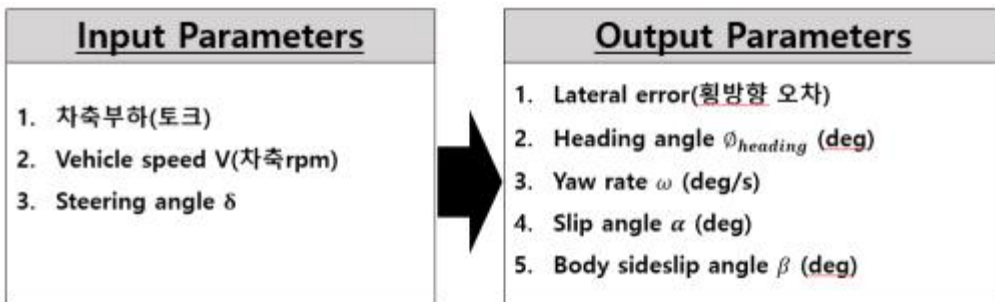
where, V : Longitudinal velocity(m/s)

β : Side-slip angle(deg.)

ω : Yaw rate(deg./s)

- m : Vehicle mass(kg)
- I_{zz} : Yaw moment of inertia(kg·m²)
- C_f : Front axle cornering stiffness(N/deg.)
- C_r : Rear axle cornering stiffness(N/deg.)
- a : Distance between front axle and CG(m)
- b : Distance between rear axle and CG(m)
- δ : Front wheel steering angle(deg.)

② Dynamic model의 구성 인자



< dynamics 모델의 입출력 인자 >

① Input Parameters

: 차축부하(토크), Vehicle speed V(차축 rpm), Steering angle δ

② Output Parameters



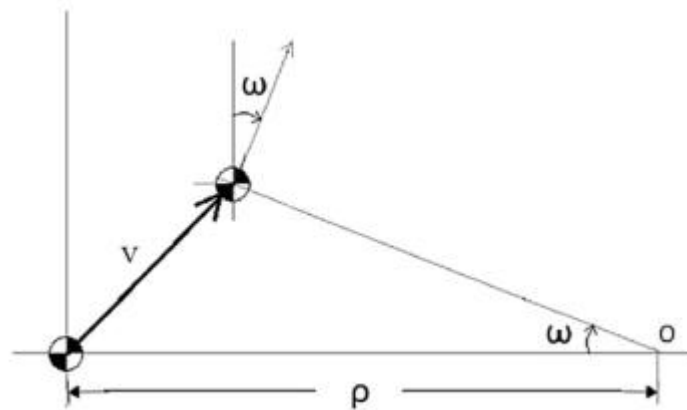
< Lateral force 개념도 >

◦ Lateral force (N) :

- 타이어가 어떠한 슬립각(Slip angle, α)으로 선회할 때 접지면에 발생한 마찰력 중 타이어 중심면에 직각으로 작용하는 힘
- 슬립각이 작은 경우 : 타이어의 진행 방향에 직각으로 작용하는 힘의 코너링 포스와 같다고 생각할 수 있음
- 슬립각이 클 경우 : 타이어의 구동력이나 제동력이 작용하고 있을 때 분리하여 생각해야 함

◦ yaw rate ω (deg./s) :

- 요 각속도라고 하며, 차량의 중심을 통하는 수직선 주위에 회전각이 변하는 속도
- 경로 추종하는 있어서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나



< Geometric relation of the yaw rate >

◦ Slip angle α (deg.) :

- 선회 상태인 타이어를 보았을 때 타이어의 진행방향과 타이어 중심면이 이루는 각도를 의미
- 타이어 동특성 관점에서는 front/rear axle에서 발생하는 엇갈림 각
- 타이어가 향하는 방향과 실제 가고 있는 방향과의 차이
- 보통 코너링에서 타이어가 가로로 미끄러지는 각도라 할 수 있음

$$\alpha_f = \delta - \theta_{vf}$$

$$\alpha_r = -\theta_{vr}$$

where, θ_{vf} : Angle that the velocity vector

δ : Front wheel steering angle(deg.)

◦ Body(vehicle) side-slip angle β (deg.) :

- 차량 선회시 타이어의 방향과 차량의 진행 방향의 엇갈림 각

◦ Heading angle ω (deg.)

㉔ 실제 트랙터의 주행 안정성 분석이 가능한 동역학 시뮬레이션 모델 개발

㉑ Multi-body dynamics 모델링

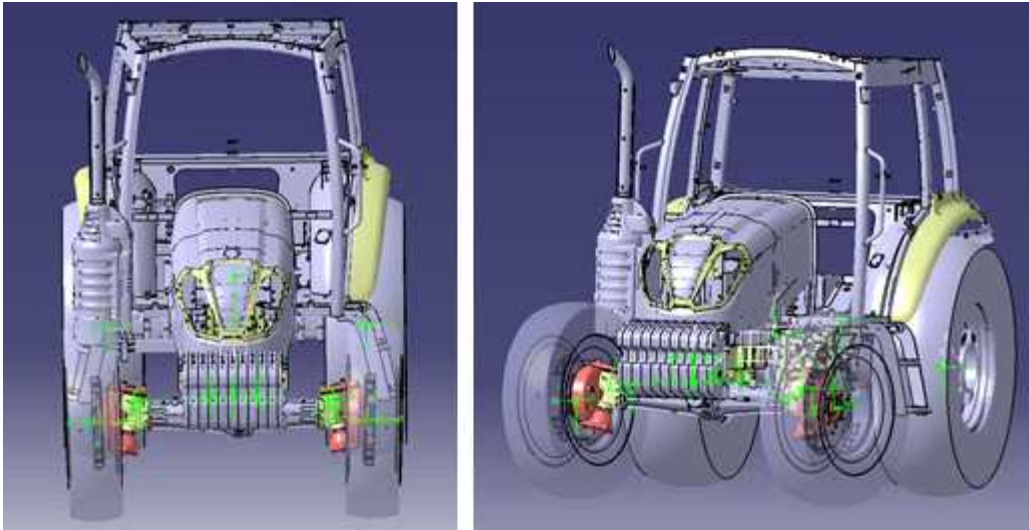
① 배경

㉑ 트랙터는 토양 조건에서 농작업을 수행하기 때문에, 토양과 트랙터 차량 모델의 동적상호작용은 가장 중요하게 분석되어야 할 요소 중 하나임. 이러한 동적 상호 작용은 차량에서의 위치에 따라서 다르기 때문에 전체 차량 모델의 개발 및 이에 대한 시뮬레이션이 필요

㉒ Multi-body dynamics 모델은 모든 부품이 3차원 운동이 가능한 상세한 동적 모델로써 차량과 토양의 수직 동적 상호작용뿐만 아니라 횡방향 동적 상호작용 분

석의 수행이 가능하며, 차량을 유연체로 표현하고 외력, 관성 및 내력으로 인한 구조적 진동 및 충돌해석에 적용될 수 있는 강점을 가진.

© 따라서, 본 연구에서는 트랙터 모델을 설계하고, Siemens 社의 LSM Virtual Lab Software를 이용하여 Multi-body dynamics 분석을 수행



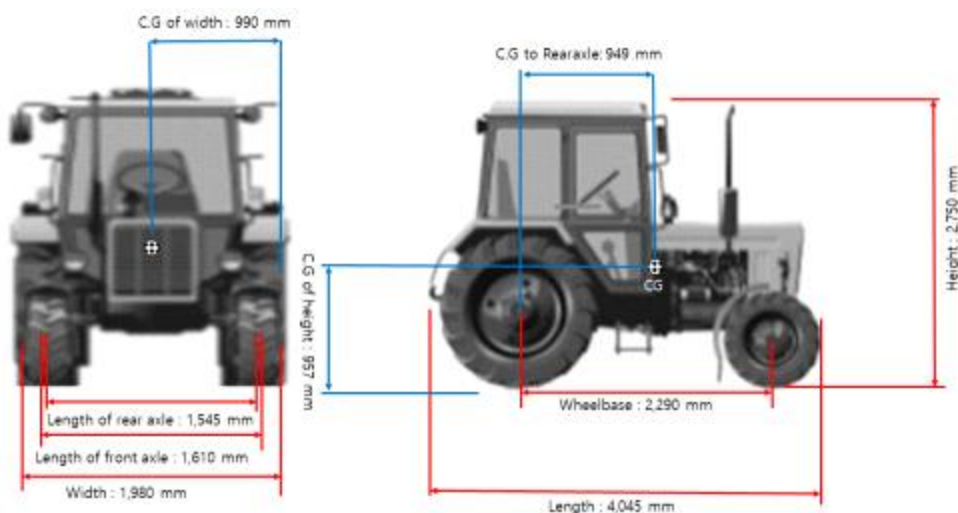
< multi-body dynamics 모델링 >

② 세부 제원

① Multi-body dynamics 시뮬레이션 모델 개발을 위하여 아래와 같이 실제 트랙터 주요 제원을 입력하였으며, 그 결과는 아래 그림과 같음.

② 해석에 사용된 차량의 세부제원은 총길이 4,045 mm, 폭 1,980mm, 높이 2,750 mm이며, 총 중량 3,585kg 이며, 축간거리는 2,290 mm, 차륜거리는 각각 전방 1,610 mm, 후방 1,545mm 로 설정

③ 차량의 무게중심은 차량의 좌측으로부터 990 mm, 뒷 차축으로부터 949 mm, 지면으로부터 957 mm로 설정함. 타이어의 제원은 전방은 넓이 315 mm, 직경 1,156 mm, 후방은 넓이 445 mm, 직경 1,575로 설정



< multi-body dynamics 모델의 제원 >



< multi-body dynamics 모델의 타이어 제원 >

㉔ 제안된 모델에 적용된 차량의 물성을 제시하였으며 트랙터의 공차 무게는 타이어 포함 전체 차량 무게는 대략 4,122(kg)이며 타이어의 수직 강성값은 250,000N·m의 값을 적용

Item	Specification
Cabin mass (kg)	Vehicle : 3,516 Vehicle + Driver : 3,581
Front tire mass (kg)	108
Rear tire mass (kg)	195
Tire vertical stiffness(N · m)	Vertical : 250,000

< 차량의 무게 >

③ 운동방정식

㉔ 차량에 대한 운동방정식은 비선형 구속다물체계 동역학 운동방정식을 이용하며 결과적인 다물체 동역학 운동방정식은 식(1)~식(4)로 표현 즉, 차량을 구성하는 물체, 조인트, 힘 요소들은 식(1)~식(4)로 표현됨

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Phi(q,t) = [\Phi_1(q,t), \dots, \Phi_m(q,t)]^T = 0 \quad (2)$$

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \quad \nu \quad (3)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_{qq})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt} \equiv \gamma \quad (4)$$

wherw, $q(t)$ =위치

$\dot{q}(t)$ =속도

$\ddot{q}(t)$ =가속도

$M(t)$ =질량행렬

$\Phi_q(t) \equiv [\partial \Phi_j / \partial q_i]_{m \times n}$ =constraint Jacobian

$Q(t)$ =외력

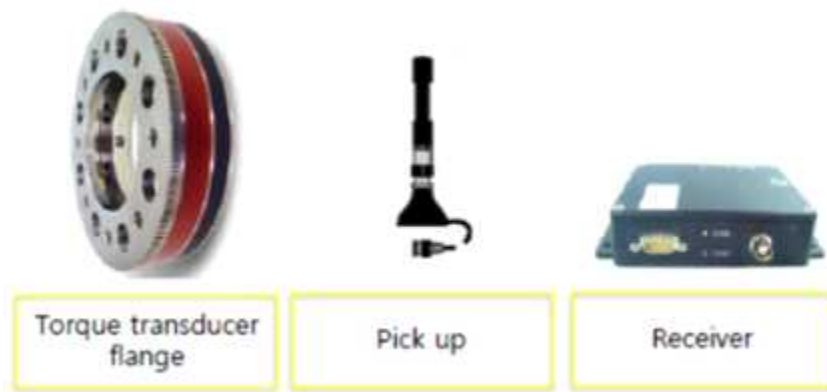
$\lambda(t)$ =Lagrange multiplier

㉔ 측정 토크

① 부하 계측 시스템 구성

㉑ 휠 토크미터

- 트랙터의 4차축에 설치
- 트랙터 동력축과 휠 사이에 설치되어 구동축의 토크를 계측
- Radio 방식의 무선 텔레메트리 방식으로 토크 신호를 전송
- 구성 : Torque flange(Battery) + Pick up + Receiver



< 휠 토크미터의 구성 >



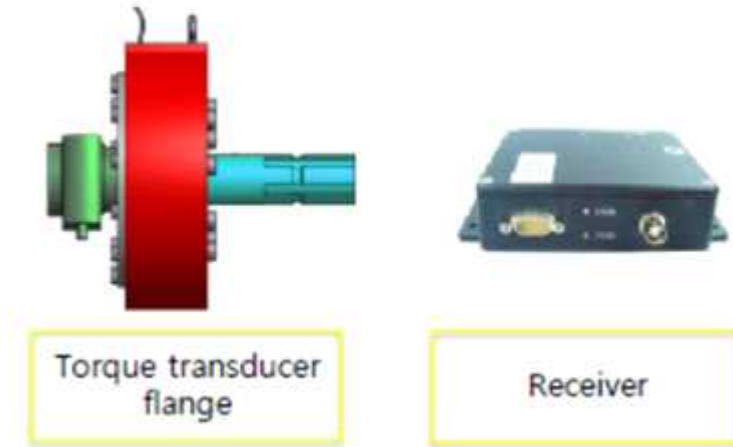
< 부하 계측 트랙터에 설치된 전륜과 후륜의 휠 토크미터 >

Term	Value
Torque range	15 kN · m & 30 kN · m (0~10VDC)
Linearity deviation and hysteresis torque (total system)	0.2%
Repeatability	< 0.3%
Maximum load	400%
Maximum breaking load	800%
Maximum speed	4,000 rpm
Signal bandwidth	1 kHz (-3dB)
Supply	12~24VDC, 50ohm
Temperature range	-10 ~ +85 °C

< 휠 토크미터의 제원 >

② PTO 토크미터

- 트랙터 PTO 동력축에 설치되어 PTO 토크와 회전수를 계측
- Inductive 방식의 무선 텔레메트리 방식으로 센서 전원 공급과 토크 신호를 전송



< PTO 토크미터의 구성 >



< 부하 계측 트랙터에 설치된 PTO 토크미터 >

Term	Value
Torque range	5 kN · m (0~10VDC)
Linearity deviation and hysteresis torque (total system)	0.2%
Overload proofness	300%
Maximum load	400%
Maximum breaking load	800%
Supply	12~24VDC, 50ohm
Temperature range	-10 ~ +85 °C

< PTO 토크미터의 제원 >

㉔ 데이터 수집 장치

- 부하 데이터 수집을 위한 데이터 수집 장치
- BNC 타입

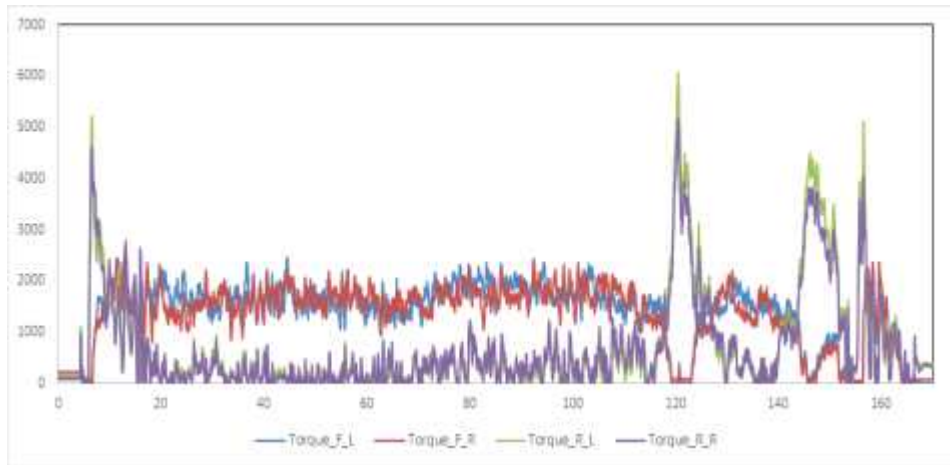
Term		Value
아날로그 입력	채널 수	32
	차동채널	16
	분해능(Bit)	16
	Sampling rate	1.25 MS/s single channel 1.00 MS/s multi-channel
아날로그 출력	최대 전압 범위(V)	-10 ~ 10
	채널 수	4
	분해능(Bit)	16
디지털 I/O	최대 전압 범위(V)	-10 ~ 10
	양방향 채널	48
	분해능(Bit)	32

< 데이터 수집 장치의 제원 >



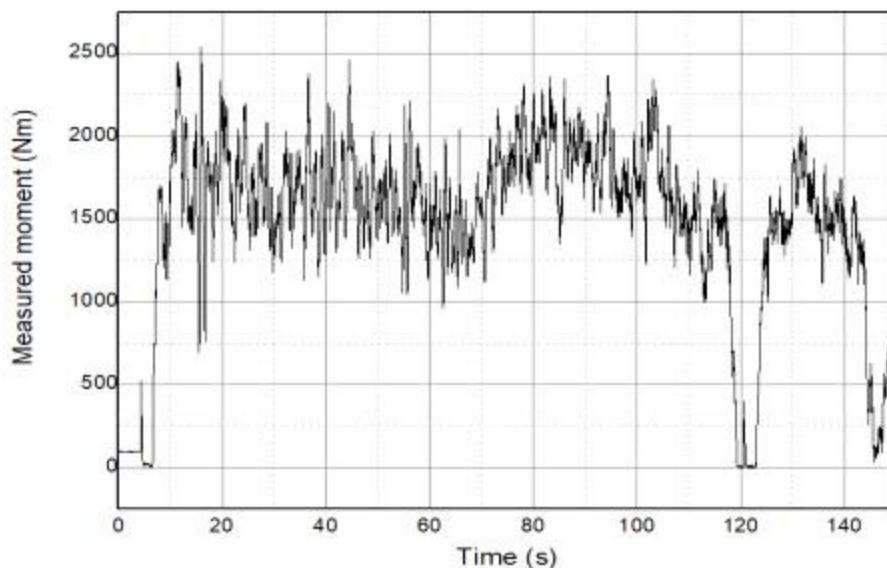
< 부하 계측 트랙터의 데이터 수집 장치 >

㉔ 실제 트랙터 로터리 작업 시 각 차축에 대한 토크 값을 측정된 값으로 동역학 모델에 입력 값으로 적용



< 차축에 입력하는 토크값 >

③ 실제 로터리 작업 시 발생하는 트랙터 차축 부하 모멘트 값을 아래 그림과 같이 개발된 다물체 동역학 시뮬레이션 모델의 입력 부하 조건으로 설정하였음. 이를 통해 개발된 다물체 동역학 시뮬레이션 모델이 무 부하 조건이 아닌, 실제 농작업 시 발생하는 부하조건을 반영함. 따라서, 실차조건을 반영한 모델의 개발을 수행함



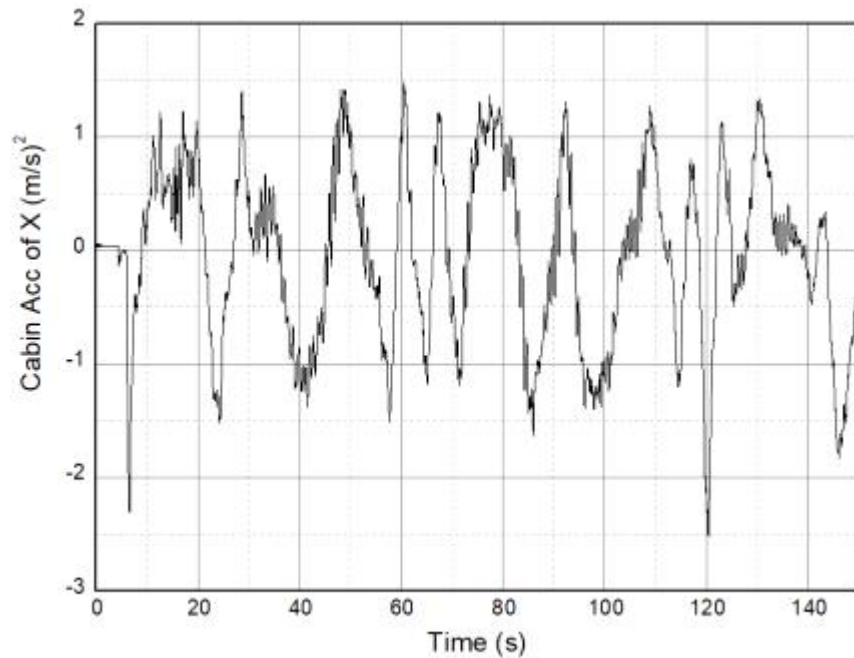
< 로터리 작업시 차축에서의 시간에 따른 모멘트 값 >

㉔ 시뮬레이션 항목

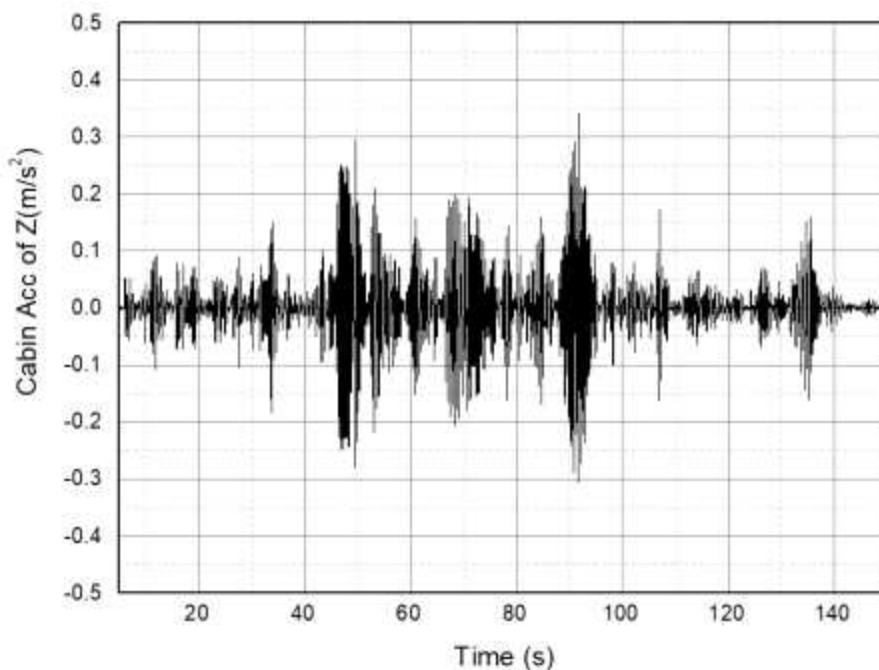
- ① Multi-body dynamics 시뮬레이션 모델을 이용하여 Multi-body dynamics에서 중요한 요소인 축방향 가속도 및 새시의 횡방향 변위에 대한 시뮬레이션을 수행
- ② 가속도 : 축방향 가속도는 차량의 충격, 경로 추종 오차 발생 등 다양한 영향을 미침
- ③ 트랙터 새시의 횡방향 변위 : 트랙터 새시의 횡방향 변위는 트랙터 주행 시 횡방향으로 얼마만큼의 이동했는지를 분석해 주는 결과로, 경로 추종 및 자율주행 시 횡방향 오차가 얼마만큼 발생하는지에 대한 분석 시 반드시 필요한 중요 요소 중 하나임

㉕ 해석 결과

- ① 부하계측을 통해 측정된 로터리 작업 부하를 이용하여 실제 모델의 각 축에 입력 부하조건을 설정하였으며, 이를 통해 해석을 수행함
- ② 트랙터 샤프의 x축과 z축 가속도 응답을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 그림과 같음
- ③ x축 최대 가속도 값은 대략 $-2.5 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$ 의 범위를 나타내고 있으며, 최대 약 2.5 m/s^2 의 가속도 값을 나타냄. 또한 가속도의 Peak to peak 값은 약 4 m/s^2 로 나타남
- ④ 수직방향 (Z축)의 가속도 값은 대략 $-0.25 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 의 범위를 나타내고 있으며, 최대 약 0.3 m/s^2 의 가속도 값을 나타냄. 가속도의 Peak to peak 값은 약 0.55 m/s^2 으로 x축 가속도 값 대비 약 14% 수준인 것으로 나타남

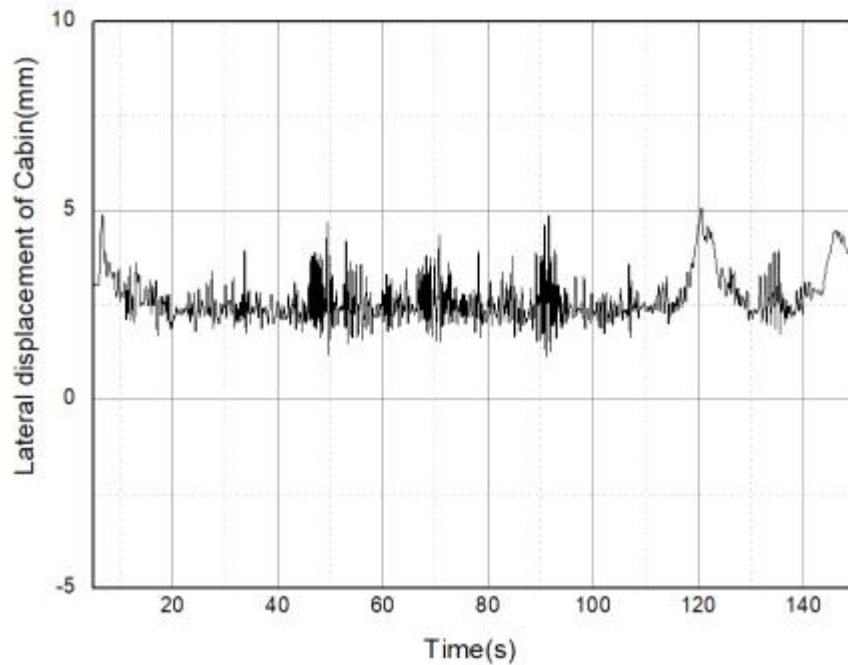


< 샤프의 x축 가속도 응답 측정 결과 >



< 샤프의 z축 가속도 응답 측정 결과 >

⑤ 트랙터 새시의 횡 방향 변위는 다물체동역학 시뮬레이션 모델에 약 0~150sec 동안 로타리 작업 부하를 인가하였을 때, 약 2~5 mm의 범위로 진동하는 것으로 나타났으며, 최대 약 5 mm의 변위를 보이는 것으로 나타남. 특히 약 40~100 sec 사이에서 심한 변동을 보이는 것으로 나타남. 이는, 위에서 언급한 새시의 z축 가속도 응답 측정 결과를 볼 때, z축 방향으로의 가속도 성분이 크게 나타남에 따라 발생하는 것으로 판단됨



< 횡방향 변위를 측정한 결과 >

㉔ 결론

- ① 트랙터 multi-body dynamics 시뮬레이션 모델은 토양 조건에서 트랙터의 거동 및 동특성 등의 해석을 위하여 필요함. 본 연구에서는 실제 트랙터 설계사양을 기준으로 트랙터 3D 모델을 설계하고, 세부 제원 등을 반영하여 시뮬레이션 모델을 개발함
- ② 개발된 multi-body dynamics 시뮬레이션 모델의 실제 농작업 부하 조건의 반영을 위하여 트랙터 부하계측시스템을 개발하고, 실제 필드시험을 통하여 로타리 작업에 따른 차축 부하 데이터를 수집함. 이를 이용하여 개발된 다물체 동역학 시뮬레이션 모델에 부하조건을 입력함
- ③ 당해연도에는 multi-body dynamics 시뮬레이션 모델을 이용하여 차체의 축방향 가속도 및 횡 방향 변위에 대한 시뮬레이션을 수행함. 그 결과, 가속도 값은 Z축이 X 축 대비 약 14% 수준을 보였으며, 새시의 횡 방향 변위는 인가된 부하와 Z축의 가속도 결과에 따라 약 2~5 mm 범위로 심하게 변화하는 것을 알 수 있음. 하지만, 이는 매우 작은 값으로 경로 추종 및 자율주행 시 무시할만한 수준의 값이라고 판단됨
- ④ 향후, 다양한 트랙터 세부 제원 및 토양 조건/모델의 반영을 통하여 시뮬레이션 모델의 검증 및 보완을 수행할 예정이며, 뿐만 아니라 자율 주행을 위한 제어기 평가가 가능한 모델링 연구를 수행할 예정

바. 위탁연구기관 2 (서울대학교)

㉔ 직교형 포장 내 경운 작업경로 생성 알고리즘 개발

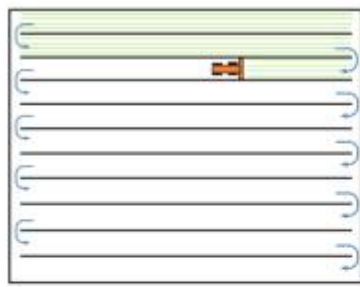
㉕ 트랙터 경운경로 분석

㉖ 차륜간격과 경운폭에 따른 경로선택

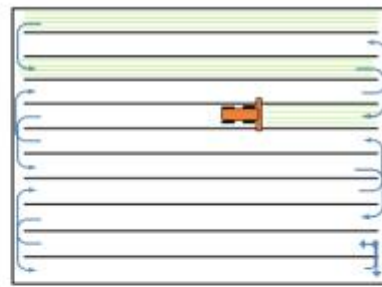
- 차륜간격이 경운폭 보다 넓을 경우는 한고랑떼기 경운을 하는 것이 능률적
- 차륜간격이 경운폭 보다 좁을 경우는 긴 변을 따라 순차적으로 왕복하면서 경운하는 것이 능률적
- 대부분의 경운작업에서 선회경로는 C형이고, 트랙터 크기에 비해 경운간격이 좁아 한고랑 떼기 경운을 하는 경우 X형 또는 R형 선회경로를 통해 순차적인 경운을 진행 (단, 이때는 트랙터의 크기는 너무 크지 않아야 함)

㉗ 적정 경운 속도와 PTO 회전속도

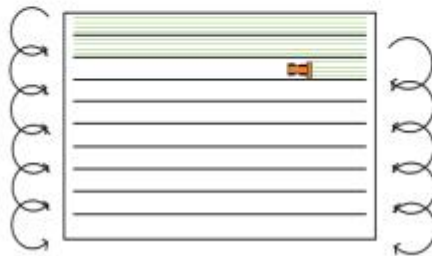
- 경운할 때의 적당한 속도는 0.4~0.6m/s이며 로터리 회전속도는 150~200rpm



(a) 경로작업기 폭이 좁을 때 경운 경로



(b) 작업기 폭이 넓을 때 경운



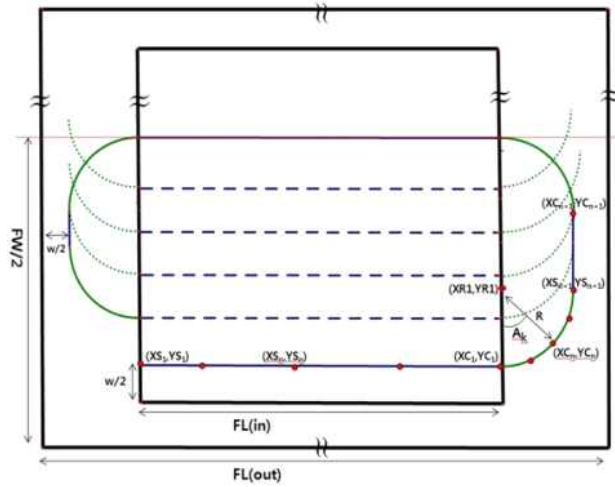
(c) 외부가 평지로 되어있는 경우 경운 경로

< 폭 & 포장 유형에 따른 트랙터 경운 작업을 위한 경로 >

㉘ C형, X형, R형 기반 선회경로 수학적 모델 개발

㉙ C형기반 경운작업 경로 모델

- 아래 그림과 같이 C형 경로는 직선과 회전 경로로 구성되며 작업기 폭을 고려한 왕복작업경로 생성을 기반으로 함
- 포장 변수(FLOUT), 트랙터 회전반경(R) 및 작업기 폭(W)를 이용 식 1과 같이 트랙터 직진 시작점 XS_1 , YS_1 과 직진 끝점 XC_1 , YC_1 을 결정함
- 트랙터 Headland에서 선회주행 시 사용한 회전 중심 XR_1 , YR_1 과 회전 끝점 X_{Sn+1} , Y_{Sn+1} 의 결정은 식 2와 같음
- 식 3을 이용하여 트랙터 작업주행의 직진경로점 X_{Sn} , Y_{Sn} 을 결정하며 선회 경로점은 식 4를 이용하여 결정함



< C형 경운작업 경로 모습 >

- 포장 변수, 회전 변경, 작업기 폭 이용 C형 경로의 직진의 시작점과 끝점의 결정

$$\begin{cases} XS_1 = R + \frac{W}{2} \\ YS_1 = R + W \end{cases} \quad \begin{cases} XC_1 = FL_{(out)} - (R + \frac{W}{2}) \\ YC_1 = YS_1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- 경로점의 간격을 인해 C형 경로의 직진 경로점 생성

$$\begin{cases} XS_n = XS_1 + \frac{k(XC_1 - XS_1)}{D_{interval}} \\ YS_n = YS_1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

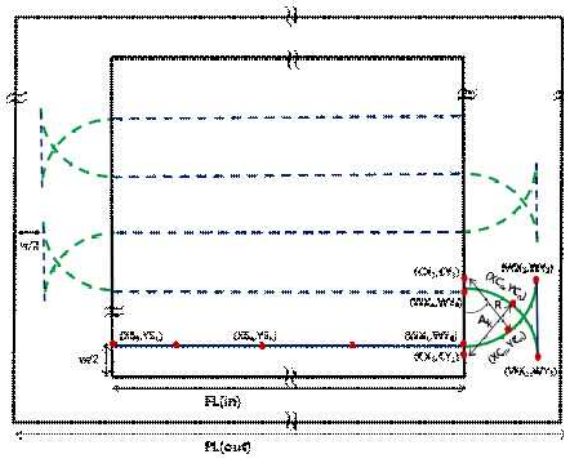
- Headland구간의 선회주행 경로점 생성

$$\begin{cases} XC_n = XR_1 + R \times \cos(A_k) \\ YC_n = YR_1 + R \times \sin(A_k) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\tan^{-1}(YR_1 - YC_1)}{XR_1 - XC_1} \\ \theta_2 = \frac{\tan^{-1}(YR_1 - YS_{n+1})}{XR_1 - XS_{n+1}} \\ A_k = \theta_1 + \frac{k(\theta_2 - \theta_1)}{N_{i.interval}} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

㉠ X형 기반 경운작업 경로 모델

- 아래 그림과 같이 R형 경로는 직선과 회전 경로로 구성되며 작업기 폭을 고려한 왕복작업 경로 생성을 기반으로 함
- 트랙터 Headland에서 선회주행 시 사용한 회전 중심 CX1, CY1 과 CX2, CY2 의 결정은 식 5와 같음
- 식 6과 식 7을 이용하여 트랙터 주행의 선회 끝점은 식 8을 이용하여 결정



< X형 경운작업 경로 모습 >

- Headland구간의 선회주행 경로점 생성

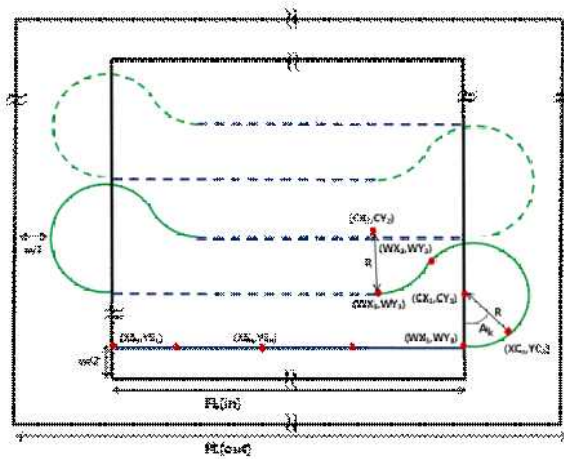
$$\begin{cases} CX_1 = WX_1 \\ CY_1 = WY_1 + R \end{cases} \quad \begin{cases} CX_2 = CX_1 \\ CY_2 = WX_1 - (R - (W - W_0)) \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

$$\begin{cases} WX_1 = FL_{out} - (R + \frac{W}{2}) \\ WY_1 = YS_1 \end{cases} \quad \begin{cases} WX_2 = CX_1 + R \\ WY_2 = CY_1 \end{cases} \quad \dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} WX_3 = CX_2 + R \\ WY_3 = CY_2 \end{cases} \quad \begin{cases} WX_4 = CX_2 \\ WY_4 = CY_2 + R \end{cases} \quad \dots\dots (7)$$

㊤ R형기반 경운작업 경로 모델

- 아래 그림과 같이 R형 경로는 직선과 회전 경로로 구성되며 작업기 폭을 고려한 왕복작업 경로 생성을 기반으로 함
- 트랙터 Headland에서 선회주행 시 사용한 회전 중심 CX1, CY1 과 CX2, CY2 의 결정은 식 8와 같음
- 식 9을 이용하여 트랙터 작업주행의 선회 끝점은 식 11을 이용하여 결정함



< R형 경운작업 경로 모습 >

- Headland구간의 선회주행 경로점 생성

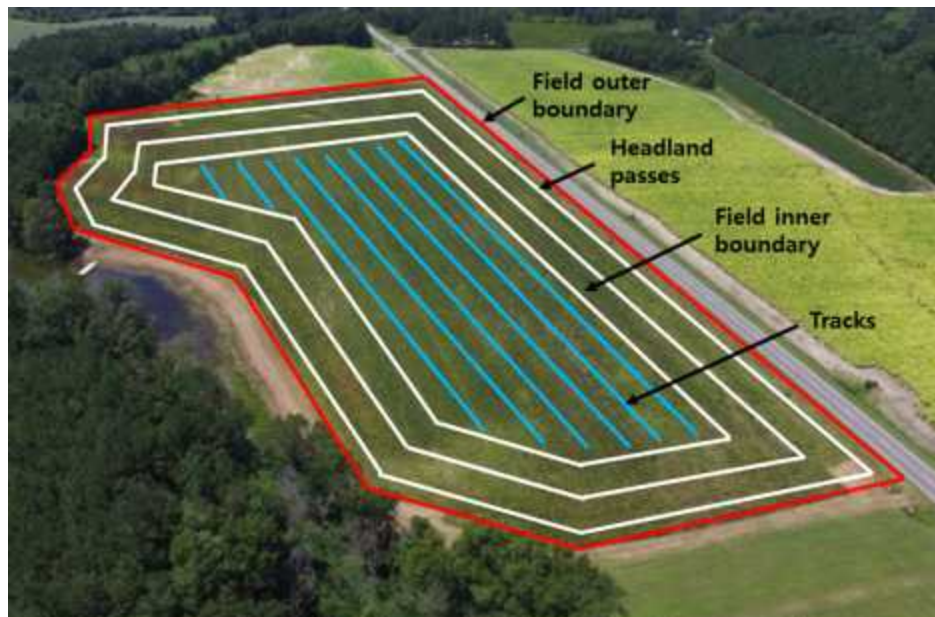
$$\begin{cases} CX_1 = WX_1 \\ CY_1 = WY_1 + R \end{cases} \quad \dots\dots (8) \quad \begin{cases} CX_2 = WX_3 \\ CY_2 = WY_3 + R \end{cases} \quad \dots\dots (9)$$

$$\begin{cases} WX_2 = \frac{CX_1 + CX_2}{2} \\ WY_2 = \frac{CY_1 + CY_2}{2} \end{cases} \dots\dots (10) \quad \begin{cases} L = ((2R)^2 - (W - W_0)^2)^{1/2} \\ WX_3 = CX_1 - L \\ WY_3 = CY_2 + (W - W_0) \end{cases} \dots\dots (11)$$

© Labview 기반 직교형 포장 경운 작업경로 생성 프로그램 개발

㉠ 자율주행 트랙터를 위한 경로생성 프로그램 구성

- 트랙터가 출발 위치에서 목적지까지 주행하기 위해서는 설정한 작업 영역에서 지나가야 할 모든 위치점을 도출하기 위해 주행경로를 생성함
- 수행한 다변형 포장에서 주행경로의 구성은 아래 그림과 같음
- 반시계 방향으로 포장 2차원 경계점을 모두 연결하여 빨간색선과 같이 포장 외부 경계선으로 표현
- 다음으로 트랙터가 포장에서 주행할 새머리 영역을 결정한 후 포장 내부 경계선을 표현
- 트랙터가 선정된 회전 패턴을 사용하여 내부 작업 영역부에서 파랑색선과 같이 왕복작업 경로를 생성
- 그 후 새머리 영역에서 흰색선과 같이 외부 회경 작업경로를 생성



< Representation of a typical field structure in the study >

- 트랙터가 포장에서 자율적으로 농작업을 수행하기 위한 주행 경로생성 시스템은 LabVIEW 2015 프로그램을 사용 개발하였으며 입력변수를 통해 작업 경로생성 후 RDDF 출력하여 경로추중에 사용할 수 있게 구
- 자율주행 트랙터의 주행경로 생성 시스템 구성은 아래 그림과 같음. 시스템의 전체적인 구성은 크게 네 개 단계로 구성함

<1단계>

- 첫 번째는 내부왕복작업부와 외부작업부로를 구분하기 위해 포장 외부 작업 경계선과 내부 작업 경계선을 생성
- 변수 설정부분으로부터 트랙터 작업기의 넓이, 작업 겹침 량과 주행 방향 등을 수동 입력이 가능하도록 함
- 프로그램을 실행하면 Text 파일형태로 반 시계 방향으로 저장된 포장 좌표 정보를 순차적으로 불러 들어오게 함
- 포장 외부 작업부에서 주행할 회경 횟수를 입력 받게 되면 포장 내부 경계 영역을 생성



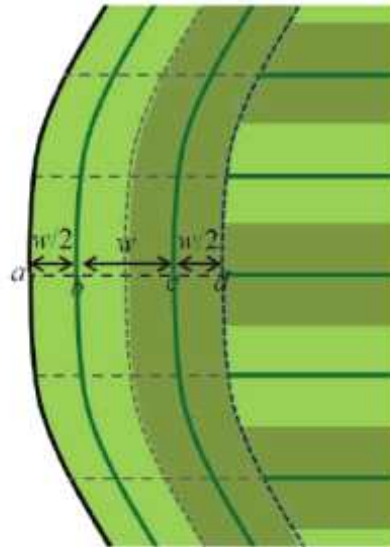
< Flowchart of the coverage path algorithm in polygonal field >

<2단계>

- 다음 단계로 포장 내부 작업부에서 트랙터가 왕복작업을 진행하기 위한 직진 경로를 생성
- 다변형 포장 내에서 미경지 작업 영역의 발생 방지를 위하여, MBR(Minimum Bounding Rectangle) 원리 기반으로 왕복 직진 작업 경로를 생성
- 사용자가 설정된 주행 방향을 이용 MBR 범위 내에서 평행선을 생성한 후, 각 평행선과 포장 내부 경계선이 교차된 두 점을 트랙터 직진 주행의 시작점과 종료점으로 도출
- 포장 외부 작업부에서 트랙터의 중복작업 영역과 회전을 위한 미 작업 거리는 적합한 주행 방향에 따라 결정
- 내부 왕복작업부에 직진 경로와 포장경계선 방향이 수직방향 관계이면 중복작업 영역과 회전 미 작업시간이 가장 작음
- 수직 방향 관계가 아닌 경우는 교차 각도 ($\theta = \theta_{path} - \theta_{field}$)를 이용 외부 작업부에서 회전 주행을 위한 미 작업 영역 경로를 생성

<3단계>

- 다음으로 포장 내부 경계선을 생성
- 아래 그림과 같이 포장 외부 작업부에서 결정된 회경 횟수를 이용 생성하는 방식으로 개발. 회경 횟수는 3 회로 가정
- 첫 번째 회경 경로와 포장 외부 경계선간의 거리는 유효 작업 폭 절반 ($w/2$)로 유지하여 생성
- 나머지 회경 경로는 유효 작업 폭(w) 만큼의 거리를 유지하여 순차적으로 생성하는 방식을 사용



< Creation of headland passes in the polygonal field (Hameed et al., 2013) >

<4단계>

- 네 번째는 트랙터가 새머리 영역에서 선회 경로를 추가하는 부분
- 무인 농작업 시 왕복 작업부에서 선회 작업부로, 선회 작업부에서 다시 왕복 작업부로 이 동 시 180도 회전
- 여기서 선회방식과 선회반경을 선정 후 선회 주행경로를 생성하여 MBR 기반으로 생성한 직진경로에 포함

㉠ 경운 경로생성 결과

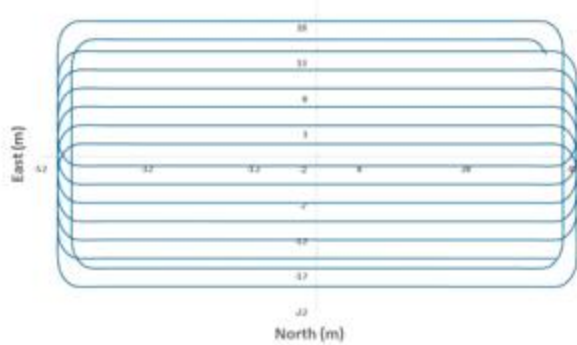
- 트랙터와 작업기의 변수는 Table 1과 같이 이용하였으며, 표준구획 0.4 ha (10m×40m) 에서 경로생성 결과는 아래 그림과 같음
- 아래 그림 (a), (b), (c)은 C형, X형, R형 선회패턴으로 생성된 작업 경로를 나타낸 것

표.1 Input variables of tractor and implement used in the study

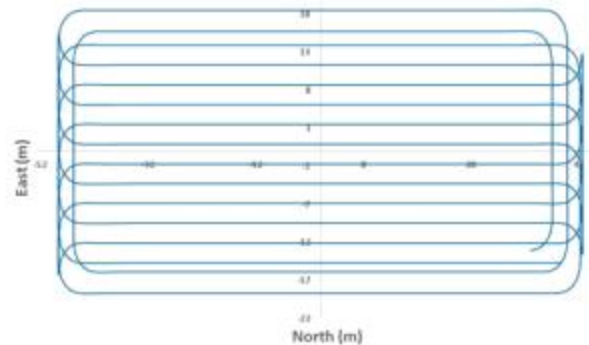
Items	Values
Manufacturer	TongYang
Model	TX803
Distance from front to rear axis	2.3 m
Distance from GPS to front axis	1.8 m
Distance from GPS to implement axis	1.3 m
Minimum turning radius	3.5 m
Width or implement	1.9 m
Width or working overlap	0.2 m

㉠ 무인 농작업을 위한 자율주행 농용차량 시뮬레이터 구축

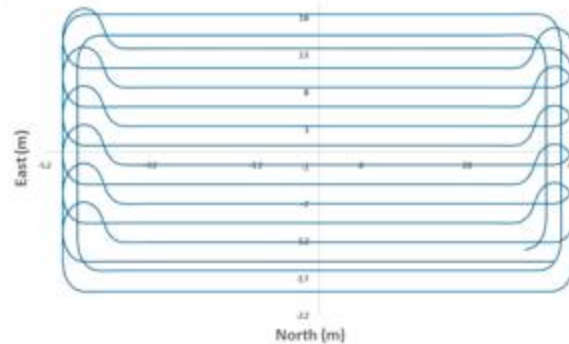
㉠ 가상현실 자율주행 농용차량 시뮬레이터



(a) C-type pattern path



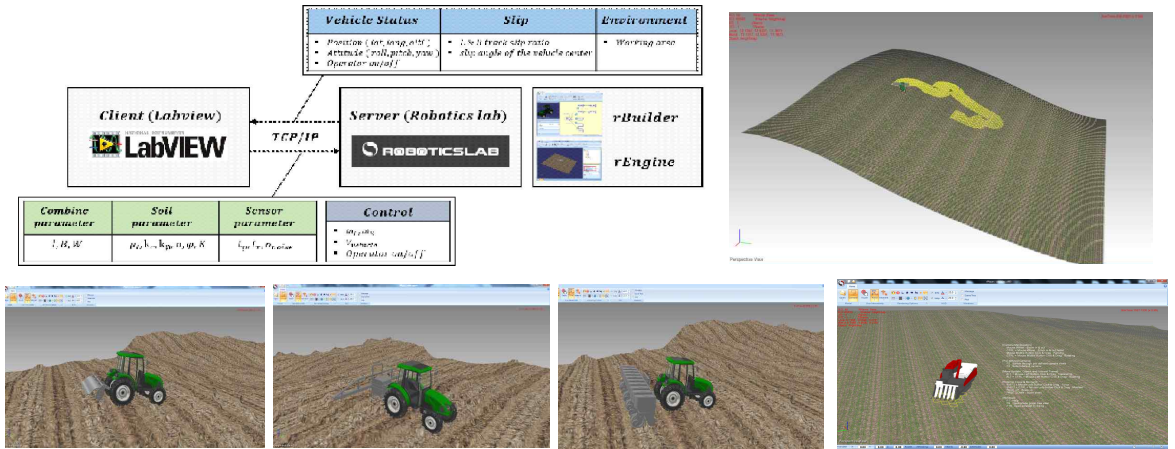
(b) X-type pattern path



(c) R-type pattern path

< 직교형 포장($100 \times 40m^2$)에서 C형, X형, R형 선회패턴에 따른 작업경로 생성 결과 >
 ㉠ 시뮬레이터 구성

- 가상현실에서 자율주행 농작업을 수행하기 위해 아래 그림과 같은 환경구조로 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발
- 테스트 환경은 크게 클라이언트 환경인 LabVIEW 프로그램에서 경로생성 및 경로추종 알고리즘을 구성하고 생성된 조향 각 및 속도정보는 Server 환경인 RoboticsLab 프로그램으로 전송하는 방식
- 차량의 위치정보와 자세정보는 서버 환경에서 클라이언트 환경으로 피드백 전송하여 목표점과 비교 후 무인 주행에 필요한 조향 각과 속도정보를 다시 생성
- 아래 그림(b)와 같이 지면경사, 토양침식에 의한 차체 미끄러짐, 작업영역 표시 등의 농업적 환경의 주요 특성이 표현 가능한 환경정보를 반영할 수 있도록 개발
- 차량의 구동엔진은 서버 환경에서 2륜 및 무한궤도형 차량의 Extended Kinematic Model (EKM)을 이용, 토양 슬립이 반영 된 차량의 움직임을 표현
- 시뮬레이터 경로생성 프로그램은 직교형 포장에서 경운, 방제, 수확 작업경로 생성이 가능하며, 다변형 포장에서 경운 최적 작업경로 생성이 가능



< 자율주행 농용차량 시뮬레이터 (a) autonomous agricultural simulation structure (b) 3D agricultural environment of simulator (c) autonomous agricultural platforms >

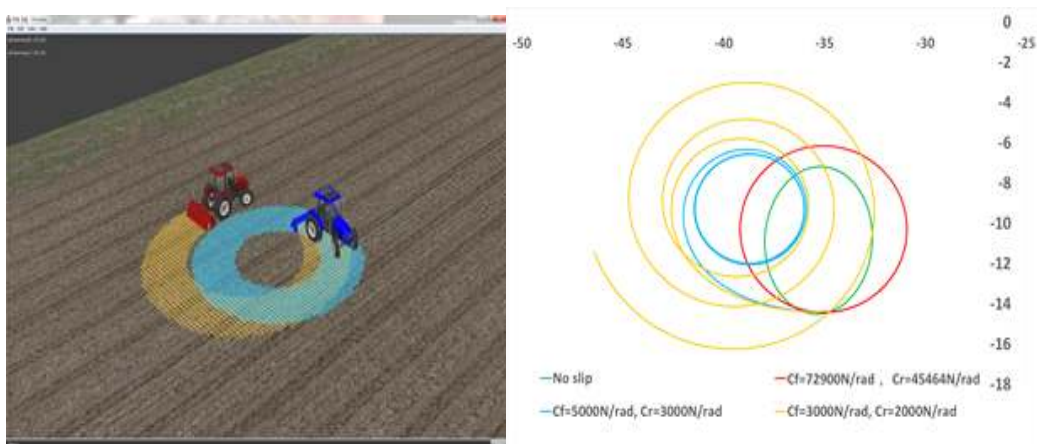
㉠ 슬립을 고려한 농용차량 주행 모델

- 트랙터가 실제 포장에서 회전 주행 시 토양의 반력에 의해 슬립현상이 발생
- 슬립현상을 시뮬레이션에서 반영하기 위해 식(12), (13)와 같이 Extended Kinematic Bicycle Model(EKBM)을 사용
- 슬립은 토양강도와 타이어 강성에 의해 결정되는 Cornering stiffness값에 의해 정의
- 아래 그림에서 보는 것과 같이 토양 슬립이 반영 안 된 차량의 추종 궤적(파란색)에 비해 슬립이 반영 된 궤적(노란색)이 회전 중심에서 더 벗어나며, Cornering stiffness값을 변경해 슬립의 강도를 수정
- 위 그림과 같이 본 2륜 차량 시뮬레이터 구동엔진은 로터베이터, 방제기, 파종기 등 다양한 작업기 탈부착이 가능해 여러 작업에 적용이 가능

C_f, C_r = 전륜과 후륜 스티프니스 (N/rad)
 β_f, β_r = 전륜과 후륜의 슬립 각도 (°)
 v_x, v_y = 종방향과 횡방향의 속도 (m/s)
 θ = 조향 각도 (°)
 m = 트랙터 무게 (kg)
 a_y = 트랙터 횡방향 가속도 (m/s²)
 I_z = 회전 관성 (kg·m²)
 $\dot{\psi}$ = 트랙터 각속도 (°/s)
 l_f, l_r = COG과 전/후륜의 휠 간의 길이 (m)

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} & -1 - \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{mv_x^2} & 0 \\ -\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{I_z} & -\frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mv_x} \\ \frac{2l_f C_f}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} \theta \quad (12)$$

$$\begin{cases} X = X_0 + \int v_x \cos \psi - v_x \beta \sin \psi dt \\ Y = Y_0 + \int v_x \sin \psi + v_x \beta \cos \psi dt \end{cases} \quad (13)$$



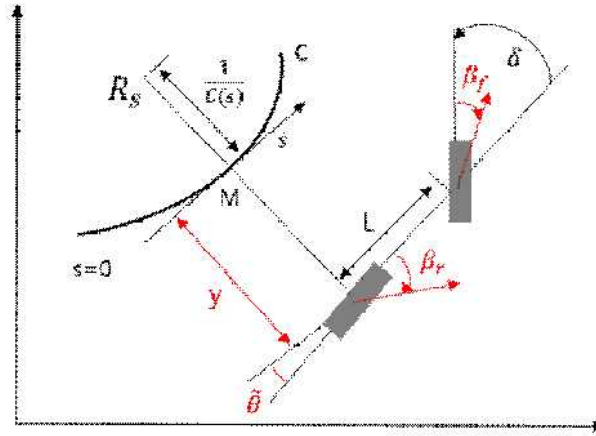
< Cornering stiffness에 따른 슬립현상 발생과 트랙터 추종궤적 변화 >

㉡ 농작업 슬립에 대응 가능한 강인 정밀추종 알고리즘 설계

㉢ 동적 경로추종 제어기 설계

㉠ Extended Ackerman Kinematic Model 기반 조향각 생성 알고리즘 개발

- 본 연구에서는 강인제어기를 설계하기 위해 아래 그림과 같이 Extended Ackerman Kinematic Model (EAKM)를 사용하여 제어 로직을 구축
- EAKM은 횡 편차(Lateral Deviation) 값과 방향각 오차(Heading Error)정보만 고려하는 것이 아닌 트랙터 포장에서 주행 시 측면 외란(lateral disturbances)도 고려하여 슬립각 β_f 와 β_r 을 극복이 가능한 주행 모델을 사용(식 14)



< Extended Ackerman Kinematic Model >

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v \times \cos(\tilde{\theta} + \beta_r)}{1 - c(s) \times y} \\ \dot{y} = v \times \sin(\tilde{\theta} + \beta_r) + \epsilon_1 \\ \dot{\tilde{\theta}} = v \times \left[\cos\beta_r \frac{\tan(\delta + \beta_f) - \tan\beta_r}{L} - \frac{c(s) \times \cos(\tilde{\theta} + \beta_r)}{1 - c(s) \times y} \right] + \epsilon_2 \end{cases} \dots\dots\dots(14)$$

Where, s: Curvilinear coordinates of point M

y: Lateral deviation

$\tilde{\theta}$: Heading error

c(s): Curvature of the path at point M

v: Vehicle longitudinal velocity

δ : Steering angle of the vehicle

β_f : Slip angle of front tire

β_r : Slip angle of rear tire

ϵ_i : Unformulated perturbation effects caused by both the inaccuracy of β_f and β_r

- 상태 변환을 통해 식 15의 EAKM을 식 16와 같이 변환 가능하며 또한 식 17과 같이 Perturbed 체인 시스템을 얻을 수 있음

$$(a_1, a_2, a_3) = (s, y, (1 - c(s) \times y) \times \tan(\tilde{\theta} + \beta_r)) \dots\dots\dots(15)$$

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = \frac{v \times \cos(\tilde{\theta} + \beta_r)}{1 - c(s) \times y} = m_1 \\ \dot{a}_2 = v \times \sin(\tilde{\theta} + \beta_r) + \epsilon_1 = a_3 \times m_1 + \epsilon_1 \\ \dot{a}_3 = \frac{d(1 - y \times c(s)) \times \tan(\tilde{\theta} + \beta_r)}{dt} = m_2 + \eta \end{cases} \dots\dots\dots(16)$$

$$\begin{aligned}
m_2 = & -vc(s)\sin(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)\tan(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r) - v\frac{dc(s)}{ds}\frac{\cos(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)}{1 - yc(s)}\tan(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)y \dots\dots\dots(17) \\
& + v\frac{1 - yc(s)}{\cos^2(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)}\left(\cos(\hat{\alpha}_r)\frac{\tan(\delta + \hat{\delta}_r)}{l} - c(s)\frac{\cos(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)}{1 - yc(s)}\right) \\
& + \frac{1 - yc(s)}{\cos^2(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)}\frac{d}{dt}\hat{\alpha} \\
\eta = & \frac{(1 - yc(s))\epsilon_2}{\cos^2(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)} - c(s)\epsilon_1\tan(\tilde{\theta} + \hat{\alpha}_r)
\end{aligned}$$

- ϵ_1 과 ϵ_2 는 ideal 체인 시스템에 외란 역할을 추가한 것이며 상태 변수 a_1 에 대해서 미분하여 식 18과 같이 단일 입력을 가진 선형 시스템으로 전환

$$\text{derivation w.r.t } t \begin{cases} a_1' = 1 \\ a_2' = a_3 + \frac{\epsilon_1}{m_1} \dots\dots\dots(18) \\ a_3' = \frac{m_2}{m_1} + \frac{\eta}{m_1} = u + \frac{\eta}{m_1} \end{cases}$$

- 가상 제어 입력 u 를 이용 식 19과 같이 PD 제어를 설계하고 식 14 EAKM을 기반으로 식 20와 같은 2차 미분 방정식을 얻게 됨
- 즉 P gain과 D gain을 조절정하여 상태 변수 a_2 a_3 를 0으로 수렴하는 것이 목적

$$u = -K_D \times z - K_P \times a_3 - \rho \times \tanh\left(\frac{0.2785\rho z}{\sigma}\right) \quad \sigma > 0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$z = K_P \times a_2 + a_3 = K_P \times y + (1 - y \times c(s)) \times \tan(\tilde{\theta} + \beta_r) \quad \dots\dots\dots(20)$$

- 식 19과 20을 이용 트랙터가 슬립을 고려한 실제 조향각은 가상 강인 제어 법칙 u 를 역 변환에 의해 식 21과 같이 얻어짐

$$\delta(y, \tilde{\theta}) = \arctan \left[\begin{aligned} & L \times \left(\frac{\cos^3(\tilde{\theta} + \beta_r)}{(1 - yc(s))^2 \cos \beta_r} \times \left(\frac{dc(s)}{ds} \times y \times \tan(\tilde{\theta} + \beta_r) \right) \right) - \beta_f \quad \dots\dots\dots(21) \\ & + u + c(s)(1 - yc(s)) \times \tan^2(\tilde{\theta} + \beta_r) \\ & + \frac{c(s)\cos(\tilde{\theta} + \beta_r)}{(1 - yc(s))^2 \times \cos \beta_r} \left) - \frac{L}{v \times \cos \beta_r} \frac{d\beta_r}{dt} + \tan \beta_r \right]
\end{aligned}$$

㉠ 농작업 환경에 의한 실시간 슬립각 예측 관측기 설계

- 트랙터가 포장에서 주행 시 발생한 전 후륜 슬립각을 알고 있는 경우 Extended Ackerman Kinematic Model을 이용 정확한 트랙터의 슬라이딩 움직임을 표현이 가능하기 때문에 이 두 변수의 추정이 매우 중요
- 기존 슬립에 관한 연구에서 슬립각을 직접 측정 사용하였으나 기술적으로도 쉽지 않으며 슬립각 센서도 고가인 단점이 있어 간접적으로 예측하는 방식을 적용
- 아래 그림은 강인제어기와 슬립관측 기반의 자율주행 시스템 개요도
- 관측 루프에서 예측 값(횡 편차와 방향각 오차)과 GPS기반으로 측정 값 이용, observer control에 적용해 전륜과 후륜의 슬립각을 각각 예측
- 예측된 슬립각을 제어 루프에 강인제어로직 기반으로 개발된 제어기에 적용하여 조향각을 계산해 트랙터 움직임과 관측기의 입력 값으로 사용



< Robust control and slip observer loops >

- 본 연구에서는 GPS/INS 기반으로 측정된 횡 편차 값과 방향각 오차정보를 기반으로 슬립 관측 알고리즘을 통해 슬립각을 간접적으로 추정
- 개발된 관측기는 제어 측면으로 문제를 해결하면 전 후륜 슬립각은 각각 제어 변수로 설계하여 EAKM 수식에서 예측된 횡 편차 값과 방향각 오차가 GPS/INS 기반으로 측정된 횡 편차 값과 방향각 오차로 수렴하게 함
- 슬립관측 알고리즘은 수식 22와 같이 EAKM 비선형 시스템을 사용.

$$\dot{\hat{X}} = f \left[\hat{X}, \begin{pmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{pmatrix} \right] = \begin{cases} f_1 = v \sin(\hat{\theta} + \beta_r) \\ f_2 = v \left[\cos \beta_r \frac{\tan(\delta + \beta_f) - \tan \beta_r}{L} - c(s) \frac{\cos(\hat{\theta} + \beta_r)}{1 - c(s)y} \right] \end{cases} \dots\dots\dots(22)$$

- 비선형 시스템 수식 22을 해결하기 위해 수식 23과 같이 선형화. 여기서 매트릭스 B는 역변환 가능한 행렬이며 이 행렬은 f를 슬립각 행렬 $u = \begin{bmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{bmatrix}$ 에 대해 편미분 한 것

$$\dot{\hat{X}} = f(\hat{X}, 0) + B(\hat{X}) \cdot \begin{pmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(23)$$

$$B(\hat{X}) = \frac{\partial f}{\partial u}(\hat{X}, 0) = \begin{bmatrix} v \cos \hat{\theta} & 0 \\ v \frac{c(s) \sin \hat{\theta}}{1 - c(s)y} - \frac{v}{L} & \frac{v}{L} (1 + \tan^2 \delta) \end{bmatrix}$$

- 관측 오차 e는 $X_{ob} - X_{meas}$ 로 정의가 되고 그의 목적은 X_{ob} 가 X_{meas} 로 근접하게 생성하는 것이며 즉 관측 오차 ϵ 를 0으로 수렴하게 만드는 것
- Error dynamics는 수식 24과 같이 정의가 되고 여기서 관측기 이득(gain)인 매트릭스 G는 Hurwitz 행렬

$$\dot{\epsilon} = G \cdot \epsilon = f(\hat{X}, 0) - \dot{\hat{X}} + B \cdot \begin{pmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

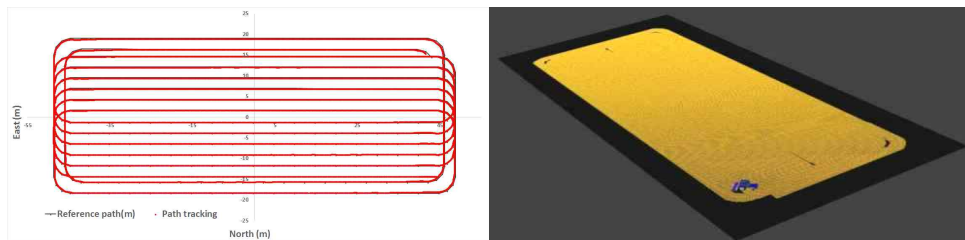
- 매트릭스 B는 역변환 가능한 행렬이 때문에 슬립각의 예측 값은 수식 25와 같이 유도 가능하며 예측 값을 강인제어 로직에 반영하도록 함
- 슬립각의 예측 값은 관측기 이득 매트릭스 G에 큰 영향을 받게 되며 관측오차 감소에 중요한 역할을 함

$$\begin{bmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \hat{\theta} & 0 \\ v \frac{c(s) \sin \hat{\theta}}{1 - c(s) \hat{y}} - \frac{v}{L} \frac{v}{L} (1 + \tan^2 \delta) \end{bmatrix}^{-1} \{ G \cdot \epsilon - f(\hat{X}, 0) + \dot{\hat{X}} \} \dots\dots\dots(25)$$

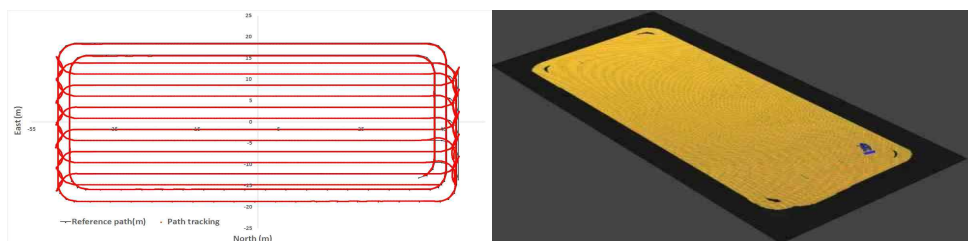
㉔ 가상 작업환경 시뮬레이터를 통한 정밀추종 알고리즘 검증

㉔ 표준구획 직교형 포장에서 C형, X형, R형 기반 자율주행 경운 경로 추종 결과

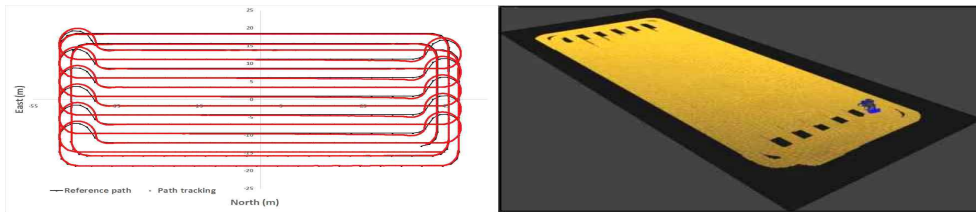
- 개발한 경로생성 알고리즘을 이용하여 가상 시뮬레이터 환경에서 경로생성 성능을 평가하였음
- 트랙터와 작업기의 제원은 Table 1과 같이 사용 하였으며 한국의 표준 포장 구획 0.4 ha (100 m × 40 m)에서 경로생성 후 시뮬레이션 평가하였음
- 아래 그림 (a)는 C형 선회패턴으로 생성된 작업 경로를 사용 주행궤적을 나타낸 것이며 시뮬레이터 환경에서 상대적 작은 미경지 영역이 있는 것으로 나타남
- 아래 그림 (b)는 X형 선회패턴으로 생성된 작업 경로를 사용 주행궤적을 나타낸 것이며 시뮬레이터 환경에서 C형 선회 패턴과 비슷하게 상대적 작은 미경지 영역이 있는 것으로 나타남
- 아래 그림 (c)는 R형 선회패턴으로 생성된 작업 경로를 사용 주행 궤적을 나타낸 것이며 시뮬레이터 환경에서 상대적 많은 미경지 영역이 있는 것을 확인
- 아래 그림 (d)와 같이 개발한 시뮬레이터를 이용 한국의 표준 포장 구획에서 3가지 선회 패턴 경로를 기반으로 포장 작업시간, 유효 작업시간 및 포장 작업효율을 분석하였음
- X형 선회 패턴 기반으로 생성된 경로는 유효 작업시간은 26.2 min과 포장 작업시간은 30 min으로 나타났으며 포장 작업효율은 87.38% 로 가장 높은 것으로 나타남
- R형 선회 패턴 기반으로 생성된 경로는 순 작업시간은 24.9 min과 전체 작업시간은 29.5 min으로 나타났으며 작업효율은 84.43%로 가장 낮았으며 시뮬레이터 환경 상에서 미경지부분이 가장 많은 것으로 판단됨
- 3가지 경로를 비교하여 X형 선회 기반의 작업 경로가 가장 적합한 것으로 나타남



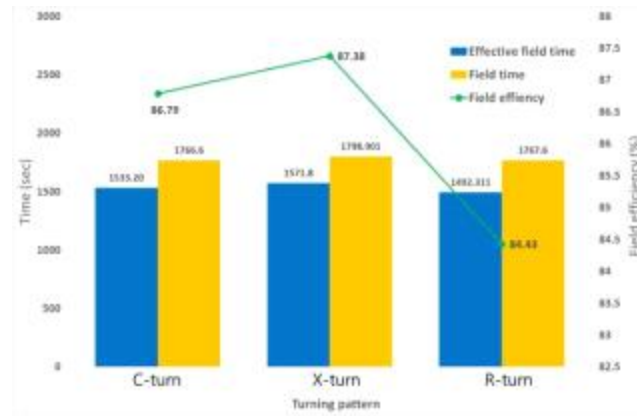
< (a) Result of simulation analysis for path generation by C-type pattern >



< (b) Result of simulation analysis for path generation by X-type pattern >



< (c) Result of simulation analysis for path generation by R-type pattern >



< (d) Result of simulation analysis by C-type, X-type and R-type pattern >

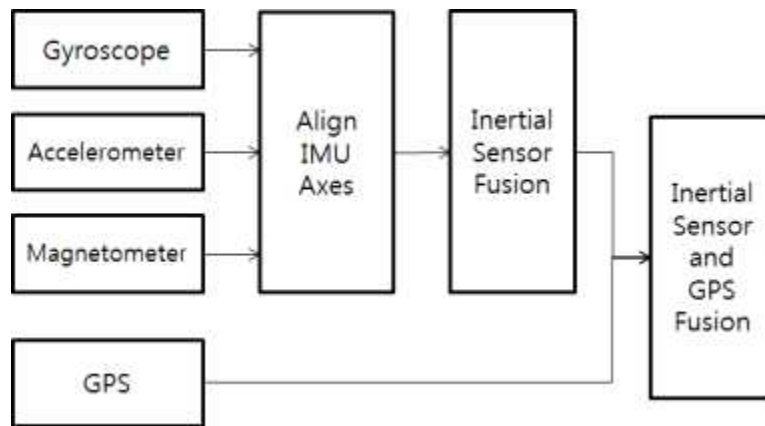
사. 위탁연구기관 3 (한국로봇융합연구원)

㉔ 참여기관 (한국로봇융합연구원) : GPS 제품 및 센서 관련 데이터 수집 및 사전조사

㉕ GPS, IMU, Encoder, Magnetometer 데이터 수집 및 사전조사 수행

㉖ 동일한 센서 제품들의 연동되는 파라미터 확인하여 융합 적용 방안 검토

하기 그림은 동일한 센서들을 융합하는 시스템의 예로써, 본 연구에서는 IMU센서에서 취득된 자이로스코프, 가속도, 지자기에서 취득된 데이터들을 정밀하게 보정해서 Roll, Pitch, Yaw의 값을 획득하고 관성 항법 시스템 (Inertial Navigation System)을 적용해서 플랫폼의 위치, 방향 및 속도를 계산함. GPS에서 취득된 데이터들을 기반으로 INS 시스템의 플랫폼의 위치, 방향 및 속도를 보정하며 최종적으로 가속도, 각속도, 지자기, 위치, 방향, 위도, 경도, 속도, 이동거리 등의 획득 데이터들을 융합 및 선택해서 사용가능하며, 본 연구에서는 동일한 센서 제품군들을 구매 후 데이터들을 취득해서 최적의 모델을 설계함.

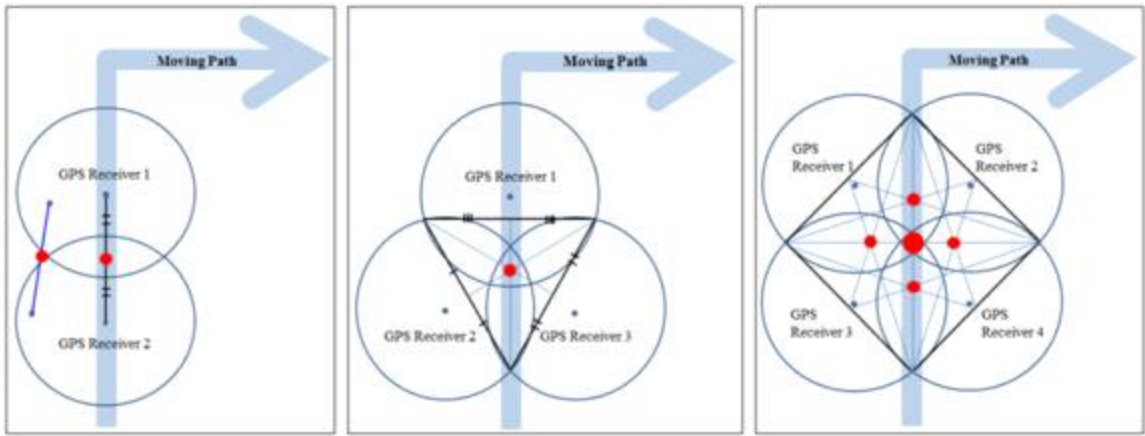


< 동일한 센서들을 융합하는 시스템의 예 >

㉗ 다중 센서들의 오차 보정 알고리즘 확인 및 센서들의 융합 적용 방안 검토

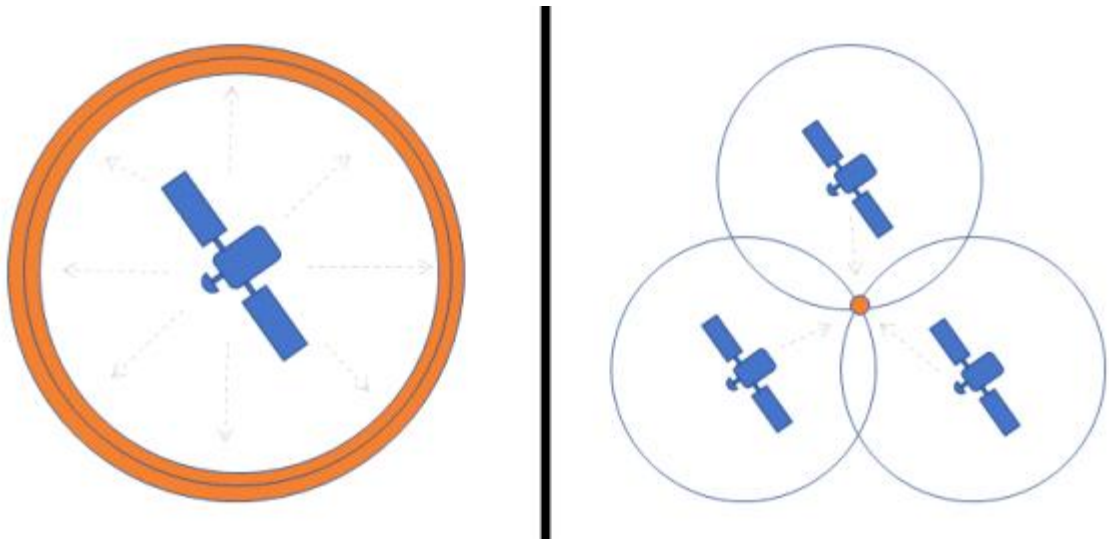
(Compensation Filter, Discrete Wavelet Transform, Kalman Filter)

다중 센서를 사용해서 오차를 보정할 시에 일반적으로 Compensation Filter, Discrete Wavelet Transform, Kalman Filter의 방법들이 사용되며, 상기 위에서 제시한 동일한 센서들을 융합하는 시스템의 예에서 Align IMU Axes와 Inertial Sensor and GPS Fusion 부분에 적용됨. 이 보정된 값들을 사용해서 하기 그림과 같이 GPS 수신기의 개수에 따른 트랙터의 무게 중심과 오차범위를 나타낸 예임. 그림에서 원은 GPS의 오차 범위이며, 삼각형 또는 사각형과 같이 GPS 수신기의 오차범위를 통해 수신기 전체 평균 오차 범위를 나타내며, 빨간 색 점이 무게중심임. GPS 수신기의 개수에 따라서 지점의 평균을 통해 위치 값을 계산하기 때문에 오차 범위가 넓은 문제가 있음. 또한, 회전 시 순간 지점 간의 방향이 틀어지게 되면 위치 오차가 더 커지게 되므로, 이를 보완하기 위해서 본 연구에서는 경제형 GPS를 다중으로 사용해서 삼각 중심 법을 이용하여 위치추정을 보완함.



< 삼각 중심점을 이용하여 위치 추정하는 시스템의 예 >

GPS는 일반적으로 실외 환경이나 기후에 따라 수신기의 안정도가 달라지기 때문에, 수신기마다 오차가 발생함. 이를 이용해서 GPS 위성의 수신 안정도를 판별하여 각 GPS 수신기의 수신 시간과 복수 개의 위성의 개수에 따라 가중치를 신뢰도로 반영해서 안정된 데이터를 획득함. 또한 복수 개의 GPS의 데이터에서 신뢰도가 낮은 GPS 수신 데이터는 빼고, 신뢰도 높은 GPS 수신 데이터만을 이용한 삼각 중심점 기반 최적의 모델을 설계함.



< 복수 개 위성의 GPS 수신 예 >

㉔ 관련 기술 자료 및 융합 알고리즘 (Kalman Filter, Particle filter, Dead-Reckoning, Inertial Navigation System)에 대한 기술 분석 수행

Kalman Filter, Particle filter, Dead-Reckoning 등은 트랙터의 예측 및 추정 방법들로 사용이 가능하며, 보정 또는 융합에 적합함. 본 연구에서는 위에서 언급한 동일한 센서들을 융합하는 시스템을 기반으로 INS 기반으로 Yaw, Roll, Pitch, 등을 사용하고 GPS 데이터들은 INS 결과를 예측 단계에서 Kalman Filter 또는 Particle Filter와 융합하여 GPS 데이터 값들을 업데이트 하는데 사용함. GPS 신호가 신뢰할 수 없는 경우 Dead-Reckoning을 사용해서 보완함

2) 2차년도 수행 결과

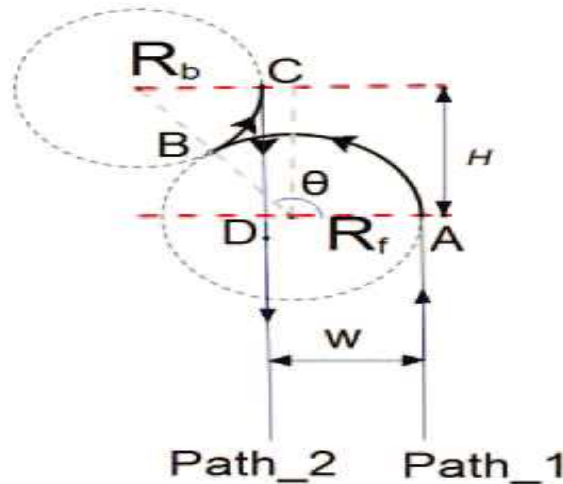
가. 주관연구기관(대동공업(주))

㉔ 조향제어 모듈 최적화 개발

㉑ 고정밀 제어 알고리즘 최적화 (Hokkaido university 공동 연구)

㉒ 조향 컨트롤 선회 알고리즘 - CB 선회

- 실제 운전자의 주행을 모방하는 선회 알고리즘을 개발
- 기본적인 프리미티브, 원호 및 선분을 기준으로 이 방법을 CB (Circle-Back) 선회라고 함.
- 농지 새머리 구간에서 후진을 통해 간단한 주행을 생성할 수 있음.
- CB 선회로 생성된 일반적인 궤적을 다음과 같음.
- 현재 경로(Path 1)과 다음 경로(Path 2) 사이의 거리(path sapce)는 W라 함.
- 작업 라인의 끝에서 트랙터는 좌회전하여 원호 A-B를 따라 움직임.
그런 다음 트랙터는 지점 B에서 오른쪽으로 조향하고 지점 C까지 후진 이동 함.
- 트랙터는 앞으로 이동하여 지점 D에서 다음 경로로 접근함.
- 전진 주행 (Rf) 및 후진 주행 (Rb)의 회전 반경은 다른 값으로 처리됨.
- 각 측면의 회전 반경 값은 경험적 값으로 고정되지 않고 선회 중에 측정되어 경로를 실시간으로 최적화할 수 있음.



< Scheme of the circle-back turning algorithm >

- 실제 시험 분석에 따르면 CB 선회의 트랙터 모델은 다음의 식과 같이 다른 방향의 선회 반경과 전진 주행의 조향 각도 및 선회 반경의 관계로 표시됨.
계수는 특정 차량에 대해 일정하다고 가정.

$$R_{\text{Left_Backward}} = \alpha_0 * R_{\text{Right_Forward}} + \beta_0$$

$$R_{\text{Right_Backward}} = \alpha_1 * R_{\text{Left_Forward}} + \beta_1$$

$$\text{Steer}_{\text{right}} = S_{00} * R_{\text{Right_Forward}}^2 + S_{01} * R_{\text{Right_Forward}} + S_{02}$$

$$\text{Steer}_{\text{left}} = S_{10} * R_{\text{Left_Forward}}^2 + S_{11} * R_{\text{Right_Forward}} + S_{12}$$

여기서,

$R_{\text{Left_Backward}}$, $R_{\text{Left_Forward}}$: 트랙터가 각각 전진/후진할 때 좌회전 주행의 회전반경

$R_{Right_Backward}$, $R_{Right_Forward}$: 트랙터가 각각 전진/후진할 때 우회전 주행의회전반경
 $Steer_{right}$, $Steer_{left}$: 좌우 방향의 조향각

㉔ 자율주행 작업

- 비례 적분 제어기

: 직진 경로를 따라 주행하는 동안 조향각을 계산

- Lateral error(d)

: GPS 안테나에서 가장 가까운 내비게이션 경로까지의 수직 거리

- Heading error

: 지면 좌표에서 원하는 각도와 실제 Heading angle의 차이

- 자율주행 방향은 트랙터의 현재 위치와 지도에서 트랙터의 현재 위치의 직각 방향의 약 1m 떨어진 내비게이션 지점의 위치에 의해 결정됨.

- 조향각

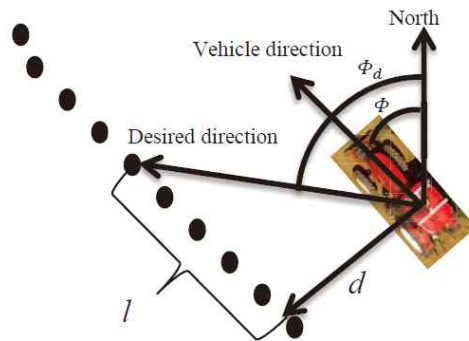
: 다음의 식에 의해 내비게이션 맵으로부터의 Lateral error 및 Heading error에 기초하여 계산

$$\psi_{steer} = -[k_{\phi}(\phi_d - \phi) + k_d d] + \psi_0$$

여기서, ψ_{steer} : 조향각

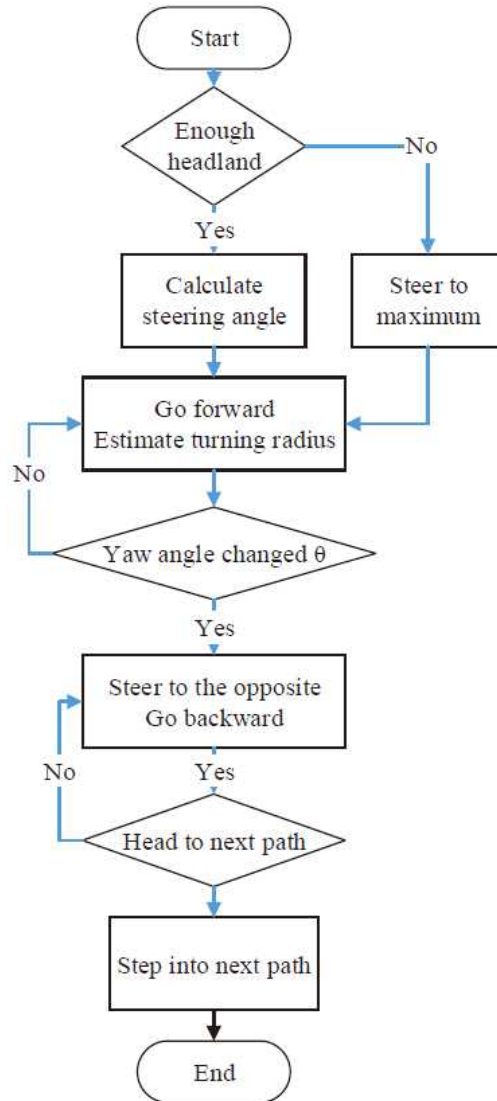
k_{ϕ} , k_d : Lateral error 및 Heading error의 gain

ψ_0 : 조향 센서의 bias



< Navigation method in straight path >

- CB 선회 방법의 작업 흐름도



< Working flow of circle-back turning algorithm >

- 선회 궤도는 원으로 단순화되고, 회전 반경은 다음의 식과 같음.

$$\text{argmin}(a, b, R_f) = \sum_{i=1}^N (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R_f^2$$

여기서, $(x_i, y_i), i \in [1, N]$: RTK-GPS에 의해 기록된 트랙터의 위치 좌표

a, b and R_f : 고정된 원의 중심 위치와 추정된 회전 반경

- 전진 주행 정지점(B점)

: yaw angle의 변화에 의해 결정됨.

$$\theta = 90 + \arcsin((R_b + w - R_f)/(R_f + R_b)) * 180 * \pi$$

㉔ 필드 시험

- 필드

: 개발된 자율주행 트랙터 시스템의 성능을 평가하기 위해 홋카이도 삿포로시 홋카이도 대학의 실험 농장에서 몇 가지 테스트가 수행

- 시험 방법

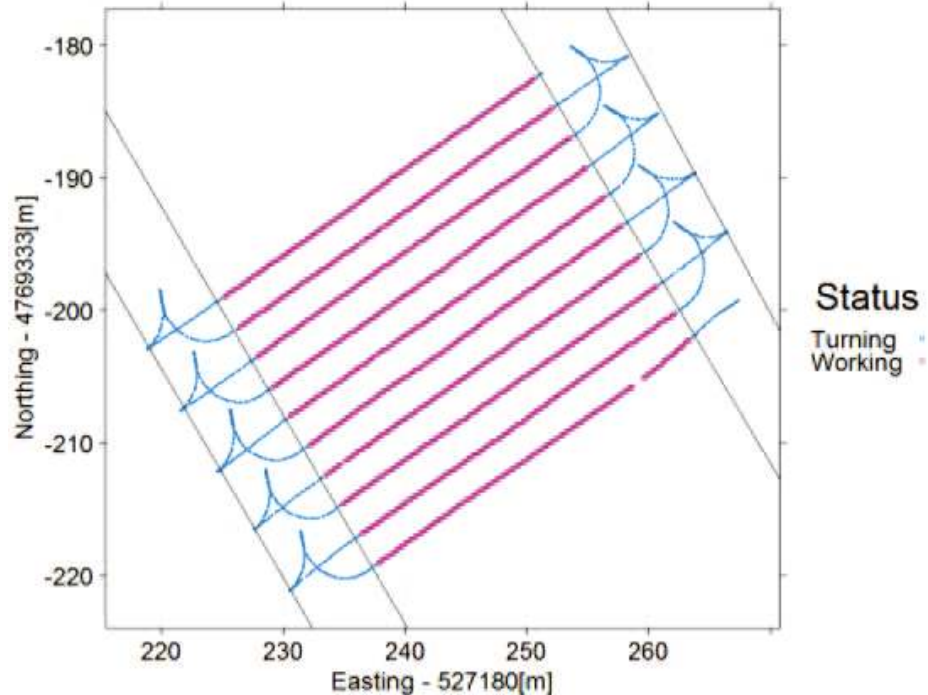
: 자율 조향 알고리즘의 정확성을 평가하기 위해 10개 경로의 맵이 작성

: 궤도의 길이를 명확하게 표현하기 위해 좌표 원점을 (527180, 4769333)으로 이동

: 테스트 맵의 왼쪽에서 오른쪽으로 10개의 경로가 있으며, 각 경로 사이의 거리는 2.64m로 설정

: 작업 경로 순서는 path 1에서 path 10까지 9번의 경로 변경

: 트랙터의 주행 속도는 선회시 1.0 m/s, 작업시 1.4 m/s로 설정



< Trajectory of robot tractor EG105 >

㉕ 시험 결과

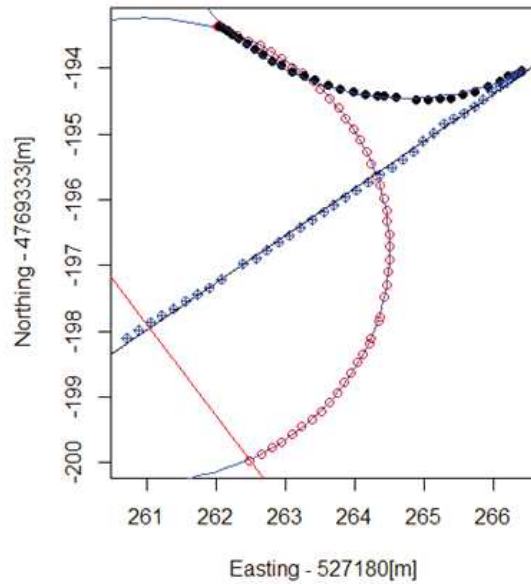
- 경로 변경

: 빨간색 원은 전방 궤적을 나타내고, 검은 점은 후방 궤적을 나타내며, 파란색 블록은 다음 경로 앞의 직선 경로를 나타냄.

: 파란색 선은 궤적의 회귀선

: 트랙터의 회전 반경이 변하는 A점과 B점을 포함한 전진/후진 선회 궤도와 두 개의 원이 일치함.

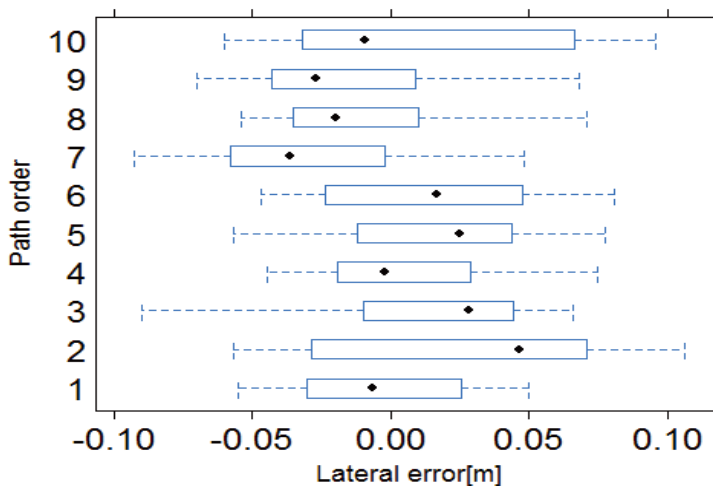
: 트랙터는 CB 선회 알고리즘에 의해 생성된 궤도를 매우 잘 주행함.



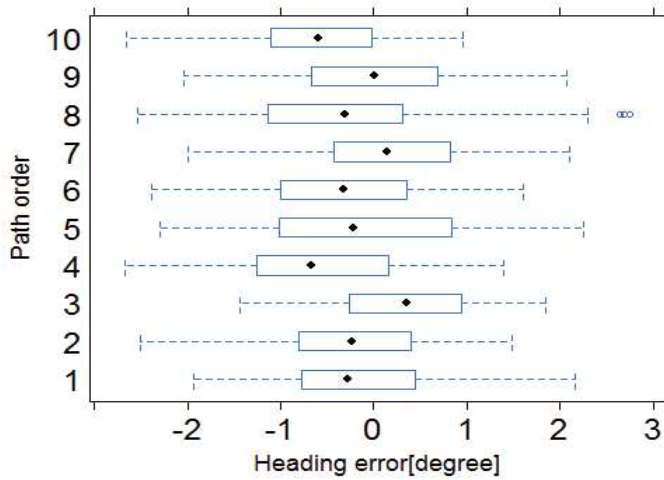
< Lane change order >

- Lateral error 및 Heading error

- : 각 경로의 Lateral error를 보여준다. Lateral error의 마이너스 값은 트랙터가 안내 경로의 왼쪽에 있음을 의미하고 양수 값은 트랙터가 경로의 오른쪽에 있음을 의미
- : 경로의 최대 편차 (Lateral error의 절대값)가 10cm 미만으로 나타났다. 모든 경로에서 편차의 평균값은 모두 5cm보다 작으며, 측면 편차의 RMS값은 모두 6cm보다 작음.
- : Lateral 편차값의 최대 RMS는 5.71cm이고 최소값은 3.12cm이며 RMS값의 평균은 4.10cm임.
- : Heading error의 절대값이 모두 3도보다 작다는 것을 알 수 있음(트랙터가 작업 라인에 큰 조향 작동없이 부드럽게 주행).
- : Heading error의 최대 RMS는 1.14도이며, 평균 Heading error는 0.98도
- : 자율주행 트랙터는 각각 6.0 cm 및 1.2도의 Lateral error 및 Heading error 내에서 1.4 m/s로 자동 주행 가능



< Lateral errors in each working path >



< Heading errors in each working path >

Path	RMS	Lateral deviation (cm)	Heading error (deg.)
Path 1		3.12	0.93
Path 2		5.71	0.87
Path 3		4.37	0.84
Path 4		2.89	1.09
Path 5		3.95	1.1
Path 6		3.89	1.01
Path 7		4.61	0.86
Path 8		3.36	1.14
Path 9		3.89	0.95
Path 10		5.24	1.03
Average		4.1	0.98

< Lateral deviation and heading error in each path >

- 각 경로의 선회의 효율성과 정확성 분석

- : 선회 궤도의 길이, 소요 시간, 농지 새머리 구간의 거리, 선회 주행 후의 Lateral error로 분석
- : 평균 선회 궤도는 약 20.4 m이며, 소요 시간은 약 25초였다. 평균 농지 새머리 구간의 거리는 약 6.6 m
- : 최대 Lateral error는 7.1 cm이었으며, 선회 후 평균 편차(Fig. 3에 표시된 D 점에서의 Lateral 편차)는 약 4.0 cm
- : CB 선회 방법은 1.0 m/s 선회 속도에서 충분히 안정적인 것으로 입증됨.

Path order	Trajectory (m)	Time (sec)	Headland (m)	Deviation (cm)
1	20.2	24.8	6.5	7.09
2	20.3	24.8	6.6	6.59
3	20	24.6	6.4	2.59
4	20.6	25	6.7	2.37
5	20.7	25.2	6.7	1.02
6	20.2	24.6	6.6	3.43
7	20.7	25.4	6.7	3.62
8	20.6	24.8	6.7	2.82
9	20.6	25.2	6.6	6.44

< Analysis of each lane change >

- 조향 모델 검증

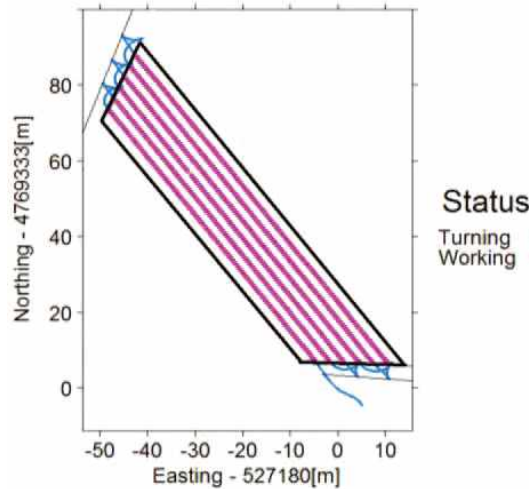
- : 실험은 경로 간의 거리(W)가 각각 2.0~3.5 m, 농지 새머리 구간(Table 3의 H)이 9.0~12.0 m 범위에서 수행됨.
- : 원하는 농지 새머리 구간 거리가 감소함에 보이는 것과 같이, 트랙터는 구간에 적합하도록 조향 각도를 조정할 수 있음을 알 수 있음.
- : 선회 후 편차는 5.8 cm 이하로 직선 경로를 따르는 것만큼 정확함.

W (m)	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5
H (m)	10.0	10.0	9.0	10.0	9.0	10.0	12.0
headland (m)	9.4	9.4	8.4	9.1	8.5	8.9	9.5
trajectory (m)	26.7	27.1	25.0	26.7	25.7	26.6	28.4
time (s)	32	32	30	32	30	31	34
deviation (cm)	3.8	4.4	5.8	3.2	2.5	1.7	5.5

< Field tests in different fields >

- 불규칙한 농지 새머리 구간에서 자율주행 트랙터의 성능

- : CB 선회 알고리즘은 알고리즘을 수정하지 않고, 농지 새머리 구간과 각 경로 사이의 각도를 완전히 활용하고, 좁은 농지 새머리 구간 거리에서 다음 경로로 전환할 수 있음.
- : 필드의 형상은 검은 색의 사변형
- : 테스트 맵의 왼쪽에서 오른쪽으로 6개의 경로가 있으며, 두 경로 사이의 거리는 2.5m임.
- : 분홍색 선은 현장에서 작업하는 동안 트랙터의 궤적이며, 파란색 선은 선회 주행 궤적임

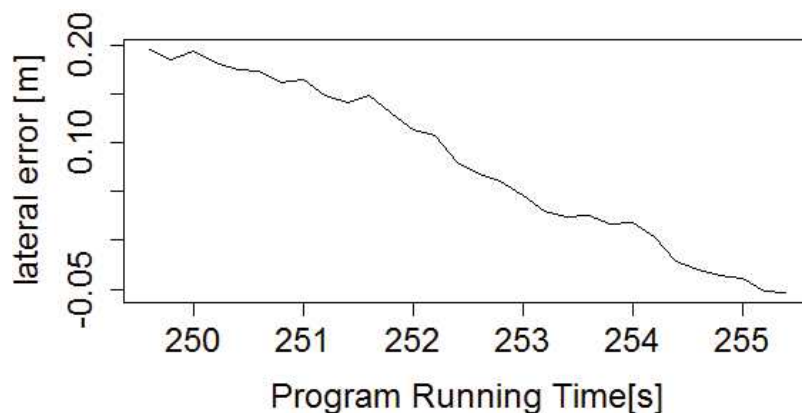


< The trajectory in an irregular shape of field >

- : B 선회 방법의 정확성을 확인하기 위해 농지 새머리 구간과 경로 사이의 각도는 약 50 °로 설정함.
- : 각 선회에 대한 결과는 Table 4에 나열되어 있으며, 여기서 선회 순서는 경로 변경 1에서 5까지 순서대로 증가함.
- : 직선 경로의 거리가 농지 새머리 구간의 불규칙한 모양으로 인해 이전 필드보다 짧아지기 때문에 궤적과 소요 시간은 작아짐.
- : 또한, 최대 꺾기 거리는 약 4.1m임.
- : 후진 선회이 끝나면 C점 (Fig. 3)의 lateral 편차는 약 20 cm이며, lateral error는 약 6 초 내에 5 cm (D점)로 감소함.

Path order	Trajectory(m)	Time(sec)	Headland(m)	Deviation(cm)
Lane change 1	18.9	23.8	3.74	3.3
Lane change 2	18.2	22.8	3.58	5.3
Lane change 3	19	23.8	3.89	2.6
Lane change 4	18.9	24	3.75	5.6
Lane change 5	20.7	25.6	4.11	1.4

<Results of each lane change >



< Lateral error in straight path during turning >

- : 농업용 트랙터에 대한 자율 제어 알고리즘을 연구
- : 상용화하고자 하는 자율주행 트랙터의 엔진 출력은 대동공업 90~125 hp, 동양물산 129 hp, 국제종합기계 110 hp으로, 100 마력급의 자율주행 트랙터 연구 진행 중임. 따라서, 일본 홋카이도 대학교에서는 105 hp의 트랙터를 이용하여 연구를 실시함.
- : 조향 장치는 유압 구동식 조향 제어 시스템(국내에서 상용화하고자 하는 트랙터와 같은 조향 제어 시스템)을 사용하여 연구 진행함.
- : 미리 정해진 내비게이션 맵 내에서, 내비게이션 방법은 자율주행 트랙터가 미리 정해진 경로와 함께 필드 작업을 수행할 수 있도록 조향 각도를 계산하는 사용됨.
- : 필드 테스트의 전체 정확도는 1.4 m/s의 속도로 4.1 cm의 RMS 오차를 보여줌.
- : 농지 새머리 구간에서의 선회 알고리즘은 선회하는 동안 효율적인 궤적과 최적화된 주행을 하도록 경로를 생성함.
- : 선회 궤적을 줄이고, 소요 시간을 줄이며, 선회 후 편차를 줄여줌으로써 복잡한 경로 변경 주행이 필요한 좁은 경로(최소 선회 반경의 2배 미만) 조건에 특히 적합함.
- : 실험 결과, 평균 농지 새머리 구간 거리는 약 6.6 m이며, 선회 후 편차는 1.0 m/s의 속도에서 약 4.0 cm로 나타남.
- : 농지 새머리 구간이 충분히 크면 자율주행 트랙터는 작은 각도로 조향하여 토양을 보호함.
- : 농지 새머리 구간을 최대한 활용하여 CB 선회 방법을 사용하는 자율주행 트랙터는 제한된 새머리 구간을 가진 불규칙적인 형태의 필드에서도 정확하게 주행할 수 있음.
- : 개발된 제어 알고리즘의 성능이 실제 필드 주행을 위해 충분히 만족되고 견고하다는 결론을 내릴 수 있음.

㉔ 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장/ 유압 시스템 최적화 설계

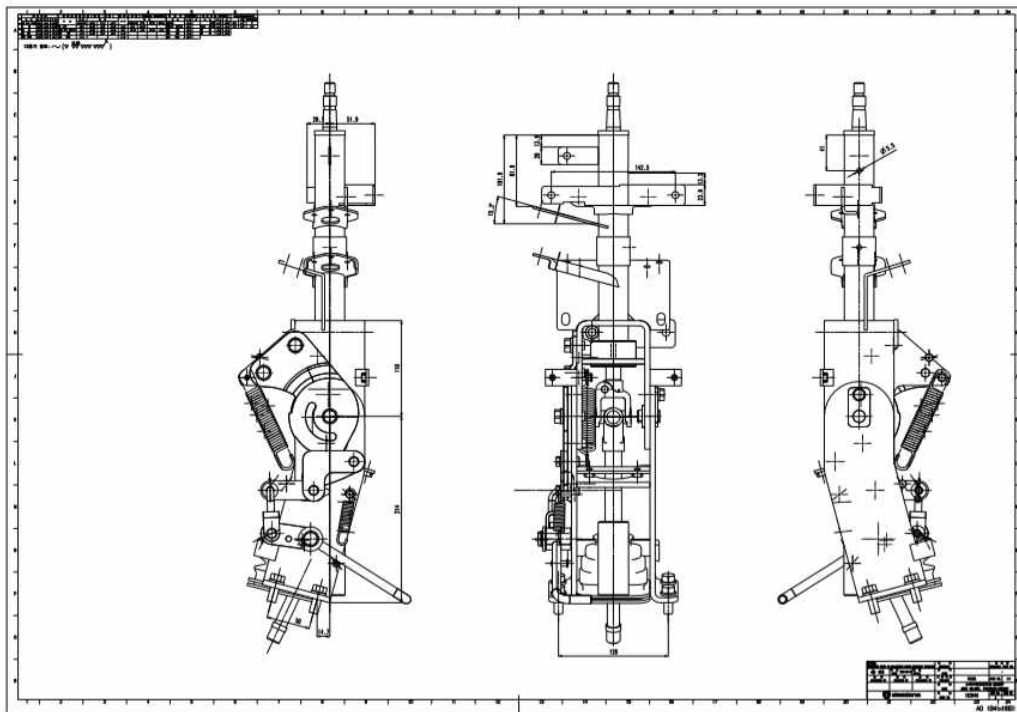
㉕ 모터 구동방식 장착부 레이아웃 최적화 설계

㉖ 조향제어모듈 탑재을 위한 스티어링 조합 설계 최적화

- 모터 구동방식의 조향제어 모듈은 스티어링휠(핸들) 아래에 위치하며 조향 칼럼에 부착되어 자율주행 시 모터의 동력으로 스티어링휠의 회전을 제어하여 의도하는 주행경로를 따라 자율 운행되도록 한다.

모터는 농경지의 비포장지와 고중량의 작업기가 부착된 트랙터의 조향륜을 무리 없이 조향작동이 될 수 있도록 충분한 토크 확보를 할 수 있는 크기로 설계되어 있다. 모터위에 부착되는 조향핸들은 모터의 크기에 의해 높게 부착되고 운전자에게 가까워져 핸들의 조작에 불편함이 생길 수 있다.

따라서 조향제어 모듈에 의하여 핸들의 위치가 높아지는 현상을 개선하기위하여 핸들 허브에서 그립까지의 높이를 축소하고, 변화된 핸들의 높이를 운전자의 체형에 알맞게 조절 사용 가능하도록 텔레스코픽 핸들 구조를 적용하였다.



<조향칼럼 설계도면>

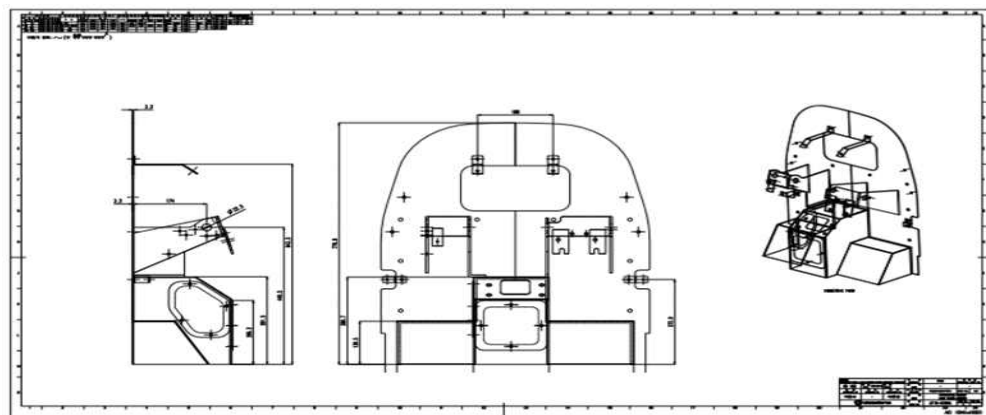
② 캐빈에 스티어링조합을 탑재하기 위한 계기판 프레임 설계 최적화
 - 조향제어 모듈이 적용된 스티어링조합은 원활한 자율주행을 위하여 주행 중 운전자에게서 이격되어 독립적인 작동이 필요하다.

1차년도 개발 수행 시 계기판 프레임은 기존 자사 트랙터 대비 틸팅 각도가 증가된 스티어링 칼럼 구조를 개발하였고, 금차 2차년도 수행은 계기판 프레임의 구조를 캐빈 전방으로 이동 배치하였다.

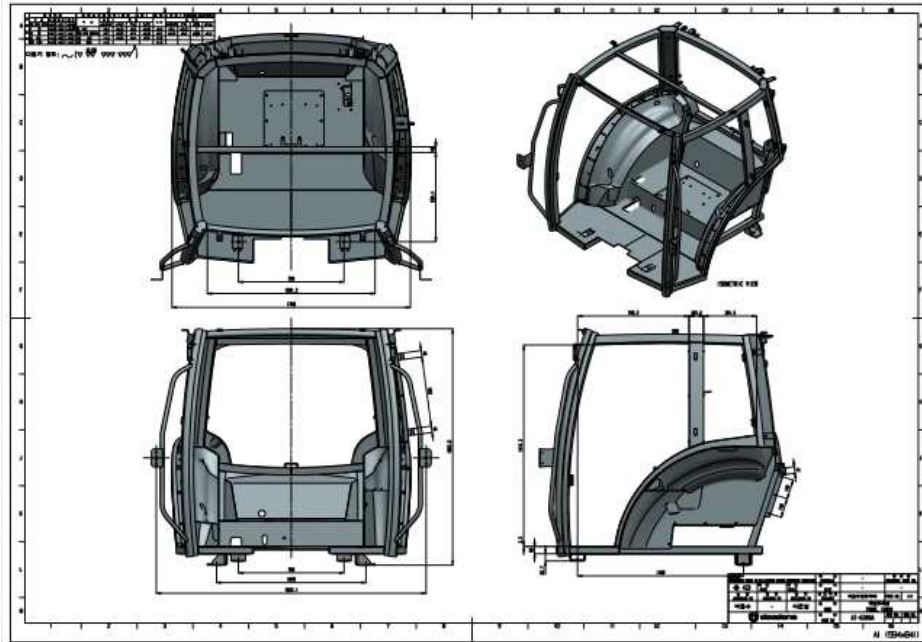
프레임의 이동 배치는 아래 그림과 같이 A필러의 구조를 기존 직선형에 가까운 형태에서 곡률을 증대함으로써 전방향으로 돌출 되도록 하고 전면 유리 또한 곡률이 적용되어 프레임의 이동배치 공간을 확보하였다.

A필러의 곡률은 상방향으로 갈수록 뒤쪽으로 치우쳐져서 전면 유리 공간이 증대되었다. 이는 운전자의 전방 시야각과 개방감이 증대되어 자율주행 시 운전자가 주변 환경을 쉽게 인식하는데 도움이 된다.

계기판 프레임의 위치는 A필러 형상으로부터 확보된 공간을 활용하여 운전자에서부터 핸들까지의 거리를 멀리하여 자율주행 시 핸들의 움직임에 운전자의 간섭이 없도록하였다.



<계기판프레임 시제품 설계 도면>



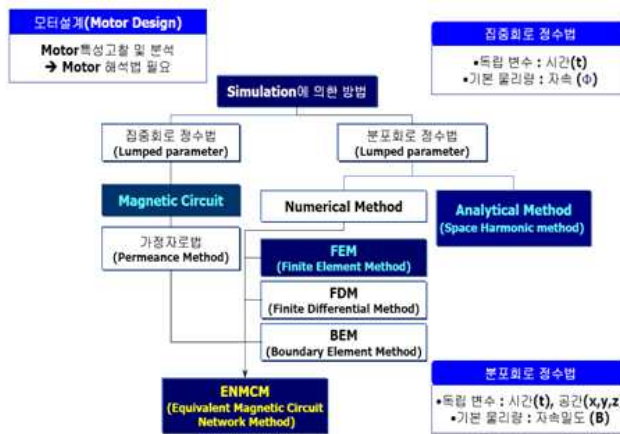
<계기판 프레임 위치 최적화를 고려한 캐빈프레임 설계 도면>

③ 조향 제어 전장시스템 설계 최적화

① 전자기 설계

- 장하분배법에 의해 모터의 기본 설계가 완료되면 그림과 같은 전자계 계산법을 이용하여 상세설계를 진행하였다.

가정 자로법 및 이론해석법은 회전자 및 고정자의 철심과 같이 복잡한 구조를 계산할 수 없기 때문에 컴퓨터를 이용한 수치 해석법을 사용하며, 그 중 가장 보편화 된 방법은 유한 요소 해석법을 기반으로 진행하였다.

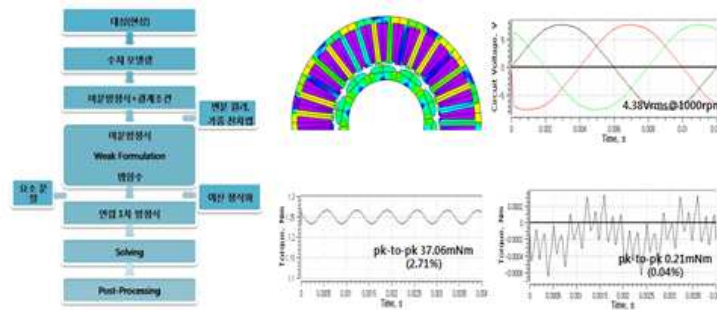


< 모터 설계 개요 >

유한요소 해석이란 해석 공간을 유한개의 소 영역(element)으로 나누고, 각 요소에 대해 절점(node)이라는 한 점에서 근사함수(trial function or interpolation function)를 이용하여 근사화 된 요소방정식을 구성한 후 이를 전 공간에 대해 조합하여 근사 해를 구하는 수치해석방법이며, FEM은 그림과 같은 과정으로 계산된다.

그림에는 유한 요소 해석 결과의 사례를 나타내었다. 해석결과 도출할 수 있는 내용은 자속밀도 및 벡터도, 전류 밀도 및 벡터도등을 통하여 철심의 포화

현상을 예상할 수 있으며, 토크 및 역기전력, 인덕턴스 등을 계산한다.



< 모터 전자기 설계 >

⑥ 기구부 설계

- 모터의 구성 요소는 크게 회전자, 고정자, 센서로 구분.
- 회전자를 구성하는 요소는 토크의 연결이 되는 축, 자속의 경로가 되는 회전자 철심과 계자의 역할을 하는 영구자석으로 구성.
- Rotor core의 재료는 무방향성 전기 강판을 사용하며, 강판의 재질의 등급에 따라 투자율 및 철손 발생 정도가 결정되어지므로 재질을 고려한 설계가 수반 되어야 하며, 자속의 포화 특성을 고려한 설계가 필요하다.
- 회전자 철심은 일반적으로 프레스 금형으로 제작하며, 고액이 투자비가 소요되므로 초기 설계가 중요하다.
- 영구자석은 모터의 토크를 발생시키기 위한 자속을 만드는 매우 중요한 요소이며, 영구자석의 재질 및 크기, 형상 등이 모터의 특성에 큰 영향을 미친다. 특히, 열에 의해 감소될 우려가 있으므로 주의하여야 하며, 영구자석의 코팅 등과 같은 제조 방법에 따라 영구 자석의 수명이 좌지우지되므로 제조 방법에 주의를 기울여야 한다.
- 영구자석이 회전자 표면에 부착되는 SPM 타입인 경우, 원심력에 의한 비산 가능성이 있으므로 영구자석의 접착력도 중요 고려 사항이다.
- 고정자를 구성하는 요소는 전자기적 구조물로는 고정자 철심, 코일 권선으로 나눌 수 있으며, 기구적인 구조물은 프레임, 브라켓 베어링 등이 포함되며, 고정자 철심은 회전자 철심과 마찬가지로, 자속의 경로가 된다.
- 무방향성 전기강판을 사용하며, 용도에 따른 재질의 선정이 중요하며, 제조 방법은 회전자 철심과 같이 금형을 사용가능하다.
- 코일 권선은 일반적으로 동선을 이용하며, 권선방식에 따라 집중권 또는 분포 권으로 제작된다.
- 권선 시 고려해야 하는 사항은 절연이 확보가 가장 중요하다.
- 절연 방법으로는 보빈이나, 절연지, Varnish 함침법 등을 사용하며, 모터의 절연 규격에 따라 절연 재료가 결정된다.

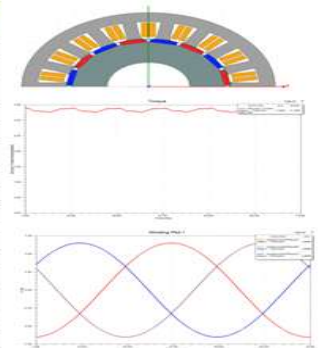


< 주요 설계 기술 요약 >

© Auto Steer 설계

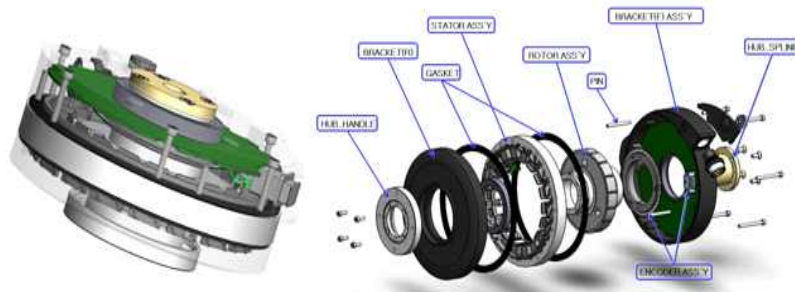
- 선진사 제품을 비교대상으로 상기의 설계과정을 거쳐 제안사양을 도출하였다. 1차 설계목표를 동급성과 유사한 성능을 확보하는데 두었고, 해석과정을 통해 해석 결과의 적정성을 확인하였다.

항목	단위	TopCon (AES-35)	제안사양 (해석치)	비고
입력전원	[Vdc]	12	12	Topcon : 9~16
정격출력	[W]	35	35	
극수	Pole	16	16	
슬롯수	Slot	18	18	
정격토크	[N m]	3.34	3.35[4.12%]리플	
정격회전속도	[rpm]	(100)	100	추정치
최대 회전속도	[rpm]	(150)	-	추정치
역기전압정수	Vrms/krpm	44.5	44.6	
회전자관성	[Kg m ² × 10 ⁻⁴]	-	-	
토크상수	[Nm/Arms]	0.737	0.728	
상인덕턴스	[mH]	0.098		
상저항	[Ω]	0.33	0.4	
정격전류	[Arms]	4.6	4.6	
권선정보		0.8mm	0.8mm*32턴	역기전력 기준
자석등급	[Guss]	4500	4500(1.39T)	
공극	[mm]	1.0	1.0	



< 모터 시뮬레이션 결과표 >

- 기구(모델링)은 설계된 데이터를 기반으로 3D CAD 툴을 이용하여 기구부 모델링 하였으며, 주요 구성도는 하기 그림과 같다. 하기 그림은 총 조립형상을 도시하였고, 개별 부품의 구성형태를 전개형으로 나타내었다.



< 주요 구성도 >

- 구조상 제약을 갖는 제어기는 모터의 내외경 치수를 기준으로 프레임내부에 일체화하고, 엔코더 신호처리를 위한 디스크 및 이미지센서를 정밀 제어할 수 있도록 그 형상과 부품배치를 실시하였다.

설계된 제어기의 3D 모델링 이미지와 사양을 그림에 나타내었다.

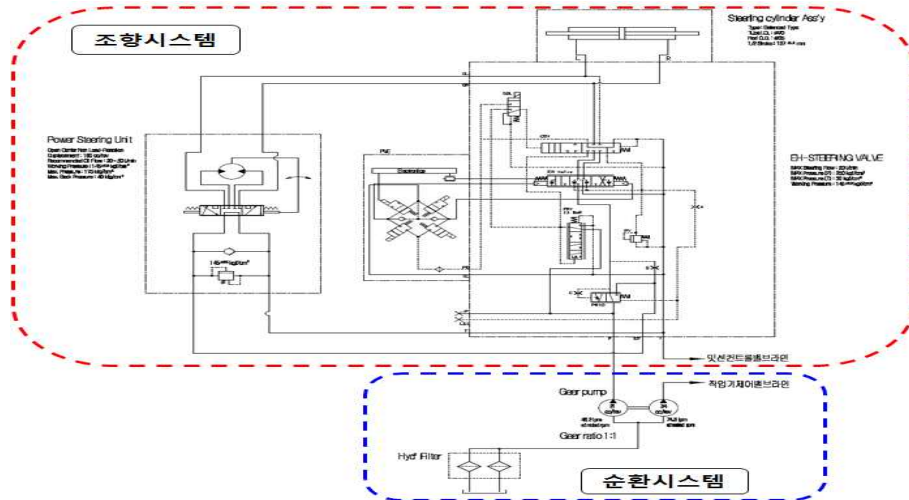
항목	단위	제어기	비고
공급전압	VDC	9~15V	
정격 전류	ARMS	4.6	
제어기 효율	%	>90	
모터 형태		PMSM	
전류 방식		사인파	
회전 센서		인크리멘탈	
냉각방식		자연냉각	
보호등급		IP65	



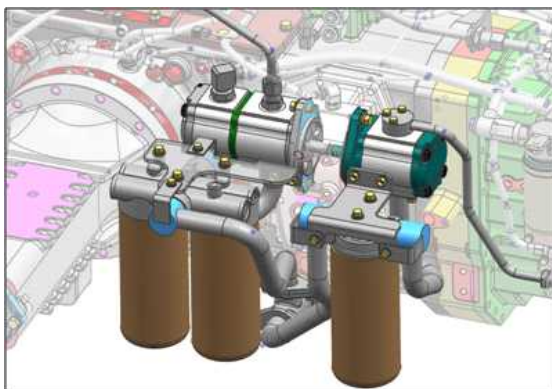
< 제어기 사양표 및 모델링 >

㉠ 유압 구동방식 조향제어 시스템 Layout 최적화 설계

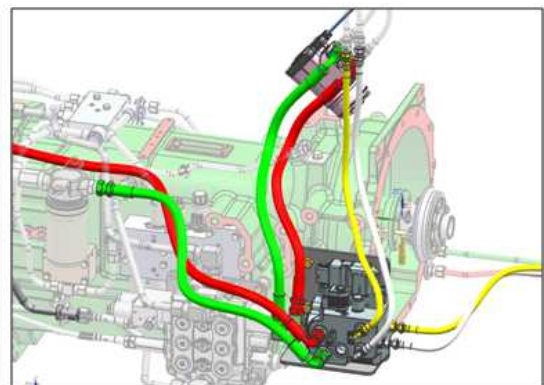
① 순환 시스템, 조향 장치 구현 및 유압 회로 Layout 설계



< 유압 구동방식 조향제어 시스템 유압회로도 >



순환제어시스템



조향시스템

< 유압 구동방식 조향제어 시스템 Layout >

- 자율주행 트랙터 장작을 위해 순환 시스템 및 조향제어 시스템 유압회로도를 설계하였고, 이를 바탕으로 순환 및 조향제어 시스템 Layout을 설계 하였다.
- 조향제어 시스템은 고속 주행시 직진성 향상을 위해 Load-Reaction 타입의

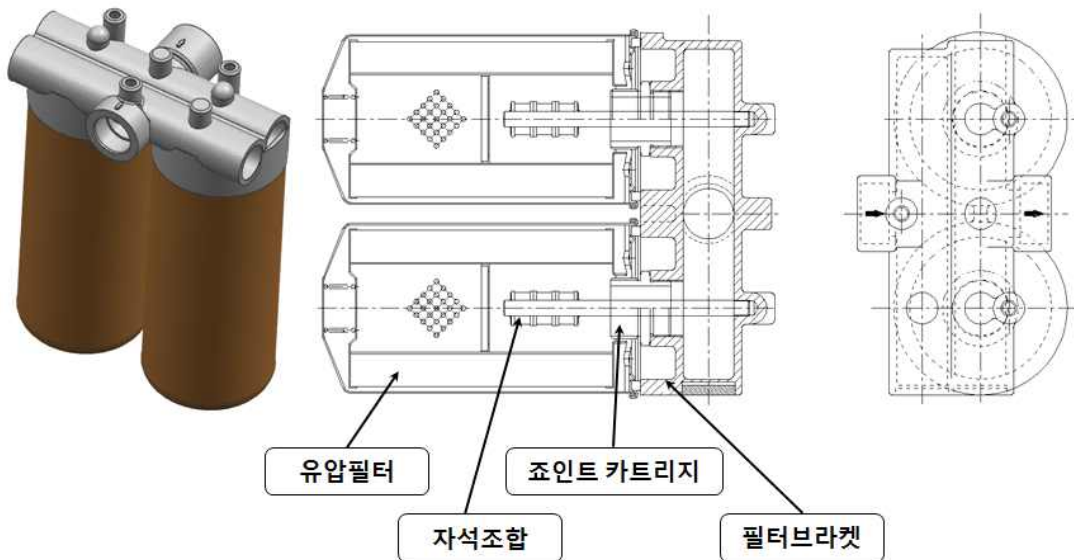
파워스티어링 유닛 및 조향제어 알고리즘에 따라 자동으로 좌/우 조향각을 조정하는 방식을 구현하는 조향제어밸브로 구성된다. 조향제어밸브는 적절한 조향제어시간과 주행상황에 따른 조향제어를 위해 전자비례제어 솔레노이드가 내장된 제품을 선정하여 설계 하였다.

- 파워스티어링유닛은 조향성능 및 핸들조작성 및 핸들 회전수를 기존 양산 트랙터와 유사하게 설정하기 위하여 용량이 160 cc/rev 이며, 시스템 압력을 작동 시 $145 \pm 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 최대압력이 175 kgf/cm^2 로 설계 하였다.
- 순환 시스템은 기어펌프에 따른 소비출력을 최소화 하고, 흡입 부압 감소를 위해 밧션케이싱측에 배치 하였으며, 펌프를 통해 토출된 오일이 조향제어밸브 및 파워스티어링 유닛을 통과한 후 밧션 변속 제어를 위해 주행제어밸브 및 밧션제어밸브로 공급될 수 있도록 설계 하였다.
- 자율주행 트랙터 제작을 위해 추가된 조향제어밸브 및 주행제어밸브는 고정밀의 전자 비례제어 솔레노이드를 사용하여 유량제어가 가능하다.

외부 이물질에 의한 오작동시 자율주행 동작에 문제를 야기 시킬 문제점을 보완 하기 위해 시제품 자율주행 트랙터는 여과효율 증대 및 흡입부압 감소를 위해 오일필터 및 필터브라켓을 신규 개발하여 적용하는 것을 검토하여 이물질 유입에 의한 밸브 오작동을 방지할 수 있도록 구성 하였다.

자율주행 시 주행 추종 성능 향상을 위해 트랙터 앞차축에 각도 센서를 장착하여 이를 피드백 제어가 가능한 형태로 구성하였다.

자율주행 시 주행속도가 빠를경우 좌우 조향각이 크게 되면 안전상의 문제가 야기될 수 있다. 이를 예방하기 위해 차량의 주행속도에 따라 최대 조향각을 제어하여 주행 시 과도한 조향으로 인한 안전 및 차량 파손 등의 문제를 예방하였다.

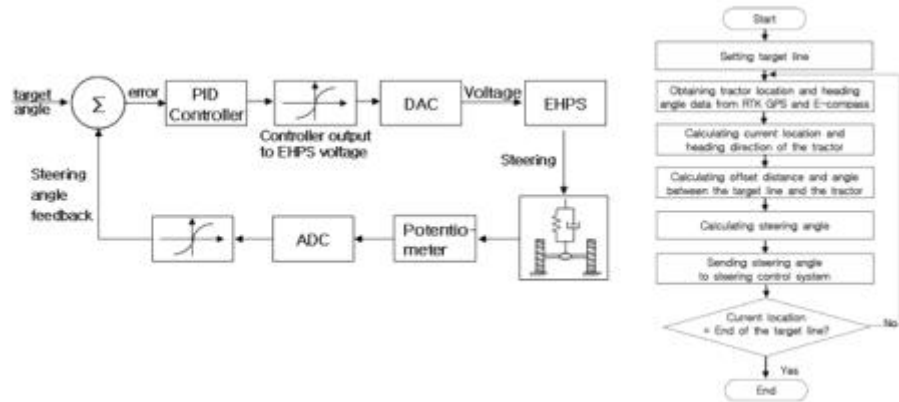


< 유압필터 구성 >

② 조향 제어 전장시스템 최적화 설계

- 조향제어기는 조향각 계산 알고리즘에서 계산된 조향각에 대한 제어오차를 최소화하기 위해 비례제어밸브를 PID제어기를 통해서 제어를 수행하도록 한다. GNSS 및 IMU로부터 제공된 현재 위치 정보를 기준으로 전송되는 주행 경로 생성 컨트롤러의 목표 앵글 값과의 차이를 최소화하기 위해 트랙터의 전륜축에

부착된 전륜 각 센서로부터 Feedback 된 정보를 이용해서 비례제어밸브(EHPS)를 제어한다. 알고리즘 및 기관별 차량의 캘리브레이션 연구가 진행 중이며 실차 제작을 통해 실차 검증 시험 진행 중이다.



