

321063  
-02

가  
변

제  
어  
형

식  
용

뜻  
옥  
수  
수

수  
확  
기

개  
발

2022

농림식품기술기획평가원  
농림축산식품부

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( )발간등록번호( O )  
첨단농기계 산업화 기술개발사업 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004329-01

## 가변 제어형 식용 뜻옥수수 수확기 개발

2023.05.26.

주관연구기관 / 국립농업과학원  
협동연구기관 / 서울대학교 산학협력단  
협동연구기관 / 두루기계통상

농림축산식품부  
(전문기관)농림식품기술기획평가원

## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “가변 제어형 식용 꽃옥수수 수확기 개발”(개발기간 : 2021.04.01 ~ 2022.12.31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 05. 26.

주관연구기관명 : 국립농업과학원 (대표자) 이승돈 (직인)

협동연구기관명 : 서울대학교산학협력단 (대표자) 김제영 (직인)

협동연구기관명 : 두루기계통상 (대표자) 김재동 (직인)

주관연구책임자 : 우제근

협동연구책임자 : 박영준

협동연구책임자 : 김재동

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

## < 요약 문 >

사업명		첨단농기계 산업화 기술개발		총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명		농기계 성능 고도화		연구개발과제번호		321063-2	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0801	%	LB0804	%	LB0899	%
	농림식품 과학기술분류	AE29	%	AE29	%	AE29	%
총괄연구개발명		-					
연구개발과제명		가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 개발					
전체 연구개발기간		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비		총 909,000천원 (정부지원연구개발비: 793,000천원, 기관부담연구개발비 : 116,000천원)					
연구개발단계		기초[ ] 응용[ ] 개발[ ] 기타[ <input checked="" type="checkbox"/> ]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(5단계) 종료시점 목표(6단계)	
연구개발과제 유형		-					
연구개발과제 특성		-					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 식용 풋옥수수 수확 일관 시스템 개발</li> <li>- 품종에 따른 가변형 예취부, 수확물 손상 최소화를 위한 이송·탈과부, 연속 수확물 수집 시스템, 자동화를 위한 제어 기술개발</li> </ul>				
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 세부 목표</li> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 메커니즘 구명 및 요인 시험장치 설계·제작</li> <li>· 착협고, 줄기 및 풋옥수수 이삭 함유율, 줄기경도 등 작물 특성 반영</li> <li>- 풋옥수수 탈과 가시화 분석 및 성능 요인시험</li> <li>· 고속 카메라 활용 풋옥수수 탈과 형상 분석을 통한 최적 탈과 메커니즘 도출</li> <li>· 탈과부 성능 요인시험 및 가시화 분석 연계 최적화 설계요인 구명</li> <li>* 풋옥수수 이송각, 탈과물러 회전속도 등 최적 성능을 위한 작동 조건 도출</li> <li>- 현장 특성을 고려한 제어기술 및 시스템 개발</li> <li>· 재배형태나 품종에 따라 예취제어가 가능한 가변형 예취부 개발</li> <li>· 작업 안전성 및 적응성 향상을 위한 실시간 수평 제어기술 개발</li> <li>· 풋옥수수 수량 및 무게 계측 기술이 적용된 수집부 자동화 기술개발</li> <li>- 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 포장성능 시험 및 작업성능 분석</li> <li>· 시작기 포장성능 시험 및 수확성능 분석</li> <li>* 예취 및 수집시스템 성능 분석: 예취율, 중량 감응 센서 정확도 등</li> <li>* 탈과시스템 성능 분석: 탈과율, 손상률 및 이물질 함유율 등</li> </ul>				
	1년차	목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주관기관 (국립농업과학원)</li> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 시험장치 요인시험 및 메커니즘 구명</li> <li>○ 참여기관 1 (두루기계통상)</li> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 시스템 설계 및 개발</li> <li>○ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단)</li> <li>- Top-down type 풋옥수수 수확기 성능검증 및 풋옥수수 이산요소모델 개발</li> </ul>				

연구개발 목표 및 내용	1년차	내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주관기관 (국립농업과학원) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 시험장치 요인시험 및 메커니즘 구명</li> <li>· 식용 풋옥수수 품종별 특성을 고려한 가변형 예취부 시물레이터 요인시험 <ul style="list-style-type: none"> <li>* 품종에 따른 수확기 범용성 향상을 위한 예취 장치 제작 및 요인시험</li> </ul> </li> <li>· 식용 풋옥수수 적합 탈과 메커니즘 구명을 위한 시물레이터 요인시험 <ul style="list-style-type: none"> <li>* Bottom-up type 탈과 메커니즘 적용 시험장치 제작 및 요인별 성능분석</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 시험장치 현장 실증 및 시작기 설계요인 도출 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 주산지 중심 풋옥수수 기계 수확 시험 포장 조성 및 운영 <ul style="list-style-type: none"> <li>* 시험 장치 수확 성능분석 및 설계요인 도출</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 참여기관 1 (두루기계통상) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풋옥수수 수확기 주요부 시스템 설계 및 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 트랙터 부착을 위한 옥수수 수확기 3-point hitch 프레임 설계</li> <li>· 풋옥수수 수확기 주요부 설계 및 해석</li> <li>· 풋옥수수 품종별 특성을 고려한 가변 예취부 설계</li> <li>· 풋옥수수 자루 절단 후의 헵지 및 이송장치 설계</li> <li>· 풋옥수수 탈과 장치 설계</li> <li>· 풋옥수수 배출·파쇄 절단 장치(파쇄날) 설계</li> <li>· 풋옥수수 탈과 후 횡이송 컨베이어 장치 설계</li> <li>· 각 시스템 부위별 구동을 위한 유압탱크 및 유압구동제어 시스템 설계</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Top-down type 풋옥수수 수확기의 수확성능 시험평가 및 작업부하도출 <ul style="list-style-type: none"> <li>· Top-down type 풋옥수수 수확기를 이용한 풋옥수수 수확시험 수행</li> <li>· 풋옥수수 수확시험 시 계측한 작업 부하 데이터(토크, 회전속도 등)를 이용하여 풋옥수수 수확 시 발생하는 하중지속분포(load duration distribution, LDD) 도출</li> <li>· Top-down type 풋옥수수 수확기의 기어박스 3D 모델 개발</li> <li>· 구축한 LDD와 기어박스 3D 모델을 이용한 기어박스 강도 및 수명평가</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
	2년차	목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주관기관 (국립농업과학원) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풋옥수수 수확기 시작기 성능시험 및 현장 실증</li> <li>- 풋옥수수 수확기 시작기 작업능률 및 경제성 분석</li> </ul> </li> <li>○ 참여기관 1 (두루기계통상) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풋옥수수 수확기 시작기 세부 설계요인 개선</li> <li>- 풋옥수수 수확기 통합 시작기 제작</li> </ul> </li> <li>○ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 요인시험장비 성능고도화 및 시험평가</li> <li>- 요인시험시스템 다물체 동역학모델과 풋옥수수 이산요소모델의 연성해석(co-simulation)모델 개발</li> <li>- 경사지 적용 및 안정성 향상을 위한 수확기 실시간 수평제어 기술개발</li> </ul> </li> </ul>