< 조향 제어 전장시스템 알고리즘 >

㉔ 통합시스템 연동 인터페이스 개발

㉕ 통합시스템 CAN 통신 공용 프로토콜 매칭

㉖ CAN 통신 사양

- CAN 2.0B를 사용하고, CAN 사용 속도(BAUD RATE)는 250KBPS로 선정하였으며, 통신 주기는 50ms(20Hz)로 하였다.

㉗ CAN 프로토콜

- CAN 메시지는 전방 차축 휠의 조향 각 정보 등을 포함한 메시지를 발송하며, 전방 차축의 위치센서 전압 값을 AD값으로 2BYTE로 발송한다. 또한 조향관련 메시지로 안전사양과 관련되어 CAN 메시지 2개를 동시에 보내도록하여 CAN 메시지 1개를 잃더라도 안전상에 문제가 없도록 발송하게 하였다.

CAN ID : 0x0CFF12FA, 0x0CFF13FA 사용 속도 250KBPS 통신주기 : 50ms							
3. 조향컨트롤러 -> 주행경로 컨트롤러							
구분	BIT8	BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2
Byte 1	(Reserved) All 1						
Byte 2	Wheel angle signal 1 WAS_WA_P: 0.99 Error Condition 100.4900 Valid wheel angle signal to scale according to P3185, P3187 & P3189 4901.5000 Error Condition 5001.65535 Reserved						
Byte 3							
Byte 4							
Byte 5	(Reserved) All 1						
Byte 6	(Reserved)			Sequence number [WAS_Seq_P], incremented by 1 in each WAS primary message 0.15 Rolls over from 15 to 0			
Byte 7	CRC16 for data bytes 1-6 [WAS_CRC_P]: 0.65535 Polynomial: 0xC86C						
Byte 8							

< 자율주행 조향 컨트롤러 발신 CAN 프로토콜 >

- CAN 메시지는 경로 생성 컨트롤러에서 목표 조향 각 정보 및 자율주행 모드 등을 포함한 발신 하는 메시지를 수신하며, 목표 조향 각 정보 값 AD값으로 2 BYTE로 발신한 메시지를 수신한다. 그리고 자율주행 모드 데이터는 2번째 BYTE 8번째 BIT에서 발신한 메시지를 수신한다. 또한 조향관련 메시지로 안전사양과 관련되어 CAN 메시지 2개를 동시에 보내도록하여 CAN 메시지 1개를 잃더라도 안전상에 문제가 없도록 수신하게 하였다.

Priority: 3
 PGN: 44288 (0xAD00)

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1..2	U16	0..64255 64256..65535	Curvature command [GPSX_Curvature_cmd]: Curvature command in [0.25km ²] (offset - 8032km ²) 0 corresponds to -8032 km ² (Max left) 32128 corresponds to 0 km ² (Straight) 64255 corresponds to 8031,75 km ² (Max right) Information not available
3	Bits 8..3 Bits 2..1	All 1 00 01 10 11	Reserved Steering command status [GPSX_Str_cmd_status]: Not intended for steering Intended for steering Error condition Information not available
4..8	-	All 1	Reserved

Priority: 3
 PGN: 44032 (0xAC00)

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1..2	U16	0..64255 64256..65535	Estimated curvature [GPSX_Estimated_curvature]: Curvature command in [0.25km ²] (offset - 8032km ²) 0 corresponds to -8032 km ² (Max left) 32128 corresponds to 0 km ² (Straight) 64255 corresponds to 8031,75 km ² (Max right) Information not available
3	Bits 8..7	00 01 10 11	Request reset command status [GPSX_Req_reset]: Reset not required Reset required Error condition Information not available
	Bits 6..5	00 01 10 11	Steering input position status [GPSX_Str_input_pos_status]: Incorrect position Correct position Error condition Information not available
	Bits 4..3	00 01 10 11	Steering system readiness [GPSX_System_ready]: System is not ready System is ready Error condition Information not available
	Bits 2..1	00 01 10 11	Mechanical system lockout [GPSX_System_lockout]: Not active Active Error condition Information not available

< 자율주행 조향 컨트롤러 수신 CAN 목표 조향 프로토콜 >

Priority: 3
 PGN: If configured as proprietary A: 61184 (0xEF00)
 If configured as proprietary B: 65280 + P3325 (default: 0xFF42)
 Occurrence: Periodic - every 500ms

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1	U8	0 All 1	If configured as proprietary A: Extended messages identifier [MMI_XID_P] If configured as proprietary B: Reserved
2	U8	0x00 0x10 0x11 0x20 0x21 0x22 0x23 0x24	Steering mode request [MMI_Str_mode_req_P]: On-Road Off-Road Reaction Off-Road Non-Reaction STW Program 1 STW Program 2 STW Program 3 STW Program 4 STW Program 5
3	Bits 8..7 Bits 6..5 Bits 4..1	00 01 10 11 00 01 10 11 All 1	Auto-guidance receiver selection and lockout [MMI_Lockout_GPS_P]: No GPS receiver selected (GPS steering prohibited) GPS Steering selected GPS 2 Steering selected Reserved AUX steering device lockout [MMI_Lockout_AUX_P]: AUX steering allowed AUX steering prohibited Reserved Information not available Reserved
4	U8		AUX program request [MMI_AUX_mode_req_P]:

Priority: 3
 PGN: If configured as proprietary A: 61184 (0xEF00)
 If configured as proprietary B: 65280 + P3325 (default: 0xFF43)
 Occurrence: Periodic - every 500ms

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1	U8	2 All 1	If configured as proprietary A: Extended messages identifier [MMI_XID_R] If configured as proprietary B: Reserved
2	U8	0x00 0x10 0x11 0x20 0x21 0x22 0x23 0x24	Steering mode request [MMI_Str_mode_req_R]: On-Road Off-Road Reaction Off-Road Non-Reaction STW Program 1 STW Program 2 STW Program 3 STW Program 4 STW Program 5
3	Bits 8..7	00 01 10 11	GPS receiver selection and lockout [MMI_Lockout_GPS_R]: No GPS receiver selected (GPS steering prohibited) GPS Steering selected GPS 2 Steering selected Reserved

< 자율주행 조향 컨트롤러 수신 CAN 자율주행 모드 프로토콜 >

㉔ 통합제어기 CAN 통신 연동 시험

- 자율주행 CAN BUS 상에서 조향 컨트롤러의 CAN 데이터가 전송되는 것을 P-CAN 장비를 통하여 측정하였다.

하기 그림과 같이 발신 CAN 메시지는 앞차측 조향각 센서의 값을 CAN ID 0x0CFF12FA, 0x0CFF13FA로 전송되고 있고 전송 주기는 50ms(20Hz)로 확인할 수 있다. 자세하게 살펴보면 BYTE 2~3에서 앞차측 조향각 값을 100~4900 AD 값으로 전송된다.

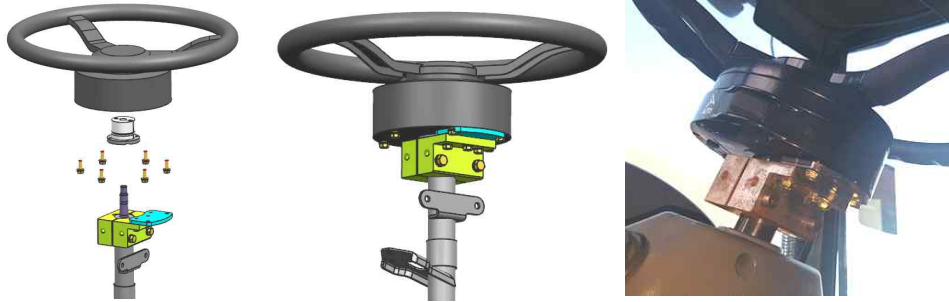
Bus	CAN-ID	DLC	Symbol	Data	Cycle Time	Count	Trigger	Creator
1	0CFF12FAh	8		01 00 11 65 00 00 00 00	50	5335	Time	User
1	0CFF12FAh	8		01 00 96 12 01 00 00 00	Over	0		User
1	0CFF13FAh	8		01 00 07 00 00 00 00 00	50	5150	Time	User
1	18F00E50h	8		00 00 12 00 00 00 10 0F	50	104	Time	User
1	18F00E50h	8		01 00 07 00 00 00 00 00	50	157	Time	User
1	18F00E50h	8		00 00 12 00 00 00 10 0F	100	74	Time	User
1	18F02B30h	8		01 00 07 F1 00 00 00 00	50	140	Time	User
1	18F01500h	8		00 13 00 00 00 00 45 00	100	81	Time	User
1	18F01500h	8		00 13 00 00 00 00 45 00	100	61	Time	User
1	18F0F500h	8		00 13 00 00 00 00 45 00	100	46	Time	User

< 조향 컨트롤러 측정 CAN 메시지 >

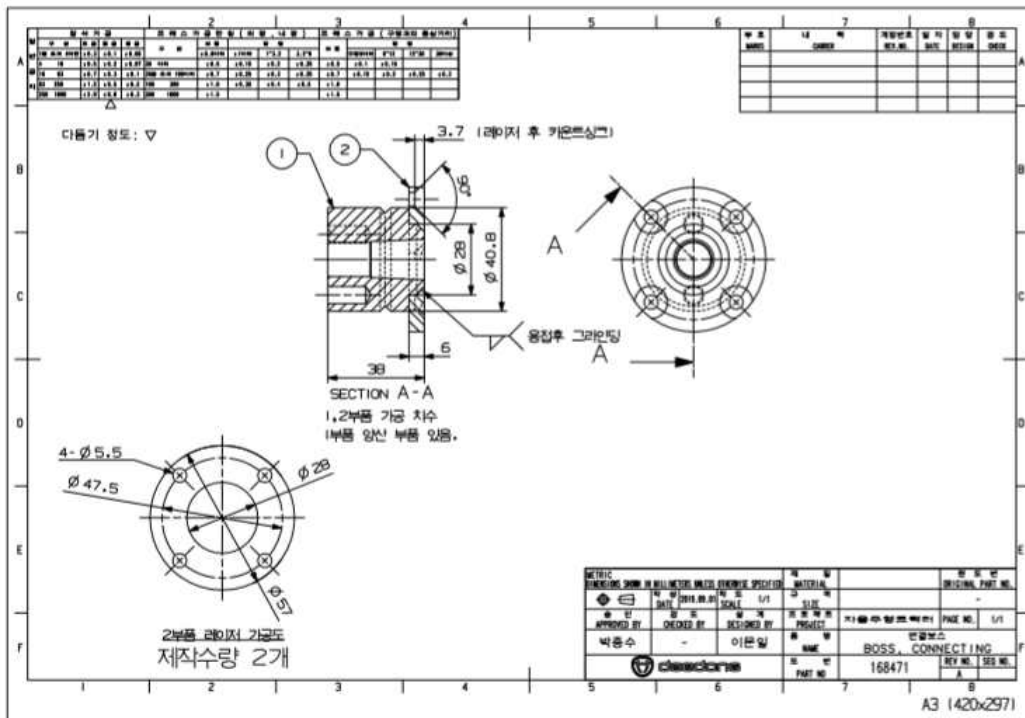
① 시제품 제작 및 시험

① 선진사 제품 성능시험을 위한 장착부 시제품 제작

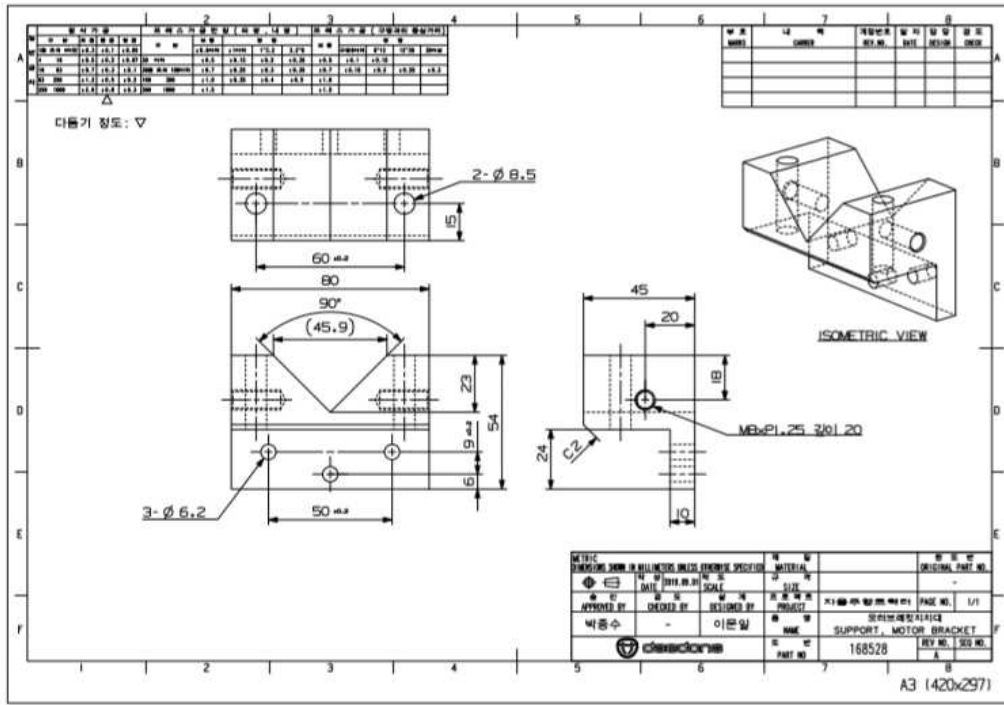
- 선진사 제품 장착을 위한 모터 마운팅 구조와 모터와 조향축 연결을 위한 커플링과 모터를 조향칼럼에 견고하게 고정할 수 있는 고정 브라켓을 설계 및 제작하였다.



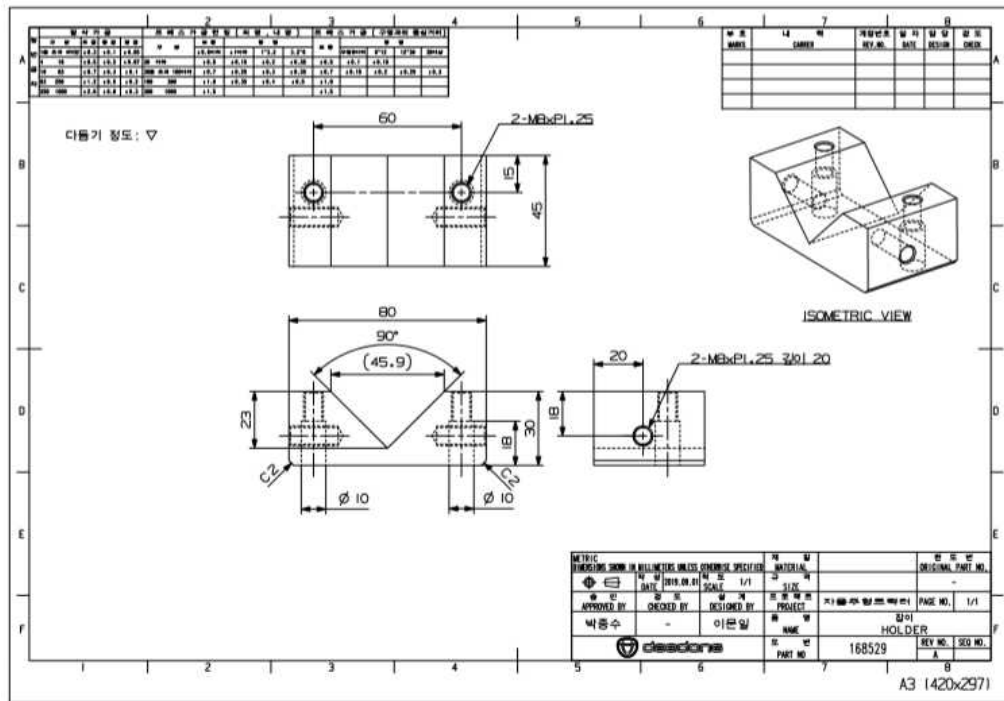
-모터 장착부 설계 및 제작-



<축 연결보스 설계 도면>



<모터고정브라켓 앞>



<모터고정브라켓 뒤>

모터 고정브라켓은 조향토크를 견딜 수 있도록 견고한 블록형태로 제작하여 조향칼럼의 앞, 뒤쪽에서 동시에 지지하는 구조로 설계, 제작 하였다.

㉔ 국내작업 환경을 반영한 선진사 조향제어모듈 성능 최적화

① 선진사 조향제어모듈 성능 최적화를 위한 선진사 모터 분석

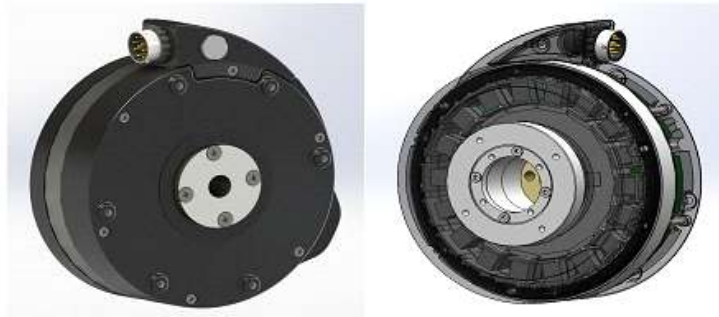
- 구동전원 체계는 차량전원을 기준으로 12Vdc가 일반적이며, 모터의 회전속도는 사람이 핸들을 조작하는데 필요한 속도를 기준으로 반영하였다.



< 개발 사양표 및 Parts 분석내용 >

㉔ 조향 제어 전장시스템 시제품 제작

- 최종 조립을 위한 형상을 하기 그림에 나타내었다.



< 조향 모터 모델링 >

- 현재 구성 부품에 대한 제작이 진행되었다. 하기 그림에는 주요 부품인 제어기, 모터의 고정자 모듈을 나타내었고 준비된 부품을 이용한 가조립 형상을 도시하였다.



< 주요부품제작 및 가조립 형상 >

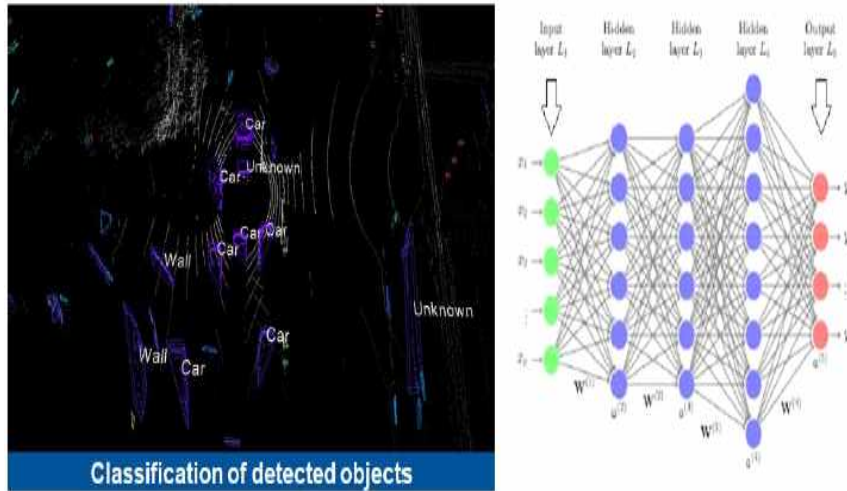
- 영구자석이 조립된 회전자와 엔코더 센서 모듈의 최종 조립을 거쳐 그 성능을 확인하는 순서로 추진예정이다.

㉔ 작업환경 인식 모듈 최적화 개발

㉔ 센서별 장애물 인식 기술 개선 개발

㉔ 영상인식 센서를 이용한 장애물 인식 기술 개선 개발

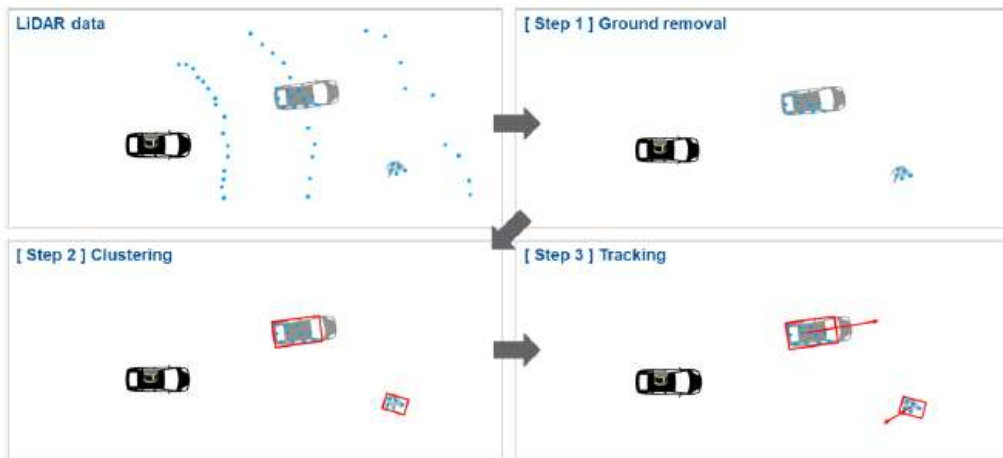
- 영상인식 센서를 이용한 장애물 인식 기술 개발은 라이다 센서를 통해 검출된 물체의 정보를 카메라에 반영하여 분류를 위한 정보를 생성해내고, 이를 이용하여 물체를 판단하게 된다. 또한 추정된 물체의 위치에서 카메라 컬러 정보를 이용하여 카메라 이미지 상의 물체 위치를 추정하였다. 그리고 색상 정보 기반 물체 판단을 위해서 아래와 같은 Deep learning 방법이 적용되었다. 컬러정보가 포함되어 있는 이미지가 입력으로 적용이 되며 출력으로는 입력된 이미지의 class 정보가 생성된다.



< 색상 정보 기반 작물 판단 로직 >

㉔ Lidar 센서를 이용한 장애물 인식 기술 개선 개발

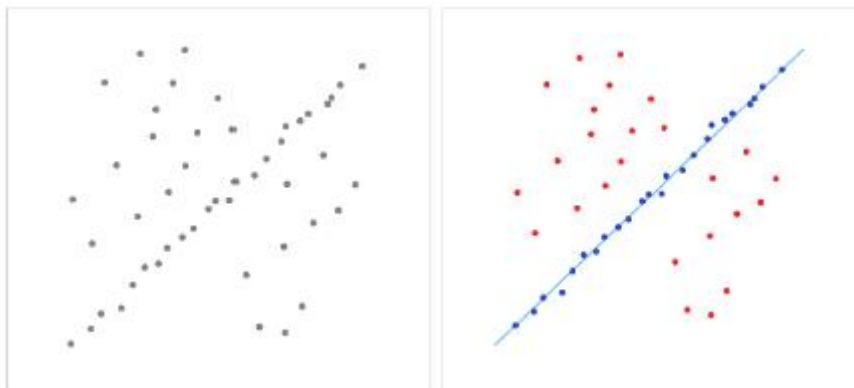
- 라이다 기반 장애물 인식 기술 개발 알고리즘은 아래 그림과 같이 Ground point cloud를 제거하고, clustering 알고리즘을 수행하여 물체를 검출하였다. 그리고 Tracking 알고리즘을 적용하여 물체의 위치 정확성과 인식 결과의 강건성을 강화하였다. 라이다 기하학 라이브러리를 이용하여 센서 간의 상대 위치 관계를 구하고 이를 월드 좌표계에 적용하여 각각 센서의 point cloud를 월드 좌표계로 변환하였다.



< 라이다 기반 장애물 검출 알고리즘 >

① 지면 검출 알고리즘 (지면 제거)

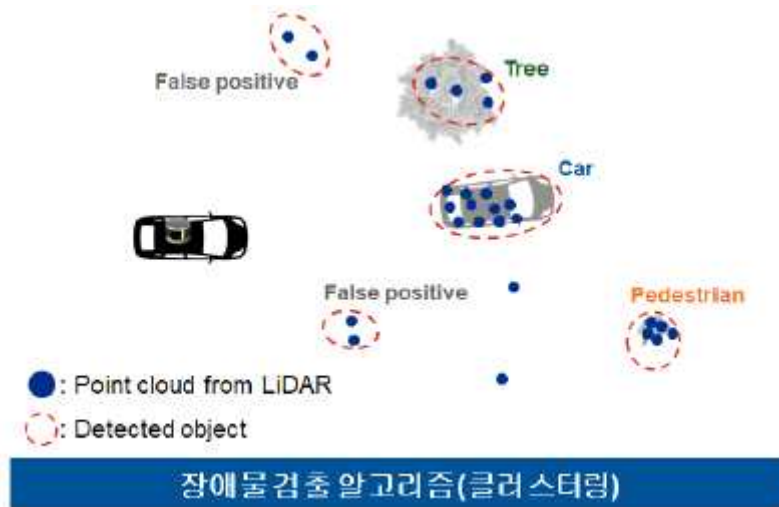
- 변수 “ground_to_tractor” 로 구분하여 지면 후보 영역을 설정
- Racsac 알고리즘을 이용하여 평면 추적
- 추정된 평면 아래 point cloud와 위의 point cloud를 추출



< 지면 검출 알고리즘 (지면 제거) >

② 장애물 검출 알고리즘 (클러스터링)

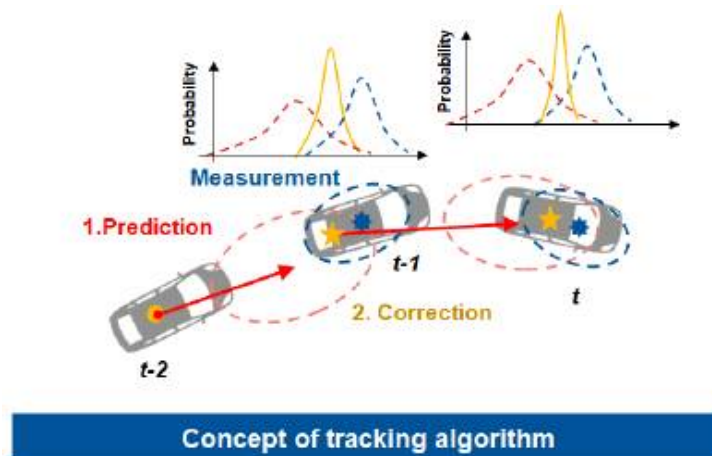
- 클러스터링은 여러 개체를 묶는 것을 말한다. 어떤 방법을 사용해서 주어진 개체들을 여러 개의 그룹으로 묶는 알고리즘이며 개체를 비슷한 것끼리 묶는 것을 말한다. 기계학습의 비교사 학습(Unsupervised Learning)의 기법 중 하나로, 세그멘테이션 기법의 일종이며, 이를 3D point cloud 에 적용하여 물체 검출을 위한 알고리즘으로 적용하였다. Point cloud 간의 data 유사성은 유클리디안 거리를 이용하였으며, 최소, 최대 point cloud 숫자를 설정하여 군집화 규칙을 적용하였다.



< 장애물 검출 알고리즘 (클러스터링) >

③ 장애물 추적 알고리즘 (Tracking)

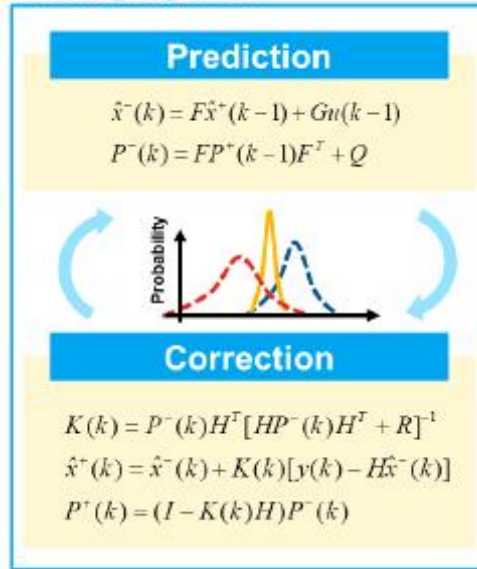
- 장애물 추적 알고리즘은 인식된 결과의 정확성과 강건성을 강화하기 위해 적용되었다. 검출된 객체의 움직임을 찾을 때, route를 생성해가는 과정을 거친다. 적용된 추적 알고리즘은 칼만 필터 기반의 추적 알고리즘이 적용 되었다.



< 장애물 추적 알고리즘 (Tracking) >

- 칼만 필터는 Optimal Recursive Data Processing Algorithm에 기반한 방법으로 the restrictive probability density propagation을 수행하여 최적화된 결과를 얻는다. 칼만 필터는 mathematical equation의 집합이고, 추적을 위한 효과적인 계산을 할 수 있다. 칼만 필터는 상황을 추적하고, 노이즈 측정에 관한 피드백을 제공해준다. 즉, feedback control을 이용함으로써 process를 추정하게 된다. 칼만필터의 방정식은 2가지 그룹으로 나뉘어 수행된다. time update equation과 measurement update equation으로 나뉘어 수행된다. time update 방정식은 projection을 수행하는데 있어 계산을 하고, measurement update 방정식은 feedback을 제공하는데 사용된다.

Tracking algorithm



< 칼만필터 기반의 추적 알고리즘 >

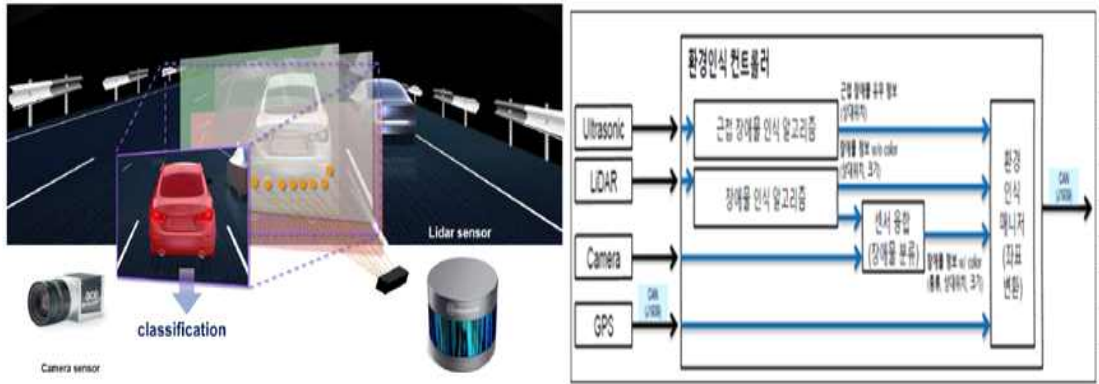
㉔ 초음파 센서를 이용한 장애물 인식 기술 개선 개발

- 초음파 센서를 이용한 장애물 인식 기술 개발은 라이다, 카메라가 감지하지 못하는 음영 구간을 보완하기 위한 기술개발로 근거리 물체 감지를 위한 용도로 개발하였다. 선정된 초음파 센서의 distance range는 약2.5~3m로 되어있으며 FoV opening angles는 horizontally $\pm 60^\circ$, vertically $\pm 30^\circ$ 로 되어있다. 따라서 음영 구간을 보완하기 위한 근거리 물체 감지를 위한 용도이므로 초음파의 센싱 범위를 근접 장애물 인식 알고리즘과 센서 정보 필터링을 통하여 1m 이내의 물체를 감지하도록 구성하였다.

㉕ 센서 융합 최적화 기술 개발

㉑ 작업환경 인식 알고리즘 모델을 반영한 센서 융합 기술 최적화 기술 개발

- 라이다 - 카메라 기반 장애물 인식 알고리즘은 라이다 센서를 통해 검출된 물체의 위치정보를 카메라에 반영하여 분류를 위한 정보를 생성해내고 이를 이용해 물체인지 판단하게 된다. 라이다-카메라 캘리브레이션이 필요하며, 카메라로부터 3차원 정보를 추출하기 위한 Extrinsic calibration 이 필요하다. 또한 카메라의 왜곡 보정을 위해 Intrinsic calibration 도 수행된다. 라이다로 검출된 3차원 물체정보를 이용하여 카메라 이미지 상에서의 물체 위치를 추정한다. 추정된 위치에서 카메라의 컬러정보를 기반으로 semantic segmenation 및 classification 알고리즘을 수행하며, 분류를 위한 Deep Learning 알고리즘이 적용되었다. 또한 초음파 센서를 근거리 장애물 인식 알고리즘을 통하여 라이다, 카메라의 음영지역, 근거리 장애물을 검출하도록 하였다.



< 환경 인식 센서 융합 시스템 >

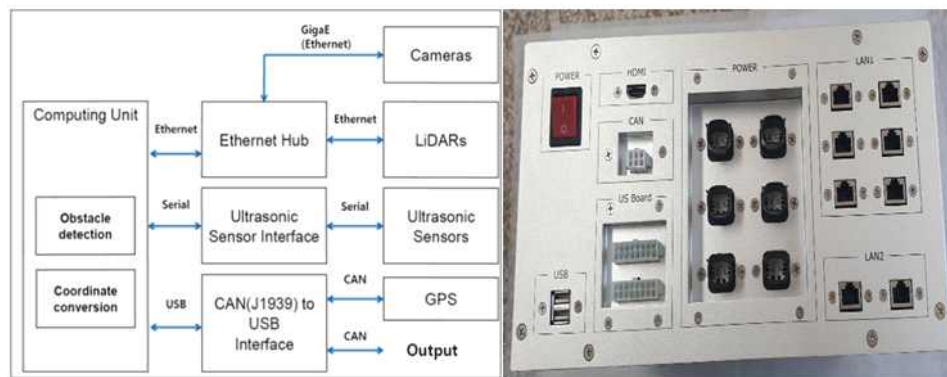
㉔ 센서 융합을 위한 제어기 설계 기술 개발

① 센서 융합을 위한 제어기 개발

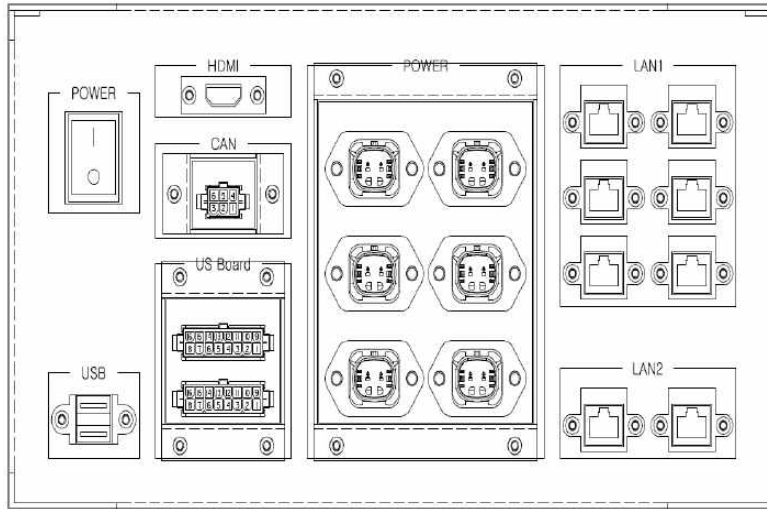
- 환경 인식 컨트롤러의 전원을 공급하기 위한 전원 인터페이스를 구성하였고, 이 전원을 이용하여 각종 환경인식 센서들의 전원을 공급하도록 구성하였으며, 차량의 전압 변동으로 인한 각종 환경 인식 센서들의 소손을 방지하기 위하여 컨트롤러 내부에 12V 정전압을 공급하도록 하는 SMPS를 적용하였다.

또한 컨트롤러 연산 시 소자들의 발열을 방지하기 위하여 팬을 적용하여 소자들의 발열을 방지하도록 구성하였다.

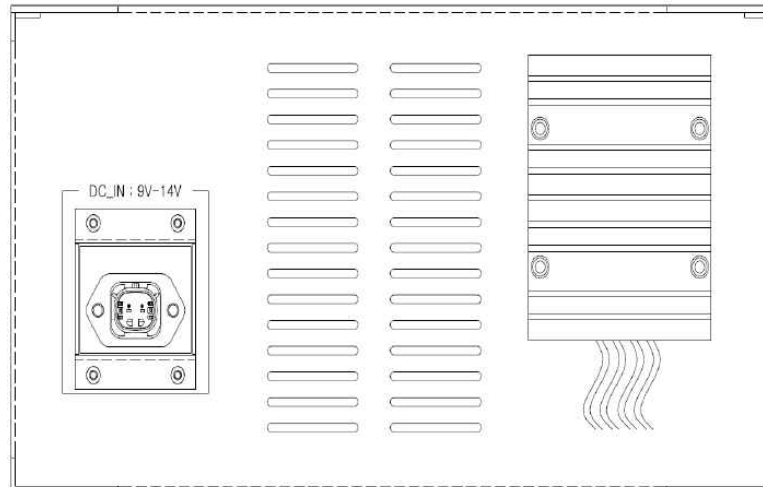
그리고 라이다 및 카메라의 영상 신호를 처리하도록 ETHERNET HUB 인터페이스를 구성하였고, 초음파 센서의 신호를 처리하도록 SERIAL 인터페이스를 구성하였고, 프로그램 업데이트 및 캘리브레이션을 위한 USB, HDMI 인터페이스를 적용하였다. 또한 각종 센서들의 정보를 연산하는 컴퓨팅 유닛을 구성하였고, GPS 신호 수신 및 주행 경로 컨트롤러 장애물 신호 발신을 위한 CAN 드라이버를 구성하였다. 하기 그림과 같이 외부 케이스 설계 및 제작을 하였고 컨트롤러 내부 회로도 및 회로도를 이용한 내부 배선도를 설계 및 제작 완료하였다.



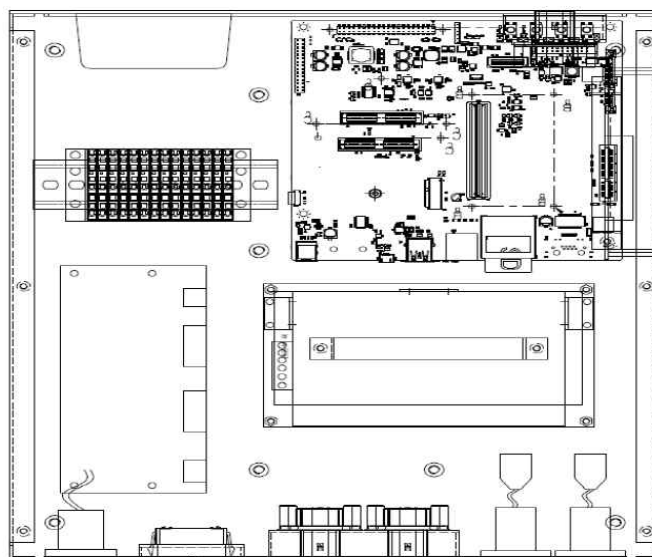
< 센서 융합을 통한 장애물 인식 제어기 개발 >



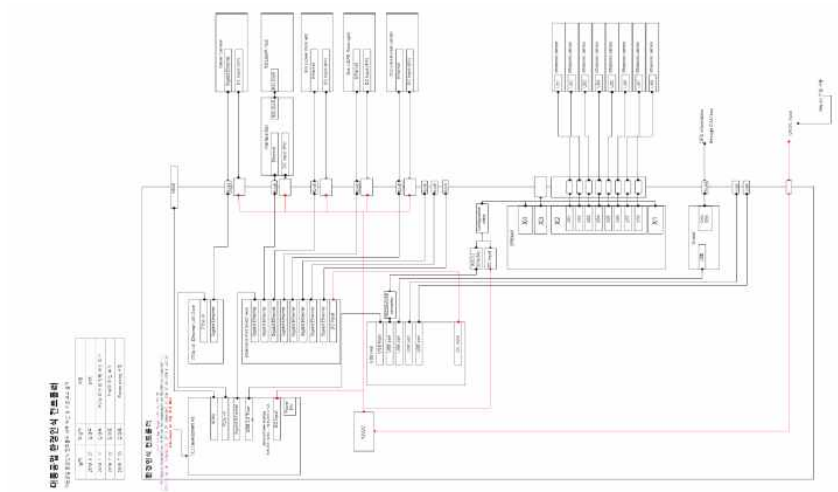
< 컨트롤러 설계 정면도 >



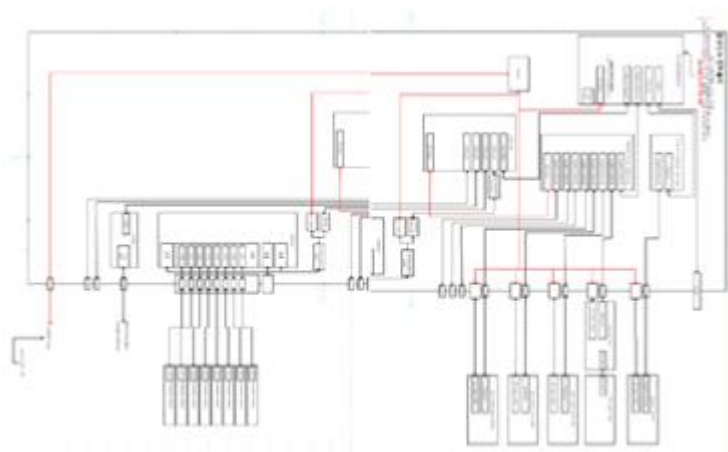
< 컨트롤러 설계 후면도 >



< 컨트롤러 설계 내부 배치도 >



< 컨트롤러 전체 회로도 >



< 컨트롤러 내부 배선도 >

③ 시스템 구성 부품 목록

- . USB HUB

TX2 Development kit Usb port를 확장하기 위한 부품
전면에 2-port도 USB Port에 연결



< USB HUB >

- . US board

초음파 센서와 연결하여 데이터 수집

RS232-Converter를 이용하여 TX2 Development kit로 데이터 송수신



< US board >

- . TX2 Development Kit

Lan port를 이용하여 외부 센서 데이터 수신
 Usb HUB를 통해 US board와 RS232 통신
 Kvaser를 통해 GPS 정보 수신



< TX2 Development Kit >

- . Pcie x4 -Ethernet Lan card

TX2 Development Kit LAN Port 확장을 위해 장착하는 카드
 Basler Camera와 Giga bit 통신



< Pcie x4 -Ethernet Lan card >

- . switching HUB (EKI-2528-BE)

외부 센서와 LAN 통신을 하기 위한 8-Port HUB
 인클루저박스 전면 RJ45커넥터를 사용하여 외부 센서와 통신



< switching HUB (EKI-2528-BE) >

- DC-DC Converter

과전압보호와 안정적인 12V 공급을 위해 DC-DC Converter를 설치
인클루저박스 내부 보드와 제품은 DC-DC Converter를 거쳐서 출력된
전압 사용

Item Features	Model No.	WG8-36S1215
 <ul style="list-style-type: none"> * Non-isolated between input and output. * Design meeting ROHS/CE * 100% full stable output current * 100% full load burn-in test. * Waterproof level IP68. * Internal capacitor: NCC & NICHICON (high reliability). * Die-cast aluminum shell, epoxy potting. * Cooling by free air convection. * High efficiency, Up to 100,000 hours of service life. * Short circuit, Low voltage, Over load and Over temperature 	Input rated voltage	12V/24V DC
	Input voltage range	8-36V DC
	Efficiency	96%
	Output voltage	12V DC
	Output current	15A
	Output power	180W
	Voltage regulation	< 1%
	Load regulation	< 2%
	Ripple & Noise	150mVp-p
	No load loss	90mA
	Working temperature	-35°C to +80°C
	Waterproof rating	IP68
	Dimension	100*80*39mm
	Weight	480g
Cooling way	Free air convection	
Input cable type	12AWG (red, black)	
Output cable type	14AWG (white, black)	
Warranty	1 year	

< DC-DC Converter >

- KVASER

CAN 데이터를 TX2 Development kit로 데이터 송신
USB HUB를 통해 데이터 송신



< KVASER >

© 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장 시스템 최적화 설계

① 자율주행 트랙터 레이아웃 설계

① 환경인식 모듈 장착을 위한 지붕 설계 및 개발

- 지붕상부에는 주행환경 인식을 위한 카메라와 라이다가 설치된다.

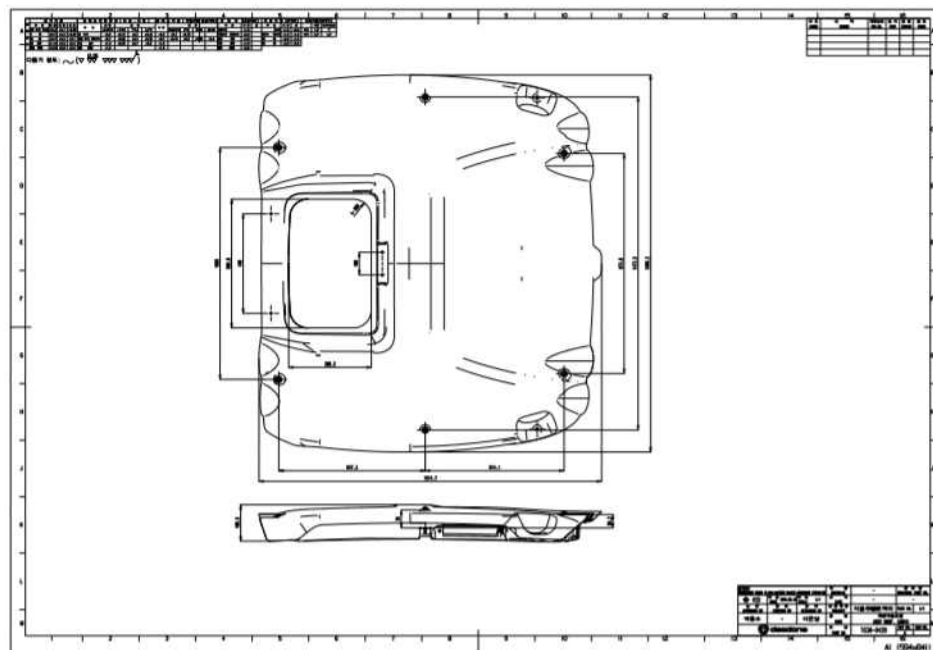
트랙터의 지붕 전방은 작업등이 배치되므로 대동, 동양, 국제 3사의 트랙터에 동일한 위치에 환경인식 모듈이 장착이 가능하도록 지붕 상부에 부착하는 것으로 결정하였다.

카메라와 라이다는 지붕 전방 가운데에 위치하고 차량 전방을 향하는 방향으로 설치되어 차량 전방의 주변환경에 장애물 유무를 판별하기위한 영상과 라이다 3D스캔 데이터를 받아들인다. 이 때 카메라와 라이다는 동일한 위치에 동일한 각도로 설치되어야하며 360도로 회전하는 라이다의 특성상 라이다가 최상부에 배치되고 그 아래 카메라가 밀착되어 배치된다.

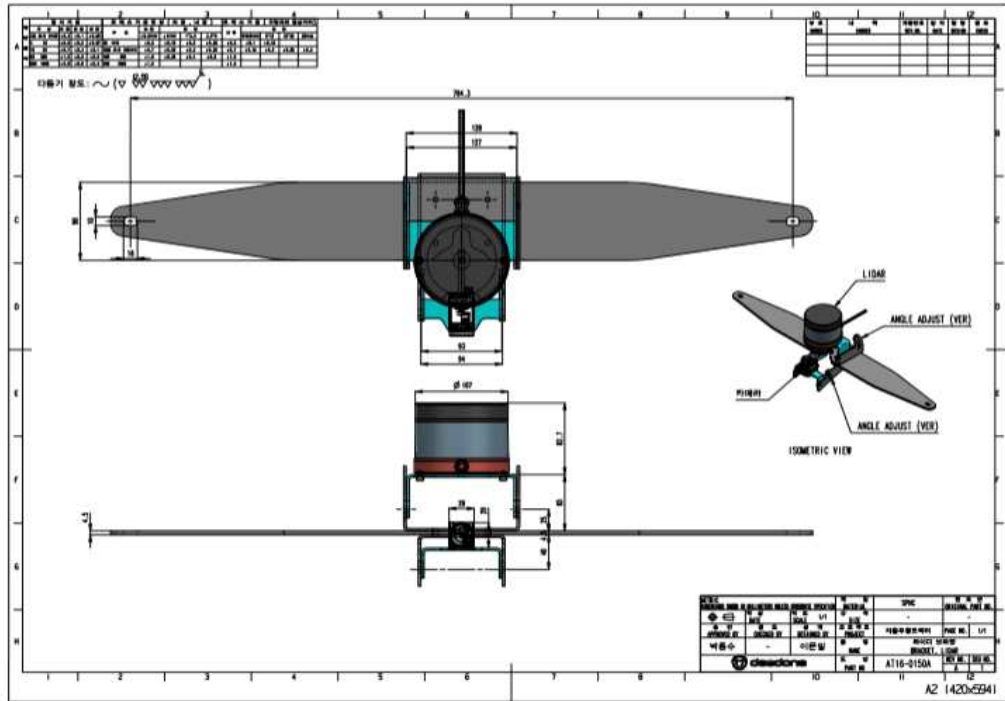
두 제품 모두 트랙터의 주행환경을 고려하여 철재 브라켓에 조립되고 지붕은 철재 브라켓을 견고히 고정하기위하여 지붕의 상면에서부터 캐빈프레임 구조물까지 연결되는 서포트를 추가하여 농경지의 험로 주행에도 라이다와 카메라가 견고히 고정될 수 있도록 설계하였다.



-환경인식 라이다, 카메라가 적용된 지붕 구조-



<지붕 설계도면>



<지붕상부 라이다, 카메라 고정브라켓 설계도면>

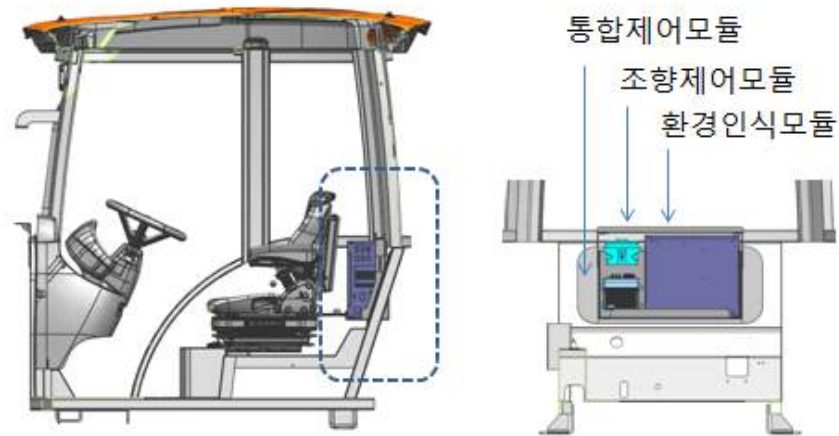
② 캐빈 내 각종 모듈 및 센서 탑재를 위한 구조물 설계 및 개발

- 캐빈 내부에 작장되어야하는 모듈은 크게 환경인식모듈, 통합제어모듈, 조향제어 모듈이다

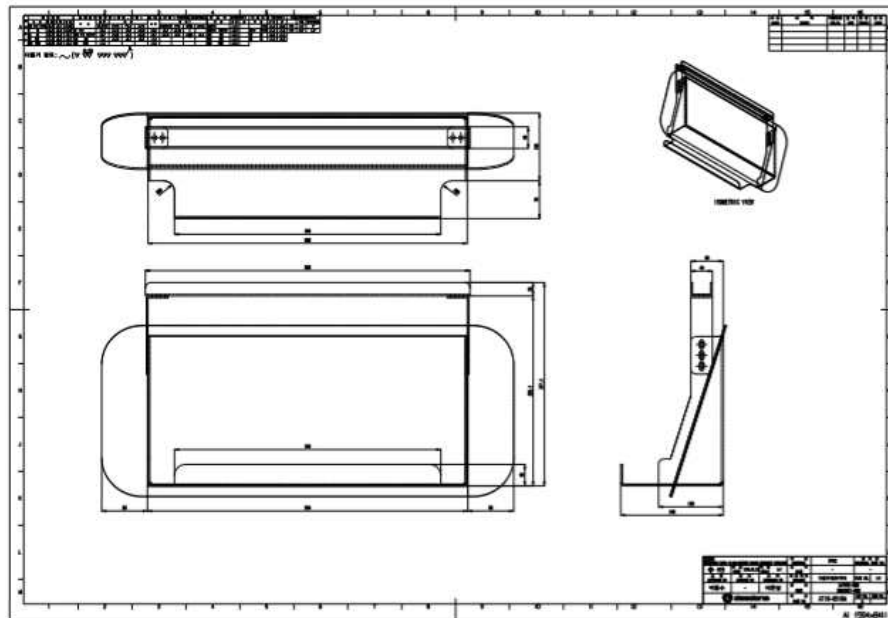
특히 환경인식모듈은 크기가 크고 수많은 센서로부터 입력되는 신호가 배선으로 연결된다.

캐빈 내부에 환경인식 모듈을 장착하기위한 공간은 운전자 의자 뒤편으로 결정하고 의자 뒤편 공간을 확보하기 위하여 경사진 캐빈 후면구조에 모듈 안착공간은 수평 좌면과 수직 벽면을 형성하여 환경인식 컨트롤러가 안정적으로 고정될 수 있는 구조를 설계하였다.

비교적 크기가 작은 통합제어모듈과 조향제어모듈은 환경인식모듈 측면에 종방향으로 배치하였다.

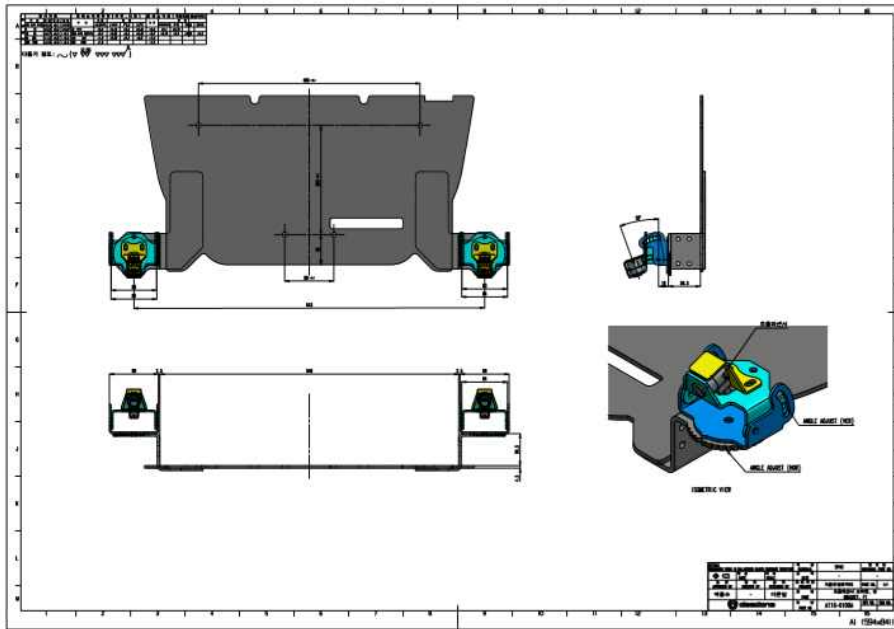


- 캐빈내부 각종모듈 탑재 설계-

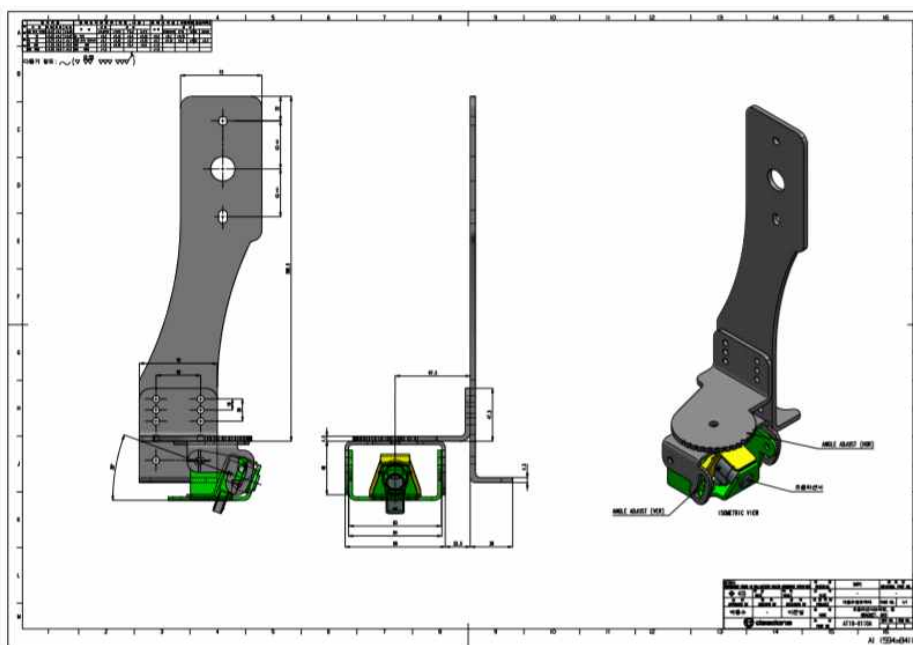


<모듈 탑재용 브라켓 설계도면>

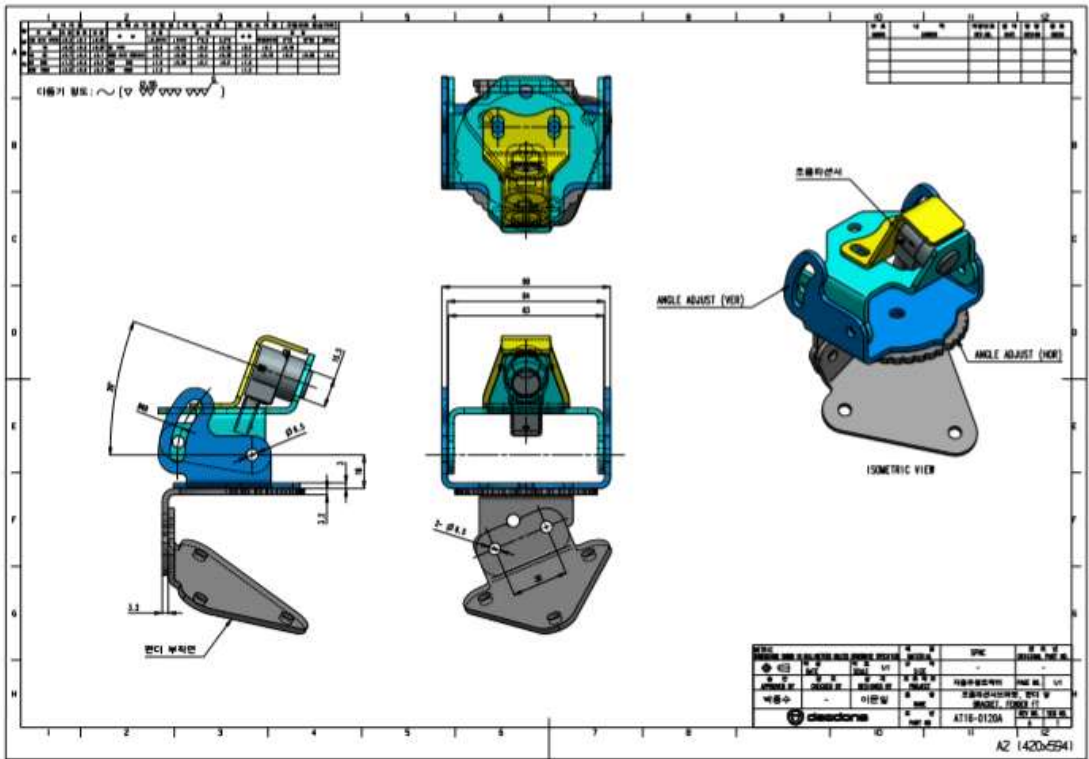
- 초음파 센서는 차량 전방, 측방에 총 8개가 설치되어 근거리의 장애물을 인지한다. 차량전방 본넷트 앞그릴에 2개가 설치되고 측면 출입문과 후륜펜더에 설치된다. 초음파 센서의 센싱 거리는 약 2m, 좌우 120도, 상하 60도의 영역을 센싱 가능하다. 차량 전방과 좌우 측면에 적절히 배치하여 센싱 영역이 빈틈없도록 하였고, 시제품 트랙터에 장착하기위한 브라켓은 센서의 장착 각도가 상하, 좌우 조절 가능하도록 설계하였고, 장애물 센싱 특성 시험을 통하여 센서의 장착 각도를 결정하였다. 센서장착은 트랙터 제조사 3사의 자율주행트랙터 대상 모델의 구조를 고려하여 동일한 위치에 설치 가능하도록 위치를 결정하였다.



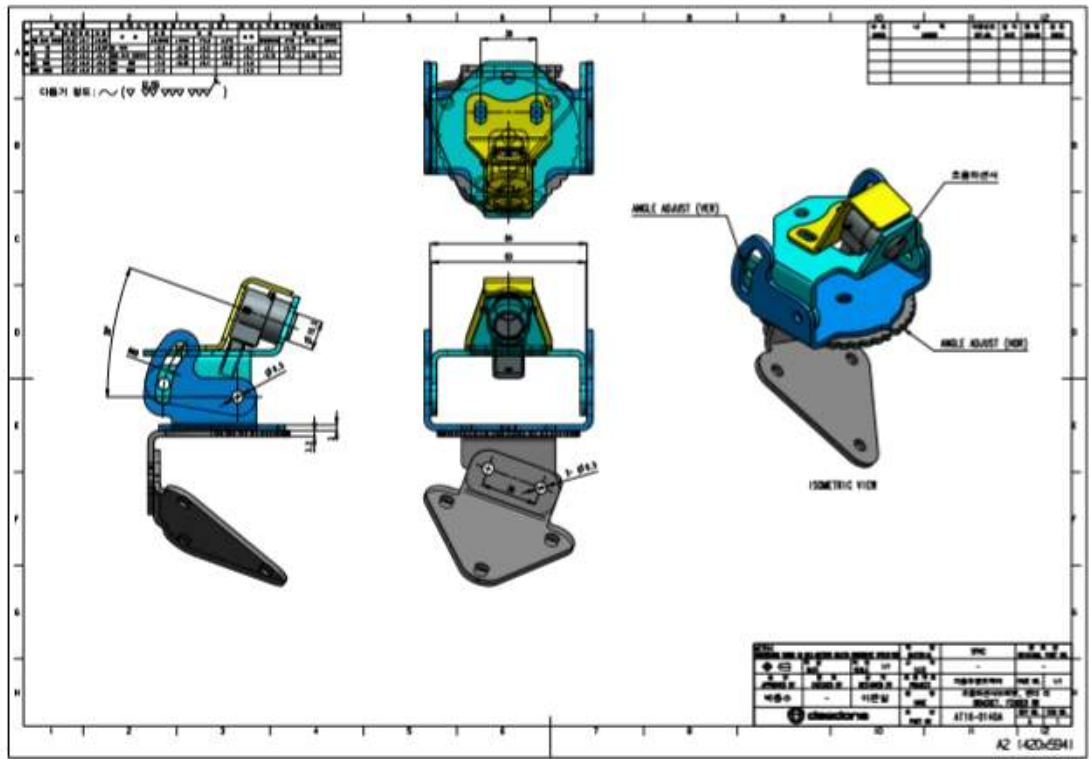
<전방 초음파센서 장착 브라켓 설계도면>



<측면 초음파센서 장착 브라켓 설계도면>



<측면 뒤 초음파센서 장착 브라켓 설계도면>



<후방 초음파센서 장착 브라켓 설계도면>

	
정방	측방
	
측방 뒤	후방

- 차량주변 초음파센서 장착모습-

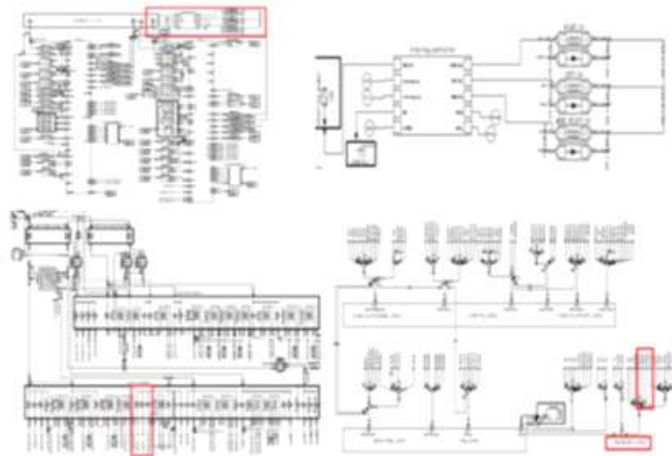
㉔ 전장 시스템 최적화 설계

① 조향제어 및 환경인식 모듈 전장 시스템 설계 및 개발

㉑ 조향제어 모듈 전장 시스템 설계 및 개발

- 모터 구동 방식 전체 시스템 회로 구성 설계

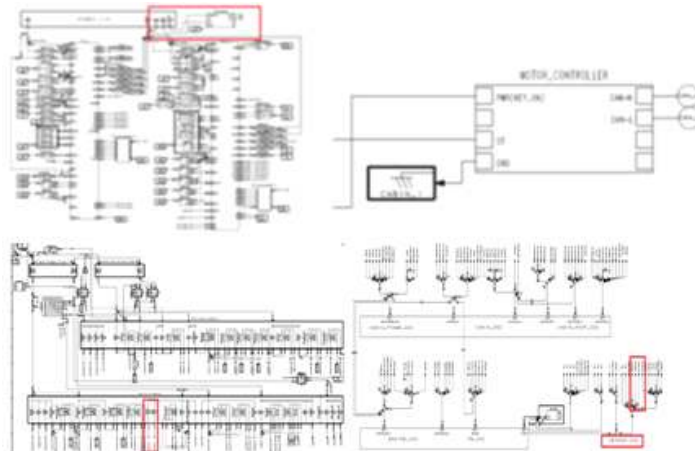
컨트롤러 각각의 핀 중 전원단은 배터리 전원, 컨트롤러 접지, KEY-ON 전원으로 차량 전체 회로에 연결하였고 조향 모듈의 데이터 시트를 기반으로 배터리 전원과 KEY-ON 전원은 각각 10A의 퓨즈를 사용하여 회로를 보호할 수 있도록 설계하였다. 그리고 신호전달 회로는 모두 CAN 통신에 의한 신호 전달로 캔라인은 차량 전체 CAN라인에 연결하였고 노이즈 방지를 위하여 트위스트 배선을 사용하였다.



< 모터 구동 방식 전체 시스템 회로도 >

- 유압 구동식 전체 시스템 회로 구성 설계

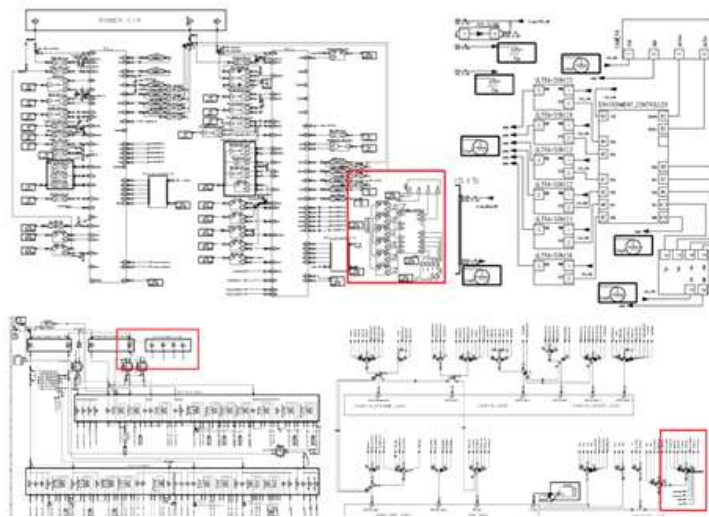
유압 구동식 컨트롤러 각각의 핀 중 전원단은 KEY-ON, 밸브측 전원, 컨트롤러 접지로 차량 전체 회로에 연결하였고, 전원단 보호를 위하여 KEY-ON 전원 10A, 밸브측 전원 10A의 퓨즈를 사용하여 회로를 보호할 수 있도록 설계하였다. RIGHT-SOLENOID, LEFT-SOLENOID, MODE-SELECT SOLENOID는 역기전력을 방지하기 위하여 다이오드를 추가하여 연기전력에 의한 솔레노이드의 이상 동작을 방지하도록 설계하였다. 또한 CAN 라인은 차량 CAN라인에 연결하였고 노이즈 방지를 위하여 트위스트 배선을 사용하였다



< 유압 구동 방식 전체 시스템 회로도 >

⑥ 환경인식 모듈 전장 시스템 설계 및 개발

- 먼저 라이더 센서의 경우 환경인식 컨트롤러와 송수신하는 RX(+),RX(-), TX(+),TX(-) 연결하였고, 라이더 센서 전원단을 보호를 위하여 10A 퓨즈를 적용하였고, 카메라 센서의 경우 영상 신호 DATA(+), DATA(-)를 환경 인식 컨트롤러와 연결하였으며, 카메라 전원단 역시 회로 보호를 위하여 5A 퓨즈를 적용하였다. 그리고 초음파 센서는 전방 2개, 측방 2개, 후방 2개를 적용하였으며 초음파 신호는 환경인식 컨트롤러와 연결하였다. 또한 초음파 센서 전원단 역시 회로 보호를 위하여 5A 퓨즈를 적용하였다. 그리고 각각의 접지들은 전압 강하를 막기 위하여 센서 접지단으로 구분하여 연결하였으며, 배터리(-)와 직결 연결하여 전압 강하로 인한 이상 동작을 보호하도록 설계하였다.

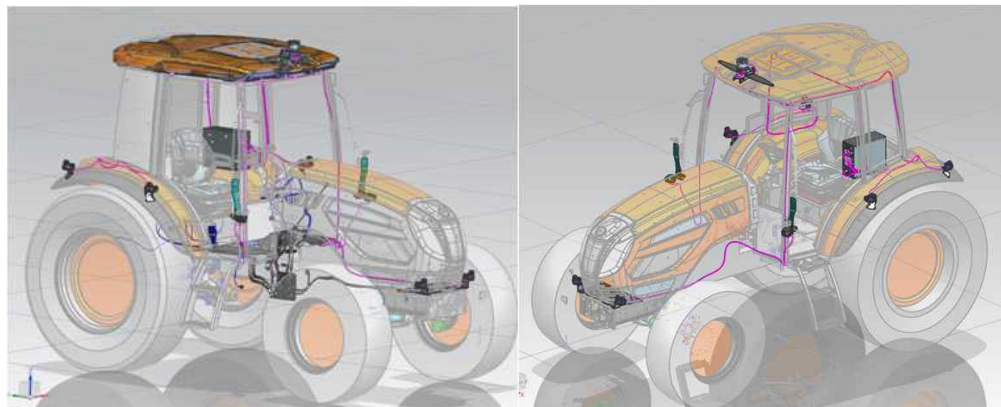


< 환경인식 모듈 전장 시스템 회로도 >

② 자율주행 트랙터 와이어하네스 설계 및 개발

① 3D 라우팅 설계

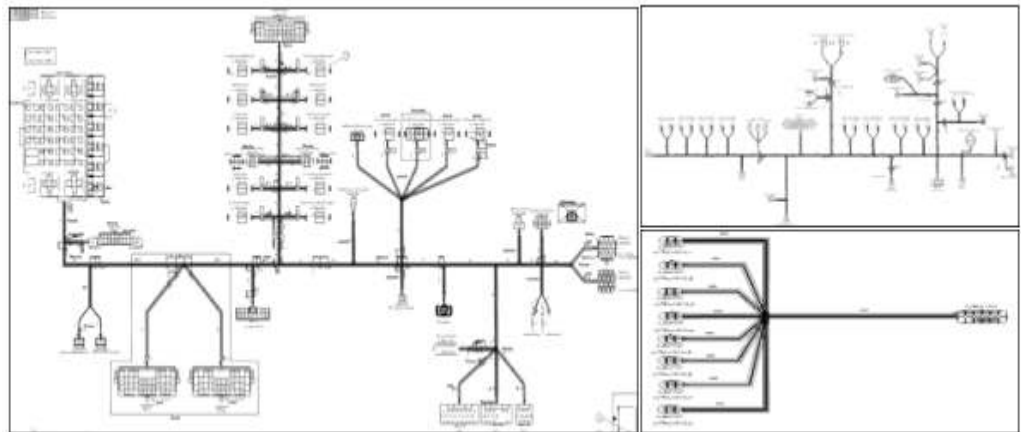
- 조향 제어 모듈관련 하네스 라우팅 설계의 경우 밸브 블록, 조향 각 센서 등의 위치와 정비성이 용이한 공간에 컨트롤러를 위치하였으며, 이에 따른 밸브 블록 및 조향 각 센서 등의 입출력, 전원, CAN 라인을 연결하는 배선 경로를 계기판 프레임과 캐빈 하부와 미션 사이로 와이어 하네스 라우팅 경로를 선정하였다.
- 환경인식 모듈 관련 하네스 라우팅 설계의 경우 라이더, 카메라, 초음파, 환경 인식 컨트롤러의 위치를 반영하여 캐빈 상부, 캐빈 A,B,C,D 필러, 앞차축 프레임 우측면으로 와이어 하네스 라우팅 경로를 선정하였다.



< 전장 시스템 3D 설계 >

② 2D 도면 설계

- 조향 제어 및 환경 인식관련 작성된 회로도 및 와이어 하네스 라우팅 경로를 반영해 2D 와이어 하네스 도면을 설계하였다. 또한 3D 기구물들과 와이어 하네스 경로 상의 간섭이나 단선, 단락을 방지하기 위하여 간섭, 단선, 단락이 우려되는 부분은 외부 피복(콜게이트, 시트, 튜브, 테이프)등을 이용하여 와이어 하네스를 보호하였으며,와이어 하네스 간섭이나 단선, 단락을 방지를 위한 고정부 표시부 및 와이어 하네스에 타이, 클램프 등을 적용하여 올바른 와이어 하네스 라우팅 경로를 유지하도록 하였다.



< 전장 시스템 2D 와이어 하네스 설계 >

㉔ 핵심 모듈 자가 진단 알고리즘 개발을 위한 Data 수집

① 조향 제어 모듈 자가진단 관련 Data 수집

㉑ 조향 제어 모듈과 기존 트랙터 부품의 실차 시험을 통한 Data 확보

a. 시험 방법

- 트랙터가 10km/h의 속도로 진입하여 반경 12m 원을 회전하는 데 필요한 핸들 각도를 측정함.
- 트랙터를 10km/h의 속도로 직진 주행하다 급하게 조향하여 2.1에서 측정한 핸들 각도로 유지 시킴.
- 조향 시작 시간 부터 트랙터가 반경 12m인 원 안으로 진입 하는데 걸리는 시간 및 조향력을 측정함.
- 조향 보조 유압 장치가 정상일 때와 fail 일때 각각 측정하며 좌, 우 각각 측정함.

b. 시험 결과

	선회방향	선회시간	조작력	기준	
		sec	kgf	선회시간	조작력
양산 차량 조향 모듈	CW	2.8	1.88	5sec	25kgf
	CCW	2.6	0.88		
자율 주행 조향 모듈	CW	2.7	1.75		
	CCW	2.6	1.12		

㉒ 센서 값들과 고장 Data 간 고장 분석 범위 및 수준 정의를 위한 내구시험

- 고장분석 및 수준 정의를 위한 실차 내구시험을 진행 할 예정이다.
실차 시험은 겨울(저온), 여름(고온, 내수성)의 기후 조건을 만족할 수 있도록 3차년 과제 수행 시 장기간에 걸쳐 시험 할 예정이다.

㉓ 조향 제어 모듈의 고장예지를 위하여 동작 상태를 확인할 수 있는 주요 인자를 선정하고 알고리즘 개발의 통계자료로 활용

- 조향 제어 모듈의 고장예지를 위하여 동작 상태를 확인할 수 있는 주요 인자인 모터의 구동상태, 속도, 토크, 입력전류, 온도 등을 선정하였고, 모터 제어기의 고장 주요인자로는 제어기 소자, 과전류, 과전압, 저전압, 입력 배터리 전압을 선정하였고 조향 시스템 개발 알고리즘에 활용하였다.

진단 항목	신호명	기능	
모터	Current fault state	모터 구동 가능 상태 확인	0 - Normal 1 - Fault
	Motor Speed	모터 속도	
	Torque Reference	모터 토크	
	Motor Current	모터 입력 전류	
	Motor Temperature	모터 온도	
모터 제어기	IGBT fault	제어기 IGBT	
	Over Current	제어기 과전류	0 - Normal 1 - Fault
	Over DC Voltage	제어기 과전압	0 - Normal 1 - Fault
	Under DC Voltage	제어기 저전압	0 - Normal 1 - Fault
	Battery Voltage	제어기 입력 배터리 전압	

< 모터 및 모터 제어기 에러 메시지 목록 >

② 작업환경 인식 모듈 자가진단을 위한 Data 수집

㉠ 각 센서의 내구성 시험

- 라이다 센서 내구성 시험

라이다 센서의 내구성에 영향을 줄 수 있는 고온, 저온, 진동, 낙하 등의 환경 시험을 진행하였다.

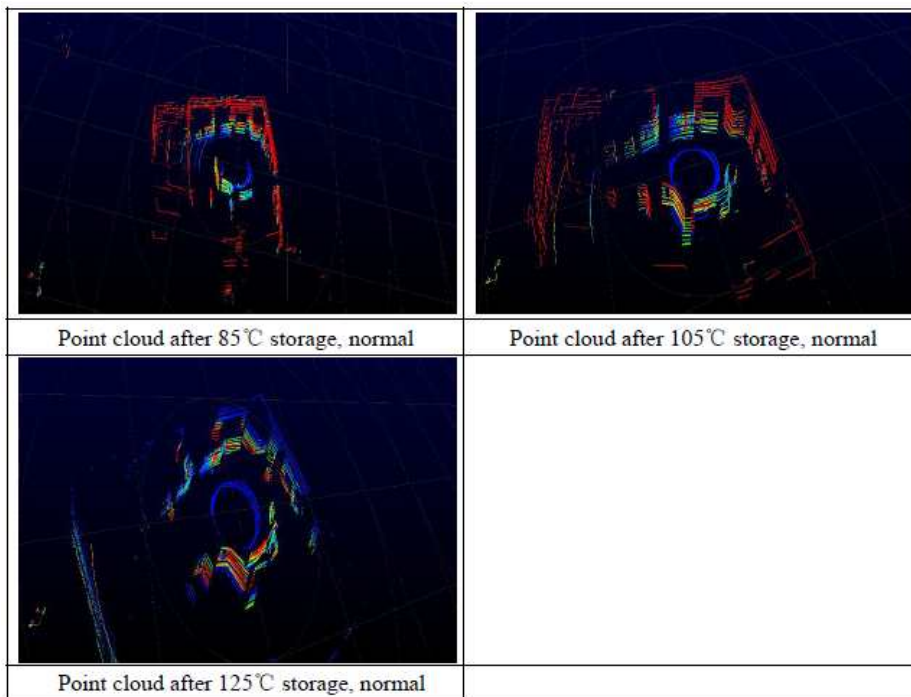
: 고온 시험

시험 샘플은 GB / T 28046.4-2011 5.1.2에 명시된 조건 하에서 보관되었다. 48의지속 시간을 각 각 85°C, 105°C 및 125°C이었다.

시험은 GB / T 2423.2의 시험 Bb에 따라 수행되었다. 샘플은 각 온도별로 저장되고, 전원 연결없이 48 시간 실험 후 하자 샘플은 실온으로 냉각되고 샘플은 정상적으로 작동해야한다. 샘플 수는 7 개였다.

Test Temperature	Test data	Test Result
85°C	After cooling down to room temperature, all 7pcs of the DUT operate normally.	Qualified
105°C	After cooling down to room temperature, all 7pcs of the DUT operate normally.	Qualified
125°C	After cooling down to room temperature, all 7pcs of the DUT operate normally.	Qualified

< 고온 시험 평가서 >



< 고온 시험 후 동작 상태 확인 >

: 저온시험

시험 샘플은 GB / T 28046.4-2011에 명시된 조건 하에서 저온에서 저장되었다.

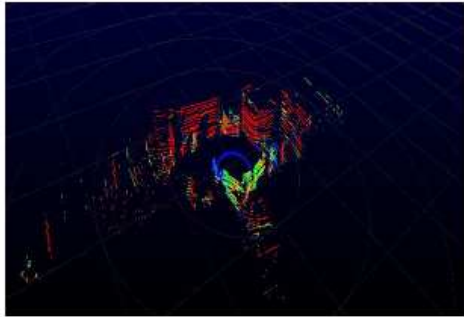
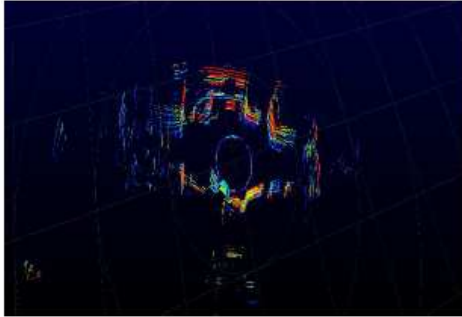
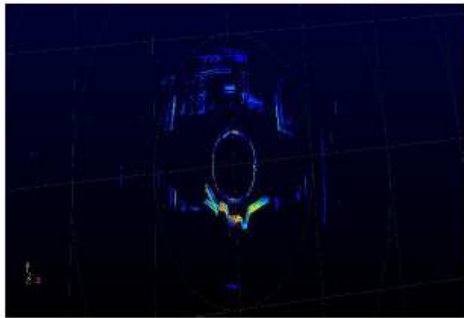
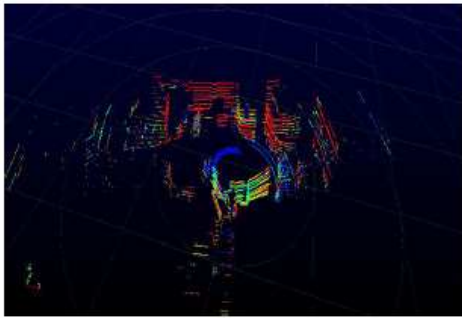
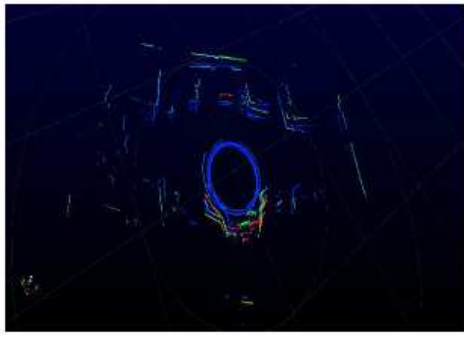

시험 온도는 각각 24 시간 동안 -20 °C, -30 °C 및 -40 °C였다.

시험은 GB / T 2423.1의 시험 Ab에 따라 수행되었다. 샘플은 온도에서 저장

후 24 시간 동안 포장 또는 전원 연결없이 필요한 온도 실험 후 샘플이 실온으로 돌아오면 샘플이 정상적으로 작동해야 합니다. 샘플 수는 7 개였습니다.

Test Temperature	Test Data	Test Result
-20°C	After returning to room temperature, all 7pcs of the DUT operate normally.	Qualified
-30°C	After returning to room temperature, 1pcs showed weakened detection performance, other 6pcs functioned normally.	6/7 Qualified
-40°C	This test was done on the 6pcs of samples which has passed the -30°C temperature storage test. After returning to room temperature, 1pcs out of the 6pcs tested samples showed weakened detection performance, other 5pcs functioned normally.	5/6 Qualified

< 저온 시험 평가서 >

	
Point cloud after -20°C storage, normal	Point cloud after -30°C storage, normal (6/7)
	
Point cloud after -30°C storage, detection performance weakened (1/7)	Point cloud after -40°C storage, normal (5/6)
	
Point cloud after -40°C storage, detection performance weakened(1/6)	Lens cracking discovered in the sample with weakened detection performance

< 저온 시험 후 동작 상태 확인 >

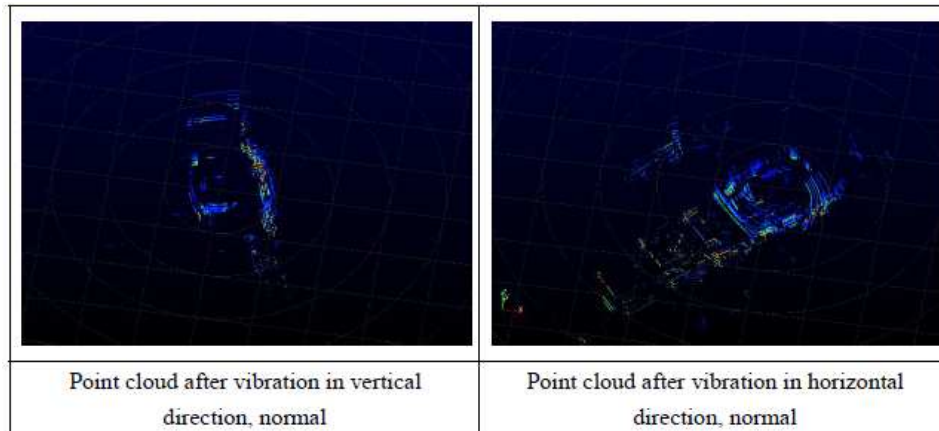
: 진동시험

지정된 조건에 따라 샘플에 대해 임의 진동 실험을 수행하였다.

GB / T 28046.3-2011 4.1.2.4에서 가속 속도의 제곱 평균값은 27.8m / s² 였다. 실험은 각각 수직 방향 및 수평 방향으로 수행되었다. 지속시간은 8 시간이었다. 전체 시험 동안 샘플을 전원 연결로 작동시켰다. 샘플 수는 2 대였습니다.

Test Direction	Test Data	Test Result
Vertical direction	During the test period, the sample worked normally. After the test, visual inspection and power-on test were conducted: The appearance and operation of the 2pcs samples were all in normal condition.	Qualified
Horizontal direction	During the test period, the sample worked normally. After the test, visual inspection and power-on test were conducted: The appearance and operation of the 2pcs samples were all in normal condition.	Qualified

< 진동 시험 평가서 >



< 진동 시험 후 동작 상태 확인 >

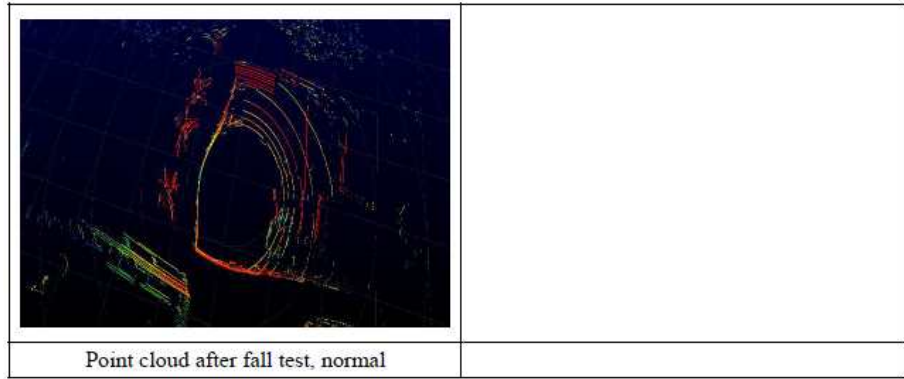
: 낙하시험

GB / T에 지정된 조건에 따라 샘플에 대해 자유 낙하 실험을 수행했습니다.

28046.3-2011 4.3, 낙하 높이는 1m, 낙하 횟수는 각 "1 코너, 3 가장자리와 6면. 샘플은 실험 기간 동안 패키지와 함께했다. 샘플 수는 3 대였습니다.

Test Direction	Test Data	Test Result
Fall Test	Visual inspection and power-on test were conducted after the test: the appearance and operation of the 3pcs samples were all in normal condition.	Qualified

< 낙하 시험 평가서 >



< 낙하 시험 후 동작 상태 확인 >

㉞ 센서 값들과 고장 Data 간 고장 분석 범위 및 수준 정의를 위한 내구 시험
 -. 상기 각 센서들의 내구성에 영향을 줄 수 있는 고온, 저온, 진동, 낙하 등의 환경 시험을 진행하였다. 이 자료를 바탕으로 해서 고장분석 및 수준 정의를 위한 실차 내구시험을 진행 할 예정이다. 실차 시험은 겨울(저온), 여름(고온, 내수성)의 기후 조건을 만족할 수 있도록 3차년 과제 수행 시 장기간에 걸쳐 시험 할 예정이다.

㉟ 통합시스템 연동 인터페이스 개발

㉠ 통합시스템 CAN 통신 프로토콜 매칭

㉡ 환경인식 컨트롤러 CAN 프로토콜 정의

㉢ CAN 통신 사양

-. CAN 2.0B를 사용하고, CAN 사용 속도(BAUD RATE)는 250KBPS로 선정하였으며, 통신 주기는 50ms(20Hz)로 하였다.

㉣ CAN 프로토콜

-. CAN 메시지는 업데이트 시간, 각 환경인식 센서의 연결 정보 등을 포함한 HEADER 메시지 1개와 환경인식 센서로 검출 된 물체의 크기(높이, 길이), 물체의 기울어짐, 트랙터와 물체와의 거리 등을 포함한 10개의 메시지를 발송하도록 하였다.

CAN ID : EA60bh 사용 속도 : 250KBPS 통신주기 : 50ms(20Hz)								CAN ID : EA61-Ajsh 사용 속도 : 250KBPS 통신주기 : 50ms(20Hz)								
1. 환경인식컨트롤러 발송 메시지(CanMsgObject_Interface_1)								2. 환경인식컨트롤러 발송 메시지(CanMsgObject_Interface_1-10)								
구분	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	구분	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	
Byte 1	Update_Time Range: 0.4e+06 Factor/Unit: 0.001 sec The time when the algorithm was updated (the point at which the controller processed information was sent to CAN) based on the environment recognition controller start time.							Object1(-10)_Length (물체크기) Range: 0.20m Factor/Unit: 0.1 m								
Byte 2								Object1(-10)_Height (물체크기) Range: 0.20m Factor/Unit: 0.1 m								
Byte 3								Object1(-10)_yaw Range: 0.3080 Factor/Unit: 0.1 degree								
Byte 4								Object1(-10)_x (물체 위치) Range: -100.100 Factor/Unit: 0.01 m								
Byte 5	State_RSLLDAR 0: Fail 1: Success				Object_number Range: 0.10				Object1(-10)_y (물체 위치) Range: -100.100 Factor/Unit: 0.01 m							
Byte 6	State_US7 0: Fail 1: Success	State_US6 0: Fail 1: Success	State_US5 0: Fail 1: Success	State_US4 0: Fail 1: Success	State_US3 0: Fail 1: Success	State_US2 0: Fail 1: Success	State_US1 0: Fail 1: Success	State_CAMERA 0: Fail 1: Success								
Byte 7	(Reserved)							State_US8 0: Fail 1: Success								
Byte 8	(Reserved)															

<환경인식 컨트롤러 CAN 프로토콜>

㉤ 통합제어기 CAN 통신 연동 시험

-. 자율주행 CAN BUS 상에서 환경인식 컨트롤러의 CAN 데이터가 전송되는 것을 P-CAN 장비를 통하여 측정하였다.

하기 그림과 같이 HEADER 발신 CAN 메시지는 CAN ID EA60xh로 되어 있고 전송 주기는 50ms(20Hz)로 확인할 수 있다. 또한 HEADER CAN 메시지에는 1~4BYTE에 업데이트 타임을 전송하고 실시간으로 물체 인식이 업데이트 되고 있음을 알 수 있다. 그리고 BYTE 5에 1~4BIT를 통하여 주변 물체 인식의 수량을 확인 할 수 있으며 10개의 물체까지 인식 할 수 있다.

BYTE 5에 5 BIT 및 BYTE 6, BYTE 7 1BIT를 통하여 환경 인식 센서들의 연결 정보를 알 수 있다. 또한 OBJECT 발신 CAN 메시지는 CAN ID EA6(1~A)xh로 되어 있고 각 OBJECT관련 CAN ID는 환경 인식 센서로 감지된 물체의 크기, 기울어짐, 물체와 트랙터와의 거리 등을 전송한다.

자세하게 살펴보면 BYTE 1은 물체의 길이방향의 크기를 전송하고, BYTE 2는 물체의 수직 높이 방향의 크기를 전송한다. 또한 BYTE 3~4는 감지 물체의 기울어짐을 전송한다. 그리고 BYTE 5~6은 트랙터와 감지 물체 사이의 X축 방향의 거리를 나타내며, BYTE 7~8은 트랙터와 감지 물체 사이의 Y축 방향의 거리를 전송한다.

Bus	CAN-ID	DLC	Symbol	Data	Timeouts	Cycle Time	Count
1	0000EA60h	8	CanMsgObject_Interface_Header_1	Update_Time = 104549.0 sec: 0 Object_number = 10 State_RSLIDAR = Success State_SICKLIDAR_FRONT_LEFT = Success State_SICKLIDAR_FRONT_RIGHT = Success State_SICKLIDAR_REAR_CENTER = Fail State_CAMERA = Fail State_US1 = Fail State_US2 = Fail State_US3 = Fail State_US4 = Fail State_US5 = Fail State_US6 = Fail State_US7 = Fail State_US8 = Fail Reserved = 0		69.7	1566
1	0000EA61h	8	CanMsgObject_Interface_1	Object1_Length = 0.7 m Object1_Height = 4.9 m Object1_yaw = 359.4 degree Object1_x = 1.7 m Object1_y = 3.6 m	0	71.7	1424
1	0000EA62h	8	CanMsgObject_Interface_2	Object2_Length = 0.8 m Object2_Height = 4.9 m Object2_yaw = 359.9 degree	0	70.8	1424
1	0000EA63h	8	CanMsgObject_Interface_1	Object1_Length = 4.9 m Object1_Height = 0.8 m Object1_yaw = 270.0 degree Object1_x = 1.7 m Object1_y = 3.6 m	0	59.3	2016
1	0000EA64h	8	CanMsgObject_Interface_2	Object2_Length = 4.9 m Object2_Height = 0.7 m Object2_yaw = 270.2 degree Object2_x = 1.7 m Object2_y = 3.6 m	0	64.0	2015
1	0000EA65h	8	CanMsgObject_Interface_3	Object3_Length = 0.7 m Object3_Height = 4.9 m Object3_yaw = 359.8 degree Object3_x = 1.7 m Object3_y = 3.6 m	0	67.4	2015
1	0000EA66h	8	CanMsgObject_Interface_4	Object4_Length = 0.7 m Object4_Height = 4.9 m Object4_yaw = 359.7 degree Object4_x = 1.7 m Object4_y = 3.7 m	0	68.0	2015
1	0000EA67h	8	CanMsgObject_Interface_5	Object5_Length = 4.9 m Object5_Height = 0.7 m Object5_yaw = 270.1 degree Object5_x = 1.7 m	0	71.0	2015
1	0000EA68h	8	CanMsgObject_Interface_6	Object6_Length = 0.7 m Object6_Height = 4.9 m Object6_yaw = 359.5 degree Object6_x = 1.7 m Object6_y = 3.7 m	0	75.2	2694
1	0000EA69h	8	CanMsgObject_Interface_7	Object7_Length = 0.7 m Object7_Height = 4.9 m Object7_yaw = 359.6 degree Object7_x = 1.7 m Object7_y = 3.6 m	0	67.1	2693
1	0000EA6Ah	8	CanMsgObject_Interface_8	Object8_Length = 4.9 m Object8_Height = 0.7 m Object8_yaw = 270.0 degree Object8_x = 1.7 m Object8_y = 3.7 m	0	63.9	2689
1	0000EA6Bh	8	CanMsgObject_Interface_9	Object9_Length = 0.7 m Object9_Height = 4.9 m Object9_yaw = 359.9 degree Object9_x = 1.7 m Object9_y = 3.7 m	0	57.9	2681
1	0000EA6Ch	8	CanMsgObject_Interface_10	Object10_Length = 2.2 m Object10_Height = 0.9 m Object10_yaw = 336.9 degree Object10_x = 3.7 m	0	57.9	2679

< 환경인식 컨트롤러 측정 CAN 메시지 >

㉔ 시제품 제작 및 시험

㉕ 작업환경 인식 모듈 성능시험용 시제품 제작

- 라이다 및 카메라 그리고 라이다, 카메라를 장착하기 위한 브라켓을 제작하여 캐빈 상부에 부착하였다. 그리고 초음파 센서 및 초음파 센서를 장착하기 위한 브라켓을 제작하여 차량 8개소에 부착하였다. 그리고 환경인식 모듈은 좌측 레버 가이드 형상을 수정하여 매립하였고 제작한 와이어 하네스와 영상 케이블을 결선 완료하였다.



< 작업환경 인식 모듈 시제품 제작 >

㉔ 센서류 단품 성능 시험

- 작업환경 인식 모듈 성능시험용 시제품 제작 한 뒤 센서류의 성능 시험을 위하여 모니터를 장착하여 라이다, 카메라, 초음파의 와이어 하네스 결선 및 영상 케이블의 결선을 확인하였으며, 라이다, 카메라, 초음파의 전원을 확인하였고, 라이다, 카메라, 초음파 등의 센서들의 입출력값을 확인하였다. 이 입출력 데이터를 확인 후 지면 검출 및 제거, 각 센서 들의 감지 거리등을 캘리브레이션하였다.



< 센서류 성능 시험 및 캘리브레이션 >

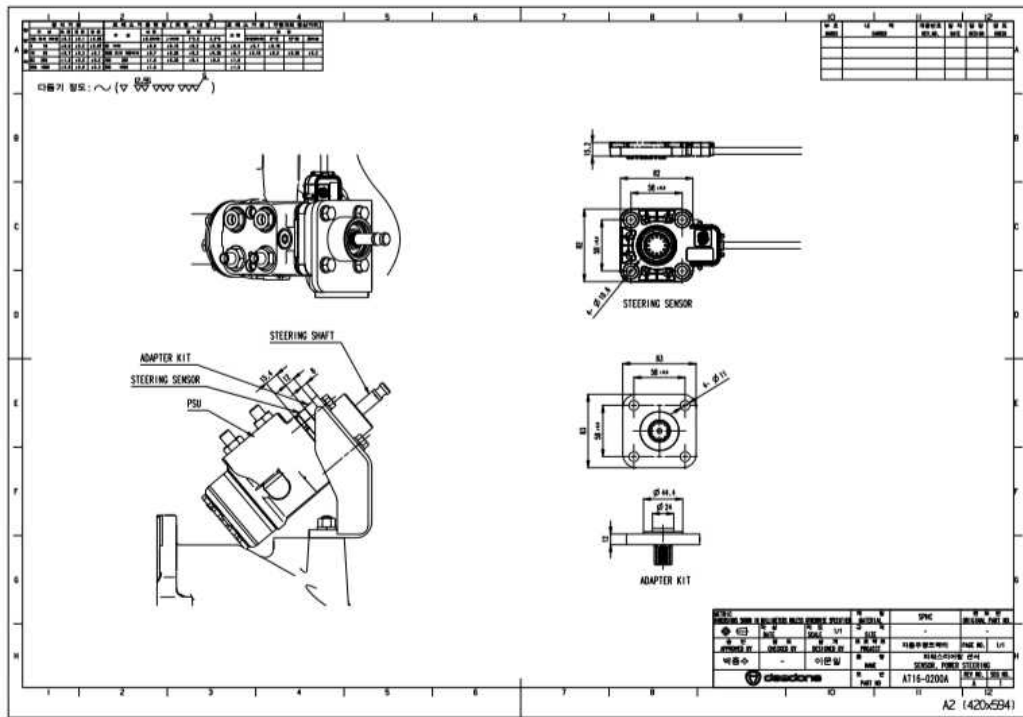
㉕ 자율주행 트랙터 시제품 개발

㉔ 자율주행 트랙터 시제품 조립용 부품 제작

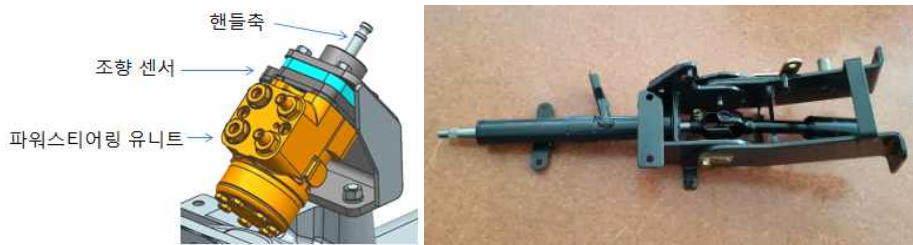
㉓ 스티어링조합

- 유압구동방식조향제어 시스템을 적용하기위하여 파워스티어링유닛 상면에 조향 센서가 적용 될 수 있는 구조를 설계하였다. 조향 센서는 파워스티어링 유닛과 핸들축 사이에 장착되어 운전자의 핸들조작 여부를 인식한다. 트랜스미션 상면에 스티어링 유닛을 고정할 수 있는 브라켓을 설계하고, 스티어링 유닛 상면에 조향센서를 부착한 후 브라켓에 조립하였다. 브라켓에는 조향축을 지지하는 베이링이 설치되고 조향축을 연결하면 조향센서와 스티어링유닛에 동시에 삽입되어 조향축의 회전을 조향센서가 인식 가능한 구조로 스티어링조합을 설계, 제작하였다.

트랙터 제조사 3사 모두 트랙터에 유압식 조향시스템을 적용 중이며, 자율 조향을 위한 전자식 유압유닛과 조향센서의 적용 구조를 기존 트랙터 레이아웃을 유지함으로써 동일한 부품을 3사 모두 사용 가능하도록 설계하였다.



<조향센서 설치 설계도면>



-조향센서 설치 구조와 스티어링 조합 제작 모습-

㉔ 지붕조합

- 지붕은 외면(Outer)과 내면(Inner)으로 구성되고 상면과, 내면 사이에 연결 서보 포트를 추가하여 상면 위에 장착되는 카메라와 라이다가 견고히 고정될 수있도록 제작하였다. 재질은 ABS수지이며, 진공성형 공법으로 제작하였다.

지붕의 크기는 캐빈 프레임과 함께 좌우방향 폭을 넓게 제작하였다. 캐빈프레임은 캐빈 내부에 환경인식모듈과 조향컨트롤러, 통합제어기가 운전자 좌측면에 장착되는 것을 감안하여 충분히 넓은 폭으로 설계, 제작되었다.

또한 자율주행 시 운전자의 시야확보를 위하여 시야확보성에 중점을 두어 전방에는 앞유리 지지대 구조를 단순화하고, 측면으로는 우측 B필러를 제거하였으며, 후면에는 후면 아래쪽 시야를 확보할 수있도록 하였고, 전방 상방향으로는 아치형 천장구조를 적용하여 시야확보를 극대화한 캐빈프레임을 설계, 제작하였다.



- 라이다와 카메라가 부착된 지붕모습-

㉔ 와이어하네스

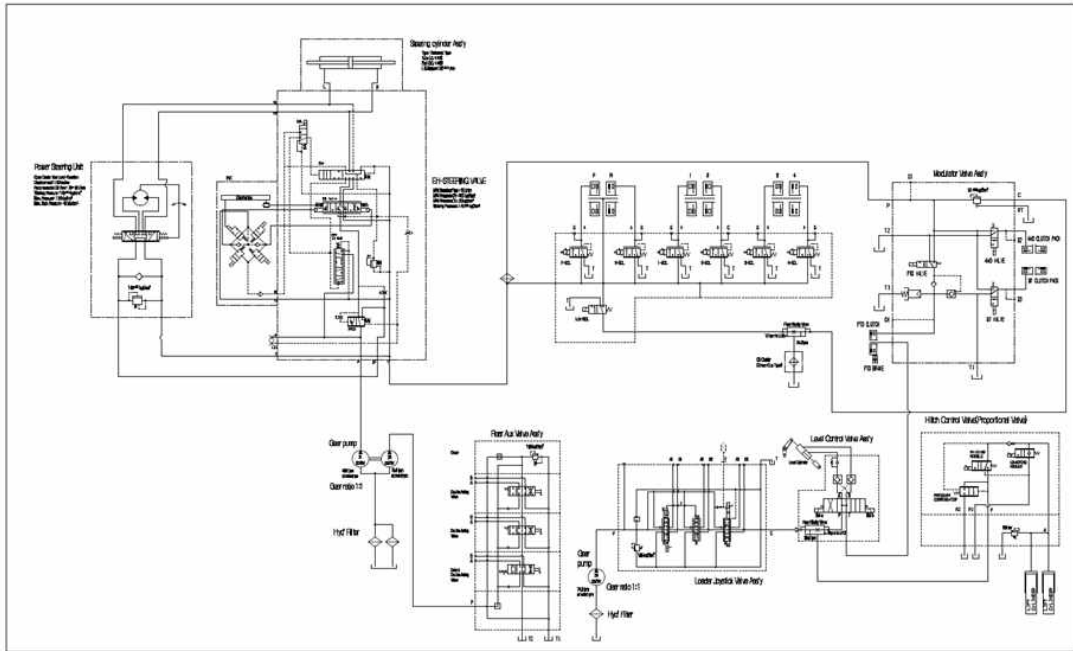
- 자율 주행관련 작성된 회로도 및 와이어 하네스 라우팅 경로를 반영해 2D 와이어 하네스 설계 된 도면으로 와이어 하네스를 제작 완료하였다.
- 그리고 3D 설계로 라우팅한 경로대로 시제품 차량에서 배선을 조립하였다.



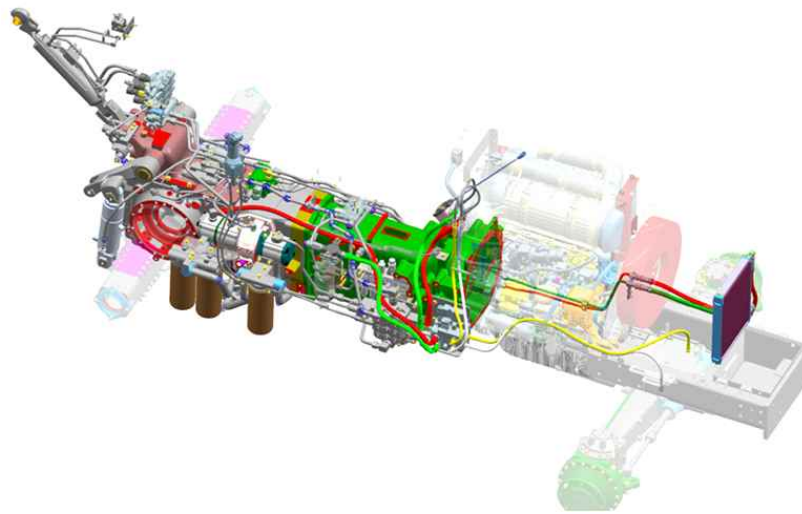
< 전장 시스템 와이어 하네스 시제품 개발 >

㉕ 유압시스템

- 시제품 조립용 유압시스템 Layout 설계
- 1차년도에 구성된 유압사양 및 유압회로를 기준으로 수정, 보완하여 시제품 조립용 자율주행 트랙터 유압시스템 Layout을 설계하고 제작 하였다.



<자율주행 트랙터 유압회로도>



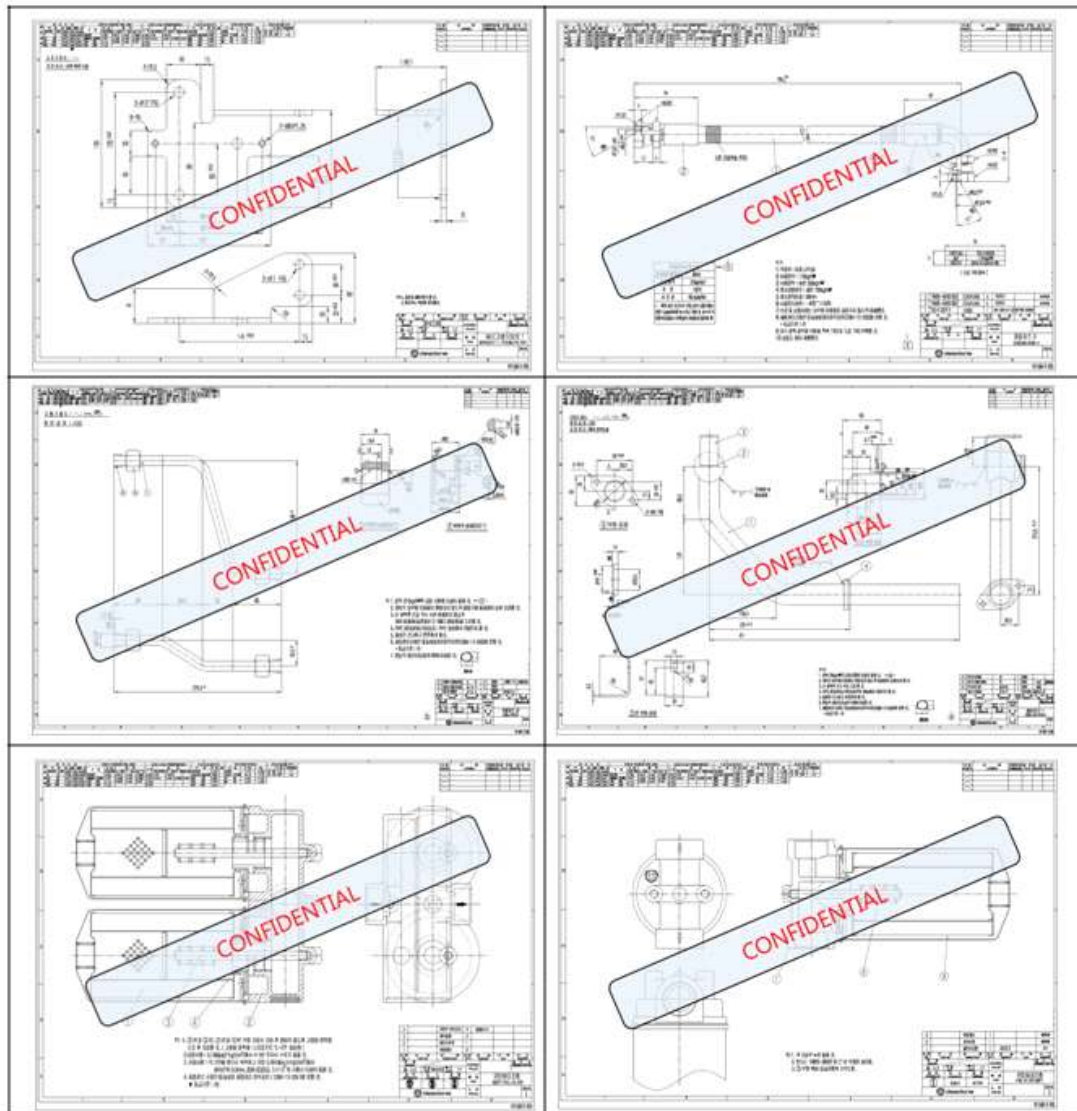
<자율주행 트랙터 유압시스템 Layout>

- 시제품 자율주행 트랙터 주행제어를 위해 유압식 다관클러치 타입의 변속구조에서 차량의 조건에 따라 최적의 변속단으로 자동 변속되는 Auto Power Shift 기능을 구현할 수 있도록 정밀제어가 가능한 전자비례제어밸브로 구성된 변속밸브를 제작하였다.
- 변속을 위하여 각각의 솔레노이드는 유압클러치를 Engage, Disengage 시키는 기능을 한다. 변속 시 적절한 변속시간과 최소의 변속충격을 위해 솔레노이드는 전자비례제어 솔레노이드로 선정하여 설계하였다.



<자율주행 시제품 제작 유압/밋선>

- 시제품 제작용 부품도면 설계



<시제품 제작 유압부 주요 도면>

㉞ 자율주행 트랙터 조립

㉠ 시제품 제작용 부품

	
<p>라이다</p>	<p>카메라</p>
	
<p>초음파센서</p>	<p>라이다브라켓</p>
	
<p>초음파센서 브라켓 지지판</p>	<p>초음파센서 브라켓</p>
	
<p>초음파센서 브라켓</p>	<p>지붕</p>
	
<p>환경인식모듈</p>	<p>환경인식모니터</p>

	
<p>캐빈프레임</p>	<p>천장판</p>
	
<p>조향유니트</p>	<p>모터 구동방식 조향핸들</p>
	
<p>조향밸브</p>	<p>흡입필터</p>

㉔ 시제품 트랙터 완성모습



<자율주행 트랙터 시제품 조립 >

㉔ 자율주행 성능 평가

㉕ 자율주행 트랙터 조향 반응 시간 시험

㉖ 시험품

- 자율 주행 트랙터 조향 제어 시스템(조향 제어기 및 조향 장치)



㉗ 시험 목적

- 자율주행 트랙터 조향 제어 시스템의 조향 반응 시간을 평가

㉘ 외관 및 구조



㉙ 시험 항목

- 조향 반응 시간

㉚ 시험 방법

- 조향 제어 개시 명령 시점을 측정하기 위해 명령이 입력되는 신호를 오실로스코프 채널 1 번으로 측정한다.
- 조향을 위한 기구부 작동 개시 시점을 측정하기 위해 조향 실린더에 변위센서를 설치하고 변위센서의 출력을 오실로스코프 채널 2번으로 측정한다.
- 조향 개시 명령 신호(오실로스코프 채널 1번)와 기구부 작동 개시 신호(오실로스코프 채널 2번)의 시간 차이를 측정하여 조향 반응 시간을 확인한다.

㉛ 평가 기준

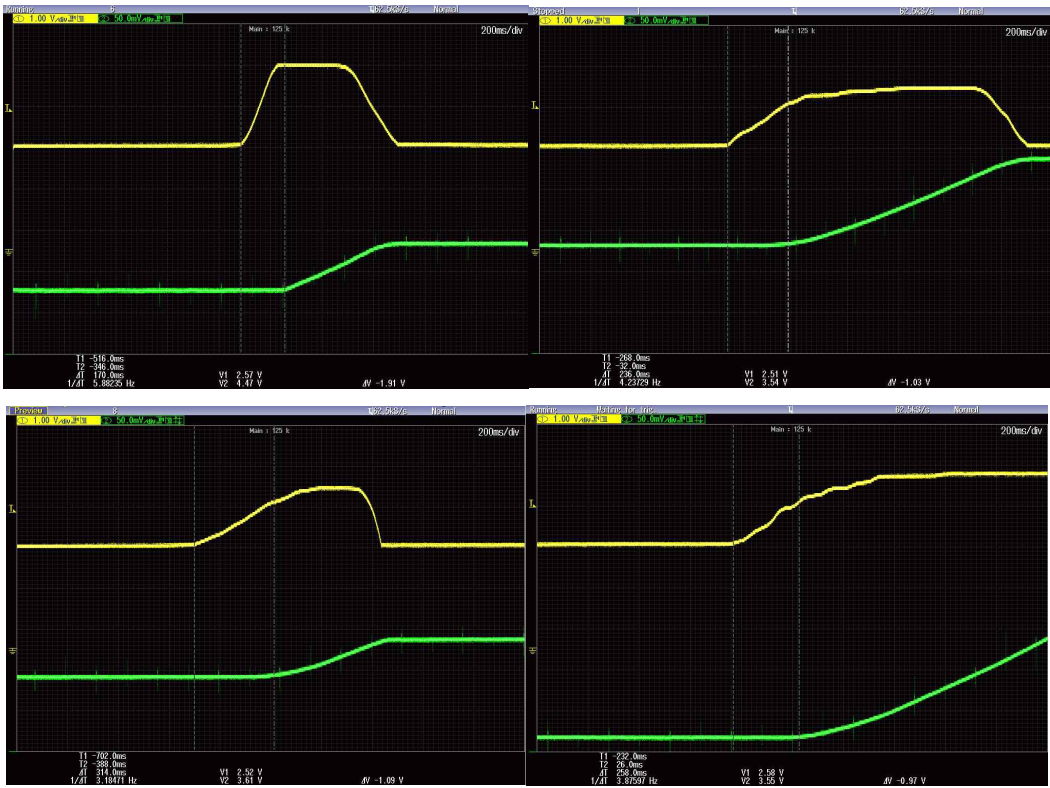
- 조향 반응 시간 0.8초 이하

㉜ 시험 결과

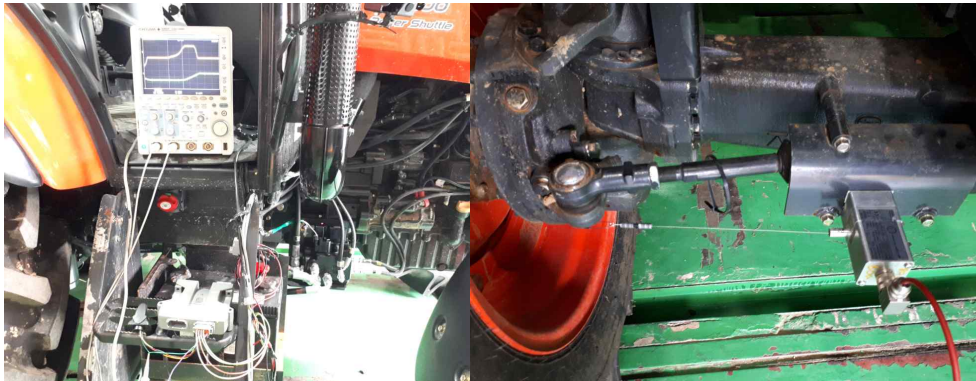
- 조향 반응 시간

횟수	1회	2회	3회	4회	5회	평균	평가 기준
조향반응시간 [ms]	170	236	314	258	188	233.2	800ms이하
평가 결과	만족	만족	만족	만족	만족	만족	

- 조향 반응 시간 시험 결과 그래프



- 시험 사진



㉔ 자율주행 트랙터 환경인식속도 시험

㉑ 시험품

- 자율 주행 트랙터 작업 환경 인식 모듈
- 작업 환경 인식 제어기가 장착된 트랙터



㉒ 시험 목적

- 자율주행 트랙터 환경 인식 업데이트 속도를 평가

㉓ 외관 및 구조



㉔ 시험 항목

- 환경 인식 속도

㉕ 시험 방법

- 자율주행트랙터 주위에 장애물(사람, 전신주)을 설치한다.
- 자율주행트랙터의 자율주행 환경인식 제어기를 작동시킨다.
- 차량을 전진하며 장애물 인식 데이터를 CAN 통신으로 수집한다.
- 장애물 환경 인식 업데이트 시간을 측정하여 환경 인식 속도를 확인한다.

㉖ 평가 기준

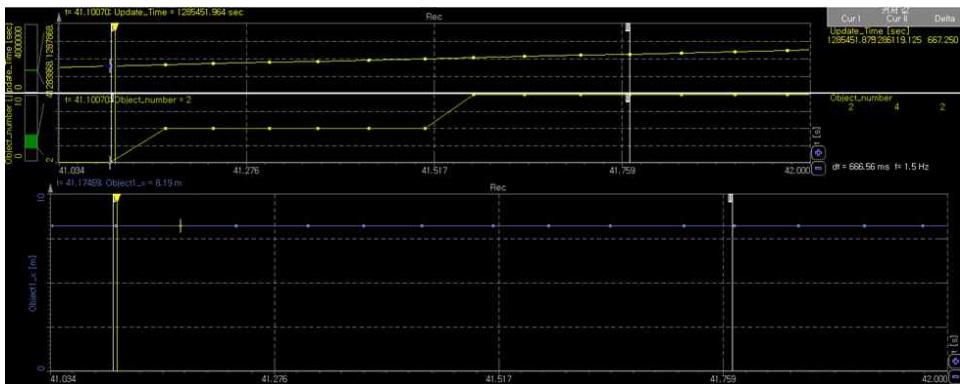
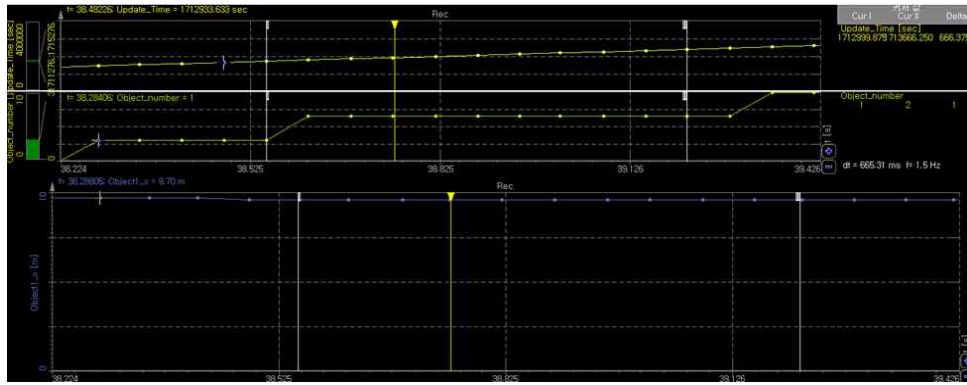
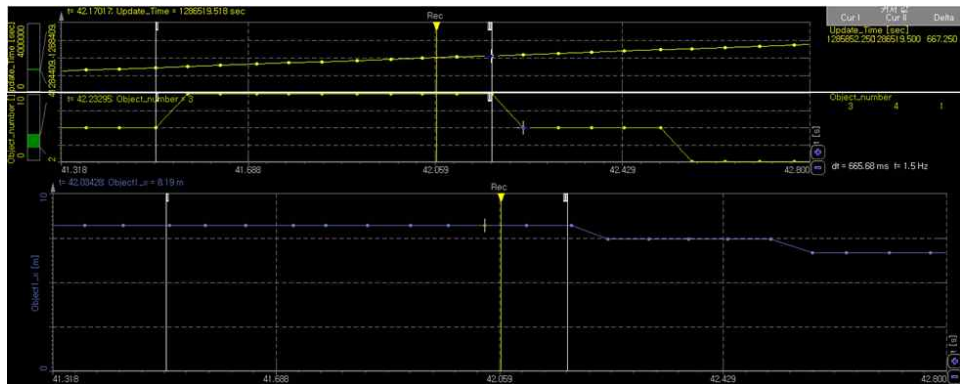
- 환경 인식 속도 15Hz이상

㉗ 시험 결과

- 환경 인식 속도

횟수	1회	2회	3회	평균	평가 기준
10회 인식 시간	665ms	665ms	666ms	665.3ms	15Hz이상
환경 인식 속도	15.0Hz	15.0Hz	15.0Hz	15.0Hz	
평가 결과	만족	만족	만족	만족	

- 환경 인식 속도 시험 결과 그래프



- 시험 사진



㉔ 자율주행 트랙터 환경인식률 시험

㉑ 시험품

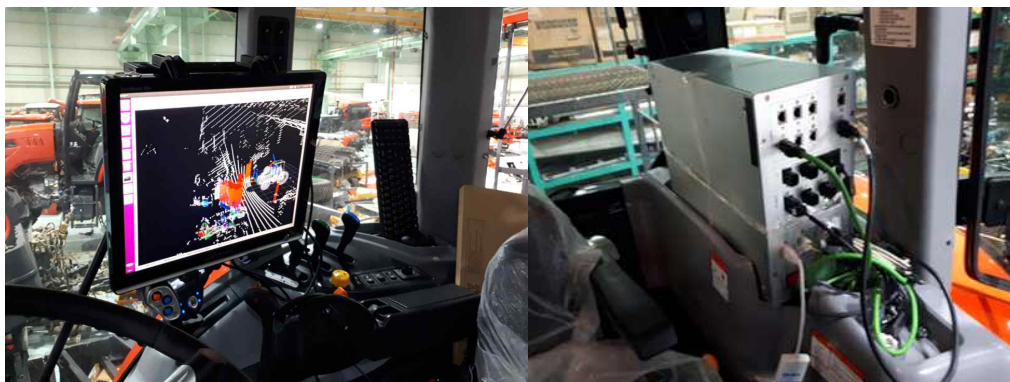
- 자율 주행 트랙터 작업 환경 인식 모듈
- 작업 환경 인식 제어기가 장착된 트랙터



㉒ 시험 목적

- 자율주행 트랙터 환경 인식 업데이트 속도를 평가

㉓ 외관 및 구조



㉔ 시험 항목

- 환경 인식률

㉕ 시험 방법

- 자율주행트랙터 작업 공간 내에 장애물(사람, 전신주 등) 10개를 설치한다.
- 자율주행트랙터의 자율주행 환경인식 제어기를 작동시킨다.
- 차량 정지 상태에서 자율주행 환경 인식 제어기가 검출한 장애물의 개수를 CAN 통신을 이용하여 출력한다.
- 실제 존재하는 장애물의 개수와 환경인식 제어기가 검출한 장애물의 개수를 비교하여 환경인식율을 계산한다.

㉖ 평가 기준

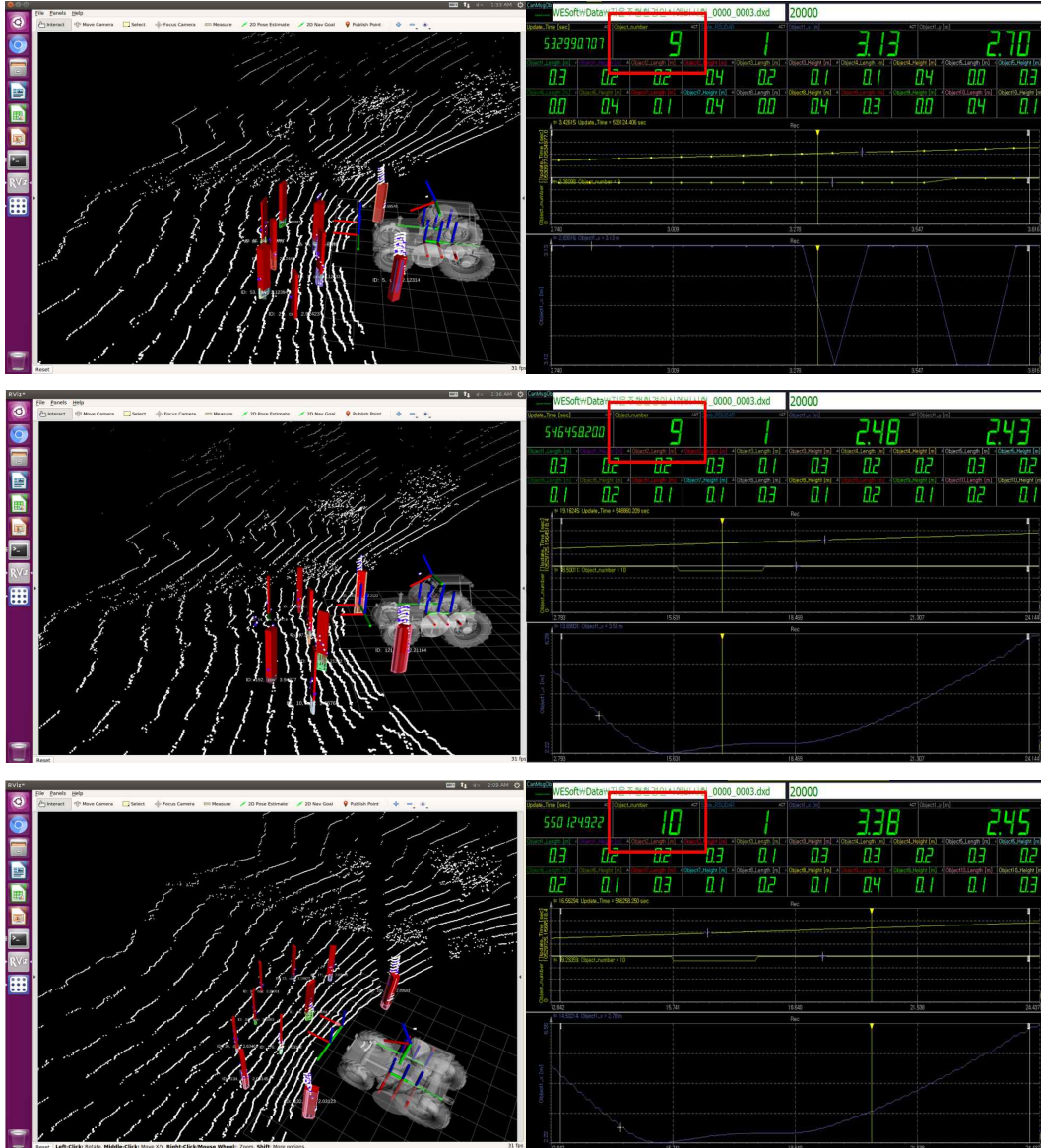
- 환경 인식률 80%이상

㉔ 시험 결과

- 환경 인식률

횟수	1회	2회	3회	평균	평가 기준
환경 인식률	90%	90%	100%	93%	80% 이상
평가 결과	만족	만족	만족	만족	

- 환경 인식률 시험 결과 그래프



- 시험 사진



㉔ 자율주행 트랙터 환경 인식 거리 시험

㉔ 시험품

- 자율 주행 트랙터 작업 환경 인식 모듈
- 작업 환경 인식 제어기가 장착된 트랙터



㉔ 시험 목적

- 자율주행 트랙터 장애물 식별 거리 평가

㉔ 외관 및 구조



㉕ 시험 항목

- 환경 인식 거리

㉖ 시험 방법

< 차량 정지 상태 >

- 자율주행트랙터 전방에 장애물을 설치한다.
- 자율주행트랙터의 자율주행 환경인식 제어기를 작동시킨다.
- 차량 정지 상태에서 장애물을 이동시켜가며 자율주행 환경 인식 제어기가 장애물을 인식하는 위치에 장애물을 정지시킨다. 장애물 인식은 환경인식 컨트롤러 모니터에 나타나는 장애물을 확인한다
- 자율주행 트랙터 본닛 전방부터 장애물까지 거리를 줄자를 이용하여 측정한다.

< 차량 원거리에서 장애물 방향으로 이동할 때 >

- 장애물을 환경인식 제어기가 인식 못하는 원거리에 설치한다.
- 자율주행 트랙터를 원거리에서 다가가면서 장애물이 인식되는 위치에 정지시킨다.
- 자율주행 트랙터 본닛 전방부터 장애물까지 거리를 줄자를 이용하여 측정한다.

< 차량 근거리에서 장애물에서 멀어지는 방향으로 이동할 때 >

- 장애물을 환경인식 제어기가 인식하는 근거리에 설치한다.
- 자율주행 트랙터를 장애물이 인식되는 위치에서 멀어지면서 장애물이 사라지는 위치에 정지시킨다.
- 자율주행 트랙터 본닛 전방부터 장애물까지 거리를 줄자를 이용하여 측정한다.

㉑ 평가 기준

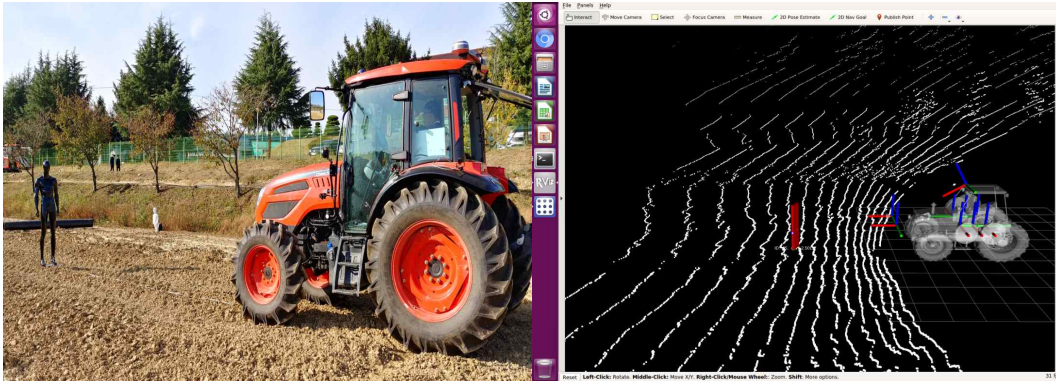
- 환경 인식 거리 5m이상

㉒ 시험 결과

- 환경 인식거리

횟수		1회	2회	3회	평균	평가 기준
환경 인식 거리	정지상태	5.2m	5.1m	5.3m	5.2m	5m 이상
	다가갈 때	5.1m	5.0m	5.0m	5.0m	5m 이상
	멀어질 때	5.4m	5.5m	5.4m	5.4m	5m 이상
평가 결과					만족	

- 시험 사진



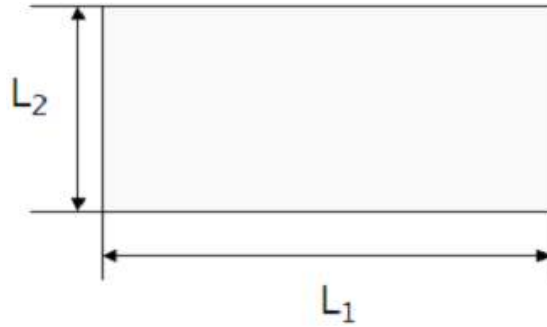
나. 협동연구기관 1 (동양물산기업(주) 중앙기술연구소)

㉔ 자율주행 경로생성 및 추종모듈 최적화 개발

㉔ 경로 생성 알고리즘 최적화

㉔ 선회 횟수와 회전 길이

- 아래 그림과 같은 가로 세로가 각각 L_1 , L_2 인 직사각형 형태의 경작지를 가로 방향으로 경작한다고 가정할 경우 가로 방향의 직선 주행 거리는 경운 경로를 어떻게 정하더라도 일정하게 되며 경운 경로의 총 길이는 회전 방법에 따라 결정됨.



<시험 포장지의 전형적인 형태>

- 트랙터의 폭을 W 라고하면 1회 주행으로 세로 방향으로 W 만큼 경작이 이루어짐.
- 따라서 가로 방향 총 주행 횟수는 L_2/W 가 정수인 경우에는 L_2/W 회, 정수가 아닌 경우에는 $L_2/W+1$ 회 주행하게 됨.
- N 을 L_2/W 보다 크거나 같은 최소 정수라고 정의하면, $N = \left\lceil \frac{L_2}{W} \right\rceil$ 이며, 총 회전 수는 $N-1$ 이 됨. 트랙터의 회전 반경을 R 이라고 하면, 회전 패턴과 그에 따른 회전 거리는 아래 그림에서와 같이 계산됨.

구분	회전 패턴	회전 길이
$W < 2R$		$\pi R + 4R\beta$
$W = 2R$		πR
$W > 2R$		$\pi R + d$

<선회 패턴에 따른 작업 거리 (Chung, et al.. 1999)>

㉔ 트랙터 이동 비용 최소화를 위한 경로 선정

- 트랙터 이동 비용은 총 이동 거리 또는 총 이동 시간으로 간주할 수 있으며, 회전하는 경우에도 직선 주행 시와 동일한 속도로 이동이 가능하다면 총 이동 시간은 총 이동 거리와 정확히 비례함.
- 그렇지 않은 경우라면 회전하는 경우의 속도와 직선 주행 시의 속도를 고려하여 시간을 산정할 수 있음.
- 직선 주행 시의 속도를 v_1 곡선 주행 시의 속도를 v_2 라 하면 아래 그림에서의 각 경

우에 대한 주행 시간은 $W < 2R$ 인 경우 $(\pi R + 4R\beta)/v_2$, $W = 2R$ 인 경우 $\pi R/v_2$, $W > 2R$ 인 경우 $\pi R/v_2 + d/v_1$ 이 됨.

- 아래 그림과 같이 경로 i 에서 경로 j 로 이동할 경우 경로 사이의 거리에 따라 이동 비용을 계산할 수 있으며 그 이동 비용을 C_{ij} 라고 하고, k 칸 떨어진 경로로 이동하는 시간을 T_k 라고 하면, 즉 바로 이웃한 경로로 이동하면 $k = 1$, 시간은 $T_1 = (\pi R + 4R\beta)/v_2$, 비용이 시간인 경우 $C_{i(i+1)} = C_{(i-1)i} = T_1$ 이 됨.



<경로 선정>

- 총 이동 비용(시간)은 이동할 경로와 경로 사이의 거리가 얼마인 이동 조합을 만드는가에 따라 다름. 예를 들어 4번의 직선 주행이 필요한 경작지의 경우, 즉 경로가 4개 나오는 경작지의 경우 각 경로를 아래에서 부터 1, 2, 3, 4라고 하면, 이동 방법은 총 3!개가 있으며 각 경우 경로 조합과 그 때의 시간은 아래 표와 같음.

경우	경로 조합	비용(시간)
1	1->2->3->4	$3T_1$
2	1->2->4->3	$2T_1 + T_2$
3	1->3->2->4	$T_1 + 2T_2$
4	1->3->4->2	$T_1 + 2T_2$
5	1->4->2->3	$T_1 + T_2 + T_3$
6	1->4->3->2	$2T_1 + T_3$

<경로 조합과 비용>

- 이동 비용 최소화를 위해서는 경로 간 이동에 걸리는 비용(시간)의 총합을 최소화하는 회전 방법의 조합이 필요하며 이 비용은 이동할 경로와 경로 사이의 거리가 얼마인 이동 조합을 만드는가에 따라 다름.
- 최적의 경로 조합을 실시간으로 탐색할 수 있는 방법을 연구 중에 있으며, 이를 자율주행 트랙터에 적용하여 경제적인 경로 조합을 제시할 수 있도록 구현할 예정임.

㉔ 경로 추종 모듈 최적화

㉕ 경로 추종 알고리즘의 안정성 향상

- 환경 인지 센서를 장착하지 않은 트랙터의 자율주행은 주어진 경로만을 추종하며 이루어지기 때문에 종종 조향각 계산상의 오류, 센서 오작동 및 통신상태 불량 등 위험요소에 노출되어있음. 그렇기 때문에 속도에 따라서 기구학적 최대 조향각 이내로

제한함.

- 또한, 조향은 경로의 곡률에 종속적일 수밖에 없기 때문에 곡률에 따른 조향각에 $\pm 10\%$ 의 허용 오차를 둬으로써 터무니없는 조향각을 제한 할 수 있었음.

㉠ 경로 추종 알고리즘의 고도화

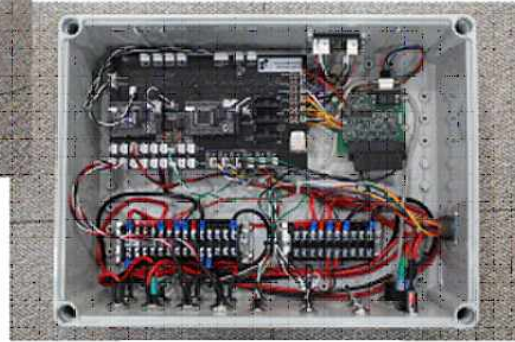
- 위도, 경도 좌표를 계산상 편의를 위해 TM 좌표로의 평면 투영을 통한 좌표 변환을 이용해 제어량을 계산함.
- 2D 지도로 표현된 이 좌표계의 heading은 구좌표계의 heading과의 편차가 존재함. 즉, 도북과 진북과의 편차가 존재함.
- 또한, 트랙터의 Mis-Alignment가 존재하고 각 모듈의 특성에 의한 오차도 존재함. 이 오차들은 서로에 대해 독립적이며 이들 오차의 합계는 선형의 성질을 지님.
- 이 오차로 인해 자율주행 트랙터는 경로의 좌우로 편향되어 주행하게 되며, 앞서 언급한 오차를 전부 모델링하기 어렵고 실제와의 차이를 갖게 됨.
- 트랙터의 특성에 따라 달라지기 때문에 튜닝과정이 필요하게 되며, 오차를 포함하여 튜닝과정을 거치고 편향 주행오차를 줄임.
- 이 방법은 조향 제어기에 오차를 고의로 발생시켜 필요한 보상 조향각을 생성하고 수치해석적인 방법을 통해 모델링을 하여 사용하게 됨.

㉡ 경로 생성 및 추종 모듈 소형화

- Proto 경로 생성 및 추종 모듈 내부에는 아래 그림과 같이 임베디드 형태의 실시간 모듈이 장착되어 있으며, 장착된 모듈은 리얼타임 프로세서로서 FPGA 및 I/O를 사용자가 임의로 재구성이 가능한 단일 PCB에서 통합한 모듈임.
- 경로 생성 및 추종 모듈을 통한 트랙터 제어가 정상적으로 이루어지는지의 여부를 확인하기 위해 Proto 경로 생성 및 추종 모듈에 외부 모듈을 구동하기 위해 제작된 기판을 부착하여 사용함. 그 이유는 기타 제어 모듈 각각에 통신과 전원공급을 담당하는 모듈을 구성할 경우 경로 생성 및 추종 모듈 박스의 부피가 커지고 배선이 복잡해지는 단점이 있기 때문임.
- 따라서, 이를 개선하기 위해 RS-232, RS-484, TTL 등 대표적인 통신방식에 대한 회로를 하나로 통합하고 단일 인터페이스 기판을 제작하여 사용함.
- 또한, 필요한 모듈을 경로 생성 및 추종 모듈 박스 외부에서 배선만 추가 및 확장하여 사용할 수 있도록 함.



경로생성/추종 컨트롤러



경로생성/추종 컨트롤러 내부

<Proto 경로생성 및 추종 모듈>

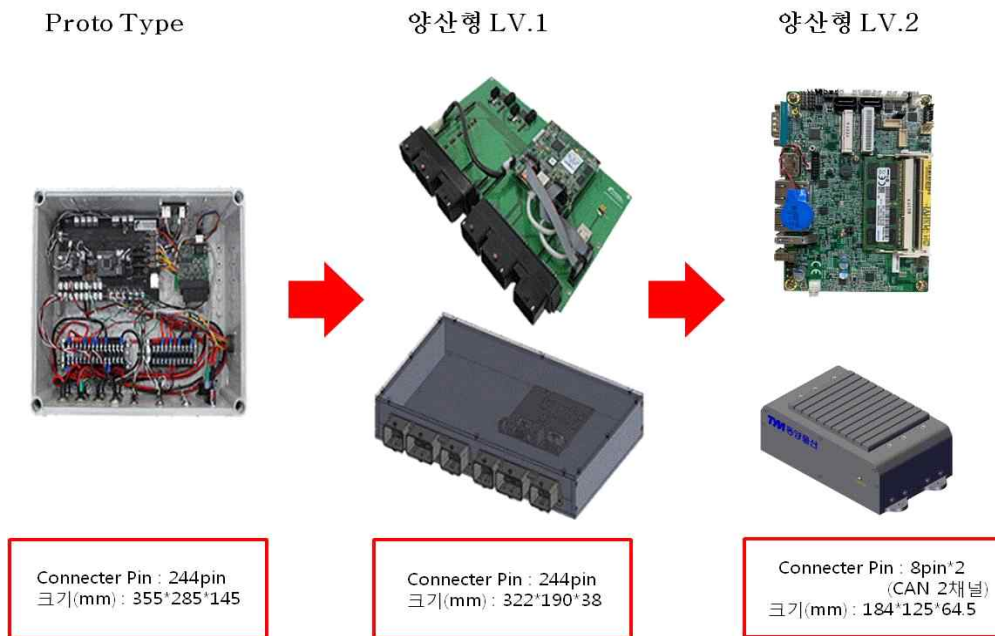
- 위의 그림과 같이 경로 생성 및 추종 모듈 외부에는 전원공급 단자, 테스트용 전원 출력 단자, 기타 모듈 간의 통신을 연결해 주는 통신케이블 단자 및 CAN 단자, 운전석에서 시스템의 모드를 변경 및 확인할 수 있는 모니터 연결 단자가 있음. 아래의 그림은 경로 생성 및 추종 모듈이 트랙터에 장착된 모습을 나타냄.
- Proto 경로 생성 및 추종 모듈은 크기와 장착 위치 등의 문제점이 있으므로 제품 양산을 고려하여 모듈 사양은 최대한 유지하되 크기와 배선 등을 간소화 하는 데에 초점을 맞춰 개발함.
- Proto 경로 생성 및 추종 모듈의 경우 크기뿐만 아니라 내부 배선의 복잡성도 하나의 개선점으로 나타났으며, Proto로 제작된 모듈은 제품 테스트의 디버깅을 위해 각 모듈의 커넥터를 통합하지 않고 독립적인 커넥터 형식으로 제작함.



<트랙터에 설치된 경로 생성 및 추종 모듈>

- 각 모듈의 디버깅이 끝난 상태이므로 제품의 안정화 및 신뢰성을 높이기 위해 경로 생성 및 추종 모듈의 배선을 PCB로 제작하여 복잡한 배선을 간소화 함.
- PCB는 현재 두 번에 걸쳐 개발이 진행되었으며 1차로 제작된 양산형 LV.1의 경우 여러 가지 기능을 테스트하기 위해 커넥터 Pin 수가 많아 크기가 커짐.

- 개발 목적에 부합하도록 필요한 커넥터 Pin만 선정하여 다시 제작된 것이 양산형 LV.2임.
- 양산형 LV.2 경로 생성 및 추종 모듈은 별도의 디스플레이 유닛을 연결하여 사용자가 경로 생성 및 자율 주행 컨트롤 그리고 모니터링이 가능하도록 개발하였으나 추후 양산형 LV.3에서는 모니터와 경로 생성 및 추종 모듈을 일체화하여 Command Console 형태로 개발할 예정임. 아래 그림은 경로 생성 및 추종 모듈의 개발 과정을 나타냄.

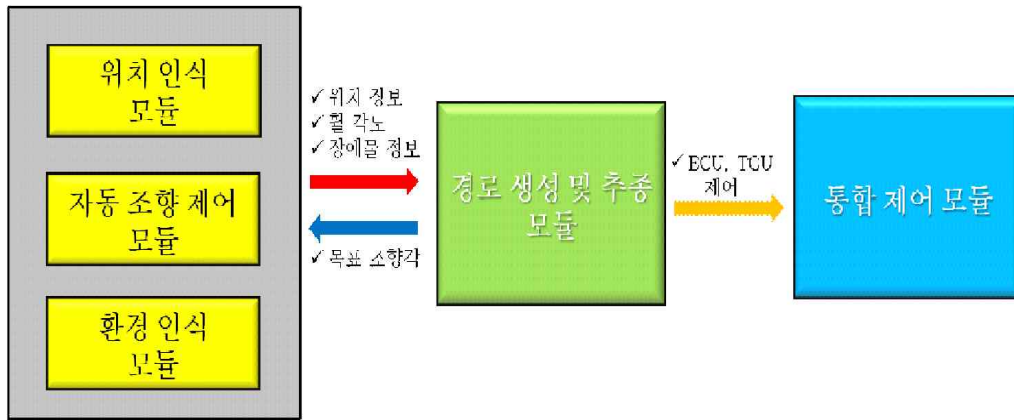


<경로 생성 및 추종 모듈 개발 과정>

㉔ 경로생성 및 추종 제어를 위한 하드웨어 시스템 개발 및 요인 시험

㉔ 경로 생성 및 추종 모듈 하드웨어 구성

- 양산형 LV.2 경로 생성 및 추종 모듈은 아래 그림과 같이 경로 생성 및 추종 알고리즘, 속도, 작업기 상·하강 계획을 처리하는 역할을 수행하며, 처리된 명령을 종합하여 통합 컨트롤러에 전송함.
- 양산형 LV.2 경로 생성 및 추종 모듈은 WINDOWS 기반의 임베디드 컨트롤러이며, 터치패널(Touch Panel)이 내장된 10인치 LCD 디스플레이를 별도로 연결하여 사용자가 컨트롤러에 명령을 직접 줄 수 있도록 개발하였음. 경로 생성 및 추종 모듈은 아래 그림과 같음.



<자율주행 트랙터 제어 구성>



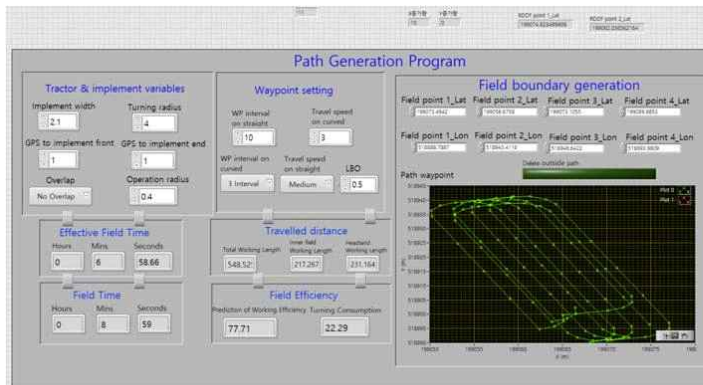
<트랙터에 장착된 경로 생성 및 추종 모듈>

구 분	세 부 항목	규 격 사 항
PERFORMANCE	Processor	Intel Atom™ E3845 1.91GHz
	Operation System	Windows 10 Pro DSP
	Ram	8GB DDR3L
	Storage Capability	Transcend SSD 256GB
	Interface	USB3.0 1port, USB 2.0 1port Video output: HDMI Supports 100Mbps Ethernet 2port RS232 1port Kvaser mPCI-E 2CH(CAN)
PHYSICAL AND ELECTRICAL	Power	9v~30V/2A
	Packing Size	184 * 125 * 64.5mm

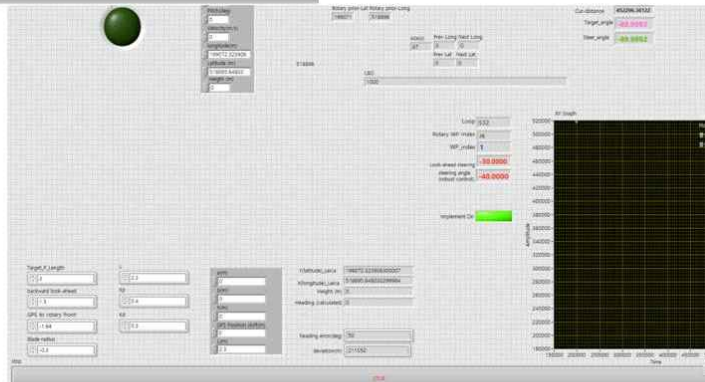
<경로 생성 및 추종 모듈 사양>

㉔ 경로 생성 및 추종 모듈 GUI(Graphic User Interface)개발

- 경로 생성 및 추종 모듈의 GUI를 상용화에 맞춰서 신규 개발함.
- 초기 모듈의 GUI는 연구 및 시험을 목적으로 개발하여 아래 그림과 같이 사용자 환경이 매우 복잡함.
- 또한, 경로 생성 알고리즘과 추종 알고리즘이 별도로 구성되어 경로 생성 후 RDDF 파일을 사용자가 추종 모듈에서 로딩해야 하는 불편함이 문제점으로 대두되어 두 가지 알고리즘을 GUI상에서 통합하여 사용자가 편하게 제어 할 수 있도록 하였음.



경로 추종 GUI

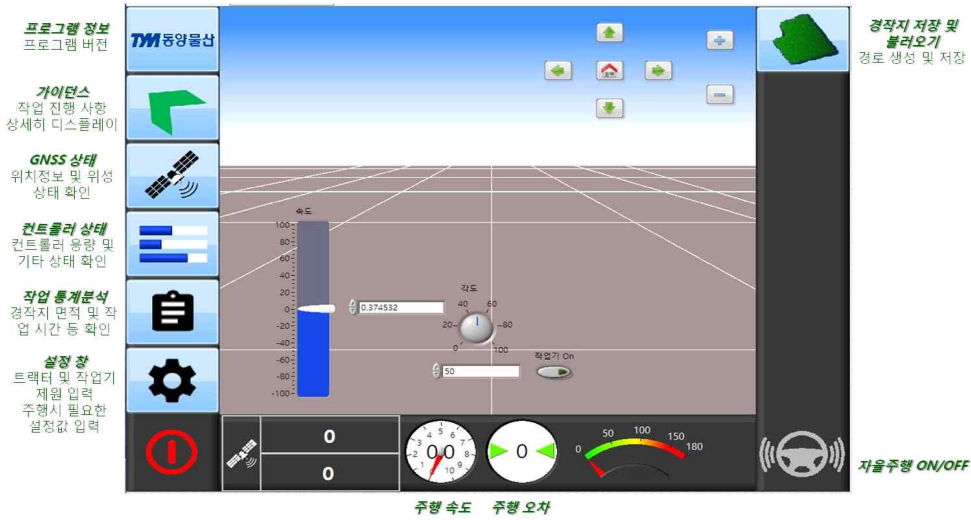


경로 생성 GUI

<초기 경로 생성 및 추종 모듈 GUI>

- 신규 개발한 GUI는 아래 그림과 같이 프로그램 정보, 주행모니터링, 위치인식 모듈 상태, 컨트롤러(경로 생성 및 추종 모듈) 상태, 작업통계, 작업 정보 저장 및 불러오기, 경로 생성 총 7개의 설정 및 모니터링 아이콘으로 구성 되어있으며, 사용자 편

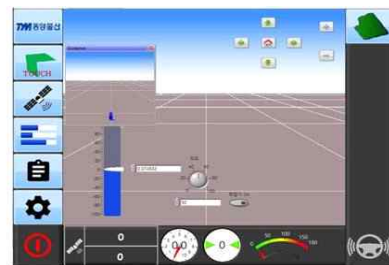
의를 고려하여 아이콘에 대한 내용을 직관적으로 파악 할 수 있도록 아이콘을 디자인 함.



<신규 경로 생성 및 추종 컨트롤 모듈 GUI>



프로그램 버전 확인 창



경로 추종 모니터링 창(가이던스)



위치 정보 확인 창



컨트롤 모듈 및 시스템 상태 확인 창



작업 통계 창

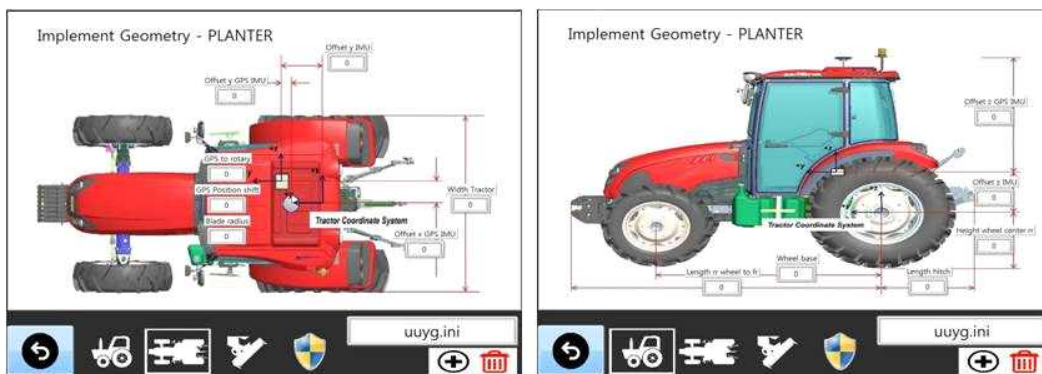
<신규 경로 생성 및 추종 모듈 주요 기능 GUI>

- 신규 경로 생성 및 추종 모듈 GUI의 주요 기능은 위의 그림과 같으며, 기능에 대한 설명은 아래와 같음.

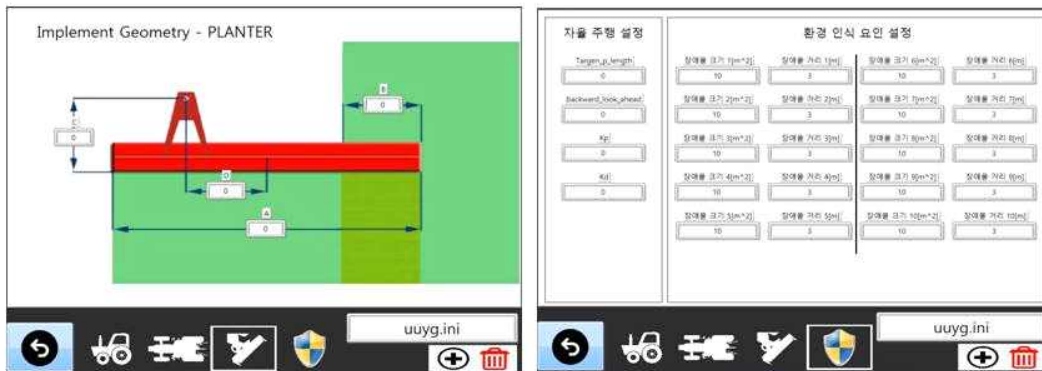
- 프로그램 정보 - 신규 프로그램 및 펌웨어의 업데이트를 위하여 현재 프로그램 버전을 확인.
- 경로 추종 모니터링 - 생성한 경로에 대한 주행 상태를 확대해서 확인

- 위치 정보 확인 창 - 위경도, 고도, Rolling, Pitching, Yawing, Heading, GPS Solution, GNSS 상태 등 위치 인식 모듈에 대한 정보를 확인
- 경로 생성 및 추종 모듈 상태 창 - 컨트롤 상태에 대한 정보 및 자율주행 시스템에 대한 상태 정보 확인
- 작업 통계 창 - 작업 면적, 이동거리, 작업 시간에 대한 통계 확인

- 추가로 아래 그림과 같이 트랙터 및 작업기 제원, 환경 인식 조건을 설정 창에서 설정할 수 있게 하였음.
- 트랙터 및 작업기 정보는 저장하여 사용 기계에 따라 사용자가 불러와 사용 할 수 있도록 개발하였으며, 환경 인식 설정은 장애물로 인식할 물체의 크기와 거리에 대한 조건을 사용자 모드를 활성화하여 설정할 수 있게 개발하였음.



트랙터 제원 입력 창



작업기 제원 입력 창

환경 인식 조건 설정 창

<신규 경로 생성 및 추종 모듈 주요 설정 창

트랙터 제원 입력(위), 작업기 제원 입력(하), 환경인식 조건 설정>

- 아래 그림과 같이 우측 상단 아이콘 터치 시 경로 생성 창이 활성화 됨.
- 경로 생성은 경작지의 꼭지점을 입력하면 C형 선회 패턴 경로가 기본으로 생성되게 구성하였으며, 다른 형태의 선회 패턴은 알고리즘 안정화를 시킨 후 추가 할 예정입니다.
- 본 과제에서 신규 개발한 경로 생성 프로그램은 아래와 같은 장점이 있음.

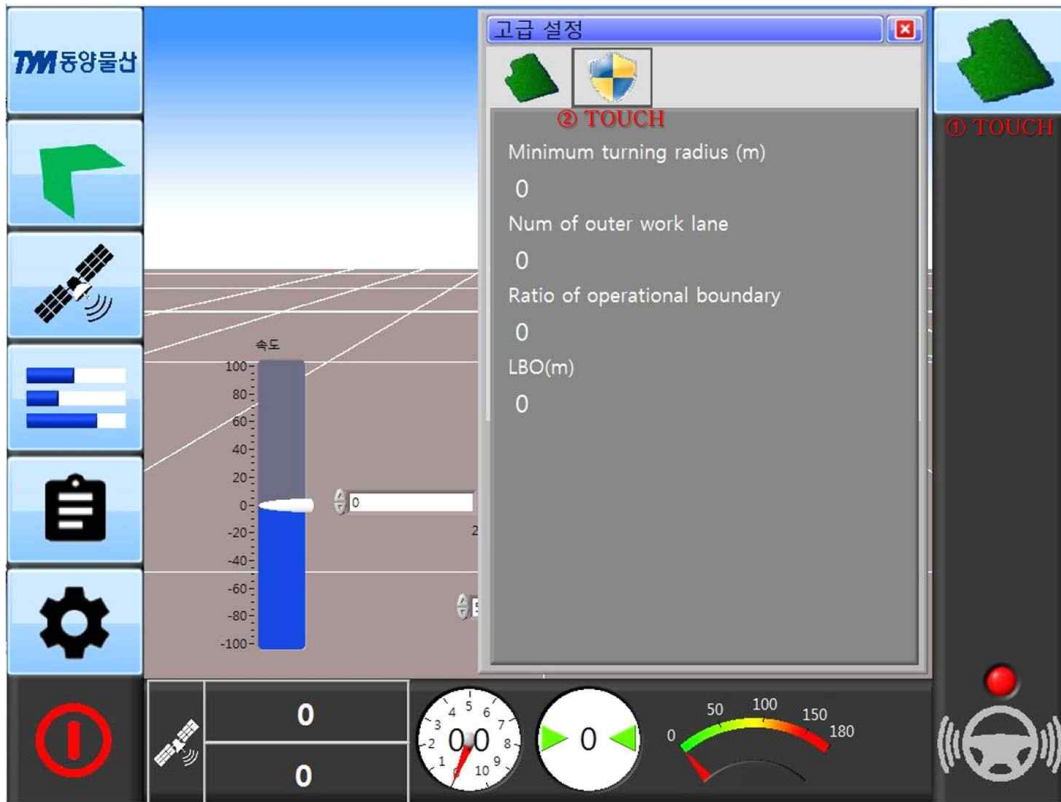
- 경작지의 4개 꼭지점만 입력 가능한 기존의 프로그램에서 무한으로 꼭지점을 입력하여 비정형 경작지도 경로 생성 가능.
- RDDF 파일이 자동으로 추종 알고리즘에 업로드 되도록 함. 기존의 경로 생성 프로그램은 사용자가 RDDF 파일을 추종 프로그램에서 직접 입력 시켜주어야 자율

주행이 가능.

- 경작지 꼭지점 입력 방법을 개선함. 기존의 프로그램은 사용자가 직접 경작지의 꼭지점 위치 정보를 취득하여 입력하는 방식이었으나, 신규 개발한 프로그램은 트랙터로 경작지 꼭지점 위치로 이동 후 확인 버튼 터치 시 경로 생성 프로그램에 위치 정보가 자동으로 입력되는 방식으로 개발함.
- 사용자 모드에서 회경 작업 횟수, 선회 반경, 작업 반경 설정, LBO 설정 가능함.
- 경작지에 따른 작업 별 경로를 저장 할 수 있어 사용자가 해당 작업의 경로를 쉽게 불러와 자율주행을 할 수 있음.
- 직선 구간과 선회 구간의 속도를 사용자가 설정하여 자율주행이 가능하도록 함.



<신규 경로 생성 및 추종 모듈 경로 생성 GUI>



<신규 경로 생성 및 추종 모듈 경로 생성 사용자 모드 설정 GUI>

㉔ 경로 추종 제어를 위한 장애물 인식 알고리즘 개발

㉔ 연구 목적

- 장애물 감지 및 분류와 같은 문제를 해결하기 위해 이미지 registration을 통해 보다 풍부한 정보를 획득
- 실시간 이미지 처리를 위한 열 화상 및 컬러 이미지의 빠른 등록 및 픽셀 수준 일치 정확도를 달성

㉔ 연구 내용

㉔ 장애물 인식 장치

- 열 화상 카메라의 사진 촬영 기반 registration은 초기 단계에서 보정된 매개 변수가 후속 계산에 활용되므로 모든 카메라를 단일 고정 프레임에 고정해야 함.
- 카메라 프레임은 2 개의 동일한 컬러 카메라와 열 화상 카메라를 장착하기 위해 3D 프린터로 설계 및 인쇄됨.
- 2 개의 컬러 산업용 카메라 (USB 3.0, The Imaging Source, Charlotte, NC, USA)가 열 화상 카메라 (A655sc, FLIR, Wilsonville, OR, USA) 에서 106 mm 떨어져 장착
- 세 대의 카메라는 모두 초점 거리가 고정되어 있으며 계산 편의성을 위해 640 * 480 픽셀의 이미지를 출력하도록 설정



< 이미지 registration을 위한 2 개의 컬러 카메라와 열 화상 카메라 >

② registration 방법

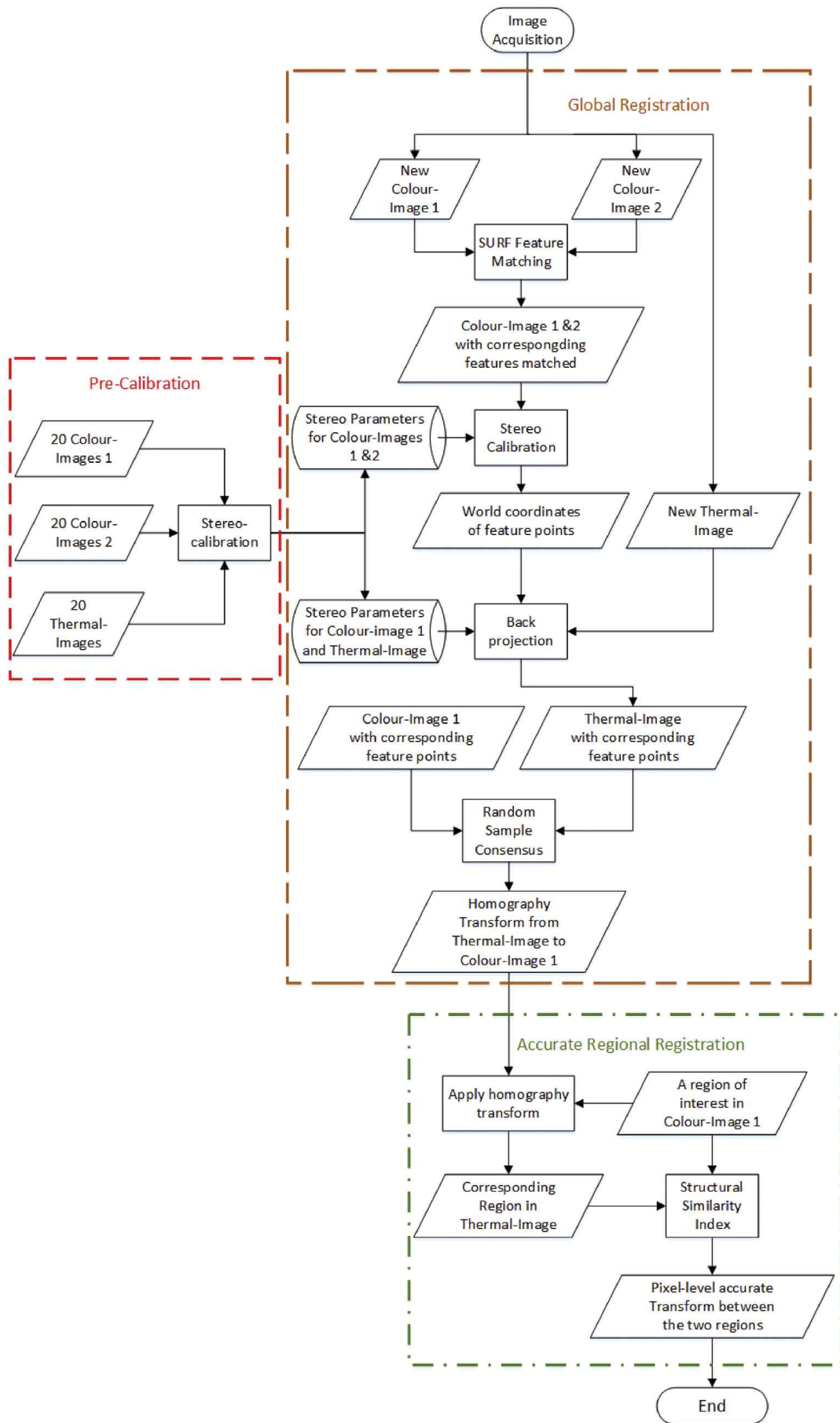
① 사전 교정

② global registration

- 컬러 이미지 간의 SURF 기능 매칭
- 모형 공간에서 특이점 좌표 생성
- 특징점을 열 화상으로 back-projection
- 컬러 이미지와 열 화상 이미지 사이의 homography 변환 검색.

③ 정확한 regional registration

- 컬러 및 열 화상 이미지를 전체 등록의 homography 변환과 결합
- SSIM을 사용한 정확한 등록.

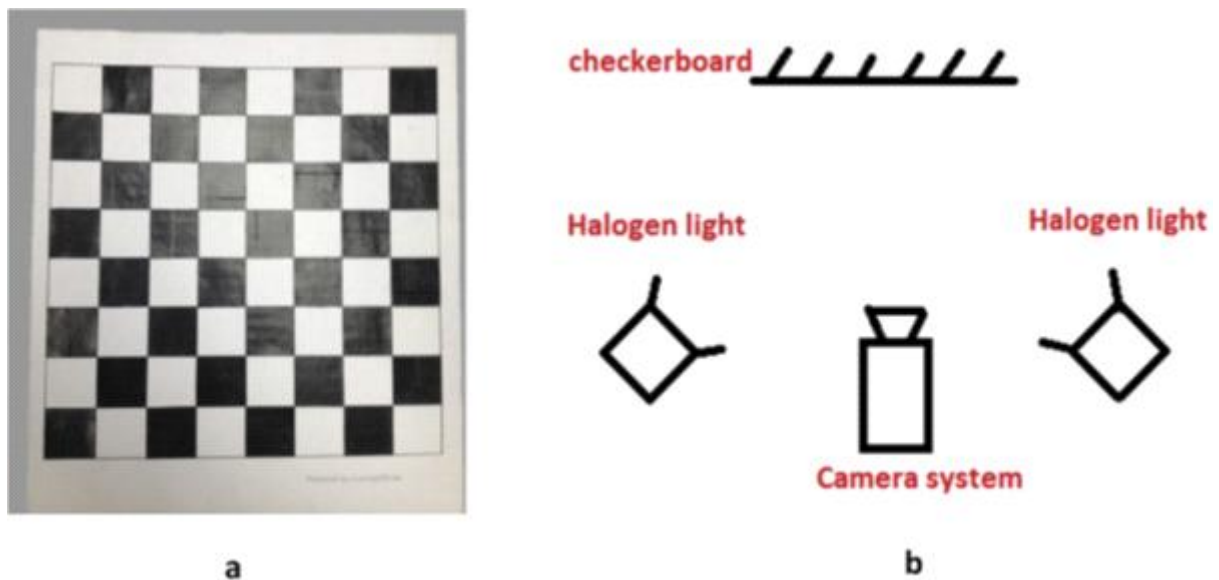


< 이미지 registration 방법의 작업 흐름도 >

③ 파라미터의 pre-calibration

- ① 매개 변수의 pre-calibration은 한 번만 수행하면되는 프로세스
- ② 디지털 카메라의 interior orientation

- 교정 초점 거리 (CFL), 대칭 방사형 렌즈 왜곡, 적절한 렌즈 왜곡 및 주요 지점 위치
- 이러한 상수 값을 결정하는 프로세스를 일반적으로 camera calibration이라 함.
 - ㉔ relative orientation
- 한 쌍의 카메라 사이의 상대 각도 태도 및 위치 변위
- 이러한 값을 결정하는 과정을 space resection이라 함.
 - ㉕ 빠른 교정을 달성하기 위해 이 두 프로세스는 이 연구에서 stereo-calibration 이라는 단일 단계로 결합
 - ㉖ stereo-calibration 설정
- 24.75 * 24.75mm 크기의 정사각형 맞춤 checkerboard와 한 쌍의 할로겐 램프 (Britek 8054 600w Halogen Light, Britek, Santa Fe, CA, USA)로 구성
- checkerboard은 일반적으로 모서리를 제어점으로 사용하여 단일 카메라 보정에 사용
- 검은 색과 흰색 사각형인 일반 checkerboard과는 달리 모든 검은색 사각형은 검은 색 비닐 전기 테이프로 처리
- 테이프의 표면 온도는 할로겐 램프에 의해 방출되는 IR 방사선의 흡수가 높기 때문에 더 빠르게 상승함. 따라서 열 화상 카메라로 촬영한 열 화상 이미지에도 checkerboard의 패턴이 표시



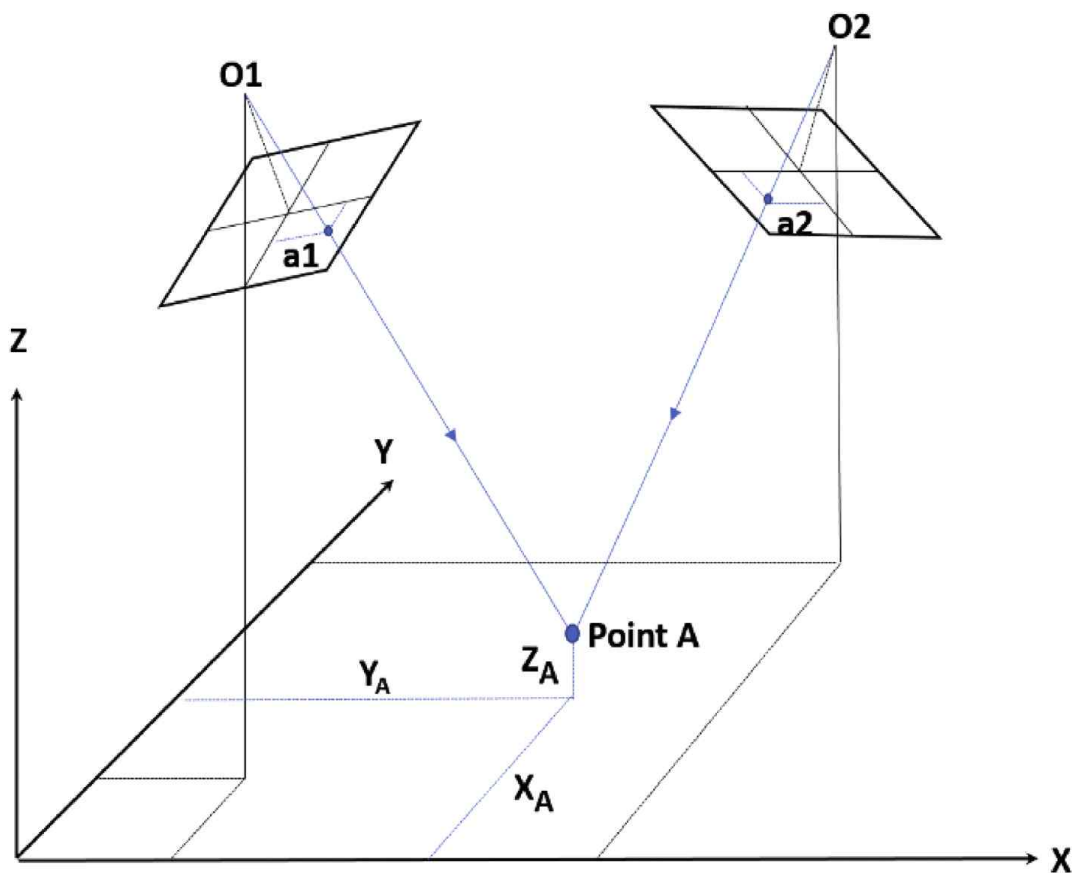
< checkerboard과 이미지 설정 >

- stereo-calibration 을 준비 할 때, 많은 측정 데이터를 제공하기 위해 30 세트의 이미지가 수집됨. 각 세트에는 3 대의 카메라로 촬영한 3 개의 checkerboard 이미지가 포함되어 있으며, checkerboard의 모서리가 자동으로 감지되어 카메라 calibration 및 space resection processe에 사용됨.
 - ㉗ 소프트웨어
- MATLAB (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA)가 이 연구에 사용된 주요 소프트웨어
- Computer Vision Toolbox의 기능인 checkCheckboardboards는 모서리를 감지하

- 고 자동으로 자체 정의 된 규칙에 따라 모서리를 정렬하는 데 사용
- stereo-calibration은 2 단계 프로세스로 최소 제곱법을 사용하여 많은 방정식의 복잡한 시스템을 푸는 것이 포함됨.
- 방정식은 collinearity condition에서 파생됨. 첫 번째 단계는 컬러 카메라 1과 2로 명명 된 두 컬러 카메라 사이의 상대 방향을 계산하는 것이고, 두 번째 단계는 collinearity condition 방정식을 적용하여 컬러 카메라 1과 열 화상 카메라 사이의 상대 방향을 계산하는 것임. 이 두 단계는 모두 MATLAB 함수, 카메라 매개 변수 추정을 사용하여 구현됨.
- 계산된 매개 변수는 나중에 사용하기 위해 Microsoft Access Table 파일로 저장

④ 모형 공간 좌표 추정

- ① 계산된 interior orientation 및 relative orientation 색상이 이 단계에서 로드 되어 다음과 같은 그림에 표시된 모형 공간에서 물체의 좌표를 추정

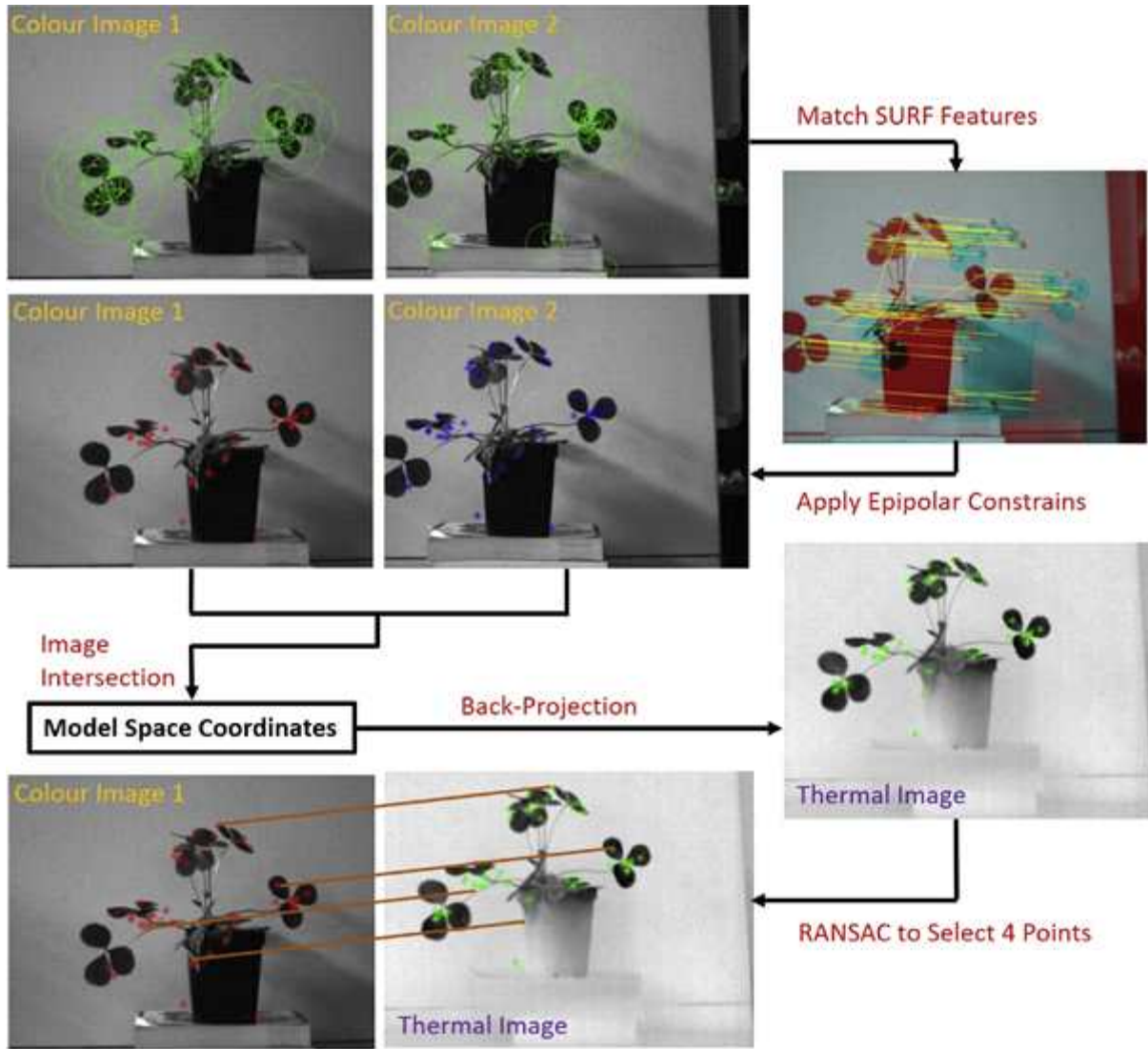


< 이미지 교차 좌표 >

- ② Interior orientation은 왜곡을 제거하기 위해 이미지를 교정하기 위해 적용
 - ③ 두 수정된 이미지에 표시된 모형 공간 점(점 A)에 대해 이미지 교차가 적용
 - ④ 이미지 교차 방법은 카메라의 주요 지점 (O1 및 O2)과 이미지 평면 (a1 및 a2)에서 지점 (A)의 위치를 연결하는 2 개의 라인을 생성
 - ⑤ 기술적으로 이 두 선은 점 A에서 교차해야 함. 이 경우 A의 3 차원 좌표 (X_A , Y_A , Z_A) 인 세 가지 변수 해결할 수 있음.
- ⑤ 열 화상 및 컬러 이미지의 global registration
- ① 컬러 이미지에 열 화상 이미지를 등록하는 것은 둘 사이의 기하학적 변환을 찾

는 것임.

- ② 각 이미지에서 여러 개의 일치하는 점을 올바르게 결정
- ③ 최적의 포인트 세트를 신속하게 선택하기 위해 SURF (Speeded Up Robust Features) 기능 검출기와 Random Sample Consensus (RANSAC)가 적용
- ④ 프로세스는 다음 그림과 같이 설명



< 열 화상 및 컬러 이미지의 global registration의 프로세스 >

- MATLAB 기능인 detectSURFFeatures, extractFeatures 및 matchFeatures를 사용하여 두 컬러 이미지에서 SURF 기능을 감지하고 일치시킴.
- 매칭된 특성을 추가하여 matching의 신뢰도를 높이기 위해 epipolar geometry 구속 조건을 적용하여 Matched features를 필터링함. epipolar geometry는 stereo vision의 기하학으로 이미지 포인트 간의 제약을 유발함.
- 필터링된 피쳐를 추출하고 해당 이미지 좌표를 registration 후보로 입력
- 이미지 교차점 프로세스를 해당 점에 적용하여 모델 공간 좌표를 추정하고 sparse point cloud를 생성
- Back-projection은 모델 투영 좌표를 열 화상 이미지로 투영하기 위해 식 (1)을 사용하여 적용

$$S \times Coordinates_{thermal} = Coordinates_{world} \times [RT]' \times K$$

where,

S : Scalar

Coordinates_{thermal} : the homogeneous coordinates of point A on the thermal image

Coordinates_{world} : the homogeneous coordinates of point A

R : the rotational matrix of the thermal camera relative to the base camera

T : the translational matrix of the thermal camera relative to the base camera

K : the intrinsic matrix of the thermal camera.

- RANSAC는 최적의 homography 변환을 위해 열 화상 이미지와 컬러 이미지 중 하나에서 4 쌍의 점을 선택하는 데 사용. RANSAC의 기준은 inlier 수를 최대화한다는 것임. 즉, 선택된 최적의 homography 변환이 컬러 및 열 화상 이미지의 대부분의 쌍과 일치한다는 것을 의미함.

⑥ 열 화상 및 컬러 이미지의 Regional registration

- ① homography 그래피 변환을 사용하여 두 이미지의 Global registration은 타겟 장면이 평면에 가깝다고 가정
- ② 높은 정확도가 필요한 경우 global registration 후에 추가 단계가 필요함. 이 연구에서는 열 영역 및 컬러 이미지의 작은 영역을 높은 정확도로 등록하기 위한 regional registration 절차가 제안
- ③ regional registration은 global registration 결과를 초기 추정값으로 사용하였으며, feature-based 방법을 사용하여 영역을 일치시킴
- 컬러 이미지에서 관심있는 임의의 영역에 대해, 알고리즘은 global registration의 결과에 기초하여 열 화상 이미지에서 대응하는 영역을 결정됨. 컬러 이미지의 영역 A에 (x_0, y_0) 의 중심이 있는 경우, 열 화상 이미지의 추정된 해당 좌표 $(X_{0_therm_est}, Y_{0_therm_est})$ 는 global registration의 homography 변환을 사용하여 계산
- 추정된 대응 좌표 $(X_{0_therm_est}, Y_{0_therm_est})$ 와 실제 대응 좌표 $(X_{0_therm}, Y_{0_therm})$ 사이에 초기 값 $(0, 0)$ 을 가진 작은 변환 $(\Delta x, \Delta y)$ 이 가정됨. 영역 A는 컬러 이미지와 영역에서 추출됨. $(X_{0_therm_est} + \Delta x, Y_{0_therm_est} + \Delta y)$ 를 중심으로 한 B는 열 화상 이미지에서 추출됨.
- Canny edge detection을 사용하여 두 영역을 edge 이미지로 변환
- SSIM index를 사용하여 두 edge map의 유사성을 측정함. SSIM index는 참조 이미지가 주어지면 이미지 품질을 측정하는 데 일반적으로 사용되는 방법임. 유사도 측정을 위해 이미지의 구조 정보를 추출하는 데 사용됨.
- 값 $(\Delta x, \Delta y)$ 을 증가시켜 이전 4 단계를 반복함. SSIM index 값이 가장 높은 변환이 최적의 값으로 선택됨.

⑦ 실험 설계

- ① 이 실험은 초기에 global registration의 효과를 테스트하기 위해 수행
- ② 카메라 calibration 및 stereo-calibration을 구현
- ③ 무작위로 배치된 checkerboard 이미지는 보정된 열 화상 카메라 시스템으로 촬영
- ④ SURF에 의해 특징을 선택하는 대신, checkerboard의 모든 모서리가 평가하기

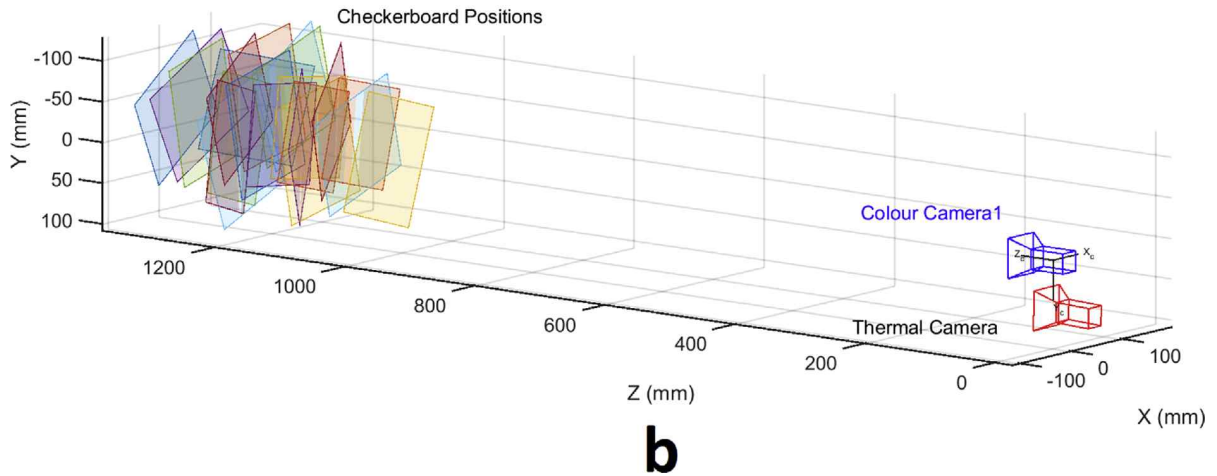
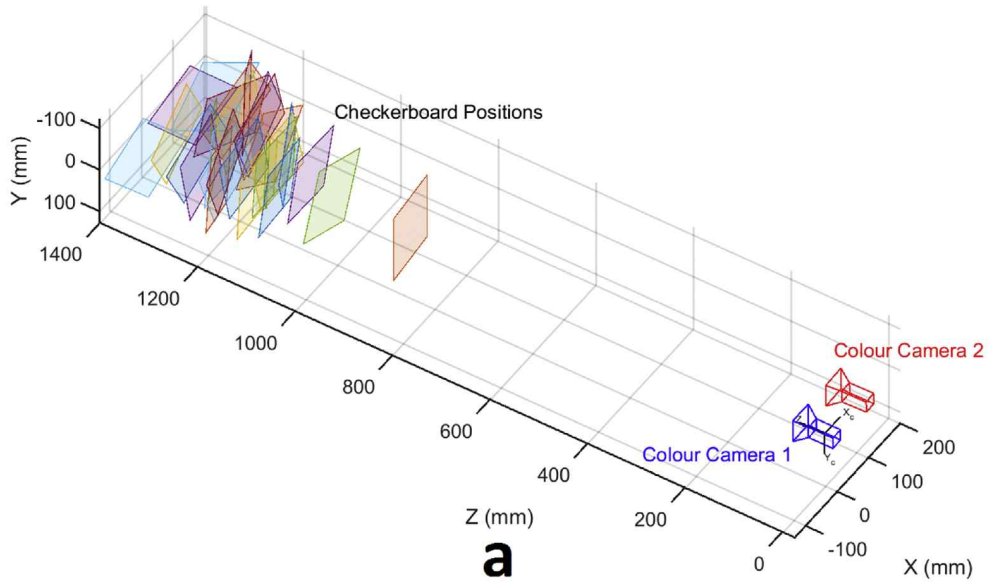
위한 점으로 선택

- ⑤ 모델 공간 좌표는 두 컬러 이미지에 이미지 교차를 적용하여 추정
- ⑥ 추정된 모델 공간 좌표가 열 화상 이미지로 다시 투영
- ⑦ 열 화상 이미지에서 checkerboard 모서리의 실제 좌표가 알고 있으므로 back-projection의 오차를 쉽게 평가

㉔ 연구 결과

① stereo-calibration 결과

- ① stereo-calibration의 수렴에서 컬러 카메라 쌍을 교정하기 위해 0.28 픽셀의 overall mean error가 발생하였고, 컬러 카메라 1과 쌍을 이루는 열 화상 카메라를 교정하기 위해 0.32 픽셀의 overall mean error가 발생
- ② 계산된 interior orientation과 카메라의 relative orientation이 포함되어 있으며, 추정된 relative orientation의 시각화 및 각각의 이미지 세트가 촬영 될 때의 checkerboard 위치를 시각화함. 청색 카메라는 3 차원 좌표계의 원점에 위치한 컬러 카메라 (1)를 나타냄. 교정에 사용됨.
- ③ 컬러 카메라 2는 (x : -106.2mm, y : -1.77mm, z : 1.13mm), 열 카메라는 (x : -52.7 mm, y : -74.9 mm, z : 0.89)에 위치



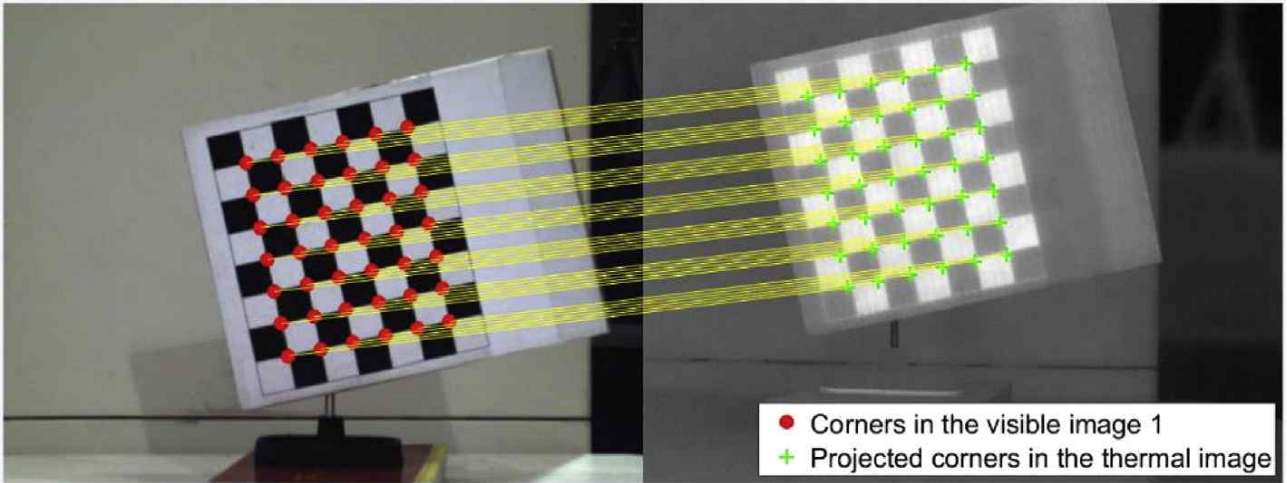
< relative orientation의 시각화 >

② 열 화상 및 컬러 이미지의 global registration 결과

- ① 열 화상 카메라의 이미지를 컬러 카메라 1의 이미지로 register하려면 선택한 점들의 모델 공간 좌표를 두 컬러 카메라를 사용하여 찾아야 함. 그 후, 카메라의 interior orientation 및 relative orientation의 정보를 사용하여 해당 점들을 모델 공간 좌표에서 열 화상 이미지로 다시 투영함.
- ② checkerboard를 대상으로 실험을 수행 시, 각 3 세트의 이미지로 구성된 총 20 세트의 이미지를 촬영함. 각 이미지에는 registration에 사용되는 42 개의 코너 점들이 있으며 정확도가 평가됨. 평균 매칭 에러는 640 * 480 픽셀 이미지에서 3.3 픽셀이었으며, 열 화상 이미지의 각 쌍에 대한 Back-projection error는 다음의 표와 같음.

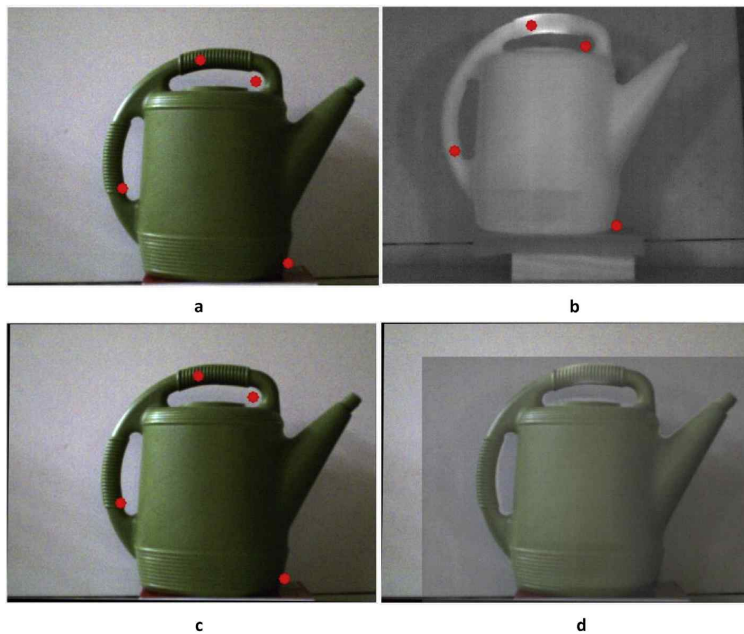
Image#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Projection error (pixel)	3.5	2.3	2.3	2.7	4.0	3.4	3.3	4.5	4.2	3.0
Image#	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Projection error (pixel)	4.5	3.9	2.0	2.0	2.2	4.8	3.1	4.1	3.1	3.7

< Back-projection error >



< 화상 이미지로 투사된 코너 포인트 >

㉔ 불규칙한 모양의 물체에 대한 실험도 수행함. 변환된 컬러 이미지뿐만 아니라 컬러 이미지에서 열 화상 이미지로 투사된 4 개의 선택된 포인트의 예를 보여 줌. 해당 지점의 실제 열 이미지 좌표를 알 수 없으므로 정확한 지점 간 일치 오류를 계산할 수 없음. 그러나, 실제 물체에 대한 정확도를 추정하기 위해, 열 이미지는 그림과 같이 registration에 기초하여 컬러 이미지에 중첩됨.



< 불규칙적인 모양의 물체에 대한 실험 >

㉔ 열 화상 및 컬러 이미지에 대한 regional registration 결과

㉔ global registration 후 각 변환된 컬러 이미지에서 100 * 100 픽셀의 무작위로 선택된 영역이 추출되며, 해당 열 영역을 검색하고 추출함.

- ③ 정확도를 나타내기 위해 영역별 컬러 이미지의 edge map이 열 화상 이미지 위에 중첩시킴.
- ④ 사진 촬영 기반으로 하는 global registration 평가
 - ① global registration에서 homography 변환을 사용하면 이미지 일치에 대한 계산이 최소화되었으며, homography 변환에 4 개의 포인트만 있으면 feature 포인트 검색 작업이 쉬워짐.
 - ② 한 쌍의 컬러 이미지에서 충분한 피처 포인트가 감지되고 컬러 이미지와 열 화상 이미지 사이에 유효한 homography 변환이 발견되는 것이 보장됨. 컬러 이미지 쌍으로부터 dense point cloud를 형성하고 포인트를 열 이미지로 back-project하는 기존의 방법에 비해 큰 이점을 보여줌.
 - ③ SSIM을 최대화하여 edge 기능을 일치 시키면 대부분의 경우 매우 높은 정확도를 나타냄. 또한, edge가 registration 목적으로 사용된 유일한 기능이기 때문에 이 방법은 edge를 추출 할 수 있는 유형의 이미지를 registration하는 데 사용할 수 있음.
 - ④ 트랙터 주행시 장애물에 대한 registration하여 장애물 인식 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단됨.
 - ⑤ 장애물 인식에 대한 정확도를 높여 safety system에 적용 가능할 것으로 판단됨.

⑩ 경로추종 제어 요인 시험

- 경로 추종 제어 요인 시험은 기존 연구에서 개발한 자율주행 트랙터에 신규 개발한 경로 생성 추종 모듈을 장착하고 직진 자율주행을 통한 경로 추종 오차를 측정함으로써 성능을 평가하였음.
- 요인 시험에서 활용한 위치 인식 모듈 및 자동 조향 모듈의 사양은 아래 표와 같음.

제 품 명	제 조 사	상세 사양
SPAN-CPT	Novatel	Signal Tracking : L1/L2 Horizontal Position Accuracy : - Single point L1 : 1.5 m - Single point L1/L2 : 1.2 m - DGPS : 0.4 m - RT-2 : 1 cm IMU Performance : - Gyro Technology : FOG - Gyro Bias : 20°/hr - Accelerometer Range: ±10g - Accelerometer Bias : 50mg

<위치 인식 모듈 사양>

구 분	세 부 항 목	규 격 사 항
PERFORMANCE	Main MCU	AT90CAN128 - 8 bit Microcontroller - 128K Bytes of In-System Reprogrammable Flash - Communication : UART / CAN / JTAG / ISP
	Steering Hall Sensor	- Analog Input 0V : 100° 2.5V : 0° 5V : -100°
	Interface	- CAN 2.0A / Baud rate : 500kbps - Digital-Analog Converter - RS232 / DIO
PHYSICAL AND ELECTRICAL	Power	24V / 7A
	Packing Size	직경 : 202 mm / 높이 : 73 mm 핸들 마운트 길이 : 48.5 mm
	Weight	3.45 kg

<자동 조향 모듈 사양>

㉠ 직진 자율주행 오차 확인 시험

① 시험장비 구성

- 자율주행 트랙터에 주행 궤적을 표시할 수 있는 장치인 페인트 Dropper를 부착하고 주행 시에 일정한 간격으로 페인트를 떨어뜨려서 트랙터의 주행궤적과 자율주행 지시선과의 오차를 측정 할 수 있음.



<페인트 Dropper (좌 : 컨트롤러, 우 : Dropper 노즐)>



<페인트 Dropper 설치 모습 및 주행 궤적 표시>

② 시험환경 구성

- ① 장소 : 한국생산기술연구원 첨단농기계지원센터 원형 트랙
- ② 시험 구간 : 직선구간 80m

③ 시험 준비

- ① 자율주행 시작 지점과 목표도달 지점까지 일직선이 되도록 기준선 작성
- ② 주행 예정 트랙터에 페인트 Dropper 장치 설치
- ③ 자율주행 트랙터에 자율주행 경로 정보(측정 거리 30m) 입력
- ④ 위치인식 모듈 장착 및 초기화 과정 후 정상적인 데이터 출력 확인

④ 시험 방법(시험규격 : ISO 12188에 의거)

- ① 입력받은 정보를 토대로 트랙터를 자율 주행
- ② 측정에 사용되는 직선거리는 : 30m
- ③ 주행 속도 주 작업 속도인 : 7 ± 0.7 km/h
- ④ 엔진회전수 : 2,100 rpm
- ⑤ 페인트 Drop 장치 장착위치는 GPS 수신 장치의 수직하단 지점
(장착 위치 오차는 GPS 수신 장치와의 거리로 보정)
- ⑥ 기준선과 트랙터가 실제 주행 궤적의 거리 측정하며 좌측은 음(-)의 값, 우측은 양(+)의 값으로 측정
- ⑦ 측정값의 RMS 오차 계산, 총 3회 측정한 평균값과 기준값을 비교

⑤ 시험 결과

- 본 시험 결과 기준선과 페인트 Dropper에 의한 자율주행 트랙터의 궤적과의 거리는 아래 표와 같은 값으로 측정되었으며, 1, 2, 3차 시험에 의한 기준선과 주행 궤적과의 RMS 값의 평균값은 3.4cm로 나타남.
- 아래 표는 실제 자율주행 후 페인트 Dropper에 의해서 표시된 주행 궤적임.

구분	1차 시험	2차 시험	3차 시험
1	5	4	7
2	0.5	0	3.5
3	-3	-4	-2.5
4	-3	-4	-7
5	-1.5	-2	-9.5
6	1.5	2.5	-7.5
7	3	6.5	-2.5
8	2	9	2.5
9	0	6	5
10	-2	2	5
11	-3	-3	1.5
12	-1	-4.5	-2
13	2	-1.5	-3.5
14	4.5	3	-2.5
15	3	6	0
RMS 오차	2.3	3.9	4.1
평균값	3.4		

<자율주행오차 시험 결과(단위: cm, 좌(-), 우(+))>

㉔ 작업부하에 따른 경로 추종 오차 분석을 위한 시스템 개발 및 농작업 시험

㉔ 작업부하 측정을 위한 트랙터 부하 계측 시스템 구성

㉔ 시험용 트랙터

- 본 연구에서는 개발 중인 자율주행트랙터(TS110, TYM, Korea)를 사용하였으며, 78 kW(@2,300 rpm)급 엔진이 장착되어 있음.
- 최대 토크는 430 Nm(@1,400 rpm)이며, 외경은 4,225(L) × 2,140(W) × 2,830(H) mm, 공차 중량은 3,985 kg임.
- 주변속 단수는 4단 및 Power shift(High, Low)로 구성되어 있으며, 부변속은 4단으로 총 전진 32단, 후진 32단의 변속 단수를 가짐. 아래의 그림과 표는 트랙터의 사진 및 세부 제원을 나타냄.



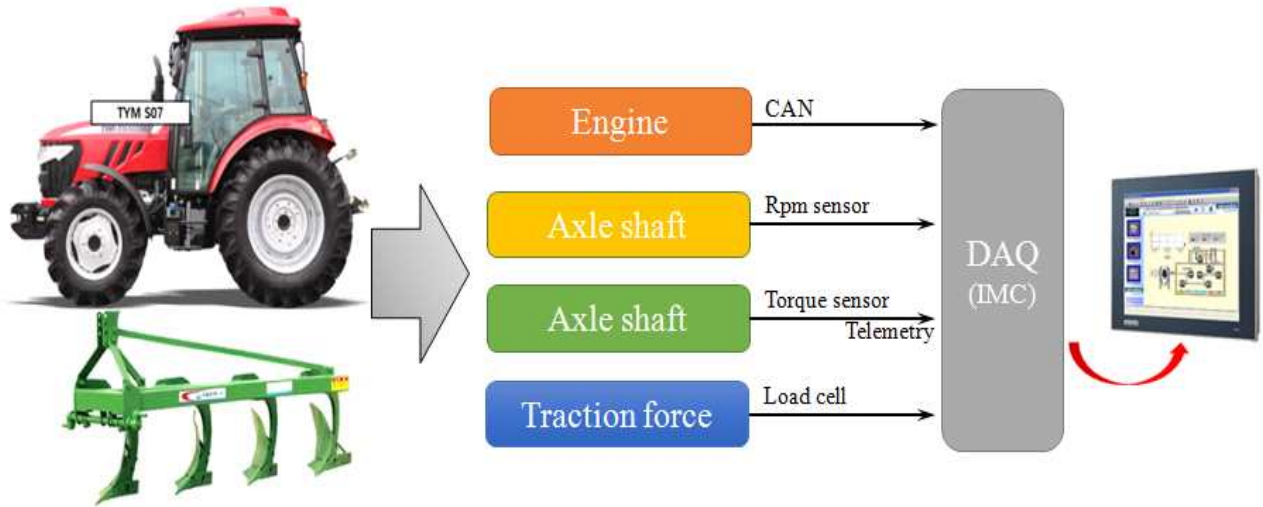
<트랙터 사진>

항 목		제 원
Length x Width x Height (mm)		4,225 x 2,140 x 2,830
Weight (kg)		3,985
Engine	Rated power(kW)	78.3 @2300
	Max. torque(Nm)	430 @1400
Transmission	main	4 stage and power shift (High, Low)
	sub	4 stage

<트랙터 제원>

㉔ 작업부하 측정 시스템

- 트랙터의 작업부하 측정 시스템은 아래의 그림과 같이 작업 시 최종구동륜 및 견인 부하 등의 측정이 가능하도록 데이터 수집 및 기록 장치(CRONOS compact CRC-400-11, IMC, Germany)를 이용하여 구성함.
- 트랙터의 작업에 따른 진동에 의해 시스템이 파손되지 않도록 별도의 장착 판넬을 제작하여 작업부하 측정 시스템을 설치·고정함. 아래의 표는 데이터 수집 및 기록 장치의 상세 제원을 나타냄.



<작업부하 측정 시스템 구성도>

항 목	제 원
Weight (kg)	10.5
Operating temperature (°C)	-40 to +85
DC power supply	10V to 32 VDC
Max. module slots	11
Max. aggregate sampling rate (kS/s)	400
Width × Height × Depth (mm)	353 × 155 × 264

<데이터 수집 및 기록 장치 제원>

㉔ 최종 구동륜 부하 센싱 시스템

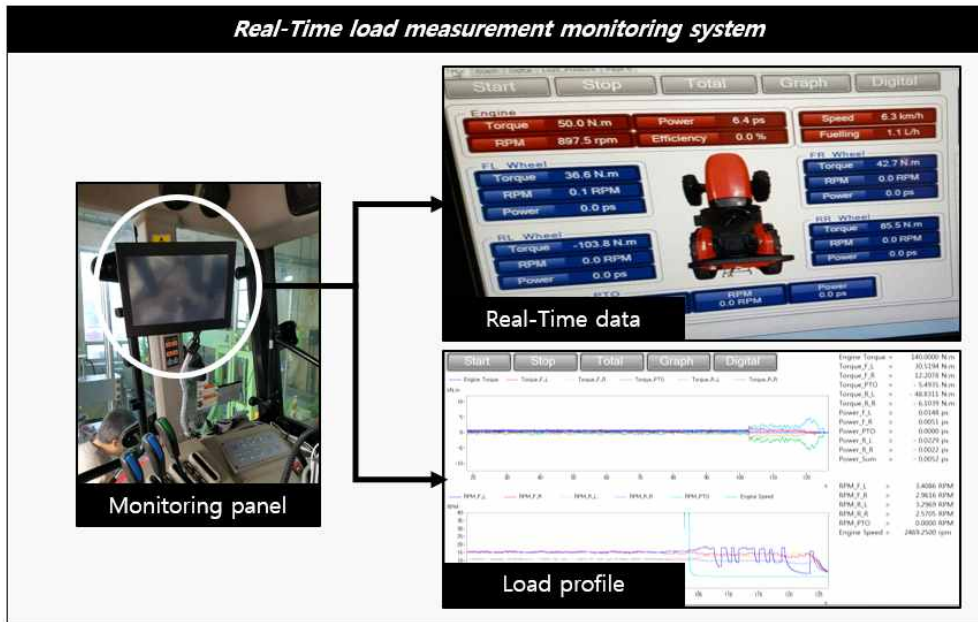
- 트랙터 최종 구동륜의 토크 및 회전속도는 전·후륜의 좌·우 총 4개의 최종 구동륜에 각각 토크 센서와 근접 센서를 설치하여 측정함.
- 최종 구동륜 토크 센서는 텔레메트리(Telemetry) 방식의 토크 센서를 사용하여 측정하였으며, 상세 제원은 아래의 표와 같음. 토크 센서 당 안테나가 한 개씩 설치되어있으며, 토크 센서는 차륜 바깥쪽에 설치하지 않고 내부에 축을 가공 후 설치하여 작업 시 외부 요인에 의한 잡음 발생 및 파손을 방지할 수 있도록 하였음.
- 트랙터 작업에 따라서 토크 센서에서 측정된 최종 구동륜 토크 데이터는 토크 센서 내의 Amplifier를 통해 증폭되어 안테나(수신부)에 전송되며, 안테나에 전송된 데이터는 케이블 선을 따라 계측기로 전송됨.
- 최종 구동륜 회전속도는 물체의 유·무를 감지하는 근접센서를 이용함. 근접센서를 이용한 회전 속도의 측정은 단위시간당 기어의 톱니수를 측정하여 회전체의 이동속도를 계산함.
- 기어의 톱니가 통과할 때마다 센서의 신호가 측정되고 단위시간동안 측정된 기어의 톱니 개수와 기어의 총 톱니수를 이용하여 회전속도를 측정함. 본 연구에서는 잇수가 100개인 기어를 설치하여 근접센서를 이용해 잇수를 측정하면서 회전속도를 계측함.
- 근접센서는 기어의 톱니수를 감지할 수 있도록 가깝게 설치하되 기어와 충돌이 발생하지 않는 위치에 설치함.

항 목	제 원
Nominal load	20 kNm
Maximum load	400%
Maximum breaking load	800%
Sensor	Strain gauge
Bridge supply voltage	3.0 V
Sample rate	4 kS/s
Bandwidth	0 to 1 kHz
Resolution	16 Bit with 16 Bit CRC
Maximum rpm	4,000 rpm
Temperature	-25 to +125°C

<최종 구동륜 부하 센싱 시스템 제원>

㊤ 실시간 부하 모니터링 시스템

- 트랙터 내부에는 아래 그림과 같이 작업 시 최종구동륜 부하, 견인력, 엔진부하 등의 데이터를 실시간으로 확인할 수 있도록 실시간 부하 모니터링 시스템을 트랙터 작업자 우측에 설치함.
- 실시간으로 데이터의 확인 및 저장이 가능함.

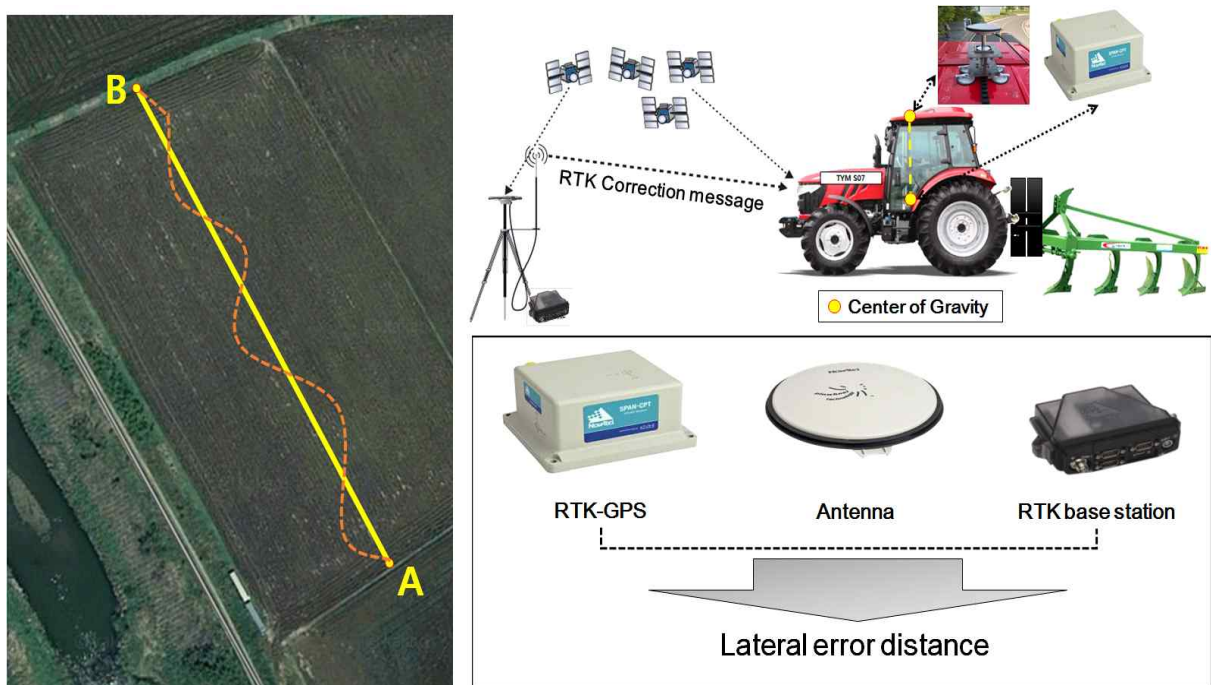


<실시간 부하 모니터링 시스템>

㉔ 작업부하에 따른 경로 추종 오차 계측 시스템 구성

㉕ 경로 추종 오차 분석을 위한 시스템

- 개발된 경로 생성 및 추종 모듈의 작업부하에 따른 경로 추종성 성능 평가를 위하여 경로추종 제어 요인 시험에서 활용한 위치 인식 모듈과 자동 조향 모듈을 사용하여 계측하였음.
- RTK-GPS는 트랙터 캐빈 내 무게중심점(center of gravity)에 설치하였으며, 수신용 안테나는 무게중심점에서 수직변위에 있는 캐빈 위 지점에 부착하였음.
- 필드 시험이 진행된 100 m 길이의 직선 작업 경로에서 시작점 (A point)과 종료점 (B point)의 좌표를 계측한 후 A-B line을 직선으로 보았을 때, 실작업 시 발생하는 트랙터 무게중심점(center of gravity)의 GPS 좌표와의 점과 직선사이의 수직 거리를 계산하여 경로 추종 오차를 계산하였음. 경로 추종 오차 계측 시스템의 세부 구성은 아래 그림과 같음.



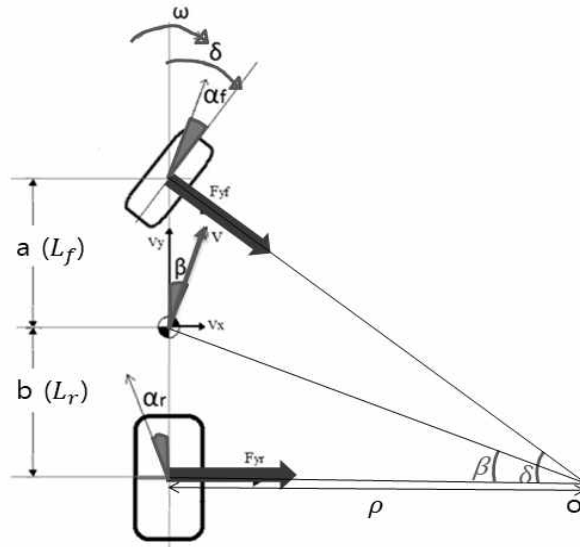
<경로 추종 오차 측정 시스템 개략도>

㉕ 작업부하에 따른 경로 추종 시스템의 정확도 분석을 위한 농작업 시험

㉖ 자율주행 트랙터 경로 추종 성능 평가 기술

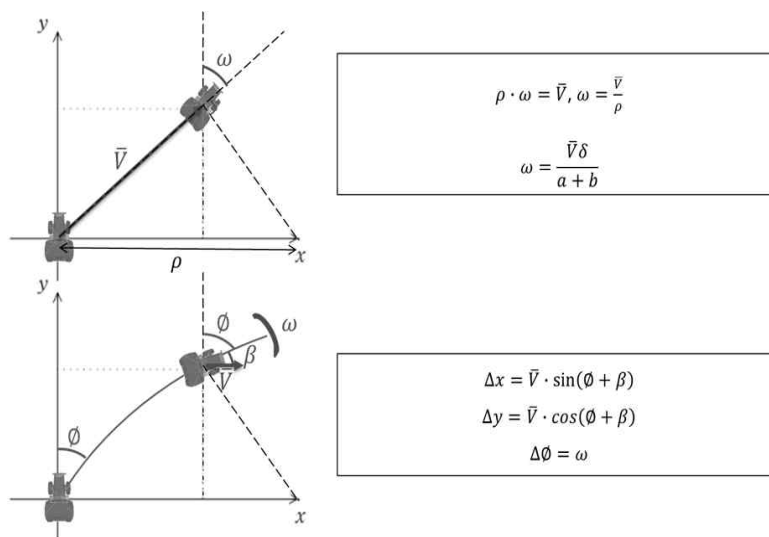
㉗ 2 자유도 bicycle 모델 (2 DOF bicycle model of vehicle)

- 일반적으로 횡가속도가 4 m/s^2 이하인 경우 2 자유도 bicycle 모델을 사용하여, 차량의 횡방향 운동 관련 연구를 진행하는데, 농업기계 또한 횡가속도가 매우 낮으므로, 2 자유도 bicycle 모델을 사용하여 횡방향 운동 해석을 진행함.



<2 DOF bicycle model>

- 정형적 환경에서의 입력 요소로는 조향각, 차량 속도로 정의되며, 출력 요소로는 yaw rate ω (deg/sec)와 vehicle sideslip angle β (deg)로 정의됨.
- 일반적으로 경로 추종 오차를 발생시키는 yaw rate ω 에 영향을 미치는 대표요소인 차량 속도에 따라 경로 추종 오차가 발생하지만, 대표 농업기계인 트랙터는 일반 차량과 다르게 작업기-토양 간 상호작용에 따른 고부하가 발생하는 대표적인 비정형 환경에서 수행되는 작업으로 단순 경로 추종 오차의 평균값을 측정하는 경로 추종 성능 평가 보다 농작업 조건에 따른 복합적인 검증이 필요할 것으로 판단됨.
- 본 연구에서는 실제 논 토양 조건에서의 작업기 종류에 따른 필드시험을 실시하여, 농작업 중 데이터 계측 및 분석을 통해 작업부하와 작업속도, 슬립과의 상관관계를 분석하고, 최종적으로 부하 및 작업속도가 경로 추종 오차에 미치는 영향을 분석하는 것을 목표로 함.



<bicycle model의 입출력 요소>

㉠ 자율주행 트랙터 경로 추종 성능 평가를 위한 농작업 시험

① 농작업 시험 포장지

- 필드시험은 충청남도 당진시 송산면 금계리에 위치한 논 토양에서 수행하였으며 ($36^{\circ} 55'48''N, 126^{\circ} 37'59''E$), 포장지는 대한민국 표준 구획 크기인 $100m \times 40m$ 크기의

필지를 선정함.

- 시험 포장지의 토양 물성치 분석은 원추 관입지수(cone index), 수분 함량(moisture content), 토양 거칠기(soil texture)를 대상으로 실시함. 원추 관입지수와 수분 함량은 포장지 별 임의의 30개 지점에서 측정을 하였으며, 토양 거칠기는 포장 시험지 복수의 지점에서의 토양 채취(soil sampling)을 통하여 미농무성(USDA)법에 따라 분석을 진행함.
- 원추 관입지수는 cone penetrometer (SC900, Spectrum Technology, USA)를 이용하여 0~30 cm 범위에서 2.5 cm 간격으로 측정하였으며, 수분 함량은 soil moisture meter (TDR300, Spectrum Technology, USA)를 이용하여 측정함.
- 필드 시험지의 토양 샘플을 채취하여 기계적 분석으로 모래(34%), 미사(48%), 점토(18%) 함량 산출을 통해 시험 포장지의 토양 거칠기를 분석한 결과 모두 양질토(loam)인 것으로 나타남.



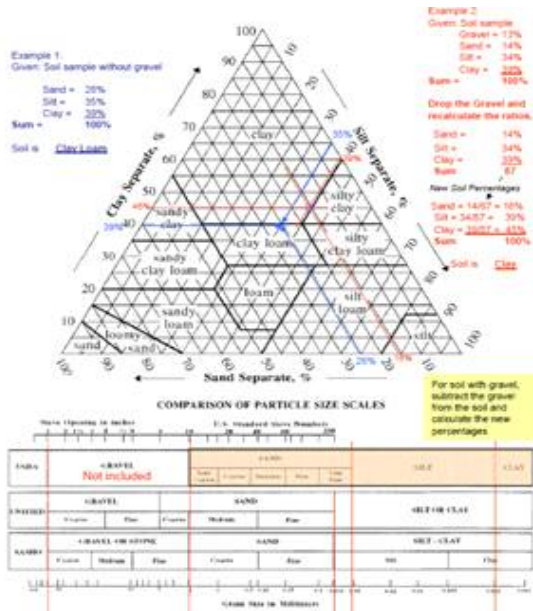
원추 관입 지수

토양 수분함량

토양 샘플링

토양 거칠기

<토양 물성치 분석 시험 순서>

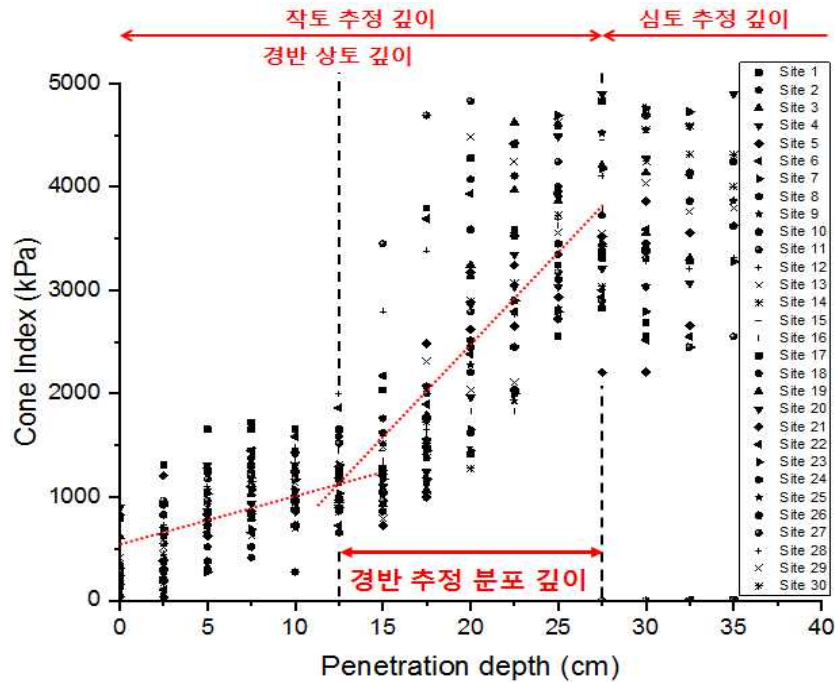


분석 항목	단위	시료명	
		당진 송산면	당신리 674-9
Sand	%	34.0	
Silt		48.0	
Clay		18.0	
Soil texture	-	Loam	

<토양 거칠기(soil texture) 분석 결과>

- 30개 지점에서 측정한 원추 관입 지수 결과는 아래 그림과 같이 평균적으로 관입 깊이가 12-13 cm 전·후로 cone index 지수가 급격히 증가하는 기울기를 나타내고, 27-28 cm 부근에서 1차 피크를 보이는 것으로 볼 때, 본 필드 시험지의 작토층(plow layer) 중 경반(hardpan) 추정 분포 깊이는 약 13-27 cm로 알 수 있음.

- 원추 관입 지수 측정 결과를 토대로 농작업 시험 시 작업기의 경심 깊이를 13 cm 부터 작업기 허용 최대 경심인 20 cm 사이로 설정함.
- 수분 함량은 34.0~38.2% 수준으로 토양 수분 함량 분포는 전반적으로 유사한 것으로 나타남.



<원추 관입 시험 분석 결과>

② 농작업 시험

- 동일 규격 및 토질 조건을 가진 포장지를 대상으로 고부하 작업인 쟁기작업을 선정 하였으며, 직진 작업을 수행하며 작업부하에 따른 경로 추종 오차를 계측함.
- 쟁기는 이랑쟁기(WJSP-8, 웅진기계)와 치즐쟁기(DWP-900, 대원정공) 2 종류의 쟁기를 사용하였음. 세부 제원은 아래 표와 같음.
- 트랙터 경운 작업은 동양물산기업(주)의 성능시험 업무를 맡고 있는 숙련된 작업자가 수행하였으며, 농작업 속도는 부착 작업기 별 사용 속도 범위에 부합하는 작업단수를 선정하여 진행하였음.
- 이랑쟁기 작업기의 경우 적정 사용 속도범위인 5-8 km/h에 준하는 M2-High, M3-Low, M3-High의 세 기어단수에서 시험을 진행하였고, 치즐쟁기 작업기의 경우 사용 속도범위인 7-9 km/h에 준하는 M3-Low, M3-High, M4-Low 세 기어단수에서 시험을 진행하였음.
- 각 시험 조건에서 작업부하와 경로 추종 오차를 동시 연속 계측 후 데이터 분석을 위해 부하에 큰 영향을 미치는 슬립율 범위에 따라 계측 데이터 분류 작업을 실시하였음.
- 트랙터 구동은 실제 작업자가 많이 사용하고 견인력이 높은 4륜 구동 모드로 실시하였고, 작업 경심은 원추 관입 지수 측정 결과를 토대로 경반 상토 추정 깊이 보다 깊으면서 작업기 허용 최대 경심 깊이는 13-20 cm의 범위를 유지하도록 3점 히치를 실시간 제어하도록 하였음.
- 경운 작업 중 작업부하가 미치는 영향을 분석하기 위해 기본 엔진 최대 회전수 (full-throttle) 조건에서 시험을 진행하였음.

항 목	제 원
L x W x H (mm)	2800 x 2150 x 1250
Weight (kg)	790
Working depth (mm)	up to 200
Working speed (km/h)	5-8
Required power (HP)	90-120

<이랑쟁기 제원>

항 목	제 원
L x W x H (mm)	2800 x 1500 x 1500
Weight (kg)	700
Working depth (mm)	up to 300
Working speed (km/h)	7-9
Required power (HP)	over 65

<치즐쟁기 제원>



<사용 부착 쟁기 작업기 사진>



<경운 작업 사진>

㉔ 농작업 부하가 자율주행 트랙터의 경로 추종성에 미치는 영향 분석

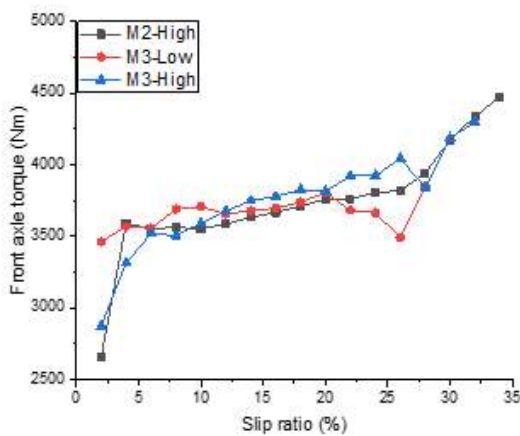
① 경운작업 - 이랑쟁기(moldboard plow)

㉑ 최종 구동륜 부하 분석

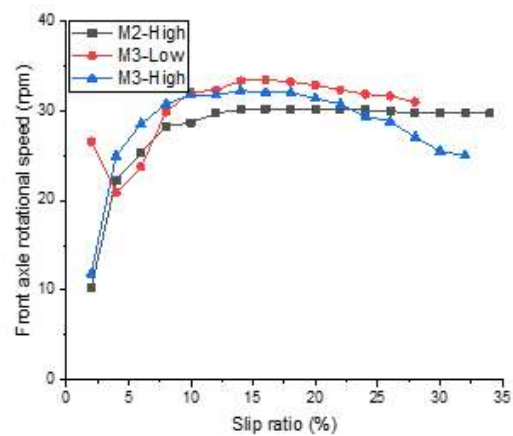
- 이랑쟁기 작업에서 최종 구동륜 부하 분석 결과 전체 평균 최종 구동륜 토크는 기어

단수가 높을수록, 슬립이 증가할수록 토크가 높아지는 경향은 엔진과 유사했으나, 최종 구동륜 토크는 오히려 M3-Low 단수에서 M3-High보다 큰 값을 보였음.

- M3-High에서의 높은 슬립이 발생하는 깊은 경심 구간에서 작업속도가 오히려 낮아지면서 M3-Low 상대적으로 적은 부하를 발생시킨 것에 영향을 받은 것으로 판단됨.
- 전륜 최종 구동륜부하는 기어단수가 커질수록 평균 토크가 증가하는 것을 확인하였으며, 견인력 및 슬립에 가장 큰 영향을 받는 후륜 최종 구동륜 토크는 15% 내외의 평균 슬립을 구간에서 M3-Low가 전반적으로 가장 큰 값을 보였음.
- 최종 구동륜 회전속도는 엔진 속도 감소에 영향을 받아 유사한 경향을 나타냈으며, 기어 단수 및 슬립율에 따른 최종 구동륜 부하의 세부 결과는 아래 그림과 같음.

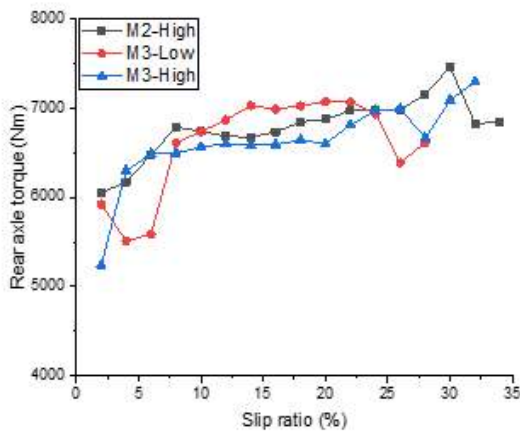


(a)

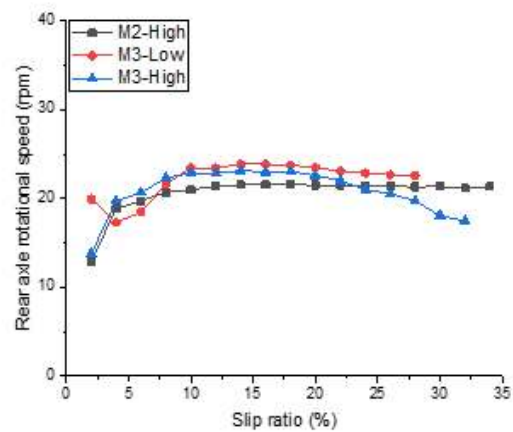


(b)

<이랑쟁기 작업 중 전륜 최종 구동륜 부하; (a)전륜 최종 구동륜 토크, (b)전륜 최종 구동륜 회전수>



(a)

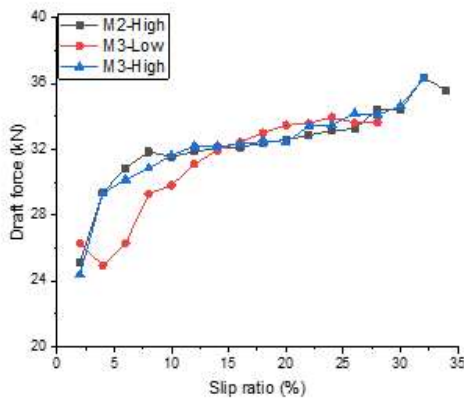


(b)

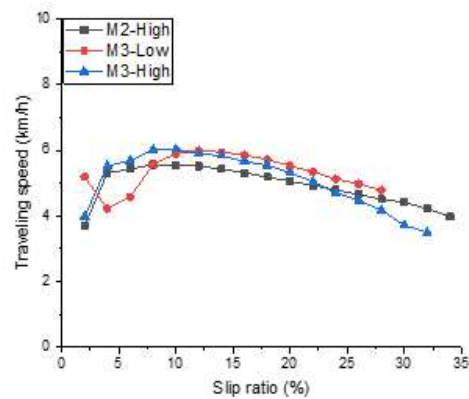
<이랑쟁기 작업 중 후륜 최종 구동륜 부하; (a)후륜 최종 구동륜 토크, (b)후륜 최종 구동륜 회전수>

㉞ 견인력 및 작업속도 분석

- 이랑쟁기 작업 중 전체 평균 견인력 분석 결과 기어단수에 상관없이 32.27~32.34 kN의 유사한 견인력이 발생하였음.
- M2-High와 M3-High 단수에서는 30% 이상의 일부 높은 슬립 구간에서는 평균 36 kN 이상의 견인력이 발생함.
- 작업속도는 0~13%의 슬립 구간에서는 기어 단수가 높을수록 빠른 경향을 보였으나, 작업 전체 평균 슬립율인 약 13~18%의 슬립 구간에서는 오히려 M3-Low의 작업속도가 M3-High보다 더 빠른 경향을 보였음.
- 따라서, 트랙터가 극복할 수 있는 부하 및 슬립 범위 내에서 이랑쟁기 작업이 수행된다면 작업속도가 가장 빠른 M3-Low가 적절한 작업 단수로 고려되어야 할 것으로 판단됨.
- 이랑쟁기 작업 중 슬립율에 따른 견인력 및 작업속도 관련 세부 결과는 아래 그림과 같음.



(a)



(b)

<이랑쟁기 작업 중 견인력 및 작업속도; (a)견인력, (b)작업속도>

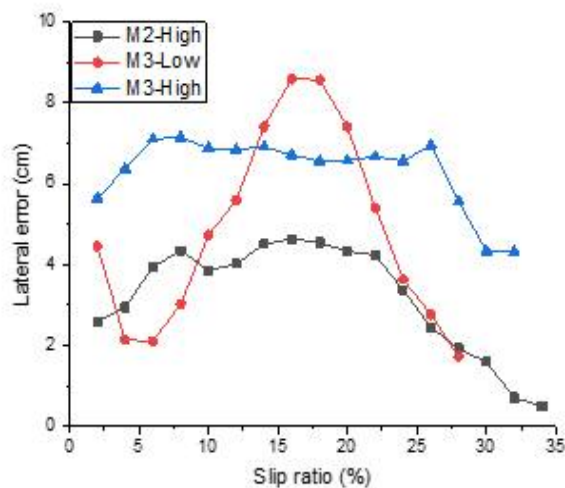
㉟ 종합 결과 분석: 이랑쟁기작업

- 이랑쟁기 작업에서 부하분석 결과 전륜토크는 기어단수가 증가할수록 큰 값을 보였지만, 오히려 후륜토크와 견인력은 M3-Low 단수에서 가장 높은 값을 보였으며 작업속도 또한 가장 빠른 경향을 보였음.
- 이랑쟁기 권고 속도범위에 해당하는 세 작업단수 중 M3-Low가 가장 큰 부하를 극복하면서도 가장 높은 작업 속도를 보여 이랑쟁기 작업에 가장 적합한 기어단수인 것으로 판단됨.
- 작업 시 발생한 경로 추종 오차는 M3-Low의 경우 전체 구간 평균 7.59 cm으로, M2-High의 4.19 cm와 M3-High의 6.63 cm 보다 2~3 cm 더 큰 경로 추종 오차를 보였음.
- 아래 그림의 이랑쟁기 작업 중 기어 단수 및 슬립율에 따른 경로 추종 오차 결과를 보면, 실제 이랑쟁기 작업 시 발생하는 평균 15%의 슬립율 구간에서는 M2-High에서 약 4 cm, M3-High에서는 약 7 cm를 보였고 M3-Low에서는 약 9 cm 이상의 오차를 보였는데, 이는 농작업 시 작업부하와 슬립율이 고려된 실제 평균 작업속도의 차이에 영향을 받은 것으로 판단됨.

- 따라서, 본 연구에서 활용된 자율주행 시스템의 경로 추종 오차는 최대 9~10 cm 수준으로 나타남에 따라 개발한 경로 추종 시스템의 성능이 검증되었음.
- 기어 단수 및 슬립율에 따른 종합 결과분석 표는 아래와 같음.

기어단수	전륜토크 (Nm)	후륜토크 (Nm)	견인력 (kN)	작업속도 (km/h)	경로추종 오차 (cm)
M2-High	3,690.8	6,804.6	32.3	5.22	4.19
M3-Low	3,717.3	6,998.0	32.6	5.71	7.59
M3-High	3,762.7	6,608.9	32.3	5.42	6.63

<종합 전체 시험구간 평균 결과분석 - 이랑쟁기>

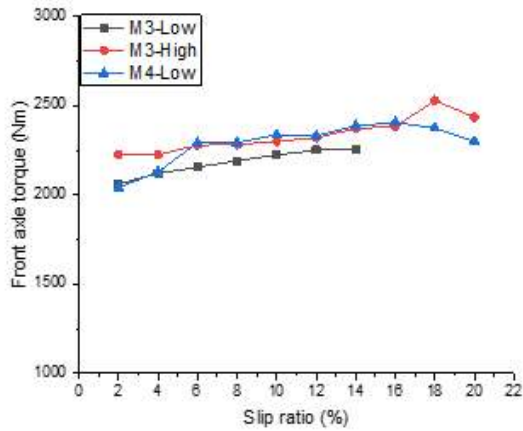


<이랑쟁기 작업 중 경로 추종 오차 결과>

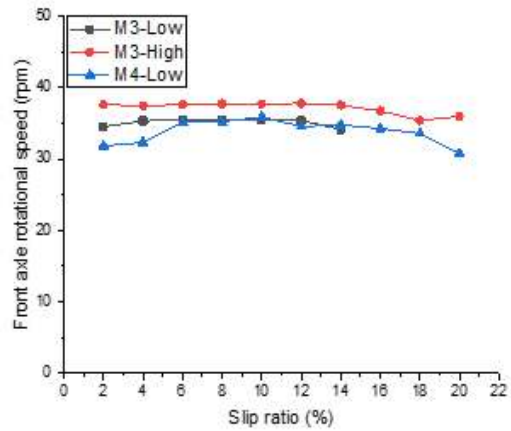
② 경운작업 - 치즐쟁기(chisel plow)

① 최종 구동륜 부하 분석

- 치즐쟁기 작업 중 최종 구동륜 부하 분석 결과 기어단수가 높을수록, 슬립이 증가할수록 토크가 높아지는 경향을 보였음.
- 전체 평균 전륜최종 구동륜 토크는 2,153~2,326 Nm로 이랑쟁기 보다 평균 약 1,500 Nm 낮은 값을 보였으며, 오히려 후륜최종 구동륜 부하는 작은 부하가 발생한 M3-Low를 제외하고는 7,291 Nm로 이랑쟁기의 6,803 Nm 보다 큰 값을 보였음. 이는, 작업기 관입 면적은 이랑쟁기가 크지만 치즐쟁기 작업 시 평균 기어단수가 더 높은 것에 영향을 받은 것으로 판단됨.
- 이랑쟁기 작업 시 최고 작업단수인 M3-High에서 큰 슬립이 발생하여 오히려 M3-Low에서 가장 큰 최종 구동륜부하가 발생했지만, 치즐쟁기 작업 시에는 전반적으로 낮은 슬립율을 보여 기어단수에 따른 속도차이가 최종 구동륜부하에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단됨.
- 치즐쟁기 작업 중 기어 단수 및 슬립율에 따른 최종 구동륜 부하의 세부 결과는 다음 그림과 같음.

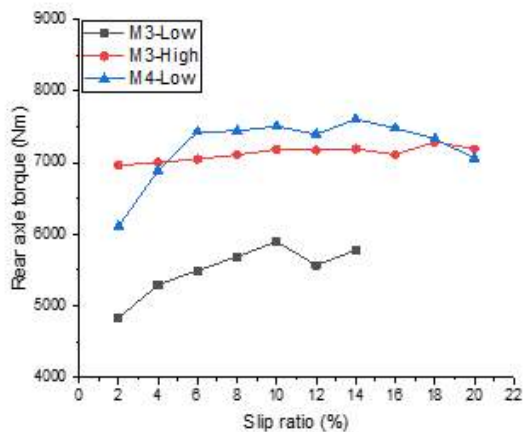


(a)

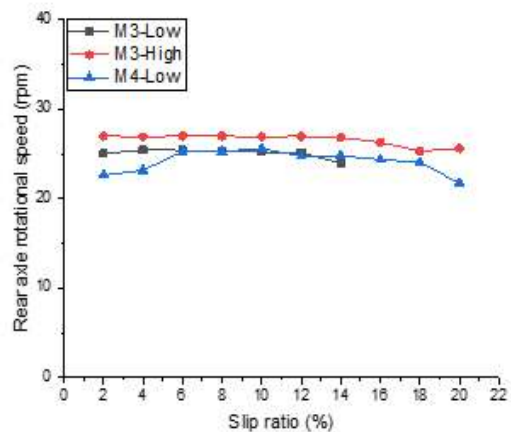


(b)

<치즐쟁기 작업 중 전륜최종 구동륜 부하; (a)전륜최종 구동륜 토크, (b)전륜최종 구동륜 회전수>



(a)

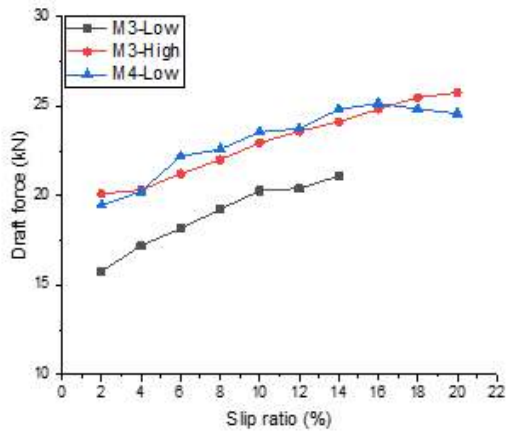


(b)

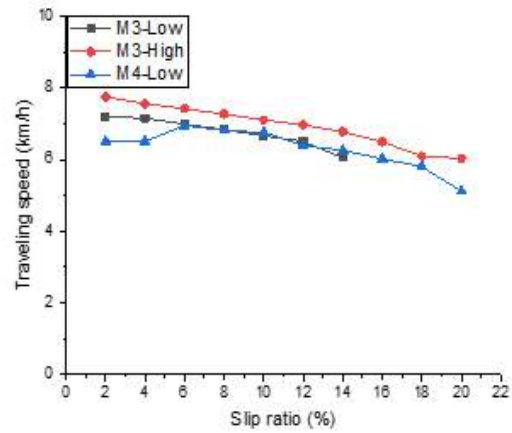
<치즐쟁기 작업 중 후륜최종 구동륜 부하; (a)후륜최종 구동륜 토크, (b)후륜최종 구동륜 회전수>

② 견인력 및 작업속도 분석

- 치즐쟁기 작업 중 전체 평균 견인력 분석 결과 M3-Low에서는 평균 18.7 kN으로 가장 낮은 견인력을 보였고, M3-High와 M4-Low에서는 23.02, 23.53 kN의 평균 견인력을 보여 이랑쟁기 작업 시 견인력에 비해 약 10 kN 낮은 값을 보였음.
- 작업속도는 M3-Low에서 6.73 km/h, M3-High에서 7.04 km/h, M4-Low에서 6.49 km/h를 보였음.
- 이랑쟁기 작업에도 사용된 M3-Low와 M3-High에서는 각각 17.8%, 29.8%의 작업 속도 증가하였음. 치즐쟁기 작업 해당 단수에서는 평균 작업속도가 가장 빠른 M3-High가 적절한 작업 단수로 고려되어야 할 것으로 판단됨.
- 치즐쟁기 작업 중 기어단수 및 슬립율에 따른 견인력, 작업속도 관련 세부 결과는 다음 그림과 같음.



(a)



(b)

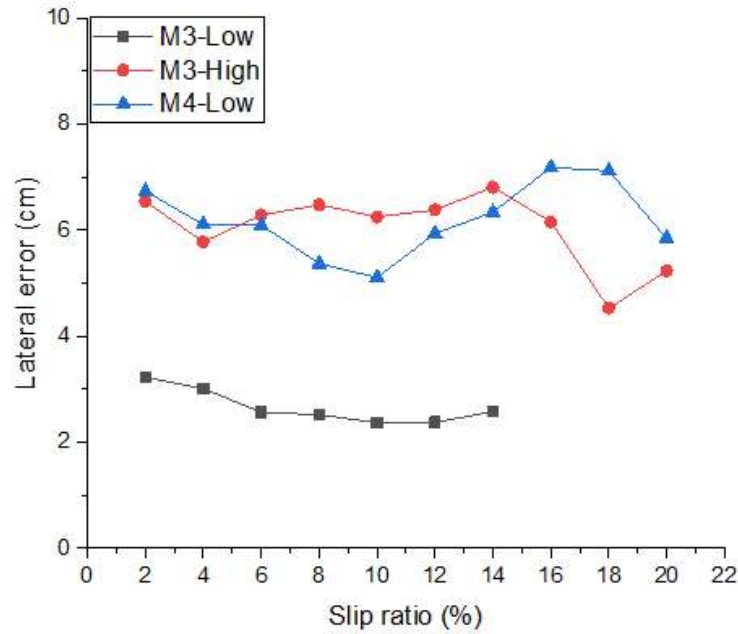
<치즐쟁기 작업 중 견인력 및 작업속도; (a)견인력, (b)작업속도>

㉔ 종합 결과 분석: 치즐쟁기작업

- 부하분석 결과 치즐쟁기 작업 시 최종 구동륜부하, 견인력 등 모든 부하관련 값들이 기어단수가 증가할수록 큰 값을 보였지만, 비슷한 수준의 평균 부하를 보인 M3-High와 M4-Low 중에서는 M3-High의 작업속도가 가장 빨랐음.
- 따라서, 치즐쟁기 권고 속도범위에 해당하는 세 작업단수 중 M3-High가 발생부하 대비 가장 높은 작업 속도를 보여 치즐쟁기 작업에 가장 적합한 기어단수인 것으로 판단됨. 이때 발생한 경로 추종 오차는 M3-High의 경우 전체 구간 평균 6.29 cm 로, M3-Low의 2.59 cm와 M4-Low의 5.91 cm 보다 최대 3.7 cm 더 큰 경로 추종 오차를 보였음.
- M3-Low에서의 2.59 cm의 오차는 작업기-토양 간 무부하에 가까운 낮은 부하 발생으로 인해 자율 주행 시스템의 최고 정밀 수준의 낮은 경로 추종 오차를 보인 것으로 판단됨. 자세히는, 다음 기어 단수 및 슬립율에 따른 경로 추종 오차 분석 그림을 보면, 실제 치즐쟁기 작업 시 발생하는 평균 10%의 슬립율 구간에서는 M3-Low에서 약 2 cm, M4-Low에서는 약 5 cm를 보였고 M3-High에서는 약 6.5 cm 이상의 오차를 보였음.
- 따라서, 치즐쟁기 작업 시 본 연구에서 활용된 자율 주행 시스템의 경로 추종 오차 수준은 약 6~7 cm의 성능을 보인 것으로 알 수 있음. 기어 단수 및 슬립율에 따른 종합 결과분석 표는 다음과 같음.

기어단수	전륜토크 (Nm)	후륜토크 (Nm)	견인력 (kN)	작업속도 (km/h)	경로추종 오차 (cm)
M3-Low	2,153.4	5,539.4	18.7	6.73	2.59
M3-High	2,317.8	7,164.6	23.0	7.04	6.29
M4-Low	2,326.6	7,418.2	23.5	6.49	5.91

<종합 전체 시험구간 평균 결과분석 - 치즐쟁기>

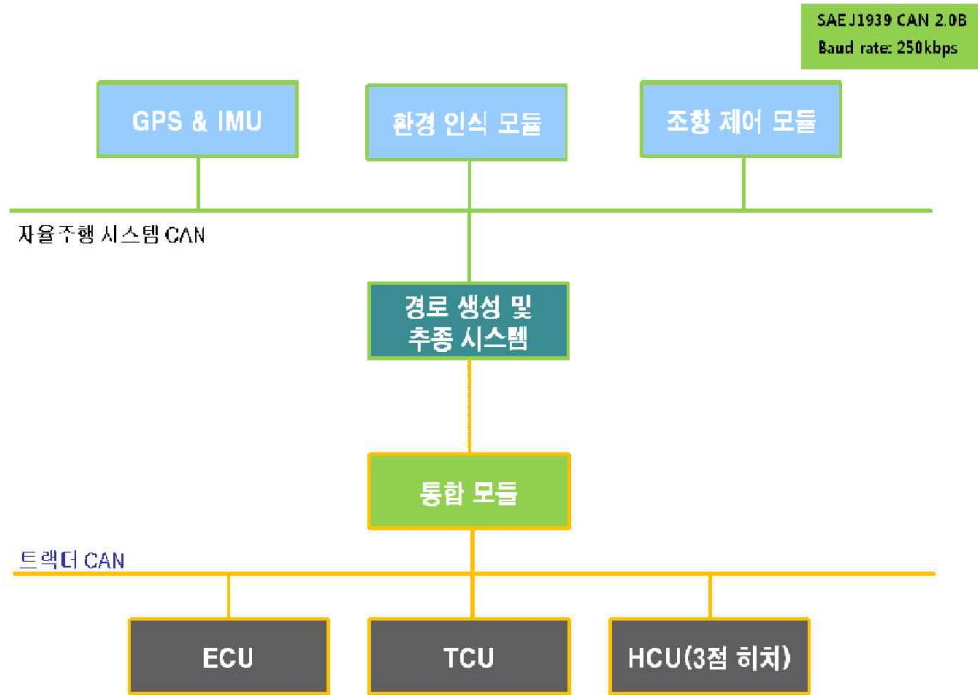


<치즐쟁기 작업 중 경로 추종 오차 결과>

㉔ CAN 기반 제어 인터페이스 설계 및 CAN Protocol 개발

㉔ 차량의 주행제어, 위치 정보를 포함한 자율주행제어 관련 Protocol 정의

- 자율주행 기능을 탑재하기 위한 트랙터에는 기존의 트랙터를 제어하기 위한 제어기 (ECU, TCU)외에 추가로 자율주행을 위한 각 모듈의 제어기가 필요함.
- 각각의 제어기는 CAN 통신 기술을 이용하여 정보를 공유하고 각각의 제어를 수행하도록 설계되었음. 따라서 기존에 트랙터에 탑재되어 있는 프로토콜 정보 외에 추가로 트랙터의 자율주행기능 구현을 위한 프로토콜 정보를 개발하여 탑재함.
- 자율주행 트랙터의 자율주행 모듈 간 통신(위치 인식 모듈, 자동 조향 모듈, 환경인식 모듈)은 경로 생성 및 추종 모듈에서 담당하여 통합 컨트롤러와 정보를 공유하며, 트랙터 제어에 관한 통신은 통합 컨트롤러에서 담당함.
- 경로 생성 및 추종 모듈은 자율주행 모듈 간의 통신과 통합 컨트롤러와 통신이 실시간으로 이루어진다는 점을 고려하여 통합 컨트롤러의 신호 처리 부하를 줄이기 위해 CAN을 2채널로 구성함.
- 아래 그림은 자율주행 트랙터 CAN의 개요와 추가 개발된 CAN 프로토콜 정보의 일부를 나타낸 것임.



<자율 주행 트랙터 CAN 개요>

CAN Messages

1. Direction : 경로생성 및 추종시스템 -> 통합모듈
2. Identifier : 0x19FFA060
3. Data

4. Repetition : 100ms

CAN 2.0B
Baud rate: 250kbps

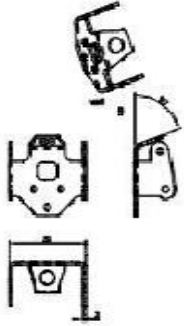
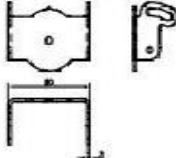
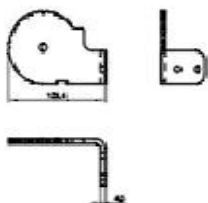
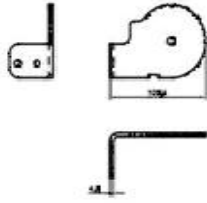
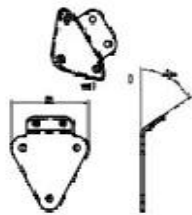
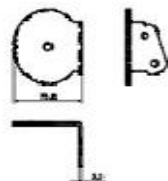
Byte	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Byte 0			자율주행 모드 : 1 수동 모드 : 0	3점 히치 하강 On : 1 Off : 0	3점 히치 상승 On : 1 Off : 0	전후진 중립 On : 1 Off : 0	후진 On : 1 Off : 0	전진 On : 1 Off : 0
Byte 1(LSB)	목표 엔진 rpm Resolution : 0.125 rpm/bit Range : 0~8,031.875 Offset : 0 Byte order : Intel							
Byte 2(MSB)								
Byte 3	Unused so far, but reserved for further use							
Byte 4								
Byte 5								
Byte 6								
Byte 7								

<자율 주행 트랙터 CAN Protocol>

㉔ 자율주행 트랙터 시제품 개발

㉔ 자율주행 트랙터 시제품 조립용 부품 제작

- 자율주행 트랙터의 각 모듈 조립을 위해서는 모듈을 고정할 브라켓류 가공이 필요함.
- 가공 부품의 일부 도면은 아래와 같으며, 주로 환경인식 센서를 부착하기 위한 브라켓을 나타냄. 또한, 각 모듈의 조립을 완료한 후 통신을 위한 배선은 현재 제작중임.

2-1 수량 : 2개	2-2 수량 : 2개
	
3-1 수량 : 1개	3-2 수량 : 1개
	<p>3-1과 대칭형상(번딩 주의)</p> 
4-1 수량 : 2개	4-2 수량 : 1개
	

<자율 주행 트랙터 센서류 가공품 일부 도면>

㉔ 자율주행 트랙터 조립

- 자율주행 트랙터의 각 모듈은 아래 그림과 같이 조립을 진행함.
- 위치 인식 모듈은 외부로부터 위치 정보를 수신해야 하므로 수신 감도를 고려하여 트랙터의 지붕 중심에 조립함.
- 경로 생성 및 추종 모니터는 사용자의 시인성을 고려하여 트랙터 우측 도어에 부착함.
- 환경인식 모듈의 경우 모듈의 크기를 고려하여 운전석 좌석 뒤쪽 고정 프레임을 이용하여 조립함.
- 경로 생성 및 추종 모듈은 좌측 휠더 커버 안쪽을 가공하여 조립하였으며, 각 모듈의 조립 상태는 아래 그림과 같음.
- 현재 환경인식 센서를 제외한 모든 모듈 및 컨트롤러는 조립된 상태이며, 11월 중 자율주행 트랙터 시제품이 완성될 예정임.

- 자율주행 트랙터 시제품이 완성된 후 12월 경 공인 인증기관을 통하여 정량적 목표 항목인 경로 생성 시간 및 경로 추종 오차 시험을 진행할 예정입니다.



<자율 주행 트랙터 조립 상태>

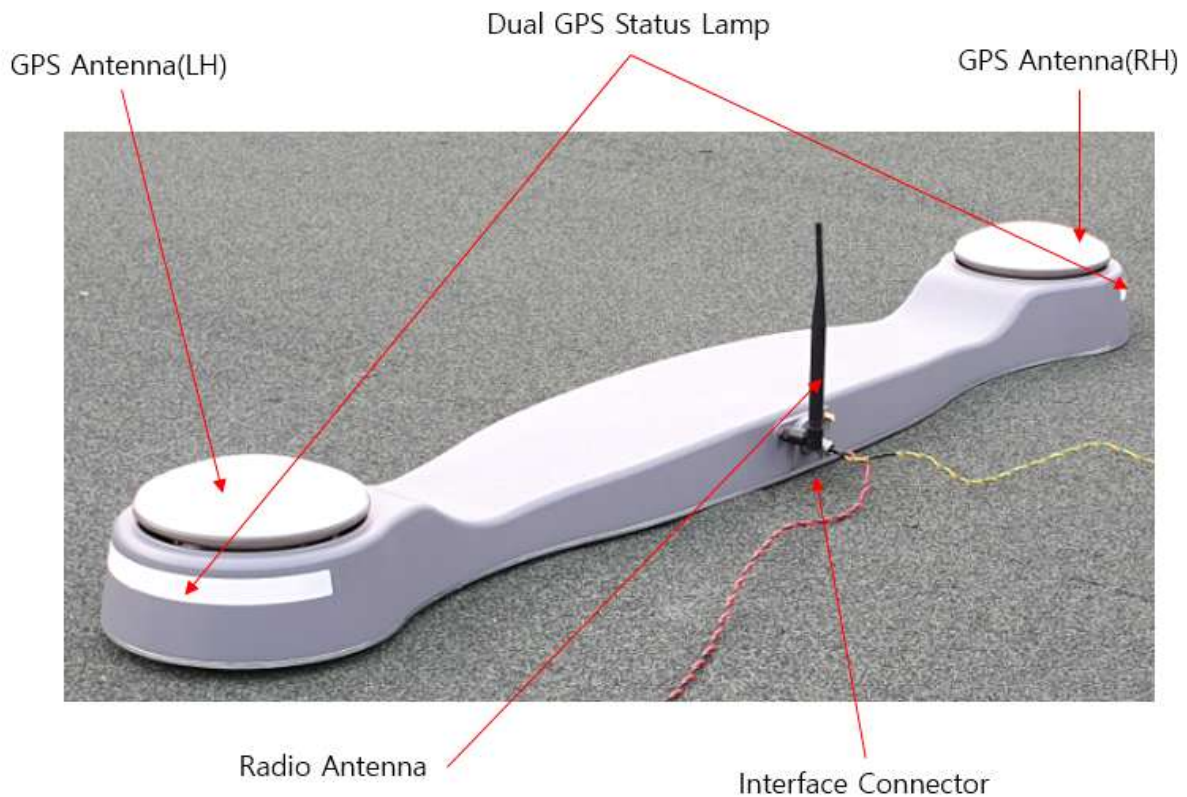
다. 협동연구기관 2 (국제종합기계(주))

㉔ 위치-자세 인식모듈 시스템 개발

㉔ 위치-자세 인식모듈 제작

자율주행 트랙터에 탑재될 위치-자세 인식모듈의 제어부 H/W 및 외형을 4대분 제작하여 국제종합기계, 대동공업과 동양물산에 자율주행 트랙터 제작용으로 제공 완료하였으며, 1대는 성능시험용으로 사용.