<p>연구개발 목표 및 내용</p>	<p>2년차</p>	<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주관기관 (국립농업과학원) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 식용 풋옥수수 수확작업 편의성 고려, 수집부 시뮬레이터 요인시험 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 탈과 후 이송된 풋옥수수의 연속 작업을 위한 적재 시스템 설계</li> </ul> </li> <li>- 풋옥수수 수확기 시작기 성능시험 및 현장 실증 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 충북, 강원 등 주산지 중심 시작기 포장성능 시험 추진 및 수확·작업성능 분석 <ul style="list-style-type: none"> <li>* 조사내용 : 수확률, 손상률, 이물질 함유율 및 수확물 손상 형태(찍힘, 멍) 등</li> </ul> </li> <li>· 풋옥수수 수확기 시작기 작업능률 및 경제성 분석 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 풋옥수수 수확기 투입에 따른 노력절감 및 비용절감 효과분석 <ul style="list-style-type: none"> <li>* 조사내용 : 관행대비 투입 노력시간, 인건비 등</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 참여기관 1 (두루기계통상) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풋옥수수 수량 및 무게 계측시스템이 적용된 수집 제어 자동화 기술개발</li> <li>- 풋옥수수 수확기 통합시작기 제작 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 트랙터 부착을 위한 옥수수 수확기 3-point hitch 프레임 제작</li> <li>· 풋옥수수 수확기 각 시스템 동력 공급을 위한 메인 기어 박스의 제작</li> <li>· 동시 작업형 고능률 옥수수 수확기 제작</li> <li>· 풋옥수수 수확기 주요부 설계</li> <li>· 탈과 후 이송된 풋옥수수의 연속 작업을 위한 적재 시스템 제작(500~1,000kg)</li> <li>· 실시간 수평 제어기술이 적용된 트랙터 연결부 유압장치 제작</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 요인시험 장비의 성능고도화 및 시험평가 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 요인시험 장비 탈과부에 추가적인 센서(유량센서, 유량밸브, 등) 부착 및 계측기 연결을 통해 요인시험 시 발생하는 부하 계측</li> <li>· 계측된 부하 데이터를 이용하여 수확기 성능에 영향을 미치는 요인 도출</li> </ul> </li> <li>- 요인시험 장비 다물체 동역학모델과 풋옥수수 이산요소모델의 연성해석모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 동역학적 분석이 가능한 요인시험 장비모델과 이산요소 분석이 가능한 풋옥수수모델의 동시 해석이 가능한 연성 해석 모델개발</li> <li>· 연성해석을 통하여 요인시험 장비-풋옥수수 간 상호작용 분석 및 설계 인자가 수확기 성능에 미치는 영향 분석</li> </ul> </li> <li>- 경사지 적응 및 안정성 향상을 위한 수확기 실시간 수평제어 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 토양 굴곡 또는 지형 경사에 의해 기울어진 차량 및 작업기의 수평 제어 기술개발</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
-------------------------	------------	-----------	--

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정성적 성과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 식용 풋옥수수 수확 일관 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>* 품종에 따른 가변형 예취부, 수확물 손상 최소화를 위한 이송·탈과부, 연속 수확물 수집 시스템, 자동화를 위한 제어 기술개발</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 정량적 성과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- (사업화지표)특허출원 3건, 기술이전 1건, 기술료 1.5백만원, 제품화 1건, 고용창출 5건</li> <li>- (연구기반지표)SCI논문 1건, 비SCI논문 2건, 학술발표 5건, 홍보 5건</li> </ul> </li> </ul>
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구개발성과의 활용방안 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 새로 개발된 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기의 조기 실용화를 위해 현장실증 추진 및 지역 적응성 향상</li> <li>- 연구결과 생산된 결과물의 산업재산권 출원 및 등록을 통해 핵심기술을 보유하고 생산업체에 기술이전을 통해 실용화 촉진</li> <li>- 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 이용방법 및 효과를 영농기술 및 정책자료로 활용</li> <li>- 기술개발 완료 후 양산설계 및 제품화를 통한 농기계 시장진입</li> </ul> </li> <li>○ 연구개발성과의 기대효과 <ul style="list-style-type: none"> <li>가. 기술적 측면 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기 개발된 식용 풋옥수수 수확기의 개선보완 및 성능향상을 통한 식용 풋옥수수 수확 기계화 기술 보급 촉진</li> <li>- 풋옥수수 기계 수확을 위한 재배양식 표준화 및 풋옥수수 수확 기계화 기술개발을 통한 식용 풋옥수수 재배 전 과정 기계화 작업체계 시스템 구축</li> <li>- 최적의 탈과 메커니즘 도출을 통한 식용 풋옥수수 수확 작업 속도, 수확율 개선 및 손상을 최소화</li> <li>- 시험 및 시뮬레이션을 사용한 식용 풋옥수수 수확 후 탈과 메커니즘의 심층 분석으로 식용 풋옥수수 수확률 및 상품성 증진 가능</li> <li>- 시뮬레이션을 통한 탈과 메커니즘 분석으로 탈과 시험에 필요한 시간적 및 경제적 비용 저감</li> <li>- 특허 출원을 통한 원천기술 확보로 풋옥수수 수확기의 독자기술 확보</li> <li>- 미개발 상태인 국내 식용 풋옥수수 수확 생력화 생산시스템 구축에 기여</li> <li>- 신기종 개발로 설계 및 제작, 생산 전문 인력 육성에 기여</li> <li>- 개발기술을 통한 유사 작물에의 기술 응용 및 상품의 다양화 시도</li> </ul> </li> <li>나. 경제적·산업적 측면 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 사료용 옥수수 수확에 비해 기계화가 미진했던 식용 풋옥수수 수확 작업의 기계화를 촉진하고 국내 농기계 산업의 대외 경쟁력 제고</li> <li>- 식용 풋옥수수 수확을 위한 동시 작업형 고능력 시스템 개발을 통해 생산 노력·비용을 절감하며 생산성을 향상함. 이를 통해 식용 풋옥수수 재배 농가의 소득 증대 효과를 기대</li> <li>- 밭 농업 수확기 개발을 통한 농촌 인력 부족 문제를 해소 및 농산물 생산비 절감을 통한 한·중 FTA 등 국제 시장 개방에 대응한 농업 경쟁력 확보</li> <li>- 식용 풋옥수수 기계 수확을 통한 상품성 있는 이삭 비율 증대</li> <li>- 식용 풋옥수수 수확기의 신규 수요 창출로 농기계 산업 활성화</li> <li>- 식용 풋옥수수 수확기의 국산화를 통한 수확기 제품가격의 안정화</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