다음의 그림은 제작된 위치-자세 인식모듈의 외형사진을 나타냄.




제작된 위치-자세 인식모듈의 외형사진

제작된 위치-자세 인식모듈은 좌우 두 개의 GPS 안테나와 RTK, VRS 등의 위치 보정 신호 수신을 위한 라디오 안테나, 트랙터 탑재 통신을 위한 커넥터, Dual GPS 모듈의 작동상태를 외부에 표시하기 위한 상태표시 램프 등으로 구성되어 있음. 좌우 GPS 안테나의 거리는 1m이며, 두 개의 안테나를 이용하여 현재 트랙터의 위치 뿐 아니라 실제 진행방향의 각도 값을 구할 수 있는 구조를 가짐. 사용된 GPS 안테나는 TERSUS AX3702 제품을 사용하였음. 다음의 표는 사용된 안테나의 성능사양을 나타냄. 제작된 Dual GPS 모듈은 트랙터에서 제공되는 전원을 이용하여 작동하도록 구성되어 있으며, 실시간 얻어진 트랙터 위치-자세 관련 데이터를 CAN 통신을 통하여 전달한다. 제작된 Dual GPS 모듈을 트랙터에 탑재하기 위한 커넥터의 사양은 아래와 같음.

GPS Antena Specification

ITEM	Specification
Frequencies	GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, BeiDou B1/B2/B3
Impedance	50 Ω
Axial Ratio	≤3.0 dB
Azimuth Coverage	360°
Peak Gain	5.5 dBi
Phase Center Offsets	±2 mm
Operating Temperature	-45 ~ 85 °C
Storage Temperature	-45 ~ 85 °C
LNA Gain	40±2 dB
Noise Figure	≤2.0 dB
Operating Voltage	3.3 ~ 12 VDC

커넥터 사양

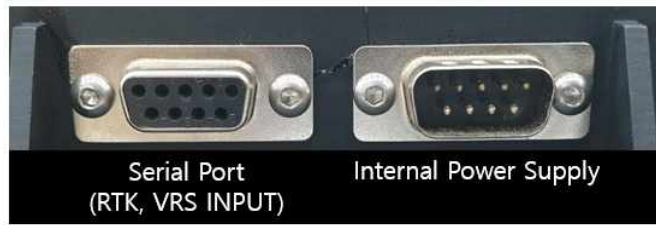
	Model		SCK-16-8(P)
	PIN사양	1	+ 12V
		5	CAN High
		6	CAN Low
8		GND	

제작된 Dual GPS 모듈의 내부는 GPS 및 IMU 데이터를 이용하여 자율주행 트랙터의 위치와 자세를 산출하는 제어기와 위치보정 정보를 수신하는 수신기가 설치되어 있음. 아래 사진은 제작된 Dual GPS 모듈의 내부모습을 나타냄.



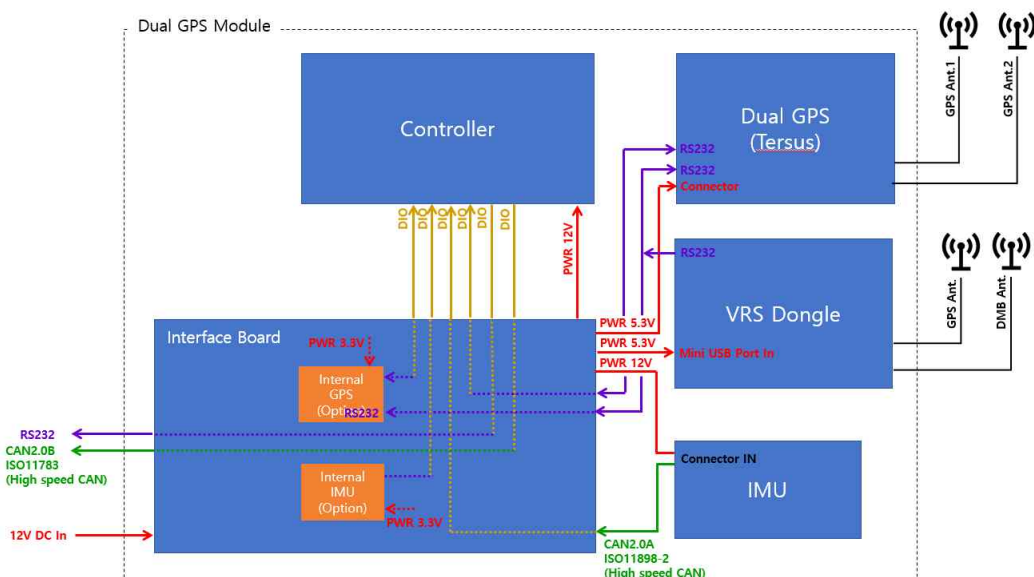
Dual GPS module Controller

Dual GPS 제어기는 두 개의 안테나 수신부와 위치보정 정보 수신을 위한 직렬통신단자(RS-232), 내부 전원 공급을 위한 전원단자로 구성됨. 직렬통신단자에는 RS-232 통신을 통하여 RTCM 3.2 규격의 보정신호를 입력할 수 있음. 그림은 Dual GPS 모듈 내부에 설치된 전원 및 통신단자 모습임.



Dual GPS 모듈의 전원, 통신단자

2차년도 개발품에서는 기본 사양으로 사용 편의성을 위하여 DMB 신호를 이용하여 VRS 보정신호 수신이 가능한 수신기를 적용하였으며, 필요에 따라 장착된 수신기 이외의 RTK 등의 수신기 사용이 가능함. 내부에 설치된 안테나는 VRS 보정신호 선택을 위하여 현 위치와 가장 근접한 위치의 기준국 선정을 위하여 사용되는 안테나임. 모듈에 사용된 제어기의 개략적인 Layout 구성 및 제원은 다음의 그림 및 표와 같다.



Dual GPS Module controller Layout

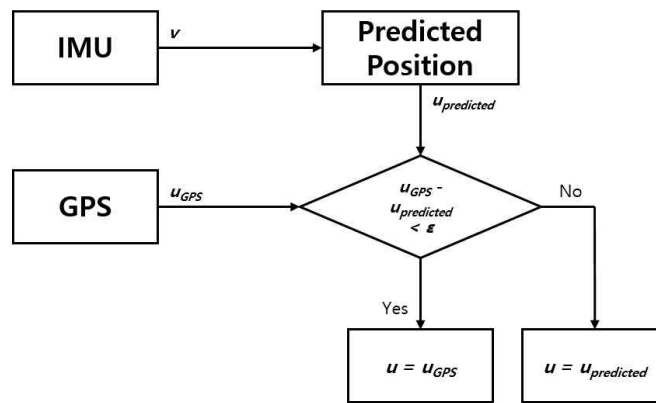
Dual GPS Controller Specification

ITEM	Specification
Processor	Xilinx Z-7010
Processor speed	667 MHz
FPGA type	Xilinx Z-7010
USB port	2.0 Hi-Speed
Analogue Input sampling rate	500 kS/s
Analogue Output Update rate	345 kS/s
Digital I/O	16 + 8 DIO lines
Supply Power	6~16 VDC

㉠ 운용알고리즘

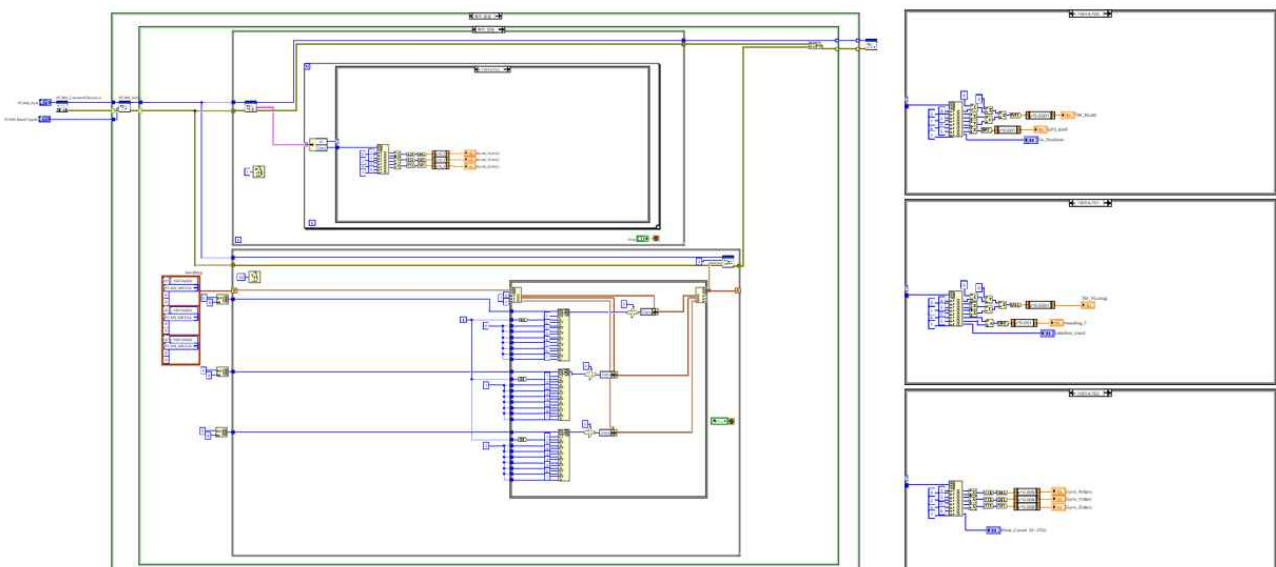
GPS는 수신되는 신호의 품질이나 단절 등으로 인한 위치정보 오차가 발생함. 따라서 작업 중인 트랙터가 안정적이고 정확한 경로추종 작업을 위하여 이를 보완할 방법이 필요함. Dual GPS 모듈은 IMU를 이용하여 오차를 보정하는 방법을 적용. IMU를 통하여 획득되는 자세 및 속도정보를 이용하여 GPS의 위치를 확인하고 보정하는 알고리즘을 적용.

IMU에서 측정된 자세정보는 제어기를 통하여 별도의 연산 없이 CAN protocol에 따라 송출되며, 트랙터의 경로추종제어 및 조향각 결정에 사용되는 True Heading은 GPS에서 측정된 값을 사용하되 GPS 수신불량의 경우 IMU의 YAW 값을 이용하여 보정된 각도를 사용. 다음의 그림은 GPS와 IMU를 이용하여 위치를 결정하는 알고리즘을 나타냄.



GPS/IMU Integration structure

위치-자세 인식모듈 제어기 알고리즘은 Labview 2018을 이용하여 작성하였음. 알고리즘은 데이터 수신부, 연산처리부, 통신처리부로 구성되어 있음. 위치-자세 인식모듈은 50Hz로 데이터를 업데이트하여 송출하도록 되어 있음. 다음의 그림은 작성된 알고리즘을 나타냄.



위치-자세 인식모듈 제어 알고리즘

제어기는 자율주행 트랙터와 데이터 송수신을 위한 커넥터 단자 외에 내부 전원공급용 단자와 위치보정신호 수신을 위한 RS-232 단자를 지원함. RS-232 단자를 이용하여 RTK 수신기 또는 VRS 수신기에서 전송되는 RTCM 3.2메세지 수신이 가능.

㉠ 자가진단기능을 위한 대응 알고리즘

Dual GPS 모듈은 작동 중 위치 인식을 위하여 사용되고 있는 GPS 위성의 숫자와 보정신호 품질에 따른 정밀도 정보를 CAN Protocol로 제공하고 있음. 따라서 위성의 숫자와 보정신호 품질에 따른 정밀도를 이용하여 자율주행의 가능여부 및 위험에 대한 평가가 가능. 또한 외부에서 육안상으로 Dual GPS 모듈의 작동상태 파악이 가능하도록 상태표시등을 설치하여 주변의 사람 또는 운전자에게 현재 운전상태를 인식할 수 있도록 하였으며 본 기술에 대하여 특허출원 중(출원번호 10-2019-0108043). GPS 수신품질은 다음의 5 단계로 구별되며, CAN Protocol로 제공됨.

GPS Message Quality

Quality	Description
0	Fix not available or invalid
1	Single point
2	Pseudorange differential
4	RTK fixed ambiguity solution
5	RTK floating ambiguity solution

다음의 표는 Dual GPS 모듈의 작동상태 및 자율주행 상태에 따른 상태표시 램프 운용의 예를 나타냄. 향후 자율주행 트랙터의 자율주행 운전상태를 제공 받아 아래와 같은 형태로 운용함으로써 주위에 시각적으로 자율운전 정보제공이 가능.

GPS 상태	표시색상		차량상태	표시방법
수동운전	WHITE	+	정상	깜박임 없음
자율운전 + 보정된 GPS수신 중	GREEN		주의	2초 간격으로 깜박임
자율운전 + DGPS GPS수신 중	BLUE		위험	0.5초 간격으로 깜박임
자율운전 + L1 GPS 수신 또는 GPS 수신 불량	RED			

- 운용 예) 1. 자율운전 중 정상상태인 경우 : GREEN 색상등이 상시 점등
 2. 자율운전 중 DGPS 급의 GPS 수신 중인 상태에서 농업기계가 설정된 주의 각도 이상으로 기울어져 운행 되는 경우 : BLUE 색상등이 2초간격으로 점멸
 3. 자율운전 중 GPS 수신 불량 상태에서 농업기계가 설정된 지역을 벗어나 운행되는 경우 : RED 색상등이 0.5초 간격으로 점멸

Dual GPS 모듈 상태표시등의 내용 및 운용예

㉡ 위치-자세 인식모듈 탑재를 위한 통신 프로토콜 개발

자율주행 트랙터와 Dual-GPS 모듈간의 CAN 통신 프로토콜을 다음과 같이 개발하였음.

위치-자세 인식모듈 CAN Protocol

Specification: CAN 2.0B

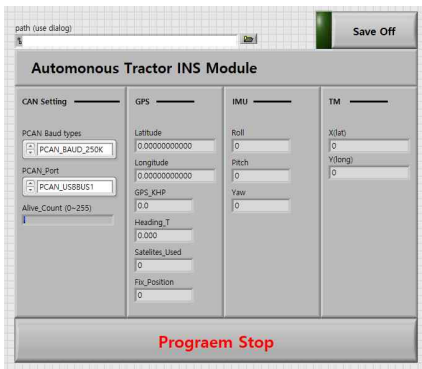
Transmission Speed 250 Kbps

											Rev.	Date	Remark					
Module	ID	Message Name	Cycle Time	Message Type	Target Module	Data Length	Packet Name	Signal ByteNo	Signal Length	Signal Bit	Contents	Value						
(hex)			(ms)			(byte)		(0-7)	(bit)	(0-7)		값	단위	Gain	실제값	비고		
Auto-Guidance Control	0x19FFA205	Sensor Data1	20	cyclic	Upper	8	Latitude	0.4	uint40	GPS_Latitude	ex) 37130856959	ex) 3713.0856959	x*10 ⁷		3713.0856959			
							Speed	5.6	uint16	GPS_Speed_KHP	0 ~ 25000	KPH	x*100		0.00 ~ 250.00			
							Fix Position	7	uint8	GPS_Fix Position	0 ~ 5							
	0x19FFA210	Sensor Data2				8	Longitude	0.4	uint40	GPS_Longitude	ex) 126589184714	ex) 12658.9184714	x*10 ⁷					
							Heading	5.6	int16	GPS_Ture Heading	0 ~ 35990	deg	x*100		0.00 ~ 359.90			
							SatelitesUsed	7	uint8	GPS_SateliteUsed	0 ~ 255							
	0x19FFA215	Sensor Data3				8	Roll	0.1	int16	IMU_Roll	-180.00 ~ 180.00	deg	x*100		-180.00 ~ 180.00			
							Pitch	2.3	int16	IMU_Pitch	-180.00 ~ 180.00	deg	x*100		-180.00 ~ 180.00			
							Yaw	4.5	int16	IMU_Yaw	-180.00 ~ 180.00	deg	x*100		-180.00 ~ 180.00			
							Alive Count	7	uint8	Heartbeat	255(0 increasing each one step, ifkeepgoingincreasing.thensuccesscontrol.otherwise.thenvehicle'llbe under emergency.							
	0x19FFA200	Auto-Guidance Command				25	8	Control Mode : Auto	0	7				0 : OFF, 1 : ON				
								Control Mode : Manual	0	6				0 : OFF, 1 : ON				

㉔ 위치-자세 인식모듈 성능시험 및 자율주행 트랙터 적용 시험

㉔ 위치-자세 인식모듈 성능시험

개발 제작된 위치-자세 인식모듈의 위치, 자세측정 시험을 다음과 같이 수행하였다. 먼저 위치-자세 인식모듈의 트랙터 인터페이스 커넥터를 이용하여 CAN Protocol을 읽고 저장할 수 있는 시험 프로그램을 작성하였다. 시험은 주위에 GPS 수신을 방해하는 장애물이 없는 개활지에서 수행하였으며, 위치-자세 인식모듈에서 출력되는 측정값의 상태와 정밀도를 확인하였다.



위치-자세 인식모듈의 성능시험

(좌) 성능시험 data viewer, (우) 성능시험모습

ISO 17123-8 규격에 의한 정지위치 오차 측정시험 결과는 다음의 표와 같다. 측정 위치오차 보정을 위하여 DMB 기반의 VRS 수신기를 이용하였다.

정지위치오차 측정시험 결과(ISO17123-8, 단위 m)

Seq. No.	Series	Set	Rover Point	Measurement		D	D*	ϵ	Spec.
1	1	1	1	553,756.00868	189,754.40551	2.00040	2.00000	0.00040	<0.1
2	1	1	2	553,754.01063	189,754.30853				
3	1	2	1	553,754.03467	189,754.31754	2.01030			
4	1	2	2	553,756.01092	189,754.68595				
5	1	3	1	553,754.09980	189,754.30437	1.96122			
6	1	3	2	553,756.02406	189,754.68332				
7	1	4	1	553,756.02519	189,754.66565	1.97557			
8	1	4	2	553,754.07738	189,754.33570				
9	1	5	1	553,756.02260	189,754.66742	2.02278			
10	1	5	2	553,754.02259	189,754.36478				

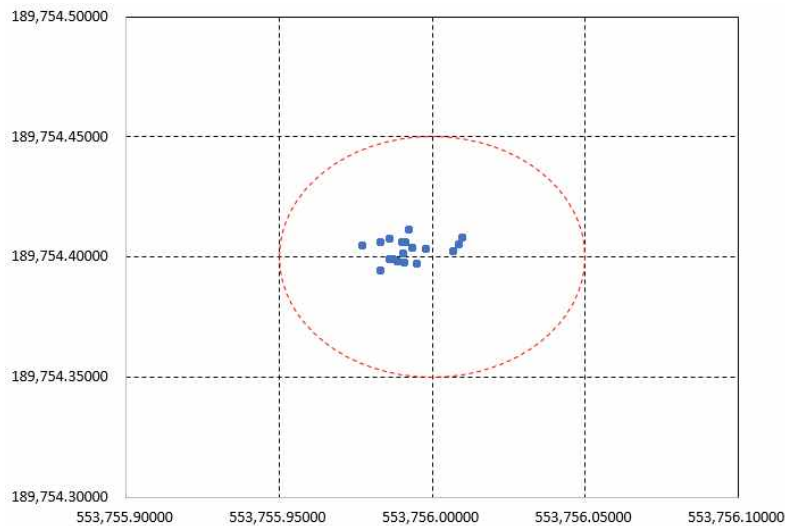
D = A,B 두 지점간의 GPS 측정 거리

D* = A,B 두 지점간의 실측측정 거리

ϵ = 위치오차

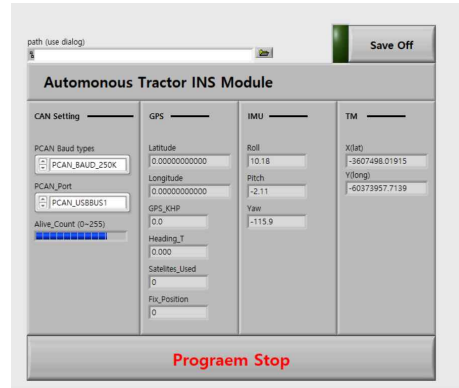
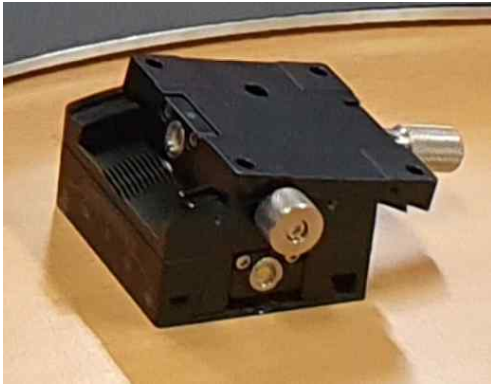
측정결과 2차년도 개발 목표값인 10cm 미만을 만족하는 결과를 얻음.

이때 수신되고 있는 GPS의 위치 산포는 다음의 그림과 같다.



측정된 GPS 위치 데이터 산포

위치-자세 인식모듈의 자세 측정 각도를 실내에서 각도측정 지그를 이용하여 실시하였다. 모듈을 평면인 책상에서 부팅한 후 각도측정 지그를 이용하여 지그에서 측정되고 있는 값과 모듈에서 측정된 값을 비교하는 방식으로 측정을 진행 하였다. 다음 그림은 각도 측정에 사용된 지그와 측정중인 화면을 나타낸다. 측정 결과 Roll의 경우 0.2°, Pitch의 경우 0.5°의 편차를 갖는 것으로 측정되었음. 그러나 보다 정밀한 측정을 위해서 지그와 위치-자세 인식모듈을 견고히 고정할 수 있는 지그 제작이 필요하며, 추가적인 실험이 필요한 것으로 파악됨.



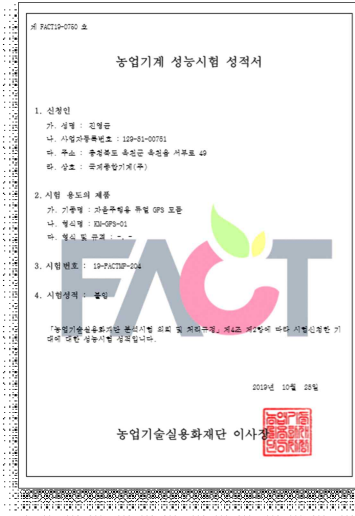
각도측정 지그(좌)와 각도측정 중인 프로그램(우)

㉔ 공인성능시험 항목

공인 시험은 ISO 17123-8에 의거하여 진행하였다. ISO 17123-8은 simplified test procedure와 full test procedure 두 가지 측정방법을 두고 있으며, 본 시험의 경우 통계해석을 하지 않으므로 simplified test procedure를 따라 시험을 진행하였다. 시험방법은 GPS 수신을 방해하는 장애물인 없는 개활지에서 VRS를 이용한 위치보정신호를 사용하여 측정점 A와 측정점 B를 자를 이용하여 실측한 거리와 위치-자세 인식모듈을 이용하여 측정한 거리의 차를 구하여 그 값이 개발 목표 성능인 10cm 미만을 만족하는지 확인하는 형태로 진행하였다. 공인인증시험은 농업기술실용화재단에서 실시 하였으며 시험결과는 별첨의 성적서와 같다. 아래의 그림은 시험 중인 모습을 나타낸다.



정지위치오차 공인인증시험



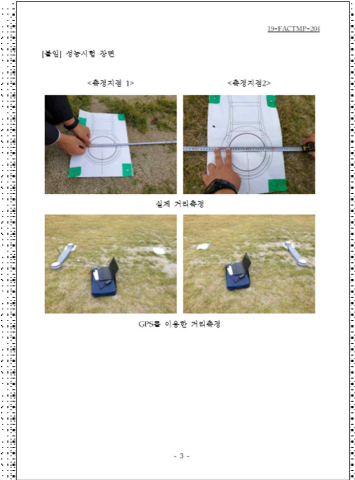
검정 성적서

1. 기종명 : 자율주행용 무인 GPS 트랙터
 2. 검정번호 : 19-FACTMP-004
 3. 형태명 : KEM-GPS-001
 4. 형태 : -
 5. 시험 목적 : -
 6. 시험 성격 : -

6.1.1 시험조건
 장소 및 장소 : 2019.10.23(수) 전북 익산시 새마을로 457
 날씨 : 흐림, 19°C
 측정소까지의 현재(제오차) 거리 : 0.1m
 측정소까지의 관측거리 : 2.49400m

6.1.2 GPS 수신상태로의 시험결과

순번	Sat	수신 차별	수평측정차오		GPS 수신거리(m)	수정오차 (m)
			x	y		
1	1	1	371.110.9640	193.725.7609	2.49296	3.00104
2	1	2	371.110.20525	193.728.1107	-	-
3	2	1	371.110.96037	193.725.75962	2.49295	3.00005
4	2	2	371.110.30203	193.728.15984	-	-
5	2	1	371.110.30338	193.728.14938	2.49099	3.00094
6	2	2	371.110.00138	193.725.76038	-	-
7	4	1	371.110.96064	193.725.76182	2.47726	3.00274
8	4	2	371.110.20245	193.728.14107	-	-
9	2	1	371.110.96098	193.725.76020	2.49381	3.00019
10	2	2	371.110.20303	193.728.15681	2.49349	3.00051



-공신인증시험 성적서-

⑧ 자율주행 트랙터 탑재 성능시험 및 평가

① 시험용 자율주행 트랙터 제작

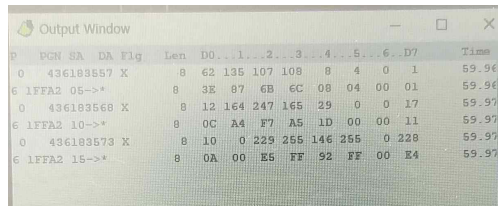
위치-자세 인식모듈은 GPS 신호의 수신에 방해물이 없도록 자율주행 트랙터 지붕에 장착이되며 이를 위한 부품을 제작하여 아래의 그림과 같이 탑재하였다.



위치-자세 인식모듈이 탑재된 트랙터(국제종합기계)

㉔ 시험용 자율주행 트랙터 성능시험 및 평가

위치-자세 인식모듈을 자율주행 트랙터 지붕에 장착하고 자율주행 트랙터와 Dual-GPS 모듈간의 CAN 통신 성능시험 및 평가를 진행하였으며, 결과는 아래와 같이 정상적인 통신 성능을 나타내고 있다.



ID	RTR	SA	DA	Flg	Len	D0	1	2	3	4	5	6	D7	Time
0		436183557	X		8	62	135	107	108	8	4	0	1	59.964
6	1	FFFA2	05->*		8	3E	87	6B	6C	08	04	00	01	59.964
0		436183568	X		8	12	164	247	165	29	0	0	17	59.97
6	1	FFFA2	10->*		8	0C	A4	F7	A5	1D	00	00	11	59.97
0		436183573	X		8	10	0	229	255	146	255	0	229	59.97
6	1	FFFA2	15->*		8	0A	00	E5	FF	92	FF	00	E4	59.97

위치-자세 인식모듈 CAN 통신 평가결과

라. 협동연구기관 3 ((주)긴트)

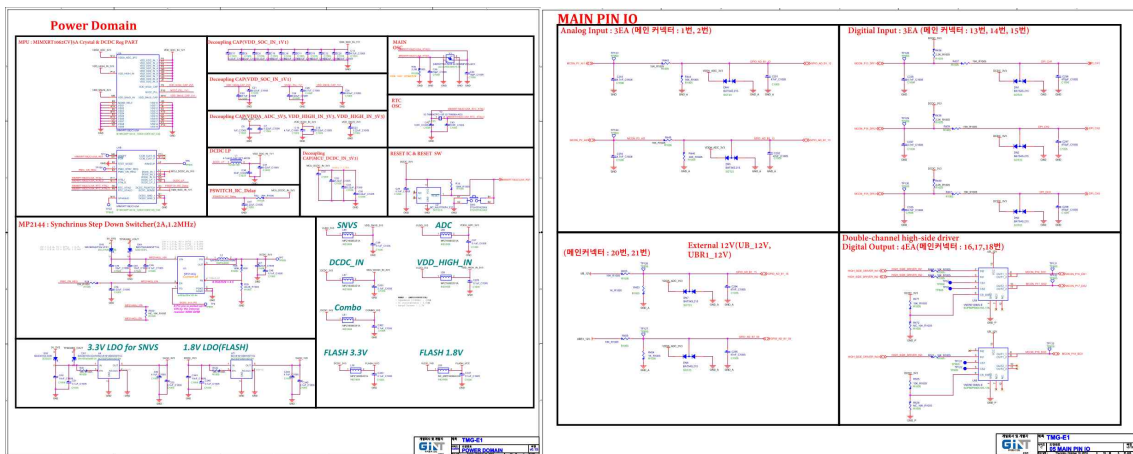
㉔ 모듈 통합 시스템 개발

㉔ 프로토타입 PCB 설계 및 제작

1차년도 수행된 시스템 하드웨어 사양 선정을 기준으로 PCB 회로 설계 및 제작하고, 핵심 모듈 통합 I/O 테스트 수행

㉔ 주요 IC 사양 선정 및 PCB 회로 설계

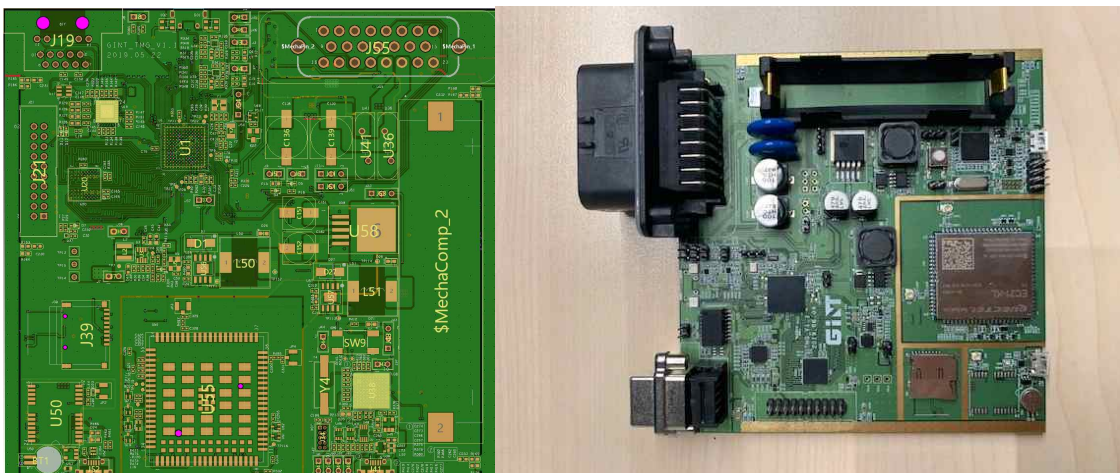
- Power Domain, MCU, MAIN 커넥터 I/O 등 주요 기반 기능 부 설계
- 트랙터 CAN, 자율주행 CAN, LTE 모듈 (GNSS 보정) 등 주요 통신 기능 부 설계



< 주요 IC 사양 선정 및 PCB 회로 설계 (긴트) >

㉔ 프로토타입 PCB HW 제작

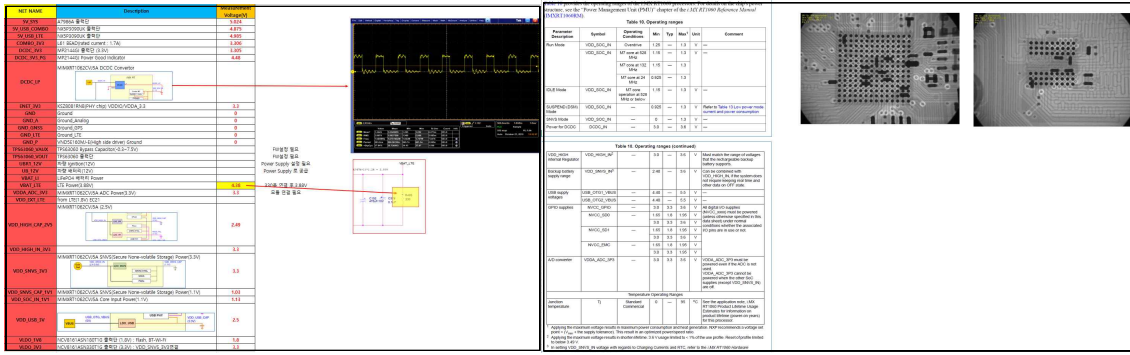
- PCB 설계 기반 레이아웃 설계
- PCB 시작 제품 HW 제작



< 프로토타입 PCB HW 제작 (긴트) >

㉔ PCB 주요 기능 테스트 수행

- Power Domain, MCU, MAIN 커넥터 I/O 등 주요 기반 기능 확인
- Pattern Short 확인 및 기타 PCB 제작 검수



< PCB 주요 기능 테스트 수행 (긴트) >

㉔ 자율 주행 시스템 모듈과의 주요 I/O 테스트 수행

- CAN 통신 기반의 트랙터 기존 모듈과의 통신 I/O 확인
- CAN 통신 기반의 자율주행 시스템과의 통신 I/O 확인
- GNSS 보정을 위한 LTE 등의 통신 I/O 확인

테스트 부문	통신 채널	비고
트랙터 기존 모듈과의 통신 I/O (TCU, 3P-HITCH 등)	CAN1	CAN1 통신 물리 동작 확인 완료
위치 인식 모듈과의 통신 I/O 조향 제어 모듈과의 통신 I/O 경로생성 및 추종시스템과의 통신 I/O 작업환경 인식 모듈과의 통신 I/O	CAN2	CAN2 통신 물리 동작 확인 완료
GNSS 보정 등 추가 기능을 위한 통신 채널	LTE, Ethernet, RS232	각 통신 물리 동작 확인 완료

< 주요 I/O 테스트 개요 (긴트) >

㉔ 프로토 타입 통합 모듈 하우징 설계 및 제작

1차년도 수행된 시스템 하드웨어 사양 선정을 기준으로 모듈 하우징 설계 및 제작

- PCB 사이즈, 트랙터내 장착 위치, 핵심 모듈과의 인터페이스 등을 고려한 통합 모듈 하우징 요구사항 및 컨셉 개발
- 검증 완료된 커넥터류 및 치부 측정을 통한 하우징 추가 요구사항 작성
- 상기 두 항목을 기반으로 한 하우징 외형 3D설계
- 직접 가공 및 3D 프린팅을 통한 테스트
- 설계 사양 1차 확정 및 시제품 제작



< 하우징 외형 설계 컨셉도 (긴트) >

Machine Pin Map

1	Universal Input1 (0-5V)	9	Serial Comm. (T.B.D.)	16	Digital Output1
2	Universal Input2 (0-5V)	10		17	Digital Output2
3	Universal Input3 (0-5V)	11		18	Reserved
4	Universal Input4 (0-5V)	12		19	Reserved
5	CAN 1 HIGH	13	Reserved	20	PWR (Batt.)
6	CAN 1 LOW	14	Reserved	21	PWR (Key On)
7	CAN 2 HIGH	15	Reserved	22	GND
8	CAN 2 LOW			23	GND (Chassis)

Machine Connector : TE Part # 1-776087-1

FAKRA Antenna Example : molex-206866

< 메인 커넥터 및 외부 I/O 사양 (긴트) >



< 통합 모듈 하우징 시제품 제작 (긴트) >

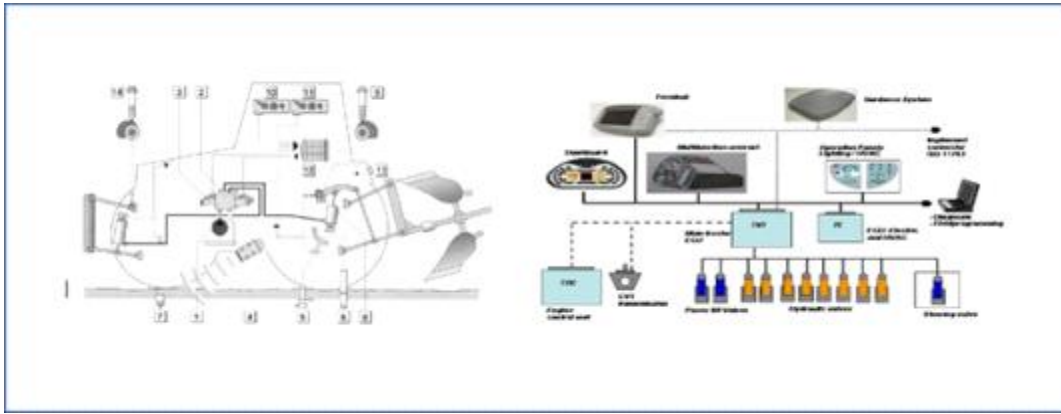
㉔ 트랙터 시스템 연동

㉔ 트랙터 고장 진단 코드 수집 및 송출

자율주행 핵심 모듈이 아닌 기존 트랙터 고장 진단 데이터 선별 수집하여, 자율 주행 경로 생성 및 추종 모듈로 송출 기능 구현

㉔ 고장 코드 선별 (3차년도 각 기관 협의 완료예정)

- ECU(엔진제어유닛) 고장 코드 선별 중
- TCU(변속기제어유닛) 고장 코드 선별 중
- 기타 트랙터 고장 코드 선별 중



< 트랙터 각 파트별 고장진단 예시 (긴트) >

DTC	J1939				LAMP FLASH CODE	제거방법 에러코드	관련명 영문명 LABEL
	HMB (HEXDECIMAL)	LB (HEXDECIMAL)	SPN (DECIMAL)	FM (DECIMAL)			
P0001	13	1	18	241	E-ECU-001	INV 구동 신호 개방 INV DRIVER SIGNAL OPEN CIRCUIT FAULT	
P0002	23	2	8	353	E-ECU-002	레일 압력 제어 오류 RAIL PRESSURE CONTROL FAULT	
P0002	24	2	9	354	E-ECU-003	레일 압력 제어 오류 RAIL PRESSURE CONTROL FAULT	
P0002	16	2	6	221	E-ECU-004	레일 압력 제어 불응 오류 RAIL PRESSURE CONTROL HIGH FAULT	
P0002	1A	2	5	222	E-ECU-005	레일 압력 제어 불응 오류 RAIL PRESSURE CONTROL LOW FAULT	
P0003	16	3	3	224	E-ECU-006	INV 피드백 전류 불응 오류 INV FEEDBACK CURRENT LOW FAULT	
P0003	24	3	5	235	E-ECU-007	INV 제어 오류 2 INV CONTROL FAULT 2	
P0003	23	3	6	234	E-ECU-008	INV 제어 오류 2 INV CONTROL FAULT 2	
P0003	11	3	20	242	E-ECU-009	INV 드라이버 잠지 단락 오류 INV DRIVER SCSS FAULT	
P0004	19	4	3	223	E-ECU-010	INV 피드백 전류 불응 오류 INV FEEDBACK CURRENT HIGH FAULT	
P0004	23	4	5	233	E-ECU-011	INV 제어 오류 2 INV CONTROL FAULT 2	
P0004	24	4	5	232	E-ECU-012	INV 제어 오류 1 INV CONTROL FAULT 1	
P0004	12	4	21	243	E-ECU-013	INV 드라이버 잠지 단락 오류 INV DRIVER SCSS FAULT	
P0004	16	4	1	231	E-ECU-014	INV PWM 제어 신호 오류 INV CONTROL FAULT 2	
P0087	00	135	16	334	E-ECU-015	레일 압력 과부하 오류 RAIL PRESSURE BUILDUP FAULT	
P0088	FA	136	16	312	E-ECU-016	레일 압력 과부하 오류 OVER RAIL PRESSURE FAULT	
P0088	00	136	17	311	E-ECU-017	레일 압력 과부하 오류 OVER RAIL PRESSURE INV FAULT	

NO.	ERROR CODE	DESCRIPTION	MESSAGE ID	TRIGGER RATE	START POSITION	DATA LENGTH	TRIGGER DIRECTION
1	130001	Forward Pedal Sensor EPP			2.110ms		
2	130002	Reverse Pedal Sensor EPP			2.110ms		
3	130003	Throttle Position Sensor EPP			2.110ms		
4	130004	Range Sensor EPP			2.110ms		
5	130005	Roll Temp Sensor EPP			2.110ms		
6	130006	일측 부하 불응			2.110ms		
7	130007	일측 부하 불응			2.110ms		
8	130008	일측 부하 불응			2.110ms		
9	130009	일측 부하 불응			2.110ms		
10	130010	일측 부하 불응			2.110ms		
11	130011	일측 부하 불응			2.110ms		
12	130012	일측 부하 불응			2.110ms		
13	130013	일측 부하 불응			2.110ms		
14	130014	일측 부하 불응			2.110ms		
15	130015	일측 부하 불응			2.110ms		
16	130016	일측 부하 불응			2.110ms		
17	130017	일측 부하 불응			4.110ms		
18	130018	일측 부하 불응			4.110ms		
19	130019	일측 부하 불응			4.110ms		
20	130020	일측 부하 불응			4.110ms		

< ECU, TCU 등 코장 코드 선별 과정 (긴트) >

- ㉞ 트랙터 ↔ 자율주행 간 CAN 송출 기능 구현
- 트랙터 CAN → 자율주행 CAN 송출 기능 구현 완료

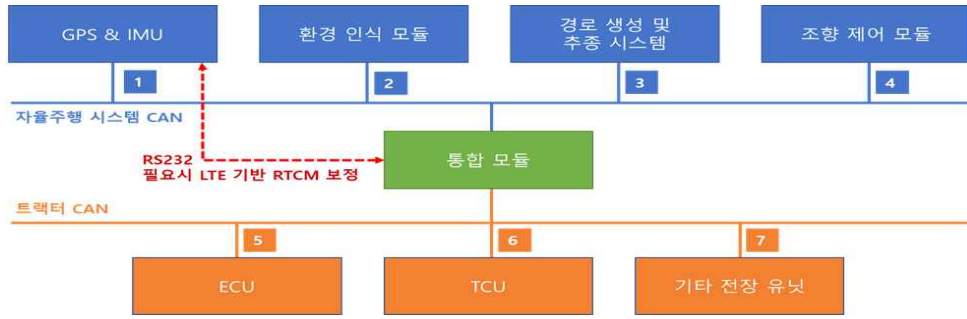
프로토콜 기반 CAN통신

GINT 통합 모듈

< 시뮬레이터 기반 트랙터 CAN → 자율주행 CAN 송출 기능 검증 (긴트) >

- ㉞ 통합 시스템 데이터 선별 및 프로토콜 개발
- 자율주행 핵심 모듈간 통신 프로토콜 협의 및 신규 개발 (고장 진단 코드 포함)

- ㉞ 자율 주행 핵심 모듈 간 통신 프로토콜 정의 및 선별
- 자율 주행 핵심 모듈 및 통합 모듈간 통신 전장 협의 및 구성
- 자율 주행 ↔ 트랙터 간 통신 전장 협의 및 구성
- 각 모듈간 통신 내용 및 주요 프로토콜 내용 취합



< 자율 주행 ↔ 트랙터 간 통신 전장 개념도 (킨트) >

Source	Destination	프로토콜 및 구현 여부	참고 사항	협의 기관
1 GPS & IMU	경로 생성 및 추종 시스템	취합 완료	Dual GPS Module Interface (2차 개발)	동양, 국제
2 환경 인식 모듈	경로 생성 및 추종 시스템	취합 완료 - 대용량 데이터 처리 완료	환경인식 모듈 (CAN 프로토콜)	대용, 동양
3-1 경로 생성 및 추종 시스템 <-> 통합 모듈	통합 모듈 <-> 경로 생성 및 추종 시스템	취합 완료 (데이터 처리 완료) 경로 생성 및 추종 시스템 <-> 통합 모듈	환경인식 모듈 (CAN 프로토콜)	동양, 킨트
3-2 경로 생성 및 추종 시스템	조향 제어 모듈	취합 완료 (ID 배분 후 킨트 직할 작성) 통합 모듈 <-> 경로 생성 및 추종 시스템	조향제어(CAN) CAN Protocol	대용, 동양, 서울대
4 조향 제어 모듈	경로 생성 및 추종 시스템	취합 완료	조향제어(CAN) Auto Guidance	대용, 동양, 서울대
5 ECU 통합 모듈 <-> ECU	통합 모듈 <-> ECU	취합 완료 - (4차까지 완료) 통합 배전 기준 대용, 국제 엔진 사양 통일이라고 한다	양자측량용 JWS CA	대용, 동양, 국제, 킨트
6 TCU 통합 모듈 <-> TCU	통합 모듈 <-> TCU	통합 모듈 <-> ECU: 목표 RPM 통합 모듈 <-> ECU: 현재 RPM	통합 모듈 <-> ECU: 목표 RPM 통합 모듈 <-> ECU: 현재 RPM	대용, 동양, 국제, 킨트
7 기타 전장 유닛	통합 모듈	통합 모듈 <-> ECU: 목표 RPM 통합 모듈 <-> ECU: 현재 RPM	통합 모듈 <-> ECU: 목표 RPM 통합 모듈 <-> ECU: 현재 RPM	대용, 동양, 국제, 킨트

< 모듈간 통신 내용 및 주요 프로토콜 내용 취합 (킨트) >

- Ⓢ 자율 주행 핵심 모듈 간 통신 프로토콜 문서 개발 (진행 중)
- ISO 11898 / SAE J1939 CAN 기반 통신 표준 참고
- 취합 내용을 바탕으로 한 표준 프로토콜 문서 작성

GIKT	Name of document	Page
Issuer: GIKT Co., Ltd.	Date: 15.08.2018 Approved: None Issue: Ver. 0.1 Reg. no.	
GINT Telematics System - Equipments Data Protocol (EDP)		
General annotations - Physical Layer according to ISO 11898 (250kb/s) - Application Layer according SAE J1939/71 - Data Link Layer according SAE J1939/21 - If there is a discrepancy between definitions in this document and the SAE, the SAE documents are valid only - The priority/source address of each OEM is different - The accuracy/interpretation of signals might differ depending on vehicle brand/models.* - EDP-Standard is designed for Diesel engines. If it is used in vehicles with other engine types (e.g. dual engine) the information delivered might be different.* * Details can be obtained from the OEM		

GIKT	Name of document	Page																								
Issuer: GIKT Co., Ltd.	Date: 15.08.2018 Approved: None Issue: Ver. 0.1 Reg. no.																									
GINT Telematics System - Equipments Data Protocol (EDP)																										
1.1.15. Cruise Control/Vehicle Speed: CCVS (SPN 70, SPN 84, SPN 597, SPN 598, SPN 976) PGN Hex: 0x00FF01 PGN Dec: 65265 Rep. Rate: 100ms <table border="1"> <thead> <tr> <th>Data Byte1</th> <th>Data Byte2</th> <th>Data Byte3</th> <th>Data Byte4</th> <th>Data Byte5</th> <th>Data Byte6</th> <th>Data Byte7</th> <th>Data Byte8</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Parking Brake Switch (0 = parking brake not set, 01 = parking brake set)</td> <td>Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)</td> <td>Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)</td> <td>Clutch status (0 = pedal pressed, SPN 598)</td> <td>Brake switch (0 = pedal released, 01 = pedal depressed, SPN 977)</td> <td>Not used for EDP-Standard</td> <td>Not used for EDP-Standard</td> <td>PTD rate: 0000 = off/Disabled, 0010 = Set, 11111 = not available</td> </tr> <tr> <td>SPN 70</td> <td>SPN 84</td> <td>SPN 84</td> <td>SPN 598</td> <td>SPN 976</td> <td></td> <td></td> <td>Not used for EDP-Standard</td> </tr> </tbody> </table> Description of SAE J1939: Parking Brake Switch: Switch signal which indicates when the parking brake is set. In general the switch actuated by the operator's park brake control, whether a pedal, lever or other control mechanism. Wheel Based Speed: Speed of the vehicle as calculated from wheel or tailshaft speed. Clutch Switch: Switch signal which indicates that the clutch pedal is being pressed. It is necessary for a safe drivetrain behaviour that the clutch switch is set before the clutch is opened (engine control function). Brake Switch: Switch signal which indicates that the driver operated brake foot pedal is being pressed. This brake foot pedal is controlling the vehicles' service brake (total vehicle braking application, not park brakes). It is necessary for safe drivetrain behaviour that the switch activates before the physical braking components are activated.			Data Byte1	Data Byte2	Data Byte3	Data Byte4	Data Byte5	Data Byte6	Data Byte7	Data Byte8	Parking Brake Switch (0 = parking brake not set, 01 = parking brake set)	Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)	Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)	Clutch status (0 = pedal pressed, SPN 598)	Brake switch (0 = pedal released, 01 = pedal depressed, SPN 977)	Not used for EDP-Standard	Not used for EDP-Standard	PTD rate: 0000 = off/Disabled, 0010 = Set, 11111 = not available	SPN 70	SPN 84	SPN 84	SPN 598	SPN 976			Not used for EDP-Standard
Data Byte1	Data Byte2	Data Byte3	Data Byte4	Data Byte5	Data Byte6	Data Byte7	Data Byte8																			
Parking Brake Switch (0 = parking brake not set, 01 = parking brake set)	Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)	Wheel based speed (0 = pedal released, 1256 km/h Big gain, 0 km/h offset)	Clutch status (0 = pedal pressed, SPN 598)	Brake switch (0 = pedal released, 01 = pedal depressed, SPN 977)	Not used for EDP-Standard	Not used for EDP-Standard	PTD rate: 0000 = off/Disabled, 0010 = Set, 11111 = not available																			
SPN 70	SPN 84	SPN 84	SPN 598	SPN 976			Not used for EDP-Standard																			

GIKT	Name of document	Page
Issuer: GIKT Co., Ltd.	Date: 15.08.2018 Approved: None Issue: Ver. 0.1 Reg. no.	
GINT Telematics System - Equipments Data Protocol (EDP)		
Additionally the parameter group contains a list of Diagnostic Trouble Codes (DTC). Together with the address of a sender parameter of misbehaving components can be identified. A DTC contains 4 bytes, which contain the SPN, the Failure Mode Identifier (FMI) and an Occurrence Count. If the DM1 contains more than one DTC a transport protocol must be used.		

GIKT	Name of document	Page																																																							
Issuer: GIKT Co., Ltd.	Date: 15.08.2018 Approved: None Issue: Ver. 0.1 Reg. no.																																																								
GINT Telematics System - Equipments Data Protocol (EDP)																																																									
In the situation shown in below, a node indicates to the network that it is about to transfer a multipacket message utilizing the service of the transport protocol. In this example, the PGN 0x00FF01 (Vehicle Identification) is being broadcasted to the network. The length of the Vehicle ID in this example is 17. The unused bytes in the last TP.CM are filled with 0xFF. The originating node first transmits a TP.CM (Broadcast Announcement Message (BAM)) followed by the data packets. No acknowledgment is performed by any of the responders. PR* : Priority SA* : Source Address <table border="1"> <thead> <tr> <th>Time(ms)</th> <th>ID</th> <th>DLC</th> <th>Byte1</th> <th>Byte2</th> <th>Byte3</th> <th>Byte4</th> <th>Byte5</th> <th>Byte6</th> <th>Byte7</th> <th>Byte8</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0xPR* EB FF SA*</td> <td>8</td> <td>0x20</td> <td>0x11</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>0xPR* EB FF SA*</td> <td>8</td> <td>0x01</td> <td>0x01</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>0xPR* EB FF SA*</td> <td>8</td> <td>0x02</td> <td>0x01</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> </tr> <tr> <td>150</td> <td>0xPR* EB FF SA*</td> <td>8</td> <td>0x03</td> <td>0x01</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> <td>0x00</td> </tr> </tbody> </table>			Time(ms)	ID	DLC	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8	0	0xPR* EB FF SA*	8	0x20	0x11	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	50	0xPR* EB FF SA*	8	0x01	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	100	0xPR* EB FF SA*	8	0x02	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	150	0xPR* EB FF SA*	8	0x03	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
Time(ms)	ID	DLC	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8																																															
0	0xPR* EB FF SA*	8	0x20	0x11	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00																																															
50	0xPR* EB FF SA*	8	0x01	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00																																															
100	0xPR* EB FF SA*	8	0x02	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00																																															
150	0xPR* EB FF SA*	8	0x03	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00																																															

< 모듈간 통신 내용 및 주요 프로토콜 문서 작성 예시 (킨트) >

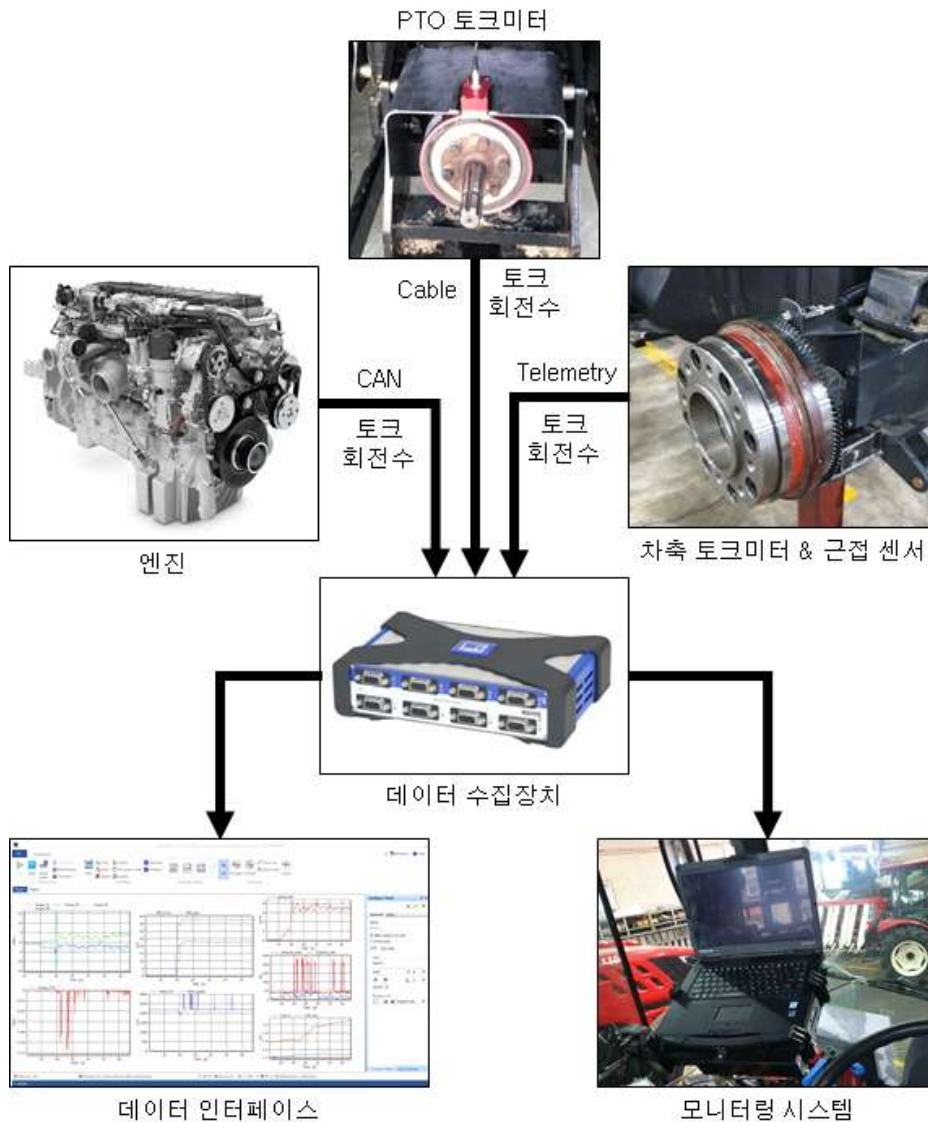
마. 위탁연구기관 1 (충남대학교)

㉔ 농작업 부하에 따른 트랙터 작업 안정성 시뮬레이션

㉔ 자율주행 트랙터 농작업 부하 수집

㉔ 부하 계측 시스템 개발

- ① 부하 계측 시스템은 트랙터의 주요 구성 요소인 엔진, 차축, PTO(Power take off) 등을 측정할 수 있도록 구성
- ② 무선 CAN 통신을 이용하여 토크, 회전속도를 측정하도록 구성
- ③ 농작업에 따른 차축의 토크와 회전속도는 트랙터의 각 차축에 토크미터를 장착하여 텔레메트리(Telemetry) 시스템으로 토크를 측정할 수 있도록 하였으며, 근접센서를 장착하여 차축의 회전수를 측정
- ④ PTO의 토크와 회전수는 토크미터를 장착하여 측정
- ⑤ 데이터 수집장치는 엔진, 차축, PTO 등의 데이터를 수집 및 저장하는데 사용
- ⑥ 트랙터 내부에 노트북을 이용하여 실시간으로 측정되는 데이터의 확인 및 저장이 가능



< 부하 계측 시스템의 구성 >

㉔ 계측용 트랙터

- ① 필드 시험을 위해 사용된 부하 계측용 트랙터(LUXEN800, KM, Korea)는 전자식 엔진이 장착된 91마력급 트랙터

- ② 외경은 4,020(L) × 2,270(W) × 2,790(H) mm, 총 중량은 4,406 kg임.
- ③ 전/후진 변속의 변속 방식은 파워시프트이며, 주변속은 동기물림식으로 총 4단 (1, 2, 3, 4)의 변속단수를 가지고 있음. 부변속은 상시물림식이며, 총 4단 (Creep, A, B, C)의 변속단수임.



< 부하 계측에 사용된 계측용 트랙터 >

구분		제원
길이 × 폭 × 높이 (mm)		4,020 × 2,270 × 2,790
중량 (kg)		4,406
엔진	정격출력(kW / rpm)	67 / 2200
	최대토크(Nm / rpm)	380 / 1400
변속기	전/후진 변속	파워시프트
	주변속	동기물림식 4단(1, 2, 3, 4)
	부변속	상시물림식 4단(Creep, A, B, C)
PTO 최대출력 (kW)		57

< 부하 계측에 사용된 계측용 트랙터의 제원 >

㉔ 필드 시험

- ① 필드 시험은 충청남도 당진시 석문면 교로리 2255번지에서 수행
- ② 시험지는 100 m × 40 m 크기의 필지 총 2곳을 사용
- ③ 쟁기 경운 시험
 - 농작업 중에서 부하가 가장 높게 나타는 쟁기 작업 실시
 - 이랑쟁기(WJSP-8, WOONGJIN, Korea)와 원판쟁기(YDP 802L-H, YOUNGJIN, Korea)를 트랙터에 부착하여 수행
 - 이랑쟁기는 90~120마력급 트랙터에서 사용하는 8련의 이랑쟁기를 사용하였으며, 기체사양은 2,800(L) × 2,150(W) × 1,250(H) mm, 총 중량은 790 kg임. 이랑쟁기는 국내에서 가장 많이 사용되는 쟁기로, 쟁기의 보습 전방에 설치된 원판날이 벼밭을 미리 잘라주어 흙냄김이 매우 좋으며, 작업 시 힘이 적게 들고, 고른 작업이 가능함.



< 이랑쟁기 작업기 >

- 원판쟁기는 50~100마력급 트랙터에서 사용하고 있는 10련의 원판쟁기를 사용하였으며, 작업기의 크기는 1,745(L) × 2,625(W) × 1,070(H) mm, 경운폭은 2,450 mm이며, 총 중량은 690 kg임. 원판쟁기는 PTO를 이용한 디스크 회전 방식으로 벧짚이나 잡초가 많은 논과 젖은 땅에서도 작업력이 우수하며, 벧짚이나 흙이 물리지 않고 깊이갈이와 갈아엎기 작업이 우수함.



< 원판쟁기 작업기 >

- 이랑쟁기 작업은 부변속 A단 & 주변속 4단(4 km/h), 부변속 B단 & 주변속 1단(5.2 km/h), 부변속 B단 & 주변속 2단(6.5 km/h), 부변속 B단 & 주변속 3단(8.3 km/h)의 변속 단수 시험 실시
- 원판쟁기 작업은 부변속 A단 & 주변속 3단(2.9 km/h), 부변속 A단 & 주변속 4단(4 km/h), 부변속 B단 & 주변속 4단(5.2 km/h)의 변속 단수와 각각 PTO 1단(540 rpm)과 2단(750 rpm)으로 시험 실시



< 이랑쟁기 경우 작업 >



< 원판쟁기 경우 작업 >

작업 구분	주행 변속단수		PTO 변속단수	주행 속도 (km/h)
	부변속	주변속		
이랑쟁기	A	4	-	4.0
	B	1	-	5.2
	B	2	-	6.5
	B	3	-	8.3
원판쟁기	A	3	P1 (540 rpm)	2.9
			P2 (750 rpm)	
	A	4	P1 (540 rpm)	4.0
			P2 (750 rpm)	

< 쟁기 경우 시험의 작업 조건 >

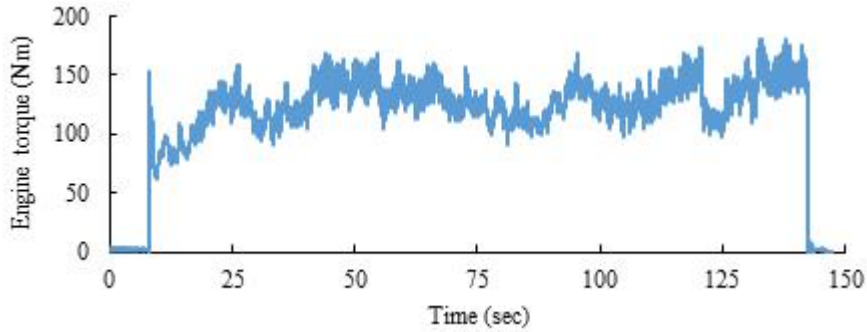
㉔ 부하 데이터 수집 및 분석

① 이랑쟁기

- A-4단 부하 분석

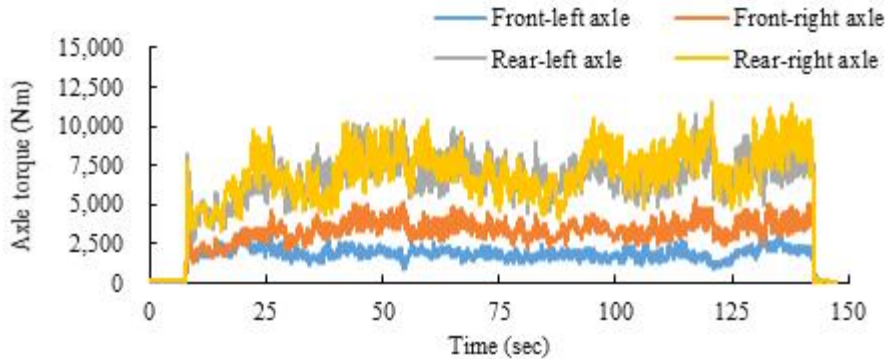
: 트랙터의 엔진 및 차축 토크는 쟁기 경우 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.

: 엔진 토크는 작업구간에서 약 63~181 Nm의 범위를 보이며, 약 137 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 이랑쟁기 A-4단의 엔진 토크 >

: 트랙터 전륜 좌측의 토크는 1416~3378 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 1079~5392 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 2799~10822 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 3447~11601 Nm의 범위로 나타남.



< 이랑쟁기 A-4단의 차축 토크 >

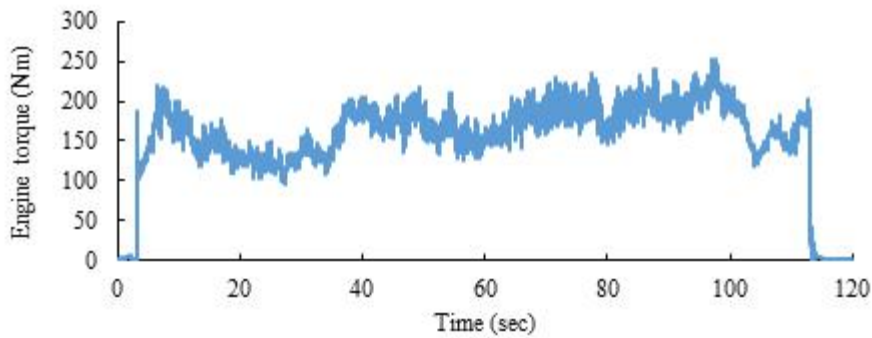
- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 181, 125.9, 25.6 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 43.8, 30.8, 6.2 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3378.1, 1911.7, 431.4 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.2, 3.7, 1 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 5392.1, 3387.4, 765 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 16.1, 7.2, 1.9 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 10821.7, 6809.4, 1535.4 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 15.4, 9.8, 2.2 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 11600.7, 7063.1, 1764.7 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 16.1, 10.1, 2.5 kW로 나타남.

구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	181.0	125.9	25.6	
	출력(kW)	43.8	30.8	6.2	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,378.1	1,911.7	431.4
		출력(kW)	7.2	3.7	1.0
	전륜 우측	토크(Nm)	5,392.1	3,387.4	765.0
		출력(kW)	16.1	7.2	1.9
	후륜 좌측	토크(Nm)	10,821.7	6,809.4	1,535.4
		출력(kW)	15.4	9.8	2.2
	후륜 우측	토크(Nm)	11,600.7	7,063.1	1,764.7
		출력(kW)	16.1	10.1	2.5

< 이랑쟁기 A-4단의 작업 시 부하 분석 결과 >

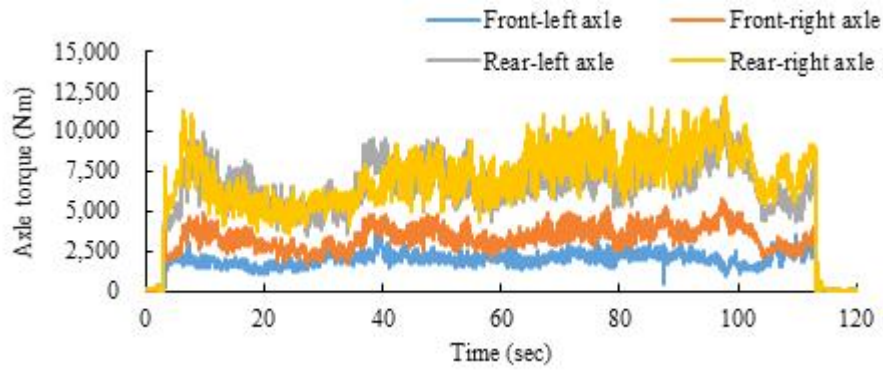
- B-1단 부하 분석

- : 트랙터의 엔진 및 차축 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.
- : 엔진 토크는 작업구간에서 약 98~254 Nm의 범위를 보이며, 약 112 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 이랑쟁기 B-1단의 엔진 토크 >

- : 트랙터 전륜 좌측의 토크는 1,138~3,580 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 1,767~5,750 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 3,507~11,541 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 3,714~12,148 Nm의 범위로 나타남.



< 이랑쟁기 B-1단의 차축 토크 >

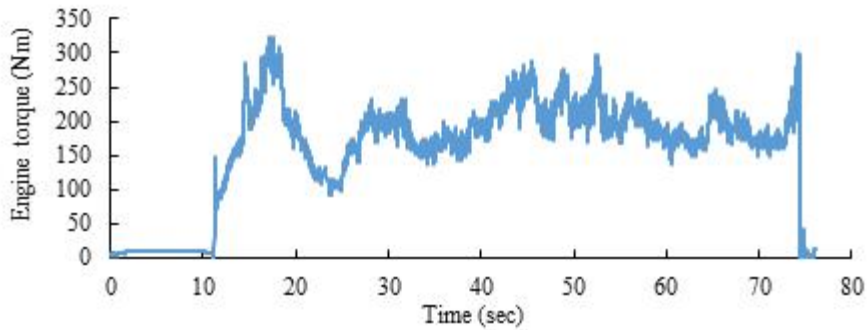
- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 253.8, 166.2, 35.3 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 58, 40, 8.2 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3579.8, 2026.5, 469.2 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 10.1, 5, 1.5 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 5750.2, 3360.6, 806.3 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 24.4, 9, 3 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 11541, 6758.1, 1617.2 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 20, 8.3, 6.8 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 12148.9, 7155.7, 1816.1 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 21, 12.7, 4 kW로 나타남.

구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	253.8	166.2	35.3	
	출력(kW)	58.0	40.0	8.2	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,579.8	2,026.5	469.2
		출력(kW)	10.1	5.0	1.5
	전륜 우측	토크(Nm)	5,750.2	3,360.6	806.3
		출력(kW)	24.4	9.0	3.0
	후륜 좌측	토크(Nm)	11,541.0	6,758.1	1,617.2
		출력(kW)	20.0	8.3	6.8
	후륜 우측	토크(Nm)	12,148.9	7,155.7	1,816.1
		출력(kW)	21.0	12.7	4.0

< 이랑쟁기 B-1단의 작업 시 부하 분석 결과 >

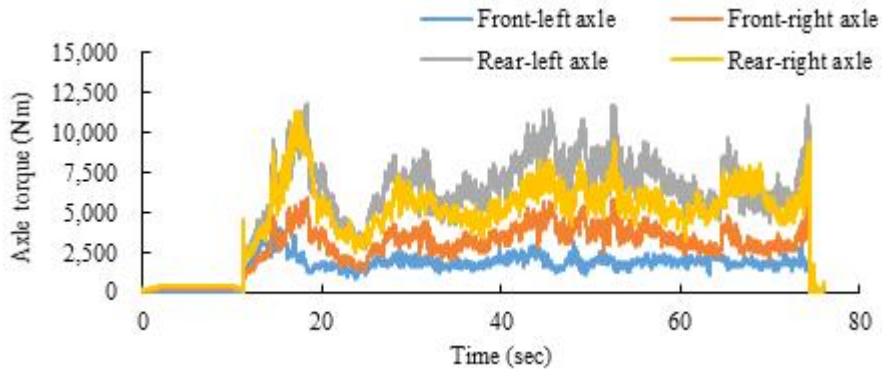
- B-2단 부하 분석
- : 트랙터의 엔진 및 차축 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.
- : 엔진 토크는 작업구간에서 약 92~324.2 Nm의 범위를 보이며, 약 70 sec의 작업

시간을 나타냄.



< 이랑쟁기 B-2단의 엔진 토크 >

: 트랙터 전륜 좌측의 토크는 981~4,235 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 1,380~5,899 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 2,930~11,839 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 2,564~11,381 Nm의 범위로 나타남.



< 이랑쟁기 B-2단의 차축 토크 >

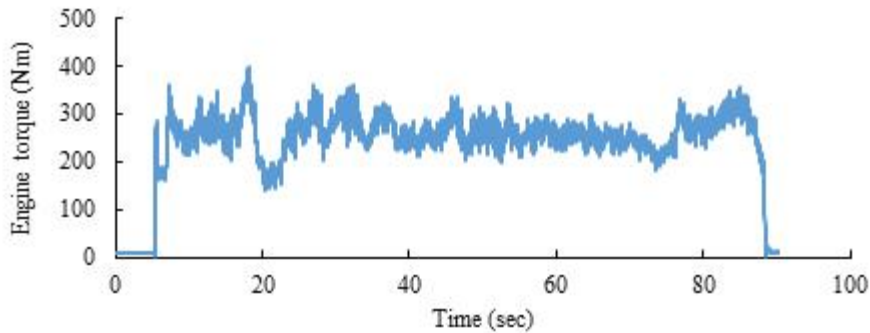
- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 324.2, 187.4, 49.9 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 66.6, 43.6, 11.2 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 4234.6, 1926.4, 527.1 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 13, 5.6, 1.9 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 5898.6, 3298.4, 988.8 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 20.1, 10.5, 3.7 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 11838.8, 6634.4, 1982 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 25.2, 13.8, 4.5 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 11380.6, 5523.4, 1642.4 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 21.4, 12.6, 4.2 kW로 나타남.

구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	324.2	187.4	49.9	
	출력(kW)	68.6	43.6	11.2	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	4,234.6	1,926.4	527.1
		출력(kW)	13.0	5.6	1.9
	전륜 우측	토크(Nm)	5,898.6	3,298.4	988.8
		출력(kW)	20.1	10.5	3.7
	후륜 좌측	토크(Nm)	11,838.8	6,634.4	1,982.0
		출력(kW)	25.2	13.8	4.5
	후륜 우측	토크(Nm)	11,380.6	5,523.4	1,642.4
		출력(kW)	21.4	12.6	4.2

< 이랑쟁기 B-2단의 작업 시 부하 분석 결과 >

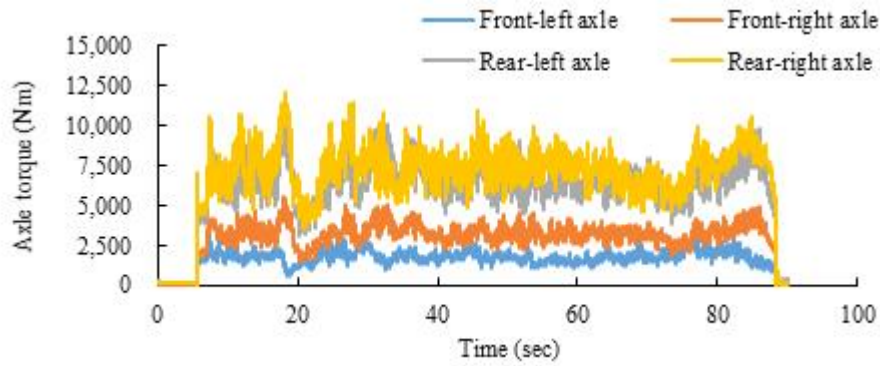
- B-3단 부하 분석

- : 트랙터의 엔진 및 차축 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.
- : 엔진 토크는 작업구간에서 약 21~398 Nm의 범위를 보이며, 약 86 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 이랑쟁기 B-3단의 엔진 토크 >

- : 트랙터 전륜 좌측의 토크는 764~3,428 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 1,552~5,614 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 3,187~11,265 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 3,542~12,046 Nm의 범위로 나타남.



< 이랑쟁기 B-3단의 차축 토크 >

- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 397.7, 255.4, 51.7 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 75.3, 51.6, 9 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3427.3, 1813.3, 452.2 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 13.3, 6.2, 1.9 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 5614.0, 3225.3, 742.4 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 19.2, 11.1, 2.8 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 11264.7, 6484.3, 1490.7 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 22.3, 15.9, 3.7 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 12045.9, 7228.8, 1655.5 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 25.6, 17.5, 4.1 kW로 나타남.

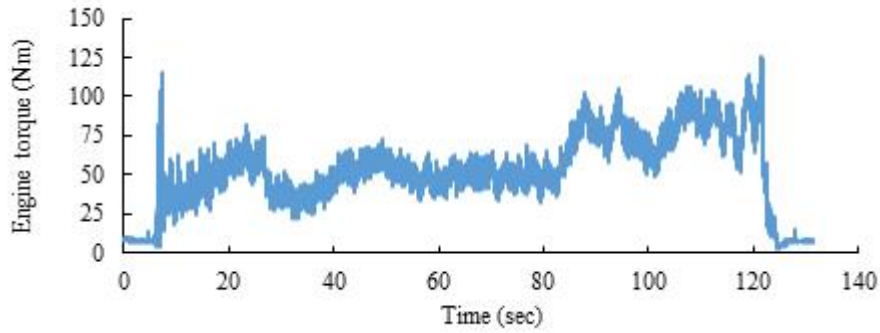
구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	397.7	255.4	51.7	
	출력(kW)	75.3	51.6	9.0	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,427.3	1,813.3	452.2
		출력(kW)	13.3	6.2	1.9
	전륜 우측	토크(Nm)	5,614.0	3,225.3	742.4
		출력(kW)	19.2	11.1	2.8
	후륜 좌측	토크(Nm)	11,264.7	6,484.3	1,490.7
		출력(kW)	22.3	15.9	3.7
	후륜 우측	토크(Nm)	12,045.9	7,228.8	1,655.5
		출력(kW)	25.6	17.5	4.1

< 이랑쟁기 B-3단의 작업 시 부하 분석 결과 >

② 원관쟁기

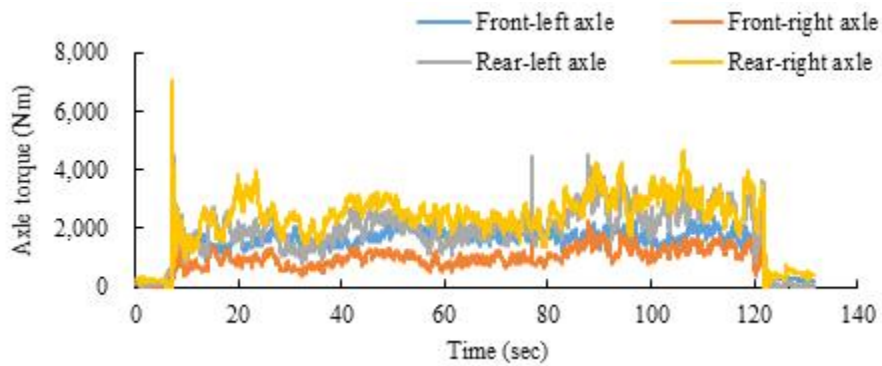
- 주행 A-3단 & PTO 1단 부하 분석

- : 트랙터의 엔진 및 차축, PTO 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.
- : 엔진 토크는 작업구간에서 약 21~126 Nm의 범위를 보이며, 약 120 sec의 작업 시간을 나타냄.



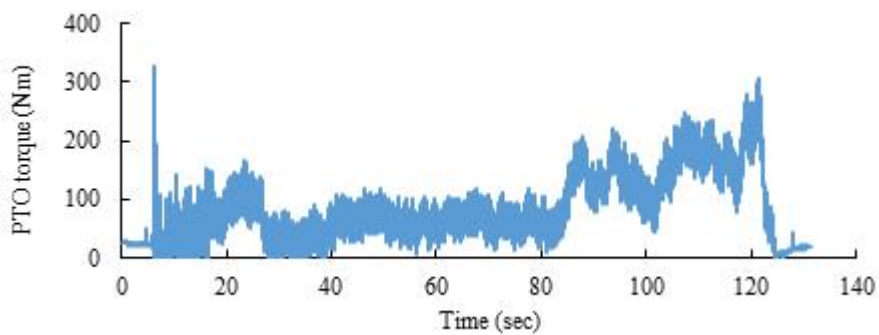
< 원관쟁기의 주행 A-3단 & PTO 1단 작업 시 엔진 토크 >

: 트랙터 전륜 좌측의 토크는 약 893~3,300 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 약 420~3,471 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 850~6,965 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 974~7,080 Nm의 범위로 나타남.



< 원관쟁기의 주행 A-3단 & PTO 1단 작업 시 차축 토크 >

: 트랙터의 PTO 토크는 작업구간에서 약 0~306 Nm의 범위를 보이며, 약 120 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 원관쟁기의 주행 A-3단 & PTO 1단 작업 시 PTO 토크 >

: 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 125.2, 57.4, 19.8 Nm로 나타남.

: 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 30.5, 14.1, 4.9 kW로 나타남.

: 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3300.1, 1673.9, 346.1 Nm로 나타났으

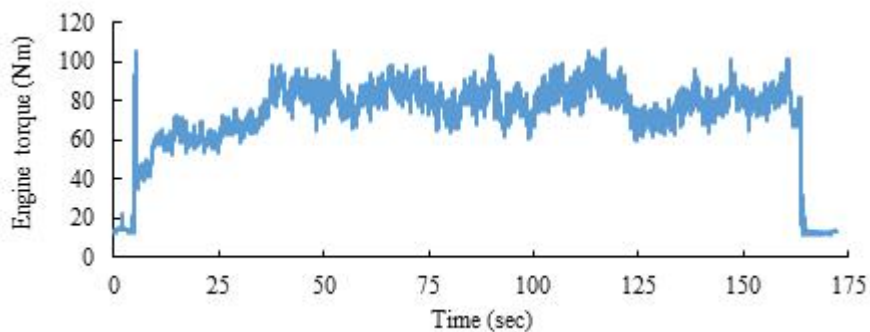
- 며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 4.4, 2.5, 0.6 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3470.2, 1035, 356.3 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 5, 1.5, 0.5 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 6964.4, 2087.2, 714.8 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 6.7, 2.2, 0.7 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 7079.6, 2530, 718.2 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 6.8, 2.7, 0.8 kW로 나타남.
- : PTO 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 305.2, 88.3, 55.6 Nm로 나타났으며, PTO의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 17.7, 5.2, 3.2 kW로 나타남.

구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	125.2	57.4	19.8	
	출력(kW)	30.5	14.1	4.9	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,300.1	1,673.9	346.1
		출력(kW)	4.4	2.5	0.6
	전륜 우측	토크(Nm)	3,470.2	1,035.0	356.3
		출력(kW)	5.0	1.5	0.5
	후륜 좌측	토크(Nm)	6,964.4	2,087.2	714.8
		출력(kW)	6.7	2.2	0.7
	후륜 우측	토크(Nm)	7,079.6	2,530.0	718.2
		출력(kW)	6.8	2.7	0.8
PTO	토크(Nm)	305.2	88.3	55.6	
	출력(kW)	17.7	5.2	3.2	

< 원판쟁기의 주행 A-3단 & PTO 1단 작업 시 부하 분석 결과 >

- 주행 A-3단 & PTO 2단 부하 분석

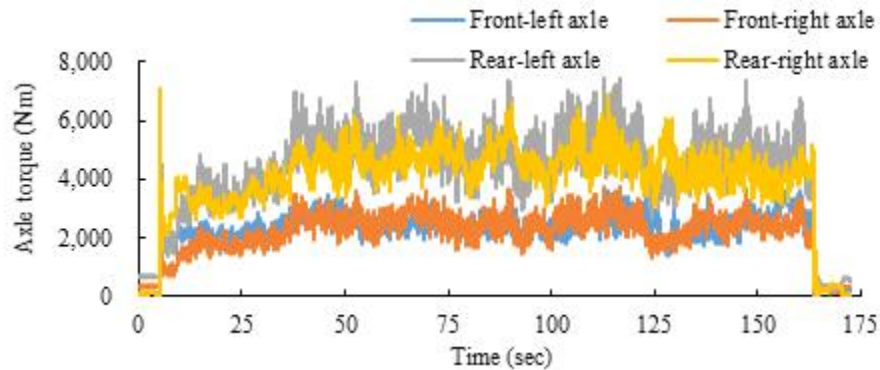
- : 트랙터의 엔진 및 차축, PTO 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.
- : 엔진 토크는 작업구간에서 약 58~107 Nm의 범위를 보이며, 약 160 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 원판쟁기의 주행 A-3단 & PTO 2단 작업 시 엔진 토크 >

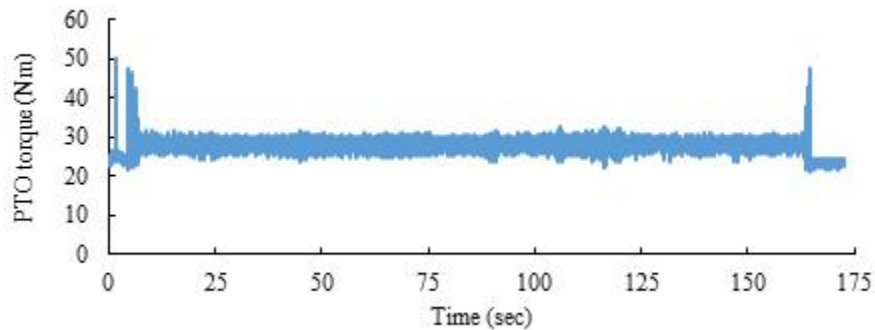
- : 트랙터 전륜 좌측의 토크는 약 1,431~3,760 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의

토크는 약 1,376~3,723 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 2,724~7,471 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 2,639~7,079 Nm의 범위로 나타남.



< 원판쟁기의 주행 A-3단 & PTO 2단 작업 시 차축 토크 >

: 트랙터의 PTO 토크는 작업구간에서 약 24~48 Nm의 범위를 보이며, 약 120 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 원판쟁기의 주행 A-3단 & PTO 2단 작업 시 PTO 토크 >

- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 106.7, 77.3, 12.5 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 26.2, 19.1, 3.1 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3759.1, 2430.4, 417.3 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 6.5, 3.6, 0.7 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3722.9, 2364.1, 551.2 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 6.6, 3.6, 0.9 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 7470.7, 4750.3, 1105 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.7, 4.9, 1.1 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 7078.6, 4317.3, 815.7 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.2, 4.8, 0.9 kW로 나타남.
- : PTO 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 47.6, 28.3, 1.3 Nm로 나타났으며, PTO의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 3.9, 2.3, 0.1 kW로 나타남.

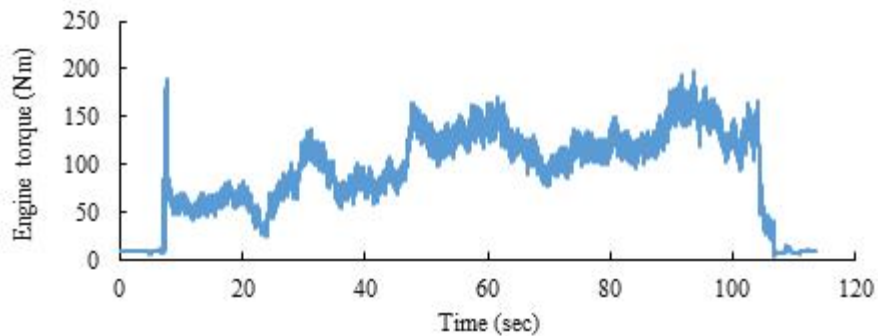
구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	106.7	77.3	12.5	
	출력(kW)	26.2	19.1	3.1	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,759.1	2,430.4	417.3
		출력(kW)	6.5	3.6	0.7
	전륜 우측	토크(Nm)	3,722.9	2,364.1	551.2
		출력(kW)	6.6	3.6	0.9
	후륜 좌측	토크(Nm)	7,470.7	4,750.3	1,105.0
		출력(kW)	7.7	4.9	1.1
	후륜 우측	토크(Nm)	7,078.6	4,317.3	815.7
		출력(kW)	7.2	4.8	0.9
PTO	토크(Nm)	47.6	28.3	1.3	
	출력(kW)	3.9	2.3	0.1	

< 원관쟁기의 주행 A-3단 & PTO 2단 작 시 부하 분석 결과 >

- 주행 A-4단 & PTO 1단 부하 분석

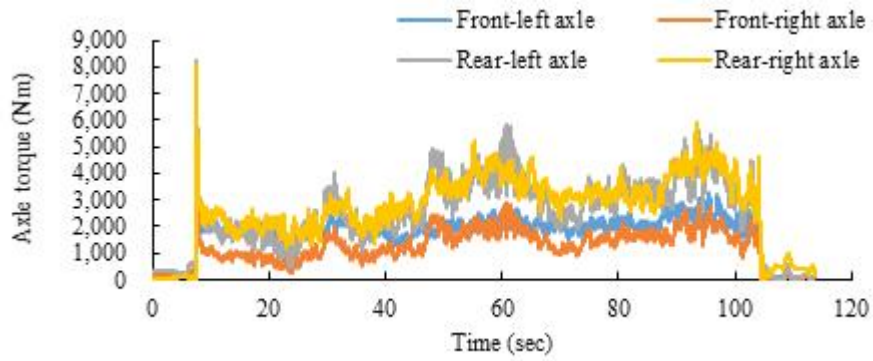
: 트랙터의 엔진 및 차축, PTO 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.

: 엔진 토크는 작업구간에서 약 28~197 Nm의 범위를 보이며, 약 100 sec의 작업 시간을 나타냄.



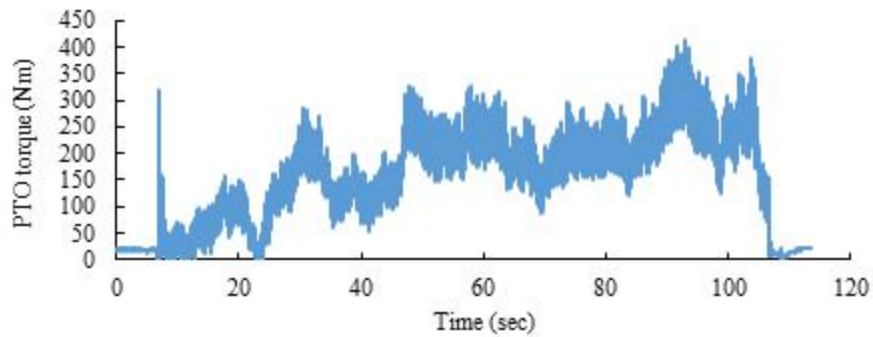
< 원관쟁기의 주행 A-4단 & PTO 1단 작업 시 엔진 토크 >

: 트랙터 전륜 좌측의 토크는 약 1,142~3,629 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 약 263~4,096 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 508~8,216 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 1,230~8,126 Nm의 범위로 나타남.



< 원관쟁기의 주행 A-4단 & PTO 1단 작업 시 차축 토크 >

: 트랙터의 PTO 토크는 작업구간에서 약 0~413 Nm의 범위를 보이며, 약 100 sec의 작업 시간을 나타냄.



< 원관쟁기의 주행 A-4단 & PTO 1단 작업 시 PTO 토크 >

- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 197, 104.4, 34.3 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 47.1, 25.4, 8.2 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3629, 1971.5, 437.1 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.8, 4, 1 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 4095.4, 1413.1, 542.5 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.4, 2.8, 1.1 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 8215.5, 2844.9, 1088.2 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 10.2, 4.1, 1.5 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 8126, 3032.4, 980.1 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 10.2, 4.4, 1.4 kW로 나타남.
- : PTO 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 412.4, 175, 77.3 Nm로 나타났으며, PTO의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 23.6, 10.1, 4.4 kW로 나타남.

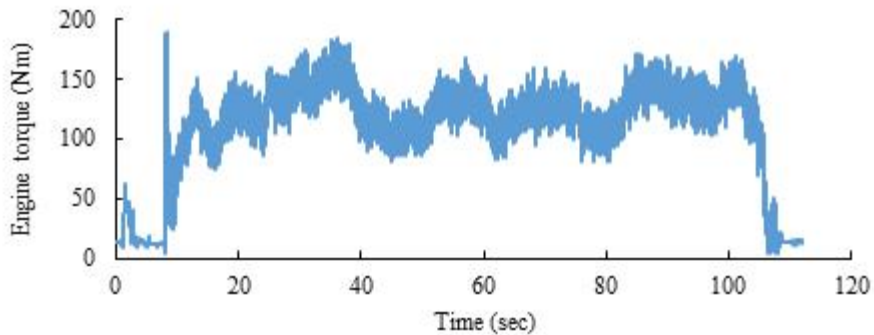
구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	197.0	104.4	34.3	
	출력(kW)	47.1	25.4	8.2	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,629.0	1,971.5	437.1
		출력(kW)	7.8	4.0	1.0
	전륜 우측	토크(Nm)	4,095.4	1,413.1	542.5
		출력(kW)	7.4	2.8	1.1
	후륜 좌측	토크(Nm)	8,215.5	2,844.9	1,088.2
		출력(kW)	10.2	4.1	1.5
	후륜 우측	토크(Nm)	8,126.0	3,032.4	980.1
		출력(kW)	10.2	4.4	1.4
PTO	토크(Nm)	412.4	175.0	77.3	
	출력(kW)	23.6	10.1	4.4	

< 원판쟁기의 주행 A-4단 & PTO 1단 작업 시 부하 분석 결과 >

- 주행 A-4단 & PTO 2단 부하 분석

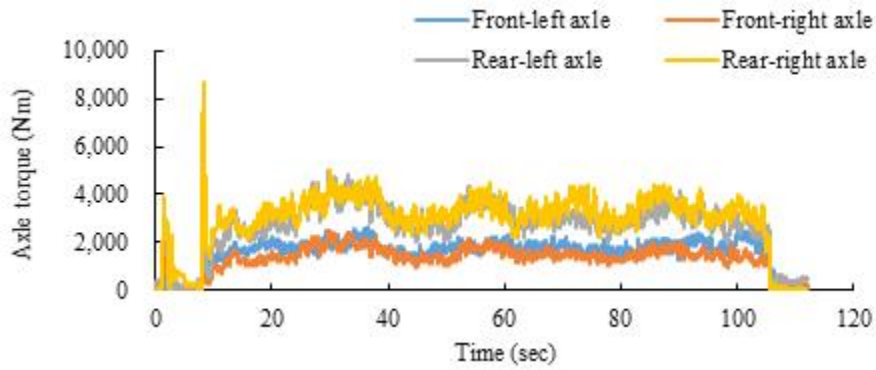
: 트랙터의 엔진 및 차축, PTO 토크는 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음.

: 엔진 토크는 작업구간에서 약 75~190 Nm의 범위를 보이며, 약 100 sec의 작업 시간을 나타냄.



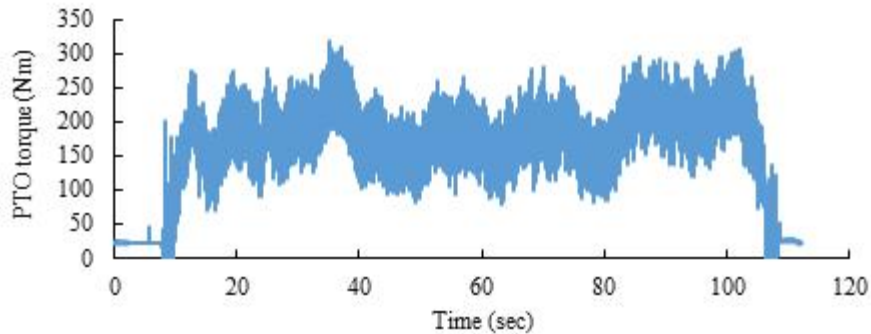
< 원판쟁기의 주행 A-4단 & PTO 2단 작업 시 엔진 토크 >

: 트랙터 전륜 좌측의 토크는 약 1,278~3,120 Nm의 범위를 보이며, 전륜 우측의 토크는 약 1,075~3,684 Nm의 범위로 나타남. 또한 후륜 좌측의 토크는 약 2,159~7,393 Nm의 범위를 보이며, 후륜 우측의 토크는 약 2,122~8,724 Nm의 범위로 나타남.



< 원판쟁기의 주행 A-4단 & PTO 2단 작업 시 차축 토크 >

: 트랙터의 PTO 토크는 작업구간에서 약 70~319 Nm의 범위를 보이며, 약 100 sec의 작업 시간을 나타냄.



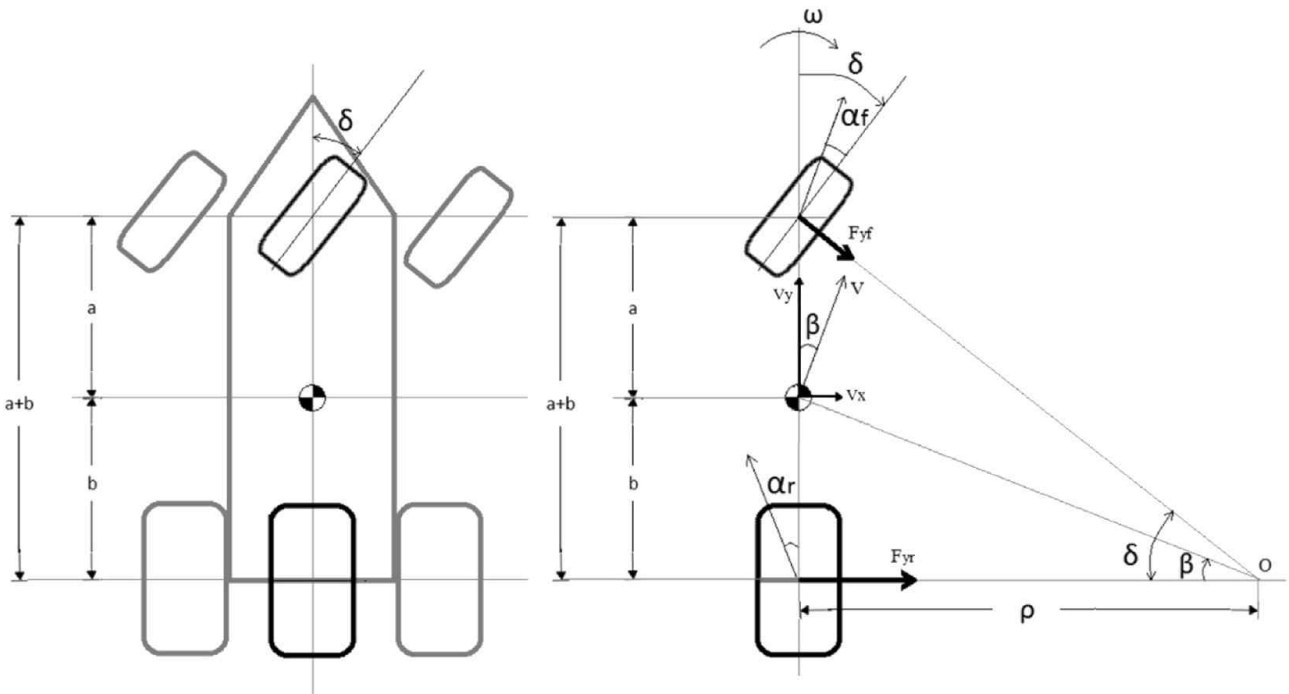
< 원판쟁기의 주행 A-4단 & PTO 2단 작업 시 PTO 토크 >

- : 엔진 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 189.6, 121.2, 26.9 Nm로 나타남.
- : 엔진 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 45.4, 29.5, 6.5 kW로 나타남.
- : 전륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3119.8, 1780.4, 366.1 Nm로 나타났으며, 전륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 5.4, 3.6, 0.8 kW로 나타남.
- : 전륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 3683.2, 1480.8, 380.2 Nm로 나타났으며, 전륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 5.6, 3, 0.8 kW로 나타남.
- : 후륜 좌측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 7392.8, 2982, 764.6 Nm로 나타났으며, 후륜 좌측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 7.6, 4.3, 1.1 kW로 나타남.
- : 후륜 우측 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 8723.7, 3261.8, 787.6 Nm로 나타났으며, 후륜 우측의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 9.1, 4.7, 1.1 kW로 나타남.
- : PTO 토크의 최대, 평균, 표준편차는 각각 318.6, 177.7, 50.4 Nm로 나타났으며, PTO의 출력은 최대, 평균, 표준편차 각각 25.1, 14.1, 4 kW로 나타남.

구분		최대	평균	표준편차	
엔진	토크(Nm)	189.6	121.2	26.9	
	출력(kW)	45.4	29.5	6.5	
차축	전륜 좌측	토크(Nm)	3,119.8	1,780.4	366.1
		출력(kW)	5.4	3.6	0.8
	전륜 우측	토크(Nm)	3,683.2	1,480.8	380.2
		출력(kW)	5.6	3.0	0.8
	후륜 좌측	토크(Nm)	7,392.8	2,982.0	764.6
		출력(kW)	7.6	4.3	1.1
	후륜 우측	토크(Nm)	8,723.7	3,261.8	787.6
		출력(kW)	9.1	4.7	1.1
PTO	토크(Nm)	318.6	177.7	50.4	
	출력(kW)	25.1	14.1	4.0	

< 원판쟁기의 주행 A-4단 & PTO 2단 작업 시 부하 분석 결과 >

- ⑧ 농작업 종류, 작업 속도에 따른 트랙터 작업 안정성 시뮬레이션 및 자율주행 트랙터의 작업 안정성 분석
 - ㉠ 주요 분석 요소
 - ① 차량 동역학
 - 차량의 파라미터를 이용하는 동역학 모델은 2자유도 bicycle model을 이용하여 나타낼 수 있음.



< Bicycle model의 개략도 >

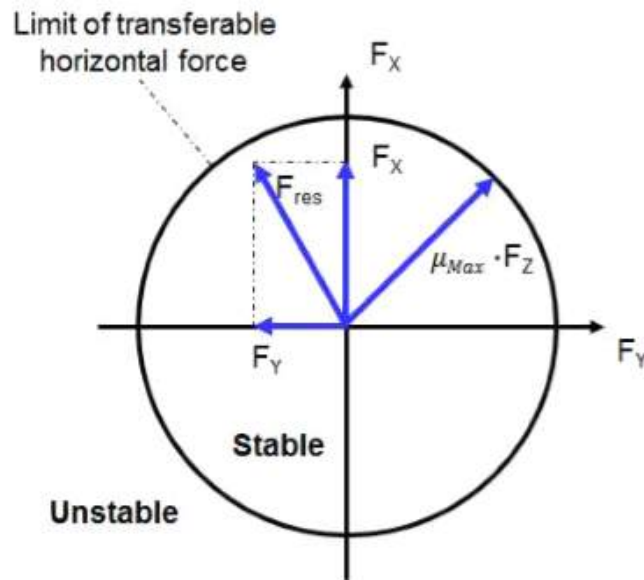
- bicycle model의 횡방향 운동과 차량의 중심점을 통과하는 연직 축 둘레의 yaw 운동은 상태방정식으로 나타내면 다음의 식과 같음.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_f - C_r}{mV} & \frac{-aC_f + bC_r}{mV^2} - 1 \\ \frac{-aC_f + bC_r}{I_{zz}} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{I_{zz}V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mV} \\ \frac{aC_f}{I_{zz}} \end{bmatrix} \delta$$

- 동역학 모델은 차량의 질량(m), 요관성 모멘트(Iz), 타이어 강성계수(Cf, Cr), 중심점에서 전·후륜 축간거리(a, b)등의 차량 파라미터가 포함되어 있음.

② 노면 마찰계수

- 차량의 동력 또는 토크를 노면으로 원활하게 전달하기 위해서는 타이어와 노면 간의 접촉이 원활하게 이루어져야 함. 또한 타이어와 노면 간의 최대 마찰계수의 크기에 따라 주행의 한계, 헛돌음, 차량의 불안전성 등이 발생하게 됨.
- 타이어와 노면은 상호작용하는 힘의 모멘트에 의해 밀착되어 있고, 안정된 주행 상태를 유지하기 위해서는 타이어 종방향 힘과 수직방향 힘의 비인 현재 마찰계수(μ)가 최대 마찰계수(μ_{max})보다 작거나 같아야 함(Kamm의 마찰원(Friction circle) 원리).



< Kamm의 마찰원(Friction circle) 원리 >

- Kamm의 마찰원 원리를 이용하여 타이어의 종방향 힘, 수직방향 힘, 최대마찰계수와 현재 마찰계수 간의 관계를 다음 식과 같이 정의됨.

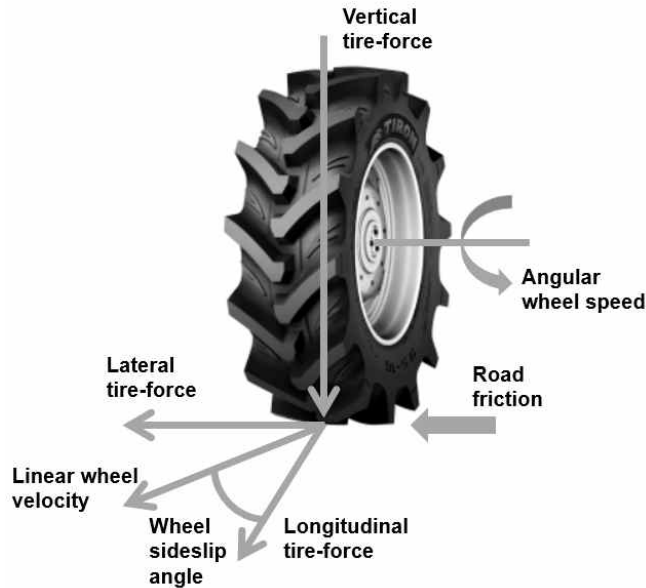
$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\mu = \frac{F_{res}}{F_z} = \frac{\text{Wheel Force}}{\text{Wheel Load}}$$

$$\mu \leq \mu_{max}$$

③ 타이어 모델

- 동역학 측면에서의 차량의 측면 미끄러짐을 고려하기 위해 고안되었기 때문에 적절한 타이어 계수의 선정을 진행.
- 타이어 계수로는 Radial stiffness, Radial damping ratio, Longitudinal stiffness, Lateral stiffness, camber stiffness, rolling resistance, Friction factor를 선정
- 트랙터의 경우 러그라는 특수한 형상을 가지고 있는 제품이기 때문에 일반적인 타이어 모델을 사용하기 위해서는 적절한 계수선정이 이루어져야 함.



< 타이어 모델 >

- 대부분의 계수는 선행연구에서 진행 된 계수들을 참고하여 선정
- Longitudinal stiffness는 차량의 견인력 및 추진력을 통해 계산을 통해 선정
- 타이어 제원을 통해 운동저항계수, 점토 주행 상수를 예측하고 이를통해 차량의 견인력을 예측하는 식을 사용하여 구성

$$K = \frac{F(\text{Longitudinal Force})}{\text{Longitudinal slipratio}}$$

$$M_c = \frac{Clbd}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{2d}} \right)$$

$$R_h = W \left(\frac{0.2}{M_c - 1.35} + 0.04 \right)$$

$$NT = \frac{T}{r} - R_h$$

㉠ 시뮬레이션 구성

① 소프트웨어

- 시뮬레이션은 안정적이며 신뢰할 수 있는 다물체 동역학 해석 소프트웨어 (Multibody Dynamics Simulation Software: MBD Software) 소프트웨어인 RecurDyn (ver.V9R2, FunctionBay, Korea)을 이용

- MBD 기술을 활용하여 실제로 기계 시스템을 제작하지 않아도 가상의 모델을 만들고, 이를 시뮬레이션 함으로써 제품의 설계 및 개발 공정에 필요한 비용과 시간을 크게 절감할 수 있음. 실제로 MBD는 MFBD와 더불어 시스템의 동적인 거동 예측이나 하중 계산, 진동 문제가 포함된 자동차, 항공우주, 산업기기, 건설기기, 전기전자, 방위산업과 같은 분야, 또 정밀한 제어가 필요한 로봇과 같은 메카트로닉스 시스템이나 엔진 내의 윤활유, 세탁기와 같이 유체와 기계 시스템이 상호작용을 하는 해석에 이르기까지 확장된 영역에서도 널리 활용

② 트랙터 모델의 제원

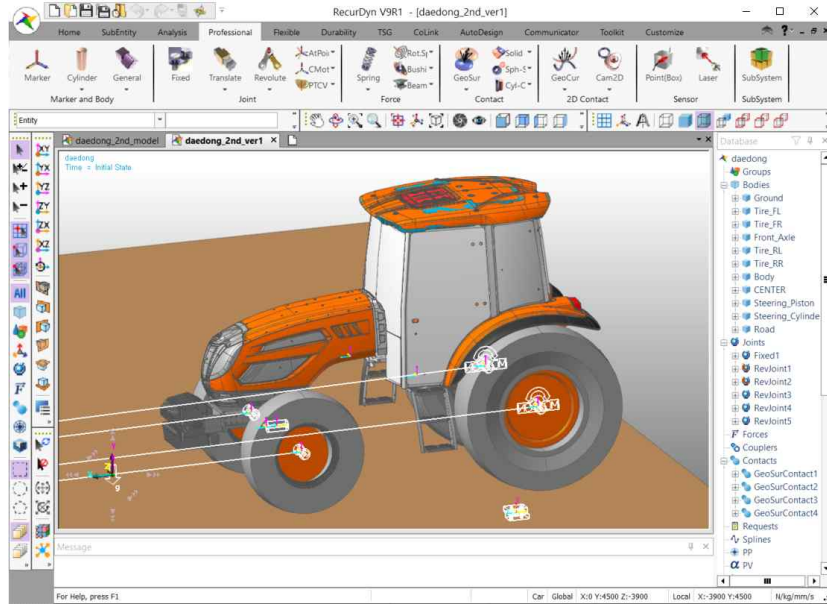
- 시뮬레이션 해석에 사용된 트랙터(PX1150PSC, Daedong, Korea)의 세부제원은 총 길이 4,290 mm, 폭 2,250 mm, 높이 2,860 mm이며, 총 중량 4,020 kg 이며, 축간거리는 2,370 mm, 차륜거리는 각각 전방 1,680 mm, 후방 1,790 mm로 설정함. 차량의 무게중심은 뒷 차축으로부터 958 mm, 지면으로부터 1,018 mm로 설정함. 타이어의 제원은 전방 타이어는 13.6-24 8PR, 후방 타이어는 18.4-34 10PR로 설정함.

구분		제원
길이 × 폭 × 높이 (mm)		4,290 × 2,250 × 2,860
중량 (kg)		4,020
축간거리 (mm)		2,370
차륜거리	전륜 (mm)	1,680
	후륜 (mm)	1,790
무게중심	후차축과의 거리 (mm)	958
	지면과의 거리 (mm)	1,018
타이어	전륜	13.6-24 8PR
	후륜	18.4-34 10PR

< 시뮬레이션에 사용된 트랙터의 제원 >

③ 차체 모델

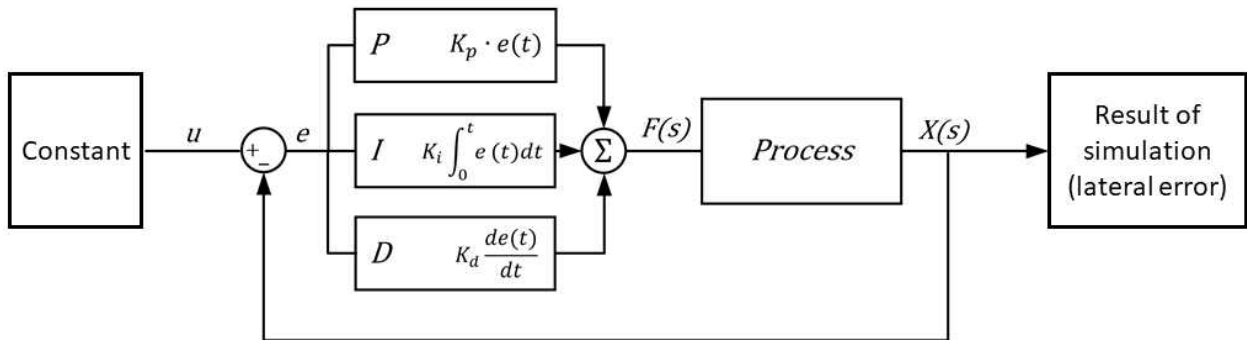
- 농업용 트랙터의 모델의 경우 차체(Car body)와 전차축(Front axle), 너클암(Nuckle arm) 및 타이어(Tire)로 구성됨.
- 차량의 운동은 관성 좌표계(Inertial reference frame)에 대해 차체와 각 바퀴에 고정된 좌표계의 위치와 회전에 의하여 기술할 수 있음.
- 전체 모델을 지오메트리로 구성하여 모델을 구성하게 되면 해석에 대한 시간이 오래 걸리기 때문에 간소화를 통해 모델을 단순화 시켜 진행함. 차량은 전차축, 차량바디, 너클암 및 4개의 타이어로 간소화를 통해 단일 지오메트리로 구성함.



< 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 트랙터 모델 >

④ 조향 모델

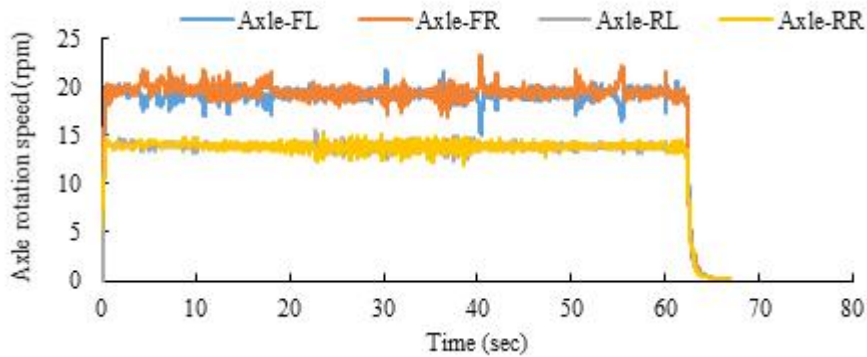
- Recurdyn의 Co-link 모델을 활용하여 운전자 모델을 구성하였으며, PID컨트롤을 통한 단순 제어모델로 구성
- 제어기 모델의 경우 현재 상용화 되어있는 자율주행 트랙터의 자율조향장치 수준으로 구성
- 시뮬레이션에서 Lateral error값을 실시간으로 수신하여 PID컨트롤러에서 처리한 후 이를 통해 조향장치의 움직임을 제어



< 시뮬레이션에 사용된 PID 제어기 모델 >

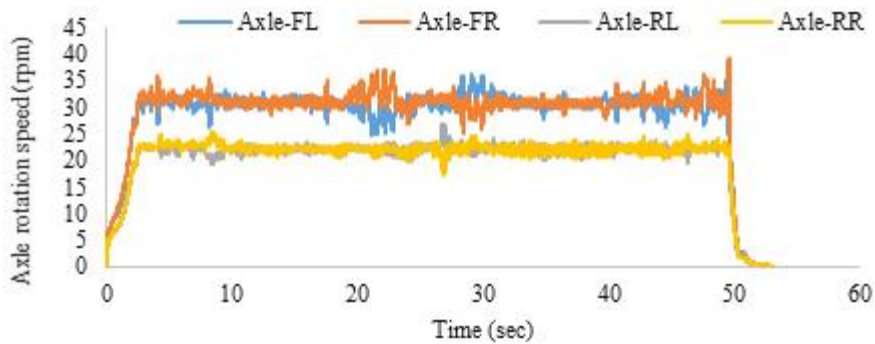
⑤ 시뮬레이션 조건

- 쟁기 작업을 통해 실측된 부하데이터를 속도에 따라 트랙터의 차축 회전수를 입력하여 시뮬레이션 진행함. 총 3가지의 속도(4 km/h, 6.5 km/h, 8.3 km/h)로 구분함.
- : 트랙터의 쟁기 작업 속도 4 km/h일 때, 작업 시간은 67 sec이며, 각 차축의 부하데이터는 다음의 그래프와 같음.



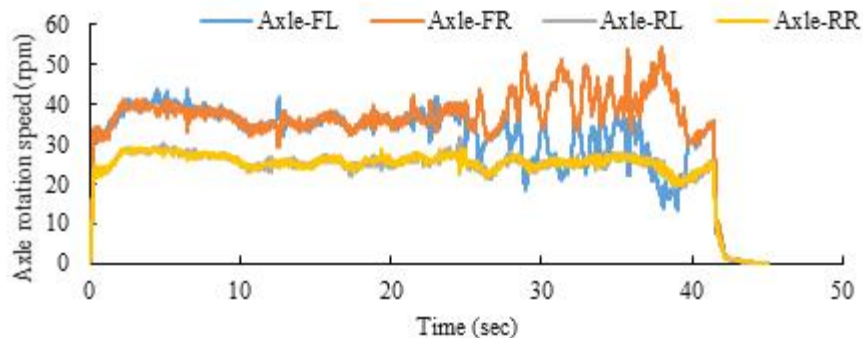
< 트랙터의 쟁기 작업 속도 4 km/h일 때의 각 차축 회전수 >

: 트랙터의 쟁기 작업 속도 6.5 km/h일 때, 작업 시간은 53 sec이며, 각 차축의 부하 데이터는 다음의 그래프와 같음.



< 트랙터의 쟁기 작업 속도 6.5 km/h일 때의 각 차축 회전수 >

: 트랙터의 쟁기 작업 속도 8.3 km/h일 때, 작업 시간은 45 sec이며, 각 차축의 부하 데이터는 다음의 그래프와 같음.



< 트랙터의 쟁기 작업 속도 8.3 km/h일 때의 각 차축 회전수 >

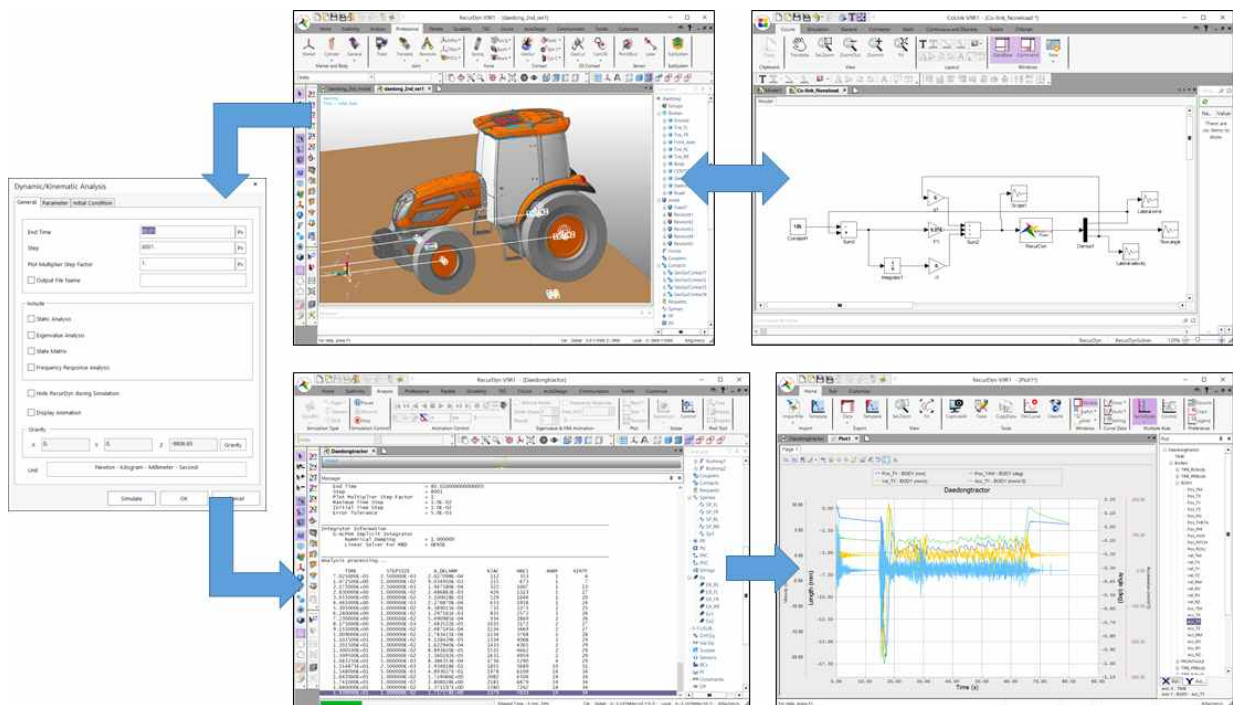
- 토양 조건에 따라 마찰계수, 구름저항계수가 달라짐. 국내 논 토양은 대부분 양질 계통임. 따라서 건조한 양토와 습한 사양토 조건으로 나누어 시뮬레이션 수행함.
: 각 토양 조건에 따른 마찰계수와 구름저항계수는 다음의 표와 같이 입력함.

항 목	마찰계수	구름저항계수
건조한 양토	0.65	0.05
습한 사양토	0.55	0.08

< 토양 조건에 따른 마찰계수 및 구름저항계수 >

㉔ 시뮬레이션 결과

① 시뮬레이션을 통해 분석할 data 선정 후 시뮬레이션을 하면 다음 그림과 같은 순서로 RecurDyn 내에서 결과값이 계산되어짐. 설정이 끝나고 시뮬레이션을 하면, 소프트웨어 내의 자체 solver로 계산되어지고 그 결과값은 animator와 plot창으로 나오게 됨.

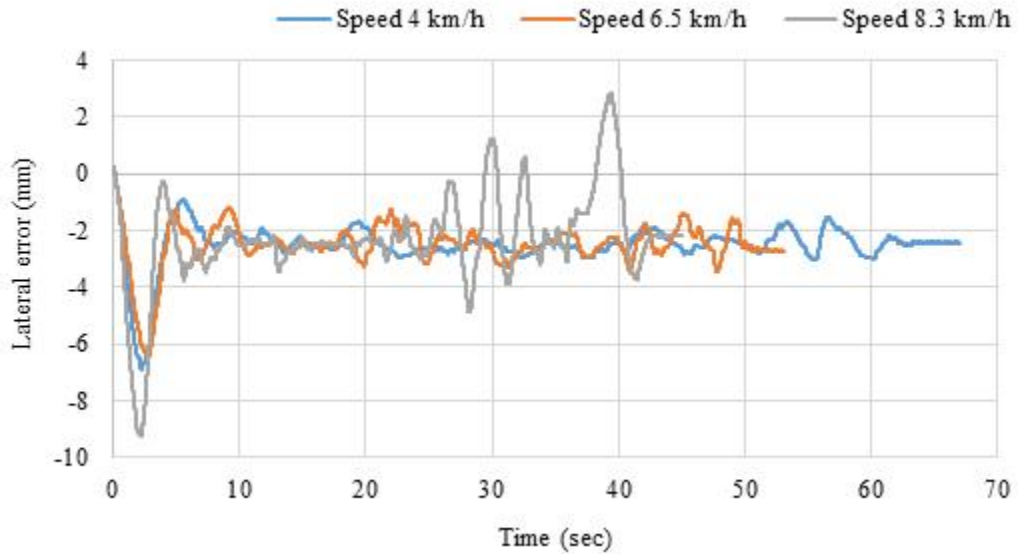


< RecurDyn 시뮬레이션의 프로세스 >

② 건조한 양토 조건에서의 쟁기 작업 속도에 따른 분석

- Lateral error 분석

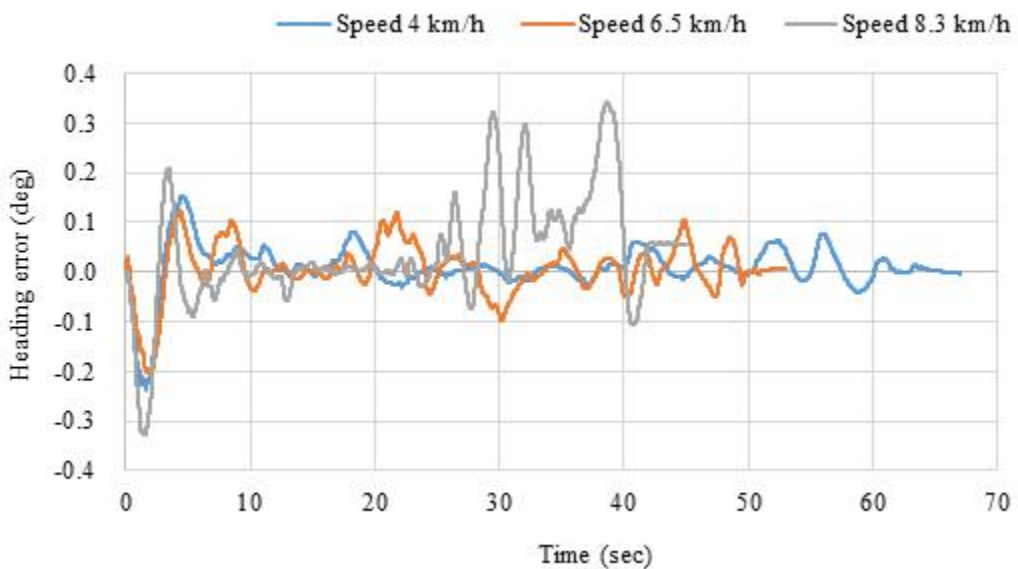
: 4 km/h 속도일 때 Lateral error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.62, 0.22, 0.77 mm를 나타내며, 6.5 km/h 속도에서 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.64, 0.22, 0.82 mm로 보임. 또한 8.3 km/h 속도에서 Lateral error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.86, 0.22, 1.71 mm를 나타냄.



< 건조한 양토 조건에서의 속도별 Lateral error >

- Heading error 분석

: 4 km/h 속도일 때 Heading error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.048, 0.002, 0.047 deg를 나타내며, 6.5 km/h 속도에서 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.054, 0.002, 0.054 mm로 보임. 또한 8.3 km/h 속도에서 Heading error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.119, 0.002, 0.113 mm를 나타냄.

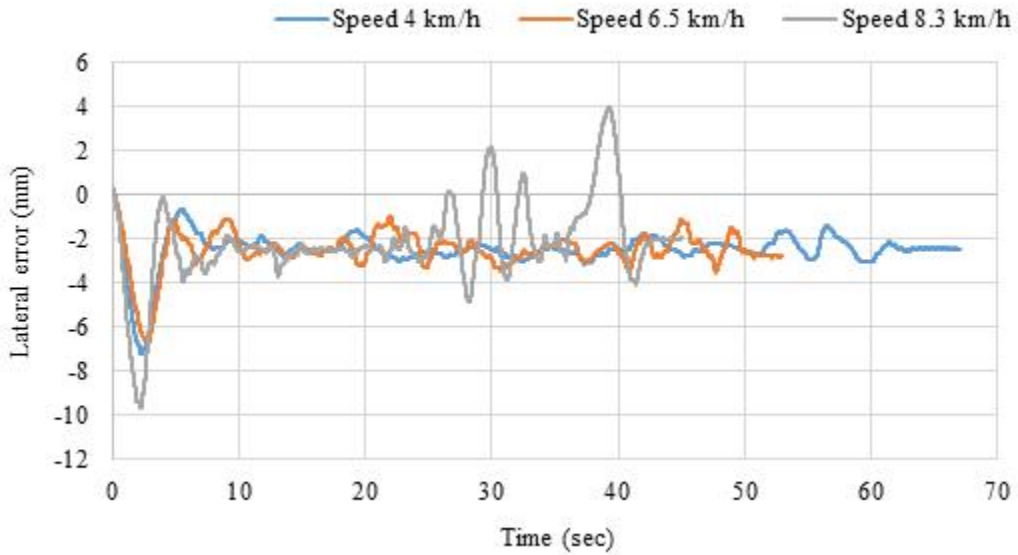


< 건조한 양토 조건에서의 속도별 Heading error >

③ 습한 사양토 조건에서의 쟁기 작업 속도에 따른 분석

- Lateral error 분석

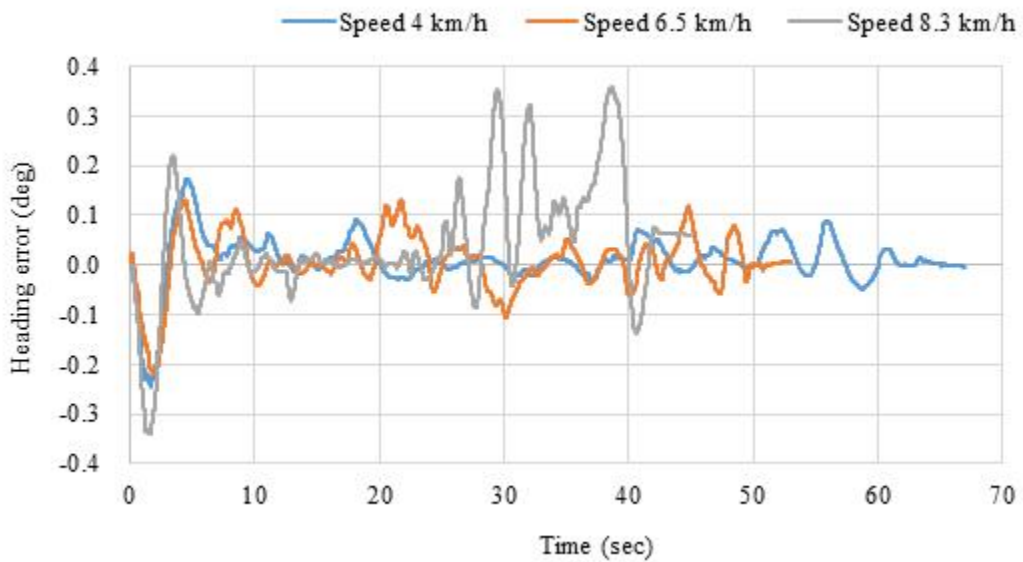
: 4 km/h 속도일 때 Lateral error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.63, 0.22, 0.83 mm를 나타내며, 6.5 km/h 속도에서 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.66, 0.22, 0.89 mm로 보임. 또한 8.3 km/h 속도에서 Lateral error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 2.93, 0.22, 1.96 mm를 나타냄.