## < 목 차 >

1장 연구개발과제의 개요 .....	7
1절 식용 풋옥수수 수확기 개요 .....	7
2절 연구개발 대상 기술의 국내외 현황 .....	10
3절 연구개발 대상 기술의 중요성 .....	15
4절 선행연구 내용 및 결과 .....	16
2장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 .....	20
1절 풋옥수수 수확기 개발을 위한 주요부 메커니즘 구명 및 현장실증 ..	20
2절 풋옥수수 수확기 설계·제작 및 성능시험 .....	34
3절 풋옥수수 수확기 탈과부 설계 최적화 및 모델 개발 .....	42
3장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 .....	63
1절 연구수행 결과 .....	63
2절 목표 달성 수준 .....	67
4장 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) .....	68
5장 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여정도 .....	69
6장 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....	70

별첨 자료

# 1장 연구개발과제의 개요

## 1절 식용 풋옥수수 수확기 개요

### ○ 옥수수 수확기 현황

- 사료용 옥수수 수확기는 수확과 동시에 줄기 및 알곡을 파쇄하기 때문에 수확 과정에서 옥수수의 손상률과 수확률에 대한 비중이 높지 않음. 또한, 사료용 옥수수 수확량이 많은 미국과 중국 등에서 개발하여 전세계로 보급하고 있음.
- 식용 옥수수 수확기는 옥수수 줄기와 잎은 파쇄하고 옥수수를 선별하여 수확하기 때문에 사료용 옥수수 수확기와 달리 옥수수의 손상률과 수확률이 매우 중요함. 현재 국내외에서 식용 옥수수에 대한 전용 수확기 개발 사례는 없으며, 사료용 옥수수 수확기를 이용하여 식용 옥수수도 수확하고 있음.
- 사료용 옥수수와 식용 옥수수는 품종이 다르고, 수확 시기도 차이가 있기 때문에 사료용 수확기로 식용 옥수수를 수확할 경우, 수확률은 낮고, 손상률은 매우 높아질 것임. 그러므로 식용 옥수수에 대한 역학적 특성을 구명하여 전용 수확기에 대한 기술 개발이 필요함.

### ○ 국내 풋옥수수의 특성을 반영한 식용 풋옥수수 수확기 기술개발

- 국내 식용 옥수수는 주로 털 여문 상태의 풋옥수수 상태로 수확되기 때문에 사료용으로 수확할 때보다 줄기의 직경과 이삭의 두께에 차이가 있으며, 상대적으로 함수율이 높음.
- 함수율이 높은 줄기와 이삭은 건조한 것(함수율이 낮은 줄기와 이삭)과 비교하여 예취에 어려움이 있기 때문에 수확 시기에 맞는 국내 풋옥수수의 함수율 및 특성을 분석한 후 그에 맞는 예취날의 두께, 각도, 개수 및 회전속도 등을 선정해야 함.
- 주산지에서 생산되는 풋옥수수를 대상으로 예취부 형태 및 기술을 개발하되, 주산지가 아닌 지역의 풋옥수수에 적용할 수 있도록 가변형 예취부와 탈과 시스템에 대한 기술개발이 필요함.
- 풋옥수수 수확은 예취, 줄기이송, 이삭 탈과, 수집 등 여러 단계를 거쳐 진행되므로 작업자의 편의와 작업의 연속성을 위해 동시 작업형 고능력 시스템을 요구함.
- 지면의 굴곡이 있거나 경사지에서도 풋옥수수 수확 작업은 균일하게 수행되어야 하므로 풋옥수수 수확기에 대한 실시간 수평 제어에 대한 기술개발이 필요함.
- 연속 수확 작업을 위한 수확물 적재 시스템(500~1000kg)과, 수확된 풋옥수수의 수량과 무게를 측정하기 위한 적재 시스템의 제어 자동화 기술도 필요함.

### ○ 연구개발 대상의 기본 개발개념

- 국내 풋옥수수 재배 농가는 외국의 대량 생산 농가와 비교했을 때 비교적 소규모임. 따라서, 제작 및 구매 단가가 높은 자주식 수확기보다는 트랙터 부착형 수확기를 개발하는 것이 국내 농가에 적합하다고 판단됨.

- 경사지 적응 및 안정성 향상을 위한 수확기 실시간 수평 제어 기술개발을 통해 작업자의 안정성 향상과 더불어 풋옥수수의 상품성 향상 추진이 필요함.
- 수확기 기술개발은 1조식을 기본으로 추진하되, 2조식으로 확장이 가능한 예취부 개발이 필요함.
- 국내 풋옥수수 특성 측정 및 요인 시험을 통하여 Top-down 방식과 Bottom-up 방식의 수확시스템 설계 및 기술개발이 필요함.
- 기존 농촌진흥청의 연구 결과인 풋옥수수 수확 기술을 도입하여 Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기에 대한 세부 설계 보완, 선행연구에서 도출된 문제점을 극복하기 위해 차별화된 예취부와 탈과부를 장착한 Bottom-up 방식 식용 풋옥수수 수확기의 별도 개발이 필요함.
  - \* Top-down 방식 및 Bottom-up 방식 대상 Two-track 연구를 통한 최적화 수확 매커니즘 도출

○ Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기

- 기존 농촌진흥청의 연구 결과인 Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기는 줄기 전체가 수확기에 투입되어 줄기는 파쇄되고 풋옥수수 이삭은 탈과 및 수확되는 방식임.
  - \* 풋옥수수 이삭은 전면 가이드와 컨베이어 벨트를 통해 적재함으로 이동
  - \* 파쇄된 줄기는 토양에 환원되기 때문에 별도의 줄기 제거 작업 불필요
- Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기의 구성
  - \* 트랙터 부착을 위한 3-point hitch 체결부
  - \* 줄기 이송 및 옥수수 이송을 위한 흡입·이송부(feeding & conveying part)
  - \* 줄기 파쇄를 위한 파쇄부(crushing part)
  - \* 이송된 풋옥수수 이삭 수집을 위한 수집부(collection part)
- Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기의 동력전달 및 수확 매커니즘
  - \* 트랙터 동력취출장치(power take off, PTO)로 전달된 동력을 옥수수 수확기 증속 기어박스과 1&2차 구동폴리에 전달, 흡입·이송 롤러와 파쇄날에 동력을 분배하여 줄기 파쇄 및 풋옥수수 수집
  - \* 줄기가 서로 이격되어 반대방향으로 회전하는 1쌍의 흡입·이송 롤러 사이로 투입
    - ※ 고당옥 등 협착고가 낮은 특성을 지닌 품종 수확 시 수확성능 저하현상 발생
  - \* 흡입·이송 롤러 하부에 위치한 파쇄날에 의해 줄기가 순차적으로 파쇄
    - (줄기 이송 방향: 위에서 아래로 (Top-down))
    - ※ 수확작업 시 기후조건으로 인해 줄기 함수율이 높을 시 흡입·이송 롤러에서 슬립현상 발생
  - \* 풋옥수수 이삭은 흡입·이송 롤러 상부에 위치한 탈과관에 의해 줄기에서 분리되어 이송
    - ※ 줄기가 파쇄되면서 풋옥수수 이삭이 탈과관에 접촉 시 멍, 찌힘 등 수확물 손상현상 발생

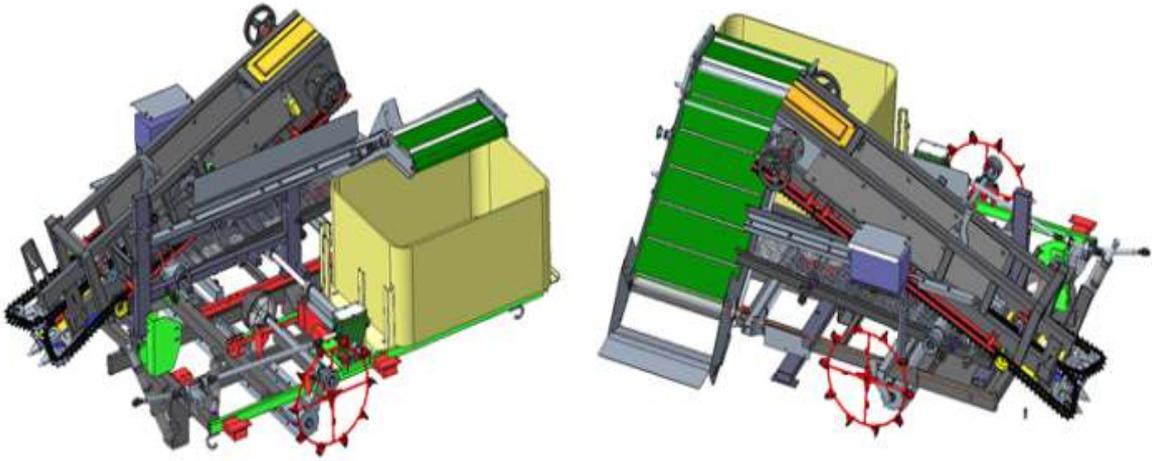


그림 1. 연구개발 대상#1인 Top-down 방식 식용 옥수수 수확기의 개념도

○ Bottom-up 방식 식용 풋옥수수 수확기

- 풋옥수수 종자에 따라 줄기의 하단부에 풋옥수수 이삭이 열리는 경우, 기존 농촌진흥청에서 개발한 Top-down 방식 식용 풋옥수수 수확기는 수확 작업에 적용 불가함.
- 일본에서는 줄기의 하단부에 풋옥수수가 열리는 종자에도 수확기 적용을 위해 Bottom-up 방식 식용 풋옥수수 수확기를 개발함.
- Bottom-up 방식은 Top-down 방식과 달리 예취부에 상승 가변실린더를 설치하여 풋옥수수 줄기를 위로 들고, 이송 벨트로 줄기를 이송한 다음 탈과물리를 통해 풋옥수수 이삭을 탈과 및 수확함.
- 풋옥수수 줄기는 풋옥수수 탈과·수확 후에 토양에 환원하므로 Top-down 방식과 마찬가지로 별도의 줄기 제거 작업 불필요 (줄기 이송 방향: 아래에서 위로 (Bottom-up 방식))
- 기존 매커니즘과 차별화된 예취부와 탈과부 뿐만 아니라 대용량 적재시스템(무게 및 수량 계측)을 탑재하여 작업의 연속성 및 작업자의 편리성 증대

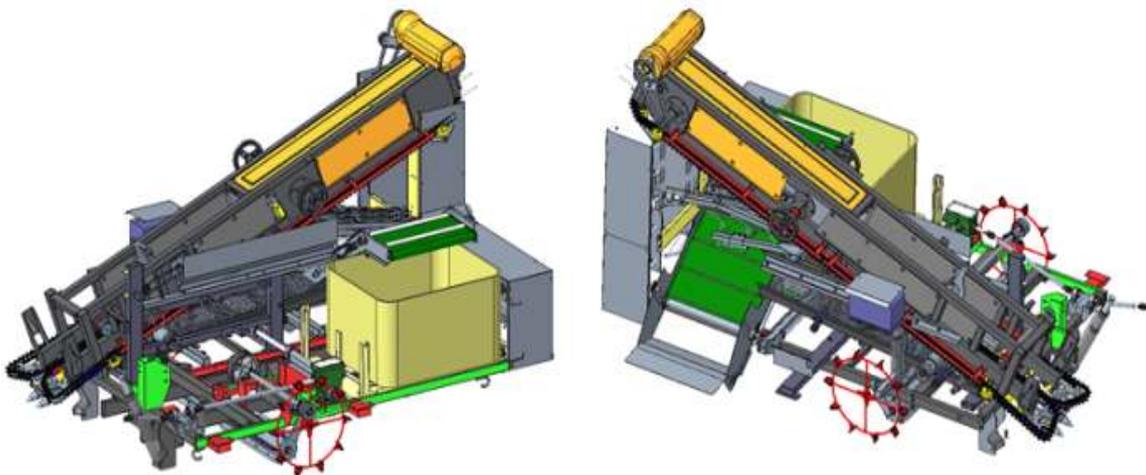


그림 2. 연구개발 대상#2인 Bottom-up 방식 식용 옥수수 수확기의 개념도

- Bottom-up 방식 식용 풋옥수수 수확기의 핵심 설계 요소
  - \* 상승/하강 가변 실린더 적용을 통한 예취부 높이 조절 시스템
  - \* 컨베이어 시스템 적용 이송 시스템
  - \* Bottom-up 방식의 풋옥수수 수확을 위한 탈과 시스템
  - \* 수확량 계측 기술이 적용된 대형 적재부
  - \* 줄기 파쇄 장치