< 습한 사양토 조건에서의 속도별 Lateral error >

- Heading error 분석

: 4 km/h 속도일 때 Heading error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.051, 0.002, 0.05 deg를 나타내며, 6.5 km/h 속도에서 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.058, 0.002, 0.058 mm로 보임. 또한 8.3 km/h 속도에서 Heading error의 RMSE, 평균, 표준편차는 각각 0.126, 0.002, 0.119 mm를 나타냄.



< 습한 사양토 조건에서의 속도별 Heading error >

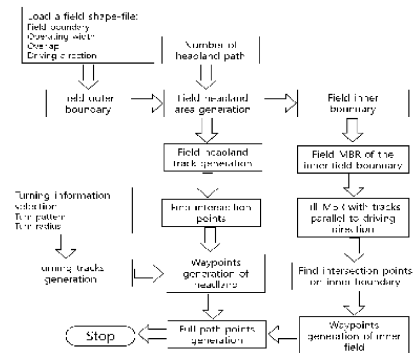
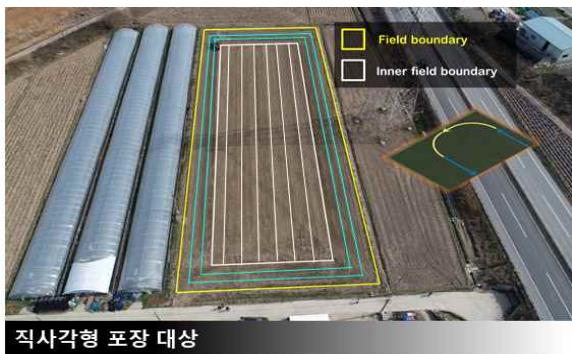
바. 위탁연구기관 2 (서울대학교)

㉔ 자율주행 트랙터를 위한 경로생성 및 추종 알고리즘 모듈화

㉔ 직교형 포장에서 C형 새머리 선회 기반의 경로 생성 알고리즘

㉔ 자율주행 경운 작업 경로 구성

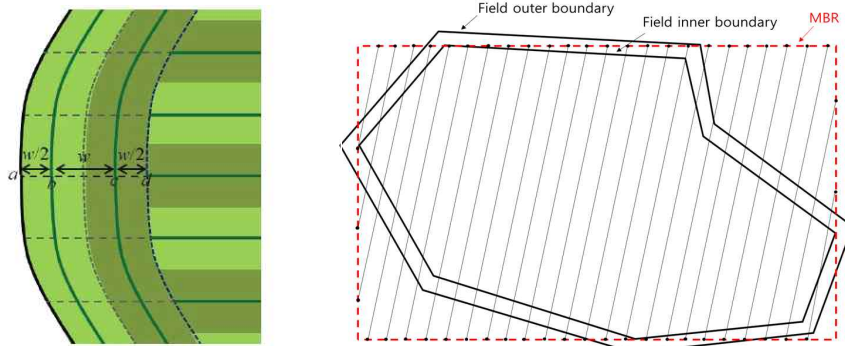
- 직교형 포장에서 주행 경로 구성은 그림 1과 같이 내부 왕복작업, C형 새머리 선회, 회경 경로로 구성됨
- 입력값은 트랙터 최소회전반경, 작업폭, 포장경계점, 작업 겹침량, 작업 및 선회속도, 회경 작업횟수
- 출력값은 각 경로 지점 별 경위도 좌표, 속도, 지점 도착 판별 정밀도, 작업기 제어 명령이 포함 된 RDDF (Route description data file) 정보
- RDDF 파일은 경로추종 알고리즘에 입력되어 기준경로, 속도 및 작업기 제어 명령 제원으로 사용됨



< 경로생성 알고리즘 개요 (좌) 알고리즘 흐름도 (우) >

㉔ 내부왕복 작업 경로 생성 방법

- 포장 내부 왕복 작업영역은 입력된 포장경계를 회경 횟수만큼 안쪽으로 평행이동시켜 생성하였으며, 회경 횟수는 3회로 가정하였음 (사용자 편의에 따라 회경 횟수는 조절 가능)
- 포장 내에서 미경지 작업영역의 발생 방지를 위하여 MBR(Minimum Bounding Rectangle) 원리 기반으로 왕복 직진 작업 경로를 생성
- 장변방향과 작업 폭 그리고 겹침량을 이용하여 MBR내에서 직진 왕복주행 경로를 생성한 후, 평행선과 포장 내부 경계선의 교차점을 식 (1)과 (2)를 이용해 도출하여, 각 작업구간의 시작점과 종료점으로 정의



< 내부 작업영역 생성 방법 (좌) MBR기법으로 생성 된 왕복 작업 시작점과 종료점 (우) >

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\tan\theta \\ 1 & -\tan\psi_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_i - x_i \cdot \tan\theta - \frac{n(w-w_o)}{\cos\theta} \\ y_i - x_i \cdot \tan\psi_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\tan\theta \\ 1 & -\tan\psi_{i+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_i - x_i \cdot \tan\theta - \frac{n(w-w_o)}{\cos\theta} \\ y_i - x_i \cdot \tan\psi_{i+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where, θ = 포장 장변 방향 ($^\circ$)

ψ_i = 포장 내부 i 번째 경계선의 방향 ($^\circ$)

w = 작업기 폭 (m)

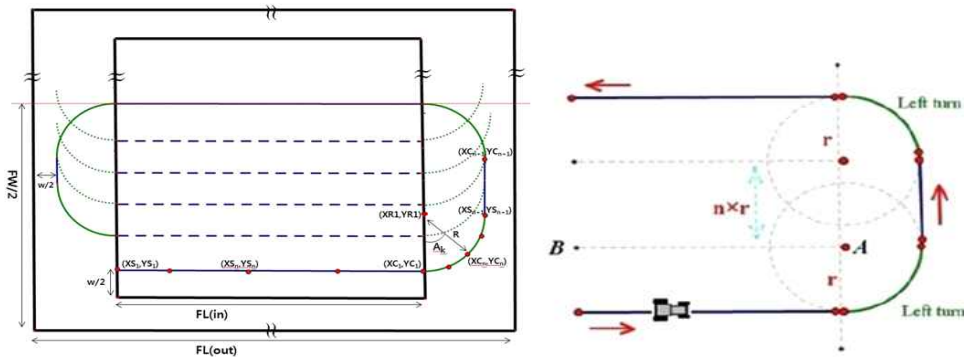
w_o = 작업 겹침량 (m)

x_i, y_i = MBR의 평행선 시작점 (m)

x_{i+1}, y_{i+1} = MBR의 평행선 끝점 (m)

㉞ C형 새머리 선회 생성 방법

- 내부왕복 작업은 가장 바깥 열부터 시작하여, C형 새머리 선회 경로를 따라 중간에 위치한 작업 열로 진입하며, 시계 또는 반시계방향으로 위와 같은 작업을 순차적으로 반복하며 내부왕복 작업 수행
- 각 왕복 작업 경로의 시작점과 종료점, 트랙터의 최소 회전반경, 작업기 폭, 겹침량을 식 3에 대입하여 반원 경로를 생성



< C형 새머리 선회 경로 개요 (좌) 수학적 모델 (우) >

$$\begin{cases} XC_n = XR_1 + R \times \cos(A_k) \\ YC_n = YR_1 + R \times \sin(A_k) \end{cases} \quad (3)$$

where, XR_1 = 내부왕복 작업경로 종료점 위도 (m)

YR_1 = 내부왕복 작업경로 종료점 경도 (m)

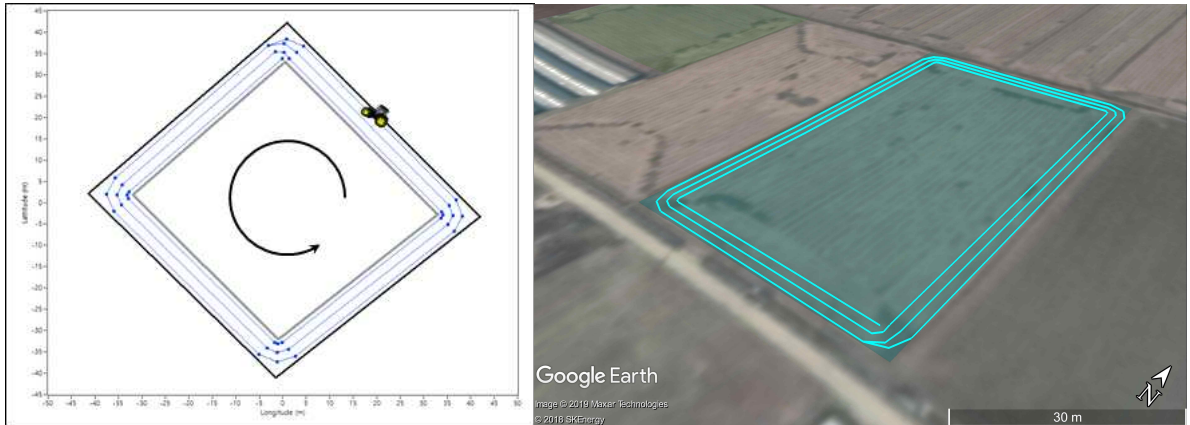
R = 트랙터 최소 회전반경 (m)

A_k = 새머리 선회 생성 각도 분해능 ($^\circ$)

㉞ 회경 작업 경로

- 회경 작업 경로는 3개의 지점으로 구성 됨 : 회경 선회 진입점, 중간점, 탈출점
- 진입점과 탈출점은 내부 작업영역의 각 변의 연장선상에 위치한 점이며, 사용자가 정의한 회경 작업횟수, 작업폭, 겹침량에 따라 개수와 간격이 정해짐
- 진입점과 탈출점은 내부 작업영역 경계의 연장선과, 포장 경계를 작업폭과 겹침량의 차에 만큼 평행이동한 선분의 교점으로 계산
- 중간점은 진입점, 탈출점의 경위도 좌표와 식(4)와 (5)를 이용해 계산

- 최외곽에 위치한 회경 경로에서부터 안쪽으로 순차적으로 작업



< 회경 작업경로 예시 >

$$\begin{cases} XP = \frac{(x_1 + y_1 a - ab) \pm \sqrt{(x_1 + y_1 a - ab)^2 - (1 + a^2)(x_1^2 + y_1^2 - 2y_1 b + b^2 - |R^2 - L^2|}}{1 + a^2} \\ YP = aXP + b \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a = -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ b = \left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) - a\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

where, (x_1, y_1) = 진입점 경위도 좌표 (m)

(x_2, y_2) = 탈출점 경위도 좌표 (m)

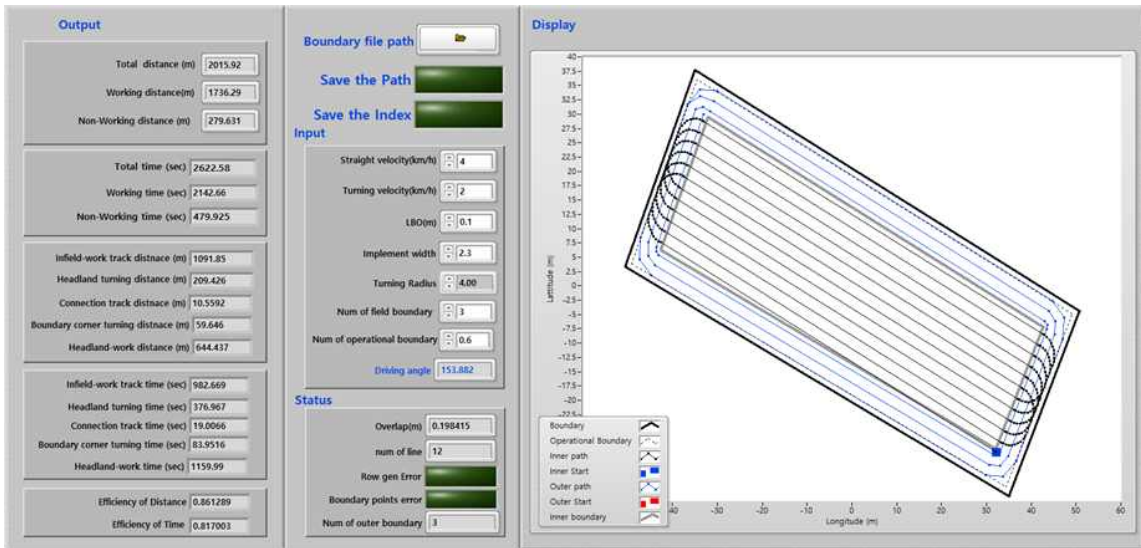
R = 트랙터 최소 회전반경 (m)

L = 진출점과 탈출점 간 직선거리 (m)

⑧ 경로생성 알고리즘 개발 및 모듈화

㉠ 경로생성 모듈 Layout

- 개발된 경로생성 프로그램은 대상 포장의 경계점 정보(TM좌표)를 미리 취득하여 시계 또는 반시계 순서에 상관없이 입력
- 사용자가 입력으로 작업 및 선회속도, 작업기 폭, 최소 선회반경을 설정 가능하며, 기본값으로 설정된 지점 도착 판별 정밀도(10cm), 회경 횟수(3회)로 생성
- 생성 된 경로는 우측의 화면에 표시됨
- 좌측 Indicator를 통해 설정된 속도로 생성된 경로를 주행했을 때, 예상 작업시간 과 작업 거리를 사용자에게 제공 가능
- 생성 된 경로와 본 경로에서의 예상 작업시간 및 거리는 중앙에 위치한 스위치를 On상태로 check후 실행시키면, 지정된 경로에 text 파일로 저장됨
- 개발된 경로생성 모듈을 ㈜동양물산에 전달



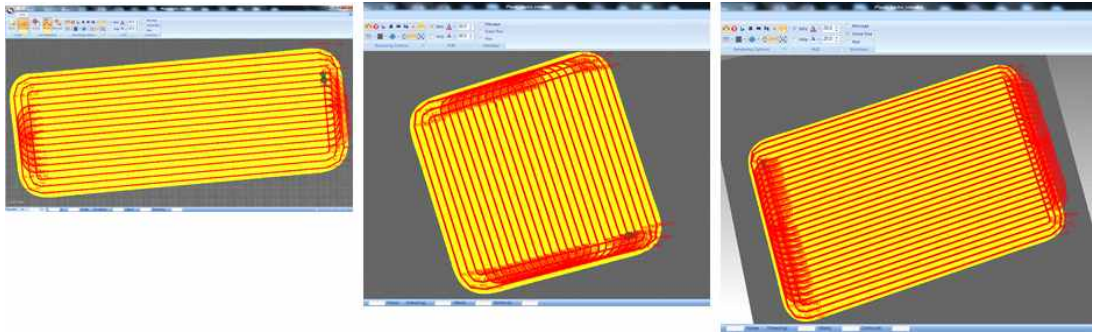
< 경로생성 모듈 화면 >

㉠ 실제 포장에서의 경로생성 모듈 적용 테스트

- GPS로 측정된 실제 포장의 경계점 정보와 (주)동양물산의 TX803 트랙터재원 (작업 폭 2.3m, 최소 선회반경 4m)을 활용해 경로생성 모듈 적용 테스트 수행
- 대상 포장은 3가지로, 충남 논산시에 위치한 크기가 다른 직사각형 포장
- 대상포장 1 : 충남 논산시 상월면 산성리 192-5 ($39 \times 97m^2$)
- 대상포장 2 : 충남 논산시 상월면 산성리 239-2 ($29 \times 54m^2$)
- 대상포장 3 : 충남 논산시 상월면 주곡리 371-9 ($65 \times 99m^2$)
- 경로생성 결과, 크기가 다른 3가지 대상 포장에서 경로생성이 0.1초 이내에 가능함이 확인되었으며, 생성된 경로를 Google earth에 도시화하여 확인함
- 추가로, 이전에 개발된 서울대학교 자율주행 트랙터 시뮬레이터를 활용해생성된 경로의 추종 가능성을 확인하였으며, 시뮬레이터의 작업영역 표시 기능을 통해 포장 내 미작업 영역이 발생하지 않는 작업기 명령이 가능함을 확인



< 자율주행 경로생성 모듈 적용 테스트 대상 포장정보 및 결과 >

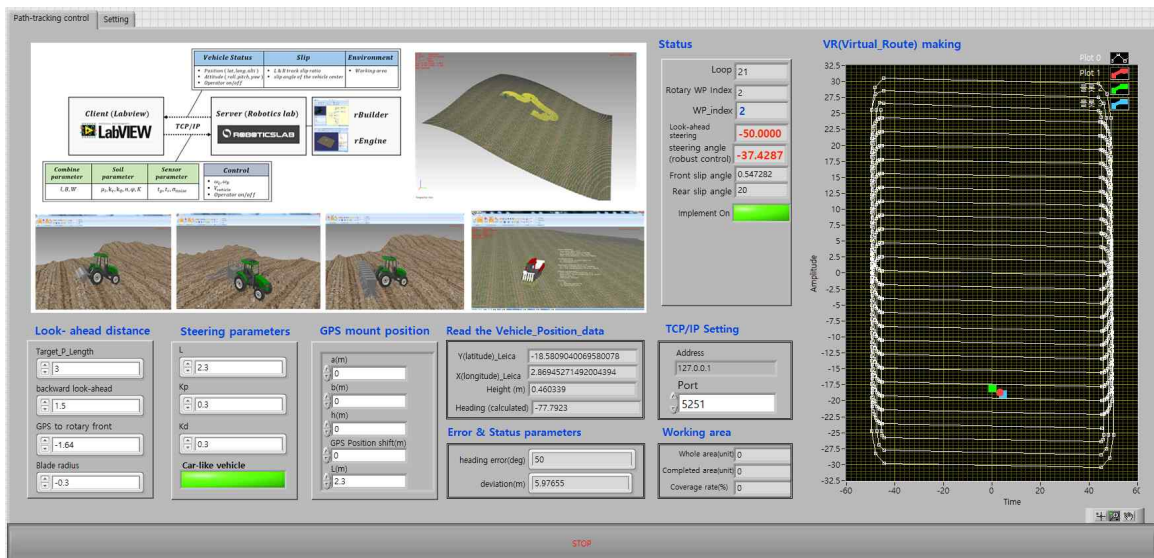


< 시뮬레이터를 활용한 생성 된 경로의 주행가능성 확인 및 작업수준 확인 결과 >

③ 경로추종 알고리즘 개발 및 모듈화

① 경로추종 모듈 Layout

- 개발된 경로추종 모듈은 경로생성 모듈에 의해 만들어진 RDDF 정보로부터 기준 경로와 각 지점 추종 시 속도, 작업기 상태 명령 정보를 불러 들어옴
- GPS로 측정된 트랙터 현재 위치와 기준경로 간 상대적 거리 차(측면변위)와 방향 차(방향각 변위)를 실시간으로 계산하여, 이를 조향각 생성에 활용함
- 사용자 입력으로 전방주시 거리, 작업기와 GPS간 거리, 작업기 중심으로부터 작업기 끝까지 거리를 입력하며, 고급설정으로 조향 감도를 조절할 수 있는 매개변수 튜닝 값(K_p, K_d) 입력이 가능함
- 사용자는 오른쪽 Display 그래프로 기준경로와 실시간 트랙터 위치를 확인할 수 있으며, 가운데 위치한 상태정보창으로 현 조향각, 예측 슬립각, 현 추종 지점, 기준경로와의 측면변위와 방향 변위 값을 실시간으로 관찰할 수 있음
- 경로추종 모듈은 (1) IMU자세 정보를 활용한 실시간 차체 기울어짐 보상, (2) 토양에 의한 차체 슬립 보상 조향각 생성, (3) 미경지 방지를 위한 지능형 작업기 상하강 제어 알고리즘으로 구성되어 있음



< 경로추종 모듈 Layout >



차체 기울어짐 보상



슬립 고려 조향각 생성

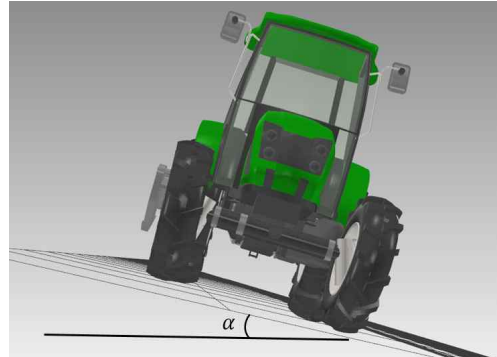
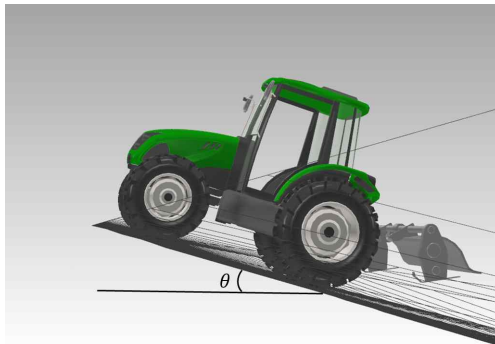


미경지 방지 작업기 제어

< 경로추종 모듈 설계조건 (1) 차체 기울어짐 보상 (2) 슬립 고려 조향각 생성 (3) 미경지 방지 작업기 제어 >

㉠ 차체 기울어짐 보상 알고리즘 및 기초실험

- 트랙터가 포장에서 주행 시 정밀한 위치 추종을 위해서는 정밀한 위치 정보를 얻는 것이 필요
- 트랙터에 장착된 GPS는 포장의 경사지 혹은 불규칙 노면 상태에 의해 롤, 피치의 영향을 크게 받게 되며 트랙터의 실제 위치와 지면상 위치 차이 발생
- 정확한 경로탐색을 진행하기 위해 트랙터에 장착된 IMU에서 출력한 롤 피치 값을 이용 노면 경사에 의한 위치 오차를 보상하는 식을 고안
- GPS 위치 오차 보상 방법은 식 7을 이용하여, 지면 대비 차체의 롤, 피치 기울어짐에 의한 위·경도방향의 변위를 계산하여 이를 GPS에서 취득된 위·경도에 반영함



< 포장의 경사지 혹은 불규칙 노면 상태에 의한 GPS 정보 오차 >

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot E^{-1}(\psi, \theta, \alpha) \quad (6)$$

$$E^{-1}(\psi, \theta, \alpha) = E(-\psi, -\theta, -\alpha) = \begin{pmatrix} \sin\alpha \sin\theta \sin\psi + \cos\alpha \cos\psi \cos\theta \sin\psi & \sin\alpha \cos\psi - \cos\alpha \sin\theta \sin\psi \\ \sin\alpha \sin\theta \cos\psi - \cos\alpha \sin\psi \cos\theta \cos\psi - \sin\alpha \sin\psi - \cos\alpha \sin\theta \cos\psi \\ -\sin\alpha \cos\theta & \sin\theta & \cos\alpha \cos\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

Where, X_c, Y_c, Z_c : Corrected position of GPS

X_r, Y_r, Z_r : Raw position of GPS

a, b, c : Distance from the COG to GPS

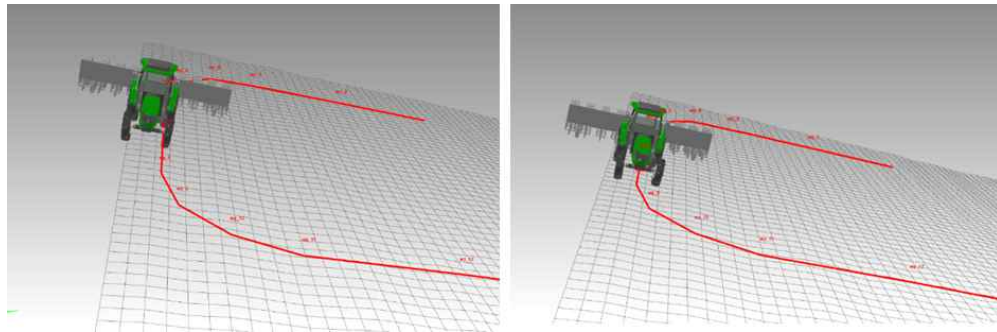
ψ : Heading angle of IMU

θ : Pitch angle of the IMU

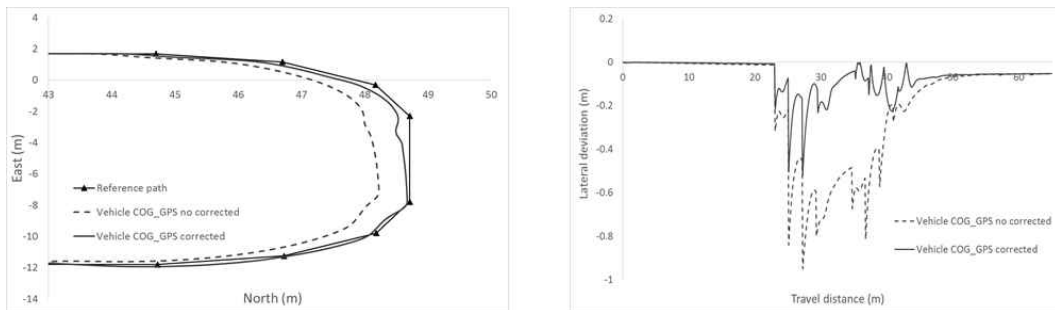
α : Roll angle of the IMU

- 시뮬레이션을 이용한 차체 기울어짐 보상 알고리즘 기초평가

- 개발한 자율주행 트랙터 시뮬레이터 상에서 GPS 보정 알고리즘을 적용한 전과 후의 주행 결과 비교
- GPS 위치의 경사지 영향 값을 보정한 결과 트랙터의 중심부(GPS 부착 위치)가 기준 경로에 더 근접하는 것을 확인
- 제시한 데이터를 관찰하면 트랙터 직진주행에서는 GPS가 경사지의 roll 방향 영향을 받지 않기 때문에 Lateral deviation이 영향받지 않지만, 회전 주행에서는 위치 정보 보정 알고리즘을 적용한 후 더욱 정밀하게 추종한 것이 관찰되어 개발한 경사지 보정 알고리즘의 효용성을 확인



< 경사진 지면에서 GPS 신호 보정 전(좌) 후(우) 시뮬레이션 실험 >



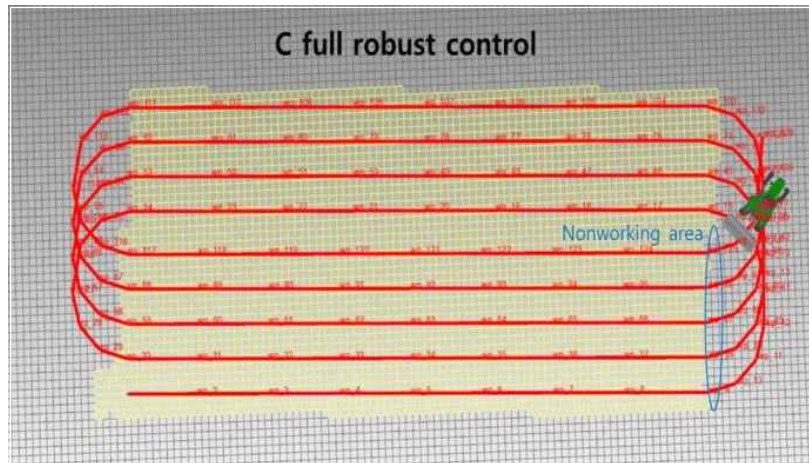
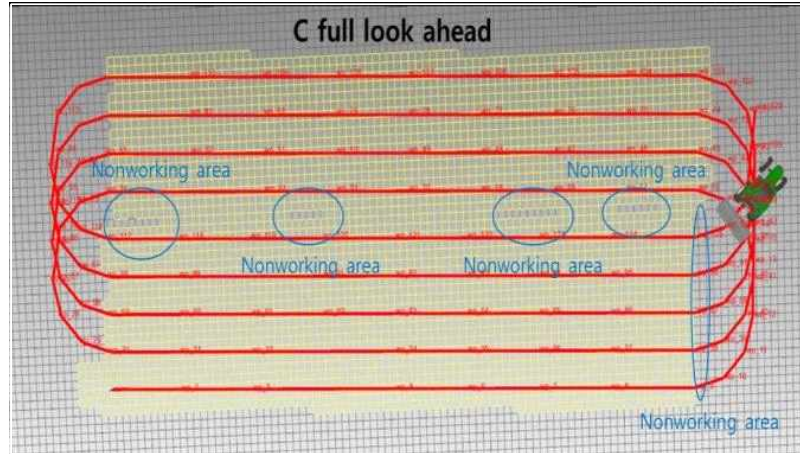
< Improvement a GPS correction algorithm using simulator >

㉔ 토양에 의한 차체 슬립 보상 조향각생성 알고리즘 모듈화 및 기초실험

- 시뮬레이션을 이용한 동적 경로 추종 알고리즘 기초평가
 - 1차년도에 개발된 EAKM기반의 조향각 생성 알고리즘과, 슬립 예측기를 모듈화하고 이를 시뮬레이션을 통해 기초실험 수행
 - 개발한 강인 동적 경로 추종 알고리즘의 주행 성능을 평가하기 위해 자율주행 트랙터(TX803 모델)에 적용된 Look-ahead 경로추종 알고리즘을 이용 가상 시뮬레이터 환경에서 비교분석을 진행
 - 전체 포장에 대해 자율주행 작업 성능을 평가하기 위해 길이가 50 m, 폭이 20 m 크기의 포장에서 C형 선회 패턴 기반의 내부 왕복 작업 경로를 생성
 - 시뮬레이터 환경에서 슬립 없는 노면과 슬립 존재한 노면 상태를 구성하여 각 노면 상태에서 두 가지 경로추종 알고리즘의 주행 성능을 각각 평가
 - 전체 주행의 RMS 위치 오차는 표1와 같이 동적 경로추종 알고리즘은 10.9 cm으로 나타났으며 Look-ahead 경로추종 기반의 RMS 위치 오차인 16.4 cm 보다 작게 나타난 것으로 판단
 - 또한 동적 경로추종 알고리즘을 사용 시 미작업 영역이 11.8 m² 나타났으나 Look-ahead 경로 추종 알고리즘을 사용시 미작업 영역이 총 18.3 m²로 나타나

동적 경로 추종 알고리즘보다 더 많은 미작업 영역 발생

- 포장의 전체 작업 성능을 평가하기 위해 표2와 같이 트랙터의 실제 작업 면적, skip면적 및 포장 작업효율 등을 제시하여 비교분석. 그 결과, 동적 경로 추종 알고리즘을 사용 시 skip 면적은 7.4 m² 감소하고 선회 시간은 12.9초 절약하여 포장 작업효율이 3.9% 상승하는 것으로 나타남



< 미경지 조사 시뮬레이션 결과 동적 경로추종 알고리즘 (상) Look-ahead steering (하) >

표 1 슬립이 큰 시뮬레이션 환경에서 동적 경로 추종 알고리즘과 look-ahead 추종 알고리즘 간 측면RMSE 비교결과

경로 추종 알고리즘	RMSE
Look-ahead control	16.4 cm
동적 경로 추종	10.96 cm

표 2 슬립이 큰 시뮬레이션 환경에서 동적 경로 추종 알고리즘과 look-ahead 추종 알고리즘 간 추종변수 비교결과

	총 면적	미경지	선회 시 손실 시간	포장 효율	미경지율
Look ahead	840 m ²	18.3 m ²	149.2 sec	68%	2.2%
동적 경로추종	840 m ²	11.8 m ²	136.3 sec	71.9%	1.4%

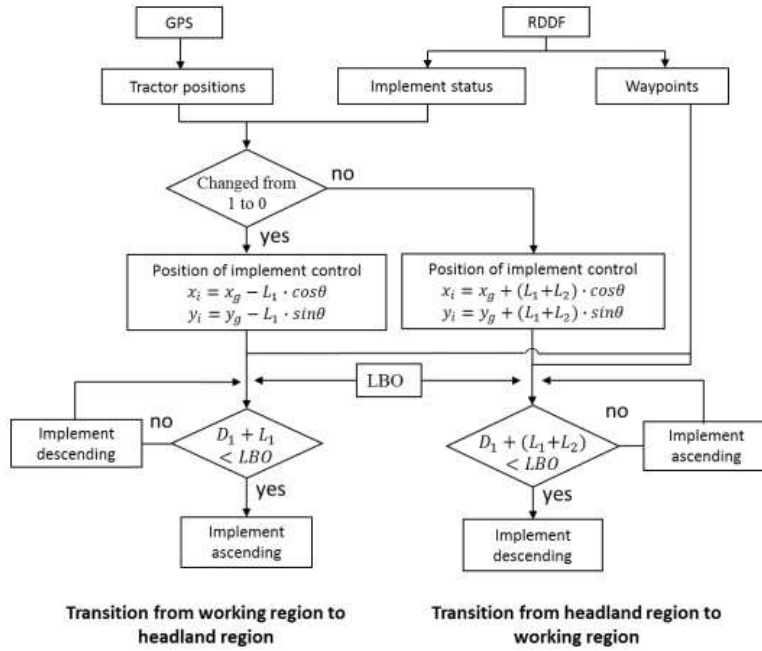
㉔ 미경지 방지를 위한 지능형 작업기 상하강 제어 알고리즘 및 기초실험

- 트랙터가 생성된 주행 경로를 기반으로 농작업 진행 시 미 작업 영역 부분을 감소시키고 및 포장 작업효율 향상시키기 위해 새머리 영역 진입 및 새머리 영역 탈출 시 작업기를 특정 경로점에서 정확히 작동하는 것이 필요
- 그림 54은 RDDF에서 작업기 제어명령이 구성된 하나의 예이며 4번 경로점에서 트랙터가 작업기 상승하고 16번째 경로점에서 작업기 하강 요구

1	9.5600000	-2.100000	0.5	1	0	4	1	
2	9.5600000	-17.10000	0.5	1	0	4	1	
3	9.5600000	-32.10000	0.5	1	0	4	1	
4	9.5600013	-36.3652105	0.5	1	0	2	0	Point of implement up
5	9.8684132	-36.9566735	0.5	1	0	2	0	
6	10.8220466	-38.285491	0.5	1	0	2	0	
7	12.2189914	-39.1379338	0.5	1	0	2	0	
8	13.8166324	-40.2058721	0.5	1	0	2	0	
9	14.7318551	-41.8956403	0.5	1	0	2	0	
10	14.7534175	-43.817224	0.5	1	0	2	0	
11	13.876343	-45.5271039	0.5	1	0	2	0	
12	12.3030684	-46.6306238	0.5	1	0	2	0	
13	10.3967202	-46.8730809	0.5	1	0	2	0	
14	8.5973012	-46.1965139	0.5	1	0	2	0	
15	7.3201343	-44.7626193	0.5	1	0	2	0	
16	6.8600013	-42.8968147	0.5	1	0	2	1	Point of implement down
17	6.8600013	-27.8968147	0.5	1	0	4	1	
18	6.8600013	-12.8968147	0.5	1	0	4	1	
19	6.8600013	2.1031653	0.5	1	0	4	1	
20	6.8600013	17.1031853	0.5	1	0	4	1	

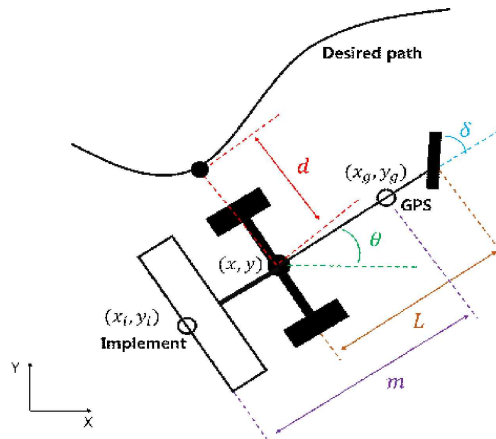
< Commands of implement control on the RDDF >

- 작업기의 효율적 작동을 위한 신호 제어 흐름도. 트랙터의 위치가 작업기 상승 요구된 위치에 도달하면 작업기 명령이 “1” 에서 “0”로 변환되어 작업기 상승을 위한 제어 위치를 계산. 제어 위치가 작업기 상승이 요구된 경로점의 LBO 범위에 들어오면 작업기를 상승. 아닌 경우 작업기 하강 상태로 주행
- 트랙터의 위치가 작업기 하강이 요구된 위치에 도달하면 작업기 명령이 “0” 에서 “1”로 변환되어 작업기 하강을 위한 제어 위치를 계산. 제어 위치가 작업기 하강이 요구된 경로점의 LBO 범위에 들어오면 작업기를 하강. 아닌 경우 작업기 상승상태로 주행



< 지능형 작업기 제어 알고리즘 흐름도 >

- 작업기 상승/하강 제어 위치의 계산은 트랙터의 기구학적 거동 기술 기반의 모델을 사용. 이 모델은 전륜과 후륜 중심으로 구성하며 필드 좌표에서 위치와 주행방향을 정의할 수 있음
- 본 모델에서는 오직 전륜만 좌우로 조향가능하며 휠의 측면 슬립과 외력은 없는 것으로 가정
- 트랙터의 거동 Kinematic 모델 (식 20)로 정의하고 X축과 Y축방향의 속도, 트랙터의 방향각, 회전 각속도, 조향 휠의 각속도로 정의

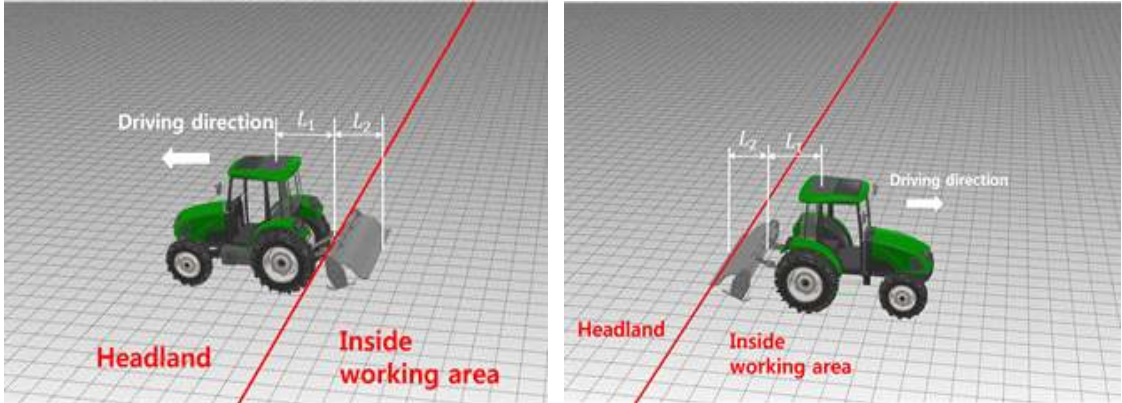


< 트랙터 운동학 모델 >

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \tan(\theta) \\ L \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta \quad (20)$$

- where, θ = 주행 방향 ($^\circ$)
 δ = 조향 각도 ($^\circ$)
 L = 축간 길이 (m)
 v = 주행 속도 (m/s)

- GPS에서 수신된 위치 좌표(x_g, y_g)와 작업 위치 좌표(x_i, y_i)의 관계는 식 (21)과 같고, 여기서 m 은 GPS 수신 위치와 작업기 위치간의 거리
- 트랙터가 새머리 영역으로 진입 시 GPS 설치 위치와 작업기 앞부분 간의 거리(L_1)를 고려하여 사전에 만들어진 RDDF에 작업기 제어 명령을 인식
- 트랙터가 새머리 영역에서 탈출 시, 식 (22)과 같이 GPS 설치 위치와 작업기 앞부분 간의 거리 그리고 로터리 날의 직경을 포함한 거리(L_1+L_2)를 고려하여 사전에 만들어진 RDDF에 작업기 제어 명령을 인식하도록 하였음
- 현재 방향각과 작업기 전 위치의 정보를 이용하여 식 (23)와 같이 작업기 현재 위치와 사전에 만들어진 RDDF에 작업기 제어 명령을 인지하여 지능형 작업기 제어



< 작업영역 진입, 탈출 시 작업기 제어 개요 >

$$\begin{cases} x_g = x_i + m \cos \theta \\ y_g = y_i + m \sin \theta \end{cases} \quad (21)$$

$$m = \begin{cases} L_1 & (\text{drive in headland}) \\ L_1 + L_2 & (\text{drive out of headland}) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} x_{i_t} = x_{i_{t-1}} + v \Delta T \cos \theta_t \\ y_{i_t} = y_{i_{t-1}} + v \Delta T \sin \theta_t \end{cases} \quad (23)$$

where, x_g, y_g = GPS 수신 위치 (m)

x_i, y_i = 작업기 위치 (m)

m = GPS와 작업기간의 길이 (m)

ΔT = 샘플링 시간 (sec)

x_{g_t}, y_{g_t} = 시간 t에서의 GPS 위치 (m)

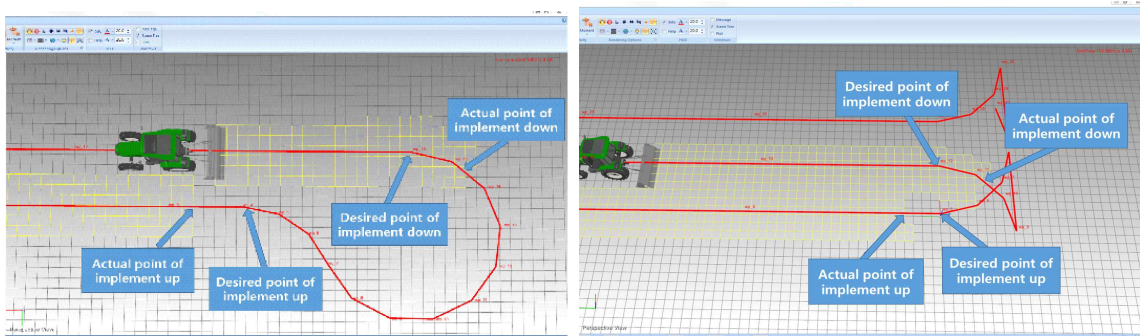
θ_t = 시간 t에서의 주행 방향 (°)

■ 시뮬레이션을 이용한 지능형 작업기 제어 알고리즘 기초평가

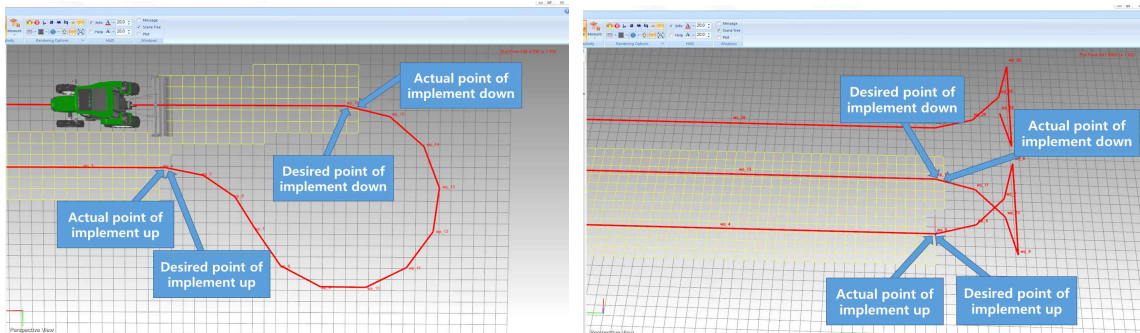
- 미경지 영역 방지를 위한 작업기 제어 알고리즘을 가상 시뮬레이터 환경에서 성능 평가를 진행하였으며, R형 선회 패턴과 X형 선회 패턴의 일부분 경로에 적용
- 지능형 작업기 제어 알고리즘 미적용 시, R형, X형 새머리 선회 구간에서 작업기의 작업 영역(노란색)을 통해 트랙터가 새머리 영역으로 진입할 때 작업기의 상승 명령이 요구된 경로점에 도달 하지 않고 작업기를 상승시켰으며, 새머리 영역에서 탈출 시 작업기의 하강 명령이 요구된 경로점에 도달 하지 못하고 작업기를 하강시킴
- 지능형 작업기 제어 알고리즘 적용 후, R형, X형 새머리 선회 구간에서 작업기의 작업 영역(노란색)을 통해 트랙터가 새머리 영역으로 진입할 때 작업기의 상승 명령이 요구된 경로점에 도달하여 상승하였으며, 새머리 영역에서 탈출 시 작업기의 하

강 명령이 요구된 경로점에 도달 후 하강

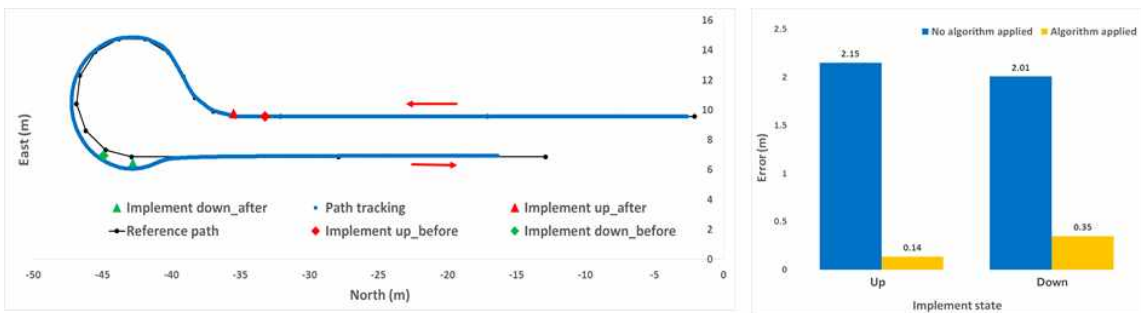
- R형 새머리 선회구간에서 알고리즘 적용 후 트랙터가 새머리 영역으로 진입할 때 RMS 위치 오차가 2.15 m에서 0.14 m로 감소하였으며, 새머리 영역에서 탈출 시 RMS 위치 오차가 2.01 m에서 0.35 m로 감소하는 것을 확인
- X형 새머리 선회구간에서 알고리즘 적용 후 트랙터가 새머리 영역으로 진입할 때 RMS 위치 오차가 2.1 m에서 0.3 m로 감소하였으며, 새머리 영역에서 탈출 시 RMS 위치 오차가 2.2 m에서 0.17 m로 감소하는 것을 확인
- 따라서, 개발한 작업기 제어 알고리즘을 적용하면 포장에서 무인 농작업 진행 시 미경지 영역 및 동력 소모량이 감소하여 포장 작업효율 향상이 가능함을 시뮬레이션에서 확인



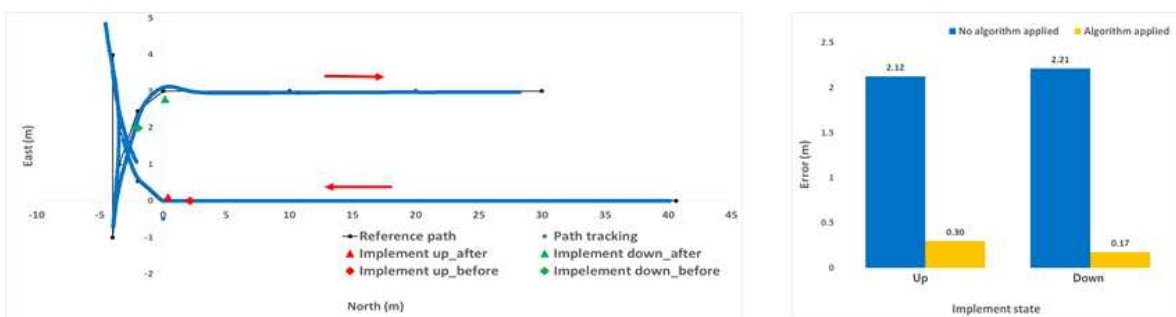
< 작업기 제어 시뮬레이션 결과 (미적용) R형 새머리 선회 주행 (좌), X형 새머리 선회 (우) >



< 작업기 제어 시뮬레이션 결과 (적용) R형 새머리 선회 주행 (좌), X형 새머리 선회 (우) >



< R형 선회에서의 작업기 제어 결과 >



< X형 선회에서의 작업기제어 결과 >

㉔ 경사지 환경에서 경로 추종 알고리즘 검증에 위한 현장 요인실험

■ 실험개요

- 경로 추종 모듈에 포함된 차체 기울어짐 보상 알고리즘과 슬립 고려 조향각 생성 알고리즘의 검증 및 효용성을 알아보기 위해 경사지 환경에서 요인실험 수행
- 사용된 트랙터는 (주)동양물산社의 TX803 기대를 개조해 만든 자율주행 플랫폼을 사용하였으며, 장착된 GPS는 3cm급 정밀도의 RTK-GPS와 IMU로 구성된 Novatel社의 SPAN-CPT
- 실험환경은 충남 논산시에 위치한 약 11.9% 경사도의 고구마밭
- 총 2가지 U자형 경로 추종 (경사를 가로지른 후 경사를 내려가는 방향으로 선회, 경사를 가로지른 후 경사를 올라가는 방향으로 선회)
- 각 경로에 대해 차체 기울어짐 보상 알고리즘과 슬립 고려 조향각 생성 알고리즘 유무에 따른 추종궤적 비교
- 총 8번의 자율주행 추종실험 수행



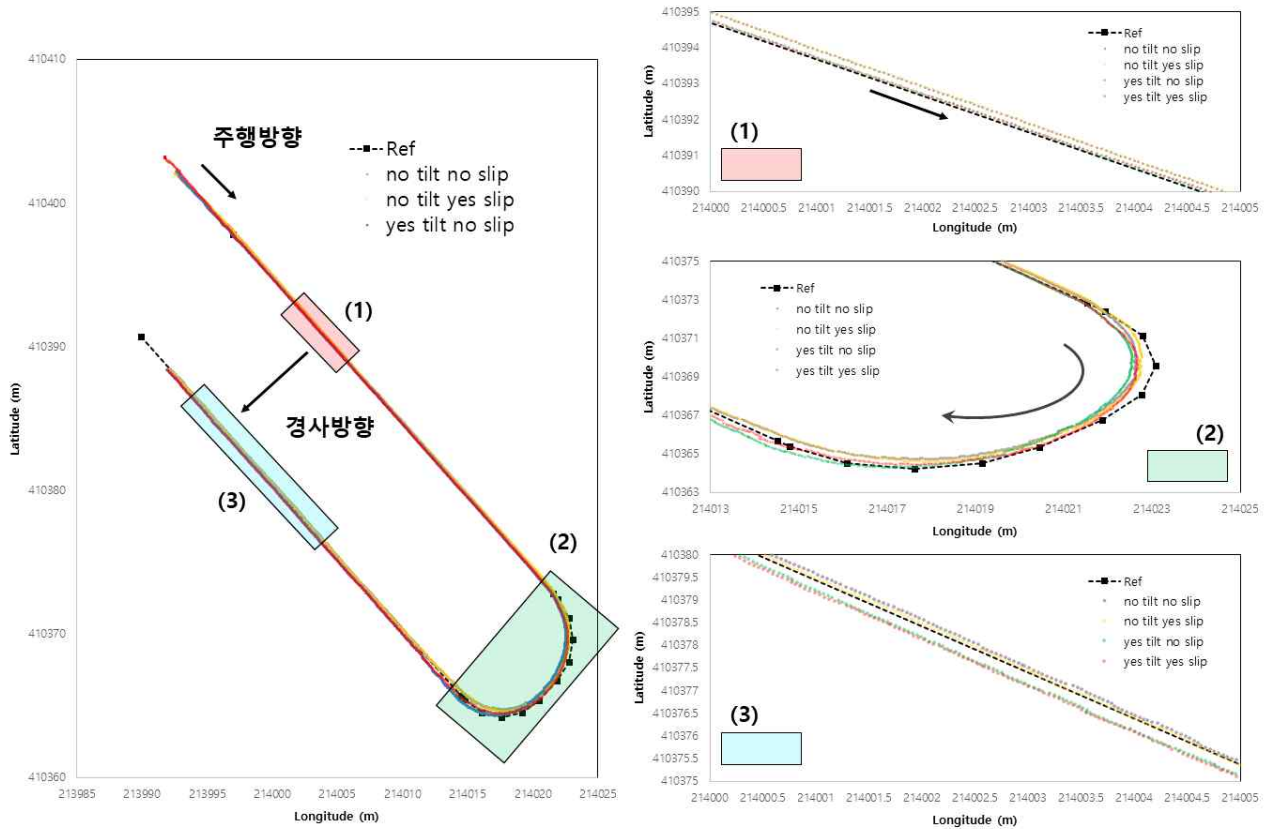
< 현장 요인실험 환경 현장사진 (좌)과 경사도 측정 결과 (우) >

■ 현장 요인실험 결과

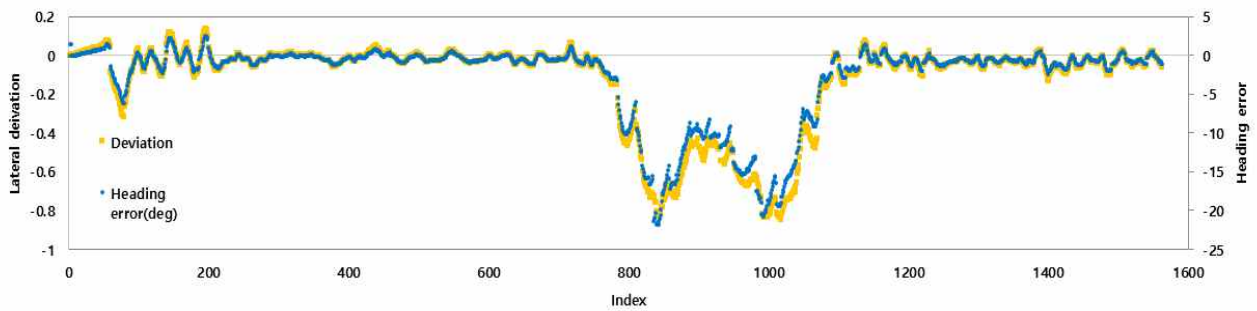
- 경로 추종 알고리즘의 현장 요인분석은 U자형 경로에서 첫 직진 구간, 선회 구간, 두 번째 직진 구간으로 나누어 분석
- 개발된 경로추종 알고리즘을 통해 U자형 경로를 문제없이 추종 가능함을 확인하여 검증 완료
- 경사를 가로지른 후 경사를 내려가는 방향으로 선회한 궤적 분석
- 차체 기울어짐 보상 알고리즘이 포함된 경우 첫 직진 구간에서 경사에 관계 없이 기준경로 위를 추종하였지만, 포함되지 않은 경우에는 차이가 발생함
- 선회 후 두 번째 직진구간 진입 시 경사 방향으로 벗어나는 경향을 보임
- 슬립 고려 조향각 생성 알고리즘 적용 시, 미적용 시보다 작은 측면변위를 보이며 두 번째 직진 구간으로 진입
- 두 번째 직진 구간 진입 후, 기준경로 위를 추종하기 위한 조향각을 생성하지만, 경사방향으로의 부하로 인해 약 15cm의 측면변위 차이를 유지하며 직진 주행함
- 경로 추종 시 측정된 측면변위와 방향각변위 그래프에서 첫 번째 직진 구간에서보다 두 번째 직진구간에서 오차가 크며, 더 변화가 심하다는 것을 관찰할 수 있으며, 경사 방향으로 치우쳐진 결과가 측정됨
- 선회 후 다음 직진구간 진입 시 차체 기울어짐 보상 알고리즘과 슬립 고려 조향각 생성 알고리즘의 효과는 적은 것으로 나타났으며, 경사지 환경에서 정밀 자율주행

을 위해서는 엔진 부하와 속도제어가 필요함을 확인

- 경사를 가로지른 후 경사를 올라가는 방향으로 선회한 궤적 분석
- 경사를 가로지른 후 경사를 내려가는 방향으로 선회한 결과와 유사하며, 선회 후 다음 직진 구간 진입 시, 경사 방향으로 벗어나는 경향이 심화 되어 기준경로보다 안쪽으로부터 진입함
- 두 번째 직진 구간 진입 후, 기준경로 위를 추종하기 위한 조향각을 생성하지만, 경사 방향으로의 부하로 인해 약 13cm의 측면변위 차이를 유지하며 직진주행



< 경사를 가로지른 후 경사를 내려가는 방향으로 선회 추종궤적 >

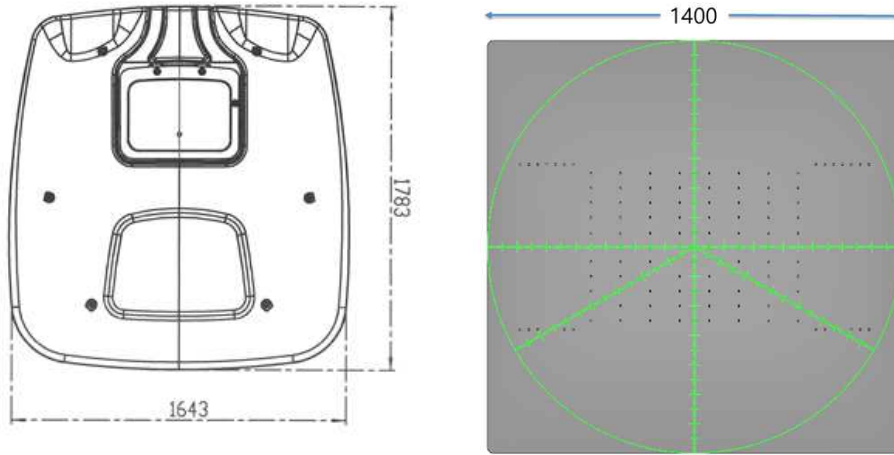


< 경사를 가로지른 후 경사를 올라가는 방향으로 선회 시 측면변위와 방향각변위 >

사. 위탁연구기관 3 (한국로봇융합연구원)

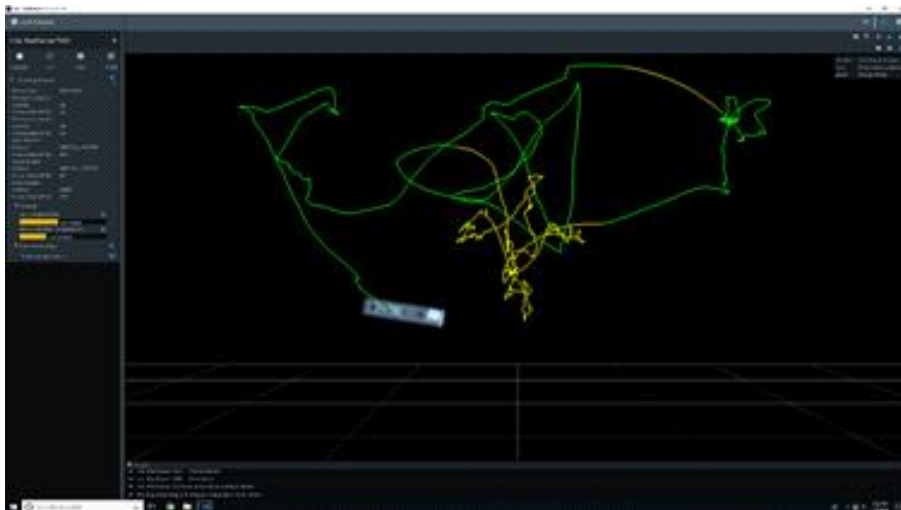
㉔ 자율주행 트랙터 위치 인식 기술 개발

㉔ 경제형 GPS 여러 개와 Encoder, IMU, Magnetometer 들의 다중센서를 융합한 시스템 설계



< 다양한 위치에서 측정가능한 지그 설계 및 제작 >

위의 그림과 같이 트랙터 상판의 크기를 고려하여 지그를 설계함. 다중 경제형 GPS를 융합한 시스템을 기본으로 보다 정확한 위치로 보정하기 위하여 Tracking camera를 고려함. Tracking camera는 다음 그림과 같이 IMU센서와 영상을 접목하여 움직임을 제공함. 이는 향후 정지(zero-velocity), 움직임을 파악하여 보정에 사용함. 최근 논문에는 위치추정 시스템에 딥러닝의 하나인 LSTM을 이용하여 정지를 찾아내어 오차를 보정하고 있음.

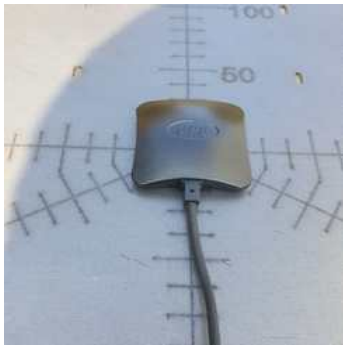


< Tracking camera의 작동 예시 >

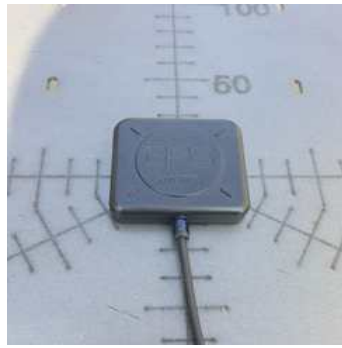
㉔ 경제형 GPS 및 저가형 센서들의 정보들을 결합한 위치 추정 알고리즘 개발

- 경제형 GPS 및 저가형 센서의 각각 위치에 따라 간섭 및 오차 확인

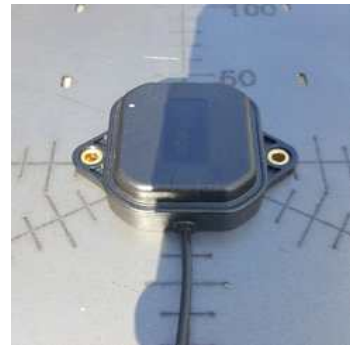
다음 그림과 같이 경제형 GPS를 사용하여 같은 위치에서 동작테스트를 진행하여 적용할 모델을 결정함.



(a) DGPS



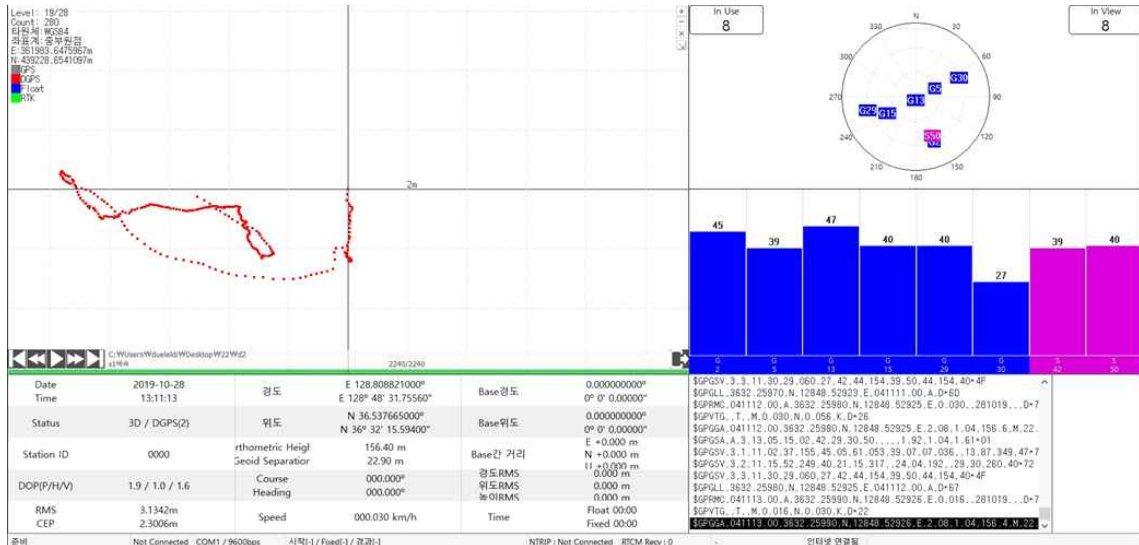
(b) RTK-GPS(m8p)



(c) RTK-GPS(f9p)

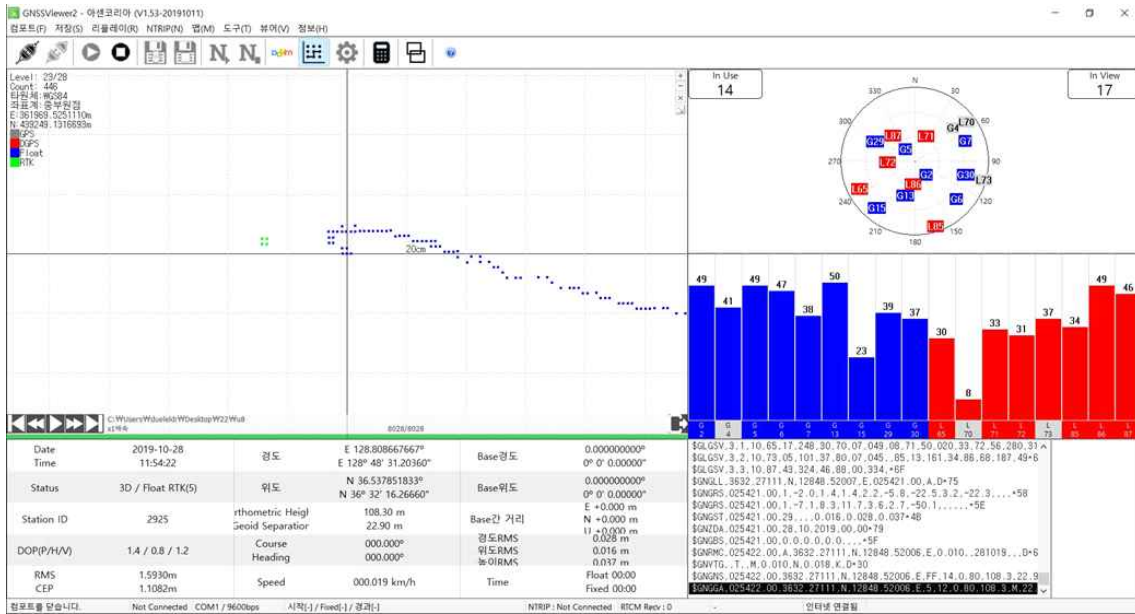
< 다양한 경제형 GPS의 위치측정 모습 >

위에서 제시한 경제형 GPS를 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었음. 첫 번째 DGPS의 경우 위치의 분포가 약 8m에 걸쳐서 나타남. 이는 가장 저렴하지만 단독으로 사용이 불가능하다고 판단됨.

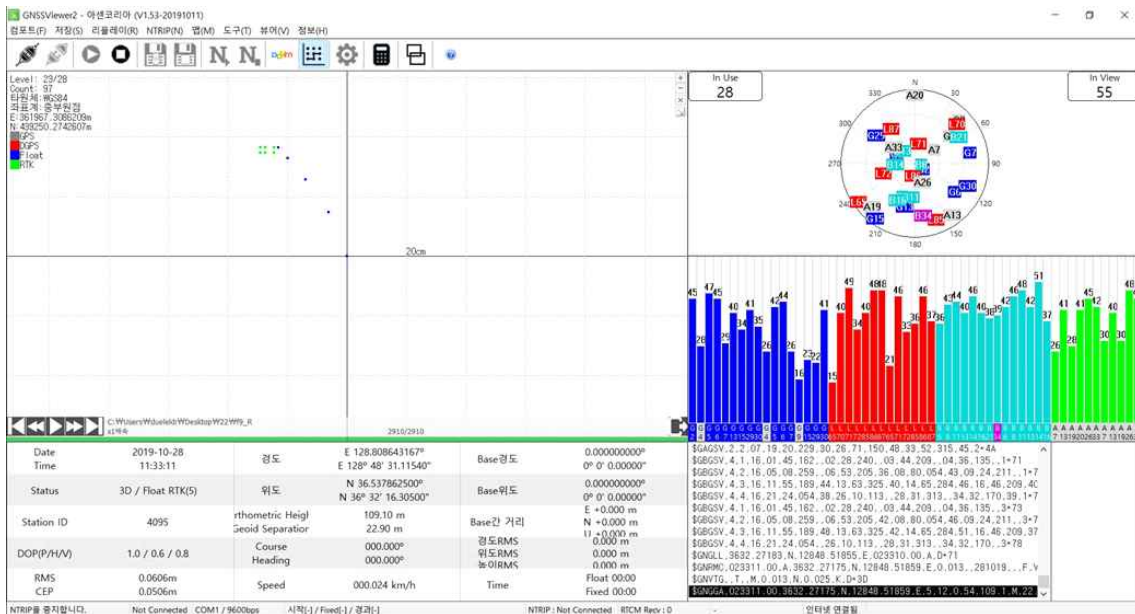


< DGPS의 고정위치측정 결과 >

따라서 우리는 많이 사용되고 있는 RTK 보정신호를 적용할 수 있는 U-blox의 모듈인 m8p와 f9p를 적용한 모델을 가지고 같은 위치에서 다음과 같은 결과를 얻었음. 먼저 m8p의 경우 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었음. 두 모듈 모두 RTK 보정신호가 고정될 때의 위치를 보면 상당히 정확한 위치(초록색 점)를 얻을 수 있음.



< U-blox사 모듈(m8p)의 고정위치측정 결과 >



< U-blox사 모듈(f9p)의 고정위치측정 결과 >

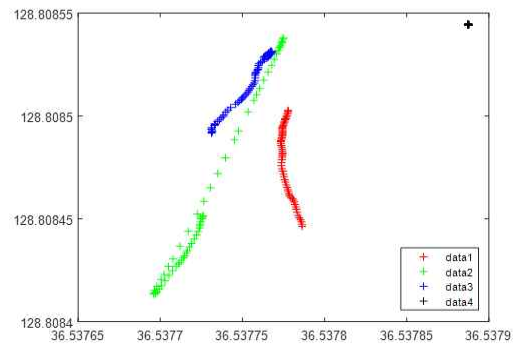
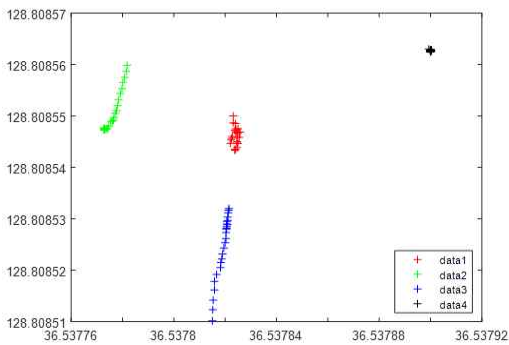
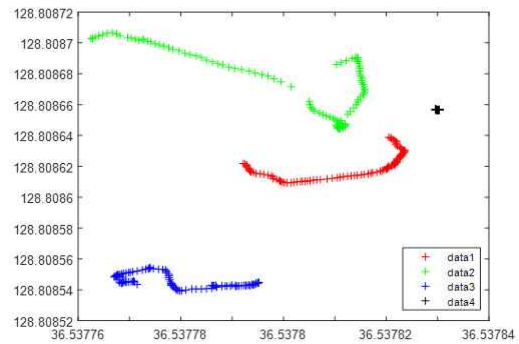
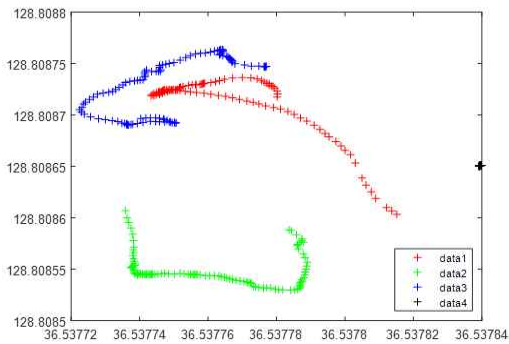
하지만 두 모듈의 차이점을 찾아보면 m8p의 경우 RTK 보정신호가 고정되어 있는 시간이 f9p의 모듈에 비해서 적어서 정확한 위치 신호를 얻기가 다소 무리가 있음. 이는 m8p의 경우 사용하는 안테나가 싱글밴드이고, f9p의 경우는 듀얼밴드를 사용하기 때문에 그림의 오른쪽 부분에서 알 수 있듯이 사용하는 위성의 수가 차이가 남. 사용 환경에 따라서 획득되는 데이터의 성능이 다르기 때문에 데이터베이스를 확보하여 알고리즘 개발에 적용할 계획임.

- 최적의 센서들의 설치 위치 제시 및 다중 센서들을 이용한 보정 시스템 개발 앞에서 설계 및 제작한 지그를 사용하여 다음과 같이 다중 경제형 GPS를 융합을 위해 데이터를 수집함.



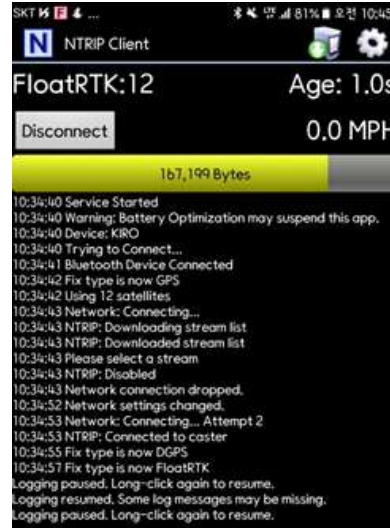
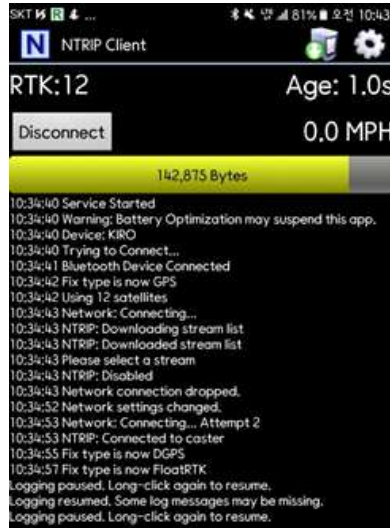
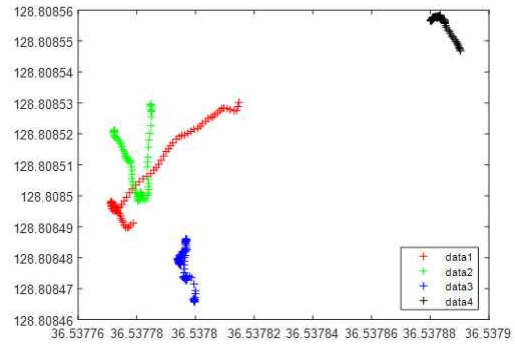
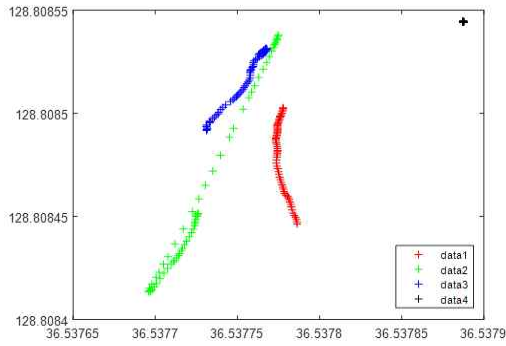
< 다중 경제형 GPS를 융합을 위한 데이터 획득 >

앞에서 설계 및 제작한 지그를 사용하여 다음과 같이 다중 경제형 GPS를 융합을 위해 데이터를 여러 위치에서 획득하였음. data1~data3는 DGPS모형을 사용하고, data4는 RTK-GPS(f9p)모형을 사용하여 획득한 데이터임. 획득한 데이터로부터 삼각 중심법을 이용하여 data1~data3의 데이터로 data4의 데이터로 보정하기에는 부적하다고 판단됨.



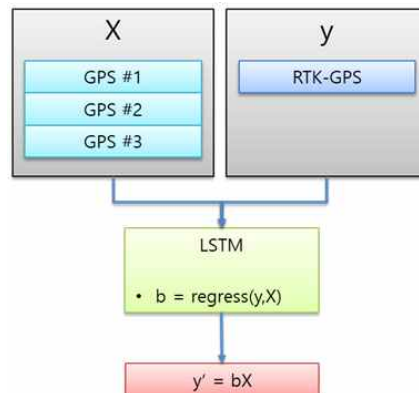
< 다양한 위치에서 삼각 중심 법을 위한 데이터 획득 결과 >

다음 그림은 위의 그림에서 마지막 지점에서 측정한 실험결과임. 둘 사이의 차이점을 보면 data4의 경우 RTK 보정신호를 이용하여 획득한 데이터임에도 불구하고 오른쪽 그림은 드리프트(drift)에러가 왼쪽에 비해 큰 것을 알 수 있음. 이는 RTK 보정신호를 이용하여 보정할 때 상태가 다르기 때문임.



(a) 고정신호가 RTK인 경우 (b) 고정신호가 FloatRTK인 경우
 < 같은 위치에서 RTK-GPS(f9p)사용하여 획득한 결과 >

오른쪽의 그림을 보면 고정신호가 FloatRTK로 왼쪽의 그림처럼 고정신호가 RTK로 가기전 과정임. 따라서 고정신호가 RTK값을 가진다면 자율주행에 적용 가능함. 그러나 실 적용환경은 테스트 환경이 잘 갖추어져 있는 경우가 아니고, 움직임이 있으면 고정신호가 RTK에서 FloatRTK로 바뀌는 경우 많음. 고정신호가 FloatRTK의 경우에 얻어지는 데이터를 분석하여 삼각 중심법 등을 활용하여 고정신호가 RTK인 경우와 같은 위치를 찾도록 연구 개발을 진행함.



< 삼각 중심법을 활용한 RTK급 위치 추정 알고리즘 >

3) 3차년도 수행 결과

가. 주관연구기관(대동공업(주))

㉞ 조향제어 모듈 개선 개발

㉠ 고정밀 제어 알고리즘 최적화 (Hokkaido university 공동 연구)

㉡ 연구 배경

- 국내 농작업 환경은 다양하게 분포하고 있으며, 비정형 환경으로 구성되어 있음.
- 트랙터는 대부분 논작업에서 사용되고 있으나, 밭작업 환경에서도 같이 사용되고 있기 때문에 관련 알고리즘 개발 시 밭작업 환경 및 경사지에서의 작업도 고려하여야 함.
- 밭작업 환경의 경우 이랑과 고랑과 같이 트랙터 자세가 변화할 수 있는 환경들이 구축되어있으며, 밭작업 분포 또한 산지에도 분포하고 있음.
- GPS (Global Positioning System)의 경우 차량 지붕에 위치하고 있으며, 차량의 기울기에 따라 GPS 위치가 보정이 필요함.
- 작업 간 Roll 각의 변화에 따라 횡방향 오차는 10 cm 이상 발생하기도 하며, 이는 밭작업 특성을 고려하였을 때 작물에 피해를 발생시킬 수 있음.
- 농작업 간 GPS 정밀도를 보정하기 위해서는 차량 자세에 따른 보정 알고리즘이 필요함.

㉢ 연구 목적

- 경사지에서의 제어 알고리즘 최적화를 위해서 자세 보정 알고리즘을 개발
- 수학적 모델 및 경로 알고리즘 개발 및 실차시험을 통해 필요성을 규명함
- 차후 국내 밭작업 환경 및 산지에 위치한 노지에서 보정 알고리즘을 이용하여 자율주행 조향장치의 제어 정밀도를 향상시킬 수 있음

㉣ 연구 내용

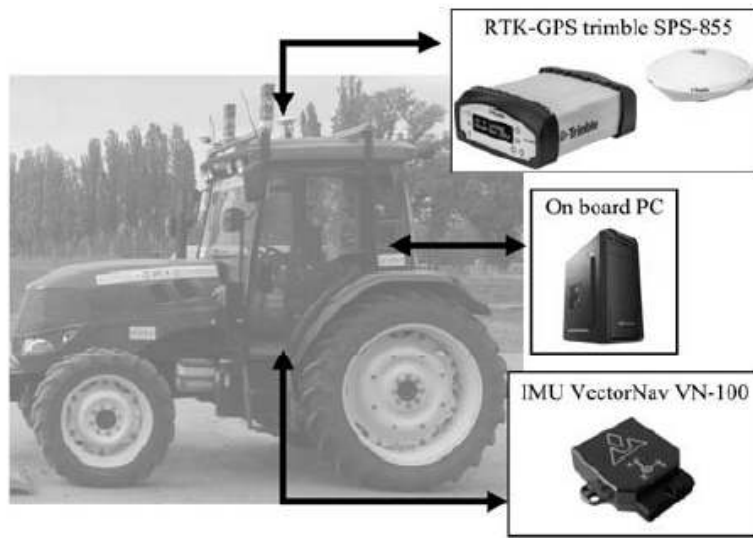
① 장비

㉠ Yanmar EG-83Y 트랙터를 사용하여 본 연구를 수행하였음.

< EG-83Y 트랙터의 제원 >

Model		Specification
Model name	EG-83Y	
Dimensions	Overall length(mm)	3,805
	Overall width(mm)	1,845
	Overall height(mm)	2,750
	Ground clearance(mm)	430
Weight	(kg)	2,940
Engine	Model	4TNV98T
	Type	4-cycle Water-cooled diesel
	Output(kW(PS))	61.0(83)
	Displacement(cc)	3,318
	Fuel tank capacity(l)	95
Brake	-	Wet disk

- ㉞ 시험을 수행하기 위해서 시험 트랙터를 구성하였음. GPS (Global Positioning System)와 IMU(Inertia Measurement Unit)와 3점 히치 제어기로부터 데이터를 로그할 수 있는 On board PC (Personal Computer)를 차량 내부에 설치하였음.



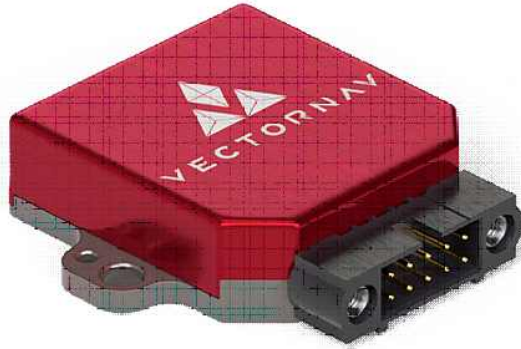
< 시스템 구성의 개략도 >

- ㉟ GPS는 RTK 수준의 Trimble社의 SPS855 모델을 사용하였음. Direction of travel과 차량속도를 수신받을 수 있게 구성하였음. 데이터 수신속도는 10 Hz로 설정하였으며 이는 GPS 장치의 성능을 고려한 수치임.



< Trimble社 SPS855 >

- ㊱ GPS의 오차는 수평방향으로 2 cm이며, 차량속도 1km/h 가 증가함에 따라 2 mm씩 오차가 증가함. 수직방향으로는 기본 오차 3 cm 이며, 차량속도 1km/h 가 증가함에 따라 2 mm가 증가함.
- ㊲ IMU 장치는 VectorNav社의 VN100 모델을 사용하였으며, 각 축마다 2.0°의 오차를 가지고 있음.



< VectorNav社 VN100 >

② 자세보정 알고리즘

㉑ GPS 설치 높이 및 차량의 Roll에 따라 오차가 증가할 수 있음.

㉒ 오차 보정을 수행하기 위해서는 GPS 안테나와 실제 위치와의 거리, 차량 무게중심점으로 부터의 GPS 거리, 그리고 현재 GPS 안테나의 위치 및 차량의 현재 자세정보를 이용하여 수행할 수 있으며, 그 식은 아래와 같이 구성됨.

$$\begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - E^{-1}(\varphi, \theta_p, \theta_r) \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ h \end{pmatrix}$$

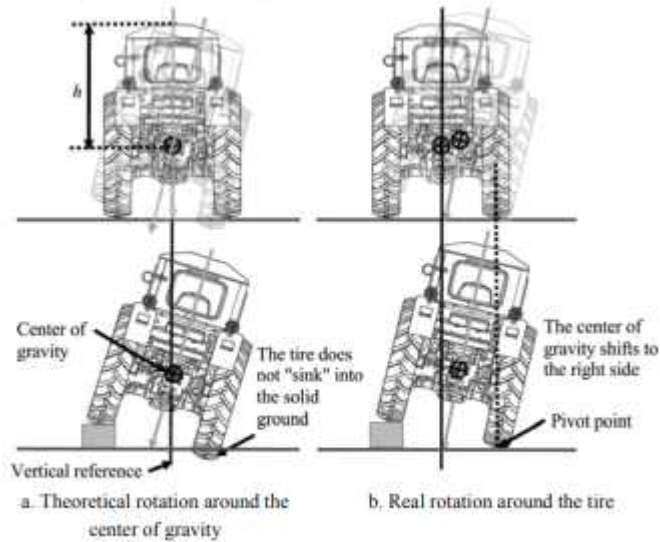
Where X_a, Y_a, Z_a = Corrected position from the GPS antenna
 X, Y, Z = Antenna position acquired by the GPS
 a, b, h = Distance from the center of gravity
 φ = Yaw angle (°)
 θ_p = Pitch angle (°)
 θ_r = Roll angle (°)

㉓ 아래식을 이용하여 Yaw 및 Pitch가 0임을 가정하였을때, 농작업 간 수평방향 오차가 발생함. 해당조건에서 안테나가 지면으로 2 m 떨어진 위치에 설치하였을 때, 3°의 롤이 발생하였을 때 수평방향 오차는 0.1 m가 발생하게 됨. 이렇게 되면 발작업 조건에서 작물의 생육을 방해할 수 있는 조건이 성립됨. 이에 따라 좌우 오차에 대한 보정을 수행하여야 함.

$$E^{-1}(\varphi, \theta_p, \theta_r) = E(-\varphi, -\theta_p, -\theta_r) = \begin{pmatrix} \cos\theta_r \cos\varphi + \sin\theta_r \sin\theta_p \sin\varphi & \cos\theta_p \sin\varphi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \sin\varphi + \sin\theta_r \cos\varphi \\ -\cos\theta_r \sin\varphi + \sin\theta_r \sin\theta_p \cos\varphi & \cos\theta_p \cos\varphi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \cos\varphi - \sin\theta_r \sin\varphi \\ -\sin\theta_r \cos\theta_p & \sin\theta_p & \cos\theta_r \cos\theta_p \end{pmatrix}$$

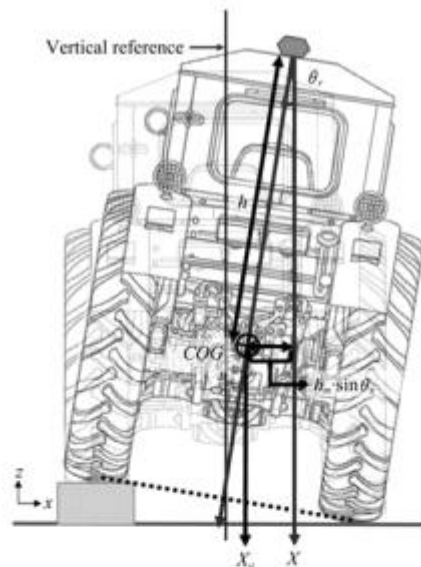
Where X_a, Y_a, Z_a = Corrected position from the GPS antenna
 X, Y, Z = Antenna position acquired by the GPS
 a, b, h = Distance from the center of gravity
 φ = Yaw angle (°)
 θ_p = Pitch angle (°)
 θ_r = Roll angle (°)

- ㉔ GPS 안테나를 보정하기 위해서는 아래그림과 같이 트랙터 무게중심에서 GPS 안테나까지의 거리 a , b , h 를 측정해야 함. 보정하기 위한 조건은 아래 그림 a 조건과 b 조건인데, a 조건의 경우 토양 침하로 인해서 무게중심점이 변하지 않음. 그러나 해당조건은 비현실적인 조건이고, 실제로는 b와 같은 조건으로 나타남. b 조건으로 가정하였을 때, 우측 타이어 하단부를 힌지 점으로 설정 하였을 때 좌측 타이어 하단부에 장애물을 위치시키게 되면 차량의 무게중심은 우측으로 이동하게 됨.



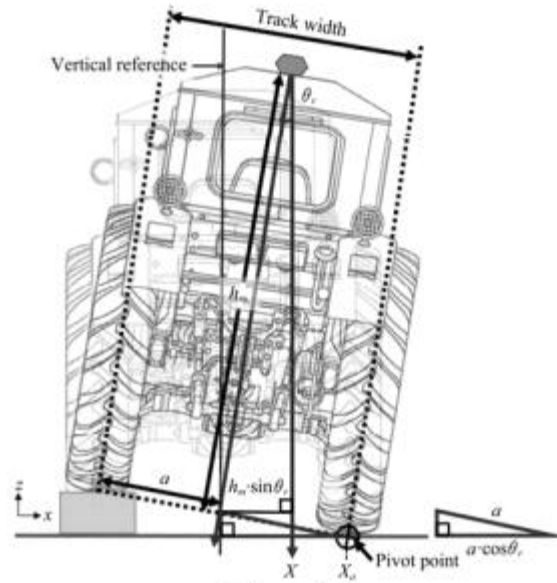
< 무게중심점 이동 예시 >

- ㉕ 아래 그림과 같이 기존의 좌표 보정 방식의 경우 GPS 안테나의 위치 데이터를 이용해서 보정을 수행하였으며, 무게중심과 GPS 안테나의 수평거리만을 측정하였음. 해당조건의 경우 실제 농작업 차량이 지나강하는 좌표가 아니기 때문에 이에대한 개선된 방식이 필요하였음.



< 기존 트랙터 좌표 보정 방식 >

- ㉖ 무게중심점에 수직축은 정확한 거리를 측정하기 어렵기 때문에, 실제 차량이 지나가야 하는위치는 아래그림 Vertical reference와 측정을 수행하여야 함.



< 개선된 좌표 보정 방식 >

③ 콘크리트에서의 자세보정 성능시험

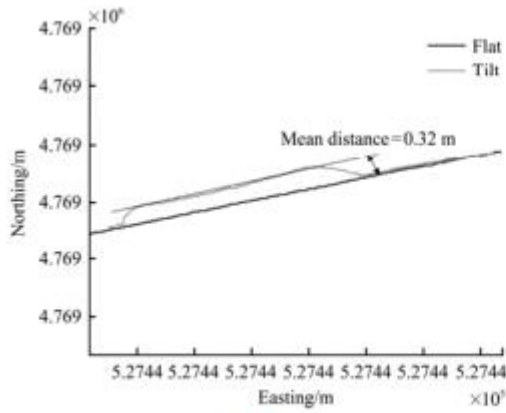
㉠ 자세 보정 시험을 수행하기 위해서, 콘크리트 구조물을 만들었음. 해당 시험의 가정은 차량 속도에 따라 Roll 변화에 의한 제어성능이 변화하는지를 판단하기 위해 수행하였음.

㉡ 시험 조건은 0.6 m/s 3.0 m/s 두조건으로 가정하였으며, 해당속도는 농작업 간 설정되는 최소 및 최대 속도 임.

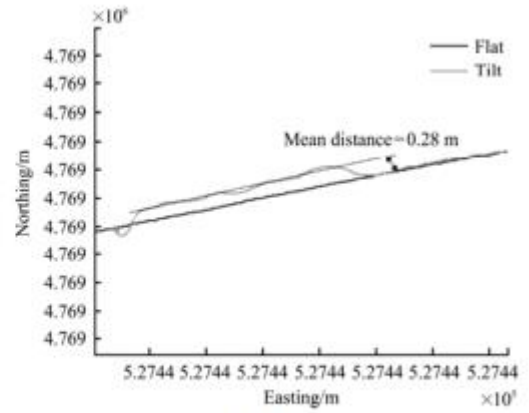
㉢ 수동운전을 통해 7 m 가량의 레퍼런스 경로를 생성하였으며 자동조향 시스템을 이용하여 해당 경로를 추종하게 설정하였음.

라. 기울어짐에 따른 경로 추종 평가를 수행하기 위해 길이 3.61 m 높이 0.175 m 의 구조물을 구성하였으며 해당구조물을 좌측 바퀴가 진행함에 따라 올라갈 수 있게 구성하였음.

㉤ 아래 좌측 그래프의 경우 0.6 m/s 조건이며, 우측은 3.0 m/s의 조건임. 속도가 낮을수록 경로 추종을 좀더 안정적으로 수행함. 결과적으로 속도에 따라 제어성능을 변화함을 확인할 수 있음. 그러나 두조건 모두 중심거리의 오차값이 거의 유사하게 나타남을 확인하였을 때, 0.6 m/s ~ 3.0 m/s 두조건 모두에서 사용 가능할 것으로 판단됨.



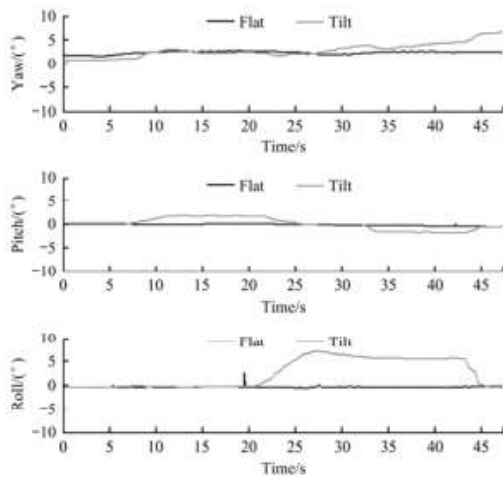
(a) 0.6 m/s



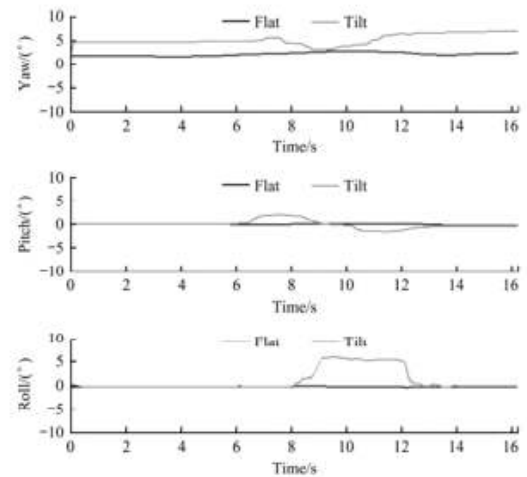
(b) 3.0 m/s

< 콘크리트 조건에서의 속도에 따른 제어 성능 평가 >

㉔ 좌측 그래프의 경우 0.6 m/s 조건에서의 자세데이터 변화 결과이며, 우측 그래프의 경우 3.0 m/s 조건에서의 자세데이터 변화 결과임. 작업 속도에 의하여 0.6 m/s에서 더 많은 시간 계측을 수행하였으며, 약 20초 가량 구조물을 지나 감에 따라 자세 데이터가 변화하였음. 3.0 m/s의 경우 16초 정도의 주행을 수행하였으며, 자세변화 구간은 4초 정도동안 발생하였음. 자세 변화는 약 5°내외로 발생하였으며, 이는 농작업 간 발생하는 자세 변화 범위 내에서 주행을 수행함.



(a) 0.6 m/s

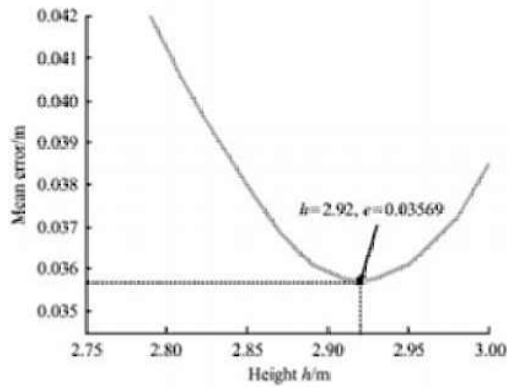


(b) 3.0 m/s

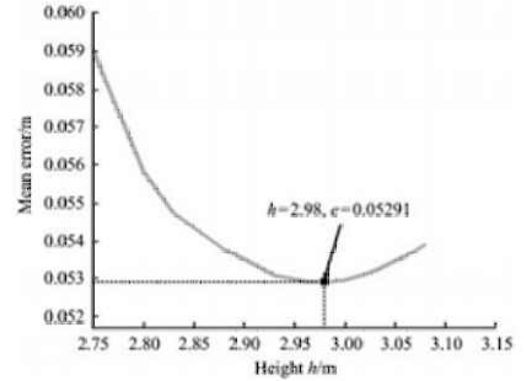
< 콘크리트 조건에서의 시험간 자세 데이터 >

㉕ Mean error을 회전축(본 시험 조건에서는 우측 후륜 타이어와 지면의 접촉부를 기점으로 한 수직 축)과 지면이 만나는 점을 기준으로 GPS 높이(h)에 따라 분석한 결과는 아래 그래프와 같이 나타났음.

㉖ 좌측 그래프의 경우 0.6 m/s 조건에서의 결과 값이며, GPS 높이가 2.92 m 일 때 가장 작은 수치의 오차를 가짐. 우측 그래프의 경우 3.0 m/s 조건에서의 결과 값이며, GPS 높이가 2.98 m 일 때 가장 작은 수치의 오차를 가지고 됨.



(a) 0.6 m/s



(b) 3.0 m/s

< 콘크리트 조건에서의 시험간 자세 데이터 >

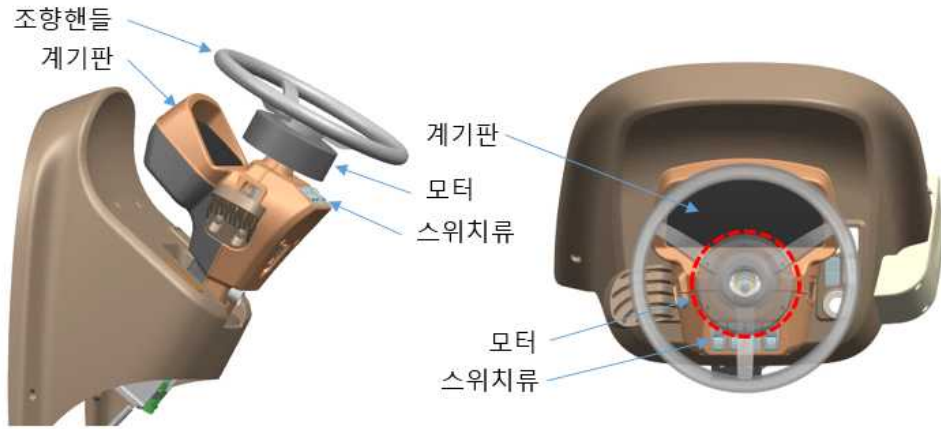
㉔ 연구 요약

- 자율주행트랙터는 제어시스템을 이용하여 설정된 경로로 주행
- 경로 설정은 GIS 기반으로 개발
- 조향 제어 알고리즘과 R 패턴 선회 알고리즘을 개발 및 시험
- 직진구간에서는 트랙터가 0.6~2 m/s로 주행하였을 때, 약 1~3 cm의 횡방향 오차 범위를 나타내고, 주행방향 오차는 1 deg 이하의 값을 나타냄
- 다중경로 작업시 선회구간에서 R 패턴 선회를 수행하면서 주행속도, 조향각, PTO, 3점히치 등을 제어하면서 작업을 수행
- 각 경로의 시작점에서의 횡방향 오차는 경로를 점차 주행하면서 감소하여 수렴
- 결과값들에 의해 자율주행트랙터는 2 m/s 이하의 속도에서는 충분히 작업이 가능하다고 판단됨
- 경로생성 및 알고리즘 개발하여 포장 시험 결과 자율주행트랙터는 R 패턴에 대하여 본 연구에서 개발한 알고리즘으로 안정적이며, 오차 범위가 작은 농작업이 가능함

㉔ 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장/ 유압 시스템 개선 설계

㉕ 모터 구동방식 조향제어시스템 장착부 레이아웃 개선 설계

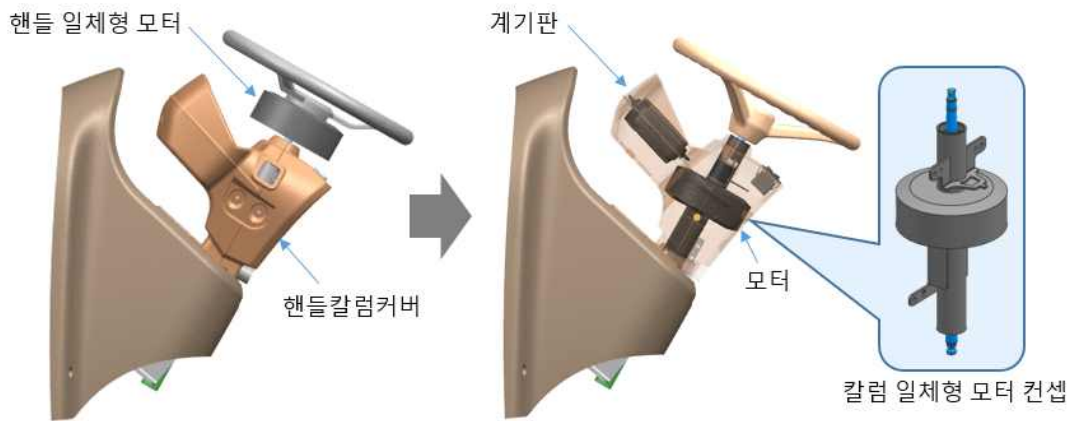
모터 구동방식 조향시스템의 핵심 부품인 모터는 조향장치의 작동을 위하여 외형 직경이 클수록 토크확보에 유리하다. 하지만 큰 외형의 모터는 조향핸들의 아래에 부착되어 계기판쪽의 시야를 가리고 핸들 주변 스위치류의 조작 공간을 막아 운전의 불편함과 사고의 위험이 있을 수 있다.



- 모터 구동방식 조향제어시스템 구조 -

이러한 문제점을 개선하기위하여 모터의 위치를 핸들칼럼커버 내부로 이동시켜 외형적으로 일반 트랙터와 동일하게 설계 변경함으로써 운전에 방해를 주지 않고 거부감 없이 자율주행 트랙터를 사용 할 수 있도록 구조를 개선하였다.

이러한 구조는 트랙터 제조사 3사의 칼럼커버 디자인을 모터를 포함 가능한 형태로 디자인으로 개발 하면 큰 어려움 없이 적용 가능한 것으로 판단된다.



- 모터 구동방식 조향제어시스템 레이아웃 개선 구조 -

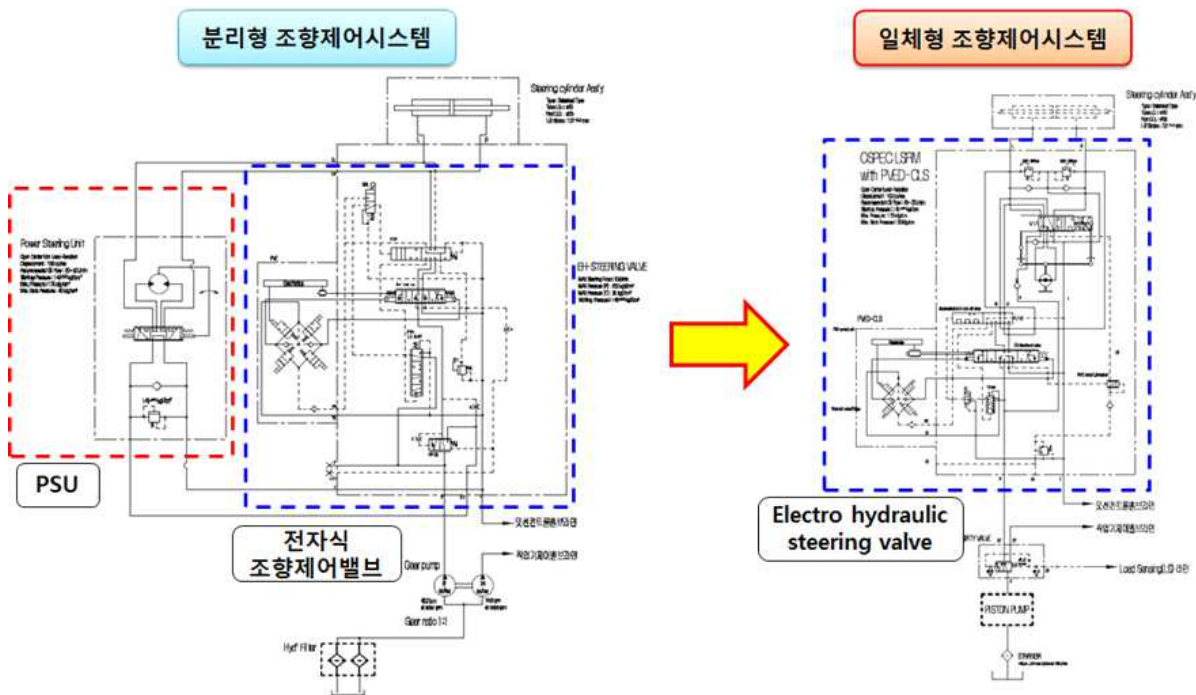
㉔ 유압 구동방식 조향제어시스템 Layout 개선 설계

- 일체형 구조 조향제어시스템 개선 설계

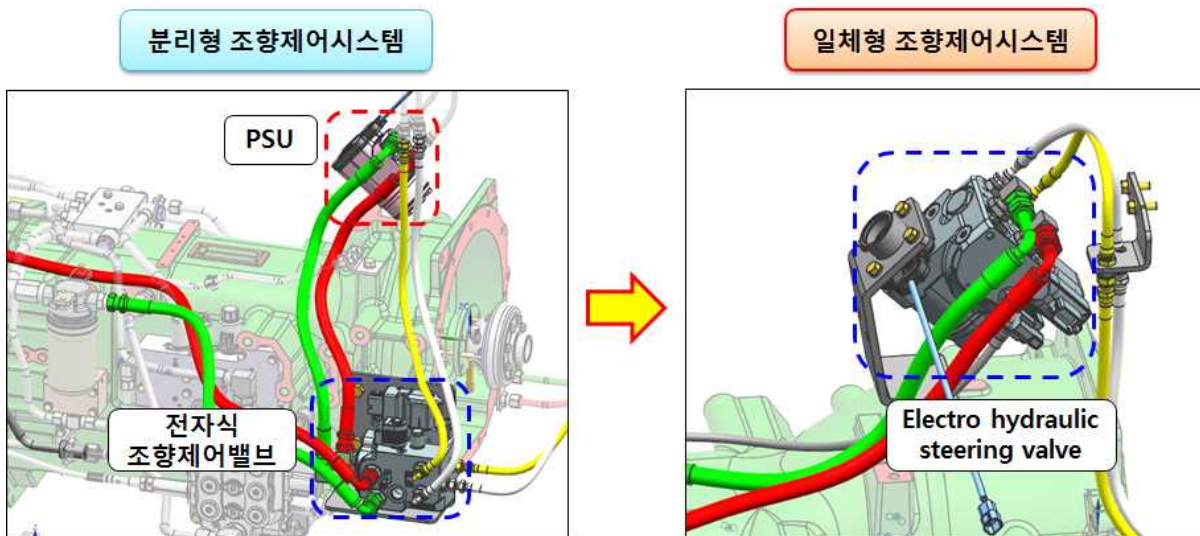
자율주행 트랙터의 조향제어를 위한 유압 구동방식 조향제어시스템은 기존 핸들을 이용한 사용자 매뉴얼 타입의 파워스티어링 유닛과 주행상황에 따라 자동으로 좌/우 조향각을 조정할수 있도록 전자비례제어 솔레노이드가 내장된 전자식 조향제어밸브로 각각 구성 되어 있다.

기존 시스템의 경우 각각 구성된 밸브를 이용하여 한정된 공간속에서 유압시스템 설계 및 유로 구성을 함으로써 시스템 구성이 복잡해 지고 외관상 감성품질이 저하되는 문제점이 야기되었다.

이를 개선하기 위하여 사용자 매뉴얼 타입의 파워스티어링 유닛과 전자식 조향제어밸브가 일체형으로 구성된 밸브를 이용하여 조향제어 시스템 layout을 설계하였다.

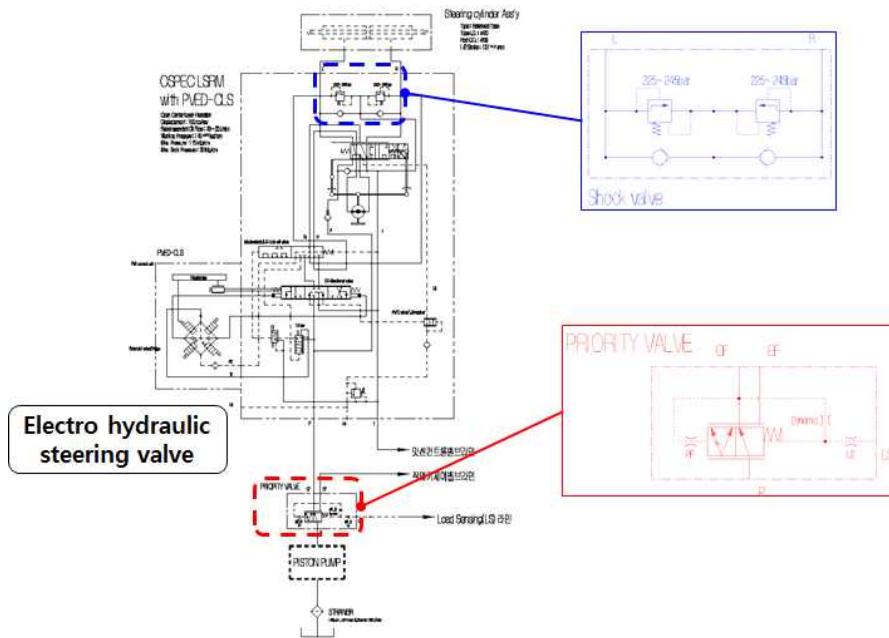


< 일체형 구조 조향제어 시스템 유압회로도 >



< 일체형 구조 조향제어 시스템 Layout >

- 일체형 구조의 조향제어밸브 적용을 위해 개발비절감 및 개발기간 단축 그리고 품질검증이 완료된 전문메이커 제품을 선정하여 본기 특성에 맞게 설계하였다.
- 현재 자율주행 적용을 위해 선정된 100hp급 트랙터는 작업환경에서 지면에 따라 좌/우 앞바퀴를 통해 충격이 발생되게 되고, 이는 앞차축 조향실린더를 통해 연결된 조향밸브에 설정압력 이상의 과도한 압력을 전달하게 된다. 이를 방지하기 위해 조향밸브에서 조향실린더로 연결되는 유로에 별도의 Shock valve를 추가하여 외부충격에 의한 과도한 압력을 해소할수 있도록 유압회로를 구성하였다.
- 또한, 자율주행 적용 트랙터의 조향시스템은 작업기 제어밸브 작동시 조향 끊김 현상 및 핸들 걸림 현상을 방지하기 위하여 상시 일정 유량이 우선적으로 조향밸브로 유입될수 있도록 Priority valve를 추가로 구성하여 안정적으로 조향밸브에 20 lpm ~ 40 lpm 유량을 공급할수 있도록 설계 하였다.

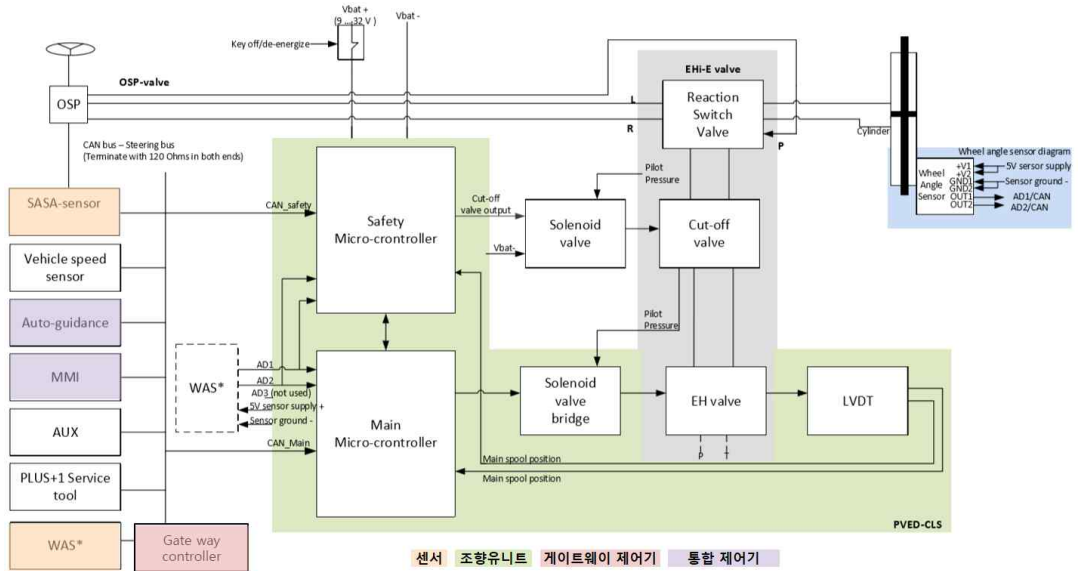


< Shock valve & Priority valve 유압회로 구성 >

㉔ 통합시스템 연동 최적화 개발

㉔ 통합시스템-조향제어 모듈 CAN 통신 프로토콜 최적화 개발

- CAN통신 프로토콜 최적화를 위해 조향시스템 구성을 통합제어기, 게이트웨이 제어기, 조향유닛, 센서들로 정의하고 각 구성에서 CAN통신으로 전달되어야 할 데이터를 정의한다.



< 조향시스템 구성도 >

- 통합제어기에서는 경로추종을 위한 조향지령 데이터와 조향유닛 모드를 변경하기 위한 모드변경 데이터를 CAN통신을 통해 게이트웨이 제어기로 전달한다.

CAN Frame	Data [HEX]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0x0CAD131α ¹⁾	Curvature command ²⁾	b ³⁾	FF	FF	FF	FF	FF	FF

1) 조향시스템명령 CAN ID(GP51 = C, GP52 = D)
 2) 곡률(지령 = 0~64255, INV = 64256~65535)
 3) 조향령명 상태(NIS = 0xFC, IS = 0xFD, Error = 0xFE, INA = 0xFF)

CAN Frame	Data [HEX]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0x0CE13FC	00	α ¹⁾	b ²⁾	30	FF	Fe ³⁾	CRC16 ⁴⁾	
0x0CEFAFC	02	α ¹⁾	b ²⁾	30	FF	Fe ³⁾	CRC16 ⁴⁾	

1) 조향모드
 (On-Road = 0x00, Off-Road Reaction = 0x10, Off-Road Non-Reaction = 0x11, STW Pro = 0x20~24)
 2) 방향표시(Forward = 0x3F, Reverse = 0x7F; Error condition = 0x6F; INA = 0xFF)
 3) 순번(0~15 범위 1씩 순차 상승)
 4) 순환 중복 검사

Sensor message	Default message ID	MAIN controller parameter	SAFETY controller parameter
Guidance System Command #1	0x0CAD131C	P3292 = 0x1C P3297 = 0x13	P3293 = 0x1D P3297 = 0x13
Guidance System Command #2	0x0CAD131D	P3293 = 0x1D P3297 = 0x13	

8.1 GUIDANCE SYSTEM COMMAND [GPSX_GMC]

Priority: 3
 PGN: 44288 (0xAD00)
 Occurrence: Periodic - minimum every 100ms
 Sent by: Auto-guidance controller / Auto-guidance 2 controller
 Sent to: PVED-CLS Main controller

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1..2	UI6	0..64255	Curvature command [GPSX_Curvature_cmd]; Curvature command in [0.25km ⁻¹] (offset - 8032km ⁻¹) 0 corresponds to -8032 km ⁻¹ (Max left) 32128 corresponds to 0 km ⁻¹ (Straight) 64256 corresponds to 8032.75 km ⁻¹ (Max right) Information not available
3	Bits 8..3	All 1	Reserved
	Bits 2..1	00	Steering command status [GPSX_Str_cmd_status]: Not intended for steering
		01	Intended for steering
		10	Error condition
		11	Information not available
4..8	-	All 1	Reserved

Sensor message	Default message ID	MAIN controller parameter	SAFETY controller parameter
Main Message Identifier - Priority	0x0CE13FC	P3292 = 0x1C P3297 = 0x13	P3293 = 0x1D P3297 = 0x13
Main Message Identifier - Subpriority	0x0CEFAFC		

11.1 HMI REDUNDANT MESSAGE [HMI_R]

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1	UB	All 1	Reserved
2	UB	0x00	Off-Road Reaction
		0x10	Off-Road Non-Reaction
		0x11	STW Program 1
		0x20	STW Program 2
		0x21	STW Program 3
		0x22	STW Program 4
		0x23	STW Program 5
		0x24	STW Program 6
3	Bits 8..7	00	GPS receiver selection and lockout (intended for steering)
		01	GPS 1 steering selected
		10	GPS 2 steering selected
		11	Reserved
4	Bits 6..5	00	Aux steering steering selected (intended for steering)
		01	Aux steering selected
		10	Aux steering prohibited
		11	Reserved
5	Bits 4..1	All 1	Reserved
6	Bits 3..2	All 1	Reserved
7	Bits 1..0	All 1	Reserved
8	UB	0x00	Aux Program 1
		0x01	Aux Program 2
		0x02	Aux Program 3
		0x03	Aux Program 4
		0x04	Aux Program 5
		0x05	Aux Program 6
9	-	Reserved	
10	Bits 8..5	All 1	Reserved
11	Bits 4..3	All 1	Reserved
12	Bits 2..1	0..15	Sequence number [HMI_Seq_N]; Incremented by 1 in each HMI program message
13..14	UI4	0..15	Roll over from 15 to 0
15	UI4	0..65535	CRC16 for data bytes 1..4 (HMI_CRC_R); Polyname: 0x809C

(a) 조향지령 CAN Frame (b) 조향유닛 모드변경 CAN Frame

< 통합제어기 송신 CAN Frame >

- 게이트웨이 제어기에서는 통합제어기에서 수신된 CAN 데이터를 조향유닛 CAN통신 규격에 맞게 변경하고 조향유닛으로 조향지령, 모드변경, 조향각 센서, 차량 속도 데이터를 전달한다.

CAN Frame		Data [HEX]							
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	
0x0CF1a7FA	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	CRC16 ⁽⁶⁾

1) 휠 각도 CAN ID(휠 각도 기준데이터 = 0, 휠 각도 중속 데이터 = 1)
2) 휠 각도 신호(역전 = 0~499 & 4991~5000, 직전 = 100~4000)
3) 순번(0~15 범위로 1씩 순차 상승)
4) 순환 중복 검사

CAN Frame		Data [HEX]							
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	
0x0CF4a7EB	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	CRC16 ⁽⁶⁾

1) 차속 CAN ID(차속 기준데이터 = 0, 차속 중속 데이터 = 1)
2) 방향(Forward = 0x0F, Reverse = 0x7F, Error condition = 0x8F, INA = 0xFF)
3) 방향(역전(Forward = 0~64025 [0~200 km/h], Reverse = 64250~65535)
4) 순번(0~15 범위로 1씩 순차 상승)
5) 순환 중복 검사

Sensor message	Default message ID	MAIN controller parameter	SAFETY controller parameter
Wheel Angle Sensor - Primary	0x0CF1a7FA	P3256-Dx4C	P3319-Dx10

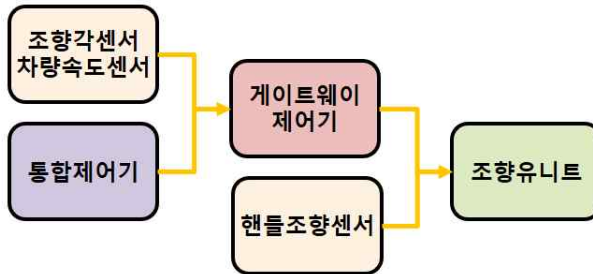
12.1.WAS PRIMARY MESSAGE [WAS_P]

Priority: 3
PbN: 02380 + P3320 (Default: Duff13)
Occurrence: Periodic - every 50ms
Send type: Wheel angle sensor
Send to: All CAN nodes

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1	UB	All 1	Reserved
2,3	US	0..99	Wheel angle signal 2 [WAS_Sig_2]
		100..4900	Error Condition
		4901..5000	WAS wheel angle signal to scale according to P3180, P3187 & P3189
		5001..65535	Error Condition
4,5	-	All 1	Reserved
6	Bit B.5	All 1	Reserved
7	Bit 4..1	0..15	Sequence number [WAS_Seq_N], incremented by 1 in each 50ms primary message
7,8	US	0..65535	CRC16 for data bytes 1..6 [WAS_CRC_6], Polynomial: 0x28DC

(a) 조향각 센서 CAN Frame (b) 차량속도 CAN Frame
 < 게이트웨이 제어기 센서 데이터 송신 CAN Frame >

- 조향유니트는 게이트웨이 제어기의 CAN데이터로 자율주행모드진입 및 트랙터 조향을 제어한다. 그리고 핸들조향센서(SASA) 데이터를 CAN으로 수신하여 비상시 사용자핸들조작을 감지하여 자율주행을 해제할 수 있도록 처리한다.



< CAN 데이터 전달 블록도 >

CAN Frame		Data [HEX]							
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	
0x0CF1a74A	Steering angle ^(a)	Steering angle velocity ^(b)	FF	Bit C ^(c)	CRC16 ⁽⁶⁾				

1) 조향 휠 CAN ID(조향 휠 기준데이터 = 0, 조향 휠 중속 데이터 = 1)
2) 조향 각 신호(조향각 = 0~4095, INA = 4096~65534, Sensor Failure = 65535)
3) 조향 각 속도(속도 = 0~40960(RPM), INA = 40961~65534, SF = 65535)
4) 센서 예러코드
5) 순번(0~15 범위로 1씩 순차 상승)
6) 순환 중복 검사

Sensor message	Default message ID	MAIN controller parameter	SAFETY controller parameter
Steering Wheel Sensor - Primary	0x0CF1a74A	P3256-Dx4C	P3319-Dx10

9.1.STW PRIMARY MESSAGE [STW_P]

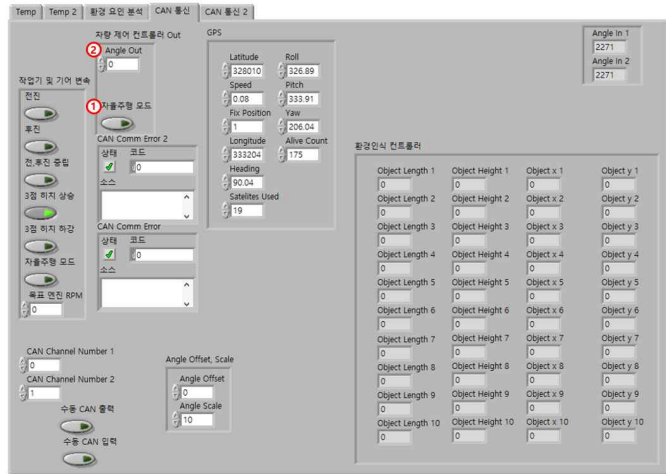
Priority: 3
PbN: 4095 + P3256 (Default: Duff13)
Occurrence: Periodic - every 50ms
Send type: Steering wheel sensor
Send to: All CAN nodes

Bytes	Encoding	Value/Range	Description
1,2	US	0..4095	Steering angle 1 relative to the D-axis point [STW_Sig_1]
		4096..65535	Error Condition
3,4	US	0..40960	Steering angle velocity [STW_Velocity_P], incremented by 1 in each 50ms primary message
5	Bit B.5	All 1	Reserved
6	Bit 4..1	0..15	Sequence number [STW_Seq_N], incremented by 1 in each 50ms primary message
7,8	US	0..65535	CRC16 for data bytes 1..4 [STW_CRC_4], Polynomial: 0x28DC

< 핸들조향센서 CAN Frame >

㉔ 통합제어기-조향제어 모듈 CAN 통신 연동 동작 시험

- 통합제어기의 조향 테스트모드에서 자율주행모드 변경과 조향지령 입력으로 좌우 조향 동작 확인하였다.



<통합제어기 조향 테스트모드 제어화면 >



<자율주행 모드 변경 화면 >



< 자율주행모드에서 조향유니트의 좌우측 밸브 개방시험 >

㉔ 시제품 제작 및 시험

- 유압 구동방식 조향제어시스템과 통합제어기간 CAN통신 동작 벤치테스트 후 시제품 트랙터에 적용하여 차량 상태에서 유압시스템의 작동과 조향반응시간 시험을 완료하였다.

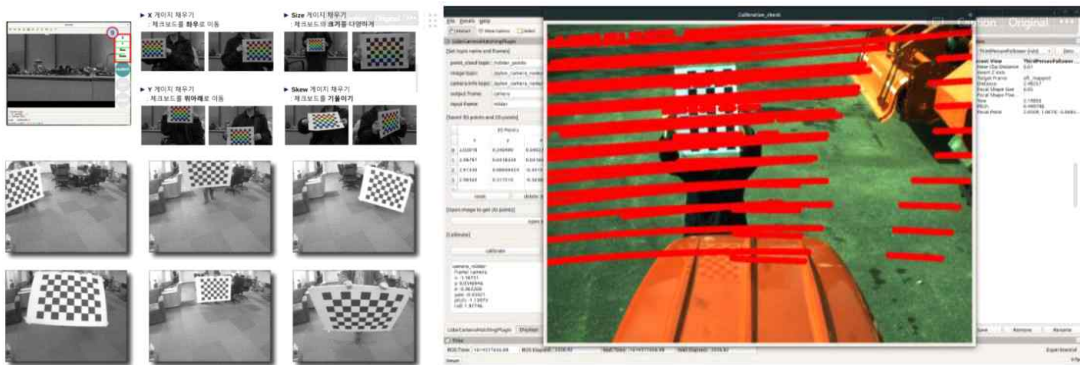
㉕ 작업환경 인식 모듈 개선 개발

㉕ 센서 융합 최적화 기술 개발

㉕ 카메라-Lidar 융합 알고리즘

① 카메라-Lidar 캘리브레이션 프로그램 개발 및 적용

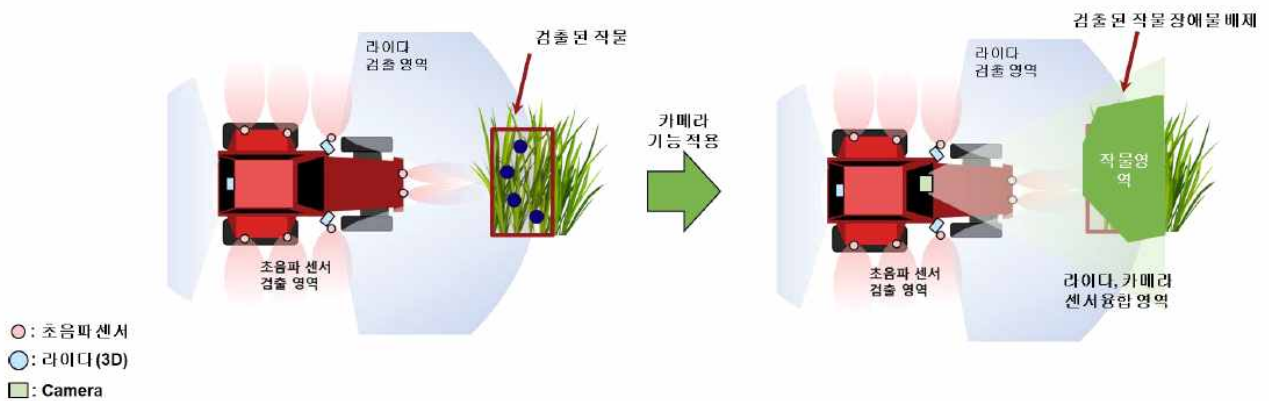
- 카메라-Lidar의 정합성을 맞추고 카메라 인식을 개선하기 위해 카메라-Lidar 캘리브레이션 프로그램을 개발하고 캘리브레이션을 수행하였다.



<카메라-Lidar 캘리브레이션 프로그램>

② 검출 작물의 장애물 판정 배제를 위한 카메라-Lidar 융합 기능 개발

- Lidar로 환경을 인식할 경우 작물까지 인식되어 장애물로 분류되지만 실제 모델 적용을 위해서는 작물은 장애물 판정에서 배제되어야 한다. 그래서 카메라 이미지에서 인식된 작물영역을 3차원에 투영하여 실제 작물영역(3차원공간)을 검출하고 검출된 작물영역과 Lidar 검출 결과를 통합하여 Lidar로 검출된 물체가 작물일 경우 장애물 판정에서 배제하는 기능을 개발하였다.