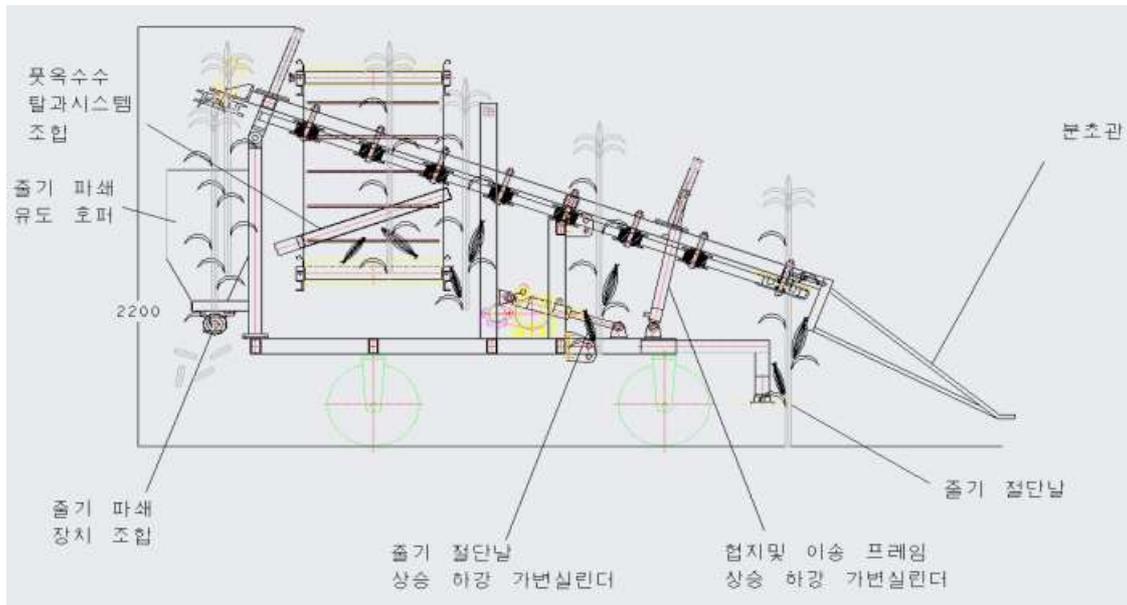


그림 3. 연구개발 대상#2인 Bottom-up 방식 식용 옥수수 수확기의 개념도

## 2절 연구개발 대상 기술의 국내외 현황

### ○ 국내 기술 수준 및 시장 현황

- 국내에서 주로 개발 및 보급 중인 옥수수 수확기는 덜여문 상태의 풋옥수수 수확보다 축산업을 위해 익은 옥수수 이삭의 낱알을 분리 및 수집하는 옥수수 수확기임.
- 국내에서 사용 중인 사료용 옥수수 수확기는 트랙터 부착형 또는 자주식 수확기이며, 트랙터 부착형에 비해 자주식은 고가의 수입품인 경우가 많아 농가의 경제적 부담이 매우 큼. 이를 해결하기 위하여 작업 규모를 산출하여 대형 기계를 공동 구매하거나 정부의 지원을 받고 있음
- 트랙터 후방 부착형 옥수수 수확기: 트랙터 후방에 수확기를 장착하여 후진하면서 옥수수를 예취하고, 전방에 옥수수 적재함을 부착하여 수확하는 방식의 옥수수 수확기가 있음. 수확 작업 시 후진으로 진행하면서 작업하기 때문에, 작업자의 자세가 좋지 못하여 장시간 작업이 불가능함. 또한 적재함이 전방에 있어 이동시 안전사고의 위험이 있음.



그림 4. 트랙터 후방 부착형 옥수수 수확기

- 트랙터 전방 부착형 옥수수 수확기: 트랙터의 전방에 수확기를 장착하는 방식임. 전방 장착 수확기를 사용하기 위해서는 전방 PTO가 있는 트랙터를 사용해야 하나, 이는 매우 고가의 수입 트랙터에만 장착되어 있어 수확기 사용이 어려움. 또한, 선취 시 차륜에 의한 작물 손실이 발생하게 되는데, 주로 영세한 규모로 옥수수가 재배되는 국내 옥수수 농업환경을 감안하면 도입이 어려운 상황임.



그림 5. 트랙터 전방 부착형 옥수수 수확기

- 트랙터 측면 부착형 옥수수 수확기: 트랙터의 후방 PTO를 주로 사용하며, PTO 동력을 트랙터 측면에 있는 수확기의 예취부, 탈과부 및 수집부로 전달하여 옥수수를 수확하는 방식임. 트랙터의 왼쪽 또는 오른쪽에 수확기가 장착되며 대부분 수확기의 위치를 변경할 수 없기 때문에 연속 작업이 불가능함. 이러한 이유로 다른 방법에 비해 작업 효율이 낮음.



그림 6. 트랙터 측면 부착형 옥수수 수확기

- 자주식 옥수수 수확기는 기계 자체에 엔진이나 전동기와 같은 동력원과 주행장치를 함께 가진 수확기로서, 국내에서는 개발된 사례가 없기 때문에 수입에 의존하고 있으며, 상대적으로 고가의 농기계이기 때문에 도입이 쉽지 않음.



그림 7. 자주식 옥수수 수확기

○ 옥수수 소비 현황 및 국내 재배여건

- 옥수수는 쌀 다음으로 생산량이 많아 벼와 밀과 더불어 세계 3대 작물 중 하나이며, 2014년 기준 세계 생산량은 약 9억 7300만톤에 이르고 있으며 생산량 역시 증가하고 있는 추세임.

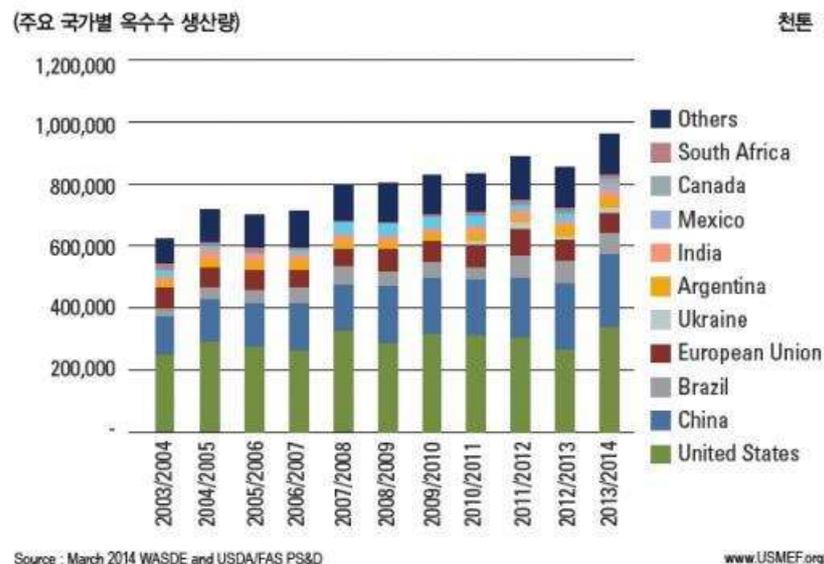


그림 8. 세계 옥수수 생산량 (출처: 2014 WASDE & USDA/FAS PS&D)

- 옥수수는 사람이 먹기도 하고, 사료용은 물론 에탄올 제조까지 다양하게 쓰이고 있기 때문에 소비량이 증가하고 있는 추세임. 2013년 옥수수 소비량은 약 8억 6984만톤이며 2016년을 기준으로 생산량보다 소비량이 증가하는 추세임.

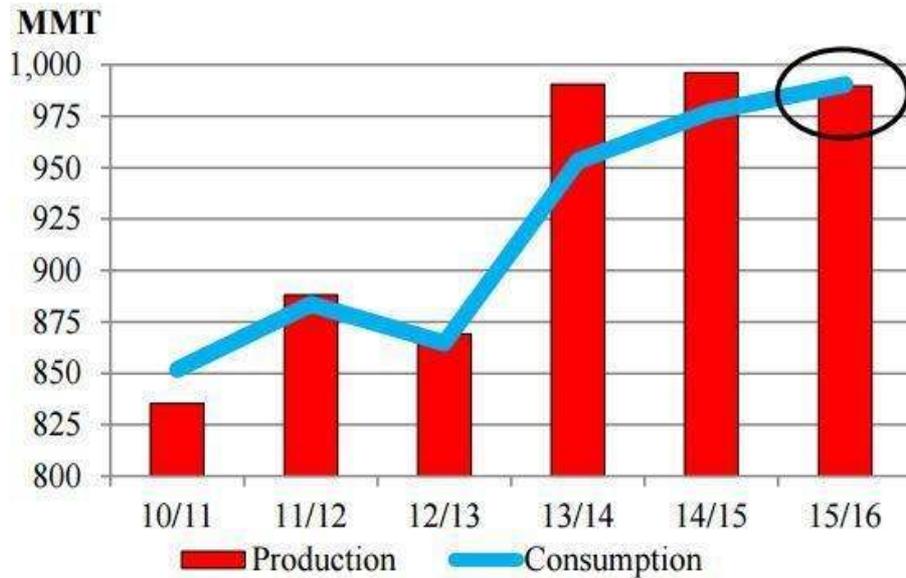


그림 9. 세계 옥수수 생산량 및 소비량 (출처: 2014 WASDE & USDA/FAS PS&D)

- 밭농업의 기계화율은 2019년을 기준으로 61.9%인 것으로 조사되었지만, 실제 밭농업에 종사하고 있는 농민들에게는 훨씬 낮은 것으로 인식되고 있음. 이는 밭농업에 있어 가장 노동력이 필요한 파종, 정식, 수확 작업에 대한 기계화율은 매우 낮은데 비해 경운, 정지 작업과 방제, 비닐 피복과 같은 상대적으로 노동력이 낮게 투입되는 작업에 대한 기계화율이 높기 때문임.

### 밭농업 기계화율 단위: %

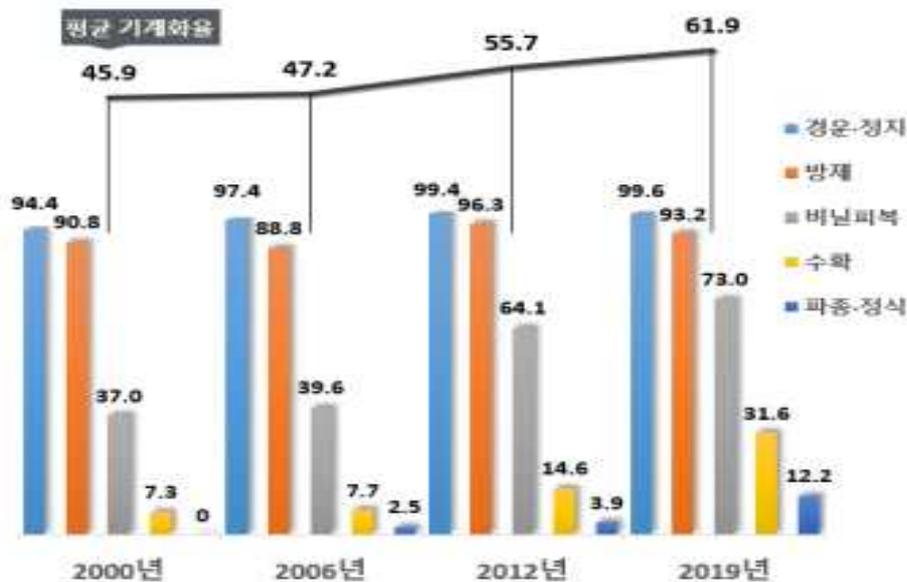


그림 10. 밭농업 기계화율 (출처: 농업기계이용실태조사)

- 식용 풋옥수수 수확기의 경우 보행형 관리기 타입을 제외한 자주식 수확기나 트랙터 부착형 수확기는 국내에서는 개발된 바 없으며 업체에서는 사료용 옥수수 수확기를 수입하여 판매하고 있음.

○ 국외 기술 수준 및 시장 현황

- 미국의 경우 대규모 재배에 적합한 대형의 사료용 및 식용 옥수수 수확기가 개발되어 보급 중이며, 수확시기 옥수수의 줄기와 잎이 건조되어 기계수확에 유리함.
- 식용 옥수수 수확기는 콤바인 형태의 자주식 수확기 및 트랙터 부착형으로 개발되었으며, 줄기째 예취하여 줄기 및 잎은 파쇄하고, 옥수수만 선별·정선하여 수집함.
  - \* 옥수수의 알곡만 탈립하여 수확하는 가공용 옥수수 수확기도 보급 중
- 사료용 옥수수 수확기는 국내보급 기종과 동일하며, 사료용으로 재배된 옥수수를 줄기째 예취하여 줄기 및 옥수수를 파쇄하여 사료용으로 수확함.



그림 11. 미국 옥수수 수확기

- 중국의 경우 ‘길림성 옥수수 수확기 프로젝트(2008)’ 추진으로 자국의 실정에 맞는 옥수수 수확기를 개발하여 보급 한 사례가 있음.
- 중국 옥수수 지대인 길림성 등 동북3성의 옥수수 기계수확률은 5%에 불과하여, 총 300 억원 투자, 연간 3,000대 규모의 옥수수 수확기 생산 추진함.



그림 12. 중국 옥수수 수확기

- 그 외 옥수수 수확을 많이 하는 유럽, 일본을 중심으로 옥수수 수확기를 개발하고 있음. 유럽의 경우 400마력급 이상의 동력 본체로 자주식 옥수수 수확을 하는 형태임. 독일의 Kemper사는 옥수수 수확기의 본체를 생산하는 대표적인 기업이며 그 외에는 일본의 Takakita, 영국의 Claas가 있음. Claas Xerion 시리즈와 Kemper 400 시리즈 등이 국내에서 대표적인 수입 옥수수 수확기인 것으로 파악됨.



그림 13. 유럽 및 일본의 옥수수 수확기

### 3절 연구개발 대상 기술의 중요성

#### ○ 농촌일손 및 식용 풋옥수수 재배 현황

- 통계청에서 발표한 '통계로 본 쌀 산업구조 변화' 보고서에서 2018년 농촌 인구 고령화율은 44.7%인 것으로 보고함. 특히 2000년대 들어선 연 1% 포인트대 증가세를 보여왔지만, 2017년 이후로 연 2% 포인트씩 상승하면서 오름폭이 커진 것으로 보고함.