<검출 작물의 장애물 판정 배제 기능 개발>

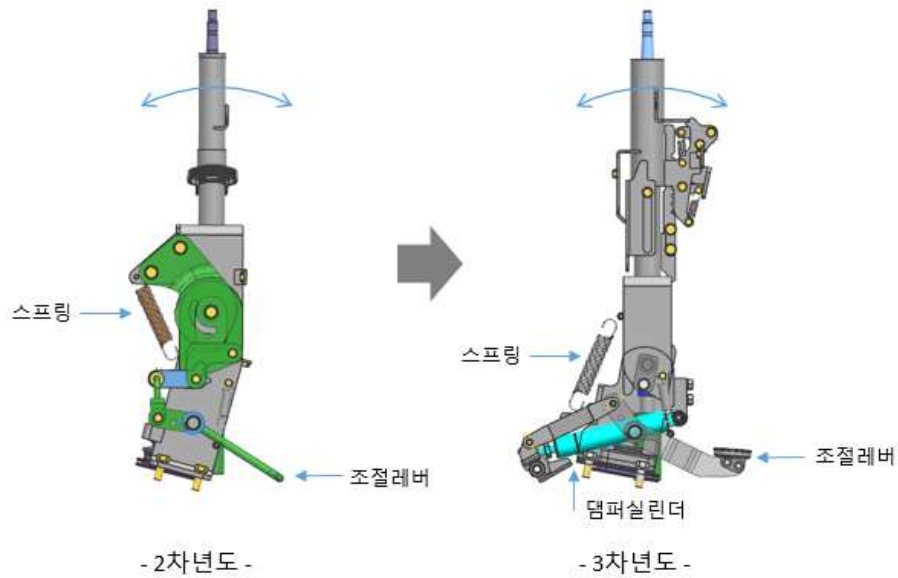
㉔ 트랙터 장착을 위한 레이아웃 설계 및 전장 시스템 개선 설계

㉕ 트랙터 장착부 레이아웃 개선 설계

㉖ 조향제어 및 환경인식 모듈 장착을 위한 지붕 개선 설계

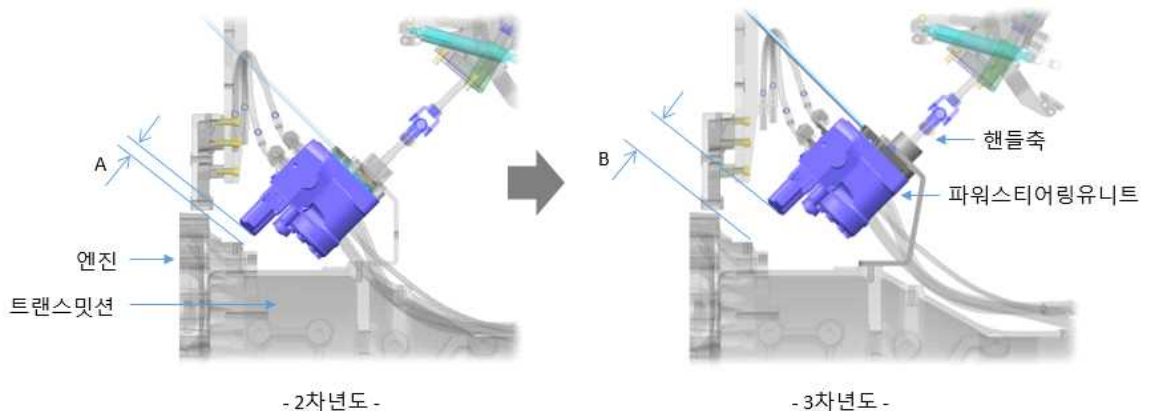
㉗ 조향제어 모듈부 개선설계

자율주행트랙터에 적합한 조향제어 모듈을 개발하기 위하여 2차년도에 조향핸들의 높이와 각도가 운전자 체형에 맞게 조절이 가능하도록 설계하였다. 고정된 핸들은 조절레버를 풀어주면 자유롭게 조절되지만 스프링에 의해 한쪽방향으로 급격히 움직여 주행 중 사용하기에는 부적합하였다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 핸들 각도가 조절되는 틸팅구조에 댐퍼실린더를 적용하여 자율주행 중 핸들을 운전자에게서 멀리 이격 시킬 때 느린 속도로 부드럽게 움직일 수 있도록 구조를 개선하였다.



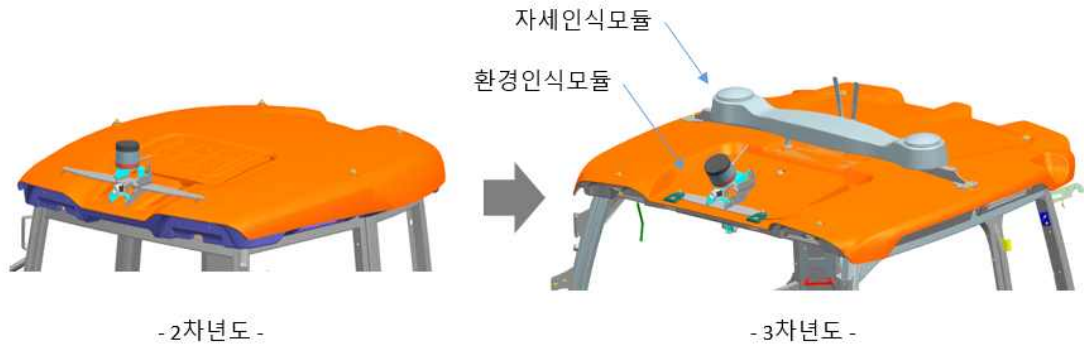
조향제어 모듈의 파워스티어링유니트는 핸들축과 연결되어 운전자의 핸들조작에 따라 유압을 조향실린더로 보낸다. 자율주행 중에는 핸들 조작 없이 유량을 제어하여 조향이 가능하다. 시제품 트랙터의 파워스티어링유니트의 위치는 엔진과 가까워 고온의 열기가 전달되어 유압제어 밸브의 고장이 우려되었다.

파워스티어링유니트를 고정하는 브라켓의 형상을 변경하고, 핸들축의 길이변경, 주변 공간 구조를 설계 변경하여 엔진으로부터 멀리 이격 시켜 열전달을 줄이고 고장의 원인을 미연에 방지하였다.

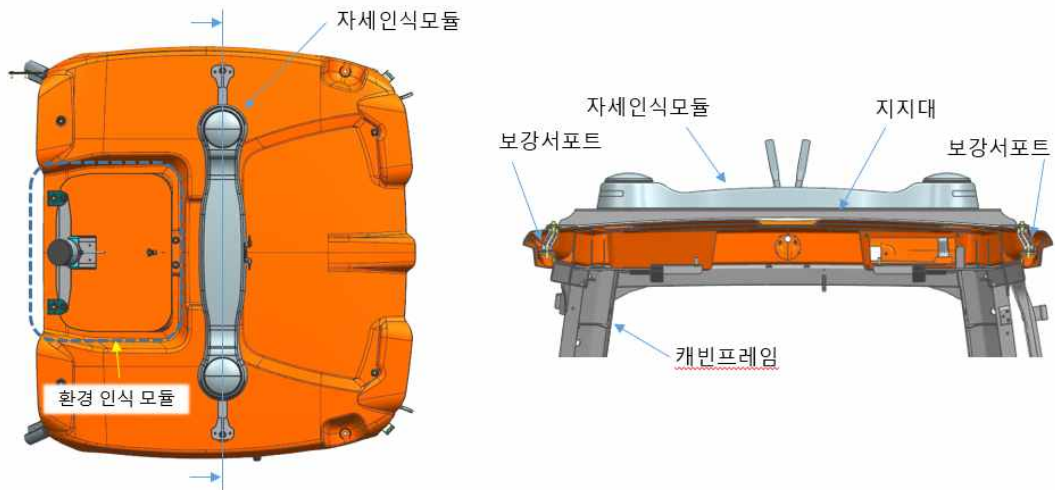


② 지붕 개선설계

- 자율주행트랙터의 지붕은 환경인식모듈(카메라, 라이다), 자세인식모듈과 같은 장치가 부착 될 수 있는 공간과 구조적인 강도가 필요하다. 2차년도 제작 시제품 대비 환경인식모듈의 브라켓 길이를 축소였고, 지붕 중앙의 위치에 앞으로 양산 시 형태 변화를 대응 할 수 있는 넓은 공간을 확보하였다.



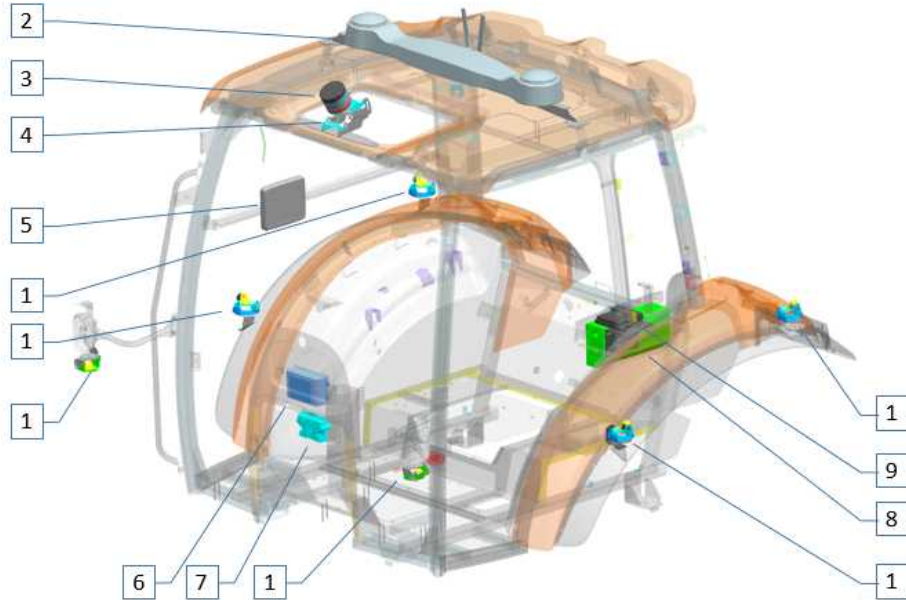
지붕 내부에 보강서포트를 자세인식모듈지지대와 캐빈프레임이 연결되는 구조로 설계하여 고중량의 하중이 지붕 외면에 작용되지 않도록 하였다.



② 캐빈 내 각종 모듈 및 센서 탑재를 위한 구조물 설계

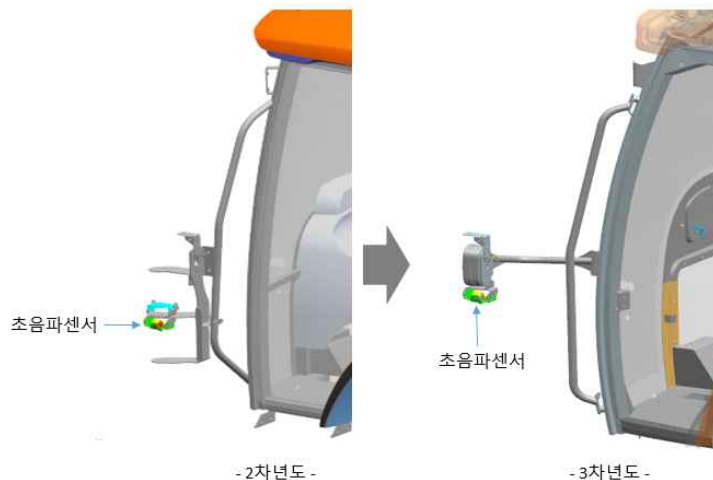
- 캐빈 외부 A필러 전방의 초음파센서 지지브라켓과 후륜펜더 상면에 초음파센서 6개를 균등한 간격으로 설치하였고, 상부 지붕에는 환경인식을 위한 라이다와 카메라, 자세인식모듈이 탑재되었다.

2차년도 시제품트랙터에서는 의자 뒤쪽에 각종 컨트롤러가 불합리한 구조로 설치되었었지만 컨트롤러의 크기가 소형화됨에 따라 좌우측에 분리하여 트랙터 캐빈의 운전자 공간을 침해하지 않고 적절히 배치되었다.

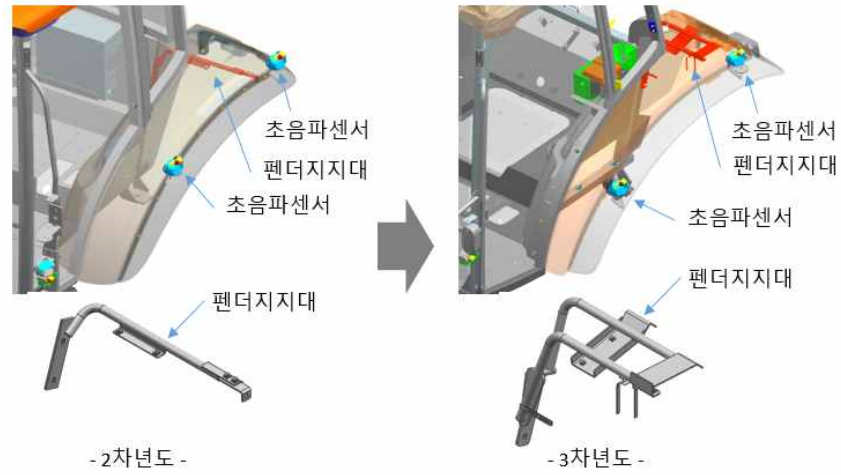


번호	명 칭	번호	명 칭
1	초음파센서(6개소)	6	경로생성 및 추종 모듈
2	자세인식모듈	7	조향제어 모듈
3	라이다	8	환경인식 컨트롤러
4	카메라	9	통합 모듈
5	모니터	-	-

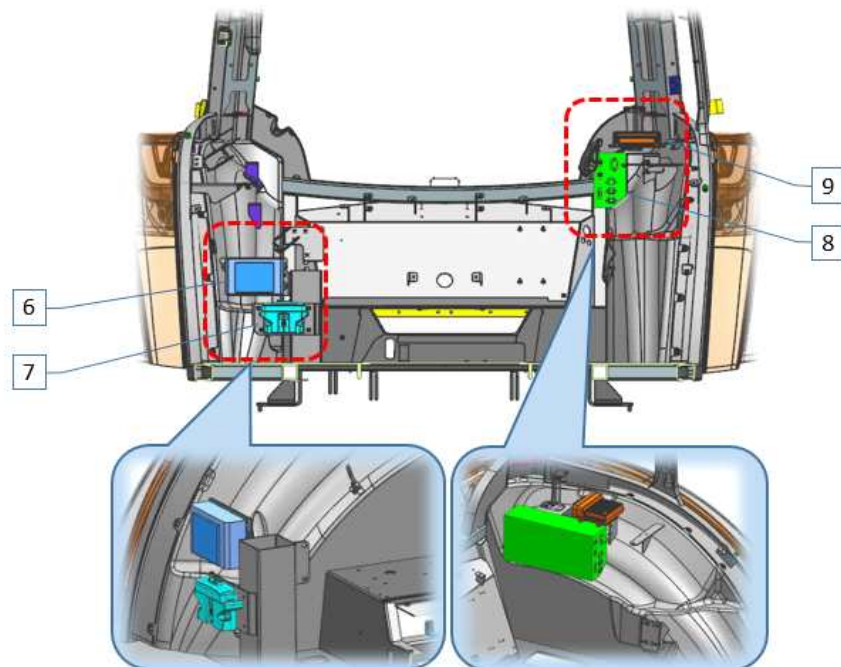
A필러 전방에 설치되어 차량 측면의 장애물을 감지하는 초음파센서는 2차년도 이후 적절한 설치높이를 결정하고 램프와 설치 구조를 공유하여 트랙터 외형에 어색함이 없는 구조로 설계, 제작 완료 되었다.



차량 후측면의 장애물을 감지하는 초음파센서는 후륜펜더에 설치되어있다. 후륜펜더는 트랙터 캐빈의 구조상 진동이 많이 발생하는 곳이므로 장애물 센싱오류나 센서의 내구성에 영향이 있을 수 있으므로 펜더 지지대의 구조를 보강하여 펜더의 떨림 진동을 축소하여 센싱오류와 내구성에 영향이 없도록 구조를 개선하였다.



트랙터의 캐빈 내부는 공간은 아주 협소하여 부가적인 장치가 설치 될 공간이 협소하다. 3차년도에 환경인식컨트롤러의 크기가 대폭 축소됨에 따라 다수의 컨트롤러를 좌우측으로 분리하여 운전석 공간에 침범되지 않고 각종 기능레버의 움직임에 간섭이 없는 공간으로 분리 배치가 가능한 레이아웃으로 캐빈 구조물을 설계하였다.



㉠ 트랙터 전장시스템 개선 설계

- 카메라를 통한 객체 영상인식 알고리즘 개선, 개발을 위해 객체 정의 및 데이터셋 수집, 라벨링 수정 작업을 수행하였다.

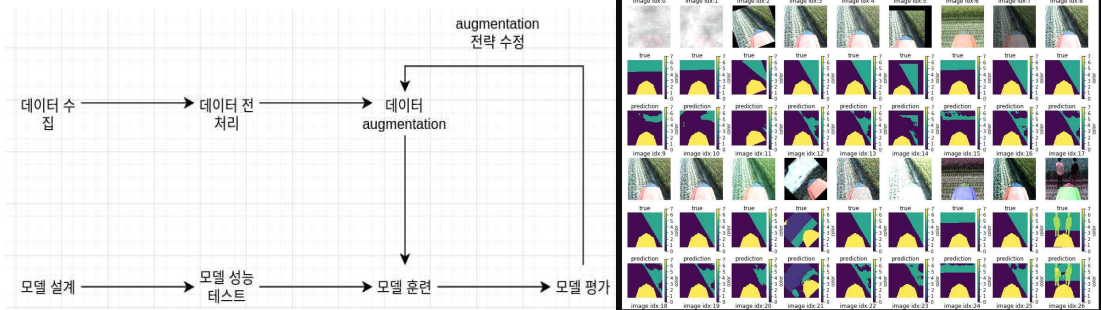
ID	Category	Classes
0	void	ground+ · dynamic+ · static+
1	flat	road · sidewalk · parking+ · rail track+
2	construction	building · wall · fence · guard rail+ · bridge+ · tunnel+
3	object	pole · pole group+ · traffic sign · traffic light
4	nature	vegetation · terrain
5	sky	sky
6	human	person · rider
7	vehicle	car · truck · bus · on rails · motorcycle · bicycle · caravan+ · trailer+



<라벨링 클래스>

<라벨링 데이터>

- Ai기반 이미지 세그멘테이션 알고리즘을 적용하여 오픈 데이터셋을 이용하여 pre-train을 수행하고 취득 데이터셋을 이용하여 fine-train을 수행하였으며, 데이터 어그멘테이션을 통해 작업지에서 얻어진 데이터에 날씨, 밝기 등을 임의호 수정하여 데이터 수를 보완하고 기존 훈련 데이터만 사용하였을때보다 over fitting을 방지하였다.



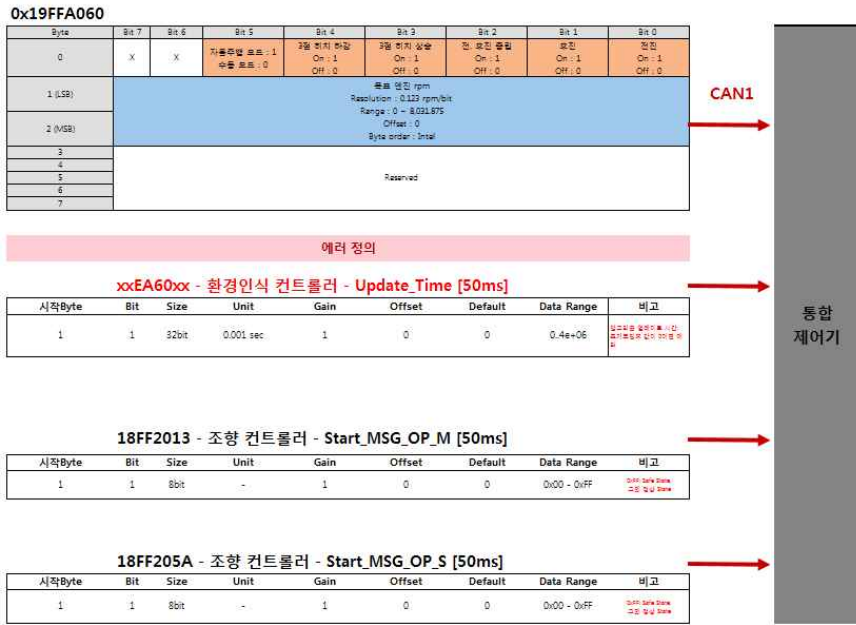
<데이터 어그멘테이션 전략>

<데이터 어그멘테이션으로 객체 인식 성능 향상>

㉡ 통합시스템 연동 최적화 개발

- ㉠ 통합시스템-작업환경 인식 모듈 CAN 통신 프로토콜 최적화 개발 및 연동 동작 시험

환경인식 컨트롤러의 동작상태 및 에러상태를 나타내는 CAN Protocol을 추가하여 통합제어기에서 환경인식컨트롤러의 동작을 모니터링하여 에러발생시 에러코드를 표시하고 자율주행을 중단하고 중립상태로 가도록 구현하였다.



<환경인식컨트롤러-통합제어기 CAN 통신 구성 및 Protocol>

④ 시제품 제작 및 시험

㉠ 시제품 제작 및 조립

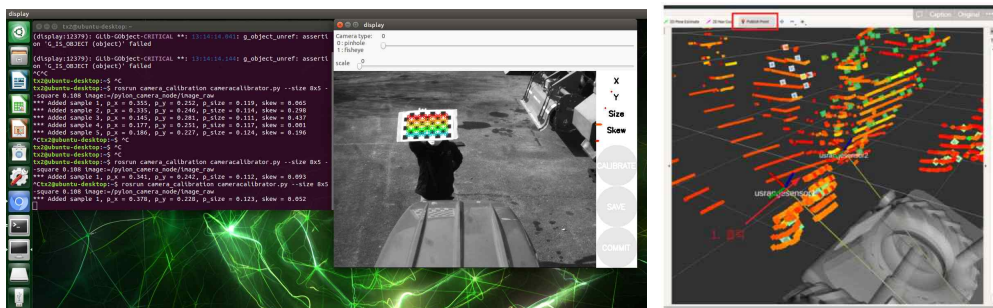
- 3차년도 환경인식컨트롤러는 양산성을 고려하여 크기를 최소화하고 장착부 형상에 맞게 수정 제작하였다. CAN, HDMI, USB, 초음파센서 입출력포트를 전면부에 배치하고 환경인식센서 확장성을 고려하여 이더넷 스위치허브를 전면부에 배치하였다.



<환경인식 컨트롤러 시제품>

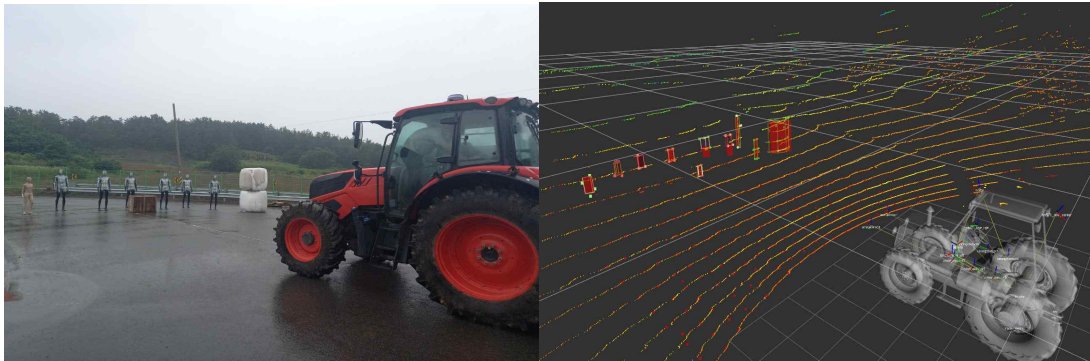
㉡ 튜닝 및 시험

- 제품 제작 및 조립후 환경인식컨트롤러의 카메라 캘리브레이션을 진행하고 환경인식 기능 점검 및 튜닝을 진행하였다.



<카메라 캘리브레이션 및 환경인식 튜닝>

- 환경인식 컨트롤러 튜닝 진행후 정량적목표항목의 환경인식거리/ 환경인식물/ 환경인식 속도에 대한 시험을 진행하였다. 환경인식 관련 모든 시험항목에서 기준을 달성하여 시험을 완료하였다.



<환경인식 정량적 목표 시험>

㉔ 자율주행 트랙터 시작품 개발

㉔ 자율주행 트랙터 시작품 조립용 부품 제작

㉔ 시작품 조립용 부품 제작: 스티어링조합 / 지붕조합/ 와이어하네스 / 호스류

① 스티어링조합 제작

틸팅구조 작동 속도가 개선 설계된 스티어링조합, 파워스티어링 유닛의 위치를 맞선으로부터 간격을 확보한 브라켓, 브라켓 위치 변경에따라 길이가 조절된 핸들축을 제작하였고, 2차년도의 계기판 프레임 설계 최적화 내용이 반영된 프레임에 조립하여 캐빈에 조립 전 서브모듈을 제작하였다.



② 지붕조합 제작

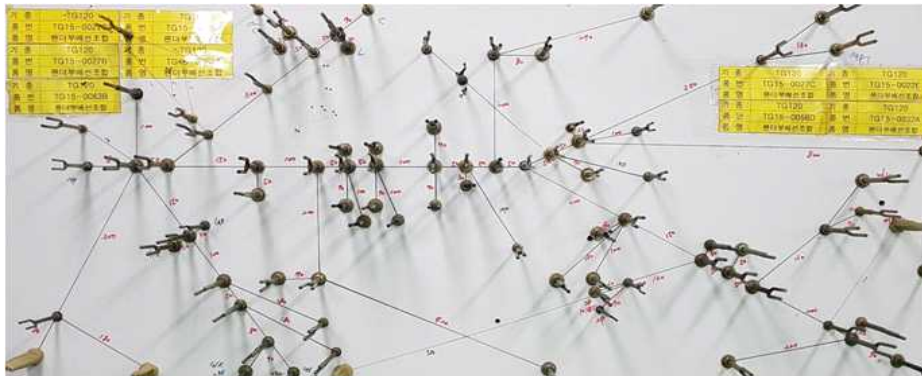
라이다와 카메라가 적용된 환경인식모듈의 장착 구조개선과 자세인식모듈의 장착 구조가 보강된 지붕조합을 제작하였다.



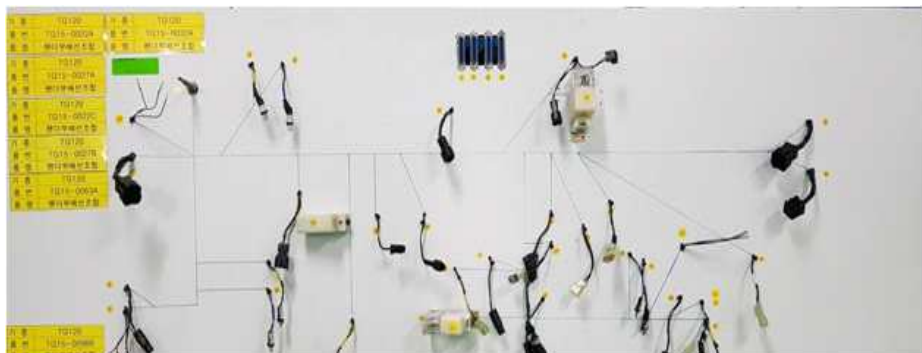
③ 와이어 하네스 제작

3차년 자율주행 차량 제작을 위한 와이어하네스 설계는 자율주행 구성품들의 조립 위치 변경 및 사이즈 변경에 따른 와이어하네스 라우팅을 변경하여 설계하였다.

또한 2차년도의 차량을 리워크하는 개념의 설계를 보완하여 보다 양산성을 높이기 위하여 트랙터 탑재된 와이어하네스에는 자율주행 단독 전원, GND, CAN 라인을 구성하였고, 자율주행관련 구성품들의 동작을 위한 와이어하네스는 옵션 KIT화로 설계 및 제작을 하였다. 이에 동일 기종 모든 차량에 자율주행 시스템을 옵션화로 적용될 수 있도록 하였다. 또한 양산 와이어하네스 제작과 동일한 커넥터 수밀 시험 등의 각종 시험을 진행하였고 제작 지그 및 검사 지그를 제작하여 양산성을 높일 수 있도록 하였다.



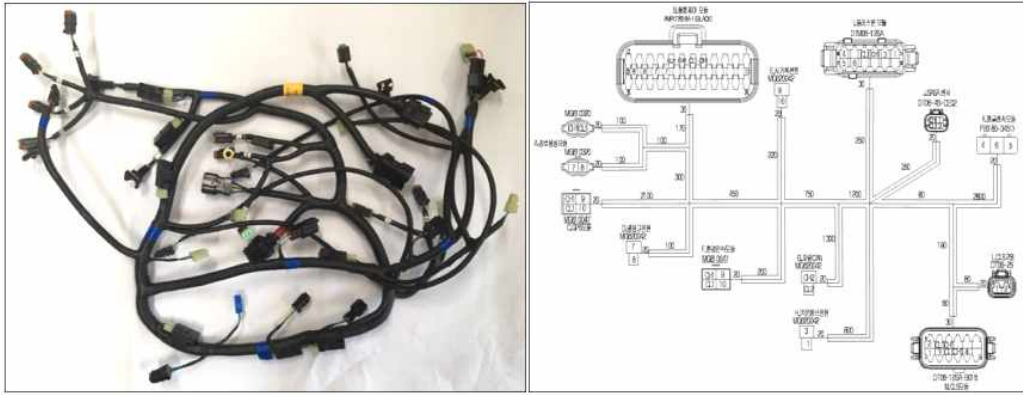
<배선 조립 지그 제작>



<배선 회로 검사 지그 제작>

조 건	0.2 bar 가압 시 (5분)	0.5 bar 가압 시 (5분)	0.8 bar 가압 시 (1분)
결과 사진			
결 과	▪ 0.2 bar 가압 시 (5분) → 수밀 TEST OK	▪ 0.5 bar 가압 시 (5분) → 수밀 TEST OK	▪ 0.8 bar 가압 시 (1분) → 수밀 TEST OK

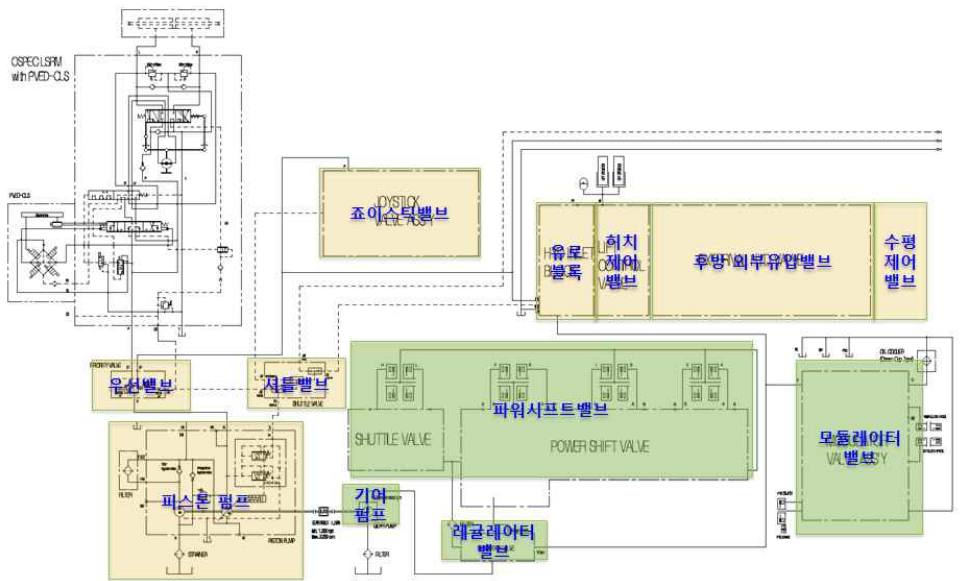
<수밀테스트>



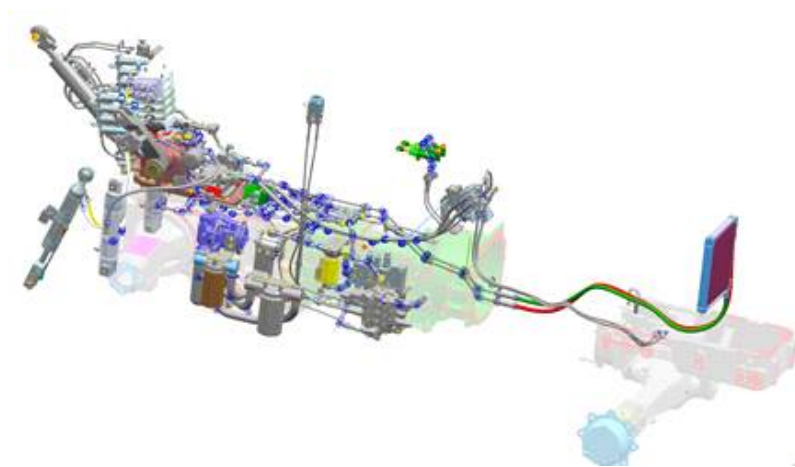
<제작 제품>

④ 유압 호스 및 튜브류 제작

3차년도 자율주행 트랙터 시작품 제작을 위하여 유압사양 및 유압회로를 수정, 보완하여 시작품 조립용 자율주행 트랙터 유압시스템 Layout을 설계하고 제작하였다.



<자율주행 트랙터 유압회로도>



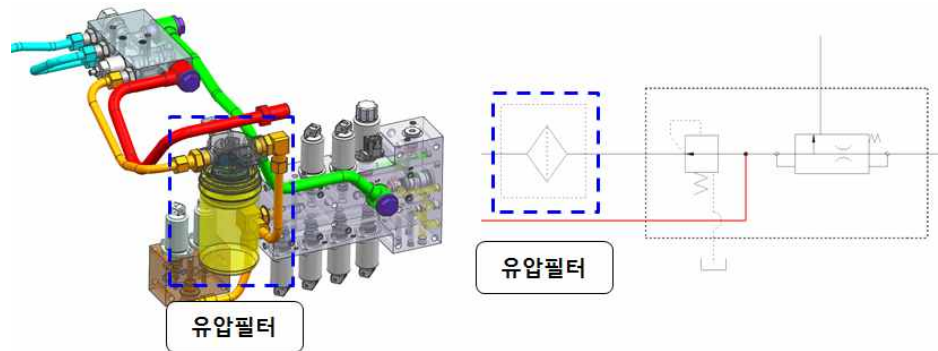
<자율주행 트랙터 유압시스템 Layout>

- 시작품 자율주행 트랙터의 유압시스템은 부하가 필요로 하는 곳에 유압에너지 (유량, 압력)을 공급하는 부하감응시스템으로 설계 하였다. 부하감응시스템은 CCLC(Closed Center Load Sensing) 시스템으로 유압부하가 없을시 유압에너지를 형성하지 않으므로 연료소모량 및 유온상승량 감소에 효과적이다.
- 시작품 자율주행 트랙터의 승강제어 및 외부작업기 제어를 위한 승강제어밸브 및 외부유압밸브는 자율주행 및 실 작업조건에서 본기 제어조건에 따라 구동될수 있도록 하기위해 정밀제어가 가능한 전자비례제어밸브와 솔레노이드밸브로 구성된 밸브를 선정하여 적용하였다.



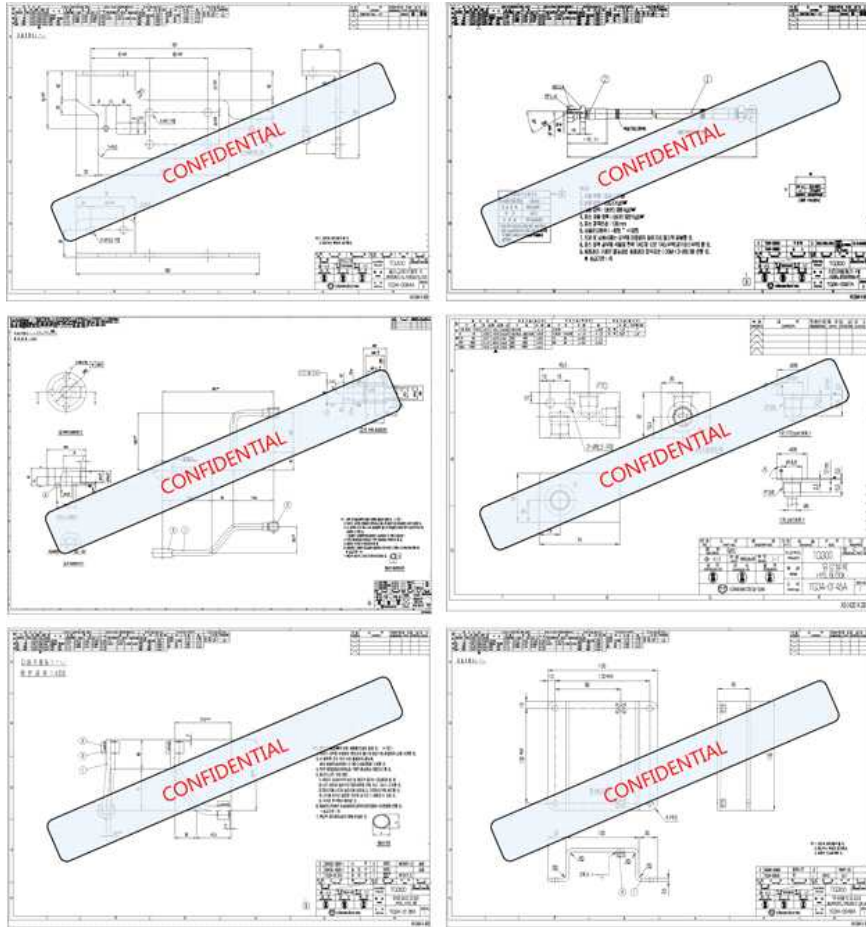
<자율주행 시작품 제작 유압 기능품>

- 자율주행 트랙터의 주행/조향/외부유압/승강 시스템에 적용중인 제어밸브는 다수의 전자비례제어 솔레노이드밸브로 구성되어 있어 이물질에 대해 상대적으로 취약한 구조임. 이를 보완하기 위해 별도의 중압필터를 추가로 구성하여 이물질 유입에 따른 밸브 오작동을 방지할 수 있도록 설계 하였다.



<유압필터 구성 layout>

- 시작품 제작용 유압부품 설계 도면



㉞ 자율주행 트랙터 시작품 조립

㉟ 시작품 제작용 기타 부품

	
<p>캐빈프레임</p>	<p>조향각센서브라켓</p>
	
<p>초음파센서 지지대</p>	<p>초음파센서 브라켓</p>
	
<p>모니터 지지대</p>	<p>라이다, 카메라 브라켓</p>
	
<p>환경인식모니터 및 경로 모니터</p>	<p>환경인식컨트롤러</p>

㊱ 시작품 트랙터 완성모습

	
<p>시작품 설계 형상</p>	<p>시작품 완성 모습</p>

㉔ 시작품 트랙터 자율주행 기능 구현 및 초기 튜닝

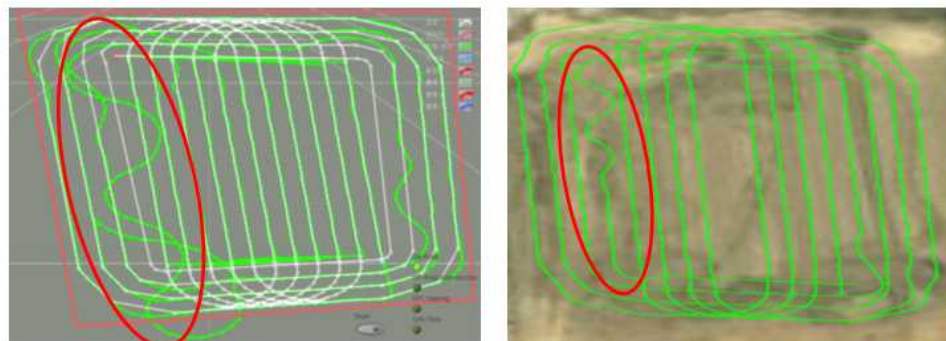
- 자율주행 내부경로의 경로추종을 성능개선 위하여 목표거리, 비레이득, 미분이득 변수를 조정한다. 기존 목표거리는 3m, 비레이득 0.8, 미분이득 0.3은 직진경로 주행 시 안정적으로 제어되나 선회 후 직진경로 진입에서 유효한 진입이 되지 않음으로 확인하였고, 이를 개선하기위해 목표거리 1.8m, 비레이득 0.4, 미분이득 0.3으로 변경하여 직진경로 진입에 대한 문제를 개선하였다.
- 자율주행 외각경로의 경우 작은 선회반경 경로로 인해 이탈하는 경우가 발생하였으며, 트랙터의 킥턴기능 활성화로 개선할 수 있었다.



(a) 기존 파라미터

(b) 변경 파라미터

< 튜닝파라미터 조정으로 직진주행경로 진입 개선 >



(a) 킥턴 기능 OFF

(b) 킥턴 기능 ON

< 킥턴 기능을 활용한 외각경로 경로추종 개선 >

© 자율주행 성능 평가

㉠ 자율 주행 트랙터 정량적 목표 시험(공인 기관 인증 시험)

① 조향 제어 모듈

㉠ 조향 반응시간

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
조향제어 모듈	조향반응 시간	초	< 0.5	0.11	만족


21-FACTMP-122

시험 성적

1. 기 종 명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-122
3. 형 식 명: HX1400ATSC
4. 형 식: 4륜구동형
5. 규 격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)
6. 시험성적:
 - 6.1. 성능시험
 - 6.1.1. 시험조건
 - 일시: 2021. 06. 16.
 - 장소: 경남 창원군 (원대동) 기술연구소
 - 조향반응 시간 측정 방법: 조향 명령 후와 조향실린더 반응시작 시와의 시간차
 - 6.1.2. 시험결과
 - 조향반응 시간: (1차) 116.9 ms, (2차) 101.9 ms, (3차) 111.3 ms
7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향 기능을 장착한 농업용트랙터로 조향반응 평균시간은 110.0 ms 로 나타남
8. 시험결과

본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임



책임연구원
김관우

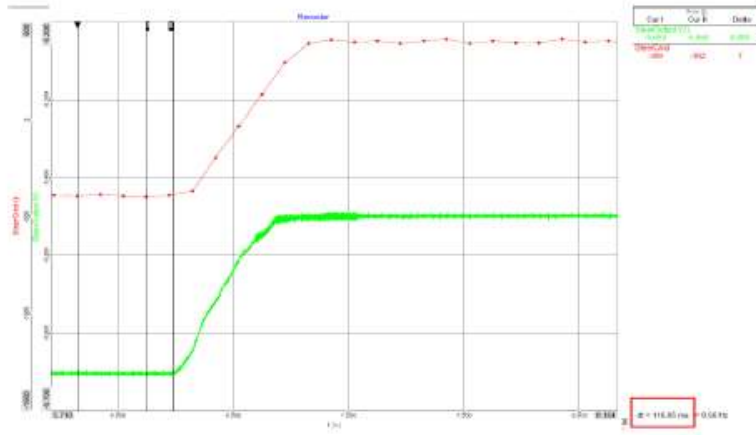
책임연구원
한태호

책임연구원
조태경

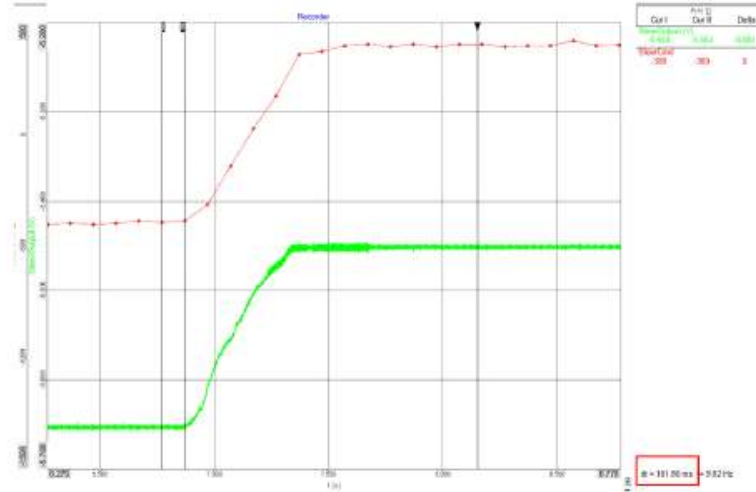
연구원
김은숙

[붙임] 조향반응 시간 시험 결과 그래프

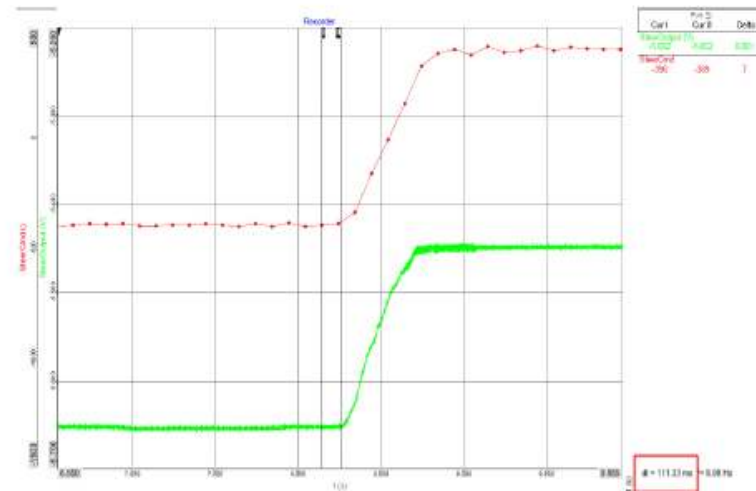
(1차)



(2차)



(3차)



② 작업환경 인식 모듈

㉠ 환경 인식 속도

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
작업환경 인식모듈	환경인식 속도	hz	> 20	21	만족

21-FACTMP-125

시험 성적

1. 기 종 명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-125
3. 형 식 명: HX1400ATSC
4. 형 식: 4륜구동형
5. 규 격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)
6. 시험성적:
 - 6.1. 성능시험
 - 6.1.1. 시험조건
 - 일시: 2021. 06. 16.
 - 장소: 경남 창원군 (주)대동 기술연구소
 - 환경인식 센서 종류 및 부착위치: 라이다, 캡 전방 상단
 - 설치 장애물 개수: 10 개(마네킹7, 전봇대1, 수확상자2)
 - 6.1.2. 시험결과
 - 평균구행속도: 3.5 km/h
 - 접근 시 장애물인식 평균시간: (1차) 477.1 ms, (2차) 477.2 ms, (3차) 473.9 ms
 7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향을 위해 환경인식 센서(라이다)를 부착한 농업용트랙터로 접근 시 장애물인식 평균시간은 476.1 ms 로 나타남
 8. 시험결과

본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임

책임연구원
김관우

김관우

책임연구원
한태호

한태호

선임연구원
조태경

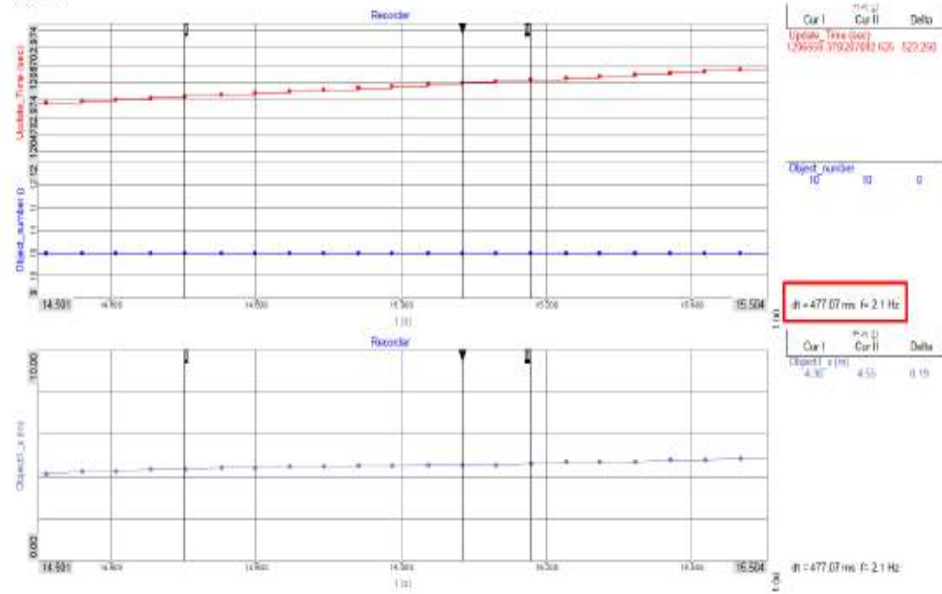
조태경

연구원
김은국

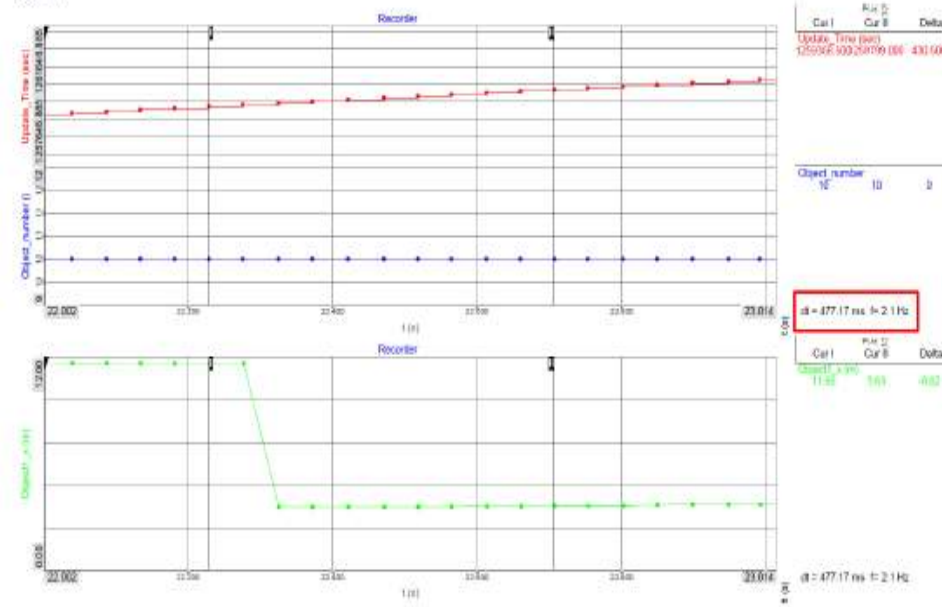
김은국

[붙임] 장애물인식 속도 시험 결과 그래프

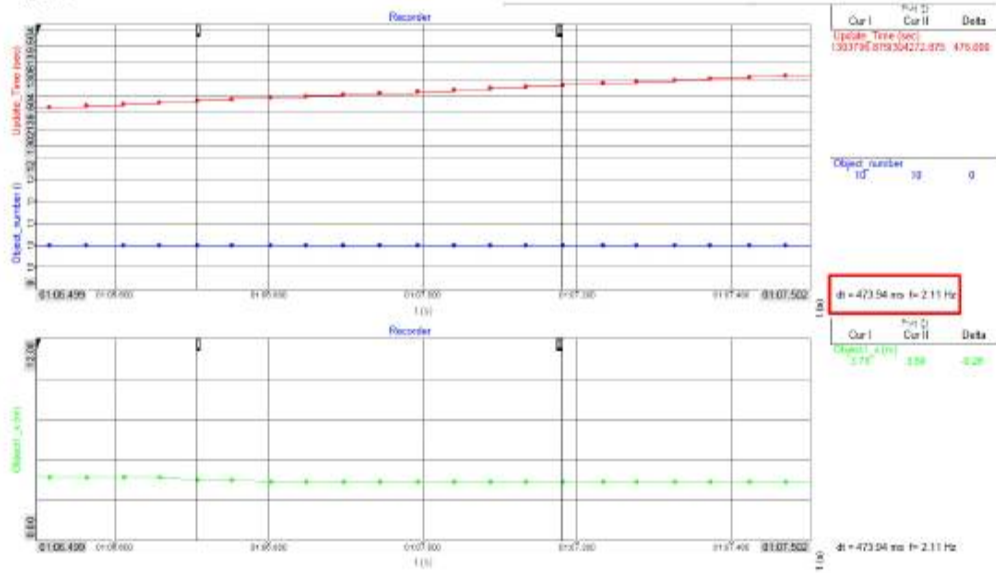
(1차)



(2차)



(3차)



㉞ 환경 인식률

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
작업환경 인식모듈	환경인식률	%	> 95	100	만족

시험 성적

1. 기 종 명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-124
3. 형 식 명: HX1400ATSC
4. 형 식: 4륜구동형
5. 규 격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)
6. 시험성적:



6.1. 성능시험

6.1.1. 시험조건

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| · 일시 | 2021. 06. 16. |
| · 장소 | 경남 창원군 (위대동 기술연구소 |
| · 환경인식 센서 종류 및 부착위치 | 라이다, 캡 전방 상단 |
| · 설치 장애물 개수 | 10 개(마네킹7, 전봇대1, 수확상자2) |
| · 트랙터 상태 | 정지 상태 |

6.1.2. 시험결과

- | | |
|-------------|-----------|
| · 장애물 인식 개수 | (1차) 10 개 |
| | (2차) 10 개 |
| | (3차) 10 개 |
| · 장애물 인식률 | 100 % |

7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향을 위해 환경인식 센서(라이다)를 부착한 농업용트랙터로 정지 시 장애물 인식률은 100 % 로 나타남

8. 시험결과

본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임

책임연구원
김관우

김관우

책임연구원
한태호

한태호

선임연구원
조태경

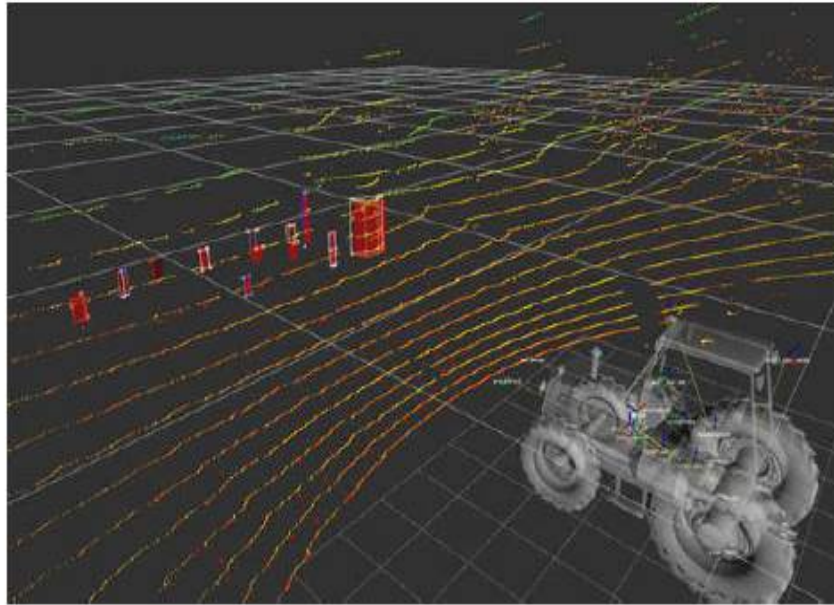
조태경

연구원
김은숙

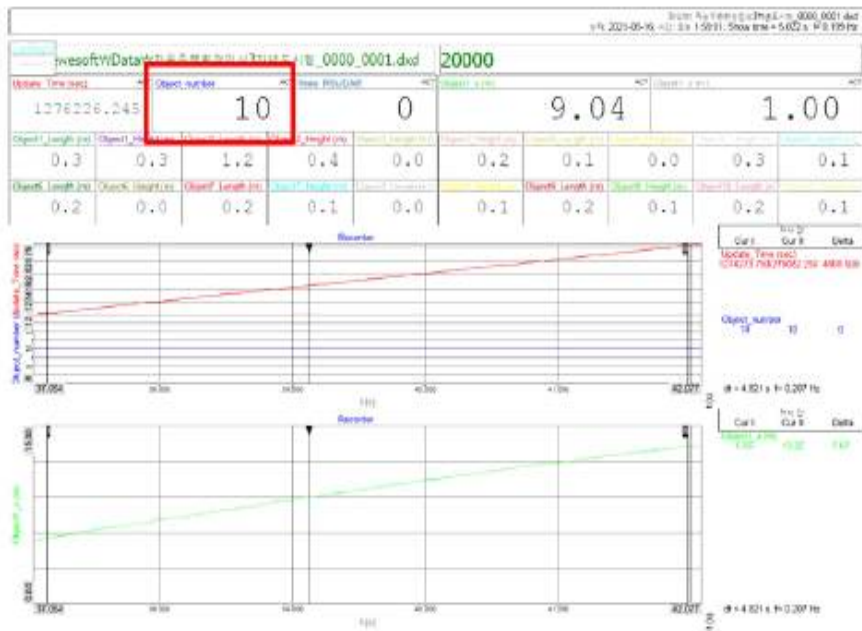
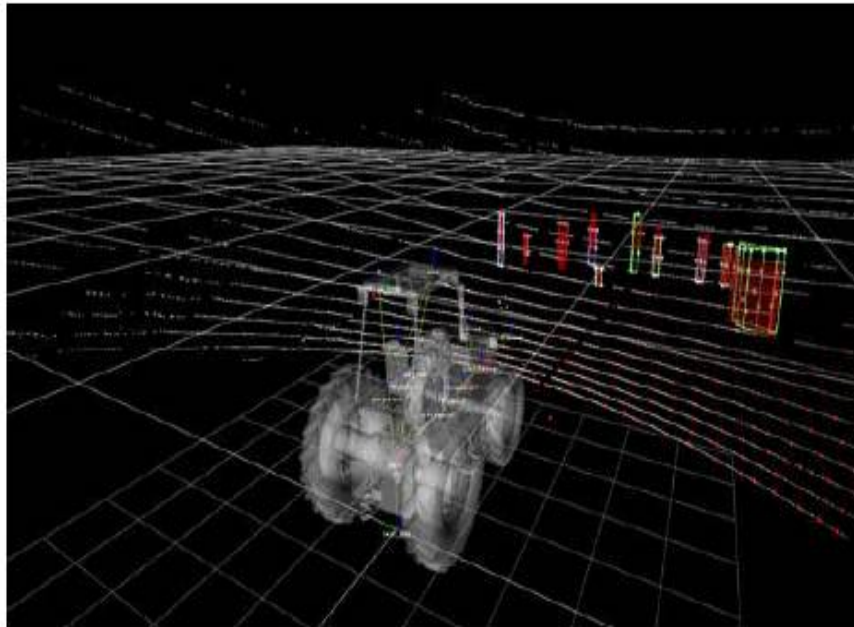
김은숙

[붙임] 환경인식 시험 결과 그래프

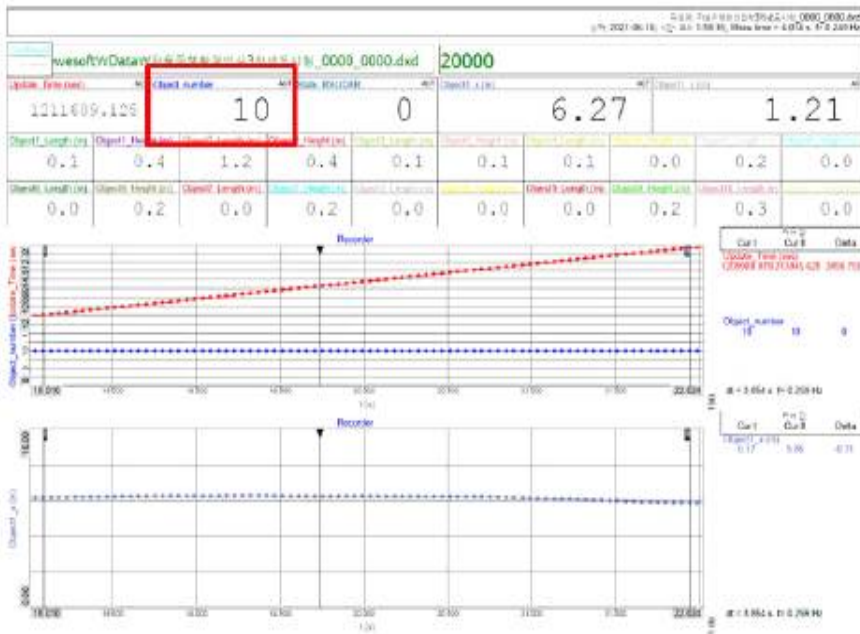
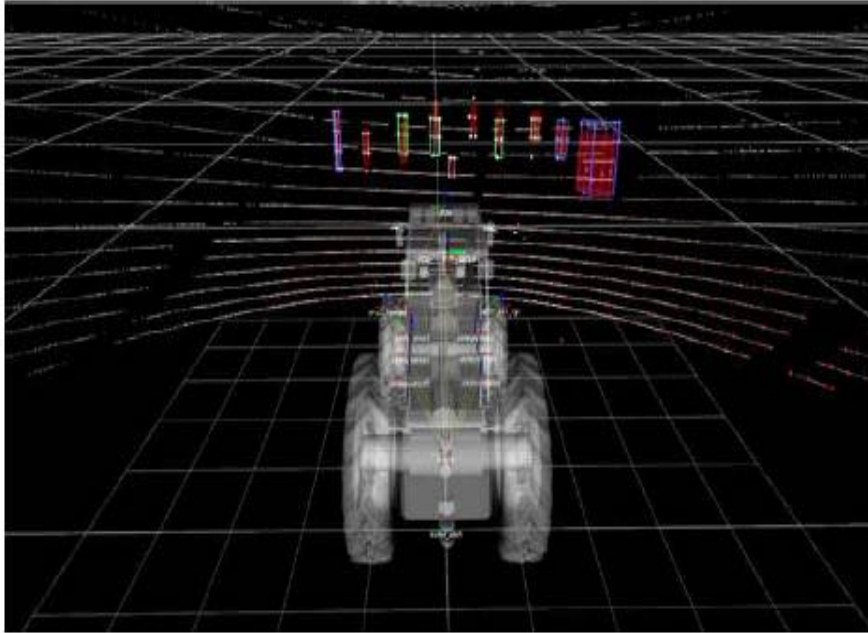
(1차)



(2차)



(3차)



㉔ 환경 인식 거리

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
작업환경 인식모듈	환경인식 거리	m	> 10	정지시 15.6 접근할 때 15.3 멀어질 때 15.8	만족

시험 성적

1. 기종명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-123
3. 형식명: HX1400ATSC
4. 형식: 4륜구동형
5. 규격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)



6. 시험성적:

6.1. 성능시험

6.1.1. 시험조건

- 일시: 2021. 06. 16.
- 장소: 경남 창원군 (주)대동 기술연구소
- 환경인식 센서 종류 및 부착위치: 라이다, 캡 전방 상단
- 환경인식 표시 방법: 환경인식 컨트롤러 모니터
- 설치 장애물 개수: 10 개(마네킹7, 전봇대1, 수확상자2)

6.1.2. 시험결과

- 평균주행속도: 3.5 km/h
- 장애물 인식 평균거리: (정지 시) 15.6 m
(접근할 때) 15.3 m
(멀어질 때) 15.8 m

7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향을 위해 환경인식 센서(라이다)를 부착한 농업용트랙터로 주행 시 장애물 인식 평균거리는 정지 시 15.6 m, 접근할 때 15.3 m, 멀어질 때 15.8 m로 나타남

8. 시험결과

본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임

책임연구원
김관우

김관우

책임연구원
한태호

한태호

선임연구원
조태경

조태경

연구원
김은국

김은국

③ 자율주행 트랙터

① 작업 오차

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
자율주행 트랙터	작업오차	cm	< 15	1.0	만족

시험 성적

1. 기 종 명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-120
3. 형 식 명: HX1400ATSC
4. 형 식: 4륜구동형
5. 규 격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)



6. 시험성적:

6.1. 성능시험

6.1.1. 시험조건

· 일시	2021. 06. 16.
· 장소	경남 창원군 ㈜대동 기술연구소
· 시험노면	아스팔트
· 주행거리	50 m
· 위치 측정점	캡 상부 유리창 뒤
· 부속작업기	없음

6.1.2. 시험결과

· 평균주행속도	3.5 km/h
· 직진주행 이탈오차(RMS)	(1차) 0.94 cm (2차) 0.90 cm (3차) 1.16 cm

7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향 기능을 장착한 농업용트랙터로 직진주행 이탈 평균오차는 1.00 cm 로 나타남

8. 시험결과

본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임

책임연구원
김관우

김관우

책임연구원
한태호

한태호

선임연구원
조태경

조태경

연구원
김은국

김은국

[붙임] 주행 작업 시험 결과 그래프

(1차)



(2차)



(3차)



㉞ 작업 정확도

구분	평가 항목	단위	개발목표치	시험 결과	평가
자율주행 트랙터	작업정확도	%	< 5	1.7	만족

21-FACTMP-121

시험 성적

1. 기 종 명: 농업용트랙터
2. 시험번호: 21-FACTMP-121
3. 형 식 명: HX1400ATSC
4. 형 식: 4륜구동형
5. 규 격: 디젤 92kW(PTO 최대출력)



6. 시험성적:

6.1. 성능시험

6.1.1. 시험조건

- 일시: 2021. 06. 08.
- 장소: 전남 함평군 손불면 석창리 1250-3
- 포장종류: 논(미경운지)
- 작업내용: 토터리 작업
- 부착토터리: 형식명 : K2600
제조사 : CELLI(이탈리아)
작업폭 : 2 600 mm
- 작업방법: 회행법 및 순차경법(자율직진·조향)
- 작업단수: 주: 1 단, 부: L 단
- 포장면적: 2 500 m² (50 m × 50 m)

6.1.2. 시험결과

- 총 작업시간: 40.0 min
- 미경운지 면적: 42.5 m²

번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
면적(m ²)	6.34	0.96	5.44	3.64	7.19	6.38	3.31	2.22	3.28	3.75

- 미작업 면적 비율: 1.7 %

7. 시험제품 개요

본 기대는 GPS 자율직진 및 조향 기능을 장착한 농업용트랙터로 50 m × 50 m 구역을 40분간 로터리 작업 시 경운작업 면적률은 98.3 %로 나타남

8. 시험결과

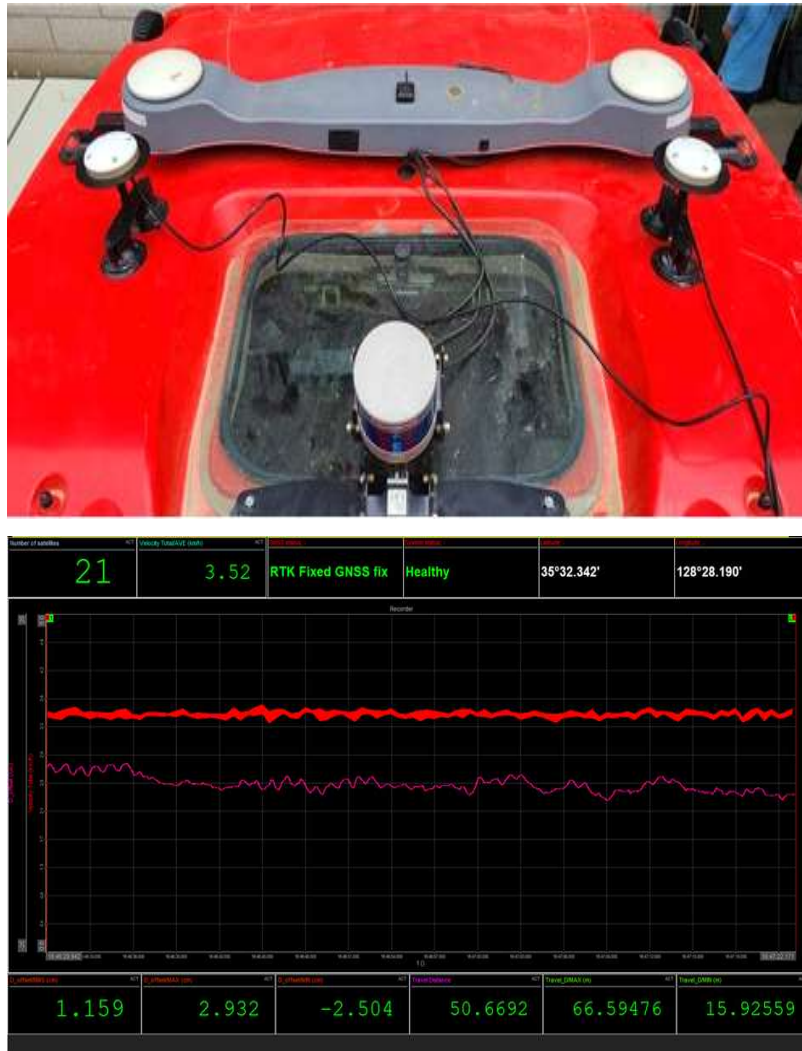
본 시험성적은 농업기술실용화재단 「분석시험 의뢰 및 처리규칙」 제5조 제2항의 규정에 따라 의뢰자가 요구한 시험방법을 적용하여 실시된 성능시험 성적임

책임연구원 김관우	김관우	책임연구원 한태호	한태호	선임연구원 조태경	조태경	연구원 김은국	김은국
--------------	-----	--------------	-----	--------------	-----	------------	-----

㉠ 현장 실증 작업을 통한 자율 주행 오차 시험

- 직진 주행시 계획된 주행경로와 실제 주행경로와의 평균제곱근 오차 측정
- 로타베이터 실작업, 고속쟁기 실작업시 자율주행 오차 시험 진행함
- 경남 창녕읍 완산리, 모산리, 효정리 작업지 실증 작업 진행함

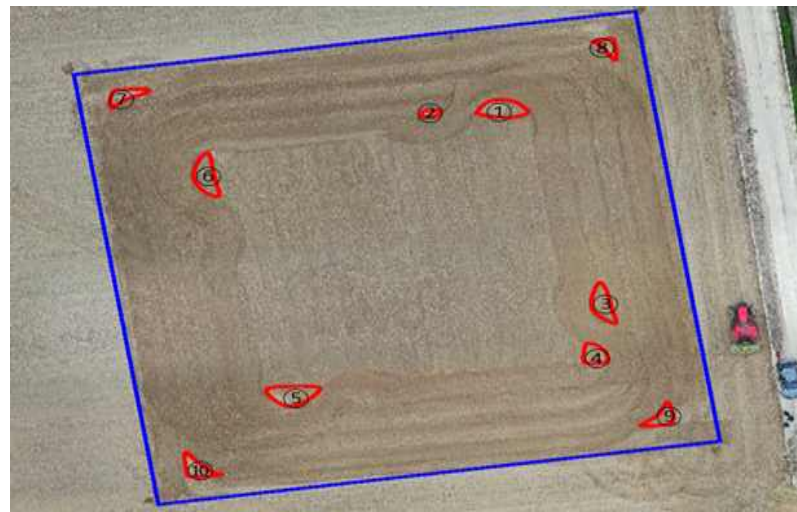




㉔ 현장 실증 작업을 통한 자율 주행 작업 정확도 시험

- 작업지를 로타리 작업하여 미경작 면적을 실측하여 전체 면적 대비 비율로 계산
- 드론을 이용하여 포장 작업지를 촬영하고 작업지에서 미경작지를 구역을 표시하고 미경작지 면적을 구함.
- 미경작 면적의 실측값과 드론으로 촬영한 미경작지 면적을 비교 평가함.
- 경남 창녕, 전남 함평, 전남 나주 작업지에서 실증 작업을 진행함.





<미경작 면적의 실측>



<미경작 면적의 조사>

⑩ 자율주행 트랙터 실증 시험

① 농작업 실수요자에게 트랙터 대여를 통한 실작업성 검증

① 목적

- 자율주행 트랙터 연속 작업을 통한 실작업 문제점 도출

② 실증시험자

- 경남 창원군 대지 위탁 영농단

③ 실증 시험 기간

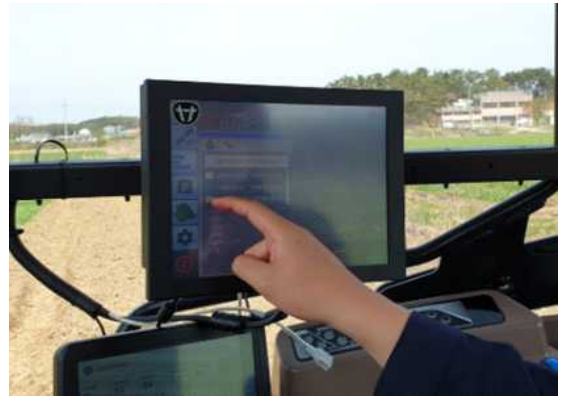
- 2021.04.~2021.05.

④ 실증 작업지 및 작업 면적

- 경남 창원군 창녕읍 일대, 34000평

⑤ 실증 작업 종류

- 논 고속 쟁기 작업, 논 로타리 작업



<실증시험을 위한 사용자 교육>



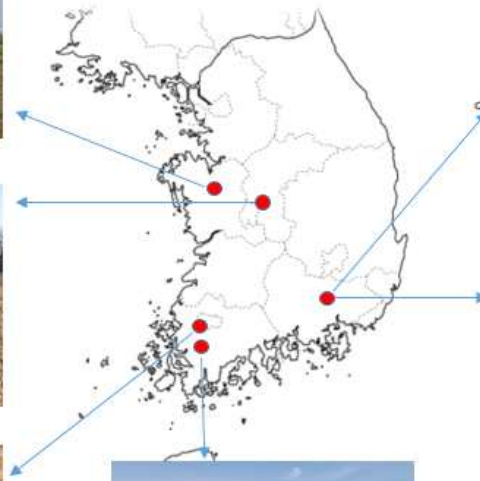
충남 공주시 우성면



충북 옥천군 양수리



전남 나주시 무인자동화실증단지



전남 함평군 손불면



경남 창원군 완산리, 모산리, 효정리

<실증시험 장소>

자율 주행 트랙터 작업 일지

1. 목적 : 자율 주행 트랙터 연속 작업을 통한 문제점 도출
 2. 의뢰자 : 대동 삼성 개발본부 자정사업팀 이동근 차장
 3. 작업자 : 이지 위치 영준단
 4. 자재 : 자율주행 트랙터 실험용 연구개발 사업단 3차년도 개발 트랙터

담당자 : 차정사업팀 이동근 차장

작업 일자	작업 시간	작업 면적	작업 종류	작업 위치	점검자	작업 결과
4/19	19:30 ~ 18:30	3000평	간속 주행	왕산리	이동근	1. 작업 초기 진작이 어려움 2. 선반, 용량다리 등 장애물 작업 때문에 풀리기에 때문에 다들한 작업 때문에 3. 작업이 시작되면 트랙터가 하일때는 시정해 놓기 이 경각지 발생 4. 선반이 면 한쪽을 낮아져 야동 사안 인데 정진 5. 경각지 관아가 짧은 경우 경각생성 인됨 6. 인터폴레이션 한기능 등장은 인가 발생.
4/22	6:40 ~ 9:30	3200평	간속 주행	왕산리	이동근	
4/23	10:00 ~ 15:00	3000평	로터리	서기리		
4/28	9:00 ~ 9:00	2400평	로터리	농성리	이동근	
4/30	9:00 ~ 8:30	1500평	로터리	원흥리	심동준	
5/5	6:00 ~ 12:00	4000평	로터리	농성리		
5/6	8:00 ~ 12:00	3000평	로터리	농성리		
5/7	14:30 ~ 16:00	1200평	로터리	용산리	이동근	
5/9	8:00 ~ 11:00	2400평	로터리	서기리		
5/10	10:00 ~ 13:00	2400평	로터리	서기리		
5/11	9:00 ~ 9:30	1200평	로터리	서기리	이동근	
5/14	14:30 ~ 18:00	3000평	로터리	농성리		
5/19	10:00 ~ 14:00	3000평	로터리	왕산리		
5/17	6:00 ~ 11:00	3000평	로터리	서기리	이동근 심동준	

2021 5 17

작업자 이강래 ~~이동근~~

<실사용자 작업일지>

㉔ 자율주행 작업시 개선사항, 불편사항, 문제점 취합 및 보완 대책 마련
 - 자율주행 트랙터 실증시험 불편사항

No	작업 시 불편사항	보완 대책 마련
1	작업 초기 조작성이 어려워 나이가 많은 사람은 조작성이 어렵다.	조작성 개선 및 자율주행 교육 실시 필요
2	초벌, 물로타리 등 작업마다 작업 패턴이 다르기 때문에 다양한 작업 패턴이 필요하다.	작업 종류에 따른 경로생성개발필요
3	주행이 시작되고 로타리가 하강되는 시점이 늦어 미경작지가 발생한다.	하강 시간에 대한 파라미터 적용하여 개선 후 평가 시험 완료
4	선회시 엔진회전수가 낮아져서 이동시간이 오래 걸린다.	선회 시 엔진회전수 유지 되도록 개선 후 평가 시험 완료
5	경작지 길이가 짧은 경우 경로 생성이 되지 않는다.	- 트랙터 제원(크기 및 선회 반경)에 따라 크기가 작은 경작지에서 경로가 생성되지 않을 수 있음 - 주행 가능한 대체 경로 생성 또는 경로 생성 실패 알림 필요
6	최대 조향시 보호 기능 동작으로 오류가 발생한다.	최대 조향 설정 레벨을 변경 적용 후 평가 시험 완료

㉕ 자율주행 작업시 기능 Safety부분 검증 진행

No	자율주행 작업시 기능 검증 내용	비고
1	경작지 등록 후 시작점 이동시 불필요한 시간 소요	수동 조작 대비
2	직진 로타리 작업후 선회시 RPM 변경(약 1500rpm) 되어 느낌	선회시 RPM 설정값 변경으로 해결 가능
3	경작지 크기가 클때 다음 직진작업 영역 접근시(선회 후 이동) 거리가 길어 불필요한 시간 소요 과다(시간, 연비 문제)	
4	경작지 크기가 클 때 다음 직진 작업 영역 접근시(선회 후 이동) 반복 이동으로 땅이 다져져 로타리 깊이 작업되지 않음	
5	외각 모퉁이 부분 미 경작지 발생	
6	GPS 위치(트랙터 센터) 오차로 최 외각 논두렁 옆 미 경작지 발생(약 1.2m)	
7	마무리 외각선회 작업 영역이 현재 4회로 너무 많음 (실작업시 2~3회)	
8	내부 미경작 영역 발생(직진 구간간 미경작은 없고, 외각 선회 작업 4회 후) 1회 더 외각 선회 작업을 해야 경작 될 수준임	
9	직진 끝 작업 구간 히치 상승 속도가 빨라 흙이 쌓임	실작업시에는 로타리를천천히 상승시켜 흙을 분산시킴
10	히치 하강 시점 늦어 미 경작지 발생	로타리 거리 파라미터조정으로 해결 가능
11	경로 생성이 일정 길이 이하에서 생성되지않은 문제 (포장지 길이,폭이 50m이상)	

㉔ 자율주행 트랙터 검정 프로세스 검토 시험

㉕ 자율주행 안전성 평가 기술 개발

- 자율주행 트랙터의 안전성에 대한 평가 항목을 분류하고 평가방안을 도출하여 농작업을 안전하게 할 수 있도록 평가 기술을 개발함.

① 주행 안전 평가기술

- 자율주행에 필요한 각각의 모듈이 정확도를 확보해야 이를 기반으로 자율주행 제어가 안전성을 확보할수 있다. 각각의 모듈은 위치 인식 모듈, 조향 제어 모듈, 작업 환경 인식 모듈이고 정확도를 평가하기 위한 기술이 필요함.
- 자율주행 기술을 장착한 트랙터가 안전한 운행을 위해 차량 경로 설정의 안전성, 장애물 환경인식의 신속성 및 정확성, 설정 경로에 대한 자율주행 경로 오차가 적정하게 수행하는지 여부를 확인하고 평가하기 위한 기술이 필요함.

② 고장 안전 평가기술

- 자율주행 트랙터의 복잡한 전자제어 장치의 여러 기능과 관련하여 최소한의 기능 고장 안전 설계 여부, 전자제어장치 고장시 제어 전략의 적정성 등을 평가하기 위한 기술

자율주행 안전성 평가기술	관련 기술 분야	평가 방법
주행 안전 평가 기술	위치 인식 모듈	정지 위치 오차
	조향 제어 모듈	조향 반응 시간
	작업 환경 인식 모듈	장애물 환경 인식 속도
		장애물 환경 인식율
		장애물 환경 인식 거리
	경로 생성 및 추종 시스템	차량 경로 생성 시간
		차량 경로 추종 오차
	자율 주행 정확도	자율주행 주행 오차
자율주행 작업 정확도		
고장 안전 평가 기술	통합 시스템 평가	자가 진단 평가
		정전기 시험
		전자파 시험

㉔ 자율주행 트랙터 현장 실증 작업 절차 개발

① 현장 실증 작업 가설 및 평가 목표 수립

- 자율주행 트랙터 단계(Level 1 자동조향, Level 2 자율주행, Level 3 자율작업, Level 4 무인자율작업)에 따른 현장 실증 작업의 가설을 세우고 현장 실증 작업의 평가 목표를 수립함.

② 현장 실증 작업의 성과 지표 설정

- 실증 작업의 조건별 경작지 작업 오차 지표 설정
: 경작지 면적, 장착 작업기, 토양 조건, 작업지 경사도
- 농작업 효율 지표 설정
- 자율주행 농기계 운행 중 사고 지표 설정

③ 현장 실증 평가 절차서 개발

- 주변환경 감지센서(LiDar, 초음파 등), 고정밀 측위시스템(RTK-GNSS), 경로 설정 및 모니터링 시스템, 자율주행 트랙터에 작업이 가능한 작업기 평가 절차서 개발
- 경로추종 성능/ 조향제어 성능/ 조향 반응 시간/ 경로 추종 오차/ 장애물 인지 평가 절차서 개발

④ 시험 평가 및 데이터 분석

- 사각형 농지 뿐만 아니라 다각형과 같이 규격화 되어 있지 않은 다양한 필드 외형 조건에서의 성능 시험이 필요함.
- 시험 평가 절차서에 따라 시험 평가를 진행하고 데이터 분석을 통해 현장 실증 작업의 문제점을 분석하고 개선 결과를 도출함.

나. 협동연구기관 1 (동양물산기업(주) 중앙기술연구소)

㉔ 자율주행 경로생성 및 추종 모듈 실증평가 및 개선품 개발

㉔ 자율주행 경로생성 및 추종 모듈 실증평가

㉔ 경로 생성 및 추종 알고리즘 검증 시험

개발한 가상환경 시뮬레이터를 이용하여 트랙터 탐색 알고리즘을 검증위해서 우선 실차 주행 통해 시뮬레이터의 검증 실험을 진행

시뮬레이터의 조향속도는 실차 조향 휠을 구동한 모터의 구동속도(120°/s) 와 일정하게 맞추었으며 사전에 계획된 경로를 추종실험을 진행

주행 경로는 크게 3 부분으로 구성되었으며 직진주행 하나과 회전주행 두 개임 시뮬레이터 검증 실험의 주행 조건은 아래 표 14과 같음

Item	Set value
Waypoint interval(1 st curve)	5m
Waypoint interval (Straight line)	35m
Waypoint interval(2 nd curve)	15m
Forward velocity	4km/h
LBO	0.4m
GPS	10Hz

표 135 Driving conditions for simulator validation

- 시뮬레이터 검증 실험 결과

시뮬레이터 검증 실험에서 계획한 경로를 따라 이탈 현상이 없었고 그림 1과 같이 경로탐색 알고리즘이 정확히 조향각을 연산하여 경로를 성공적으로 추종함

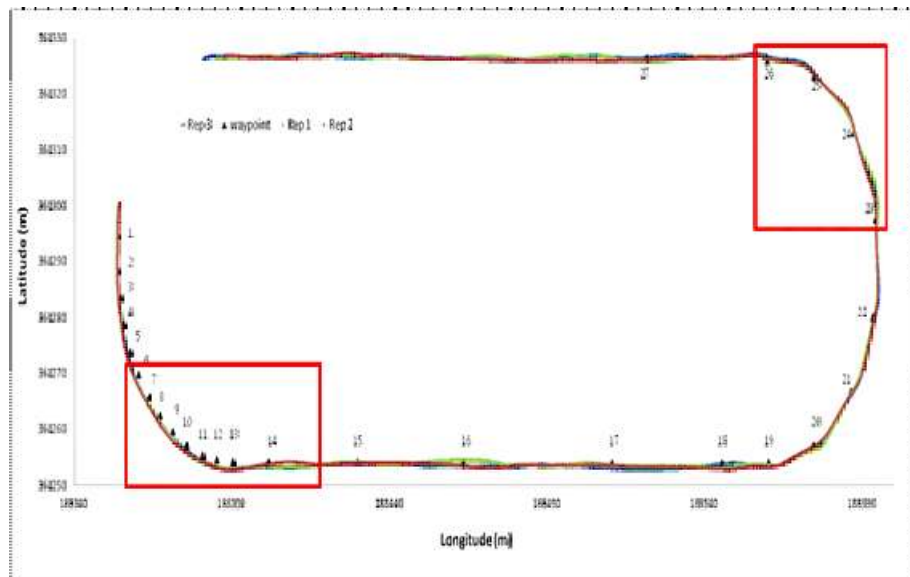


그림 640 Test result of simulator validation

그림 2와 같이 1st curve path(point 1->13)와 2nd curve path(point 19->26)의 경로점 간격의 차이로 생성된 조향각 및 추종 궤적이 많이 차이가 있음

1st curve path 구간에서 생성된 조향각의 범위는 0~-25도 이며 2nd curve path 구간에서 생성된 조향각의 범위는 5~-30도, 즉 트랙터가 같은 경로조건을 이

용하여 시뮬레이션 조향 값과 실차주행 조향 값을 비교 후 데이터가 많이 유사함

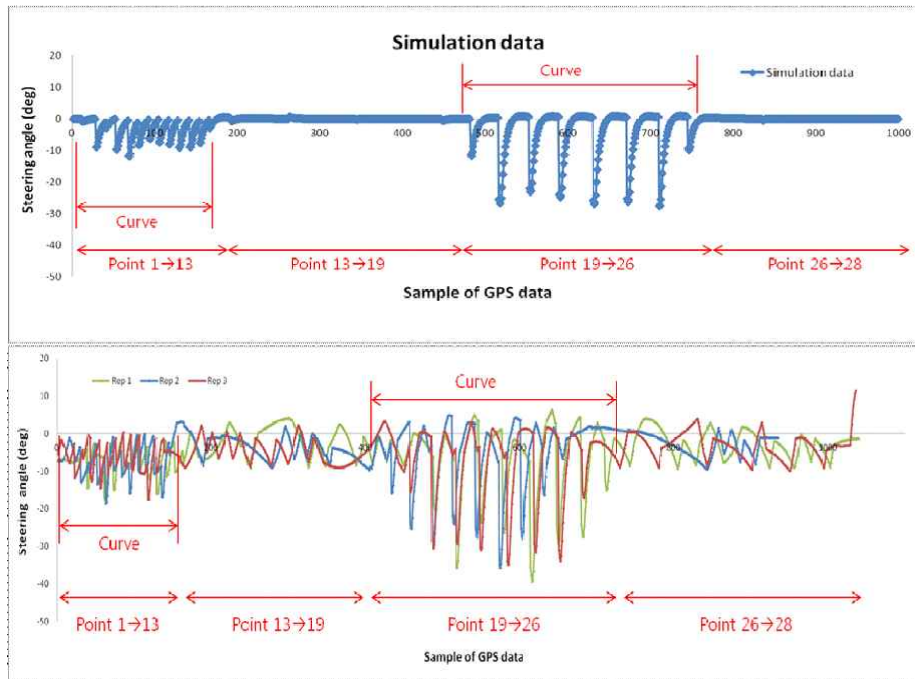


그림 641 Steering angle changes generated along the tracking route

㉔ 경로추종 성능 시험

- 시험 환경

경로 추종 성능 검증을 하기 위한 시험은 전라북도 김제시에 위치한 첨단농기계 종합지원센터의 테스트 트랙에서 진행함

주행 경로는 직선과 곡선 코스로 이루어져 있으며 총 주행거리는 560m, 직선 주행거리는 직선 주행거리는 200m.

노면은 마른 상태이고 아스팔트 포장로이며, 주행속도는 운전자가 10km/h를 유지



그림 642 테스트 트랙과 경로

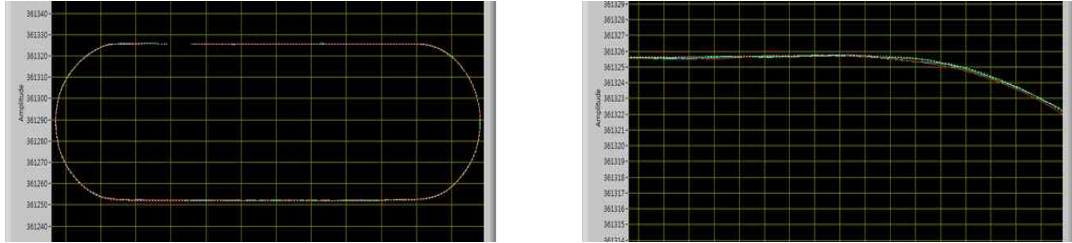
- 시험 방법

실험 방법은 경로를 설정하고 그 경로를 추종한 결과인 트랙터의 궤적을 경로와 비교하였으며 이때 발생하는 오차는 경로와의 횡방향 오차 즉, 수직 거리를 의미한다. 트랙터의 초기위치 때문에 발생하는 초기 수렴 오차는 제외.

- 실험 1. 트랙 전체 시계방향(CW) 주행
- 실험 2. 트랙 전체 반시계방향(CCW) 주행

- 결과 분석

시험 1) 트랙 전체 시계방향(CW) 주행 (3회 반복 시험)



전체 주행 경로

주행 경로 확대

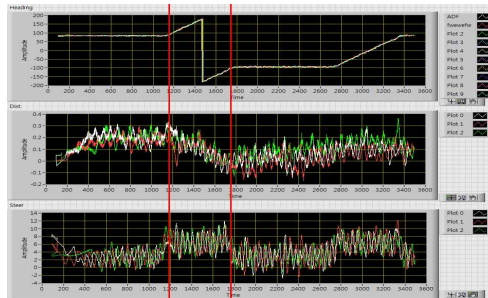


그림 645 트랙 전체 시계방향(CW) 주행 시험 결과 그래프

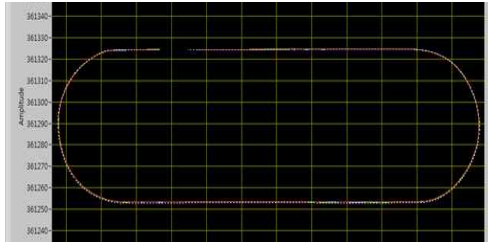
	test 1	test 2	test 3	평균
	전구간	전구간	전구간	
항방향 오차(cm)	13.914	12.068	15.128	13.703

표 15 트랙 전체 시계방향(CW) 주행 시험 전구간 결과

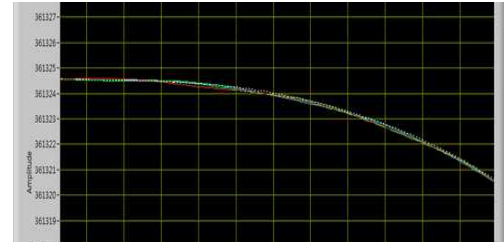
	test 1	test 2	test 3	평균
	직진 구간	직진 구간	직진 구간	
항방향 오차(cm)	10.459	8.792	16.211	11.821

표 16 트랙 전체 시계방향(CW) 주행 시험 직진구간 결과

시험 2) 트랙 전체 반시계방향(CCW) 주행 (3회 반복 시험)



전체 주행 경로



주행 경로 확대

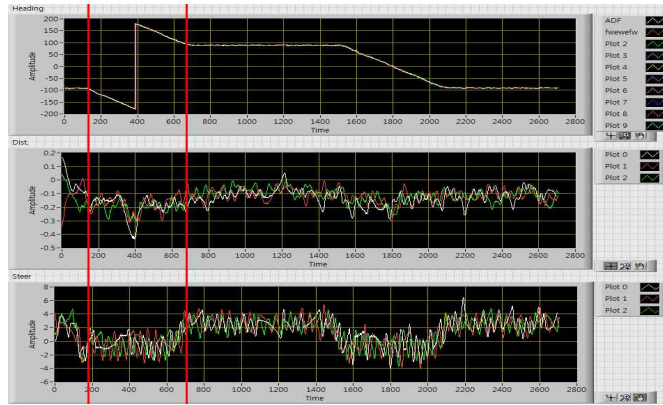


그림 7 트랙 전체 시계방향(CCW) 주행 시험 결과 그래프

	test 1	test 2	test 3	평균
	전구간	전구간	전구간	
황방향 오차(cm)	17.005	16.231	16.091	16.442

표 17 트랙 전체 시계방향(CCW) 주행 시험 전구간 결과

	test 1	test 2	test 3	평균
	직진 구간	직진 구간	직진 구간	
황방향 오차(cm)	14.537	13.103	11.353	12.998

표 18 트랙 전체 시계방향(CCW) 주행 시험 직진구간 결과

⑧ 자율주행 경로생성 및 추종 모듈 최종 개선품 개발

자율주행을 위한 컨트롤러를 제작하기 위해 전자제어용 각 구성 모듈간 CAN 2.0B 통신으로 인터페이스를 구성하였으며, 컨트롤러 내/외부에 먼지, 방수(IP67) 및 노이즈 / 진동에 대한 내진제를 장착 및 제작함

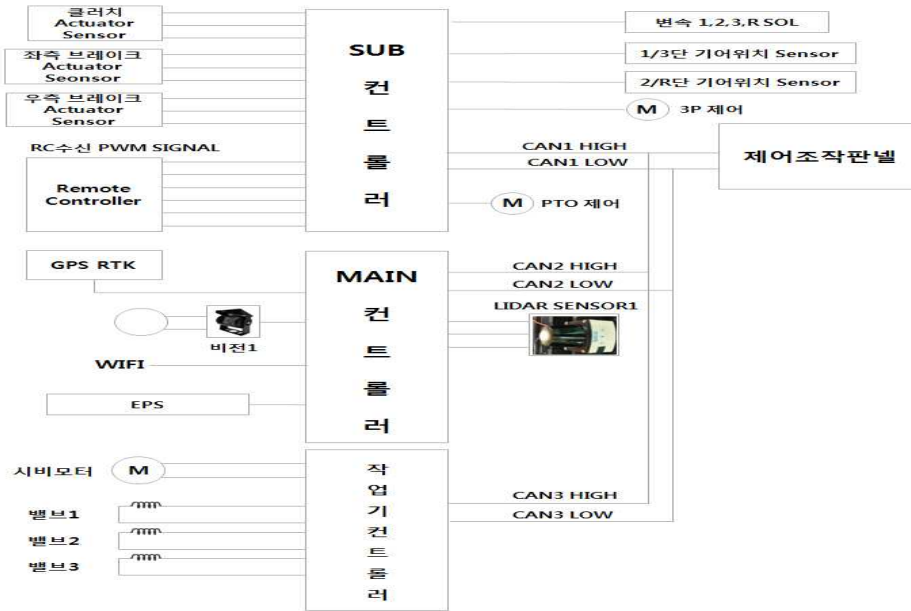


그림 8 통합제어기기 구성도

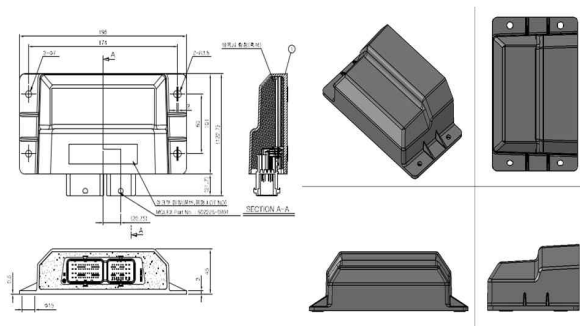


그림 9 자율주행 컨트롤러 2D 및 3D

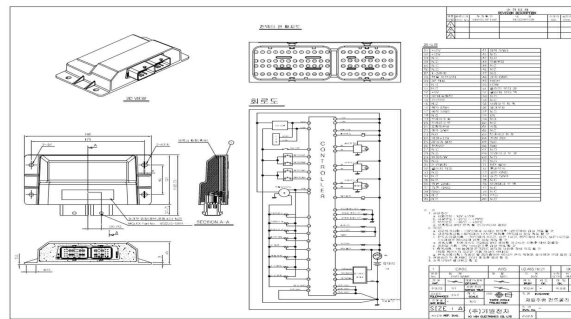


그림 10 자율주행 컨트롤러 도면

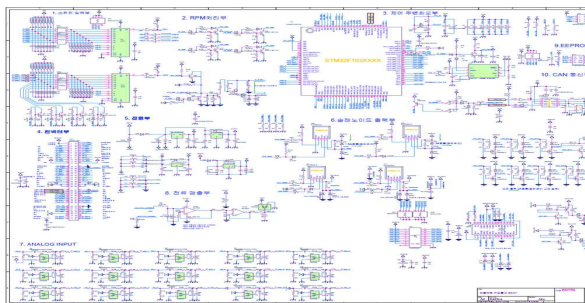


그림 11 자율주행 컨트롤러 회로도

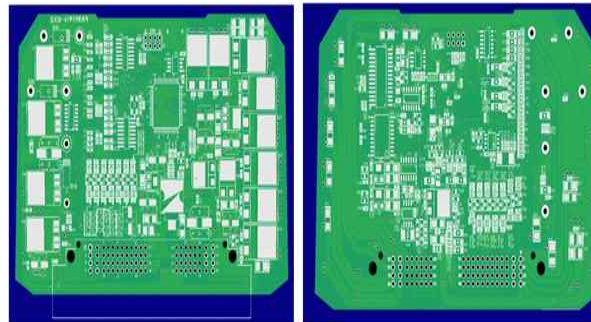


그림 12 자율주행 컨트롤러 PCB

INPUT (센서)	SIGNAL TYPE	OUTPUT	SIGNAL TYPE
조향각센서(0~5V)	튜닝	1단 SOL(비레) <MAX 2.0A>	12V
리니어센서 브레이크 좌측(0~5V)	튜닝	3단 SOL(비레) <MAX 2.0A>	12V
리니어센서 브레이크 우측(0~5V)	튜닝	2단 SOL(비레) <MAX 2.0A>	12V
리니어센서 클러치(0~5V)	튜닝	R단 SOL(비레) <MAX 2.0A>	12V
3P 위치 포텐시옴터(0~5V)	튜닝	PTO SOL(ON/OFF) <2.3A>	12V
엑셀 위치 센서(0~5V)	튜닝	LINEAR ACTUATOR (CLUCH)	RELAY SW(정)
포텐시옴터 (1-3) (0~5V)	튜닝	LINEAR ACTUATOR (RIGHT BRAKE)	RELAY SW(정)
포텐시옴터 (2-R) (0~5V)	튜닝	LINEAR ACTUATOR (LEFT BRAKE)	RELAY SW(정)
		LINEAR ACTUATOR (CLUCH)	RELAY SW(역)
		LINEAR ACTUATOR (RIGHT BRAKE)	RELAY SW(역)
		LINEAR ACTUATOR (LEFT BRAKE)	RELAY SW(역)
		엑셀 ACTUATOR(Servo Motor)	PWM
		3P(Bosch) 비레 상승	GND
		3P(Bosch) 비레 하강	GND

그림 13 자율주행 컨트롤러의 입력/출력부

㉞ 자율주행 트랙터 시작품 개발

㉠ 양산화를 목표로한 최종 개선 설계 및 제작 완료

㉡ 자율주행 경로 생성 및 추종 제어기

자율주행 시스템의 판단를 담당하는 시스템으로 경로 추종 알고리즘, 속도 계획을 처리하는 역할을 수행하며 또한 처리된 명령을 종합하여 하위제어기(TCU)에 전송한다. 자율주행 상위제어기는 WINDOWS 기반의 임베디드 컨트롤러임

터치패널(Touch Panel)이 내장된 7인치 LCD 디스플레이가 별도로 구성되어 사용자가 상위제어기에 명령을 직접 줄 수 있도록 GUI(Graphical user interface)도 신규 개발함



그림 14 자율주행 경로 생성 및 추종 제어기

구분	세부항목	규격사항
사양	Processor	Intel Atom™ E3845 1.91GHz
	OS	Windows 10 Pro DSP
	RAM	8GB DDR3L
	Storage	Transcend SSD 256GB
	Interface	USB3.0 1port, USB 2.0 1port RS232 1port KvasermPCI-E 2CH(CAN)
	Power	VDC 9v~30V/2A
	Packing Size	184 * 125 * 64.5mm

표 19 트랙 전체 시계방향(CCW) 주행 시험 직진구간 결과



그림 15 그림자울주행 경로 생성 및 추종 제어기 GU

㉔ 트랙터 자율주행 컨트롤러(TCU)

TCU(Tractor Control Unit)은 트랙터 주행 알고리즘을 처리하는 통합 제어기이며 Main MCU인 sbRIO는 Multi-Core로서 FPGA와 Real-Time Processor 나뉘는데 CPU 점유율이 높은 센서 및 액추에이터 모듈의 데이터를 FPGA를 통해 처리하며 GPS 데이터 로깅 및 자율주행 알고리즘과 같은 상위 프로그램은 Real-Time으로 처리하여 VCU의 성능을 최대한 활용할 수 있음

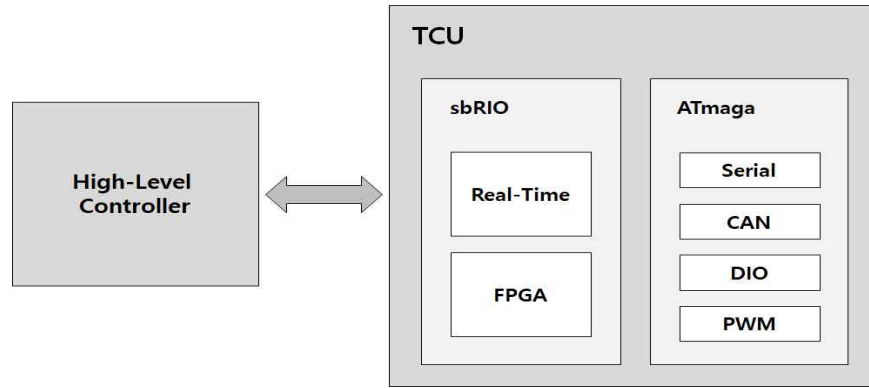


그림 16. TCU의 Mutil-Core 구성sbRIO

Main MCU인 sbRIO는 FPGA와 Real-Time Processor 나뉘는데 CPU 점유율이 높은 센서 및 액추에이터 모듈의 데이터를 FPGA를 통해 처리하고 GPS 데이터 로깅 및 자율주행 알고리즘과 같은 상위 프로그램은 Real-Time으로 처리하여 TCU의 성능을 최대한 활용할 수 있음

구 분	세 부 항 목	규 격 사 항
PERFORMANCE	Main MCU	sbRIO 9606 - 400 MHz processor - 512 MB nonvolatile storage - 256 MB DRAM - 9 to 30 VDC supply input - Communication : RS232 / RS485 / CAN
	Sub MCU	AT90CAN128 - 8 bit Microcontroller - 128K Bytes of In-System Reprogrammable Flash - Communication : UART / CAN / JTAG / ISP
	Connector Pinout	112 Pin
	Interface	RS232, RS485, TTL, PWM Flow, I2C, CAN
PHYSICAL AND ELECTRICAL	Power	9V ~ 24V / 1A
	Dimension of board	L x W x H : 210 mm x 150 mm x 34 mm
	Packing Size	L x W x H : 220 mm x 190 mm x 50 mm
	Weight	1.55 kg

표 20 자율주행 트랙터 TCU 사양

㉔ 자율주행 시스템 소프트웨어 구성

트랙터 자율주행 시스템의 소프트웨어는 상위제어와 하위제어로 분류되며 상위제어는 트랙터의 주행경로 생성, 경로 추종, 주행속도 등 주로 주행관련 알고리즘을 처리한다. 하위제어는 상위제어기에서 내린 명령을 받아 트랙터를 제어함

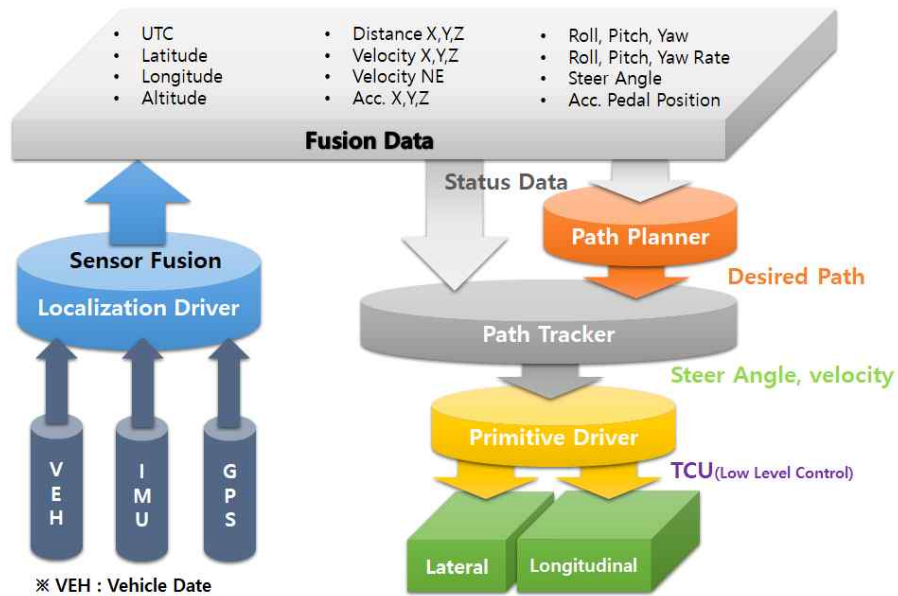


그림 16 자율주행 트랙터 SW 구성

㉔ 플랫폼을 이용한 실차 성능 평가

㉔ 실 포장 조건에서의 자율주행 입력 조건에 따른 실증 평가 진행

㉔ 작업 오차 시험

트랙터가 경운 작업 시 기준 경로를 얼마나 정확히 추종할 수 있는지 확인하기 위해 작업 오차 시험을 진행하였다. 추종 정밀도가 떨어지면 작업 성능 저하가 발생할 수 있기 때문에 최소 10cm의 정밀도를 가질 수 있도록 함

광파기의 프리즘을 트랙터(작업경로 측정시) 또는 작업기(기준경로 설정시)에 부착하여 트랙터 위치를 실시간으로 추적하여 주행궤적을 측정 및 평가함

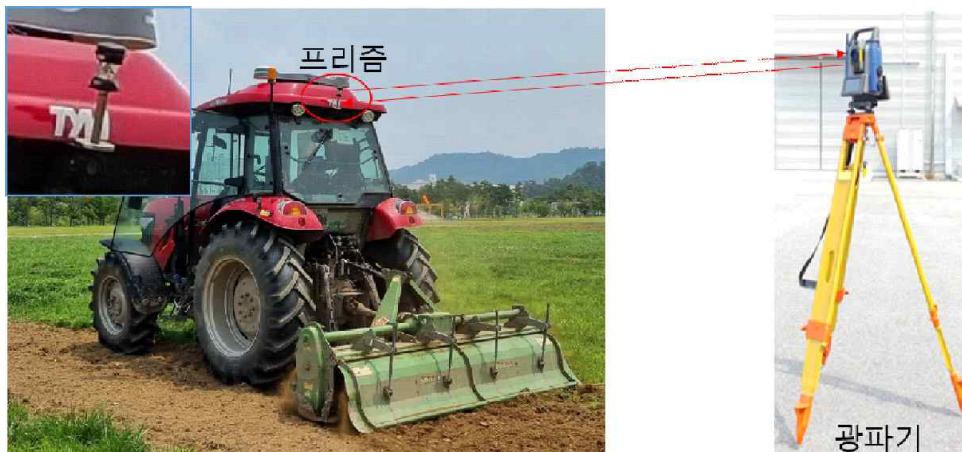


그림 17 주행궤적 측정장치 개념도

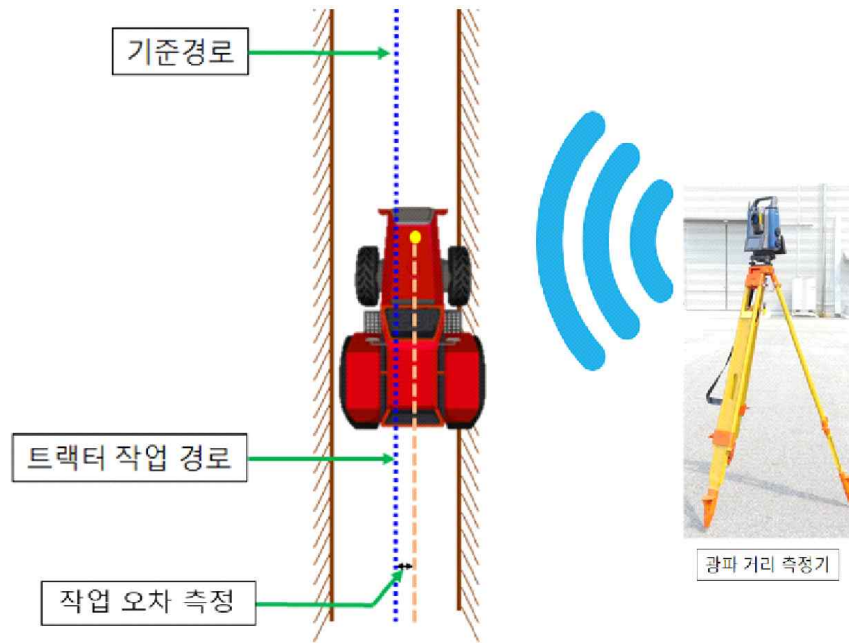


그림 18 작업 오차 시험 방법

- 시험 준비

광파기는 트랙터의 상단 위치에 부착된 프리즘에서 반사되는 빛을 이용하여 트랙터의 위치를 추적하며, 10Hz의 샘플링 속도로 트랙터의 고정위치 또는 주행궤적에 대한 GPS 데이터 저장

본 시험에서는 트랙터의 위치를 실시간으로 추적하여 주행궤적 측정

- 시험 규격 및 방법

작업오차 시험에 앞서 ABLine 설정 및 생성이 진행되며, 측정된 기준경로와 작업 오차 시험을 통해 측정된 주행경로를 비교하여 작업오차 도출

작업오차 시험은 3회 시험을 실시하며 측정 오차의 평균값으로 산출

- 시험 결과

작업오차 시험 결과 1차 시험 시 8.55cm, 2차 시험 시 6.17cm, 3차 시험 시 13.23cm로 측정되었으며, 3회 측정 평균값은 9.32cm로 산출됨



그림 19 작업 오차 시험 결과 그래프

	Test 1	Test 2	Test 3	평균
RMS 오차(cm)	8.553	6.177	13.234	9.321

표 21 작업 오차 시험 결과

㉠ 경로 추종 오차 시험

트랙터 직진 경로 추종 성능을 확인하기 위하여 경로 추종 오차 시험을 진행함
시험 방법은 작업 오차 시험과 동일하게 진행함.

- 시험 방법 및 조건

광과기를 사용하여 자율주행트랙터의 포장도로 이동 경로 측정

자율주행트랙터의 주행에 따른 경로를 측득를 위해 트랙터의 상단에 프리즘 설치

자율주행 기준경로는 주행 전 트랙터가 정차한 위치를 시작점으로 하여 위치 좌표로 설정된 목표 지점까지 직선으로 연결한 경로로 설정

자율주행 출발 전 트랙터의 위치 정보를 취득하기 위한 위치.상태 인식 시스템의 정상데이터 출력 확인

직진 80m 구간의 아스팔트 포장 도로에서 5km/h의 속도로 직선 자율주행 진행

3회 반복 측정하여 각 시험의 RMSE 산출

- 시험 결과

경로추종오차 시험 결과 1차 시험 시 7.72cm, 2차 시험 시 8.32cm, 3차 시험 시 5.33cm로 측정되었으며, 3회 측정 평균값은 7.12cm로 산출됨



그림 20 자율주행트랙터 경로오차 시험 장비 구성

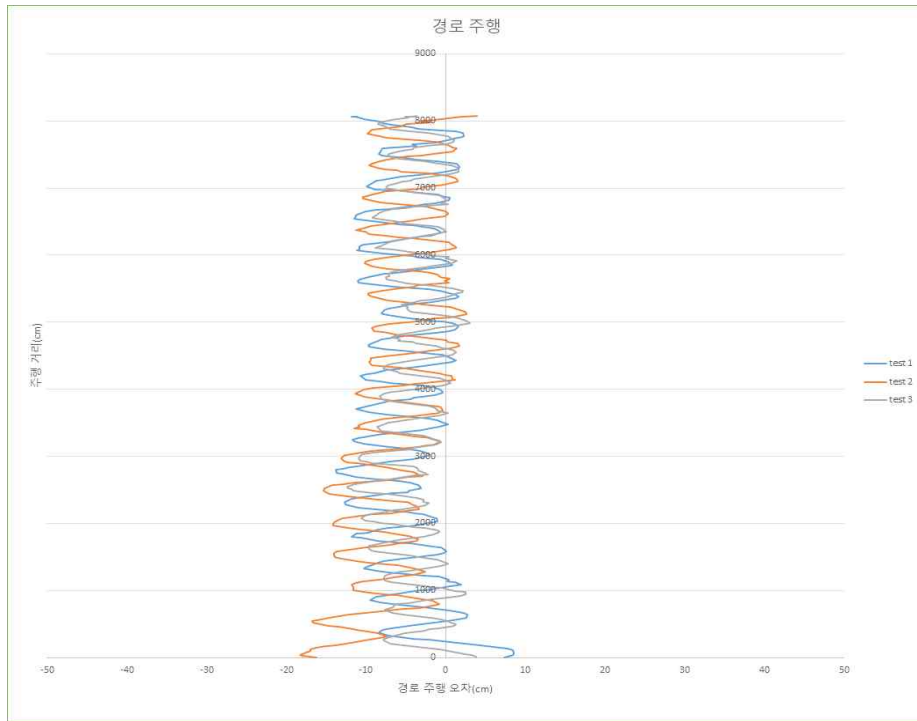


그림 21 경로추종오차 시험결과

	Test 1	Test 2	Test 3	평균
RMS 오차(cm)	7.722	8.317	5.330	7.123

표 22 자율주행트랙터 경로추종오차 시험 결과

㉔ 경로생성시간

자율주행 작업을 위한 경로생성 시 경로생성 및 추종 제어기에서 자율주행 작업 경로를 연산하고 생성하는 시간을 측정하였음

-시험 방법 및 조건

자율주행 경운작업을 진행 경작지(4000m²)의 모서리 4개 지점의 위치 데이터 취득 취득한 위치데이터를 사용하여 경로생성 프로그램을 통해 자율주행경로 패턴을 진행 하며 이태, 프로그램의 생성 시간을 확인 함



그림 22 경로생성시간 시험 경작지 전경



그림 23 자율주행 경로생성 프로그램

- 시험 결과

경로생성시간 시험 결과 0.269s의 시간이 소요되었음

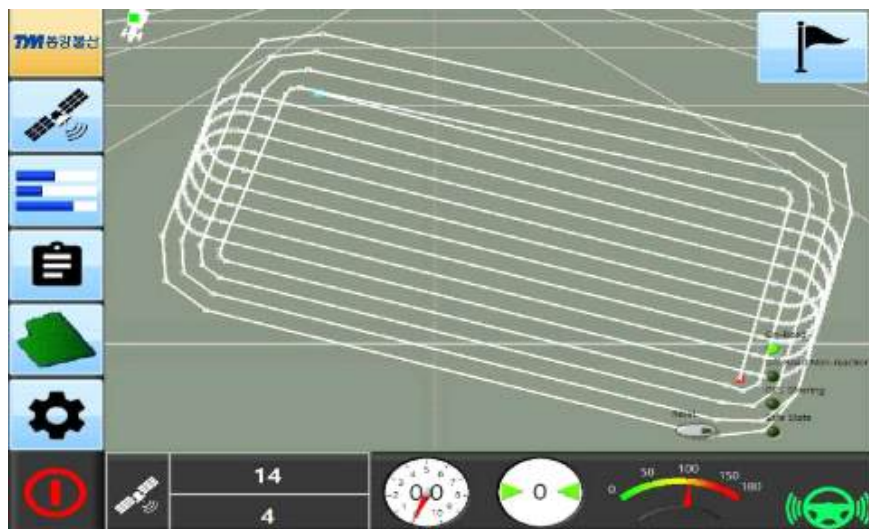


그림 24 자율주행 트랙터 경운 작업 자율주행 경로 생성 결과

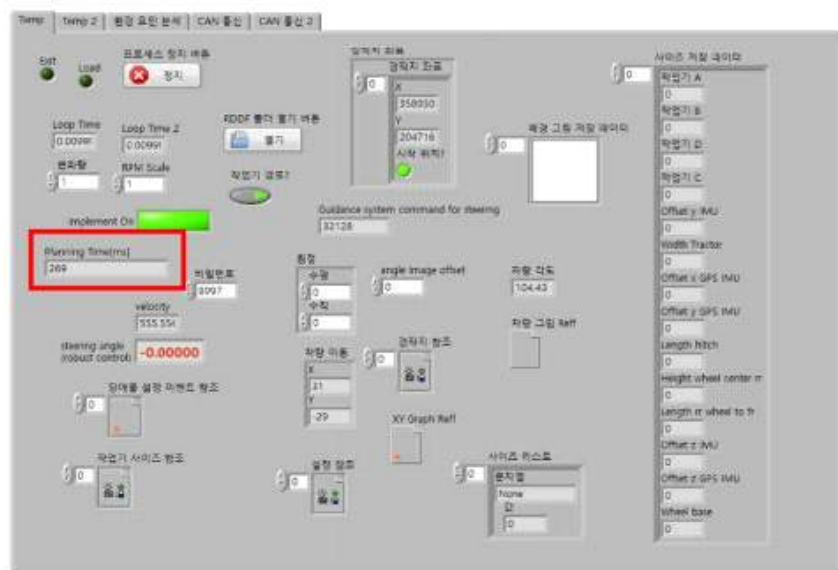


그림 25 경로생성시간 확인 프로그램

㉔ 작업 정확도 시험

자율주행트랙터로 경운 자율 작업 시 발생하는 미경작지를 확인하기 위하여 시험을 진행함

- 시험 방법 및 조건

경로생성시간 시험을 통해서 생성된 자율주행 경운작업 경로를 사용하여 자율주행 경운작업을 진행함

경운작업 완료 후 드론을 이용하여 작업 완료 이미지를 취득

작업이 완료된 경지의 이미지 처리를 통해서 미경작지에 대한 면적 비율 산출



그림 26 작업정확도 시험 경작지 촬영용 드론

- 시험 결과

작업이 완료된 이미지를 이용하여 이미지 처리 및 분석한 결과 총 작업면적 (4000m^2) 대비 미경작지 면적(149.42m^2)의 비율이 3.74%임



그림 27 작업정확도 시험 경작지 면적 및 시험 완료



그림 28 작업정확도 시험 결과 - 미경작지

총 작업면적(m ²)	미경작 영역 면적(m ²)			
	4000	1	46.82	4
	2	28.41	5	22.06
	3	20.46	6	15.26

표 23 작업정확도 시험 결과

㉔ 플랫폼을 이용한 실차 성능 평가

Ⓐ 최적 파인 튜닝을 통한 개선, 보완

㉑ 포장주행 실험

- 포장 주행 실험 방법(최적화 조건)

Look-ahead 경로탐색 알고리즘이용 검증된 가상 시뮬레이터에서 C형 경로 작업 위해 경로탐색 알고리즘 요인 최적화를 진행.

최적화된 요인을 이용하여 포장에서 주행실험을 하였고 작업주행 RMS 10cm 이내로 하는 것을 목표로 삼음

포장의 경로생성은 출발점 P1 설정하고 반시계방향으로 좌표를 순번으로 각각 P2, P3 및 P4로 측정하여 경로생성 및 탐색 프로그램에 입력하였고 그림 29는 실험 포장의 4 개 꼭짓점의 GPS 위치좌표정보임.

포장 좌표 정보 및 시뮬레이션 최적화 조건이용 C형 작업 경로를 생성하였고 주행실험을 하였음

그림 33은 트랙터 동양물산 실험포장에서 자율주행 경운한 모습을 나타낸 것임

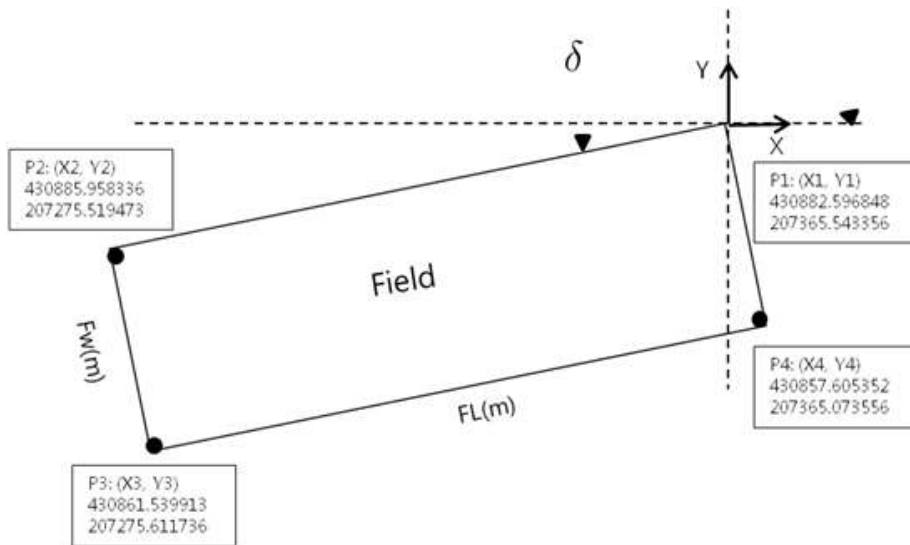


그림 29 Field information in this study



그림 672 A view of the automated tillage operation in paddy filed

㉔ 포장 작업주행 실험 결과

실차 검증실험을 90m×25m의 직사각형 포장에서 무인 자율주행 경운작업을 통행 검증을 하였고 생성한 C 형 경운경로와 주행궤적의 비교를 통해 주행성능을 평가함

그림 34는 동양물산 실험포장에서 주행경로와 주행 궤적을 비교한 그림이고 그림 35는 주행 시 생성된 조향각을 나타낸 그림임

트랙터 직선구간에서 생성한 조향각은 $-5^{\circ} \sim +5^{\circ}$ 범위 안에 있으며 선회구간에서 생성한 조향각은 $-42^{\circ} \sim +5^{\circ}$ 범위 안에 이었음.

그림 36과 같이 주행 속도는 일정한 시속 3km/h 주행 하였고 경로에서 크게 이탈 거리 없이 경로탐색 경운작업을 하였음

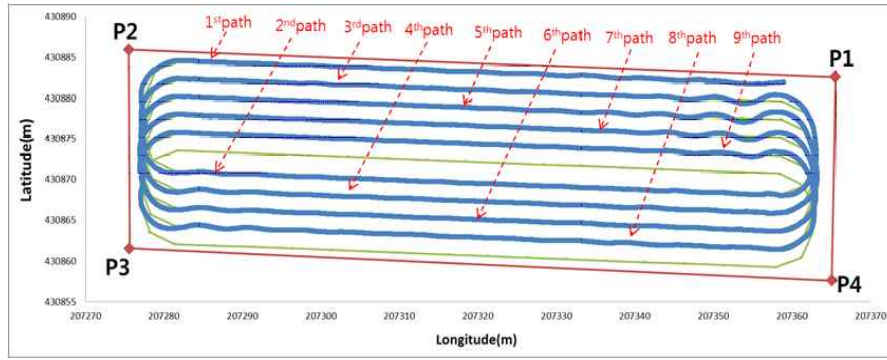


그림 673 Test result of C-type path tracking at paddy field

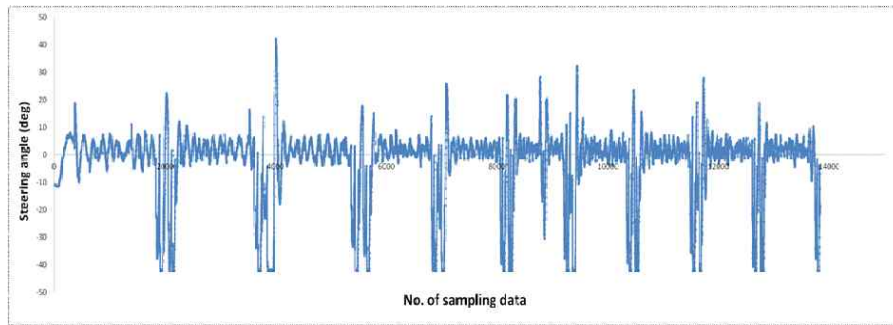


그림 674 Steering angle changes generated along the tracking route

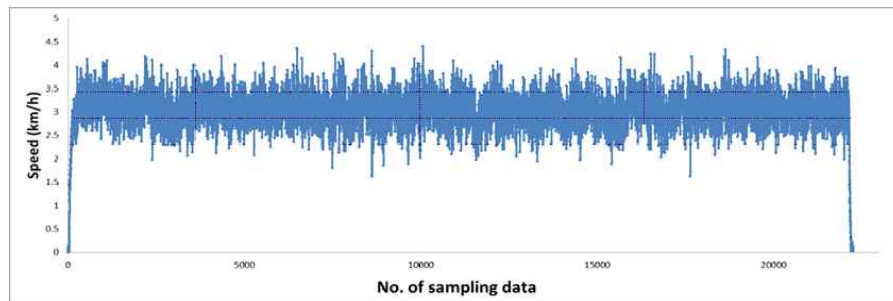


그림 675 Result of forward velocity at paddy field

그림 37은 계획한 경로 중 1st path~9th path 까지 각각 직진부분의 작업 주행 RMS 오차를 나타내는 것임

1st path에서 트랙터의 출발 시작 방향이 직선경로의 방향과 일치하게 시작했으므로 출발 lateral deviation 이 작게 보였고 주행 RMS 오차는 5.7cm이며, 좌:18.13cm, 우:7.84cm의 Maximum deviation 범위 내에 직진주행을 시행되었음.

2nd, 4th, 6th, 8th path 4 개 경로부분에서 트랙터 회전구간에서 직진구간으로 진입 시 큰 이탈 구간 없이 보였고 주행 RMS 오차는 각각 3.8cm, 5.8cm, 4.8cm, 11cm 작은 값으로 나타냄

직진경로에서 적업주행 최대오차(Maximum deviation)는 각각 14.26cm, 11.70cm, 10.03cm, 21.42cm임

3rd, 5th, 7th, 9th path 4 개 경로부분에서 트랙터 회전구간에서 직진구간으로 진입 시 위 분석한 직진경로보다 상대적으로 큰 이탈을 보였고 주행 RMS 오차는 16.2cm임.

이 부분의 회전영역은 물질이 많은 싸여있으며 작업 주행이 토양의 상태에 인해

슬립 영향을 많이 받은 것으로 나타남.