그림 14. 농촌인구 고령화율 (출처: 2019 통계청)

- 농촌인구 고령화로 노동시간 투입이 적고, 기계화율이 높은 벼농사를 선호하는 추세가 나타나고 있음. 또한 10a당 벼 전체 생산 시간은 16.29시간(2019년)인 반면, 2021년 기준 옥수수는 10a당 56.8시간 투입이 필요하며 그 중 수확 작업은 전체 단계 중 가장 많은 16.8시간(29.6%)을 차지하는 것으로 나타남. 이에 밭농업의 노동 투입시간 절감을 위한 기계화가 반드시 이루어져야 함
- 밭농업 기계화율은 약 61.9%으로 최근 10년간 약 10% 증가하였지만, 이앙기와 콤바인을 이용하는 벼농사의 약 98.6% 기계화율과 비교하여 부족한 실정임. 벼농사용 기계를 공용으로 활용하는 경운·정지, 방제 작업을 제외하면 밭농업 기계화는 매우 미흡한 실정으로 파종·정식 및 수확 작업에 농업기계 개발이 필요함.

표 1. 밭농업 기계화율 (출처: 2019 농업기계 이용실태 조사)

연도	평균	주요 작업별 기계화율(%)				
		경운정지	과종·정식	비닐피복	방 제	수 확
'16	58.3	99.9	8.9	66.8	92.0	23.9
'20	61.9	99.6	12.2	73.0	93.2	31.6
벼	98.6	100	100	-	98.0	100

- 관세청 농축수산물 수입가격 자료에 따르면 우리나라는 옥수수 수입의 비중이 매우 높은 편이며, 매년 수입량이 증가하는 추세를 보이고 있음. 논 대체 밭작물 재배 및 간척지 활용성 증대를 위해 경쟁력 있는 품목으로 풋옥수수가 유망하나, 수입산 대체 등 노동력 절감을 통한 생산성 향상을 위해서는 수확기 개발이 반드시 필요함.
- 옥수수 재배는 식용과 사료용으로 구분되며, 과종작업은 곡물 과종기가 개발되어 보급이 활발하고, 수확에 있어 사료용은 기계화가 되었으나 식용은 인력에 의존하고 있음.
- 생산-가공-유통이 연계된 규모화된 풋옥수수 재배지역이 늘어나고 있으나, 농업 노동력 고령화 및 감소로 수확 작업 시 인력확보가 어려워 수확기계 개발 요구도가 높음. 또한 지역별 특화 품목으로 풋옥수수를 이용한 생산과 가공이 연계된 집단재배지가 증가하고 있지만, 수확 작업 시 인력확보가 어려우며 인건비가 증가 추세이기 때문에 옥수수 수확기에 대한 기계화 요구는 높아지고 있음.
- 논 이용 밭작물 재배 확대에 따른 풋옥수수 재배 증가로 식용 풋옥수수 수확기 개발 및 실용화가 시급함. 이를 위한 부·청 협력연구로 기 개발 식용 풋옥수수 수확기('19, 농진청)의 성능 향상 및 산업화 연구를 통한 실용화 기반 마련이 필요함. 작업속도 증대, 수확물 손상률 저감 등 수확성능이 향상이 필요함.

#### 4절 선행연구 내용 및 결과

- 국내의 경우, 옥수수 수확기 개발 관련 연구는 탈립기, 포엽기 등의 연구가 수행되었으며, 식용 풋옥수수 수확기에 관한 연구는 최근 농촌진흥청에서 수행 및 개발되었음.('19, 식용 풋옥수수 수확 기계화 기술 개발)
  - 국내 보급되고 있는 옥수수 수확기는 사료용 옥수수를 수확하는 기계로 줄기 및 이삭의 낱알을 수집하는 형태로 자주식과 트랙터용 작업기가 보급되고 있음.
- 옥수수 탈립기 개발 및 작업조건 구명(1985, 농과원)
  - 탈립률은 옥수수의 수분함량이 낮고, 탈곡부 회전속도가 높을수록 증가하지만, 손상률 또한 탈곡부 회전속도가 높을수록 증가하는 것으로 분석되었으며, 옥수수 수분함량 16%, 탈곡부 회전속도는 600rpm에서 손상율은 2.5%로 가장 양호하였음.
- 식용 풋옥수수 포엽 제거를 위한 옥수수 포엽 제거기 개발(2009, 농과원)
  - 포엽 제거율 79.3%, 손상율 6.7%로 양호하며, 성능은 1200개/시간으로 인력 450개 대비 62.5% 노력절감 및 35% 비용절감 효과가 있음.

○ 식용 풋옥수수 수확 기계화 기술 개발(2019, 농촌진흥청)

- 식용 풋옥수수 수확 기술 개발 목표

\* (재배양식) 풋옥수수 수확 기계화 적응 재배양식 설정 : 1주 2본 재배, 조간 70 cm, 주간 40 cm

\* (기계개발) 식용 풋옥수수 수확기 개발

※ 트랙터 부착형, Full-feed 방식 1조식, 예취+이송+줄기파쇄+탈과+수집 일관 작업형

※ 작업성능 : 3.5시간/10a, 수확율 : 95.7% 이상

\* (기대효과) 식용 풋옥수수 수확 작업시간 80% 및 소요비용 25% 절감

※ 작업시간 : (관행) 17.5시간/10a → (수확기) 3.5시간/10a

※ 소요비용 : (관행) 326,625원/10a → (수확기) 236,553원/10a



그림 15. 풋옥수수 수확 시작기 및 기계 수확 매커니즘

- 식용 풋옥수수 수확기 포장 성능 시험결과

\* 단옥수수(고당옥) 대상 풋옥수수 수확기 포장 성능 시험(19.07.15, 고령)

※ 작업속도(0.10, 0.13, 0.17 m/s)에 따른 옥수수의 탈과율, 손상율 등 수확 성능 분석

※ 시험대상 : 파종 후 86일이 지나 수확된 옥수수(옥수수 수확적기 90~100일)

※ 작업속도 0.17 m/s에서 미탈과율 및 손상률이 가장 낮게 나타남

※ 품종 특성상 착협고가 낮아 기계수확 적응성 미흡 → 손상률(찍힘 현상) 20~30%



a. 작물 생육조사

b. 포장 성능시험

c. 수확성능 분석

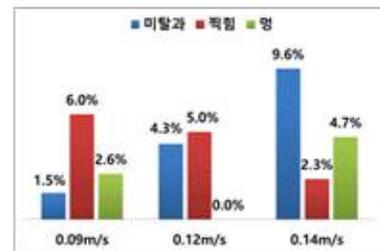
그림 16. 단옥수수(고당옥) 시험

\* 찰옥수수(일미찰) 대상 풋옥수수 수확기 포장 성능 시험(19.08.13, 수원)

※ 탈과속도(757.3, 851.24, 1,318.7 rpm) 및 작업속도(0.10, 0.13, 0.17 m/s)에 따른 풋옥수수의 탈과율, 손상율 등 수확 성능 분석

※ 공시작물 : 일미찰 풋옥수수(파종 후 105일째에 수확)