직진경로에서 적업주행 최대오차(Maximum deviation)는 각각 29.44cm, 16.61cm, 44.06cm, 30.16cm, 임

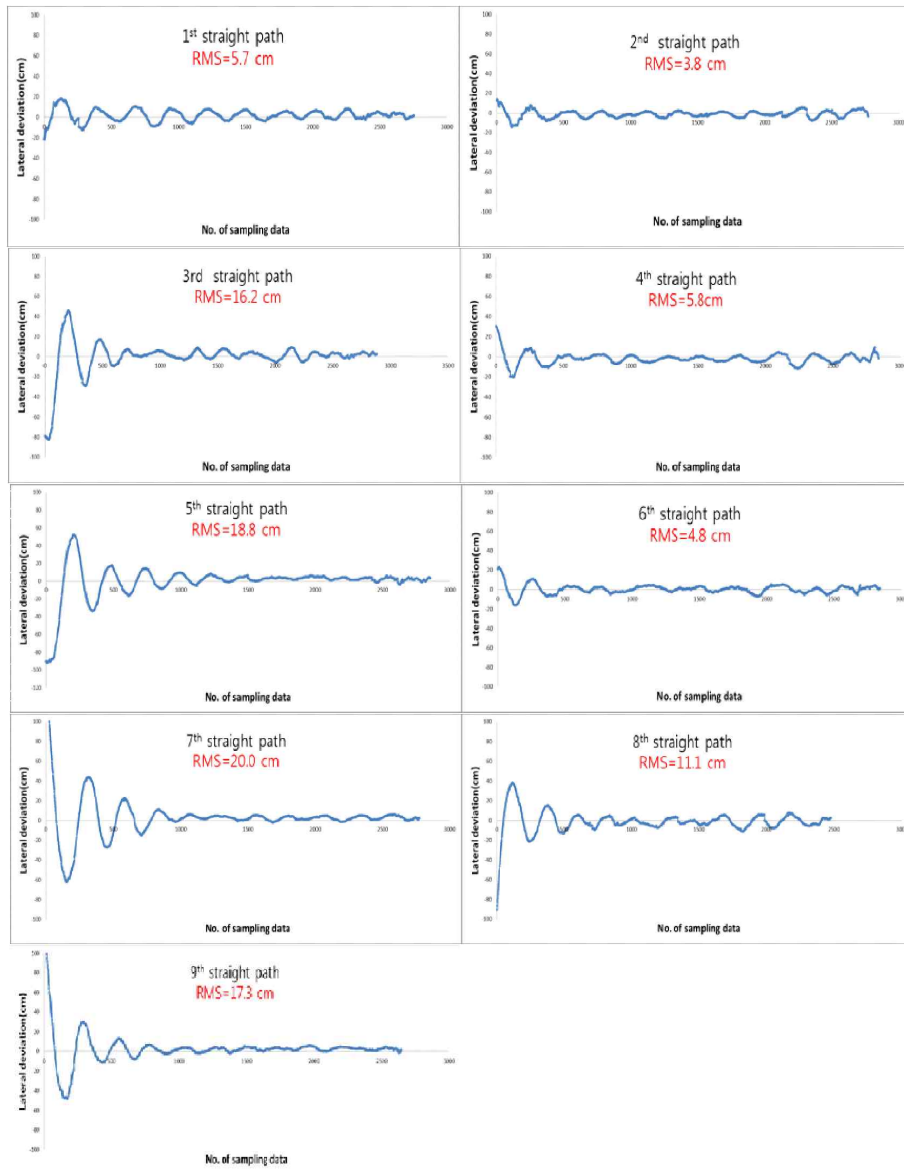


그림 676 Test result of straight RMS at paddy field

㉔ 소형 자율주행 플랫폼 개발

- 환경을 수행하기 위한 자율주행 플랫폼 Unmanned ground vehicle(Husky, ClearPath Robotics, Kitchener, Canada)을 선정함.
- 크기는 $900(L) \times 670(W) \times 390(H)mm$, 무게는 50kg의 제원을 갖으며, 최대 75kg의 무게 탑재가 가능하고 최대 속도 3.6 km/h의 속도 구현 가능
- 데이터 처리는 NUC PC (Intel Chip-based Mini-ITX, VIA Technologies, Taipei, Taiwan)를 서정하였음.
- GPS, IMU(Inertial measurement unit), 휠 엔코더, Lidar(UTM-30LX, Hokuyo Automatic Co., Ltd.) 및 Kinect 카메라(Kinect v2, Microsoft Co, WA, USA)를 부착하였음.

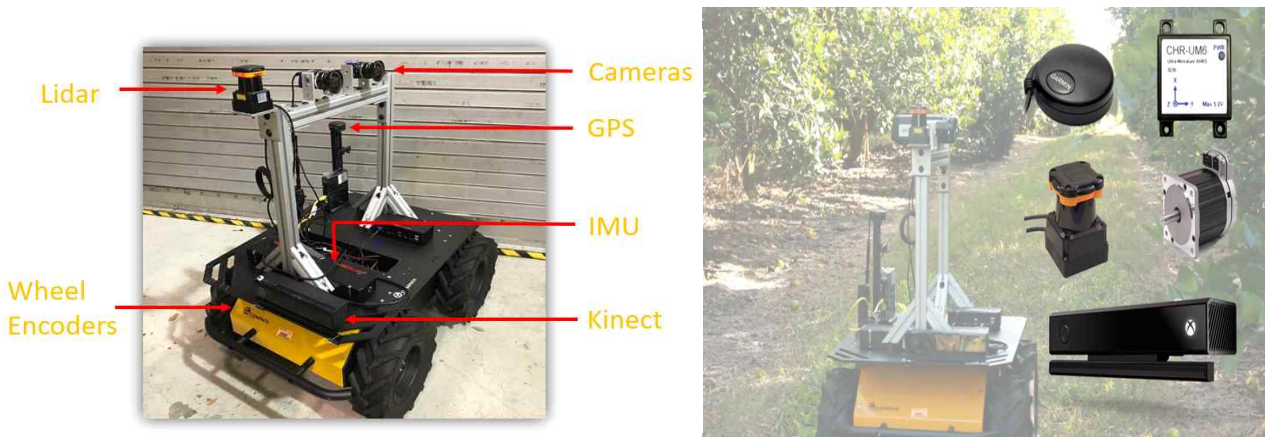


그림 677 환경인식을 위해 최적화 작업을 수행한 자율주행 플랫폼 모델

- ROS (Robot Operating System) 제어 소프트웨어를 개발하여 환경인식 작업을 수행함.
- 내장된 PC에서 비전 데이터를 수신하고, 제어 명령을 로봇에 보내줄 수 있게 구성하였음.

㉕ 경로 추종 알고리즘에 대한 성능평가

- 환경인식 시스템의 경로 추종 정확도를 판단하기 위해, 카메라 시스템을 이용하여 해당 지점으로 이동시킨 후, 로봇이 각 경유지에서 멈추면 50 개의 GPS 데이터를 수신, 해당 데이터들을 실제 좌표라 가정하고 평가를 수행하였음.
- 각 지점별 평균 0.41 m의 위치 파악 오차를 얻었으며, 아래 표는 6회 실행 결과를 나타냄.
- 평균적으로 0.3 내외의 수치를 보이나, 일부 지점에선 0.5 이상의 오차를 보이기도 하였음.
- 해당 시스템의 경우 노지환경 및 과수 환경에서 사용하기엔 어려움이 없지 않을 것으로 판단되나, 정밀함을 요구하는 밭작업 환경에서는 개선의 여지가 필요함.
- 또한, 영상인식 시스템과 GPS 시스템의 SI (System Intergration)을 통해 좋은 성능을 보여줄 수 있을 것으로 판단됨.

	Error (m)		Error (m)
1	0.41	4	0.27
2	0.49	5	0.61
3	0.29	6	0.38
Mean error			0.41

표 24 로봇의 위치 정확도 성능평가 결과 값

㉔ 영상인식 시스템 및 성능평가

- 열 화상 카메라의 사진 촬영 기반 registration은 초기 단계에서 보정된 매개 변수가 후속 계산에 활용되므로 모든 카메라를 단일 고정 프레임에 고정해야 함.
- 2 개의 비주얼카메라(USB 3.0, The Imaging Source, Charlotte, NC, USA) 및 열 화상 카메라 (A655sc, FLIR, Wilsonville, OR, USA)로 구성하였음.
- checkCheckboardboards 기능을 이용하여 모서리를 감지하는데 사용함.
- 점들의 모델 공간 좌표를 비주얼 카메라를 이용하여 찾았으며, 카메라의 interior orientation 및 relative orientation 의 정보를 이용하여 열화상 카메라에 투영 시켰음.
- 해당 시스템을 이용하여 평가한 결과, Back-projection error는 다음의 표와 같음.

Image	Projection error (pixel)	Image	Projection error (pixel)
1	2.3	11	4.8
2	3.5	12	4.2
3	4.5	13	2.2
4	2	14	2.7
5	3.3	15	3.9
6	4	16	3.5
7	4.5	17	3
8	2	18	3.1
9	3.1	19	3.7
10	4.1	20	2.3

표 25 Back-projection error

- 트랙터 주행시 장애물에 대한 registration하여 장애물 인식 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단되며, 해당 시스템을 이용하여 안전 장치에도 사용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 장애물 인식에 대한 정확도를 높여 safety system에 적용 가능할 것으로 판단됨.
- 장애물 회피 및 인식에 대한 평가는 아래와 같이 수행하였으며, 환경인식 시스템에서 촬영한 사진 및 영상들을 이용, 시뮬레이션 타입의 성능평가를 수행하였음.

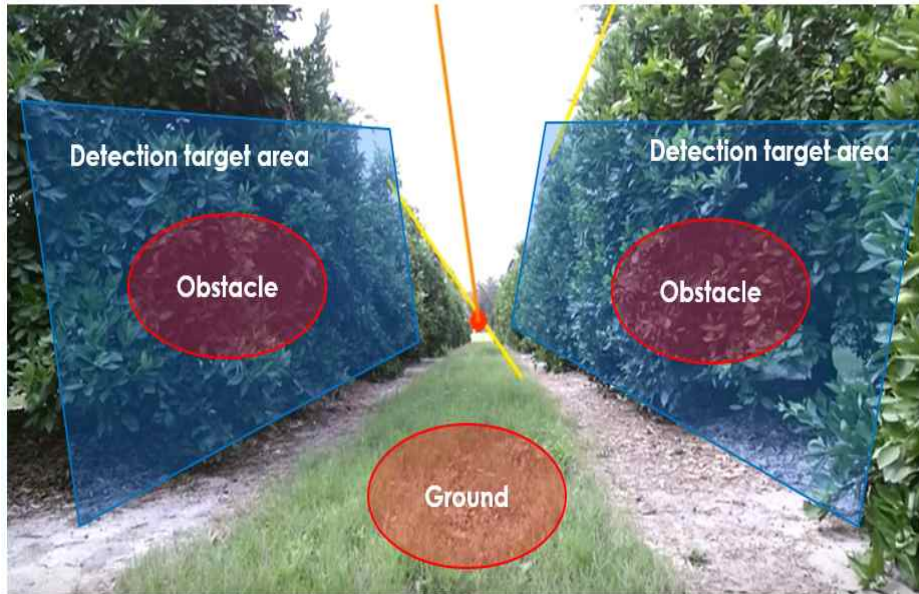


그림 678 자율주행 플랫폼을 이용한 장애물(나무) 인식 결과

㉔ 소형 장애물에 대한 영상인식 수행

- 노지환경에 따라 다양한 장애물이 발생할 수 있기 때문에, 소형 장애물에 대한 대비도 필요함.
- 밭에서 딸기에 대한 환경인식을 수행하여서, 영상인식간 판단이 가능한지에 대한 연구를 수행하였음.
- Faster R-CNN 탐지방식과 플랫폼에 부착 된 카메라를 이용하여 근거리 딸기 및 환경 자동인식에 관한 기술 개발을 수행하였음.
- 기본적으로 소형 플랫폼에 영상인식 장치를 부착하고, 각 근거리 이미지 촬영을 통해서 환경인식 간 소형 물체에 대한 구분 시험을 수행하였음.
- 본 시험간에는 미성숙 딸기와, 성숙 딸기를 구분하는 것을 목표로 수행하였음.
- 먼저 영상 및 사진에 대한 품질 측정을 수행하기 위해서 아래 식을 이용하여 수행하였음.

$$GSD = \lambda \frac{H}{c}$$

where

GSD = 샘플거리

H = 영상인식 거리

c = 카메라 초점거리

λ = 카메라 센서 픽셀의 크기

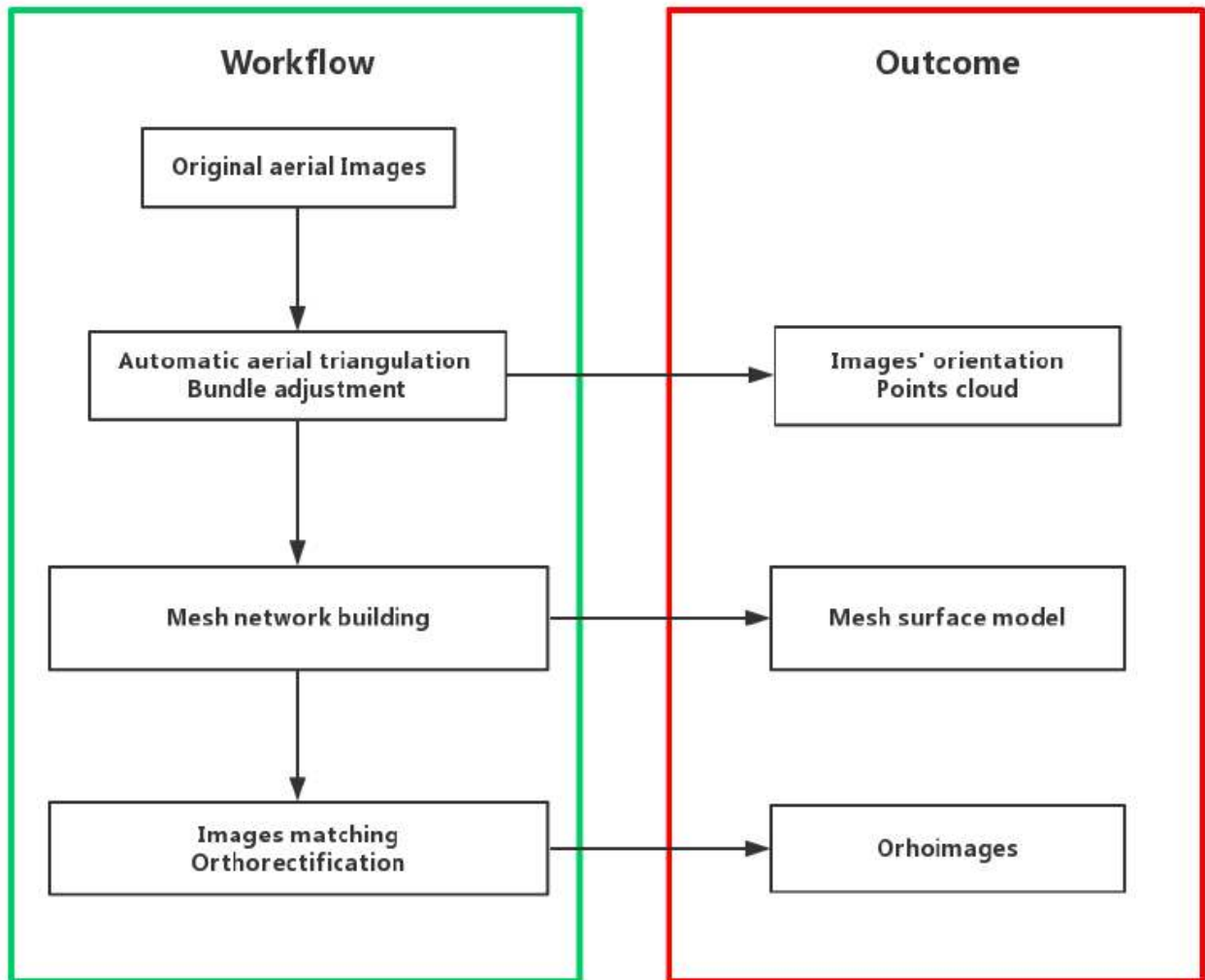


그림 679 소형 장애물 영상인식을 위한 전체적인 Workflow

- 정사영상을 사용하여 미성숙 딸기와 딸기에 위치 파악에 대한 분포지도를 작성하게 하였으며, 품질 또한 판단하였음.
- GSD는 3m 높이 조건에서 2.4mm이고 2m높이의 이미지는 1.6mm로 설정하였음.
- Faster R-CNN을 사용하여 이미지에서 객체를 식별하기 위해 딸기는 빨간색, 미성숙 딸기는 녹색 혹은 노란색으로 설정하여 환경인식을 수행하게 하였음.

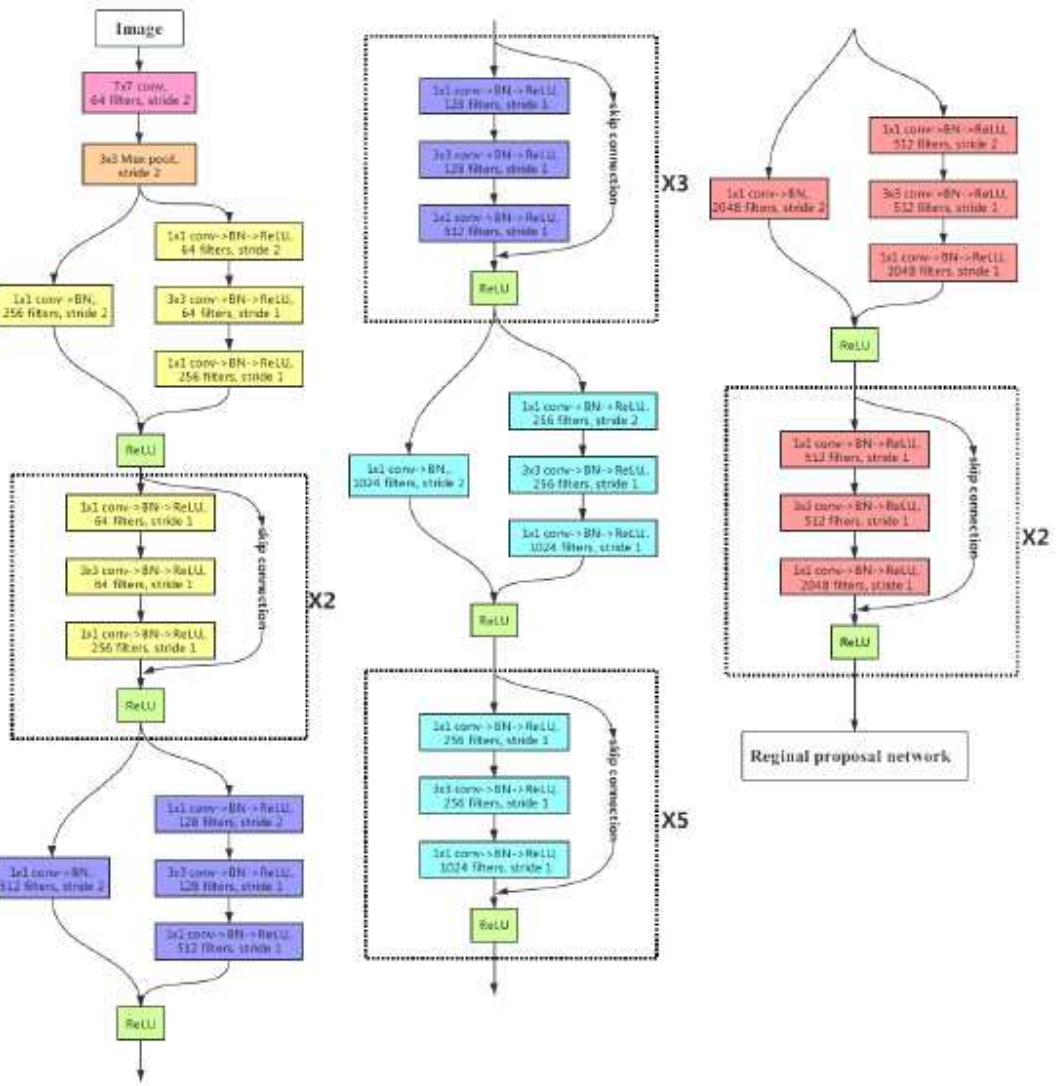


그림 680 ResNet-50 시스템의 아키텍처

- 차후 해당 시스템을 이용함에 따라 데이터 베이스를 누적하여 각 장애물에 대한 색상 지정을 통해 사용할 수 있을 것으로 판단됨.



그림 681 환경인식 시스템 영상인식 및 대상 판단에 대한 결과

- 환경인식에 대한 성능을 높이기 위해서 총 12,526개의 영상인식을 수행시켰음.
- 아래표와 같이 Test image와 Training image를 구분하였으며, 8 - 2 비율로 구분하여 학습을 수행하였음.

	training Images, 80%	Test Images, 20%	Total, 100%
Flower at 3 m	3,654	914	4,568
Flower at 2 m	6,366	1,592	7,958
Sensation mature/immature at 3 m	2,192	548	2,740
Sensation mature/immature at 2 m	3,819	955	4,774
Radiance mature/immature at 3 m	1,462	366	1,828
Radiance mature/immature at 2 m	2,547	637	3,184

표 25 딥러닝 수행 결과 표

- 데이터 베이스를 구축하기에는 어려움이 있어 ImageNet 데이터를 이용하여 반복학습을 시켰고, 기본 학습률은 0.01 이었음.
- 고해상도 정사영상을 생성하기 위해 Pix4D 소프트웨어를 사용하였으며, 3D 모델은 각각 2D 영상들의 투영을 통해서 형성되었으며, 아래와 같이 딸기밭에 대한 영상인식을 수행하였음.

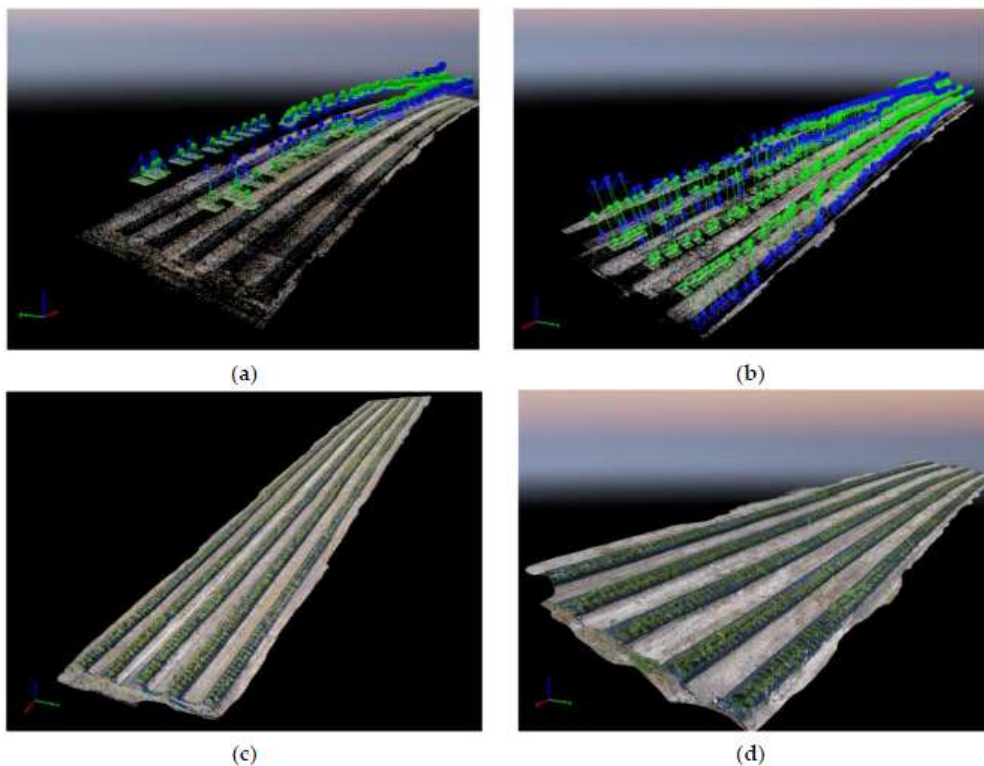


그림 43 환경인식 사진 투영 결과

- 감지 된 객체에 대한 정확도에 대한 판단은, IoU의 중복성 판단을 이용하여 수행하였음.

- 해당식은 아래와 같이 구성 됨.

$$IoU = \frac{Area(GroundTruthIDetected)}{Area(GroundTruthUDetected)}$$

- 해당식에서 Area(GroundTruthI Detected)는 예측 및 정답 경계 상자의 교차 영역이고 Area(GroundTruthU Detected)는 예측 및 정답 경계 상자의 합집합 영역으로 설정하였음.

- IoU가 임계값보다 크면 참 양성(TP)으로 간주하였으며, 감지된 개체가 정답 경계 상자와 일치하지 않으면 가양성(FP)로 간주 하였음.

- 해당방식은 ImageNet 데이터 베이스를 이용할때도 동일하게 적용시켜서 이에 대한 평가를 수행하였음.

- 거리에 따른 영상인식 정도에 대한 판단을 수행하기 위해서 2 m, 3 m를 분할하여 평가를 수행하였음.

- 거리가 멀어질수록 선명도가 떨어져, 정확한 인식이 어려운 것으로 나타났음.

- 딥러닝에 대한 인식 결과들은 아래와 같음.



(a)



(b)

그림 44 환경인식 결과 1



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 45 환경인식 결과 2



(a)



(b)

그림 46 환경인식 결과 3

- 아래표는 매뉴얼 카운트와 딥러닝 카운트를 비교한 결과이며, 딥러닝 카운트의 평균정확도는 84.1%이고 평균 Occlusion은 13.5%으로 분포하였음.
- 꽃의 수가 줄어들수록 Occlusion과 FN 수가 증가함을 알 수 있음.

Date	Manual Count (from the Field)	Ground Truth (from Images)	Deep Learning Count	TP	FP	FN	Occlusion	Accuracy
11/15 /2018	1098	972	964	953	11	19	11.5%	87.8%
11/29 /2018	558	473	447	443	4	30	15.2%	80.1%
12/13 /2018	813	702	687	680	7	22	13.7%	84.5%
Average							13.5%	84.1%

표 25 매뉴얼 카운트와 딥러닝 카운트를 비교한 결과

- 아래표와 같이 Faster R-CNN 는 초당 8.872 프레임(FPS)을 수행할 수 있음. Faster R-CNN 모델의 성능이 R-CNN 및 Fast R-CNN 모델의 성능을 능가하는 것을 알 수 있음.

Method	Proposals	Training Time	MAP	Test Time	Speed	FPS
R-CNN	SS 2000	72.4 h	0.614	12.024 s		0.083
Fast R-CNN	SS 2000	8h	0.723	2.386 s		0.419
Faster R-CNN	RPN 400	5.5 h	0.772	0.113 s		8.872

표 26 Faster R-CNN

- 현재 단계에서는 간단한 대형 장애물에 대한 인식만을 필요로 하지만, 차후 연구가 진행됨에 따라 소형 장애물에 대한 인식도 필요로 할 것으로 판단됨.
- 차후 해당시스템을 이용하여서 소형 장애물에 대한 인식을 수행하고 딥러닝 기술을 이용하여 분별할 수 있는 시스템을 구성할 수 있을 것으로 판단됨.

구분	평가항목		단위	개발 목표치	개발성능
	주요 성능 Spec				
경로생성및추종 시스템	경로생성시간		초	0.5	0.27
	경로추종오차		cm	15	7.12
자율주행트랙터	작업오차		cm	15	9.32
	작업정확도		%	5	3.74

표 27 자율주행 트랙터 경로생성 및 추종 성능

다. 협동연구기관 2 (국제종합기계(주))

㉔ 위치-자세 인식모듈 실증평가 및 최종 개선품 제작

㉕ 트랙터 탑재 실증시험 평가

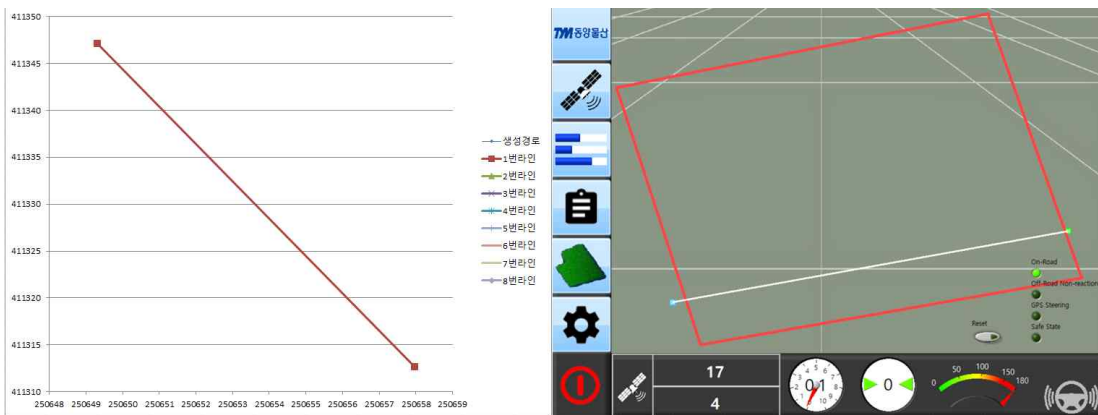
㉖ 농로(직선)에서 주행속도별 성능평가 시험

2차년도에 제작된 위치-자세 인식모듈을 트랙터에 탑재하여 실증시험을 진행 하였음. 농로(직선)에서 위치-자세 인식모듈의 주행속도별 데이터를 취합하여 주행속도가 생성경로와 주행경로의 오차에 어느정도 영향을 주는지에 대한 성능평가 시험을 실시하였음.



<농로(직선)에서 속도별 자율주행중인 트랙터>

시험의 원활한 진행을 위해 주변에 GPS수신에 영향을 주는 지형 지물이 없는 (주) 국제종합기계 주차장의 아스팔트위에서 위치-자세 인식모듈의 RTK Fix상태에서 충분한 위성 갯수를 확보 한 후 시험을 진행하였음. 임의의 2점을 정하여 36m의 직선경로를 생성하였고 생성경로는 아래의 그림과 같음.



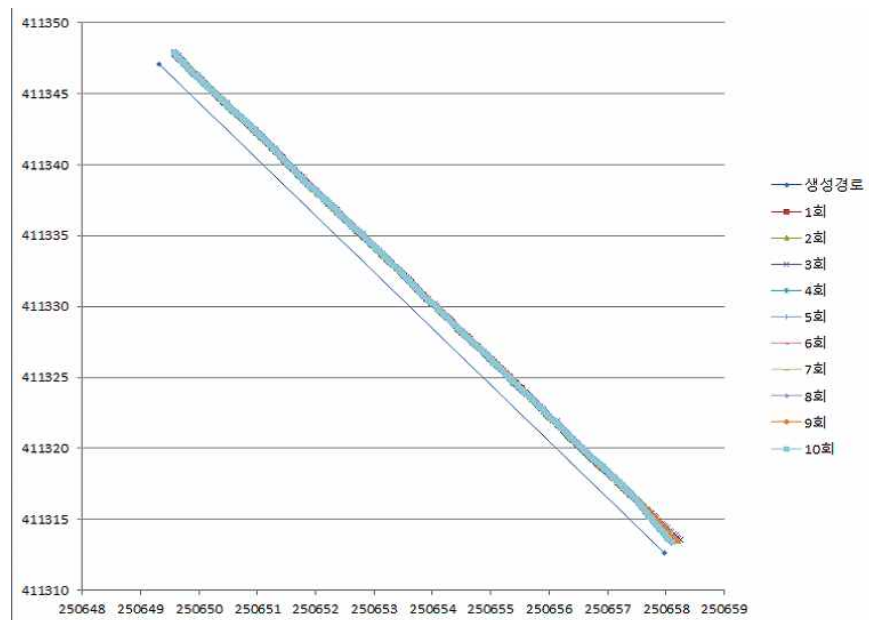
<임의의 2점으로 직선 경로 생성>

주행경로의 데이터는 속도별(1.8, 3.0, 4.0, 5.2m/s)로 각 10회씩 반복하여 생성하였으며, 부변속2단 주변속 1단으로 일정한 속도를 내기위해 rpm을 변경 조정하여 데이터를 수집 하였음.

속도	RPM
1.8m/s	1500RPM
3.0m/s	2000RPM
4.0m/s	2500RPM
5.2m/s	3000RPM

<RPM별 속도표>

생성된 경로의 시작지점 이전에 자율주행모드로 시작하여 종료지점을 지나면서 데이터를 수집하고, 시작지점 이전데이터 및 종료지점 이후의 데이터는 삭제하여 주행 경로를 생성하였으며 생성된 주행경로의 그래프는 아래와 같음.



<1.8m/s로 10회 생성된 주행경로>

위 그래프에서 생성된 경로와 주행경로와의 거리를 구하기 위해, 생성된 경로의 직선방정식을 만들고, 기울기와 y절편을 구한 후 주행경로 데이터의 각 점과의 거리를 피타고라스정리와 닮음비를 이용하여 모두 계산하고 평균을 내었음.

- ① $y = ax + b$ a(기울기), b(y절편)
- ② $a = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$
- ③ $b = y - ax$
- ④ $h = xy / \sqrt{(x^2 + y^2)}$ h(직각삼각형의 높이)

1	TM_X	TM_Y														
2	411312.6	250658.2	12.61828	57.9811												
3	411347.1	250649.3	47.12001	49.31514												
4	1번라인															
5	411313.5	250658.2	13.51	58.19	경로의기울기	생성경로y절편	주행경로y절편	주행y일때주행x의값	주행x일때주행y의값	주행y의값일때 경로x의값	주행x의값일때 경로y의값	x	y	거리		
6	411313.6	250658.2	13.61	58.16	-3.981294692	243.4581222	245.1815382	57.75712173	11.78658404	58.19	13.51	0.43287827	1.723415959	0.41983732		
7	411313.7	250658.1	13.71	58.14	-3.981294692	243.4581222	245.1620993	57.73200427	11.90602288	58.16	13.61	0.427995728	1.703977119	0.41510187		
8	411313.8	250658.1	13.79	58.11	-3.981294692	243.4581222	245.1824734	57.70688681	11.98564878	58.14	13.71	0.433113185	1.724351225	0.420065158		
9	411313.9	250658.1	13.85	58.1	-3.981294692	243.4581222	245.1430346	57.68679285	12.10508762	58.11	13.79	0.423207151	1.684912384	0.410457554		
10	411313.9	250658.1	13.85	58.1	-3.981294692	243.4581222	245.1632216	57.67172237	12.14490056	58.1	13.85	0.428277625	1.705099437	0.415375275		
11	411314	250658.1	14.02	58.06	-3.981294692	243.4581222	245.1739698	57.6290227	12.30415235	58.06	14.02	0.430977303	1.715847649	0.417993622		
12	411314.1	250658	14.12	58.04	-3.981294692	243.4581222	245.194344	57.60390524	12.38377824	58.04	14.12	0.436094761	1.736221756	0.42295691		
13	411314.2	250658	14.2	58.01	-3.981294692	243.4581222	245.1549051	57.58381127	12.50321709	58.01	14.2	0.426188726	1.696782915	0.413349307		
14	411314.3	250658	14.32	57.99	-3.981294692	243.4581222	245.1952792	57.55367032	12.58284298	57.99	14.32	0.436329675	1.737157021	0.423184748		
15	411314.4	250658	14.36	57.97	-3.981294692	243.4581222	245.1556533	57.54362334	12.66246887	57.97	14.36	0.426378658	1.697531127	0.413531577		
16	411314.5	250657.9	14.51	57.93	-3.981294692	243.4581222	245.1464015	57.50594716	12.82172066	57.93	14.51	0.424052845	1.688279339	0.411277771		
17	411347.1	250649.8	47.08	49.76	-3.981294692	243.4581222	245.1892239	49.32519127	45.3488983	49.76	47.08	0.434808733	1.731101702	0.421709626		
18	411347.2	250649.7	47.18	49.74	-3.981294692	243.4581222	245.209598	49.30007381	45.42852419	49.74	47.18	0.439926191	1.751475808	0.426672914		
19	411347.3	250649.7	47.24	49.73	-3.981294692	243.4581222	245.2297851	49.28500333	45.46833714	49.73	47.24	0.444996665	1.771662861	0.431590635		
20	411347.4	250649.7	47.38	49.7	-3.981294692	243.4581222	245.2503462	49.24983889	45.58777598	49.7	47.38	0.450161106	1.79222402	0.43659949		
21	411347.5	250649.7	47.48	49.66	-3.981294692	243.4581222	245.1910944	49.22472144	45.74702777	49.66	47.48	0.435278563	1.732972239	0.422165301		
22	411347.6	250649.6	47.58	49.64	-3.981294692	243.4581222	245.2114685	49.19960398	45.82665366	49.64	47.58	0.440399602	1.753346339	0.42712859		
23	411347.7	250649.6	47.68	49.61	-3.981294692	243.4581222	245.1920297	49.17448652	45.9460925	49.61	47.68	0.435513478	1.733907498	0.422393139		
24	411347.7	250649.6	47.73	49.61	-3.981294692	243.4581222	245.2420297	49.16192779	45.9460925	49.61	47.73	0.448072207	1.783907498	0.434573522		
25	411347.9	250649.6	47.88	49.57	-3.981294692	243.4581222	245.2327779	49.12425161	46.10534429	49.57	47.88	0.445748393	1.77465571	0.432319716		
26													평균	0.427607404		

<생성경로와 주행경로간의 거리 평균>

위 표를 보면 계산된 생성경로와 주행경로간의 10회 반복한 거리 평균은 42.76cm 이고, 최소 40.4cm에서 최대 46.2cm로 계산되었음.

이는 생성경로와 주행경로 데이터의 기준점이 일치하지 않아 발생된 오차로 경로 생성프로그램은 Dual GPS Module의 두 개의 안테나 가운데를 기준점으로 하였고 데이터 수집은 Dual GPS Module의 왼쪽 안테나를 기준점으로 수집 하였음.

실증시험의 진행일정에 따라 실증시험 먼저 진행한 후 경로 생성 프로그램을 변경하여 기준점으로 발생한 오차를 확인하였음.

(㉔항목에 시험결과 첨부)

이에따라 기준점이 달라 발생된 오차는 무시하고, 10회 반복 시험에 따른 오차를 계산해보면 1.8m/s의 속도에서 최소 0.0037cm 최대 0.64cm이고 0.21cm의 평균오차를 확인하였으며 주행속도별 10회 반복 평균 오차는 아래 표와 같음.

속도 \ 횟수	횟수										평균
	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회	
1.8m/s	0.0206	0.0257	0.3643	0.0037	0.6461	0.2069	0.0926	0.536	0.4431	0.3305	0.2187
3.0m/s	0.283	0.3911	0.0302	0.4855	0.1607	0.3897	0.0558	0.0076	0.6389	0.1807	0.2623
4.0m/s	0.4475	0.0148	0.4266	0.2089	0.0202	0.0747	0.6201	2.0658	0.6415	0.4648	0.4985
5.2m/s	0.0267	1.2003	0.5859	1.0429	0.4595	0.0558	0.0562	1.2887	0.4552	0.6519	0.5823

<주행속도별 10회반복 평균오차. 단위(cm)>

위 표를 보면 주행속도별 10회 반복시험의 거리 오차는 1.8m/s의 속도에서 0.2187cm의 오차를 보였고 5.2m/s의 속도에서 0.5823cm의 오차가 발생하였음.

위 실험 결과를 토대로 주행속도에 비례하여 반복시험의 거리 오차가 커지는 경향을 보인다고 판단되었지만 오차의 값이 최대 0.5cm로 작아 자율주행트랙터로의 작업이 문제없이 진행 될 수 있다고 판단되었음.

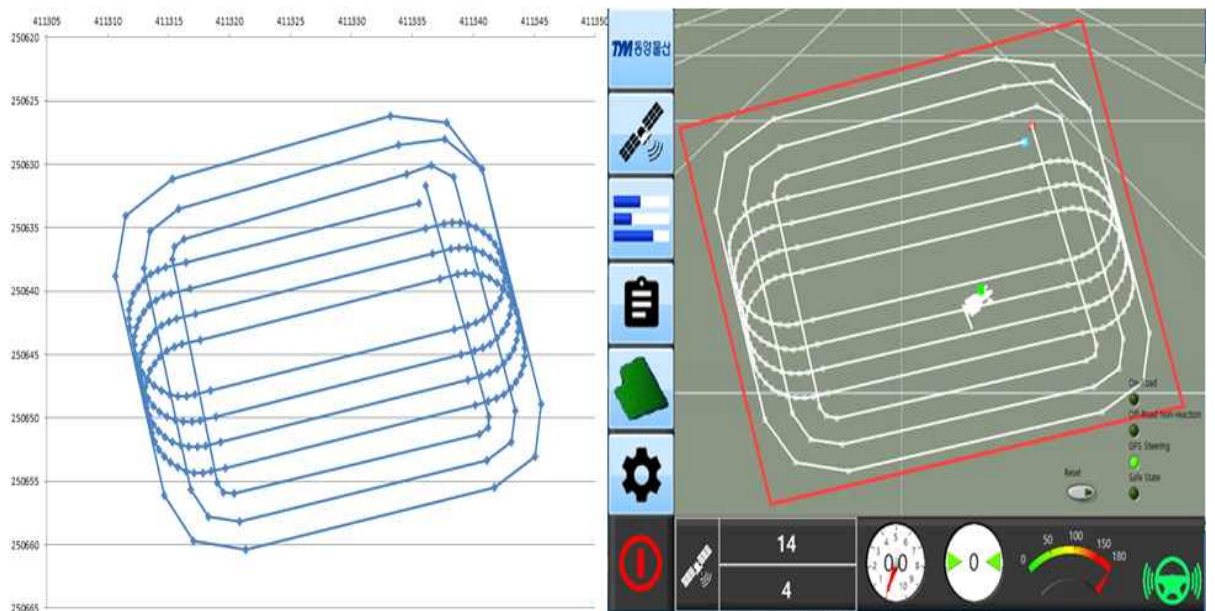
㉔ 평탄한 시험장(농지)에서 성능평가 시험

자율주행 트랙터로 실제 농지에서 자율주행 모드의 작업을 실행하기 전에 보다 안전한 평탄한 시험장(농지)에서 생성경로와 주행경로의 데이터를 반복적으로 수집하여, 생성경로와 주행경로와의 오차가 일정하게 허용범위 안에서 발생하는지 성능평가 시험을 진행하였음.



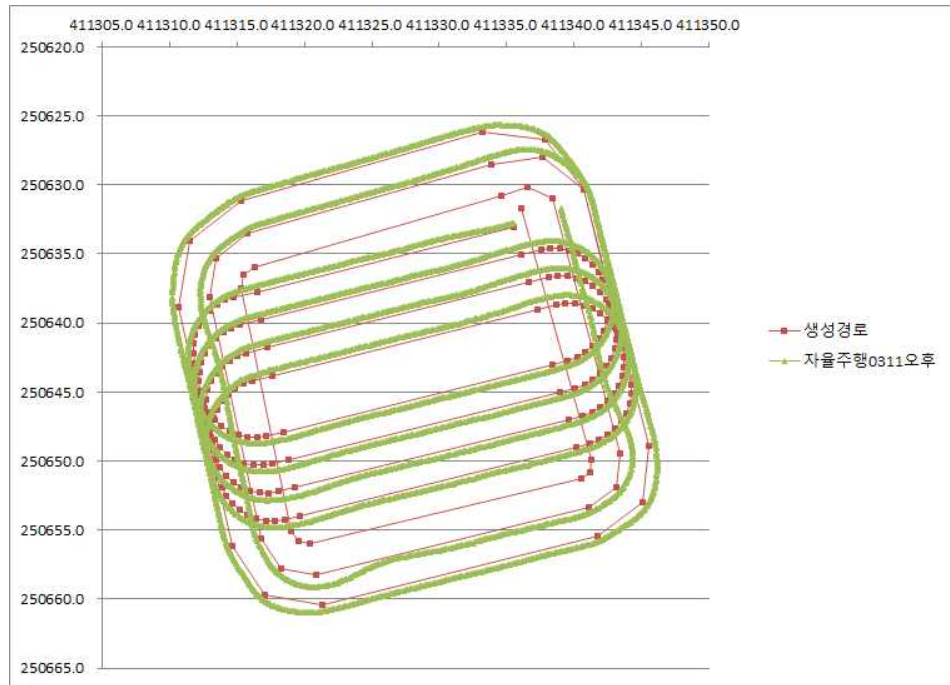
<40x40m의 아스팔트에서 자율주행중인트랙터>

평탄한 시험장(농지)에서의 성능평가지험은 원활한 시험진행을 위하여 40x40m의 (주)국제종합기계의 아스팔트로 된 주차장에서 진행하였으며, 시험장(농지)의 임의의 외곽 4점을 선정하여 경로를 생성하였음.



<40x40m의 아스팔트 시험장에 생성된 자율주행 경로>

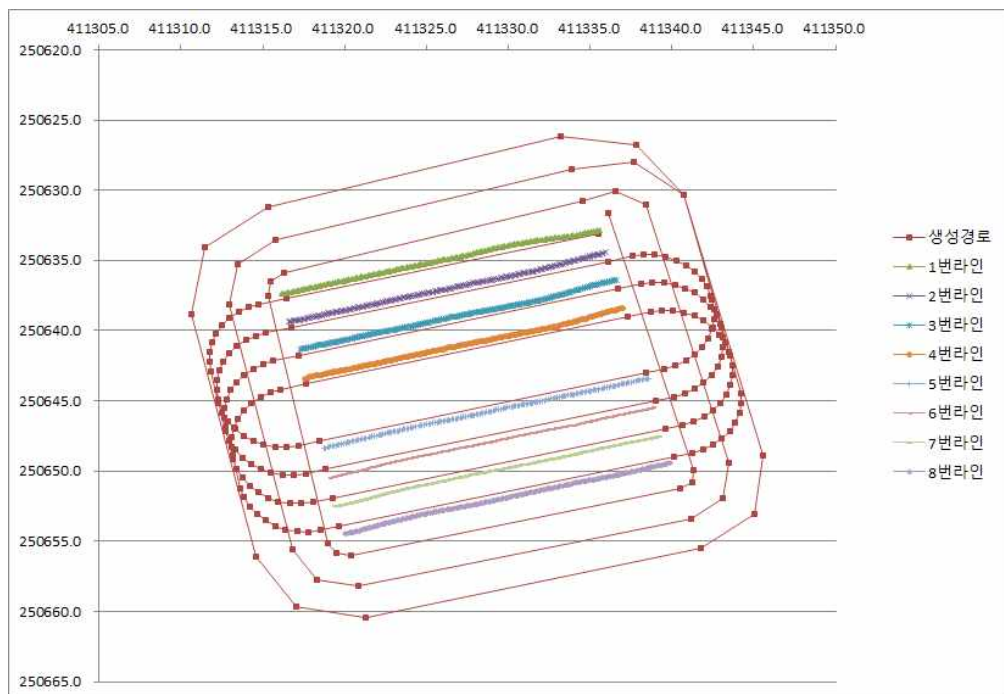
직선경로 데이터 수집과 마찬가지로 생성된 경로의 시작점 이전에 자율주행모드로 시작하여 종료점을 지나면서 데이터를 수집하였고, 시험의 안전을 위해 Idle RPM으로 주행하여 주행경로를 생성하였으며, 생성된 주행경로는 아래의 표와 같음.



<40x40아스팔트시험장에서 수집된 자율주행경로>

거리계산을 용이하게 하기 위해 생성된 경로의 곡선이 포함된 부분을 제외하고, 직선구간8개의 라인을 기준점으로 추출하여 오차를 계산하는 방식으로 진행함.

주행경로도 마찬가지로 직선구간 8개의 라인을 추출하였으며 이를 이용하여 만든 그래프는 아래와 같음.



<자율 주행 경로에서의 직선구간>

생성된 경로와 주행경로와의 거리를 계산하기 위하여, 농로(직선)에서의 주행속도별 성능평가 시험과 마찬가지로 생성된 경로의 직선 방정식을 만들고, 1개라인의 주행경로 데이터의 각 점과의 거리를 모두 계산하여 평균을 내었으며 계산 과정은 다음과 같이 진행하였음.

1	TM_X	TM_Y																				
2	411335.5	250633.1	35.52822	33.08106																		
3	411316.4	250637.7	16.44999	37.72512																		
4	1번라인				경로의기울기	생성경로y절편	주행경로y절편	주행y절때주행x의값	주행x절때 주행y의값	주행y의값일때 경로x의값	주행x의값일때 경로y의값	x'	y'	거리								
5	411335.6	250633.1	35.64	33.06	-4.10809311	171.4282949	171.4535582	33.05385036	35.6147367		33.06	35.64	0.006149642	0.025263302	0.005975163							
6	411335.5	250633.1	35.49	33.08	-4.10809311	171.4282949	171.3857201	33.09036365	35.53257484		33.08	35.49	-0.010363649	-0.042574835	0.010069609							
7	411335.4	250633.1	35.39	33.1	-4.10809311	171.4282949	171.3678819	33.11470584	35.45041297		33.1	35.39	-0.014705843	-0.060412973	0.014288605							
8	411335.3	250633.1	35.29	33.11	-4.10809311	171.4282949	171.3089629	33.13904804	35.40933204		33.11	35.29	-0.029048037	-0.119332042	0.02223878							
9	411335.2	250633.1	35.19	33.13	-4.10809311	171.4282949	171.2911247	33.16339023	35.32717018		33.13	35.19	-0.033390231	-0.13717018	0.032442874							
10	411335.1	250633.2	35.13	33.16	-4.10809311	171.4282949	171.3543675	33.1799555	35.20392739		33.16	35.13	-0.017995548	-0.073927387	0.017484973							
11	411335	250633.2	34.98	33.19	-4.10809311	171.4282949	171.3276103	33.21450884	35.08069459		33.19	34.98	-0.024508839	-0.100684593	0.023813467							
12	411334.9	250633.2	34.87	33.21	-4.10809311	171.4282949	171.2997722	33.24128525	34.99852273		33.21	34.87	-0.031285253	-0.128522731	0.030397619							
13	411334.8	250633.2	34.81	33.24	-4.10809311	171.4282949	171.363015	33.25589057	34.87527994		33.24	34.81	-0.015890569	-0.065279938	0.0154399717							
14	411334.7	250633.3	34.66	33.26	-4.10809311	171.4282949	171.2951768	33.29240386	34.79311808		33.26	34.66	-0.03240386	-0.133118076	0.031484489							
185	411317.4	250637.1	17.37	37.07	-4.10809311	171.4282949	169.6570116	37.50116923	19.14128333		37.07	17.37	-0.431169226	-1.771283326	0.41893597							
186	411317.2	250637.1	17.21	37.09	-4.10809311	171.4282949	169.5791735	37.54011674	19.05912146		37.09	17.21	-0.450116736	-1.849121464	0.437345896							
187	411317.1	250637.2	17.11	37.13	-4.10809311	171.4282949	169.6434972	37.56445893	18.89479774		37.13	17.11	-0.434458931	-1.784797739	0.422132338							
188	411317	250637.2	17.01	37.15	-4.10809311	171.4282949	169.625659	37.58880112	18.81263588		37.15	17.01	-0.438801125	-1.802635877	0.426531334							
189	411316.9	250637.2	16.91	37.17	-4.10809311	171.4282949	169.6078209	37.61314332	18.73047401		37.17	16.91	-0.443143319	-1.820474015	0.43057033							
190	411316.9	250637.2	16.87	37.19	-4.10809311	171.4282949	169.6499828	37.6228802	18.64831215		37.19	16.87	-0.432880196	-1.778312153	0.420598396							
191	411316.7	250637.2	16.72	37.22	-4.10809311	171.4282949	169.6232256	37.65939349	18.52056936		37.22	16.72	-0.439393488	-1.805069359	0.42692899							
192	411316.6	250637.2	16.62	37.24	-4.10809311	171.4282949	169.6053874	37.68373568	18.429075		37.24	16.62	-0.443735682	-1.822907497	0.43145886							
193	411316.5	250637.3	16.52	37.27	-4.10809311	171.4282949	169.6286302	37.70807788	18.3196647		37.27	16.52	-0.438077876	-1.799664704	0.425848605							
194	411316.4	250637.3	16.43	37.29	-4.10809311	171.4282949	169.6207921	37.72998585	18.23750284		37.29	16.43	-0.439985851	-1.807502842	0.427502447							
195	411316.4	250637.3	16.38	37.32	-4.10809311	171.4282949	169.6940349	37.74215695	18.11428005		37.32	16.38	-0.422156948	-1.7734280048	0.41017939							
196	411316.2	250637.4	16.23	37.35	-4.10809311	171.4282949	169.6672777	37.77867024	17.99101725		37.35	16.23	-0.428670239	-1.761017255	0.416507885							
197																						0.389323663

<생성경로와 주행경로와의 거리 평균>

3일간 오전, 오후로 시간을 달리하여 10회 반복 경로를 생성하였고 위 표와 마찬가지로 계산하여 발생한 오차는 아래 표와 같음.

라인	횟수										
	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회	평균
1번	1.4924	8.232	0.656	0.0722	1.3579	1.7053	1.9304	1.7403	2.7197	0.8546	2.0761
2번	0.7542	0.0969	2.8920	0.7775	0.5356	0.5593	0.5814	0.5545	0.6148	0.1665	0.7533
3번	1.0809	0.5498	2.3902	1.0093	0.2841	0.1731	0.1979	0.2026	0.7396	0.1715	0.6799
4번	0.5438	0.2936	2.2282	0.6040	0.2974	0.4114	0.4378	0.5122	0.2159	0.1202	0.5664
5번	1.1535	0.1619	2.0032	0.8748	0.5828	0.5828	0.1797	0.2003	0.3701	0.3714	0.6480
6번	0.1839	0.3111	1.4031	0.5238	0.3329	0.2880	0.1761	0.2857	0.6111	0.0903	0.4206
7번	0.7178	0.2958	1.4131	0.0612	0.0607	0.1986	0.1089	0.3516	0.6147	0.0471	0.3869
8번	0.2883	0.2105	1.2257	0.0164	0.4985	1.1183	0.5394	0.0290	0.3000	0.5199	0.4746

<8개 직선구간의 10회 평균 데이터>

직선실증시험과 마찬가지로 기준점이 달라 발생된 오차는 무시하고 10회의 실증시험의 결과로 최대2cm 최소 0.38cm 평균 0.75cm의오차가 발생하였음.

1번라인의 시험의 오차가 2cm로 큰 이유는 1번 라인은 시작지점이 포함된 라인으로 시작지점의 진입각도에 따라 오차가 크게 발생하는 것으로 1번 라인을 제외한 후 계산하면 오차의 평균은 0.5cm정도로 판단되고, 3일간 시간을 달리 수집한 것에 대한 시간에 따른 오차는 매우 작게 나타난 것으로 판단됨.

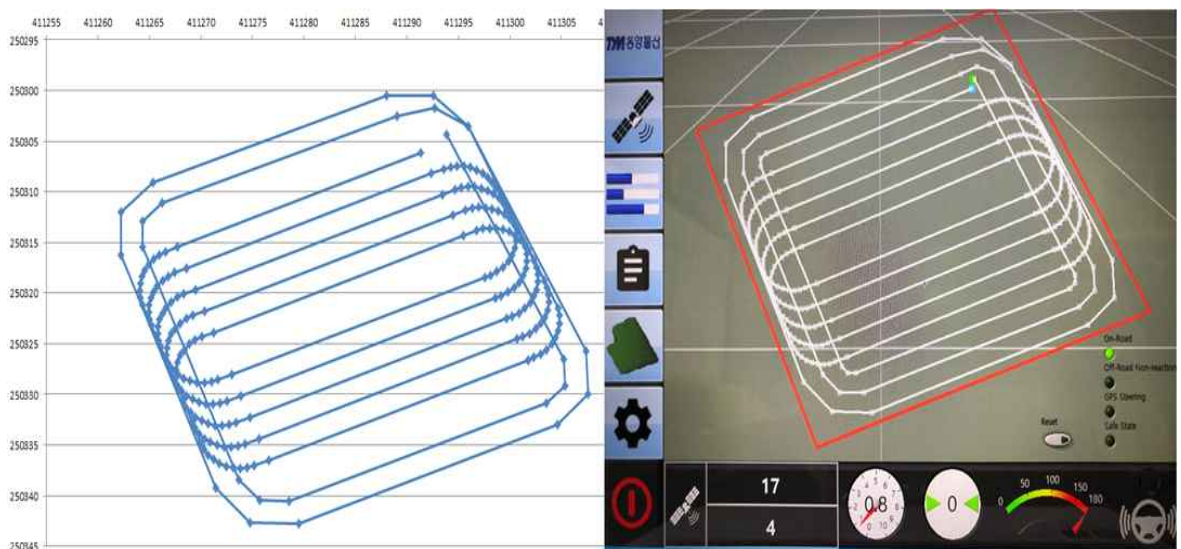
㉔ 실제 농지 농작업 환경에서의 성능평가지험

자율주행 트랙터가 실제 농지 농작업 환경에서 자율주행모드로 작업 시 데이터를 반복적으로 수집하여 생성경로와 주행경로와의 오차가 일정하게 허용범위 안에서 발생하는지 확인하기 위해 성능평가 시험을 진행하였음.



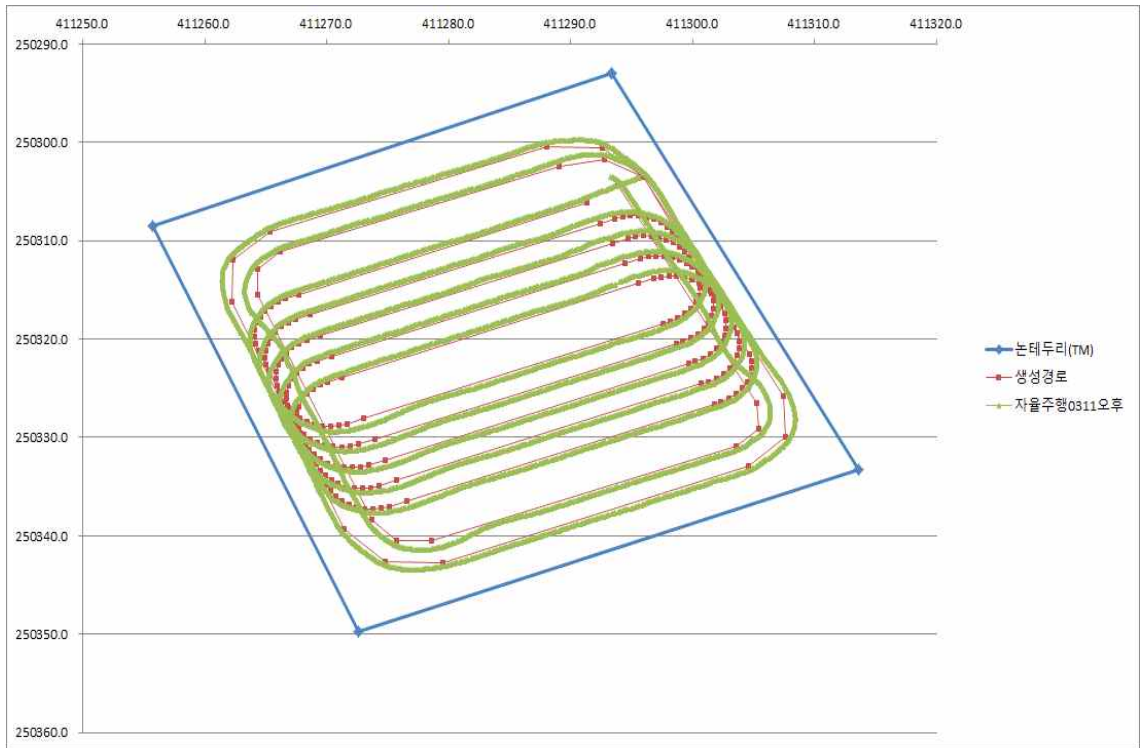
<농지에서 농작업중인 자율주행트랙터>

실제 농지 농작업 환경에서의 성능평가지험은 이전 아스팔트에서의 시험과 동일하게 진행하되 실제 농작업 환경의 40x40m인 농지에서 진행하였으며, 임의의 외곽 4 점을 선정하여 경로를 생성하고 반복적인 자율주행으로 데이터를 생성하여 취득하였음.



<실제 농지에서 자율주행 생성 경로>

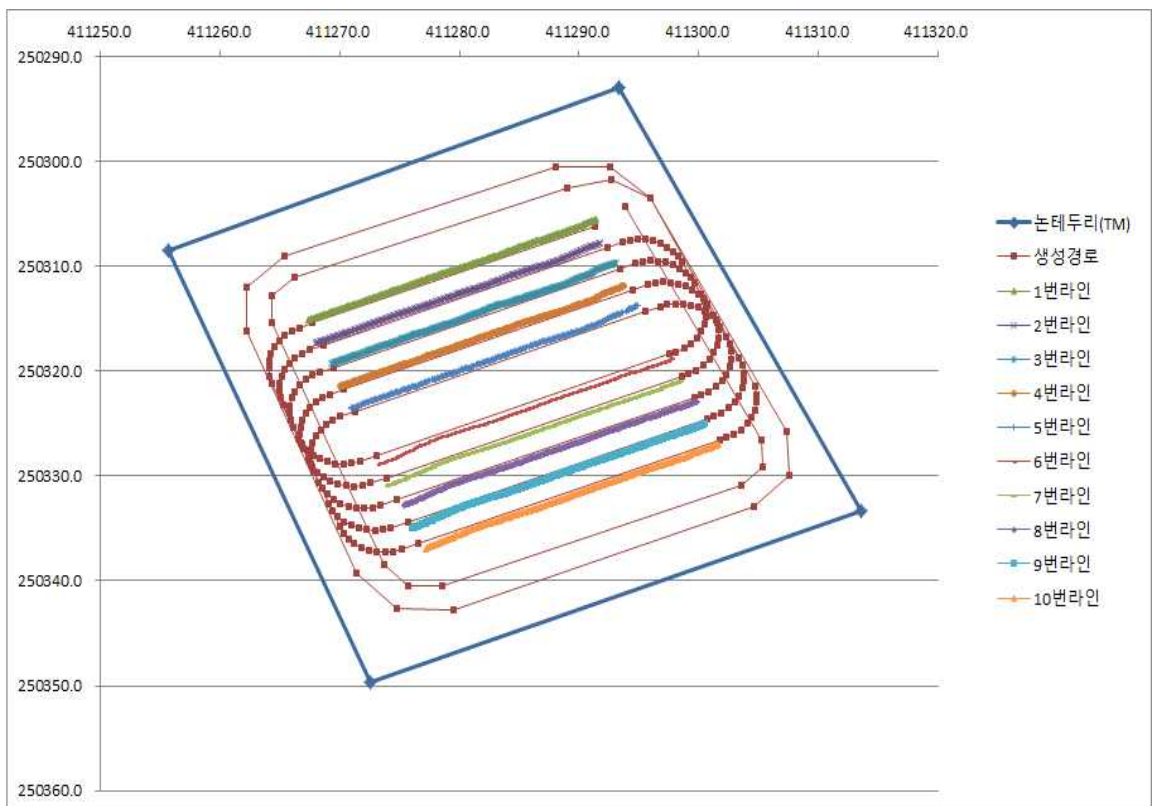
이전 실증시험 데이터 수집과 마찬가지로 생성된 경로의 시작점 이전에 자율주행 모드로 시작하여 종료점을 지나면서 데이터를 수집하였고, 시험의 안전을 위해 Idle RPM으로 주행하여 주행경로를 생성하였으며, 생성된 주행경로는 아래의 표와 같음.



<실제 농지 농작업 환경에서의 자율 주행 경로>

거리계산을 용이하게 하기 위해 생성된 경로의 곡선이 포함된 부분을 제외하고, 직선구간8개의 라인을 기준점으로 추출하여 오차를 계산하는 방식으로 진행함.

주행경로도 마찬가지로 직선구간 10개의 라인을 추출하였으며 이를 이용하여 만든 그래프는 아래와 같음.



<실제 농작업 환경에서의 자율주행경로 직선 구간>

생성된 경로와 주행경로와의 거리를 계산하기 위하여, 생성된 경로의 직선 방정식을 만들고, 1개라인의 주행경로 데이터의 각 점과의 거리를 모두 계산하여 평균을 낸 값은 아래의 표와 같음.

1	TM_X	TM_Y										
2	411291.3	250306.2	91.3	6.2								
3	411267.7	250315.5	67.7	15.5								
4	1번라인				경로의기울기	y절편	x	y	x'	y'	거리	
5	411291.4	250305.5	91.4	5.5	-2.547311472	107.0884923	6.147066219	92.97638674	0.6	1.5	0.565083	
6	411291.3	250305.6	91.3	5.6	-2.547311472	107.0884923	6.182397587	92.87449428	0.6	1.5	0.560737	
7	411291.3	250305.6	91.3	5.6	-2.547311472	107.0884923	6.217728956	92.74712871	0.6	1.5	0.547083	
8	411291.2	250305.7	91.2	5.7	-2.547311472	107.0884923	6.253060324	92.67070937	0.6	1.5	0.552046	
9	411291.1	250305.7	91.1	5.7	-2.547311472	107.0884923	6.288391692	92.54334379	0.6	1.5	0.538391	
10	411291	250305.7	91.0	5.7	-2.547311472	107.0884923	6.319797353	92.46692445	0.6	1.5	0.5397	
11	411290.9	250305.8	90.9	5.8	-2.547311472	107.0884923	6.359054429	92.36503199	0.6	1.5	0.539008	
12	411290.8	250305.8	90.8	5.8	-2.547311472	107.0884923	6.394385797	92.23766642	0.6	1.4	0.525354	
13	411290.7	250305.9	90.7	5.9	-2.547311472	107.0884923	6.429717166	92.16124707	0.6	1.5	0.530317	
14	411290.6	250305.9	90.6	5.9	-2.547311472	107.0884923	6.468974242	92.0338815	0.6	1.4	0.520317	
15	411290.5	250306	90.5	6.0	-2.547311472	107.0884923	6.50430561	91.93198904	0.6	1.4	0.515971	
251	411268.4	250314.7	68.4	14.7	-2.547311472	107.0884923	15.18797082	69.59206743	0.5	1.2	0.435607	
252	411268.3	250314.8	68.3	14.8	-2.547311472	107.0884923	15.22330218	69.49017497	0.5	1.2	0.431261	
253	411268.2	250314.8	68.2	14.8	-2.547311472	107.0884923	15.25863355	69.38828251	0.5	1.2	0.426915	
254	411268.1	250314.8	68.1	14.8	-2.547311472	107.0884923	15.29396492	69.33733628	0.5	1.2	0.441187	
255	411268.1	250314.9	68.0	14.9	-2.547311472	107.0884923	15.32537058	69.23544382	0.5	1.2	0.433187	
256	411268	250314.9	68.0	14.9	-2.547311472	107.0884923	15.35677624	69.13355136	0.5	1.2	0.425187	
257	411267.9	250314.9	67.9	14.9	-2.547311472	107.0884923	15.39603332	69.05713202	0.5	1.2	0.433803	
258	411267.8	250315	67.8	15.0	-2.547311472	107.0884923	15.43136469	68.98071267	0.5	1.2	0.438766	
259	411267.7	250315	67.7	15.0	-2.547311472	107.0884923	15.46669606	68.87882022	0.5	1.2	0.43442	
260	411267.6	250315	67.6	15.0	-2.547311472	107.0884923	15.50202742	68.80240087	0.5	1.2	0.439383	
261	411267.5	250315.1	67.5	15.1	-2.547311472	107.0884923	15.53735879	68.70050841	0.5	1.2	0.435037	
262	411267.4	250315.1	67.4	15.1	-2.547311472	107.0884923	15.56876445	68.59861595	0.5	1.2	0.427037	
263	411267.3	250315.1	67.3	15.1	-2.547311472	107.0884923	15.60409582	68.52219661	0.5	1.2	0.432	
264											평균	0.443399

<생성경로와 주행경로와의 거리 평균>

10일간 오전, 오후로 시간을 달리하여 10회 반복 경로를 생성하였고 위 표와 마찬가지로 계산하여 발생한 오차는 아래 표와 같음

라인	횟수										평균
	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회	
1번	8.9328	1.0951	0.3150	1.0388	0.6138	3.7915	0.0792	3.0178	1.9455	1.2423	2.2072
2번	0.2233	0.0487	1.2525	0.6345	0.2867	3.2962	0.1711	0.3599	0.6902	0.4465	0.7410
3번	1.5299	0.1108	0.8395	0.6124	0.3166	1.5704	0.8227	0.3118	0.7579	0.1739	0.7046
4번	1.6077	1.2557	1.4207	1.6035	0.1108	2.6599	0.4868	1.1007	0.7505	0.0382	1.1034
5번	0.4320	0.1315	1.7569	1.0234	1.0215	0.0205	0.8189	1.6554	0.9461	0.1013	0.7908
6번	0.9646	2.3497	1.1034	1.1584	0.1258	0.1258	0.7433	0.0291	3.1323	1.9813	1.1714
7번	0.6584	3.9788	0.9849	0.3634	1.0106	1.6850	1.7323	1.1511	0.6485	2.1436	1.4357
8번	0.3885	0.8222	0.1748	1.0398	1.0568	3.2108	0.5349	0.3467	0.8831	2.1485	1.0606
9번	0.5364	1.9631	0.4112	0.2818	1.9037	1.4067	1.9256	0.2535	0.6570	3.3952	1.2734
10번	0.1136	0.7652	0.7948	0.7227	1.8361	0.4350	2.4151	1.7544	0.9239	2.4239	1.2185

<10개라인의 10회 평균 데이터>

이전시험들과 마찬가지로 기준점이 달라 발생된 오차는 무시하고 10회의 실증시험의 결과로 최대2.2cm 최소 0.7cm 평균 1.1cm의 오차가 발생하였다.

이전 시험들과 마찬가지로 시작지점이 포함된 시작점 진입각도에 따라 1번라인의 오차가 크게 발생하지만 1번라인을 제외한 후 계산하면 오차의 평균은 1.0cm 정도로 판단됨.

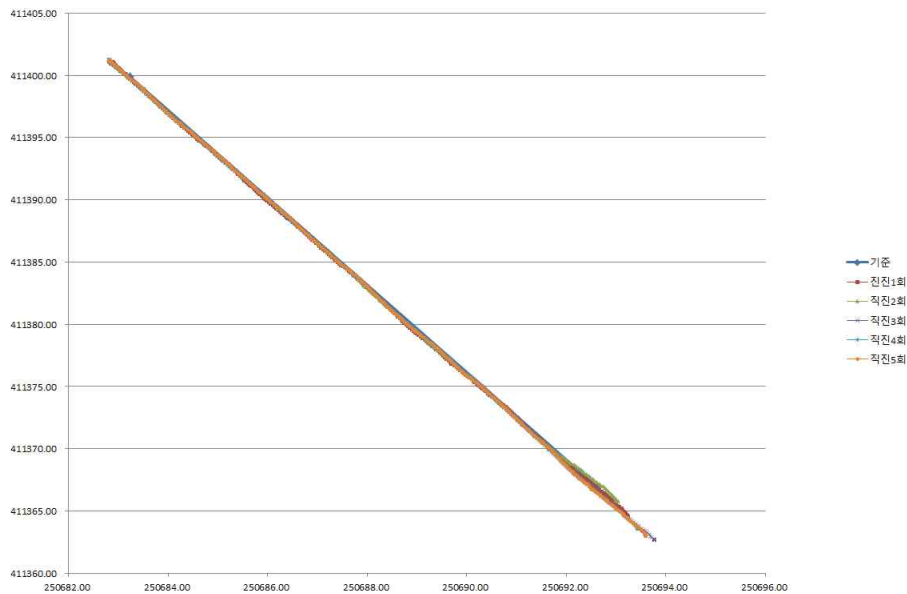
㉞ 알고리즘 및 모듈 개선

위 실증시험에서 반복횟수별 오차는 1cm내외로 작은편이지만, 생성경로와 실제주행 경로의 오차는 45cm내외로 상당히 큰편이다.

이는 기준점의 차이로 인해 발생하는 것으로 생성경로의 좌표는 2개의GPS안테나의 중간지점이며, 주행경로의 데이터는 좌측 GPS안테나가 기준점이 되어 발생한 오차로 생성경로의 좌표를 좌측 GPS안테나가 기준점이 되도록 변경하였다.



<알고리즘 및 모듈 개선 후 전진시험모습>



<개선후 생성경로와 직진경로의 데이터>

개선된 상태에서의 측정값은 ㉟ 농로(직선)에서 주행속도별 성능평가 시험과 같은 방법으로 계산하면 4cm정도의 오차를 보이고 있음.

© 위치-자세 인식모듈의 정지위치변화.

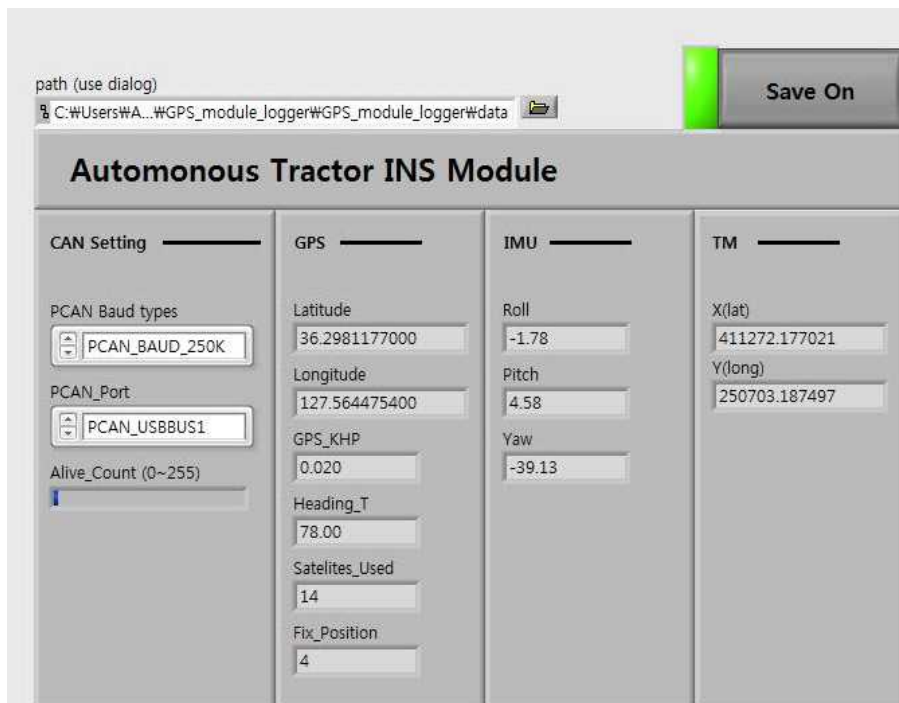
정지오차 인증(ISO17123-8기준)과 별도로 정량적 목표 평가방법에 의하여 (주)국제종합기계의 GPS신호 수신을 방해받지 않는 개활지에서 보정신호를 사용하여 RTK신호가 Fix로 고정되어 안정화 된 이후로부터 1시간동안 1분 간격으로 데이터를 수집하여 최대 측정위치 오차가 전체 평균값을 중심으로 목표 값을 반경으로 하는 원안에 위치하기위한 시험을 진행하였음.

위치-자세 인식모듈이 정지된 상태에서 TM좌표 X,Y값의 분포도를 측정해보았음.



<정지상태에서 GPS수신중인 트랙터>

정지된 상태에서의 좌표 값을 누적하여 표본을 추출하기 위해 GPS_module Logger 프로그램을 이용하였고 설정된 CAN 세팅 값의 IMU와 GPS 데이터는 아래 그림과 같이 추출하였음.



<GPS_module Logger로 측정중인 모습>

정지상태의 누적 데이터는 1시간동안 1분 간격으로 총 60회 수집하였음.

회수 TM좌표	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회
X	410890.50	410890.50	410890.51	410890.50	410890.50	410890.50	410890.50	410890.50	410890.50	410890.50
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

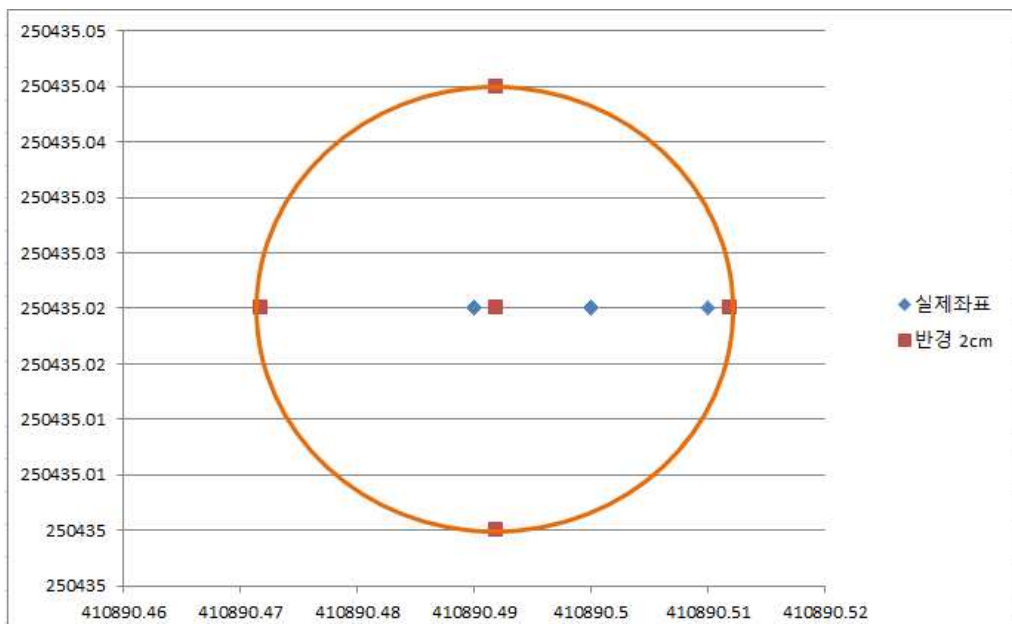
회수 TM좌표	11회	12회	13회	14회	15회	16회	17회	18회	19회	20회
X	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

회수 TM좌표	21회	22회	23회	24회	25회	26회	27회	28회	29회	30회
X	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

회수 TM좌표	31회	32회	33회	34회	35회	36회	37회	38회	39회	40회
X	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

회수 TM좌표	41회	42회	43회	44회	45회	46회	47회	48회	49회	50회
X	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

회수 TM좌표	51회	52회	53회	54회	55회	56회	57회	58회	59회	60회
X	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49	410890.49
Y	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02	250435.02

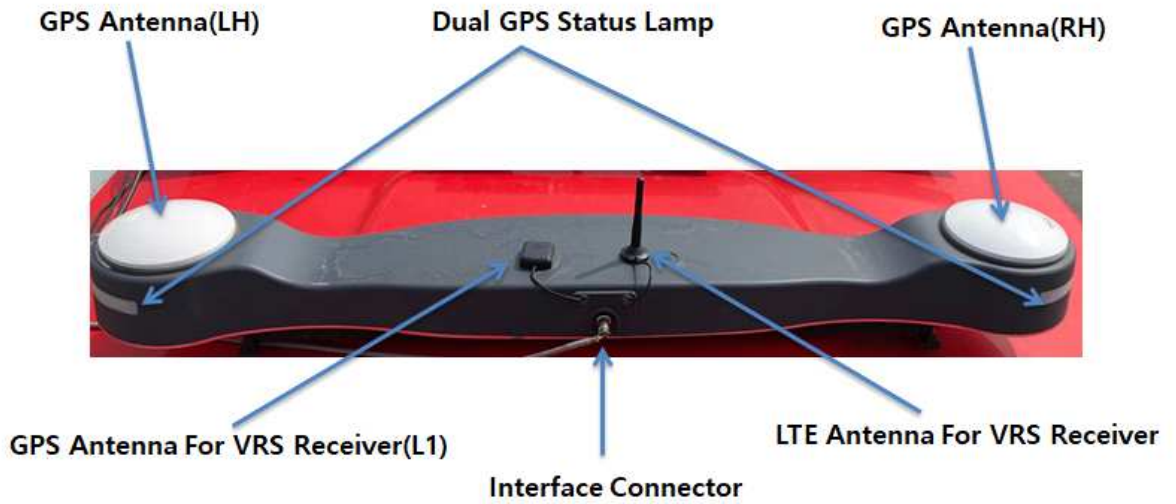


<위치-자세 인식모듈의 정지상태에서 1시간동안의 변화>

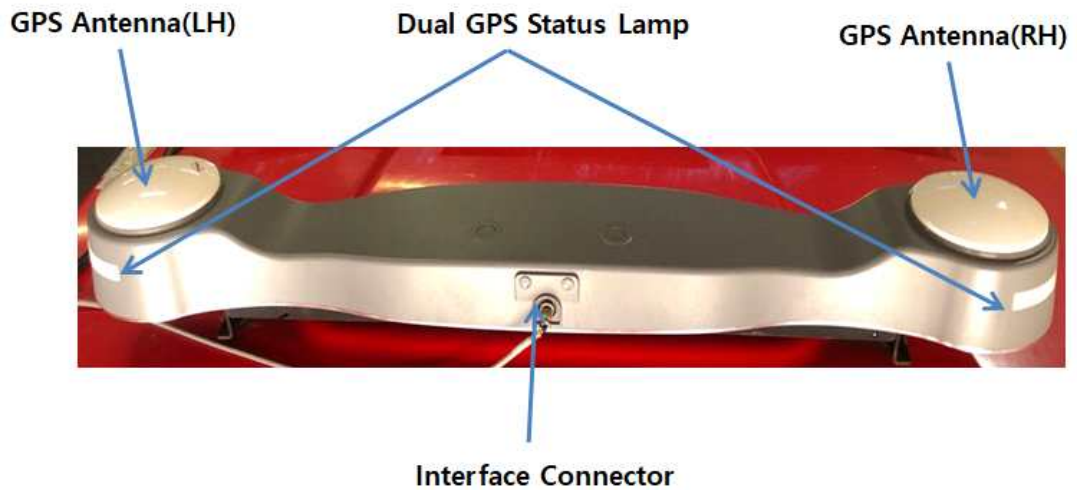
위 그래프를 보면 측정값의 전체 평균값을 중심으로 2cm를 반경으로 하는 원안에 모두 위치하는 것을 확인하였음.

① 최종 개선제품 제작

자율주행 트랙터에 탑재될 위치-자세 인식모듈의 제어부 H/W 및 외형을 4대분 제작하여 국제종합기계, 대동공업과 동양물산에 자율주행 트랙터 제작용으로 각1대분씩 제공 완료하였으며, 1대는 성능 시험용으로 사용 하였음.



<위치-자세 인식모듈(2차년도)>



<위치-자세 인식모듈(3차년도)>

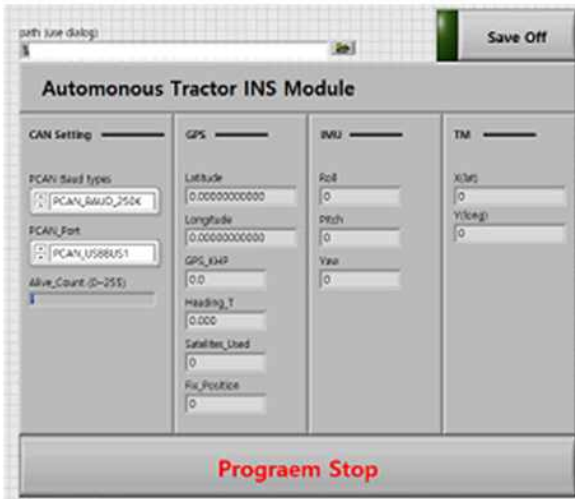
2차년도에 제작된 위치-자세 인식모듈은 전송방식 중 DMB를 이용하여 브로드캐스트 RTK를 사용하였으나, 위치와 기상상태에 따른 수신률이 저조하여 LTE통신으로 대체하여 브로드캐스트 RTK를 사용하였음.

외관에 부착되어 있던 Antenna 2종을 파손위험을 줄이고 외관 디자인을 정리하기 위해 내부에 위치시켰음.

㉔ 위치-자세 인식모듈 성능평가 및 공인평가시험

공인 시험은 ISO 17123-8에 의거하여 진행하였다. ISO 17123-8은 simplified test procedure와 full test procedure 두 가지 측정방법을 두고 있으며, 본 시험의 경우 통계해석을 하지 않으므로 simplified test procedure를 따라 시험을 진행하였다. 시험 방법은 GPS 수신을 방해하는 장애물인 없는 개활지에서 VRS를 이용한 위치보정신호를 사용하였다.

공인 인증 시험을 위한 사전 점검으로 (주)국제종합기계 사내의 GPS수신에 방해되지 않는 공간에서 예비시험을 진행하였다.



<(좌)성능시험 data viewer , (우)인증시험예비테스트>

측정점 A,B,C의 각 거리는 3m이며, 세점의 위치를 반복 10회 측정하였고, 10회측정된 데이터 평균값의 차이로 오차를 계산 하였다.

GPS 수평측정오차 시험결과
-측정지점(1,2번) 간 측정오차

순번	Set	측정지점	수평측정과표		측정거리(m)	측정오차(mm)
			x	y		
1	1	1	410892.757930	250405.138970	2.998801	1.2
2	1	2	410894.768287	250407.364115		
3	2	1	410892.735893	250405.166047	3.000318	0.3
4	2	2	410894.768339	250407.373098		
5	3	1	410892.746886	250405.148017	3.006203	6.2
6	3	2	410894.768339	250407.373098		
7	4	1	410892.735841	250405.157064	2.999526	0.5
8	4	2	410894.757243	250407.373162		
9	5	1	410892.746834	250405.139034	3.013629	13
10	5	2	410894.779384	250407.364051		
평균오차						4.3

-측정지점(2,3번)간 측정오차

순번	Set	측정지점	수평측정과표		측정거리(m)	측정오차(mm)
			x	y		
1	1	2	410894.768287	250407.364115	2.99142	8
2	1	3	410896.767548	250409.589323		
3	2	2	410894.768287	250407.364115	3.012893	12
4	2	3	410896.789793	250409.598178		
5	3	2	410894.768339	250407.373098	3.026987	27
6	3	3	410896.800994	250409.616079		
7	4	2	410894.779436	250407.373034	3.005506	5
8	4	3	410896.789845	250409.607160		
9	5	2	410894.779384	250407.364051	2.9988	1
10	5	3	410896.789741	250409.589195		
평균오차						11

<예비테스트 시험결과>

예비 시험결과 4.3mm, 11mm의 데이터를 얻을수 있었는데 이는 목표로 하고 있는 2cm이내의 결과이며, 이를 토대로 공인인증을 위해 농업기술 실용화재단에 공인인증 시험을 신청하였다.

위치-자세 인식모듈의 정지오차 2cm를 만족하기 위한 공인인증 시험을 농업기술실용화재단을 통하여 진행함.



<GSP정지오차 공인인증 시험장면>

2021년 3월18일(목)에 농업기술실용화재단에서 시험을 실시하였으며, 날씨는 구름 없이 맑고 온도는 14° 이었으며, GPS수신에 방해가 되지 않는 개활지에서 시험을 진행 하였음.

측정점 세 점중 A와B의 거리 3m, B와C의 거리도 3m이며, 세점의 위치를 반복 5set 로 반복 측정하였고 측정된 데이터의 거리를 구하여 실제거리와의 차이를 평균내어 계산 하였음.

A와B지점의 5set 평균오차는 0.8cm B와C지점은 1.1cm 로 측정되었다.

공인인증성적서는 별첨의 성적서와 같다.

농업기계 성능시험 성적서

1. 신청인
가. 성명 : 김영준
나. 사업과등록번호 : 129-81-00761
다. 주소 : 충청북도 옥천군 옥천읍 사부도 49
라. 상호 : 옥재농업기계(주)

2. 시험 용도/리 제품
가. 기종명 : 자유주행용 휴대 GPS 모듈
나. 품목명 : GN-GPS-02
다. 필드 및 규격 : -

3. 시험번호 : 21-FACTMP-026

4. 시험성적 : 불합

농업기술실용화재단 본의시험 의뢰 및 적외선, 제4호 제2항에 따라 시험신청한 기
때에 대한 공동시험 결과입니다.

2021년 04월 02일

농업기술실용화재단 이사장

점정 성적

1. 기종명 : 자유주행용 휴대 GPS 모듈
2. 측정번호 : 21-FACTMP-026
3. 형식명 : KM (GPS-02)
4. 형식 : -
5. 규격 : -
6. 시험 성적 : -

6.1.1 시험조건
- 일시 및 장소 : 2021.03.18(목), 전북 익산시 평동로 457
- 날씨 : 맑음, 평균온도 14°C
- 측정오차의 원개(제외가 제외)
- 동 측정지점 간 수평거리 : 3.000m

6.1.2 GPS 수평측정오차 시험결과
- 측정지점(1, 2번) 간 측정오차

순번	Set	측정 지점	수평측정차량(m)		수평거리(m)	측정거리 측정오차 (mm)
			x	y		
1	1	1	371119.753	193724.095	3.011	11
2	1	2	371120.609	193721.208		
3	2	1	371119.753	193724.096	3.006	6
4	2	2	371120.620	193721.208		
5	3	1	371119.708	193724.095	3.003	3
6	3	2	371120.565	193721.217		
7	4	1	371119.719	193724.096	2.990	9
8	4	2	371120.565	193721.217		
9	5	1	371119.708	193724.096	2.985	15
10	5	2	371120.565	193721.226		
평균 오차						8.8

측정지점(2, 3번) 간 측정오차

순번	Set	측정 지점	수평측정차량(m)		수평거리(m)	측정거리 측정오차 (mm)
			x	y		
1	1	2	371120.609	193721.208	2.994	6
2	1	3	371121.465	193718.339		
3	2	2	371120.620	193721.208	2.990	9
4	2	3	371121.465	193718.339		
5	3	2	371120.565	193721.217	2.994	6
6	3	3	371121.421	193718.348		
7	4	2	371120.565	193721.217	2.990	9
8	4	3	371121.410	193718.348		
9	5	2	371120.565	193721.226	3.024	24
10	5	3	371121.465	193718.339		
평균 오차						10.8

7. 측정세종 개요
본 기종은 자유주행드래기 목적용으로 제작된 GPS 모듈로 두 지점 간 수평거리 3m를 기준으로 하여 GPS 수신거리 측정요를 시험한 결과 두 측정지점 간 평균오차는 각각 8.8mm, 10.8mm로 나타났다.

8. 측정결과
본 시험실적은 농업기술실용화재단 본의시험의뢰 및 적외선 제4호 제2항의 규정에 따라 실시한 성능시험 실적으로 ISO 17123-8:2015 Optics and optical instruments - Field procedures for testing geospatial and surveying instruments - Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic(RTK)을 제정된 Simplified test procedure를 준용하여 실시되었음.

책임연구원 김광우 연구원 조태경
관측부 조태경

<공인인증성적서>

라. 협동연구기관 3 ((주)긴트)

㉞ 통합 모듈 상용화 기술 개발

㉠ 통합 모듈 내환경성 시험 및 개선 설계

㉡ 통합 모듈 방수 테스트

1) 시험 조건

- 침수 깊이 : 1,000mm
- 침수 시간 : 30 min

2) 시험 장비 : 수조

3) 시험 방법

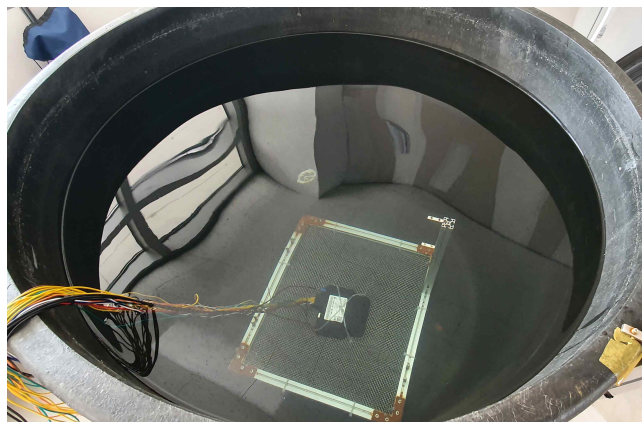
(1) 시험 전 대상 시험품의 기본 성능을 확인한다.

(2) 지정된 깊이 이상이 되는 수조에 지정된 깊이만큼 침수시켜 지정된 시간만큼 위치시킨다.

4) 시험 진행 사진



< 수조 깊이 확인 >



< 침수 중 >

5) 시험 결과

테스트 항목	결과
방수 시험	PASS

㉠ 통합 모듈 온도 테스트

1) 시험 조건

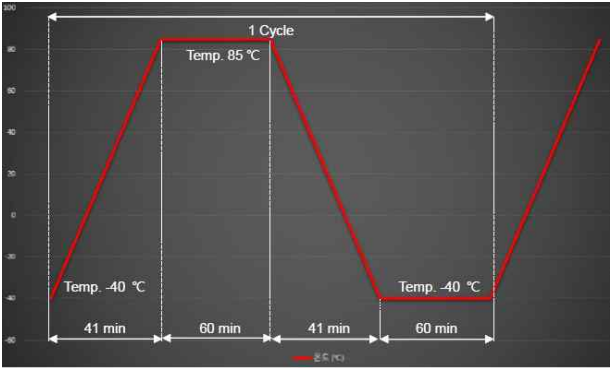


- 온도 사이클 테스트 : KS C IEC 60068-2-14 작동 안함 또는 작동 중
- 온습도 테스트 : KS R 0015

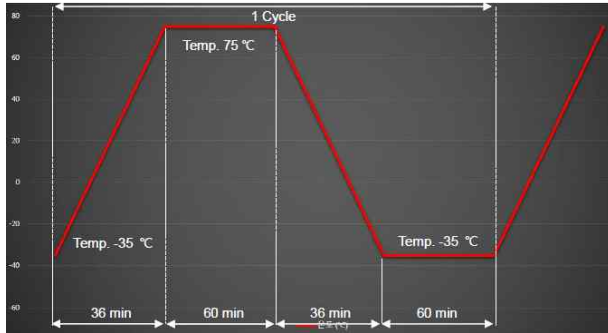
2) 시험 장비 : 온습도 챔버

3) 시험 방법

- (1) 시험 전 대상 시험품의 기본 성능을 확인한다.
- (2) 지정된 규격에 맞는 온도 습도 환경을 유지하여 시험을 실시한다.

4) 시험 진행 사진

테스트 방법	시험 진행 사진
 <p>Not-Operating</p>	 <p>a. Sample in chamber image</p>  <p>b. Temperature chamber image</p>



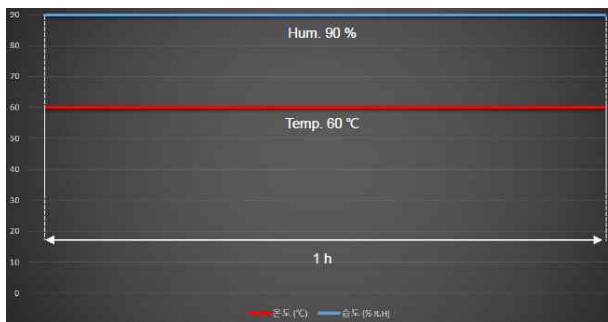
Operating



a. Sample in chamber image



b. Simulator setup image



Operating



a. Sample in chamber



b. Simulator setup image

5) 시험 결과

테스트 항목	규격	결과
온도 사이클 테스트 (비작동)	KS C IEC 60068-2-14	PASS
온도 사이클 테스트 (작동중)	KS C IEC 60068-2-14	PASS
온습도 테스트	KS R 0015	PASS

㊤ 통합 모듈 내진동성 테스트

1) 시험 조건

- 진동 주파수: 33.3Hz
- 진동 가속도: 54.6 m/s² (5.57g) (고객과 협의)
- 진동 방향 및 시간: 상하(4시간), 좌우(2시간), 전후(2시간)

2) 시험 장비 : 진동시험기

3) 시험 방법

- (1) 시험 전 대상 시험품의 기본 성능을 확인한다.
- (2) 지정 진동 주파수, 진동 가속도, 지정방향으로 시험을 실시한다.

4) 시험 진행 사진 - 각 지정 축 장착 상태에서 기본 성능 확인

진동 방향	시험 진행 사진
좌우	
전후	
상하	

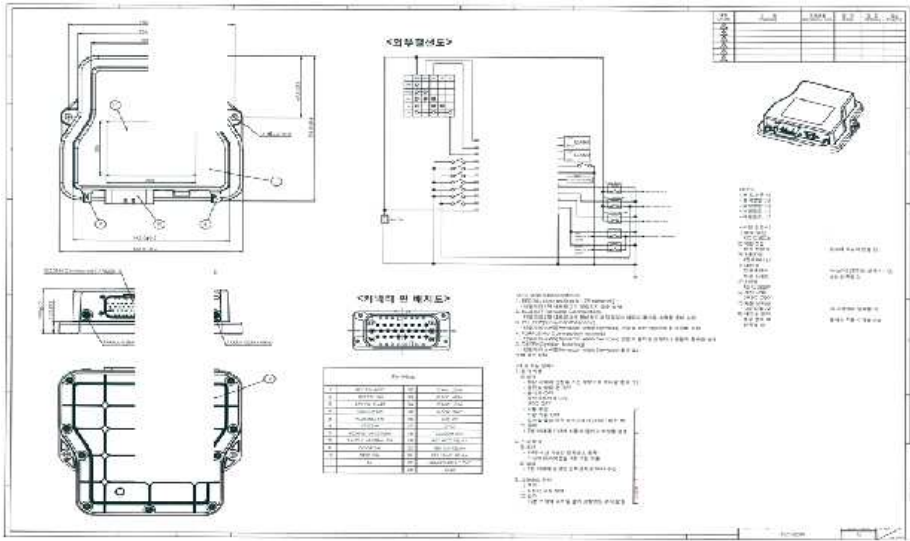
5) 시험 결과

진동 주파수	진동 가속도	진동 방향	결과
33.3Hz	5.5g	좌우	PASS
		전후	PASS
		상하	PASS

- ㊸ 내환경성 테스트 결과 기반 개선 사항 및 추가 기능 요구사항을 반영한 개선 설계
 - 방수테스트 이후 패킹 구조 개선 : 오링 두께 0.2 -> 0.3 변경

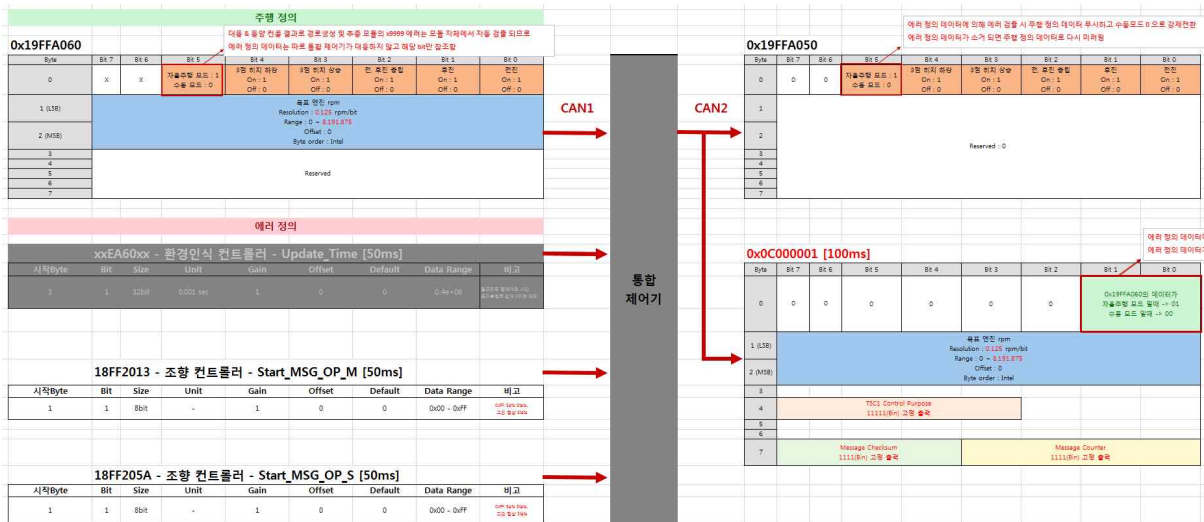
㊸ 통합 모듈 사양 및 통신 인터페이스 규격 문서화

- 제조사 공용 사용을 위한 통합 모듈 최종 사양 문서화

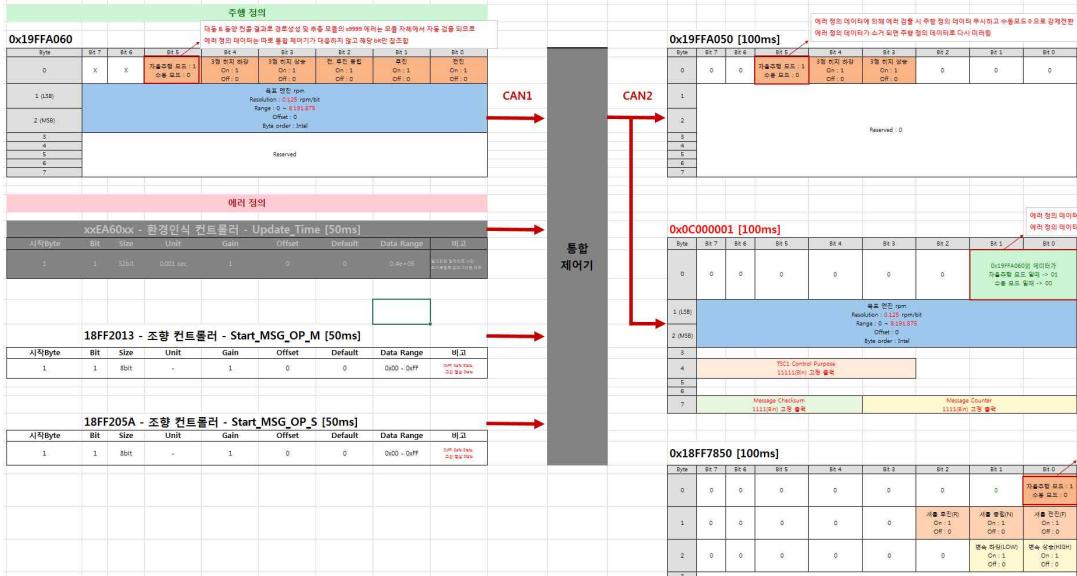


< 최종 사양 문서화 - 보안을 위해 일부 가림 처리 >

- 제조사 및 핵심 부품 공용 사용을 위한 통신 인터페이스 규격 문서화



< 인터페이스 규격화 1 - 보안을 위해 일부 삭제 처리 >



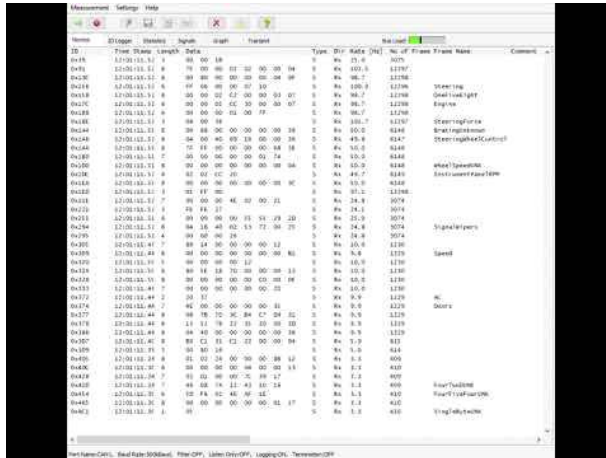
< 인터페이스 규격화 2 - 보안을 위해 일부 삭제 처리 >

- ㉔ 자율 주행 트랙터 현장 실증 - 통합 모듈 실증
- ㉕ 통합 모듈 환경 적합성 실증
 - 자율 주행 트랙터의 전원, 하네스 진동 환경에서 통합 모듈의 적합성 실증



< 대상 차량에서의 실 장착을 통한 실차 검증 >

- ㉖ 통합 모듈 기능 적합성 실증
 - 핵심 모듈을 포함한 자율 주행 트랙터 통합 후 상호 통신 기능 여부 실증



< CAN 데이터 모니터링 실측 스크린 샷 >

㉞ 통신프로토콜 표준화 방안

㉞ 신규 개발되는 기종의 공용화 방안

신규로 개발되는 기종은 아래의 표준을 적용하여 공용화 추진

- Physical Layer according to ISO 11898 (250kb/s)
- Application Layer according SAE J1939/ 71
- Data Link Layer according SAE J1939/ 21

㉞ 양산중인 기종의 프로토콜 공용화 방안

각 제조사간 상이한 차량용 제어기 프로토콜을 통합제어기를 통해 프로토콜 정리하여 공용 프로토콜로 사용

주행 정의

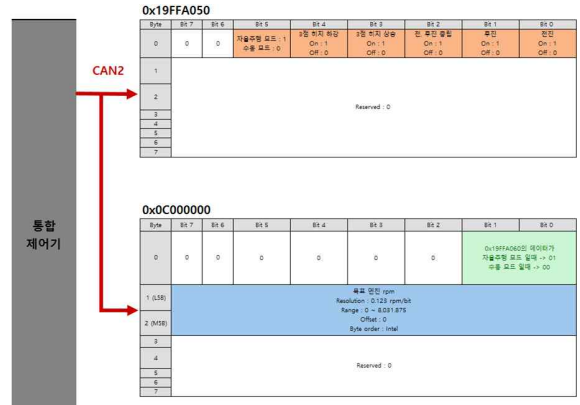
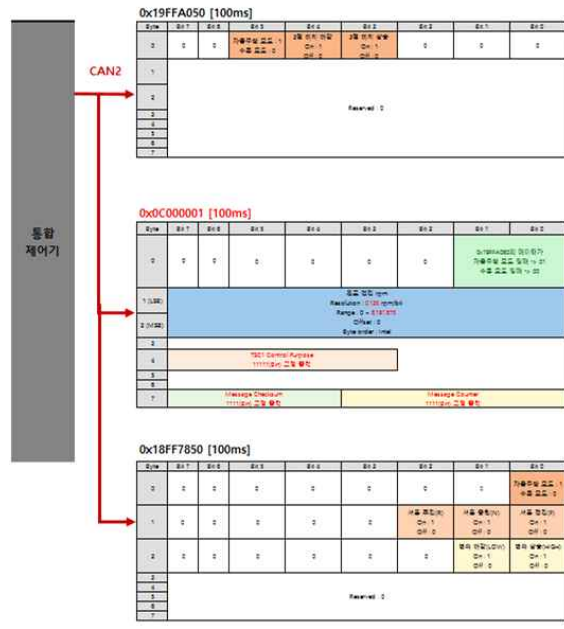
0x19FFA060									
Byte	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	비고
0	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1 (LSB)	속도 단위 rpm Resolution: 0.028 rpm/Bit Range: 0 ~ 32767 rpm Offset: 0 Byte order: little								
2 (MSB)	Reserved: 0								
3	Reserved: 0								
4	Reserved: 0								
5	Reserved: 0								
6	Reserved: 0								
7	Reserved: 0								

제어 정의

xxEA60xx - 환경인식 컨트롤러 - Update_Time [50ms]									
시작Byte	Bit	Size	Unit	Gain	Offset	Default	Data Range	비고	
1	1	20H	0.01 sec	1	0	0	0.00~0.05	0x00~0x1F (0.01sec 단위)	

18FF2013 - 조향 컨트롤러 - Start_MSG_OP_M [50ms]									
시작Byte	Bit	Size	Unit	Gain	Offset	Default	Data Range	비고	
1	1	8H	-	1	0	0	0.00~0.05	0x00~0x07 (0.01sec 단위)	

18FF205A - 조향 컨트롤러 - Start_MSG_OP_S [50ms]									
시작Byte	Bit	Size	Unit	Gain	Offset	Default	Data Range	비고	
1	1	8H	-	1	0	0	0.00~0.05	0x00~0x07 (0.01sec 단위)	



마. 위탁연구기관 1 (충남대학교)

㉔ 자율주행 트랙터 포장 실증을 통한 동역학 시뮬레이션 모델 평가

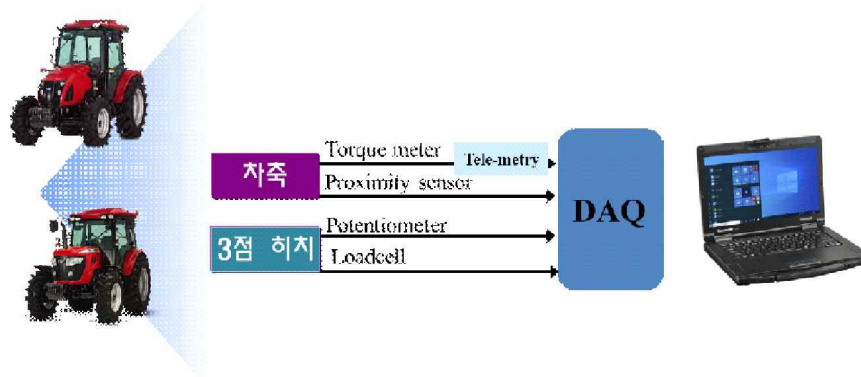
㉔-1 포장 실증 데이터를 이용한 모델 검증

㉔-1-1 제어 모델 성능 평가 방법

- 시뮬레이션 모델을 이용하여 자율주행 제어기를 이용한 성능평가를 수행하기 위해 동역학 모델을 구성하였음.
- 동역학 모델 개발은 44 kW 급 트랙터 (TX59, TYM Corporation, Korea)와 78 kW 급 트랙터(S07, TYM Corporation, Korea)를 이용하여 수행하였음.
- 78 kW 급 트랙터 모델을 이용한 제어 모델 성능평가는 운전자 모델(PI 계수 변경) 및 도로 모델(마찰 계수 변환)에 대하여 수행하였음.
- 차량 모델에 따른 제어 모델 성능평가는 44 kW 급 트랙터 모델을 같이 이용하여 수행하였음.
- 운전자 모델에 따른 제어 모델 성능평가는 제어모델의 P와 I 계수 변경을 통해 수행하였으며, 계수 변화에 따라 다른 운전자 모델이라고 가정하였음.
- 도로 조건에 따라 마찰계수가 변화하기 때문에, 도로 모델에 따른 시뮬레이션은 마찰계수 변화를 통해 각기 다른 조건의 모델로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였음.
- 차량 모델에 따른 성능평가를 수행하기 위해서 44 kW 급 트랙터 모델을 이용하여, 제어기 모델은 동일 모델로 구성하였음.

㉔-1-2 동역학 모델 개발 및 검증

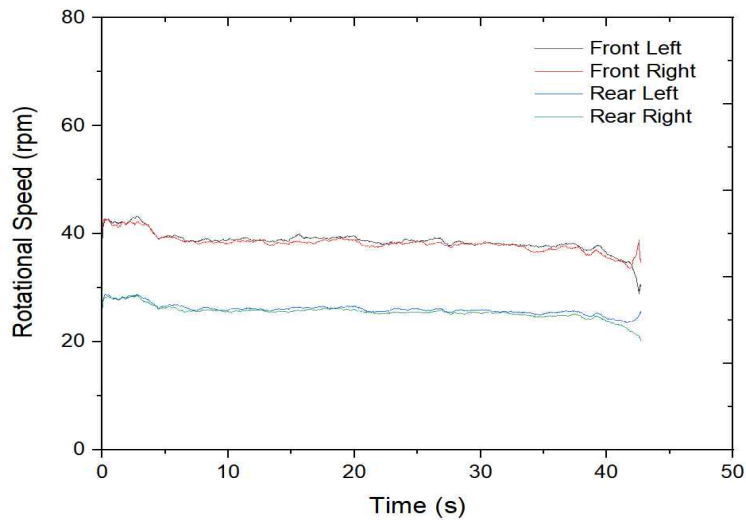
- 본 연구에 사용될 모델에 대한 개발 및 검증은 부하 계측 시스템을 개발하여 수행하였음. 입력데이터는 후방 육분력계에서 계측 되는 견인력 데이터와 각 차축의 회전속도 및 3점히치의 높이로 설정하였으며, 검증데이터는 각 차축에 발생하는 토크로 설정하였음. 모델에 대한 검증은 계측된 토크데이터와 시뮬레이션 결과값과의 RMS (Root Mean Square) 분석을 통해 수행하였음.
- 트랙터 각 차축에 토크미터와 근접센서가 설치하였으며 트랙터 작업에 따라서 토크미터에서 측정된 차축 토크 데이터는 토크미터 내의 앰플리파이어를 이용하여 계측하였음. 회전속도는 철판을 가공하여 100개의 이를 만들어 차축에 설치하였음. 차축에 장착되어 있는 총 100개의 이를 바퀴의 회전에 따라 감지하고 이를 이용하여 단위시간당 회전속도를 계산하였음.
- 총 6개의 로드셀을 이용하여 3점히치에 부착 가능한 육분력계를 구성하였음. 수평 및 수직 방향으로 각각 3개의 로드셀이 설치되나, 견인력 데이터를 계측하기 위해 수평방향 로드셀 데이터만을 이용하였음. 3개의 수평 방향으로 설치되는 로드셀은 각각 상부, 하부의 2개 히치 포인트에 설치하였음.
- 3점히치 높이는 3점히치의 승하강 구동을 시켜주는 유압모터 장치의 회전축 부분에 포텐시오미터를 설치하여 계측하였음.
- 계측기는 유니버설 타입의 DAQ (840B, HBM, Germany)를 사용하였으며, 회전속도 데이터는 Frequency로 설정하여 계측하였으며, 차축토크미터는 앰플리파이어에서 나오는 전압을 계측하여 각각 회전속도 및 토크로 변환하여 계측하였음.



부하계측 시스템 구성도

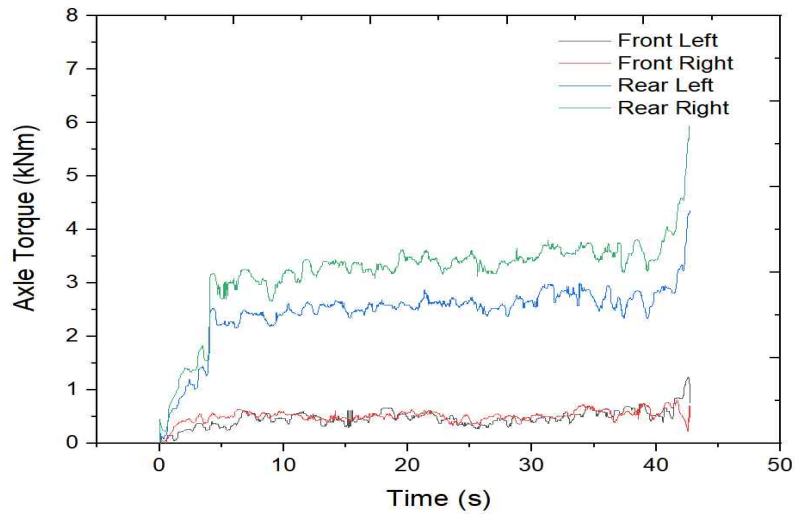
㉔ 계측 결과 분석

- 44kW급 트랙터 차축 회전속도 및 토크 데이터는 아래와 같이 계측 되었음.
- 트랙터 차축 회전속도는 아래 그림과 같이 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음. 트랙터 전륜 좌·우측의 차축 회전속도는 각각 20~30 rpm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 차축 회전속도는 각각 35~40 rpm의 범위로 나타남.



44 kW 급 트랙터의 쟁기 작업 간 계측 된 차축 회전 속도

- 트랙터 차축 토크 및 출력은 아래 그림과 같이 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음. 트랙터 전륜 좌·우측의 토크는 각각 0~1 kNm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 토크는 약 2.5~4 kNm 범위로 나타남. 후륜의 토크가 전륜 토크의 약 2~3배 더 높게 나타나고 있음.



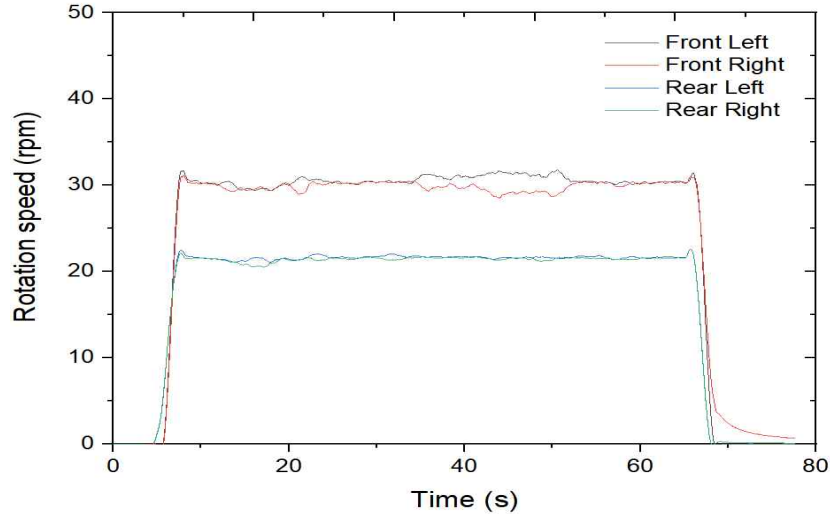
44 kW 급 트랙터의 쟁기 작업 간 계측 된 차축 토크

- 전륜 좌측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 0.74, 0.25, 0.49, 0.10 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 43.26, 28.83, 38.66, 1.73 rpm으로 나타났음.
- 전륜 우측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 0.75, 0.34, 0.52, 0.08 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 42.85, 33.64, 38.29, 1.54 rpm으로 나타났음.
- 후륜 좌측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 3.00, 2.16, 2.59, 0.17 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 28.88, 23.63, 26.02, 0.94 rpm으로 나타났음.
- 후륜 우측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 3.81, 2.67, 3.37, 0.21 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 28.56, 20.20, 25.53, 1.18 rpm으로 나타났음.

44kW 트랙터 차축 회전속도 및 토크 부하 분석 결과

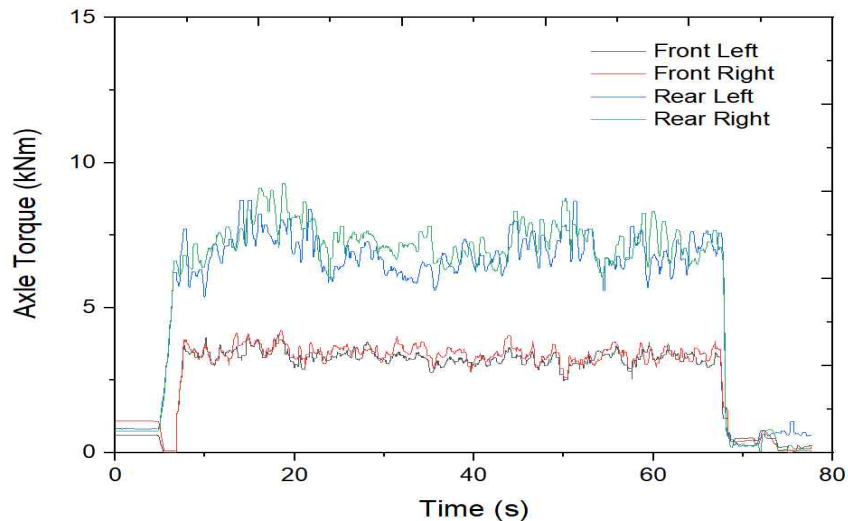
		Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
Forward_Left Axle	Torque (Nm)	0.74	0.25	0.49	0.10
	Rotational speed (rpm)	43.26	28.83	38.66	1.73
Forward_Right Axle	Torque (Nm)	0.75	0.34	0.52	0.08
	Rotational speed (rpm)	42.85	33.64	38.29	1.54
Rear_Left Axle	Torque (Nm)	3.00	2.16	2.59	0.17
	Rotational speed (rpm)	28.88	23.63	26.02	0.94
Rear_Right Axle	Torque (Nm)	3.81	2.67	3.37	0.21
	Rotational speed (rpm)	28.56	20.20	25.53	1.18

- 78kW급 트랙터 차축 회전속도 및 토크 데이터는 아래와 같이 계측 되었음.
- 트랙터 차축 회전속도는 아래 그림과 같이 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음. 트랙터 전륜 좌·우측의 차축 회전속도는 각각 20~25 rpm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 차축 회전속도는 각각 30~35 rpm의 범위로 나타남.



78 kW 급 트랙터의 쟁기 작업 간 계측 된 차축 회전 속도

- 트랙터 차축 토크 및 출력은 아래 그림과 같이 쟁기 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하는 개형으로 나타내고 있음. 트랙터 전륜 좌·우측의 토크는 각각 3~4 kNm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 토크는 약 6~10 kNm 범위로 나타남. 후륜의 토크가 전륜 토크의 약 2~3배 더 높게 나타나고 있음.



78 kW 급 트랙터의 쟁기 작업 간 계측 된 차축 토크

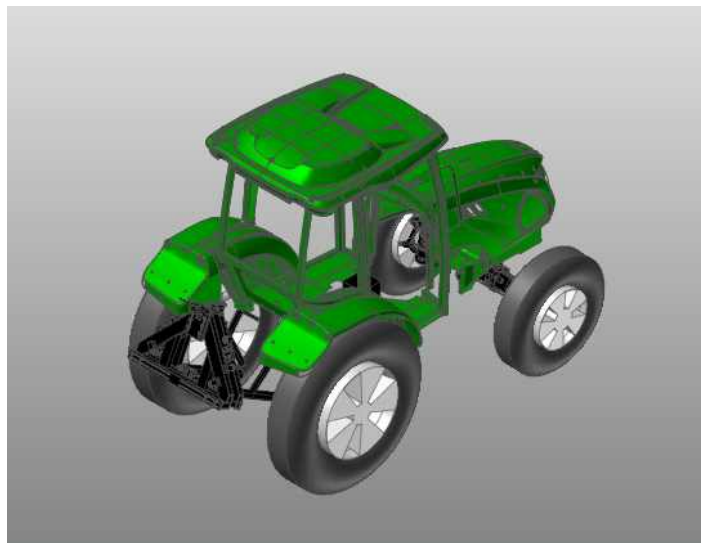
- 전륜 좌측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 4.07, 1.66, 3.29, 0.25 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 31.80, 26.71, 30.55, 0.54 rpm으로 나타났음.
- 전륜 우측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 4.22, 1.78, 3.43, 0.27 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 31.15, 25.39, 29.91, 0.54 rpm으로 나타났음.
- 후륜 좌측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 8.71, 5.37, 6.91, 0.65 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 22.60, 20.82, 21.63, 0.21 rpm으로 나타났음.
- 후륜 우측 토크의 최대, 최소, 평균, 표준편차는 각각 9.28, 6.02, 7.34, 0.66 kNm 로 나타났으며, 회전속도는 각각 22.62, 20.51, 21.46, 0.27 rpm으로 나타났음.

78kW 트랙터 차축 회전속도 및 토크 부하 분석 결과

		Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
Forward_Left Axle	Torque (Nm)	4.07	1.66	3.29	0.25
	Rotational speed (rpm)	31.80	26.71	30.55	0.54
Forward_Right Axle	Torque (Nm)	4.22	1.78	3.43	0.27
	Rotational speed (rpm)	31.15	25.39	29.91	0.54
Rear_Left Axle	Torque (Nm)	8.71	5.37	6.91	0.65
	Rotational speed (rpm)	22.60	20.82	21.63	0.21
Rear_Right Axle	Torque (Nm)	9.28	6.02	7.34	0.66
	Rotational speed (rpm)	22.62	20.51	21.46	0.27

㉔ 동역학 모델

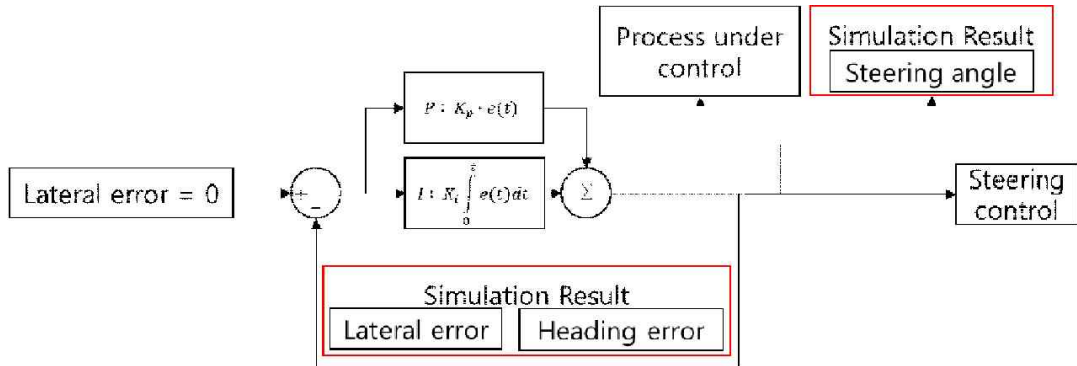
- 동역학 모델은 상용 프로그램인 Recurdyn (V9R4, Functionbay, Korea)를 이용하여 구성하였음. 각 트랙터 모델의 제원들 고려하여 구현하였으며, 동일한 모델을 이용하여 제원 변경을 통해 각 트랙터 모델을 구현하였음.
- 구속조건은 실제 트랙터의 구성 조건을 참고하여 수행하였음. 각 차축에는 타이어를 구성하였으며, 히치부도 구성하여 실제 계측데이터를 이용하여 히치의 움직임도 구현하였음.
- 모델을 구성하기 위한 입력데이터는 각 차축의 회전속도, 3점히치의 높이 데이터, 육분력계에서 계측 되는 견인력 데이터로 선정하였음. 실제 장치들을 동일하게 모델내에서 구현하여, 동일한 위치에 각 입력데이터를 구현하여 실제와 동일하게 구동하게 구현하였음.
- 지면과의 관계는 타이어 모델을 이용하여 구현하였으며, 타이어 모델은 UA (University of Arizona) 모델을 이용하여 구현하였음.



조향 모델 성능평가에 사용 된 동역학 모델

㉔ 조향 제어 모델 개발

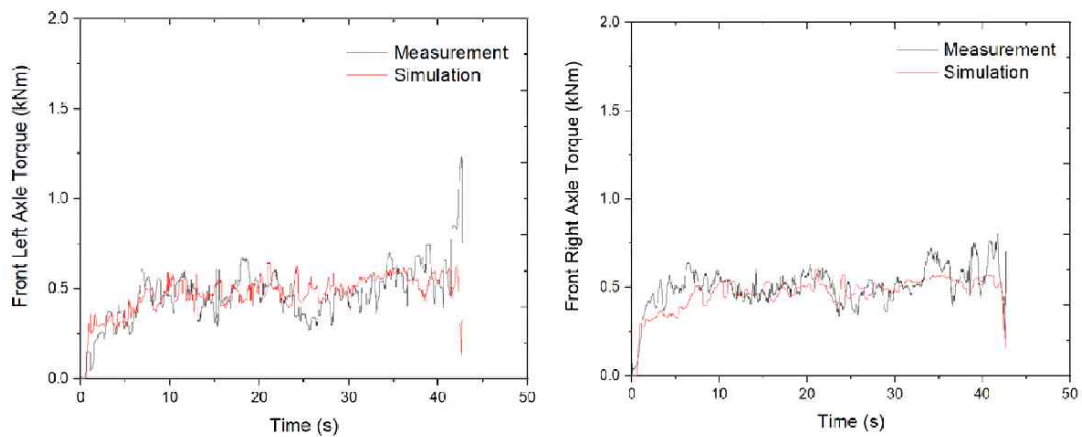
- 조향 제어 모델은 아래 그림과 같이 구성하였으며, 실시간으로 동역학 모델로부터 횡방향 오차를 수신받아 차량의 조향 제어를 수행할 수 있게 구성하였음. PI 제어 모델로 구성하였고, 각 계수들은 Trial and error 방식을 이용하여 최적의 조향제어를 수행하는 계수로 선정하였음.



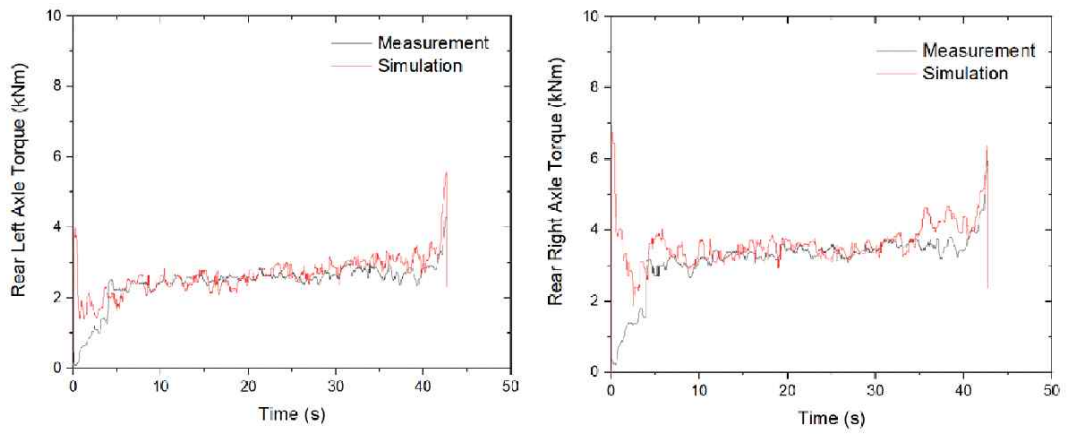
조향 제어를 수행하기 위한 조향 제어 모델의 구성도

㉕ 시뮬레이션 모델 검증

- 데이터 분석은 작업구간에서만 수행되었으며, 계측데이터와 시뮬레이션 결과값의 각 차축별 토크들의 RMS를 계산하고 RMS 값의 오차를 계산하여 모델 검증을 수행하였음.
- 44 kW 급 트랙터의 계측데이터의 RMS는 전방 좌측 및 우측이 각각 0.49, 0.53으로 나타났으며 후방 좌측 및 우측이 각각 2.59, 3.37으로 나타났음. 시뮬레이션 결과값의 RMS는 전방 좌측 및 우측이 각각 0.50, 0.50으로 나타났으며, 후방 좌측 및 우측이 각각 2.71, 3.61으로 나타났음. 각각 오차는 전방 좌측 및 우측이 1%, 6%로 나타났으며, 후방 좌측 및 우측이 각각 5%, 7%로 나타났음. 매우 유사한 결과값으로 판단되며 해당 모델을 이용하여 제어 모델 성능평가 수행이 가능할 것으로 판단하였음.



44 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값의 전방 좌측(좌) 및 우측(우) 우측 토크

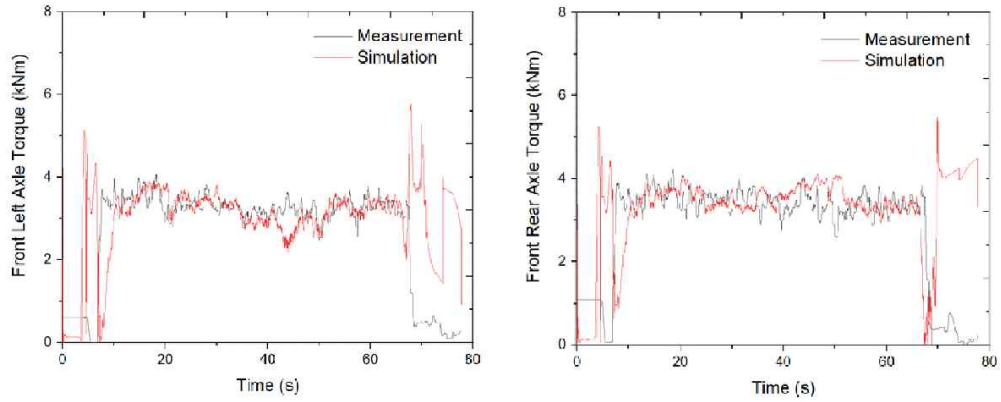


44 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값의 후방 좌측(좌) 및 후방(우) 우측 토크

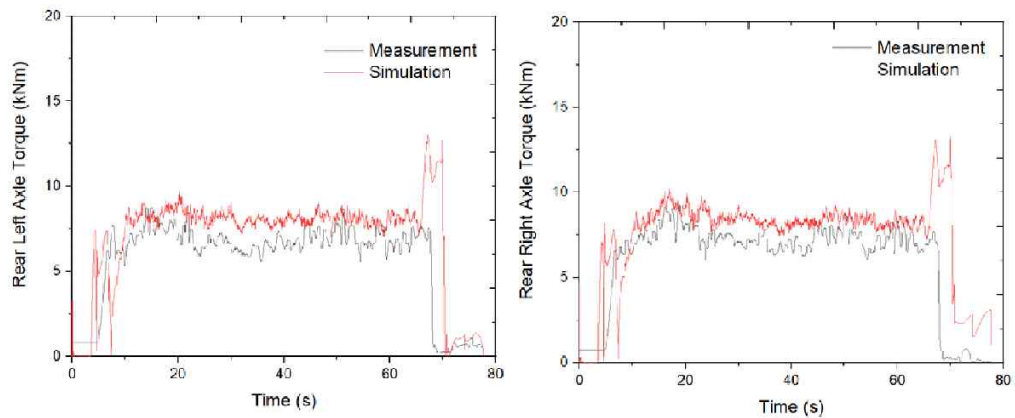
44 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값 RMS 분석 결과 표

	Front left	Front right	Rear left	Rear right
Measurement	0.49	0.53	2.59	3.37
Simulation	0.50	0.50	2.71	3.61
Error	1%	6%	5%	7%

- 78 kW 급 트랙터의 계측데이터의 RMS는 전방 좌측 및 우측이 각각 3.29, 3.44으로 나타났으며 후방 좌측 및 우측이 각각 6.98, 7.41으로 나타났음. 시뮬레이션 결과값의 RMS는 전방 좌측 및 우측이 각각 3.24, 3.53으로 나타났으며, 후방 좌측 및 우측이 각각 8.26, 8.55으로 나타났음. 각각 오차는 전방 좌측 및 우측이 1%, 2%로 나타났으며, 후방 좌측 및 우측이 각각 15%, 13%으로 나타났음. 매우 유사한 결과값으로 판단되며 해당 모델을 이용하여 제어 모델 성능 평가 수행이 가능할 것으로 판단하였음.



78 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값의 전방 좌측(좌) 및 우측(우) 우측 토크



78 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값의 후방 좌측(좌) 및 후방(우) 우측 토크

78 kW 급 트랙터의 계측 데이터 및 시뮬레이션 결과값 RMS 분석 결과 표

	Front left	Front right	Rear left	Rear right
Measurement	3.29	3.44	6.98	7.41
Simulation	3.24	3.53	8.26	8.55
Error	1%	2%	15%	13%

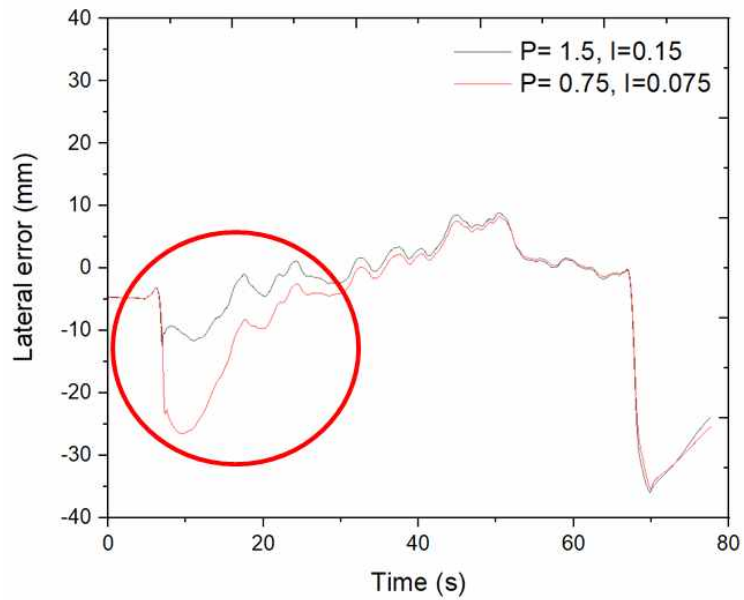
㉔ 운전자 모델에 따른 성능평가

㉕ 성능평가 방법

- 운전자 모델의 경우 계수 수치의 따라 제어 성능이 급격하게 달라질 수 있음. 이에 따라 Trial and error 방식을 사용하여 계수 선정을 수행하고 있음. 계수에 따른 제어성능을 비교 및 분석하기 위해서, 기존에 설정된 P와 I 계수를 그대로 사용하였을 때와 두 개의 계수를 1/2 수준으로 변경하였을 때 시뮬레이션을 수행하여 운전자 모델에 따른 제어모델 성능평가를 수행하였음. 성능평가는 차량 주행에 따른 횡방향 오차에 대한 RMS 분석으로 수행하였음.

㉖ PI 계수 변환에 따른 제어 모델 성능평가

- 운전자 모델 변환 이전과 이후의 RMS는 각각 4.5, 7.8로 나타났음. 약 2배 이상의 차이를 보이고 있으며, 출발 초기에 조향으 잡아주는 속도가 기존 모델 대비 느려서 발생하는 것으로 판단됨. 이후에는 유사한 제어 성능을 보여주면서 시뮬레이션이 수행되었음.



운전자 모델 변환에 따른 제어 모델의 비교 (횡방향오차)

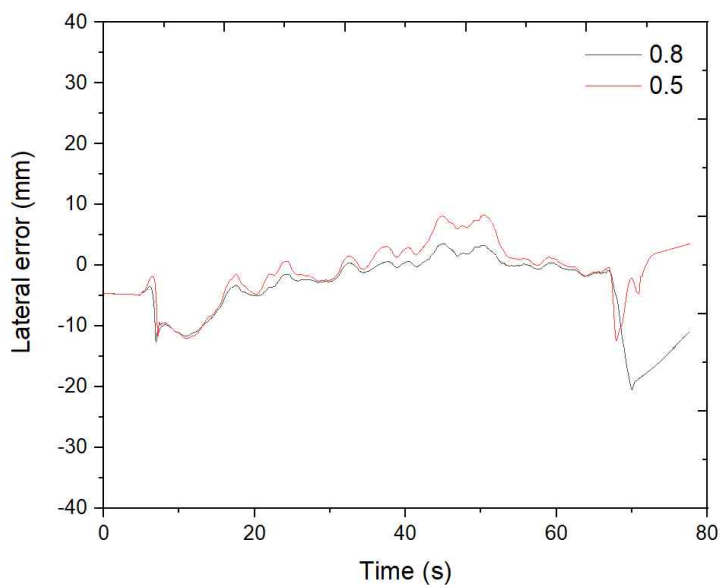
㉔ 도로 모델에 따른 성능평가

㉔ 성능평가 방법

- 도로 모델에 따른 성능평가는 마찰계수 변환을 통해서 수행하였음. 도로 조건은 정상적으로 제어 수행이 가능한 마른 콘크리트 조건과 상대적으로 수분 함유량이 많은 점토 조건으로 설정하였음. 통상적으로 마른 콘크리트 표면은 0.8 정도의 수치로 사용하고 있으며, 점토 조건은 0.5 수준의 수치로 사용하고 있음. 성능평가는 차량 주행에 따른 횡방향 오차에 대한 RMS 분석으로 수행하였음.

㉔ 마찰계수 변환에 따른 제어 모델 성능 평가

- 마찰계수 변환 이전과 이후의 RMS는 각각 3.7, 4.5로 나타났음. 약 1정도의 차이를 보이고 있으며, 노면의 조건이 기존 시뮬레이션 조건 대비 슬립이 많이 발생하는 조건이기 때문에 작업을 수행함에 따라 간헐적으로 제어 성능이 떨어지면서 발생하는 것으로 판단 됨. 전체적으로 유사한 성능을 보여주면서 작업이 수행되었음.



도로 모델 변환에 따른 제어 모델의 비교 (횡방향오차)

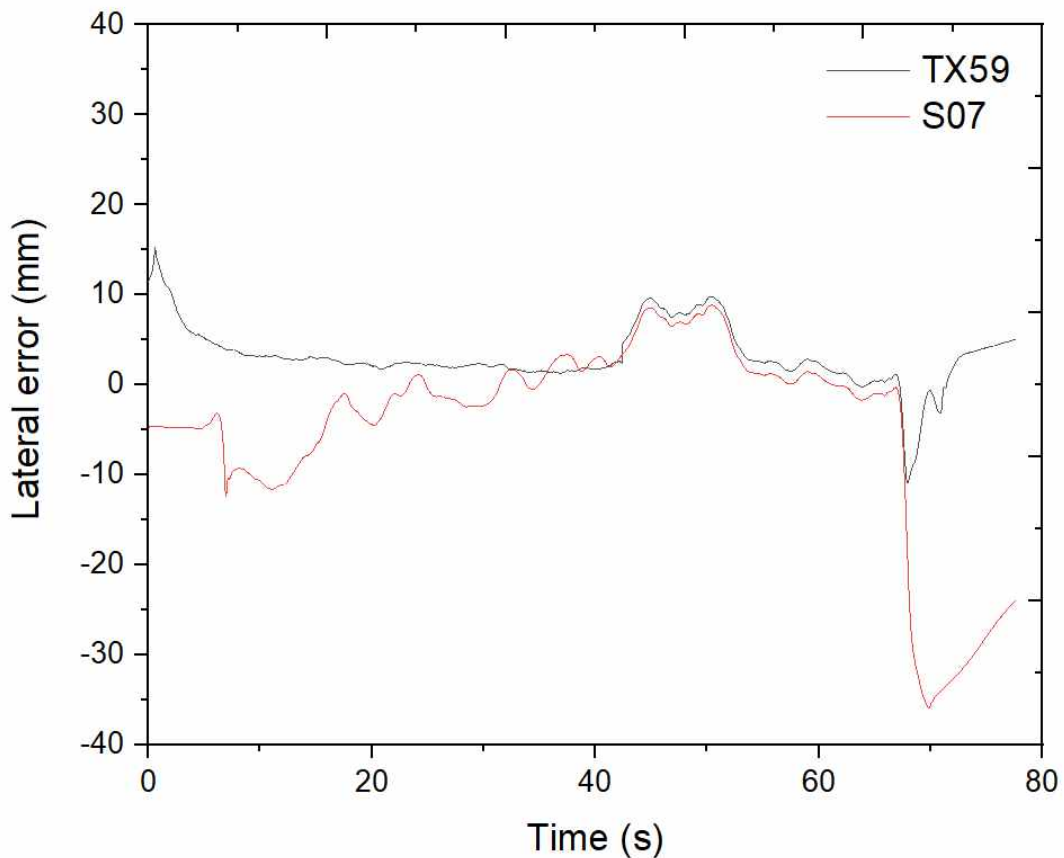
㉔ 자율주행 트랙터의 차량 모델에 따른 성능평가

㉔ 성능평가 방법

- 차량의 크기 및 무게중심 등 차량에는 다양한 동역학적 거동을 결정할 수 있는 요소들이 존재하고 있음. 따라서 제어모델에 대한 성능평가를 수행하기 위해서는 동일 제어를 사용하였을 때 차량 모델에 따른 성능평가를 수행하여야 함. 따라서, 44 kW 급 트랙터 모델에 동일 제어를 적용시켜서 차량에 따른 제어 모델 성능평가를 수행하였음. 성능평가는 차량 주행에 따른 횡방향 오차에 대한 RMS 분석으로 수행하였음.

㉔ 차량모델 변환에 따른 제어 모델 성능 평가

- 78 kW 급 트랙터 모델의 횡방향 오차 RMS 는 4.5, 44 kW 급 트랙터 모델의 횡방향 오차 RMS는 4.1로 나타났음. 전체적인 RMS 수치는 유사하게 발생하였으며 시뮬레이션 수행 간에도 유사한 형태의 횡방향 오차를 보였음.
- 다만, 차량 출발지점이 달라서 제어 초기에 차이가 있고 이외에는 유사한 성능을 보이며 시뮬레이션을 수행하였음.



차량 모델 변환에 따른 제어 모델의 비교 (횡방향오차)

㉔ 모델 변환에 따른 제어 모델 성능 평가 결과 종합

㉔ 조건별 RMS 분석

- 동역학 모델 변환에 따른 제어 모델 성능평가는 아래 표와 같이 종합되었음.
- 시뮬레이션 모델 변환에 따른 제어 모델의 성능은 크게 바뀌지 않으며, 노면의 마찰계수가 감소하여 슬립이 많이 일어날 경우 제어 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있음. 또한, 제어 모델의 계수 변경 시 기존 제어기 모델 대비 제어 성

능을 하락하는 것을 확인할 수 있음.

- 따라서, 제어 모델 성능에는 제어 모델 계수가 가장 큰 영향을 끼치며, 이후 노면 조건, 차량 모델에 따라 제어 모델 성능 변화에 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있음.

모델 변환에 따른 제어 모델 성능 평가 결과 표

		Lateral error RMS
Driver model	Control model factor P=1.5, I=0.15	4.5
	Control model factor P=0.75, I=0.075	7.8
Road condition	Friction factor =0.8	3.7
	Fraction factor =0.5	4.5
Tractor simulation model	78 kW Tractor	4.5
	44 kW Tractor	4.1

㉔ 자율주행 트랙터 성능검정을 위한 국내외 문헌자료 수집

㉔ 자율주행 트랙터의 성능검정 방법

- ㉔ 현재 관련 표준들은 이미 ISO에서 제정하여 도입되어 있음.
- ㉔ 국내에서도 ISO 부합 표준인 KS B ISO 12188-2를 제정하여 국내에 도입하여 관련 평가를 수행하고 있음.
- ㉔ 관련 표준은 위성기반 위치인식장치의 동적 시험과 직진 및 수평 이동 중 위성기반의 자동유도장치 시험으로 구분하여 제정되어 있음.
- ㉔ 자율주행 트랙터는 GPS (Global Positioning System)을 기반으로 시스템이 구성되기 때문에, GPS 자체에 대한 성능평가가 필요함. 해당 항목은 KS B ISO 12188-1 평가 항목으로 수행 가능할 것으로 판단됨.
- ㉔ KS B ISO 12188-1을 요약하며 아래와 같이 정리됨.
 - 적용범위는 위치인식장치를 사용하여 결정한 항법데이터의 정확도를 평가하고 보고하는 절차임. 해당 표준은 포장지에서의 움직임에 따른 성능에 초점을 맞추고 있으며, 위치인식장치의 동적 성능평가 방법을 제시하고 있음.
 - 용어들에 대한 정의는 총 18개에 대한 정의를 하고 있음. 위치인식장치, 항법데이터기록, 이동경로, 기준내비게이션장치, 지리좌표계, 이동속도, 지상이동방향, 시간, 초기화 시간, 경로이탈 오차, 수평위치 오차, 수직위치 오차, 지연 시간, 절대 수직 및 수평 위치 정확도, 상대 수직 및 수평 위치 정확도, 단기 동적 정확도, 장기 동적 정확도, U턴 정확도에 대한 정의를 해두었음.
 - 시험사항에 대해서는 일반사항, 수평위치 측정 시험 및 동적 신호 재수신 시험에 대해서 정의해두었음.
 - GPS의 성능시험을 수행하기 전 기본적으로 수행하여야 하는 일반사항은 총 6가지고 있음. 이동경로는 최소한 두 개의 직선 구간과 U턴 구간을 포함해야 하며, 직진 구간은 최소 90 m이어야 함. 한국의 지리적 위치를 고려하여 진북에서 35°에서 55° 사이에 위치하여야 함. U턴 구간은 5 m에서 10 m 사이의 일정한 선회 반경으로 180° 선회해야 하고, 양쪽의 직진 구간과 바로 연결되어야 함. 주행 경로의 고도 변화는 1 m를 넘지 않아야 하며, 위치인식장치 안테나 높이에서 수평면과 10° 이상의 높이에는 위성 신호를 방해하거나 차단하는 장

애플이 시험 경로의 어떤 지점에서 보이지 않아야 함. 다중 경로 간섭을 유발하는 금속 또는 기타 표면은 이동경로의 50 m 이내에 없어야 하며 경로 위치와 형상은 정확하게 반복할 수 있도록 적절하게 세부 사항을 문서화해야 함. 초기화 시간이 시작되기 전에 위치인식장치의 모든 펌웨어 및 사용자 구성 설정을 기본 값으로 재설정해야 함. 이 재설정 후에 사용자가 구성할 수 있는 설정을 변경할 수 있음. 위의 사항들은 초기화 기간 전에 이루어져야 하고 전체 시험 중 사용자 설정이 변경되어서는 안 됨. 모든 장치 설정은 명시적으로 문서화되어야 함. 항법데이터기록(NDR)은 위치인식장치가 지원하는 최대 속도로 기록되어야 하며, 최소한 날짜, 시간, 위치, 지오이드 분리, 속도, 지상 경로, 위성 수, 보정 상태 및 위성배치형상을 포함해야 함. 모든 수신기 출력은 명확하게 기술되고 문서화되어야 함. 또한 위치인식장치 출력 포트와 데이터 통신 프로토콜도 명확하게 문서화되어야 함. 기준항법장치는 이동경로를 따르는 시험 위치인식장치보다 적어도 한 자릿수(10배) 이상 정확한 기준항법데이터를 생성하기에 충분한 절대 위치정확도와 데이터 출력 속도를 가져야 함. 기준항법데이터는 위치인식장치 출력과 ± 1 m/s의 편차로 동기화되어야 함. 기준항법장치의 사양과 실제 이동경로를 계산하기 위해 사용된 보간법이나 다른 계산 기법이 명확하게 문서화되어야 함. 기준측정장치는 위성기반 장비에 국한되지 않음. 비고정식 경로에서 시험을 수행할 때, 시험 경로는 탑재한 차량이 통과할 때마다 1 m 미만의 편차로 반복되어야 함. 모든 시험 동안 독립적인 도구가 실제(예측되지 않은) 위성 신호와 시험 위치 및 시간에 대한 위성 가시성, 구성 및 신호 품질 등의 배열 매개변수를 기록하는 데 사용되어야 함. 중요한 매개변수의 그래프 외에도 보고서는 수치 매개변수에 대한 평균, 최소 및 최대 값을 포함함. 동적 신호 재수신 시험을 수행할 때, 위치인식장치의 신호 손실은 위성 신호를 차단하기 위해 금속 하우징으로 수신기의 안테나를 덮거나 안테나부터 수신기까지 연결선에서 안전한 부분에 삽입된 최소 60 dB의 스위치 감쇠기를 사용하여 시뮬레이션 해야 함. 시험 주행 동안 수신기는 시험 경로 주위를 계속 움직여야 함. 한 방향(시계 방향)과 하나의 속도(1.0 m/s)만으로 주행되어야 함. 신호 차단은 전체 180° U턴(전형적인 새머리 주행 상황) 동안 발생함. 신호 차단 후, 위치인식장치가 유효한 항법데이터기록을 전송하기 시작한 후 U턴 구간을 통해 다음 횡단 구간에서 후속 차단 시험이 시작됨. 첫 번째 신호 차단 시험이 시작될 때 시험 주행을 시작됨. 각각의 시험 주행은 1시간 동안 지속되고 3시간 이내 중단되어야 함. 13시간 이내에 세 번의 시험 주행을 완료하여야 함.

- 수평위치 측정시험은 총 3가지에 대해서 정의되어 있음. 위치인식장치의 초기화 시간은 위치인식장치 제조업체가 권장하는 사항을 준수하여야 함. 시험 동안에 사용된 실제 초기화 시간은 최소 5분 단위로 보고되어야 함. 위치인식장치는 초기화 시간 동안 고정하여야 함. 각 시험 주행은 시작과 끝날 때의 날짜와 시간이 기록되어야 함. 시험 주행은 1시간 단위로 수행되어야 함. 각 시험 주행 동안, 위치인식장치는 단일 속도와 방향으로 이동경로 주변을 계속해서 주행해야 함. 시험 주행은 (0.1 ± 0.05) m/s, (2.5 ± 0.2) m/s 및 (5.0 ± 0.2) m/s의 주행 속도로 수행되어야 함. 가장 낮은 주행 속도에서는 할당된 시간 내의 직진 구간에서 충분한 데이터 수집을 보장하기 위해 직진 구간 사이에서 교대로 수신기를 가속하는 것이 허용됨. 속도와 방향의 각 조합으로 4회씩 총 24회의 시험을 실시해야 함. 모든 시험 주행은 25시간 이내 종료해야 함(각 시험 주행 사

- 이 시험장비 또는 차량의 조정이나 관리를 위해 몇 분은 허용 가능함).
- 동적 신호 재수신 시험은 총 2가지 항목에 대해서 정의되어 있음. 동적 신호 재수신 시험의 목적은 위치인식장치가 신호가 손실된 후 신호를 다시 수신하고 항법데이터기록을 전송하는 기능을 평가하는 것임. 농업에서는 농경지 모서리에서 신호손실이 자주 발생하므로 이동경로의 선회 구간에서 이 시험을 수행하여야 함.
 - 계산 방법과 보고서 작성방법에 대해서 정의되어 있음. 시험의 유효성을 인정하기 위해, 시험 중에 수집된 데이터 집합에는 데이터 샘플링 속도를 기준으로 예상되는 전체 항법데이터기록의 최소 75 %가 수집되어야 함. 시행주행 측정 시험 방법에 명시된 허용 오차를 벗어난 속도로 계측된 항법데이터기록은 차후 분석에서 사용되지 않아야 함. 각 시험 보고서에는 부호가 있는 오차 추정치의 측정 분포(그래픽 및/또는 표 형식)가 포함되어야 함. 주어진 오차 분포와 관련될 수 있는 방향의 중요성을 결정하기 위해 편차의 존재에 대한 통계 분석을 수행할 수 있음. 부호가 없는 오차 분포를 사용하여 중위수, 95 % 및 최대 오차를 보고해야 함. 오차 요약에 덧붙여, 각 시험 보고서는 위에 언급된 시험관련 사항과 다음의 내용을 포함함.
 - a) 시험 시설 및 절차에 대한 상세한 설명 또는 참조
 - b) 시험 중에 사용된 위치인식장치(모델 및 일련 번호 포함) 및 설정에 대한 설명
 - c) 각 시험 주행의 출발과 도착에 해당하는 시간(2.1.8)
 - d) 위성 및 차이 보정 장치 매개변수
 - e) 평균 태양 흑점 수로 측정된 태양 활동
 - f) 결과에 영향을 미칠 수 있는 시험의 기타 조건에 관한 관측
 - 모든 선형 거리 및 오차는 부속서 A에 열거된 방정식을 사용하여 계산되어야 하며, 다른 데이터 투영을 위해 사용하여 발생할 수 있는 위치 편차를 제거해야 함. 시험 운영자는 부호 있는 오차 추정의 방향을 구별하기 위해 일관된 부호 규정을 선택하여야 함. 절대 동적정확도는 모든 부호가 있는 수평위치오차의 평균과 표준편차의 합으로 나타내어야 함($\bar{x}+S_x$). 절대 수직위치정확도는 모든 부호가 있는 수직위치오차의 평균과 표준편차의 합으로 나타내어야 함($\bar{x}+S_x$). 상대 수직위치정확도는 경로 위 모든 부호가 있는 수직위치오차의 표준편차로 나타내어야 함. 단기 동적정확도는 각 유효한 시간대에서 확인된 데이터의 경로이탈오차의 표준편차의 기하 평균 두 배의 제곱근으로 표시해야 함. 각 시험 주행의 데이터는 15분씩 겹치지 않은 4개의 시간대로 구분되어야 함. 각 시간대에서 이동경로의 직진 구간 중 중앙 50 m 부분에 해당하는 항법데이터기록 전체를 식별해야 함. 확인된 항법데이터기록수가 이동경로 데이터 속도에 따라 예상되는 총 항법데이터기록 수보다 적어도 25 % 이상이고, 시험 시간대에서 시작 30초 이내에 최소 4개 지점과 마지막 30초 이내에 최소 4개 지점이 확인되었다면, 그 시간대는 유효한 것으로 간주하고 통과오차 계산에 사용됨. 유효한 시험을 위해서는 속도와 방향이 결합된 최소 9개의 유효한 시간대가 확인되어야 함. 장기 교차경로 정확도는 직진 구간의 중앙 50 m 부분에 해당하는 모든 항법데이터기록의 경로이탈오차의 평균과 표준편차를 합한 값의 두 배의 제곱근으로 표시되어야 함[$\sqrt{2}(\bar{x}+S_x)$]. U턴 정확도는 U턴 구간과 선회 후 다음 직진

구간의 처음 20 m에 해당하는 모든 경로이탈오차의 평균과 표준편차를 합한 값의 두 배의 제곱근으로 표시되어야 함[$\sqrt{2(\bar{x}+S_x)}$]. 위성 신호의 재수신과 첫 번째 유효 항법데이터기록과 출력 사이의 경과 시간이 기록되어야 함. 경로이탈 오차의 평균과 표준편차의 합은 첫 번째 유효 항법데이터기록을 전송한 직후 발생한 직진 구간의 연속 5개의 10 m 구간에 해당하는 모든 항법데이터기록으로부터 개별적으로 결정되어야 함. 지상이동경로 정확도는 모든 유효 항법데이터기록의 경로 오차 평균과 표준편차의 합으로 표시함($\bar{x}+S_x$). 이동경로 정확도는 직진과 선회 구간을 나누어 보고하여야 함. 이동방향 지연시간은 중간과 최고 속도에서 수행된 시험 중 U턴 구간에서 발생한 모든 유용한 항법데이터기록의 평균 지연시간으로 나타냄. 각 항법데이터기록에서 지연시간을 계산하기 위하여 실제 이동경로(TC)를 따라서 항법데이터기록에 의해 주어진 이동방향이 정확하다면 이동방향과 반대방향에 가상 점을 정함. 지연시간은 수신기가 해당 가상 점에서 항법데이터기록의 실제 위치까지 이동하는 데 필요한 시간으로 측정하여야 함. 속도 정확도는 모든 유효 항법데이터기록의 속도 오차의 평균과 표준편차 합으로 표시하여야 함($\bar{x}+S_x$). 속도 정확도는 직진과 선회 구간을 나누어 보고하여야 함. 지연시간은 해당하는 신호의 수신과 항법데이터기록의 첫 문자 출력 간에 경과된 시간[1초당 펄스 수(PPS)로 표시 — 초의 시작을 매우 정밀하게 알리는 전기신호]으로 표현함.

- 다음 관계식은 오차 및 정확도 계산을 위해 항법데이터기록을 국지 직교 좌표 장치로 지리적 좌표를 변환하기 위하여 사용하여야 함.

$$F_{lon} = \frac{\pi}{180^\circ} \left(\frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} + h \right) \cos \varphi$$

$$F_{lat} = \frac{\pi}{180^\circ} \left(\frac{a^2 b^2}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} + h \right)$$

여기에서 Flat, Flon : 항법데이터기록의 위도 및 경도 구성요소를 미터 단위 직교 좌표로 변환하는 데 사용할 수 있는 위치별 변환 계수(m/degree)

j : 시험장의 위도 위치로 도(degree)로 표시하고, 시험자가 선택할 수 있지만 시험 경로의 어떤 지점에서든 1000 m 이내에 위치해야 함.

h : 타원체 위의 시험 경로의 평균 높이

a : 타원체의 장반경(단위: m)

b : 타원체의 단반경(semi-minor axis)(단위: m)

표 A.1은 테스트 중에 사용할 수 있는 지리 정보 데이터에 대한 a 및 b 값임.

표 A.1 — 지리 정보 데이터에 대한 a 및 b 값

타원체	범위	a m	b m
IERS Conventions(2003) ^a	EU	6 378 137	6 356 751.858 0

GRS-80 ^a	Galileo	6 378 137	6 356 752 314 1
WGS 84 ^c	GPS	6 378 137	6 356 752.314 2
PZ-90.20 ^d	GLONASS	6 378 136	6 356 751.361 8
^a International Earth Rotation and Reference Systems Service(2003)			
^b Geodetic Reference System 1980			
^c World Geodetic System(1984)			
^d Geodetic system used in GLONASS			

㉔ KS B ISO 12188-2을 요약하며 아래와 같이 정리됨.

- 해당 표준은 농업용 차량의 성능을 평가하고 보고하는 절차를 규정하고 있으며, 직선 경로를 따라 이동하는 동안의 자동 조향 장치에 대한 성능평가를 수행하기 위한 내용들에 대해서 정의하였음.
- 용어들에 대한 정의는 총 15개에 대한 정의를 하고 있음. 자동유도차량장치, 차량대표점, 시험경로, 시험경로 구간, 추종 센서, 시험 주행, 전체 시험, A-B 라인, 운전자, 상대직교경로오차, 재통과 시간, 통과 오차, 장기유도오차.
- 시험사항에 대해서는 일반사항, 수평위치 측정 시험 및 동적 신호 재수신 시험에 대해서 정의해두었음. 시험경로는 콘크리트 포장 노면이어야 함. 농용 포장 표면과 같이 콘크리트 노면이 아닌 대체 노면인 경우에도 시험을 진행할 수 있지만 시험 보고서에 명확하게 기술해야 함. 시험경로의 위치와 형상은 반복이 가능하도록 적절한 세부 사항들을 기록하여 문서화해야 하며, 경로는 1 m 이하의 높이 변화만을 허용함. 수평선보다 10도 이상 높은 곳에 위치한 위치인식장치 안테나의 높이에서 시험경로의 어떤 지점을 보든 위성 신호를 방해하거나 차단할 수 있는 장애물이 없어야 함. 이 경로에서는 50 m 이내에 다중 경로의 간섭을 일으킬 수 있는 금속 또는 기타 표면이 없어야 함. 시험경로는 하나 또는 그 이상의 시험경로 구간을 포함해야 함. 시험경로 배치의 시험 대상 자동유도차량장치가 시험 속도와 “시험경로” 방향으로 각기 지정된 시험경로 구간을 출입할 수 있도록 하여야 함. 시험경로에서는 전체 시험 주행 시간에 대해 시험경로 구간을 통과하는 시간 비율을 최대화하기 위해서 마지막 구간에서 고속 회전할 수 있어야 함. 각각의 시험경로 구간은 최소 100 m 길이로 해야 하며, 가급적 진북으로부터 35도에서 55도 사이에 위치하여야 함. 추종/추적센서로 받은 측정값은 각 시험경로 구간을 따라 상대직교경로오차를 결정하기에 충분해야 함. 그리고 추종/추적센서 사양과 교정 절차를 참조할 수 있도록 시험보고서에 기입해야 함. 가장 대표적인 자동유도차량장치(AGVS) 옵션을 제조사가 선택할 수 있도록 차량을 선택해야 함. 모든 차량에 대해, 실제 필드 작업 중 건너뛰거나 중첩된 양이 추정된 주행유도오차와 관계가 있도록 차량대표점이 선택되어야 함. 달리 명시되어 있지 않는 한, 차량대표점은 3점 히치에 작업기가 장착되어 사용되는 트랙터의 후륜 사이의 지점, 견인형 작업기가 장착된 트랙터의 드로우 바 피벗 점, 자주식 분무기의 붐 중간 지점에서 바로 아래에 위치한 지점, 그리고 콤바인 전륜의 앞쪽으로 명시된 거리의 지점으로 함. 시험을 하기 전에, 자동유도차량(AGS)의 모든 구성요소가 올바르게 설치되어야 함. 모든 펌웨어 및 사용자가 구성할 수 있는 설정은 기본값으로 재설정하여야 함. 사용자가 구성할 수 있는 설정 변경은 위의 재설정 과정 후 변경이 허용되며, 초기화 기간 전에 변경한 후 전체 시험 중에는 변경하지 않아야 함. 수정된 모든 설정들에 대해서는 명확하게 문서화해야 함. 제조사의 권장 사항과 모든 것이 일치하도록 제조업체의 사용 설명서 및 기타 사용자용 지침을 확인해야 함. 이러한

확인 은 농업용 차량 및 자동유도/안내장치를 포함한 자동유도차량장치의 모든 구성요소에 적용됨. 이러한 권장 사항과 상당한 차이가 있는 경우(예: 차이 보정 서비스의 정확도 감소, 차량 안정성 저하, 권장하지 않은 계측 설정 및 기타 특별 관심 분야) 별도의 전체 시험이 필요함. 다음 내용은 시험 주행 순서 설명임.

- A-B 라인은 시험경로를 따라 시험 차량을 수동으로 주행하거나, 명시된 지리좌표를 입력하는 첫 번째 시험 주행 순서보다 적어도 1시간 전에 설정해야 함. A 점과 B점은 가장 긴 시험경로 구간의 대략적인 시작점과 끝점을 나타냄.
- 주어진 주행 속도에서 진행된 각각의 전체 시험은 연이틀 동안 GNSS 배치 구성이 다른 상태에서 진행된 최소 3회의 시험 주행 순서로 구성됨. 각 시험 주행 순서의 시작 시간은 무작위로 지정함. GNSS 위치인식의 다양한 품질을 보증하기 위하여 연속되는 시험 주행 순서 사이에는 1시간 이상 차이를 둬. 또한 위성 궤도주기[GPS의 경우, (24 ± 1) 시간]로 인해 GNSS 배치가 반복되는 2회의 시험 주행 순서는 수행하지 않음. 처음과 마지막 시험 주행 순서 사이에는 24시간 이상의 시간이 필요함.
- 각 시험 주행 순서는 통과 오차 값을 계산하는 데 사용할 수 있는 한 쌍의 차량대표점 위치에 대한 재통과 시간의 분포를 균등하게 분배할 수 있는 시험 주행 조합으로 구성해야 함. 이 시험은 적어도 7.5분 동안 한 방향으로 이동하고 선회 후 7.5분을 출발점으로 다시 이동해야 함. 반대 방향으로 이동할 때, 기록된 차량대표점 위치 간의 수평 거리는 시험경로 구간의 모든 불연속 부분에 대한 상대직교경로오차를 대표함. 선회 후 첫 번째 구간 통과를 반복하면 15분 이내 재통과 시간의 모든 값에 대해 두 개의 개별적인 통과 오차를 추정할 수 있어야 함.
- 시험경로가 1개 이상의 시험경로 구간을 가지고 있거나 또는 시험 주行的 상당 부분이 지정된 시험경로 구간 밖에서 이루어지는 경우, 유효한 차량대표점 위치에 대한 재통과 시간 분포는 25 % 데이터 공백(해당 데이터가 없는 재통과 시간)을 초과하지 않아야 하며, 12분에서 15분 사이에는 그러한 공백이 허용되지 않으므로 더 긴 재통과 시간으로 인하여 더 큰 오차가 나타날 수 있음.
- 각 시험 주행 순서는 일정한 엔진 속도(포장 작업을 수행할 때와 같이)로 설정되는 일정한 주행 속도에서 수행되어야 함. 시험 데이터가 기록되는 시험경로 구간을 이동하는 동안 운전자의 조작은 허용되지 않음. 트랙터의 경우, 저속 [(0.1 ± 0.05) m/s 또는 최저 권장 속도], 중속 [(2.5 ± 0.2) m/s], 그리고 고속 [(5 ± 0.2) m/s]의 세 가지 속도 사용을 권장함. 자율 조향 모드가 설정된 상태에서 0.1 m/s로 주행할 수 없을 경우, 가장 낮은 주행 속도로 주행하고 해당 속도를 보고서에 기입해야 함. 선택사양인 역방향 이동 뿐 아니라 각 주행 속도에 해당하는 시험 데이터는 독립적으로 처리되어야 함. 중속은 콤파인에, 고속은 자주식 분무기에 권장함.
- 상대 차량대표점 위치 측정은 적어도 10 Hz의 샘플링 속도를 갖는 추종/추적 센서에 의해 측정되어야 함. 지정된 시험경로 구간 내의 모든 유효 데이터 기록(예: 잘못된 추종 센서 측정 제외)은 해당 상대 상대직교경로오차 추정치(통과 및 장기유도오차)를 계산하는 데 사용해야 함. 진입하기 전에 정상적인 작동을 위해서 최소한 10초가 허용되어야 함.

- 시험보고서 작성 방법 및 계산 법에 대해서는 총 2가지로 정의하고 있음. 수집된 자료에 근거한 시험 보고서는 모든 시험 대상 자동유도차량장치에 대해 작성되어야 함. 각 차량, 위치인식장치, 차이 보정 서비스, 주행 속도와/또는 자동유도차량장치 성능에 영향을 줄 수 있는 기타 옵션에 대한 별도의 시험 보고서가 필요함.
- 모든 시험 보고서는 시험 대상 제품의 주요 정보와 시험 시간과 장소를 기재해야 함. 최소한 다음 정보가 포함되어야 함.
 - 시험 시설 및 기관 목록: 이름, 시험경로(위치 및 형상) 설명 및 추종 센서
 - 시험 AGS 정보: AGS의 제조사 및 상표, AGS의 일부로 설치된 주요 구성요소 목록(시험한 사진 포함), 펌웨어 버전 번호 및 고객에게 출시 날짜, 위치인식장치의 상표 및 차이 보정 서비스 설명, 장치 성능에 영향을 줄 수 있는 위치인식장치 및/또는 제어 장치 설정
 - 시험 차량에 대한 정보: 시험 중 사용된 차량에 대한 제조사, 모델 및 구성, 타이어 형식, 캡 서스펜션과 자동 안내 성능에 영향을 미치는 기타 차량 사양(예: 주요 차량 치수 및 지정된 차량대표점의 위치, 엔진 RPM)
 - 시험조건에 대한 정보: 각 시험 주행 시 날짜와 시간, 각 시험 주행 순서 중 트랙터를 안내하는 위치인식장치의 수평 위치인식 정밀도 저하율 값을 포함한 관측된 위성의 수, 시야에 있는 수평 위치인식 정밀도 저하율 값을 포함한 사용가능한 인공위성의 수(GNSS 성능 품질을 저하시키는 현상의 표시가 있음), 시험 중 기상조건(온도, 습도, 지표 조건), 평균 흑점 수로 정량화된 태양 활동, 유효한 데이터 포인트(표시된 시험경로 구간 내에서)에 대한 실제 이동 속도 분포.
- 오작동, 잘못된 시험 주행 순서 및 시험 중 발생하는 기타 비정상 상황에 대한 내용 기록

AGS 성능은 통과에 대한 부호가 있는 것과 없는 것의 분포와 추종 센서를 사용하여 얻어진 장기유도오차를 통해 정량화되어야 함. 부호가 있는 오차 추정치는 차량대표점의 임의의 위치와 이전 시험 주행과는 반대 방향으로 주행 중 기록된 해당 차량대표점의 위치 사이의 최단 수평 거리로 계산해야 함(그림 1 참조). 양의 오차는 후행 통과 점의 차량대표점이 이전 통과 트랙의 오른쪽에 있음을 의미함(후행 통과 점을 기반으로 함).
- 통과 및 장기유도오차는 방향성 편차(평균)와 변동성(표준 편차)과 함께 측정된 부호가 있는 분포로 기록되어야 함. 또한 통과 및 장기유도오차는 절대(부호가 없는) 오차의 누적 분포는 이 분포의 50 %, 95 % 및 최댓값이 같이 기록되어야 함. 부호가 없는 오차 누적 분포의 95 % 값은 핵심 품질 지표로서 강조되어야 함.
- 유효한 통과 오차 추정치를 계산하기 위해 사용된 해당 차량대표점이 기록 위치에 대한 재통과시간의 분포가 보고되어야 함.

㉔ 자율주행 트랙터 성능검정을 위한 가이드 라인 개발

㉔ 자율주행 트랙터의 작업 능력 향상 성능 검정

㉔ 위성기반 위치인식 장치의 동적 시험 평가 방법

- 자율주행 트랙터의 작업 능력 향상에 대한 성능 점검을 수행하기 위해서는 GPS와 같은 GNSS (Global Navigation Satellite System)을 기반으로 하는 위치 시스템 및 항법 장치들의 위치 정확도를 평가하는 방법에 대한 수립이 필요함.
- 평가 방법을 수립하기 위해서는 평가에 사용되는 용어들에 대한 정의가 필요함.
- 기존에 수집 된 문헌들을 종합하였을 때 아래와 같이 정의될 수 있음.

· 전장비

작업을 하는데 필요한 모든 장비를 부착한 상태.

· 경로추종

시험기대의 현재 위치에서 다음 위치로 이동하기 위하여 자세, 방향, 속도 등을 제어하는 것.

· 위치인식장치(GNSS : Global Navigation Satellite System)

위성기반 무선허법신호를 이용하여 안테나 중심점의 지리좌표 위치를 실시간으로 결정하고 알려주는 장치.

· 주행경로

포장주행궤적을 설정하기 위하여 대부분의 자동유도장치에서 사용하는 두 임의의 지점 A와 B를 통과하는 가상의 직선.

· 조종자

시험기대를 작동하거나 감시하는 사람.

· 외부환경측정 및 기록 장치

시험 중 온도, 습도, 풍속 등의 외부환경을 측정 및 기록할 수 있는 장치.

· 차량대표점

자동유도차량의 위치를 대표하는 다음의 고정점.

· 시험종료지점

시험기대가 시험경로 말단에 도달하거나 완전히 정지한 지점.

- 시험 항목에 대해서는 아래와 같이 정의될 수 있음.

· 구조조사

· 성능시험

가) 직진경로 추종 성능 시험

나) 속도제어 성능 시험

· 조작성 난이도시험

· 안전성시험

- 시험조건에 대해서는 아래와 같이 정의될 수 있음.

· 시험기대의 정비 및 준비운전

a) 시험에 사용되는 시험기대는 신제품으로서 충분히 길들임 운전을 실시한 것으로 간주하며 시험 전에 정상상태로 정비하고 준비운전은 2시간 이내로 함.

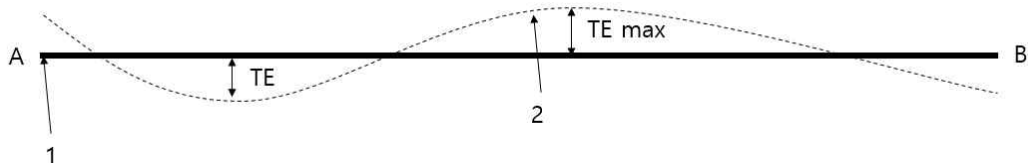
b) 모든 펌웨어 및 신청자가 구성할 수 있는 설정은 기본 값으로 재설정 하여야 함.

c) 사용자가 구성할 수 있는 설정 변경은 위의 재설정 과정 후 변경이 허용되며, 변경한 후 전체 시험 중에는 변경하지 않아야 함.

- d) 수정된 모든 설정들에 대해서는 정보를 제공 하여야 함.
- 연료, 윤활유 및 배터리
 - 시험에 사용하는 연료, 윤활유 및 배터리는 시판되고 있는 것으로 하고 시험기대 제조자가 규격 및 성능설명서에서 정하는 것으로 함.
- 운전조건
 - 대기압은 96.6 kPa 보다 낮지 않은 상태에서 평지의 시험포장에서 수행함.
- 시험경로
 - 평탄한 콘크리트 노면에서 진행함. 경로는 구배 없이 평탄하여야 하며, 위치인식장치 안테나의 높이에서 시험 경로의 어떤 지점을 보든 위성 신호를 방해하거나 차단할 수 있는 장애물이 없어야 함. 시험 주행 구간은 100 m 이상의 길이로 구성되어있어야 함.
- 성능시험항목은 아래와 같이 정의될 수 있음.
 - 직진경로 추종 성능 시험은 아래 조건내에서 수행되어야 함.
 - a) 주행시험은 야외시험장에서 수행함.
 - b) 시험구간은 직선거리 100 m 이상으로 함.
 - c) 주행경로의 고도변화는 1 m 이내로 함.
 - d) 경로로부터 반경 50 m 이내에 다중 경로 간섭을 유발하는 금속 등이 없어야 함.
 - e) 시험경로를 따라 시험기대를 수동으로 주행하거나, 명시된 지리좌표를 입력하며 첫 번째 시험 주행 전에 설정해야함.
 - f) 비상시 정지를 위한 조작 이외에 시험 중 조종자의 조작은 허용하지 않음.
 - 측정 및 조사항목은 아래와 같이 정의 될 수 있음.
 - ① 경로이탈 오차의 평균
 - ② 경로이탈 오차의 표준편차
 - ③ 경로이탈 오차의 최대값
 - ④ 경로이탈 오차의 누적분포 50%, 95% 값
 - ⑤ 주행속도
 - 시험방법은 아래와 같이 정의될 수 있음.
 - ① A-B 라인은 시험경로를 따라 시험 차량을 수동으로 주행하거나, 명시된 지리좌표를 입력하는 첫번째 시험 주행 순서보다 적어도 1시간 전에 설정해야 함. A점과 B점은 가장 긴 시험경로 구간의 대략적인 시작점과 끝점을 나타냄.
 - ② 시험경로를 수동으로 설정하는 기대는 A-B라인의 시작점에서 정지상태로 출발하며, 명시된 지리좌표를 입력하는 기대는 A-B라인 시작점 최소 20 m 전에서 주행을 시작하여 A-B라인의 시작점을 진입하여 종료지점까지 자율주행모드로 경로주행을 실시함. 단, 두가지 설정이 모두 가능한 기대는 두가지 방법으로 각각 수행함.
 - ③ 데이터 샘플링 속도는 10 Hz 이상으로 측정된 결과의 경로 이탈오차 평균 값 및 표준편차를 산출함.
 - ④ 주행은 저·중·고속으로 각각 3번 실시하고 연속되는 시험 주행 순서 사이에는 1시간 이상 차이를 두며, 처음과 마지막 시험 주행 순서 사이에는 24시간 이상의 시간둔 주행 데이터를 기반으로 경로이탈 오차의 평균, 경로이

탈 오차의 표준편차, 경로이탈 오차의 누적분포 50%, 95% 값 및 최대값을 산출함.

⑤ 본 시험방법에서 기술하지 않은 사항은 ISO-12188-2에 따름.



· 속도제어 성능 시험은 아래와 같이 정의 될 수 있음.

가) 시험목적

이 시험은 자율주행 농업기계의 속도제어 오차를 확인 하는 것을 목적으로 함.

나) 시험조건

6-1-2.과 동일한 조건으로 직진경로 추종 성능 시험 중 속도데이터를 취득 함.

다) 측정 및 조사항목

자율주행 농업기계의 등속구간 속도

라) 시험방법

① 최소 1 m이상의 등 간격을 보유한 임의구간 50지점을 선정하여 순간 속도를 측정하여 다음식에 의해 산출함.

② 속도오차는 주행 속도별로 실시하며 속도별 3번 반복하여 산출된 속도오차 중 최대값으로 함.

$$V_e = \frac{V_m - V_s}{V_s} \times 100$$

여기서 V_e : 속도오차(%)

V_s : 설정 속도값 (m/s)

V_m : 측정 속도값 평균 (m/s)

- 조작의 난이도시험은 아래와 같이 정의될 수 있음.

· 시험목적

이 시험은 자율주행 시스템의 조작 및 취급의 난이를 확인하는데 목적이 있음.

· 시험조건

이 시험은 자율주행 시스템이 설치된 농업기계에 대하여 실시하며 시험장소는 시험소 내의 시험포장을 이용함.

- 측정 및 조사항목은 아래와 같이 정의될 수 있음.
 - 가) 자율주행 동작 및 해제 조작난이
 - 나) 비상정지 및 해제 조작난이
 - 다) 기타 시험이 필요하다고 인정되는 부위의 조작난이
- 시험방법
 - 시험자가 사용설명서에 의해 작업을 실시하면서 레버, 버튼, 스위치 등 조작장치에 대한 조작취급의 난이를 조사함.
- 안전성시험항목은 아래와 같이 정의될 수 있음.
 - 시험목적
 - 자율주행농업기계의 비상시 안전성을 확보 및 위험의 우려가 있는 부위에 대한 안전장치, 안전방호장치 및 안전표시 등을 확인하는데 있음.
 - 시험조건
 - a) 시험기대는 전장비 상태에서 신청자가 규격 및 성능설명서에서 제시한 상태로 함.
 - b) 주행시험은 야외시험장에서 수행함.
 - c) 시험경로를 따라 시험기대를 수동으로 주행하거나, 명시된 지리좌표를 입력하며 첫 번째 시험 주행 순서보다 적어도 1시간 전에 설정해야함.
 - d) 비상시 정지를 위한 조작 이외에 시험 중 조종자의 조작은 허용하지 않음.
 - e) 성능, 조작의 난이도시험 등을 완료한 후 안전장치 등을 조사함.
 - 측정 및 조사항목
 - a) 주행경로 이탈 긴급정지 및 경보장치
 - b) 1회 조작으로 정지할 수 있는 기능 또는 장치 유무

바. 위탁연구기관 2 (서울대학교)

㉞ 자율주행 경로생성 및 추종 개선 알고리즘 개발

㉠ 작업률 향상을 위한 경로생성 모듈 개선

㉡ 회경 경로 개선 모델

- 회경경로는 농지 경계를 따라 주행하는 직선 경로와 이를 잇는 모서리 선회로 구성.
- 2차년도에 개발된 회경 경로(그림 10X (좌))는 직진 동작으로만 모서리 선회를 수행하여 포장의 모서리 부근에 미경지 발생.
- 회경 경로생성 방식을 개선하여 작업률 하락의 문제점을 개선하고자 그림 10 (우)와 같이 후진이 포함된 경로를 설계함.

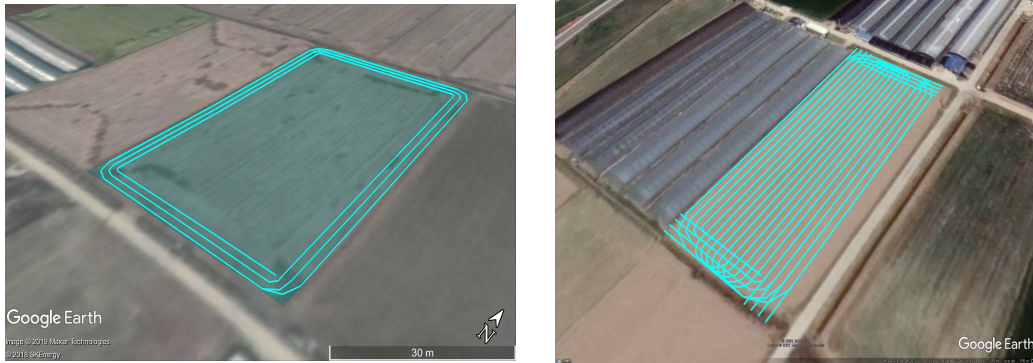


그림 746 회경 작업 경로 기존 (좌) 및 개선 (우)

- 그림 11X와 같이 설계된 경로에서 트랙터는 모서리 선회 진입 후 모서리의 각도와 트랙터 최소 선회 반경에 따라 식 1-5Y로 계산되는 추가적인 직진 경로를 주행하여 후진 시 다음 작업 열과의 오차를 최소화함.
- 모서리 선회 후 트랙터는 작업기가 농지 경계에 인접할 때까지 후진함으로써 포장의 모서리 부근 작업을 수행하게 됨.
- 개선된 회경 모델이 반영된 경로생성 모듈 펌웨어 업데이트.

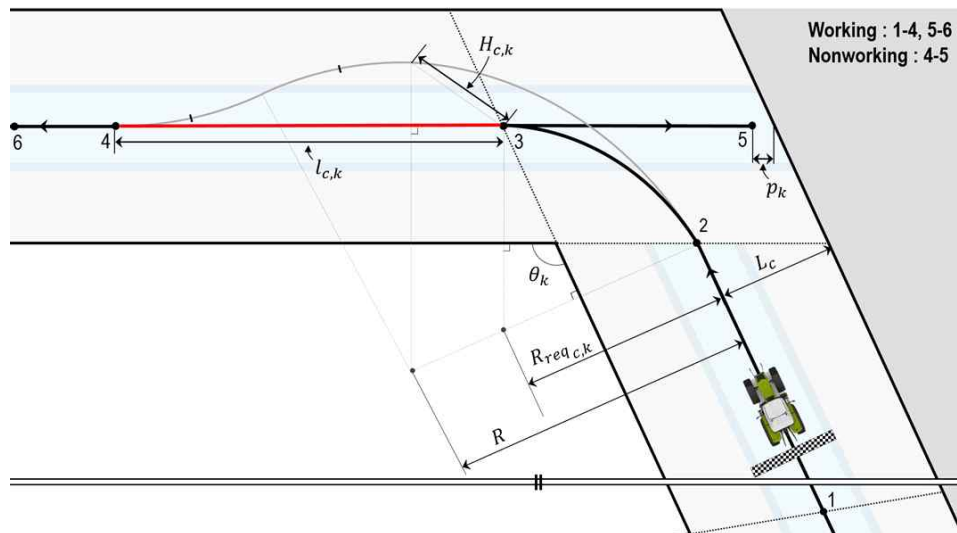


그림 747 후진을 포함한 회경 경로 설계 개념도

$$L_c = \{(n_h - c)(w - w_{0-init}) + 0.5w\}; c = \{1, 2, \dots, n_h\} \quad (1)$$

$$R_{req,c,k} = \tan(0.5\theta_k)L_c \csc(\theta_k) \sqrt{2 - 2\cos(\theta_k)}; k = \{1, 2, \dots, n_s\} \quad (2)$$

$$H_{c,k} = R \tan(0.5\theta_k) - L_c \csc(\theta_k) \sqrt{2 - 2\cos(\theta_k)} \quad (3)$$

$$l_{c,k} = \begin{cases} l_{look-ahead} (R - R_{req,c,k} \leq 0) \\ H_{c,k} \sin(0.5\theta_k) + \sqrt{4R \cos(0.5\theta_k) - H_{c,k} \cos^2(0.5\theta_k)} (R - R_{req,c,k} > 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$p_k = 0.5(w - w_{o-init})|\cot(\theta_k)| \quad (5)$$

where,

R is the minimum turning radius of the tractor (m)

w is the implement width (m)

w_{o-i} overlap length (m)

R_{req} is Required turning radius at the boundary corner (m)

$l_{c,k}$ is the alignment distance (m)

$l_{look-ahead}$ is Look-ahead distance (m)

θ is the corner angle of the field (rad)

n_h is Number of headland passes

㉔ 시뮬레이터를 활용한 기초성능 평가

- 서울대학교 자율주행 농기계 시뮬레이터를 활용하여 후진이 포함된 회경 경로의 추종 및 작업 성능 조사.
- 그림 3X와 같이 30도부터 150도까지 10도 간격으로 다양한 각도의 코너각 조건에서 경로를 생성하고 작업 구간에서의 측면변위를 측정.
- 실험 결과 (그림 4X 좌), 개선된 회경 경로생성 모델은 코너 각이 좁을수록 그리고 급격한 선회를 요구하는 안쪽 회경에서 더 긴 추가 직진 거리를 제공하여 후진 시에 트랙터가 다음 열과의 오차가 감소.
- 위와 같은 경로를 시뮬레이터가 추종한 결과, 그림 4X 우와 같이 30도부터 150도까지 10도 간격 회경 조건에서 7 cm이내의 측면변위가 측정되어 제시한 경로의 현장 적용 가능성을 확인함.

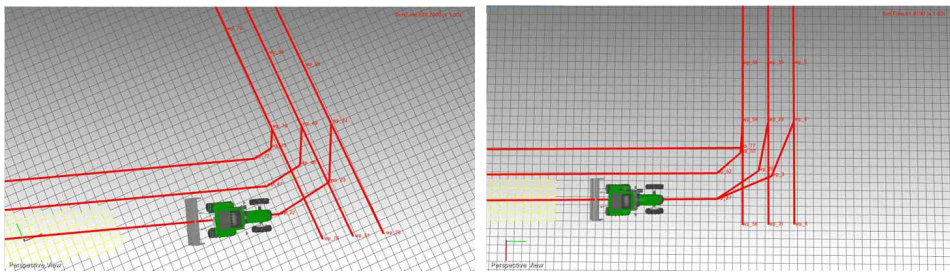


그림 748 시뮬레이션 환경에서 다양한 코너 각 조건의 회경 경로 예시 : 60도 (좌) & 90도 (우)

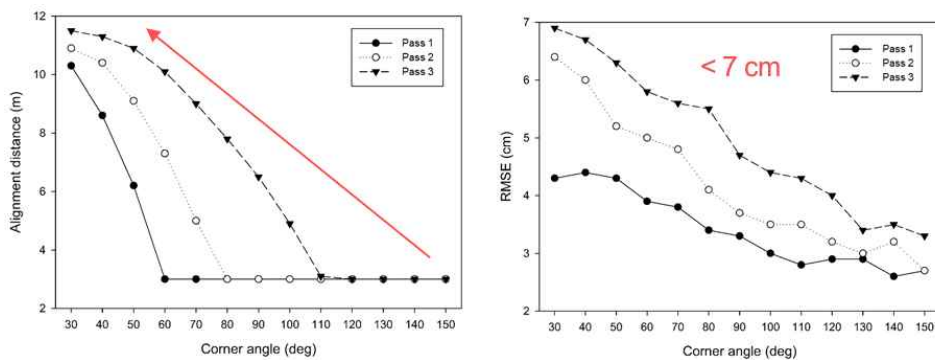


그림 749 다양한 코너 각에서의 추가 조정 거리 생성 결과 (좌)와 시뮬레이터 추종 결과 (우)

- 비교를 위해 개선 전후 경운 경로를 생성하고 시뮬레이션을 활용하여 자율작업을 수행.
- 실험 대상 포장은 국내 표준규격 사운 (100x40 m², 직사각형)
- 경로생성 결과 (표 1Y), 예상 작업 거리 및 시간은 각각 약 2분 30초와 88 m 증가 하였지만, 작업 율은 96.3 %에서 99.8 %로 거의 전 영역작업이 가능한 수준에 도달 할 수 있음을 확인하였다.
- 그림 5X는 시뮬레이션 작업 영역을 보여주는 결과로 후진이 포함된 개선된 회경 경로로 인해 농지 코너 부근에서의 작업성이 향상되었기에 도출된 결과.
- 새롭게 제안된 경운 경로의 기초성능평가 완료.

표 176 기존 경로와 개선된 경로의 성능지표 비교

	예상 소요 시간 (sec)	예상 작업 거리 (m)	작업률 (%)
기존 경로	2360.3	2202.9	96.3
회경 개선 경로	2514.2	2290.4	99.8

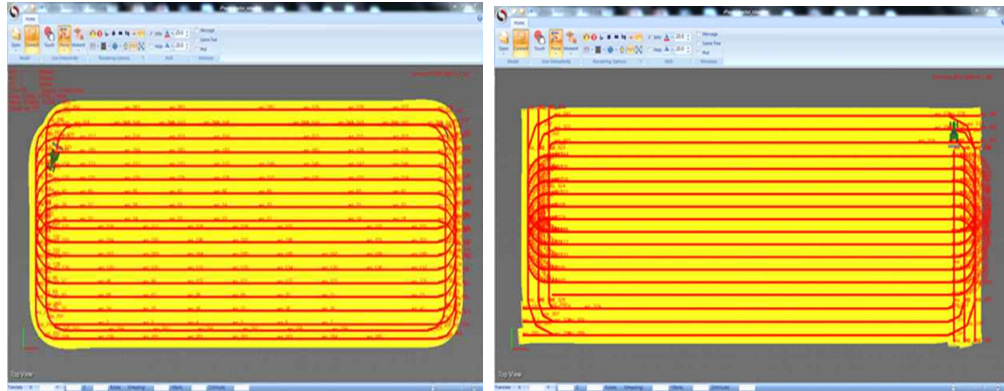


그림 750 시뮬레이션을 통한 기존 경로와 개선 경로 작업성 비교 결과

㉞ 사용자 편의성 향상을 위한 작업 시작점 선택기능 개선

㉟ 문제점 분석

- 기존의 경로생성 모듈은 작업 시작점의 위치가 포장경계점을 입력하는 순서에 영향을 받았으며, 사용자가 직접 선택할 수 없었음.
- 시작점을 선택할 수 없는 문제로 인해 자율주행 실행을 위해서는 작업 무작위로 생성되는 작업 시작점까지 운행해야 하는 불편함이 존재.

㊱ 작업 시작점 선택기능을 포함한 경로생성 모듈 업데이트

- 사용자 편의성을 개선하기 위해 UI 프로그램으로부터 사용자가 인접한 포장경계점을 클릭하면 이에 근접한 지점부터 자율주행이 시작할 수 있는 경로생성 개선 버전 모듈 수정 개발.
- 그림 6X는 사용 예시로, 그림 6X (상)에서 좌측의 포장 모서리 점을 사용자가 선택하게 되면 이에 상응하는 작업 경로가 자동으로 생성되며, 그림 6X(하)에서와같이 다른 포장경계점을 선택함에 따라 대응되는 작업 경로가 생성됨을 확인.

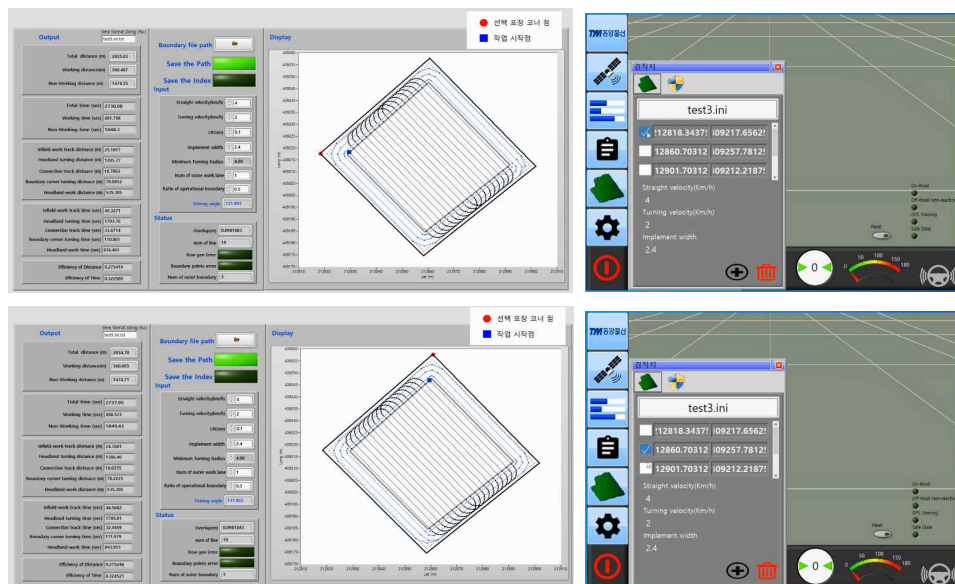


그림 751 사용자 편의성 향상을 위한 경로생성 모듈 개선 수정 버전 - 사용자 작업 시작점 선택기능

㉞ 자율주행 트랙터 경로생성 및 추종 알고리즘 현장 요인 및 신뢰성 평가

㉠ 자율주행 경로생성 및 추종 알고리즘 성능평가

㉡ 자율주행 경로생성 모듈

- 서울대 개발 자율주행 트랙터 경로생성 모듈은 **그림 7X**와 같음.
- 경로생성을 위한 입력 인자는 포장경계점 좌표, 작업폭, 트랙터 최소 선회 반경, 작업 및 선회 속도, 그리고 새머리 선회 방식이며 선택적으로 포장 내 주행 방향을 결정할 수 있음.
- 경로생성 모듈은 입력된 정보를 바탕으로 포장 내 경운 경로를 생성하며 waypoint 형태로 화면에 도시화함.
- 사용자 편의성 향상을 위해 예상 소요시간, 소요거리, 그리고 효율을 제공함.
- 생성된 Waypoint는 주행 및 작업 명령과 함께 Route data definite file (RDDF)로 저장됨 (**그림 8X**).

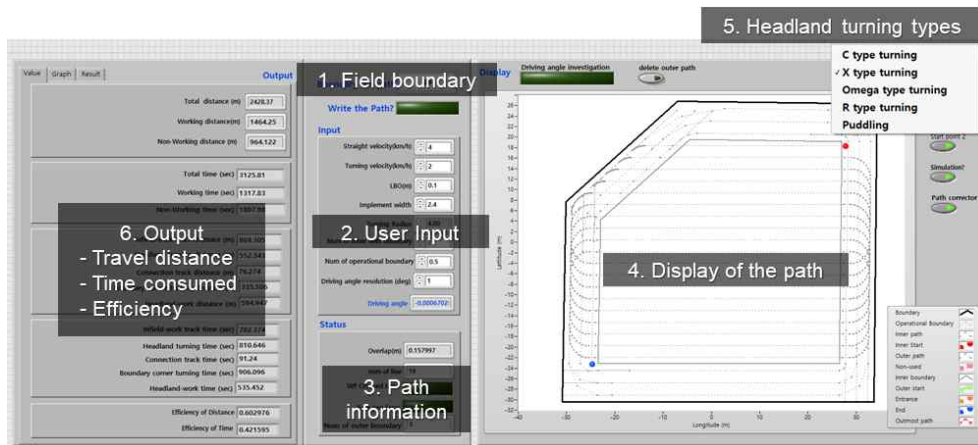


그림 752 자율주행 경로생성 모듈

Index	Latitude (m)	Longitude (m)	LBO (m)	Speed (km/h)	Implement
1	540648.8371451	195572.448126	0.6	4	1
2	540646.3864177	195570.717737	0.6	4	1
3	540644.5213563	195570.237512	0.3	2	0
.....
19	540634.4169852	195613.4234568	0.3	2	0
20	540631.7984187	195606.9820698	0.3	4	1

그림 753 주행 및 작업 명령 파일 (Route data definition file, RDDF) 예시

㉢ 자율주행 경로추종 모듈

- 서울대 자율주행 트랙터 경로추종 모듈은 **그림 9X**과 같이 구성됨.
- 트랙터 및 작업기 정보 (GNSS 안테나 설치 위치, GNSS 안테나와 작업기 간 거리)와 변수 (전방 주시거리 및 조향감도)를 사용자로부터 입력받음.
- 경로생성 모듈로부터 RDDF를 수신받아 기준경로로 지정.
- 주행 중 GNSS 센서로부터 수신되는 위치 정보를 활용하여 기준경로 내 차량의 목표 Waypoint를 산출하고, 각 지점에 도달에 필요한 속도 및 작업기 상하강 명령을 RDDF로부터 수신하여 차량에 전송함.
- GNSS로부터 수신되는 위치 및 방향각 정보와 기준경로 간 차이를 실시간으로 계산하고, Extended kinematic model (**그림 10X**) 기반의 주행 제어를 통해 조향각을 생성.
- 조향각을 생성하기 위한 수식은 **식 Y6**와 **Y7**과 같음.
- 불규칙한 노면을 주행하는 트랙터의 기울어짐 보상을 위해 IMU로부터 수신되는 Roll, Pitch 값과 GNSS 설치 위치를 활용하여 실시간 위치 보정.

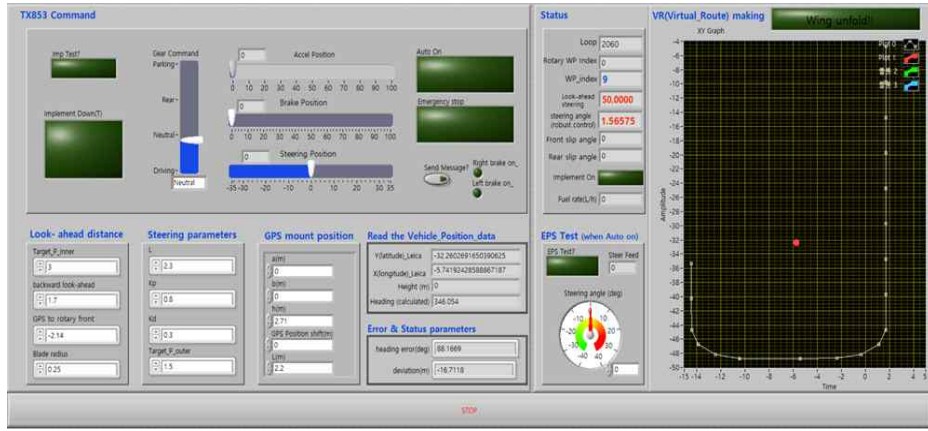


그림 754 자율주행 경로추종 모듈

$$f(y, \tilde{\theta}, \delta, \beta_f, \beta_r) = \begin{cases} \dot{y} = v \sin(\tilde{\theta} + \beta_r) \\ \dot{\tilde{\theta}} = v \cos \beta_r \frac{\tan(\delta + \beta_f) - \tan \beta_r}{L} \end{cases} \quad (Y6)$$

$$\delta(y, \tilde{\theta}, \beta_f, \beta_r) = \tan^{-1} \left\{ L \frac{(-K_p y - K_d \tan(\tilde{\theta} + \beta_r)) \cos^3(\tilde{\theta} + \beta_r)}{\cos \beta_r} + \tan \beta_r \right\} - \beta_f \quad (Y7)$$

where,

y is the lateral deviation of the tractor with respect to the reference path(m)

$\tilde{\theta}$ is the heading error of the tractor with respect to reference path (rad)

v is the forward velocity of the tractor (rad)

δ is the steering angle of the front wheel (rad)

L is the wheelbase of the tractor (m)

K_p is the proportional gain and K_d is the derivative gain

β_f and β_r and are the side slip angles of the front and rear wheels (rad)

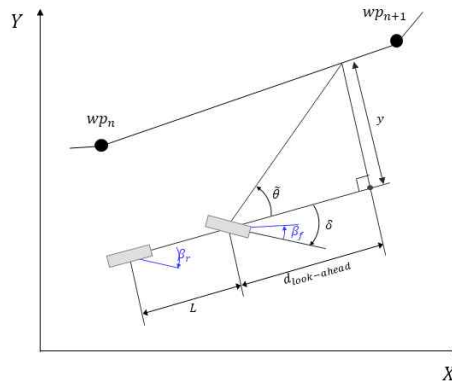


그림 755 경로 추종기 모델 : Extended kinematic model

㉔ 자율주행 트랙터 구성

- TYM(주)에서 생산 중인 80마력 TX803 트랙터 (그림 11X)에 자율주행 기능을 탑재, 작업기 가능하도록 경로생성 및 추종 제어기를 설계 및 시스템 통합 등을 수행하였으며, 제원은 표 2X과 같음.
- 자율주행 트랙터에 사용된 센서는 Novatel社 SPAN CPT모델 GNSS/INS Combined 시스템을 사용하여 알고리즘 검증에 위한 안정적인 위치 및 방향각 정보 취득이 가능함.
- cm급 정밀도 취득을 위해 국토지리정보원에서 제공하는 위성기준점 네트워크 RTK서비스를 활용하여 RTCM3.1 프로토콜을 따르는 보정 신호를 수신.
- 로터베이터 작업기는 작업폭 2.3 m, 경운 깊이 약 10 cm의 성우社 YJ220DXG모델을 장착하여 자율경운 작업이 수행되도록 구성함.



그림 756 자율주행 트랙터 실물 사진

표 177 TX803 제원

Brand	TYM
Model	TX803 (80ha)
Wheelbase	2.19 m
Length	3.93 m
Minimum turning radius	4 m
Weight	3460 kg
Transmission	24 forward and backward

㉔ 실험 방법 및 자율경운 작업 결과

- 충남 논산시 소재 농지 면적은 $97 \times 36 \text{ m}^2$ 의 무경운 농지에서 한 차례의 내경 및 회경 작업을 포함한 자율 전역 경운 작업 실시 (그림 12X).
- 농지의 각 경계점에 위치시켜 목표 포장정보 취득.
- 경로생성 모듈을 통해 경운 경로를 생성하고 RDDF형태로 정보 저장.
- 생성된 경로의 시작점에 트랙터를 위치시킨 후 자율주행 실행.
- 회경 작업을 포함한 트랙터가 정지하는 도착점까지 작업자의 개입 없이 경운 작업 완수.
- 자율주행 경로생성 및 추종 모듈에 설정된 기준경로와 작업기의 너비 정보를 기준으로 전체 작업면적을 산출하며, 자율주행 트랙터가 실제 주행한 경로와 작업기의 면적을 산출하여 미경지율 분석.



그림 757 실험 농지 - 충남 논산시 상월면 신충리 141-7 (97m × 37m)

- 실측 포장경계점 및 트랙터 제원 정보를 경로생성 모듈에 입력한 결과, 내부 왕복 경로 12열과 외부 회경 경로 3열이 생성됨.
- Intel i7-8086K CPU @ 4.00 GHz 탑재 PC 기준 생성시간 0.068초 소요.
- 예상 작업 거리는 2181.6 m, 예상 소요시간은 43.8 분 산출.
- 추종궤적 분석 결과 (그림 13X) 사람의 개입 없이 내부 및 외부를 포함한 전 영역 자율 경운 작업 수행이 가능함을 확인하였으며, 각 내부왕복 작업 열 별 추종 성능을 분석한 결과, 측면변위 7 cm 이내, 방향각 오차 1.3° 정확도로 로터베이터 자율경운 작업 수행 (그림 14X).
- 회경 경로 추종 결과, 측면변위 8cm 이내, 방향각 오차 1.5° 정확도로 자율경운 수행.

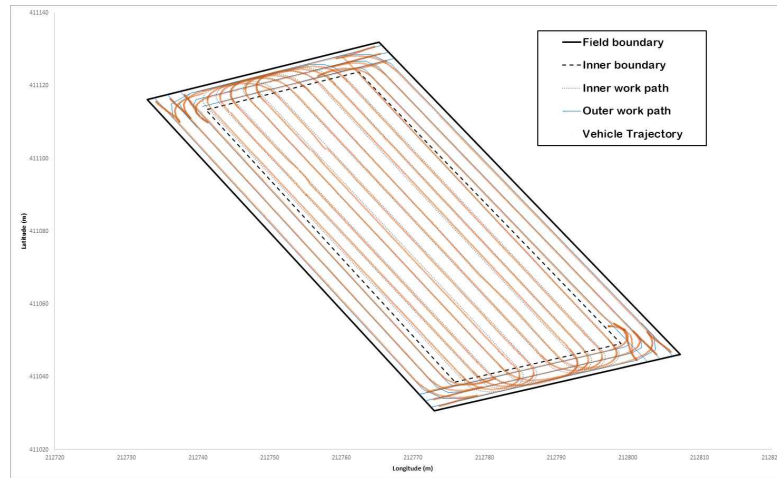


그림 758 목표 포장 생성 경로 및 자율경운 작업 추종궤적

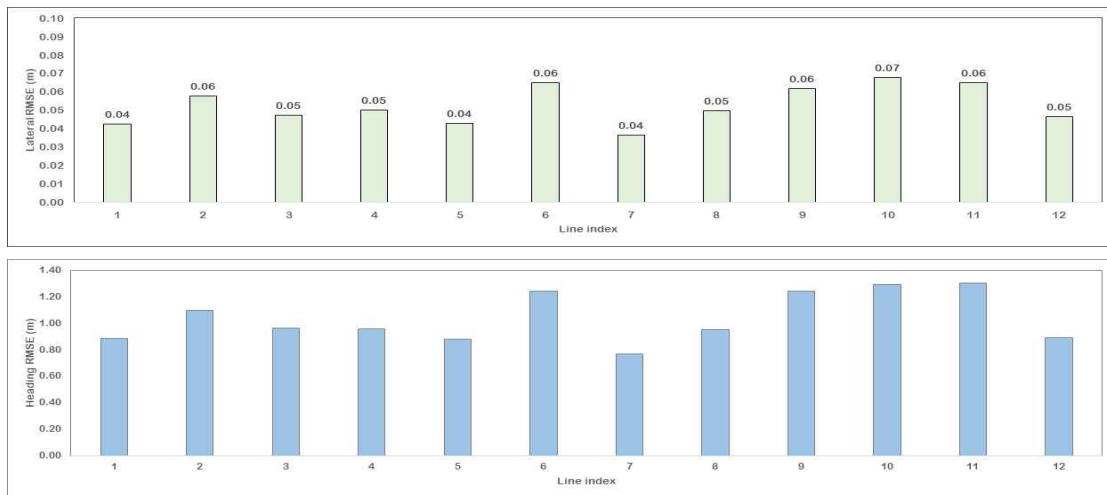


그림 759 내부 왕복 작업 열별 추종성능 - 측면변위 7 cm 이내 & 방향각 오차 1.3 deg 이내

- 작업 성능을 평가하기 위해 추종궤적 별 작업기 상/하강 명령을 기록하여 데이터를 기록.
- ESRI社 ArcGIS 프로그램을 활용하여 작업기가 하강 된 지점을 작업이 수행 된 지역으로 지정하여 경운 Coverage map (그림 X15)을 작성.
- Coverage map 결과, 전체면적 3497.1 m² 중 99.01 %의 면적 (3463.4 6 m²)에서 경운 작업 되었음을 확인.
- 포장 코너 부근의 회경 작업 시와 일부 내부왕복 경운 작업 구간의 두 구역에서 미경지가 발생 되었음을 확인되었지만 99% 이상의 작업성 확보.

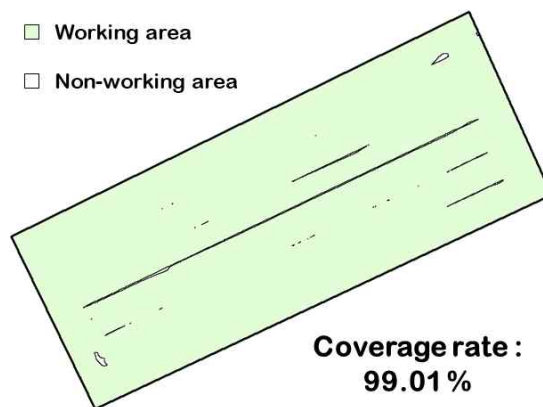


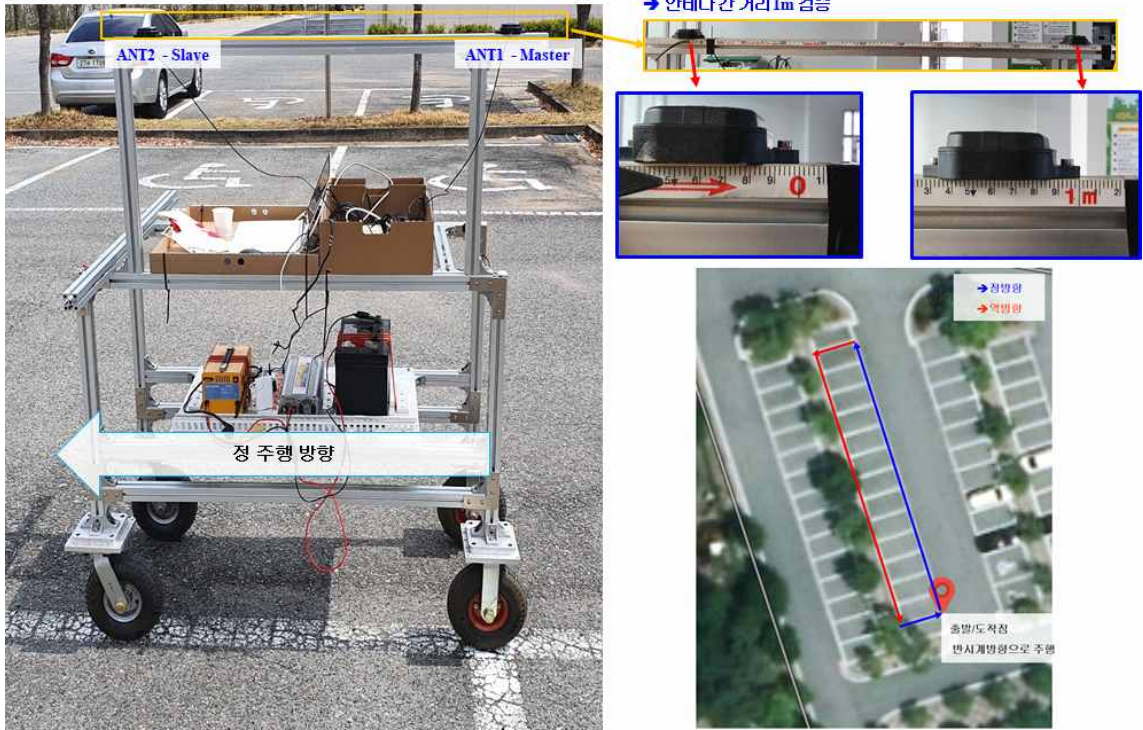
그림 760 ArcGIS 프로그램을 활용한 Coverage map 결과

사. 위탁연구기관 3 (한국로봇융합연구원)

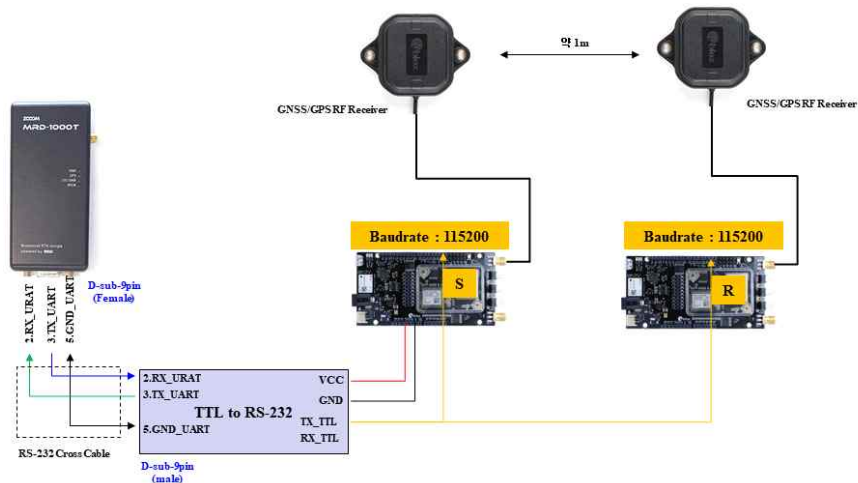
㉔ 자율주행 통합 시스템과 연동 가능한 모듈형 인터페이스 개발 및 고정밀 위치 인식 기술개발

㉔ 자율주행 통합 시스템과 연동 가능한 모듈형 인터페이스 개발

- 다수의 저가형 RTK-GPS의 센서와 보정 신호 수신기로 데이터 획득 및 오차 확인
- 취득 데이터는 개활지 도로이며, 날씨가 맑은 상태에서 획득한 데이터임.
- RTK 보정신호 수신기 1대에 다수의 RTK-GPS 모듈을 연결하여도 RTK 수신 가능함.
- 보정신호 수신기는 특별한 요청 신호가 없어도 항상 데이터를 송신하는 특징이 있음.

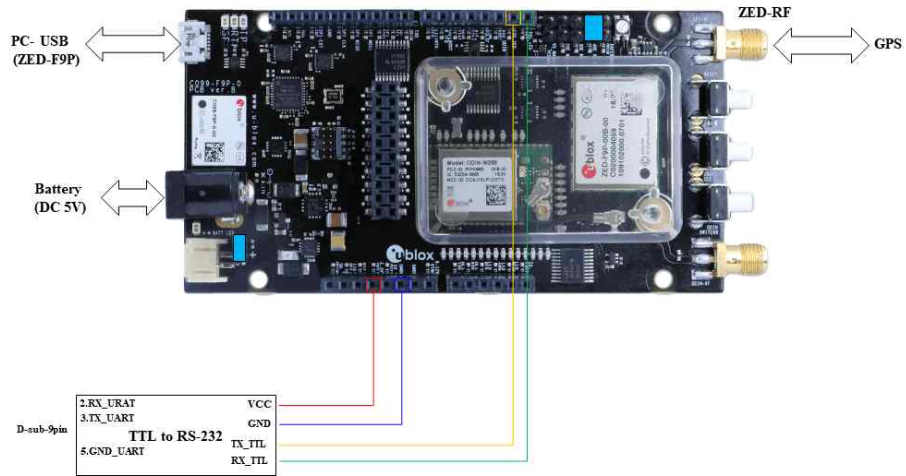


< RTK-GPS의 센서 테스트 실험 구성 및 주행 경로와 방향 >



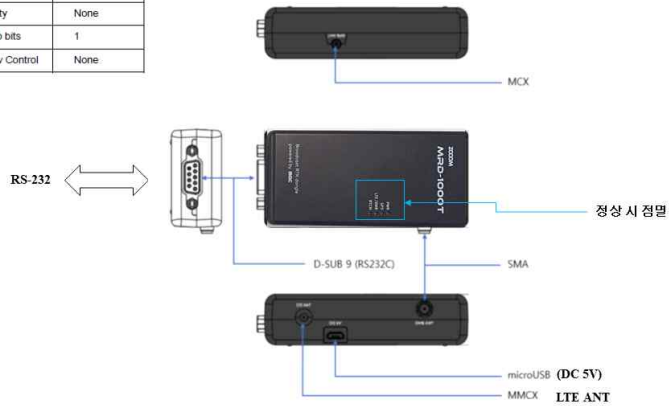
<RTK-GPS의 센서와 보정신호 수신기 구성도>

- GPS 수신기는 2개로 테스트를 하였으며, 수신기 간의 거리는 약 1m 임.
- 복수의 테스트 결과 1m 거리 확인이 잘되는 것을 확인 가능함.

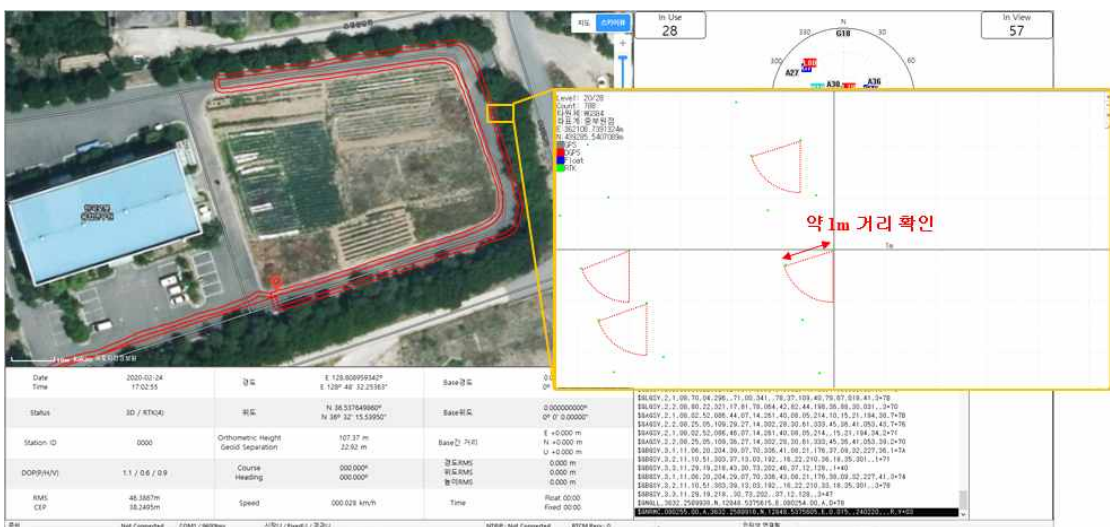


<C099-F9P, GPS 모듈>

Baud	115200
Data bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Flow Control	None



<GPS 보정신호 수신기>

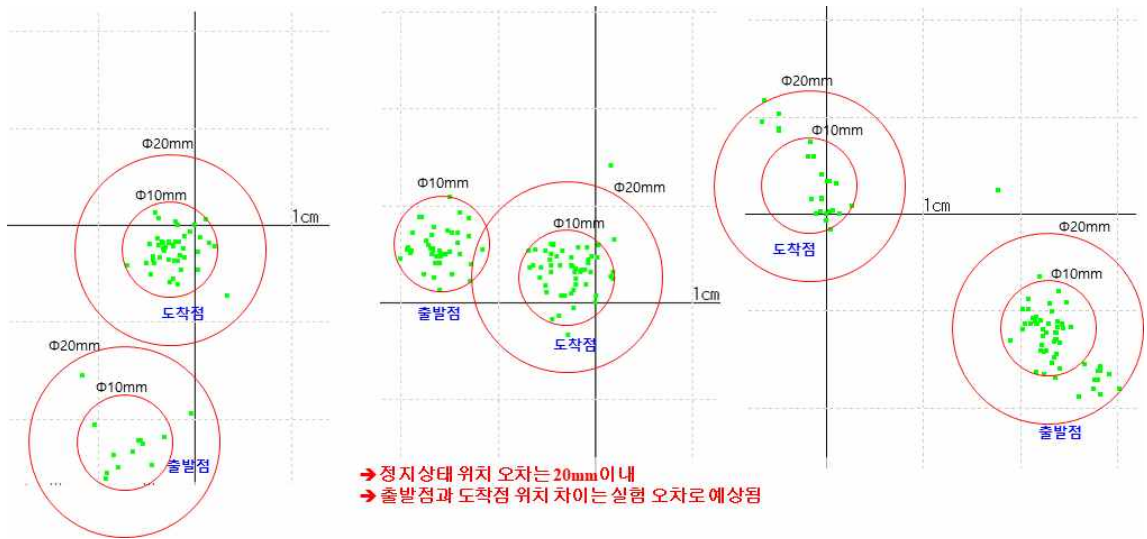


< 저가형 RTK-GPS의 센서 위치측정 테스트 >

- 고가의 보정 신호 수신기와 저가의 보정 신호 수신기를 동일한 GPS 모듈을 활용하여 성능을 측정하였고, 개별적으로도 성능을 각각 측정함.

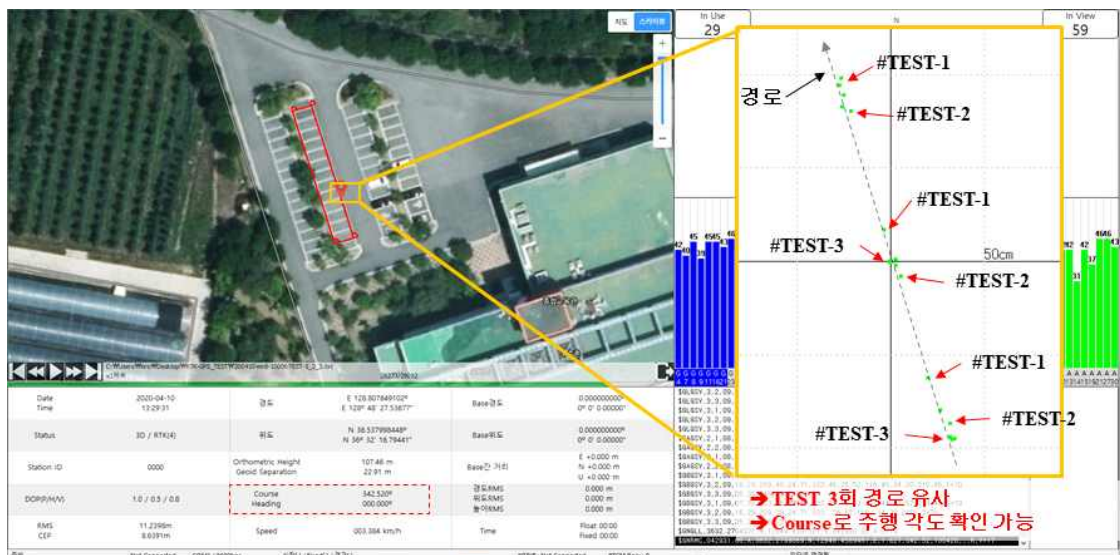


<고가의 GPS 보정신호 수신기 성능 확인 결과(위치 및 heading 각 오차)>

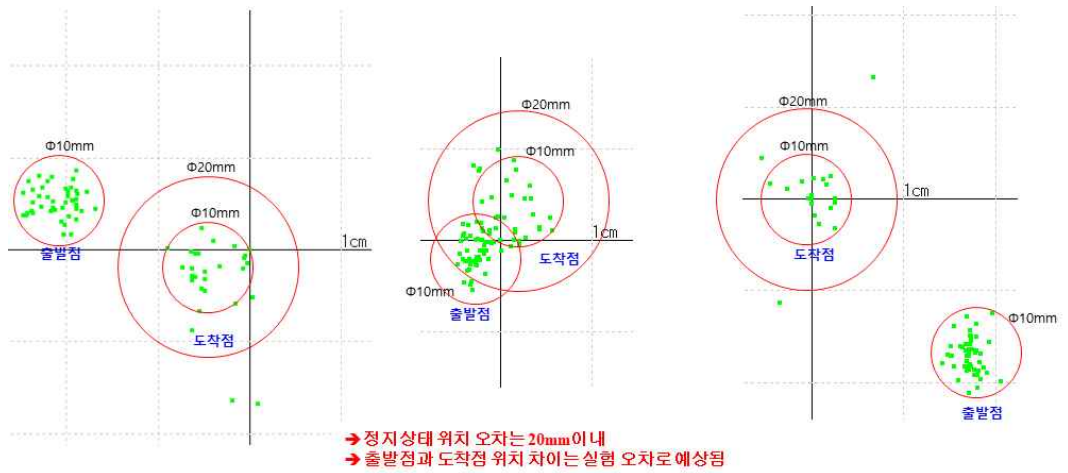


<고가의 GPS 보정신호 수신기 성능 확인 결과(위치 오차)>

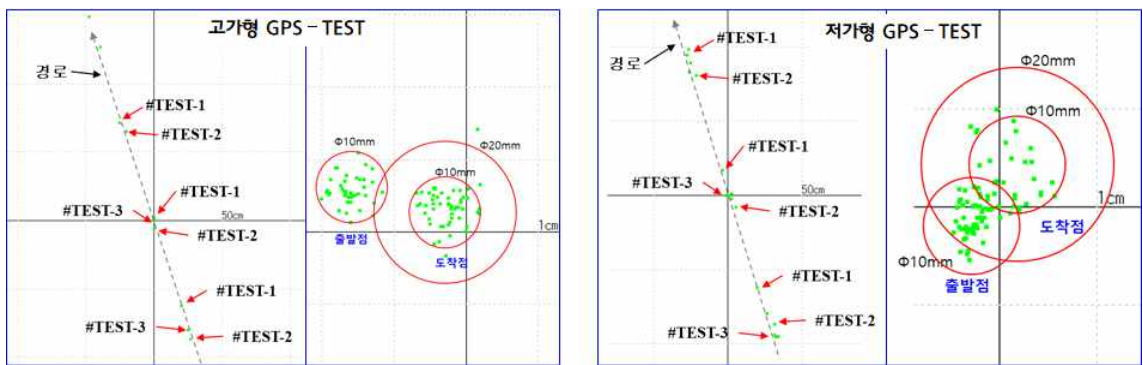
- 고가의 GPS 보정 신호 수신기 성능은 20mm 이내의 오차 범위를 보여줌.



<저가의 GPS 보정신호 수신기 성능 확인 결과(위치 및 heading 각 오차)>



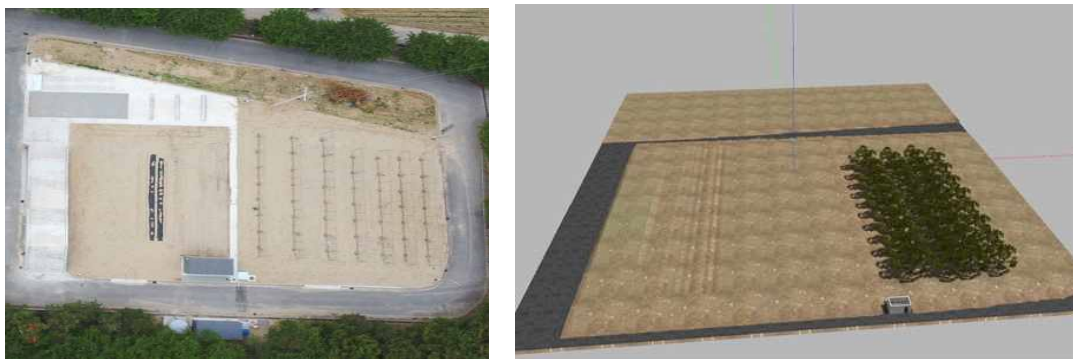
<저가의 GPS 보정신호 수신기 성능 확인 결과(위치 오차)>



<고가 및 저가의 GPS 보정신호 수신기 성능 확인 결과(위치 오차)>

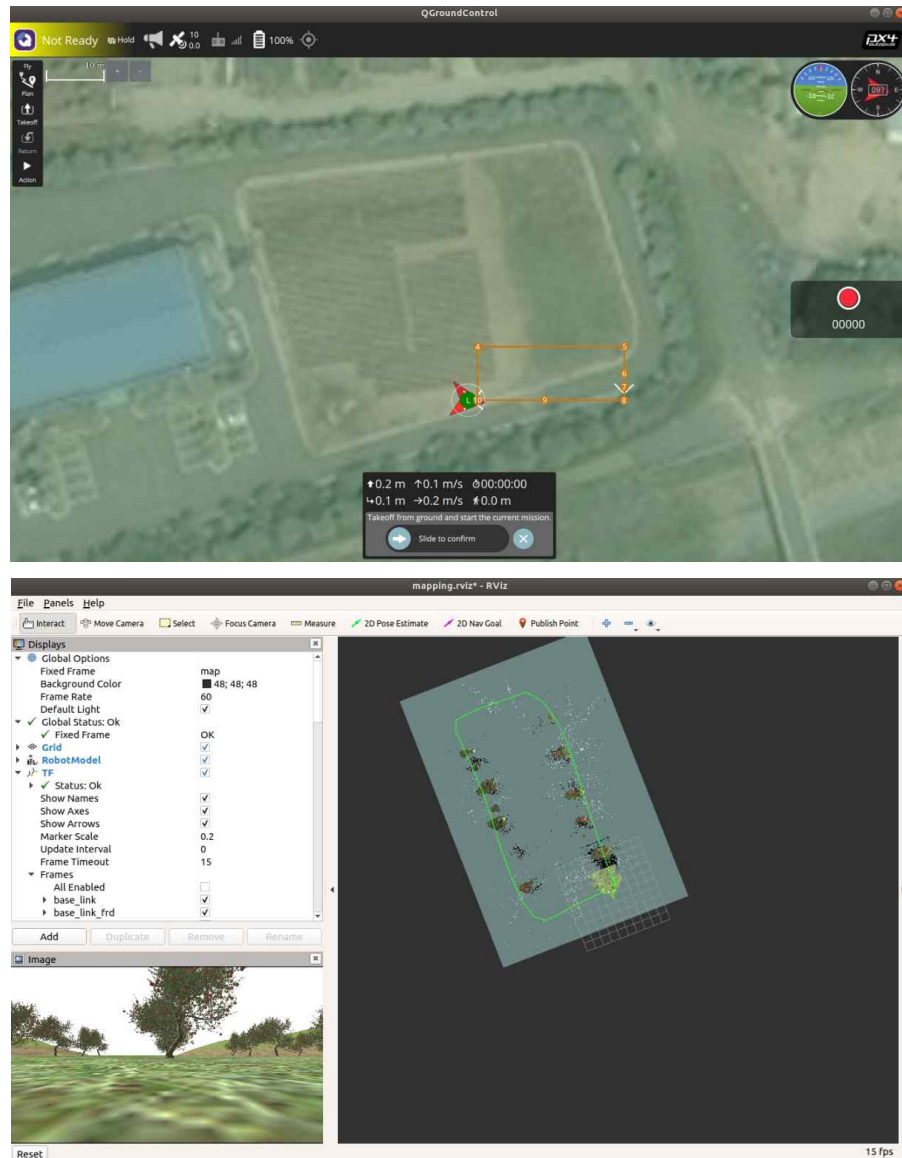
- 주차선 주행시 2가지 RTK 수신기 모두 반복 테스트에서 동일한 경로를 주행하는 것으로 확인되며 위치 정밀도는 고가의 GPS 보정 신호 수신기가 비슷하거나 더 정밀한 것으로 나타남.

- ㉔ 다중의 GPS들의 위치 보정 알고리즘과 센서들을 이용한 위치 보정 알고리즘 개발
 - 저가의 GPS를 다중으로 사용하여도 다수의 저가형 RTK-GPS의 센서로 성능을 개선하는 부분에는 한계가 존재하며, GPS 이외의 다중센서로 카메라를 사용함. Tracking camera의 IMU 센서와 영상을 접목하여 움직임을 제공함.



<테스트베드 환경 시뮬레이션 구현결과>

- Tracking camera를 테스트하기 위해서 ROS의 Gazebo를 활용하여 테스트를 진행하였고, 데이터를 확보하기 위해서 한국로봇융합연구원의 테스트 필드 환경을 모델링함.



<주행경로 설정 및 테스트 결과>

- 주행경로 설정을 하였고, 실제 플랫폼에 Tracking camera, GPS 및 IMU를 융합해서 진행을 하였고, tracking camera를 사용하지 않았을 대와 사용해서 Path를 비교하면 육안으로 tracking camera로 융합한 결과가 보정되는 것을 확인하였음.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

국내 작업 환경 및 지형을 고려하여 트랙터에 적합한 센서를 선정하고 센서 융합 최적화를 통해 영상인식 카메라, Lidar센서, 초음파센서를 사용하여 저비용 고효율의 경쟁력있는 작업 환경 인식모듈 개발하였다

경제형 GPS에 고정밀 위치인식기술을 적용하여 고가의 정밀 GPS와 동등 수준의 기능을 확보하여 저가형의 자율주행 트랙터 개발을 위한 기반을 확보하였다.

각 참여기업에서 개발한 자율주행 모듈 및 기술을 공유하여 사용가능하도록 통합시스템을 개발하여 자율주행 플랫폼을 참여기업에서 공동으로 사용할 수 있도록 하였다.

각 참여 농기계 제조사의 트랙터에 공용으로 사용할 수 있도록 통합시스템은 범용성 있는 공용 CAN Protocol을 개발하여 국내 주요 농기계업체가 불필요한 중복개발을 줄일 수 있게 되었다.

자율주행, 작업에 적합한 주요 농작업 실증 시험을 통해 자율주행 성능시험 및 최적화 개발로 실사용환경에 적합한 자율주행 트랙터가 개발되어 농업 종사자 인구감소에 대한 중요한 기술적 대안이 될 것으로 기대된다.

(2) 정량적 연구개발성과

구분	평가항목 (주요 성능 Spec)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 (%)	세계 최고 수준 보유국/ 보유기업 (/)	연구 개발 전 국내 수준	개발 목표치			평가방법	비고
				성능수준	성 능 수 준	1차 년도	2차 년도	3차 년도		
위치인식모듈	1. 정지위치오차	cm	10	< 1.5 (/Topcon)	2.5	-	10>	2>	입회시험 ISO 17123-8	완료
조향제어모듈	2. 조향반응시간	초	10	-	-	1	0.8	0.5	공인기관 입회시험	완료
경로생성 및 추종시스템	3. 경로생성시간	초	5	0.5 sec (미국/Johndee re)	5 sec	1	0.8	0.5	공인기관 입회시험	완료
	4. 경로추종오차	cm	10	15 cm (일본/Kubota)	40 cm	30	20	15	공인기관 입회시험 (ISO12188-2)	완료
작업환경인식모듈	5. 환경인식 속도	hz	10	20 Hz (미국/Johndee re)	15 hz	-	15	20	공인기관 입회시험	완료
	6. 환경인식율	%	5	95 % (미국/Johndee re)	60 %	-	80	95	공인기관 입회시험	완료
	7. 환경인식 거리	m	5	10 m (일본/Kubota)	-	3	5	10	공인기관 입회시험	완료
통합시스템개발	8. 공용 프로토콜 개발	건	10	-	-	-	3	4	공인기관 입회시험	완료
	9. 자가진단 항목 개발	건	5	-	-	-	-	4	공인기관 입회시험	완료
	10. ESD(정전기시험)	KV	5	-	-	-	-	CLASS4	공인기관 시험 IEC61000-4 -2	완료
	11. EMC(전자파시험)	MHz	5	-	-	-	-	ECE R 10.03	공인기관 시험 ECE R 10.05	완료
자율주행트랙터	12. 작업오차	cm	10	15 cm (미국/Johndee re)	35 cm	-	-	15	공인기관 입회시험 (ISO12188-2)	완료
	13. 작업정확도	%	5	5%↓ (미국/Johndee re)	10↓	-	-	5	공인기관 입회시험	완료

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)

(22쪽 중 7쪽)

(3) 세부 정량적 연구개발성과(해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 증빙자료를 별도 첨부해야 합니다)

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Simulation Study to Develop Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations	Journal of Biosystems Engineering	Xiongzhe Han	44(4)	대한민국	Springer	비SCIE	2019.12	JBIS-D-01-00027R4	100
2	Development of autonomous tractor model considering the off-road environment	Precision Agriculture Science and Technology	김택진	1권 1호	대한민국	한국정밀농업학회	비SCIE	2019.12.31	제 19-02	100
3	Dynamic characteristic analysis of autonomous tractor according to plow tillage	Precision Agriculture Science and Technology	김택진	1권 1호	대한민국	한국정밀농업학회	비SCIE	2019.12.31	제 19-03	100
4	Development of a Real-Time Tillage Depth Measurement System for Agricultural Tractors: Application to the Effect Analysis of Tillage Depth on Draft Force during Plow Tillage	SENSORS	Y. S. Kim	3	Switzerland	MDPI	SCIE	2020.02.08	1424-8220	100
5	Effects of Temperatures and Viscosity of the Hydraulic Oils on the Proportional Valve for a Rice Transplanter Based on PID Control Algorithm	Agriculture	MD. A. A. Siddique	3	Switzerland	MDPI	SCIE	2020.03.12	2077-0472	100
6	Path detection for autonomous traveling in orchards using patch-based CNN	Computers and Electronics in Agriculture	W. S. Kim	175	Netherlands	ELSEVIER	SCIE	2020.07.13	0168-1699	100
7	Dynamic simulation of steering controller of agricultural tractor during rotary tillage	PRECISION AGRICULTURE SCIENCE AND TECHNOLOGY	H. H. Jeon	3	Korea	Korean Society of Precision Agriculture	비SCIE	2020.09.01	2672-0086	100
8	Design and validation testing of a complete paddy field-coverage path planner for a fully autonomous tillage tractor	Biosystems Engineering	ChanWoo Jeon	208	UK	ELSEVIER	SCI	2021.06	1537-5110	100
9	A reliable quasi-dense corresponding points for structure from motion	KSII TRANSACTIONS ON INTERNET AND INFORMATION SYSTEMS	Jangseok Oh	vol.14 no.9	대한민국	한국인터넷정보학회	SCIE	2020.09.30	1976-7277	10

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2018 한국정밀농업학회 추계 학술대회	김완수	218.11.13	농업기술 실용화재단	대한민국
2	2018 대한기계학회 학술대회(본부)	김용주	2018.12.13	강원랜드 컨벤션센터	대한민국
3	2019년도 IT융합부문 춘계 학술대회	전현호	2019.04.26	대전 라운컨벤션 호텔	대한민국
4	2019 춘계공동학술대회 (사)한국농업기계학회	전현호	2019.05.10	경상대학교 GNU 컨벤션센터	대한민국
5	2019 춘계공동학술대회 (사)한국농업기계학회	정연준	2019.05.10	경상대학교 GNU 컨벤션센터	대한민국
6	2019 한국농업기계학회 춘계 학술대회	전찬우	2019.05.10	경상대학교 가좌캠퍼스	대한민국
7	2019 한국농업기계학회 춘계 학술대회	장규진	2019.05.10	경상대학교 가좌캠퍼스	대한민국
8	2019 한국농업기계학회 추계 학술대회	전찬우	2019.10.17	엘리시안 강촌	대한민국
9	농업기계학회 2020 춘계 공동학술대회	전현호	20.06.15.~20.06.26	온라인 학술대회	대한민국
10	ASABE 2020	H. H. Jeon	20.07.13.~20.07.15	Virtual and on demand	USA
11	AETC 2020	H. H. Jeon	20.02.10.	Hyatt Regency, Louisville, Kentucky	USA
12	2020년도 추계 농업기계학회	전찬우	2020.10.30.	전북대학교	대한민국
13	2021년도 춘계 농업기계학회	전찬우	2021.04.30.	국립농업과학원 농업공학부	대한민국

□ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	트랙터용 3점 히치장치	대한민국	충남대학교 산학협력단	2019. 02.28	10-2019- 0023664				100%	○	
2	높이 센싱 알고리즘을 구비한 자율주행 트랙터	대한민국	충남대학교 산학협력단	2019. 03.11	10-2019- 0027511				100%	○	
3	농업기계용 듀얼 지피에스 모듈	대한민국	국제종합 기계(주)	2019. 09.02	10-2019- 0108043				100%	○	
4	자율주행 작업차량을 위한 지능형 주행시스템	대한민국	충남대학교 산학협력단	2020. 02.18	10-2020- 0019390				100%	○	
5	자율 작업 농기계의 가상 농작업 시뮬레이션 시스템 및 방법	대한민국	서울대학교 산학협력단 (김학진 한웅철 전찬우)	2020. 07.24.	10-2020- 009268				100%	○	

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타
1		√								
2		√								
3		√								
4		√								
5		√								

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)
(22쪽 중 8쪽)]

표준화

○ 국내 표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

○ 국제 표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	HX자율주행트랙터	2020.08.01	(주)대동	사내 개발본부	시제품 시험			
2			동양물산기업(주)					
3	LX자율주행트랙터	2019.08.20	국제종합기계(주)	사내 연구소	시제품 시험			

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	자기실시	신제품 개발	국내	자율주행트랙터	자율직진기능 트랙터개발	(주)대동	1,040,490	-	2021	5

* 1) 기술이전 또는 자기실시

* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등

* 3) 국내 또는 국외

매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
자율주행트랙터	2021	1,040,490	-	1,040,490	거래명세서
합계		1,040,490	-	1,040,490	

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)
(22쪽 중 9쪽)

□ 사업화 계획 및 무역 수치 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
	국외				
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수치 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			2020년	2021년	
1	자율주행트랙터	(주)대동	21	22	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	28
		생산인력	15
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	연구원	2019		1			1		1				
2	연구원	2020		1			1		1				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비
1	한국산업기술평가관리원	기계산업핵심기술개발사업	레벨3 자율작업 트랙터용 개방형 통합제어시스템 기술개발	김성규	5,252,134 천원

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	중앙TV방송	KBS NEWS	드론이 씨부리고 자율주행차가 모내기	2019.06.15
2	Internet/PC통신	뉴스스	이제는 농사도 자율주행시대	2019.07.10

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)
(22쪽 중 11쪽)]

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 조향제어 모듈 개선 개발 ○ 작업환경 인식 모듈 개선 개발 ○ 자율주행트랙터 시작품 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경사지에서의 제어 알고리즘 최적화를 위해서 자세 보정 알고리즘을 개발 ○ 작업환경 인식 카메라-Lidar 융합 기능 개발 ○ 시작품트랙터 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100% ○ 100% ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 비포장 주행경로에서의 슬립제어를 위한 제어 모델 및 경로 추종 ○ 플랫폼을 이용한 실차 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Robust Control 알고리즘을 추가 및 속도제어 알고리즘을 경로 추종 프로그램에 추가 개발하여 경로 추종시 슬립을 최소화 하였음. ○ 직진 및 선회 그리고 포장지 내 자율주행 오차와 미경작지를 시험하였음 ○ 경로생성시간 : 0.3s ○ 경로추종오차 : 7.12cm ○ 작업오차 : 9.32cm ○ 작업정확도 : 3.74% 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100% ○ 100% ○ 100% ○ 100% ○ 100% ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 위치-자세인식모듈의 정지오차 2cm 이내 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공인기관입회시험 ISO17123-8 기준하여 2cm이내 (1.1cm)로 검정성적서 발급. ○ GPS신호를 1시간동안 1분간격으로 데이터 수집하여 최대측정치의 오차가 전체평균값을 중심으로 2cm를 반경으로하는 원안에 위치. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 통합 모듈 상용화 기술 개발 ○ 자율 주행 트랙터 현장 실증 통합 모듈 실증 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 내환경성 시험 후 설계 변경 적용 ○ 트랙터 제조사와 함께 실증 테스트 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100% ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 자율주행 트랙터 포장 실증을 통한 동역학 시뮬레이션 모델 성능 평가 ○ 자율주행 트랙터 성능검정을 위한 국내외 문헌자료 수집 및 성능검정 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 트랙터 이용 계측 시스템을 개발 및 시험. 수집 데이터를 동역학 모델 개발 및 검증을 위해 사용. 개발된 동역학은 조향 제어 모델 성능평가에 사용, 계획서에 제시한 운전자 모델, 도로 모델, 차량 모델에 따른 조향 제어 모델 성능평가를 수행함. ○ 현재 ISO에서 제정한 표준이 국제적으로 널리 통용되고 있음. 현재 국내에서도 ISO 부합 표준을 제정하여 도입하고 있는 실정임. 이에따라 관련 문헌들은 각각 국내외 표준에 대한 분석으로 대체하였으며, 성능검정은 실용화재단에서 관련 시험을 주관하고 있음. 이에 따라 실용화 재단의 자문을 통해 관련 검정방안을 도출함. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100% ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 자율주행 트랙터 알고리즘 실증 요인 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전 영역 자율경운 경로생성 및 추종모듈 개발 ○ 추종정밀도 15 cm 이내 ○ 작업정확도 90% 이상 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100% ○ 100% ○ 100%
<ul style="list-style-type: none"> ○ 자율주행 통합 시스템과 연동 가능한 모듈형 인터페이스 개발 및 고정밀 위치 인식 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저가형 GPS 수신기 2개와 보정 수신기를 활용하여 데이터를 취득하였고, 20mm이내 성능취득이 가능하다. 다중센서를 활용하여 위치 오차를 보정이 가능하다. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100%

4. 목표 미달 시 원인분석 (해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)
(22쪽 중 13쪽)]

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 현재 국외에는 자율주행 트랙터가 상용화 되어 관련 기술들을 많이 보유하고 있다. 국내에서도 관련 연구를 활발히 수행하고 있으며, 최근 관련 플랫폼 및 기술들이 많이 개발되어 있다. 각 단품 제품들을 결합하여 SI (System Interation)를 수행하기 위해서는 많은 시험과 성능평가를 수행하여야 한다. 실차를 이용한 시험들은 상대적으로 시간 및 장소적 제약이 많이 발생하기 때문에, 이를 대체할 수 있는 시험방법이 필요한 실정이다. 본 연구를 통해서 동역학 모델을 개발하고, 이를 이용하여 대체시험을 수행할 수 있는 방안을 도출함으로써 자율주행 관련 차량 개발 시 시험과 비용의 절감 효과가 기대된다.
 - 현재 국내외에서는 ISO 표준들을 이용하여 성능평가를 수행하고 있으나, 각 국가별로 변화 혹은 추가되어야 할 항목들이 존재한다. 본 연구를 통해서 국내환경에 맞는 자율주행 제어기의 성능평가 방법을 도출하여, 차후 관련기관(실용화재단)과의 협업을 통해서 국내에 자율주행 농업기계의 상용화를 가속화 시킬 수 있다.
-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 자율주행 트랙터에 관한 연구는 지속적으로 수행 될 것으로 예측 된다. 이에 따라 새로운 모델 및 제어기들이 지속적으로 개발 될 것이며, 안정성 시험을 수행하여야 할 것으로 예측 된다. 그러나 실차를 이용한 시험은 농작업 특성상 시간 및 장소적 제약이 많이 발생 하며, 이에 따라 이를 대체할 수 있는 방안이 필요한 실정이다. 본 연구를 통해서 개발한 동역학 모델의 경우, 시간 및 장소적 제약이 상대적으로 적으며 이에 따라 새롭게 개발 된 트랙터들의 시험을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 차후, 본 과제에 참여한 농기계 업체들과의 협업을 통해 자율주행 트랙터와 관련 된 연구를 지속적으로 수행할 예정이며, 이에 따라 본 연구에서 개발 된 동역학 모델이 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 국내에는 자율주행 농업기계의 제어 성능평가 방법에 대해서는 ISO 부합 표준을 통해서 관련기관들에게 방안을 제시하고 있다. 그러나 ISO 표준의 경우 전 세계에서 보편적으로 사용 되는 시험 방법들에 대해서만 정리 되어 있기 때문에, 국내에 최적화 된 시험 검정 방안이 필요하다. 본 연구에서 조사하고 제시한 방안을 기반으로, 실용화 재단과 차후 논 의를 통해서 문제점을 찾아 수정방안을 도출할 수 있을 것으로 판단되며 이에 따라 국내 자율주행 농업기계의 상용화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내	
국외논문	SCIE		
	비SCIE		
	계		
국내논문	SCIE	1	
	비SCIE	2	
	계	3	
특허출원	국내		
	국외		
	계		
특허등록	국내	3	
	국외		
	계	3	
인력양성	학사		
	석사		
	박사		
	계		
사업화	상품출시	220 대	
	기술이전		
	공정개발		
제품개발	시제품개발		
비임상시험 실시			
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	
		2상	
		3상	
	의료기기		
진료지침개발			
신의료기술개발			
성과홍보		1	
포상 및 수상실적			
정성적 성과 주요 내용			

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.	1)
	2)

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)]

자체평가의견서

1.

		과제번호		318072-3	
사업구분	첨단생산기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	첨단생산기술개발사업				주관
총괄과제				총괄책임자	
과제명	자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단			과제유형	(기초,응용,개발)
연구개발기관	대동공업(주)			연구책임자	감병우
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	6개월	1200,000	800,000	2,000,000
	2차년도	12개월	2400,000	1,600,000	4,000,000
	3차년도	18개월	2400,000	1,600,000	4,000,000
	4차년도				
	5차년도				
	계	36개월	6,000,000	4,000,000	10,000,000
참여기업	동양물산기업(주), 국제종합기계(주), (주)긴트, 충남대학교, 서울대학교, 한국로봇연구원				
상대국	상대국연구개발기관				

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2021년 8월 31일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
대동공업(주)	상무	감병우

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확 약	
-----	--

I. 연구개발실적

다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수 (우수, 보통, 미흡, 극히불량)

국내 작업 환경 및 지형을 고려하여 트랙터에 적합한 센서를 선정하고 영상인식 카메라, Lidar센서, 초음파센서를 사용하여 저비용 고효율의 경쟁력있는 작업환경 인식모듈 개발하였다.

경제형 GPS에 고정밀 위치인식기술을 적용하여 고가의 정밀 GPS와 동등 수준의 기능을 확보하여 저가형의 자율주행 트랙터 개발을 위한 기반을 확보하였다.

각 참여기업에서 개발한 자율주행 모듈 및 기술을 공유하여 사용가능하도록 통합시스템을 개발하여 자율주행 플랫폼을 참여기업에서 공동으로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수 (우수, 보통, 미흡, 극히불량)

농촌인구 감소, 고령화로 인력을 대체할 지능형 농업기계의 필요성이 대두되고 있는 실정에서 농업 현장에서 활용가치가 높은 농업용 트랙터에 대한 선진기술을 개발하였다.

자율주행, 작업에 적합한 주요 농작업 실증 시험을 통해 자율주행 성능시험 및 최적화 개발로 실사용환경에 적합한 자율주행 트랙터가 개발되어 농업 종사자 인구감소에 대한 중요한 기술적 대안이 될 것으로 기대된다.

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수 (우수, 보통, 미흡, 극히불량)

본 과제를 통하여 개발된 기술을 활용하여 자율직진이 가능한 농업용 트랙터를 사업화하였고, 본 기술 기반으로 하여 자율주행, 자율작업, 무인자율작업으로의 기술 향상 기반을 확보하였다.

농업용 트랙터뿐만 아니라 이앙기, 콤바인, 발작물작업기 등의 농업기계로 기술을 확산 가능하며 국내 주요 농기계생산업체가 함께 과제에 참여하여 공동 개발함으로써 기술을 공유하여 국내 농기계제품의 기술이 향상되고 수출 경쟁력도 확보가능하다.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수 (우수, 보통, 미흡, 극히불량)

본 과제를 수행하면서 단순 신기술 개발이 아닌 과제 종료 즉시 완성차량 신제품을 출시하기위하여 노력하였으며, 참여연구원외에 전사적인 움직임으로 제품을 기획, 개발, 홍보, 생산에 성공하였다.

이는 농기계 산업의 국내 경쟁업체로 이루어진 공동연구기관이 개발 자료 및 정보공유에 거리낌이 수렴함으로써 가능하였다.

위탁연구기관의 연구 활동을 위해 차량 제공 및 협업시험에 적극적으로 협력하였고, 연구결과는 신제품 제품화에 중요한 기술로 습득함으로써, 앞으로 제품의 기능 향상에 활용이 가능하도록 하였다.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수 (우수, 보통, 미흡, 극히불량)

연구개발성과 중 주요성과인 특허는 목표 5건 대비 실적 5건을 달성하였다.
 논문 목표 7건 대비 실적 11건으로 초과달성, 홍보 및 전시 부분에서 목표 2건 대비 실적 5건으로 초과달성하였다.
 제품화 부분에서 농기계업체 3사의 목표 3건 중 현재 1건으로 미달되었지만 조속한 시일 내 제품출시를 위해 준비 중이며, 다만 제품화 매출액은 목표를 월등히 초과달성하였다.
 기타 목표는 종료 5차년도 까지 계획되어있으며, 계획된 목표를 달성할 수 있도록 자율주행트랙터 기술을 진보시킬 계획이다.

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²))

[별첨 1]

(22쪽 중 18쪽)

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
조향제어모듈개발	5	100	유압식 조향시스템 개발 적용 및 전동식 컨셉 설계 완료
작업환경 인식 모듈 개발	10	100	장애물 인식을 목표로 달성한 환경인식 모듈 개발 완료
HMI UI개발	10	100	GUI 탑재 네비게이션 개발 완료
경로생성, 추종 컨트롤러 개발	15	100	제어기 개발 완료
위치-자세인식모듈 개발	10	100	고정밀 위치 인식 기술 개발 완료
모듈 통합 시스템 개발	10	100	내환경성 통합모듈 개발 완료
동역학 모델을 개발	10	100	조향 제어 동역학 모델 개발 완료
경로생성 및 추종 알고리즘 개발	10	100	작업 경로생성 및 추종기능 개발 완료
경제형 GPS 및 고정밀 위치 인식 기술 개발	10	100	저가형, 보급형 GPS모듈 개발 완료
자율주행트랙터 시제품개발	10	100	시작품 트랙터 3대 제작 완료
합계	100점	100	

III. 종합의견

1. 대한 종합의견

국내 농기계 제조사 3사가 협력하여 자율주행트랙터 기술 개발을 성공적으로 이루었으며, 경쟁관계의 업체에서 신기술 개발에 협력하는 관계를 유지하면 국가전체의 기술발전에 큰 도움이 될 것으로 생각한다. 자율주행기술을 짧은 과제기간 동안 개발 및 제품화에 성공하여 국내 최초 자율주행트랙터를 출시하여 연구개발과제를 성공적으로 수행 완료하였다.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

본과제의 핵심기술은 완성차량에 적용되어야 기능이 구현됩니다. 참여기관 중 농기계 제조사 3사는 과제 기술 범위 외의 차량 설계, 제작 등에 상당수의 참여연구원 인력과 시간이 투입된 점을 고려하여 평가바랍니다.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

본 과제를 통하여 개발된 기술을 활용하여 제품화 출시에 성공하였다. 앞으로 단계적으로 기능을 추가 적용하여 완전 자율주행트랙터를 상용화 할 예정이다. 또한 본 과제 기술은 다양한 농기계에 적용이 가능한 기술이며, 트랙터외의 농기계에 기술을 확산 전개할 예정이다.

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)]

IV. 보안성 검토

○ 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 의견

--

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

--

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	농작업 기계·시스템	
연구과제명	자율주행 트랙터 상용화 연구개발 사업단			
주관연구개발기관	대동공업(주)	주관연구책임자	감병우	
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	6,000,000 천원	4,000,000 천원	-	10,000,000 천원
연구개발기간	2018.07.31. ~ 2021.06.30.			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(자체 사업화) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:)			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
①작업환경인식모듈 및 알고리즘 개발	장애물과 농작물 환경인식 모듈 개발 완료
②위치, 자세인식모듈 개발	고정밀 위치인식 기술 개발 완료
③자율주행경로 생성 및 추종 알고리즘 개발	농작업 시 슬립을 고려한 경로추종 모듈 개발 완료

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표										
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용등)		
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T P R O T O C O L	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논 문	S C I	비 S C I			논 문 평 관 I F	학 술 발 표		정 책 활 용	홍 보 전 시
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	명	건	건			
가중치	11.8						21.8	11.8		21.8				6.8	4.8	5.8	6.8	2.8	2.8	3		
최종 목표	5						3	400		9		3	4	2	6	2	2	1	2	1		
당해 년도	목표	5					3	400		9		3	4	2	6	2	2	1	2	1		
	실적	5					1	1040		17		7	3	2.2	13	2	2	0	5	1		
달성률 (%)	11.8						7.3	11.8		21.8				6.8	4.8	5.8	6.8	0	2.8	3		

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	작업환경인식기술
②	위치, 자세인식기술
③	자율주행경로 생성 및 추종기술

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장으로 해결	정책 자료	기타
①의 기술					√		√			
②의 기술					√	√	√			
③의 기술					√		√			
·										

* 각 해당란에 √ 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	농업 환경의 장애물, 농작물 인식기술로 적용
②의 기술	농지에서의 농기계 위치 인식, 험지에서의 자세 변화에 따른 오차 인식 및 보정
③의 기술	농작업 영역 내에서 자율주행 경로 생성 및 경로 추종기술 ①, ②, ③의 기술이 통합되어 고정밀 자율주행 트랙터 상품화 실현

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용액)	
	특허출원	특허등록	품종등록	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용 창출		투자유치	논문 SCI	비SCI			논문평균 I-F	학술 발표		정책 활용
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	명	건	건	건
가중치	11.8							21.8	11.8		21.8			6.8	4.8	5.8	6.8	2.8	2.8	3
최종목표	5						3	400		9		3	4	2	6	2	2	1	2	1
연구기간내 달성실적	5						1	1040		17		7	3	2.2	13	2	2	0	5	1
연구종료후 성과창출 계획		3						30,358				1	2	1	2	1			1	

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.