※ 탈과속도 851.2 rpm, 작업 속도 0.12 m/s 에서 미탈과율, 손상률 등이 가장 낮게 나타남.



a. 작물 생육조사

b. 탈과속도에 따른 성능 분석

c. 작업속도에 따른 성능분석

그림 17. 찰옥수수(일미찰) 시험

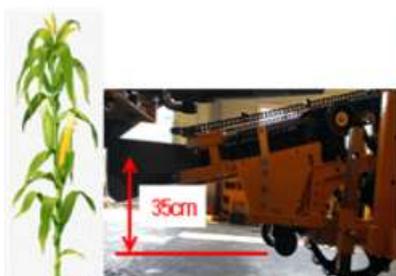
- 식용 풋옥수수 수확기 보완사항 도출

\* (예취부) 풋옥수수 품종에 따른 기계 수확 적합성 향상을 위한 가변 제어기능 필요

※ 풋옥수수의 착협고는 고당옥 26.7 cm, 황금맛찰 81.27 cm, 일미찰 119.4 2 cm 인 것으로 분석됨.

※ 고당옥 품종의 경우, 개발한 시작기의 한계 예취높이(35 cm)보다 착협고가 낮아 기계 수확의 효과가 낮은 것으로 나타남.

※ 풋옥수수 품종에 따른 예취 높이가변 제어 기능이 적용된 풋옥수수 수확기의 개발이 필요함.



a. 시작기 한계 예취 높이



b. 수확물 손상(찌킴)



c. 수확물 손상(명)

그림 18. 수확기 한계 예취높이 및 수확물 상태

\* (이송/탈과부) 수확물 탈과율 향상 및 손상률 저감 등 이송·탈과 메커니즘 개선 필요

※ 줄기의 함수율, 강도 등 풋옥수수의 생육 상태에 따른 수확 성능 편차 발생

※ 줄기의 강도가 낮을 시 미탈과 현상이 발생하며 줄기의 함수율이 높을 경우 옥수수 이송 롤러에서 슬립 현상 발생

※ Head-feed 방식 메커니즘에 대한 탈과부 기술 연구 및 기 개발 메커니즘(Full-feed 방식)에 대한 개선을 통해 풋옥수수 특성에 적합한 이송·탈과 메커니즘 개선



a. 슬립현상                      b. 수확물 미탈과                      c. Head-feed 방식 메커니즘  
 그림 19. 수확기 작업불량 현상 발생 및 Head-feed 방식 메커니즘

- \* (수집부) 수확 작업의 연속성 및 작업 능률 향상을 위한 이송 및 수집 장치 고도화 기술 개발
  - ※ 기 개발된 풋옥수수 수확기의 경우 망에 수집하는 형태로, 잦은 망 교체로 인한 작업 능률의 저하가 발생하기 때문에 작업 효율을 향상하기 위한 기술 개발이 필요
  - ※ 500~1,000kg의 대용량 수확물 저장장치 채용 및 제어기술 개발
  - ※ 수확물 수량 및 무게 계측 기술을 적용한 수집부 제어 자동화 등 수집부의 편의성 향상 필요



그림 20. 무게 계측 기술 개발 예시(차량 무게)

- \* (기타) 국내 재배여건을 고려한 풋옥수수 기계 수확작업 방안 도출
  - ※ 시작기 줄기 파쇄날 및 이송·탈과 롤러 지상고 낮춤 등 구조적 보완 필요
  - ※ 경사지에서의 옥수수 수확기 적용 및 수확기의 자세의 안정성을 도모하기 위한 옥수수 수확기의 실시간 수평 제어 기술 개발 필요

## 2장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용

### 1절 풋옥수수 수확기 개발을 위한 주요부 메커니즘 구명 및 현장실증

#### 1) 1차년도 수행과정 및 수행내용(국립농업과학원)

- 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 주요부 통합시험장치 요인시험 및 메커니즘 구명
  - 줄기 예취 및 이송, 풋옥수수 이삭 탈과 및 수집, 줄기파쇄 일관작업형 수확기 주요부 통합 시험장치 요인시험
    - \* 통합시험장치 주요 특징
      - ※ 트랙터 P.T.O를 통한 통합시험장치 유압펌프 구동 및 주요부 유압모터 작동
      - ※ 줄기 예취부, 줄기 이송부, 풋옥수수 이삭 탈과부 유압모터 적용
  - 통합시험장치 주요부 1차 작동시험
    - \* 시험장소 : 충남 아산시 두루기계통상 소재 풋옥수수 재배포장
    - ※ 공시품종 : 일미찰(찰옥수수), 고당옥(단옥수수)

표 2. 통합시험장치 1차 작동시험 시험포장 풋옥수수 재배양식

품 종	주간(cm)	조간(cm)	두둑폭(cm)	두둑높이(cm)
일미찰(찰옥수수)	39.9	123.6	41.4	17.0
고당옥(단옥수수)	40.0	80.0	40.0	12.5

표 3. 통합시험장치 1차 작동시험 시험포장 풋옥수수 생육특성

품 종	줄기길이(cm)	착협고(cm)	엽수(개)
일미찰(찰옥수수)	204.8	80.4	11
고당옥(단옥수수)	170.0	40.0	7

- \* 작동시험 방법 : 풋옥수수 연속 수확작업 및 주요부 작업상태 확인
  - ※ 작업조건 : 트랙터 작업속도 0.12 m/s, 엔진 2,000 rpm, PTO 540 rpm 고정
- \* 1차 작동시험 결과 및 보완사항
  - ※ (예취부) 예취 전 줄기와 벨트 접촉 및 인발로 인한 벨트 풀림 현상 발생
    - ☞ 예취날 위치 조정을 통한 줄기와 벨트 접촉 타이밍 조절
  - ※ (이송부) 이물질 끼임 및 탈과부 줄기 걸림으로 인한 벨트 풀림 발생
    - ☞ 이송부 롤러 가이드 적용을 통한 벨트 이탈 방지 등 보강 설계 필요

- ※ (탈과부 및 파쇄부) 유압모터 출력저하로 인한 미작동 현상 발생 및 성능 저하
  - ☞ 출력저하 현상 방지를 위한 주요부 필요유량 검토 등 유압회로 재설계 필요



a. 이송벨트 풀림                      b. 탈과롤러 줄기 걸림                      c. 탈과 후 줄기 미배출

그림 21. 통합시험장치 보완사항 도출

- 통합시험장치 주요부 2차 작동시험

\* 시험장소 : 충청남도 아산시 두루기계통상 소재 풋옥수수 재배포장

※ 공시품종 : 대학찰(찰옥수수)

표 4. 2차 작동시험 공시작물(대학찰) 물성 및 재배양식

	조건 (cm)	주간 (cm)	두둑높이 (cm)	두둑폭 (cm)	줄기경(cm)		
					상	중	하(밑단)
	40	25	13.8±0.8	39.3±1.2	2.1±0.3	1.8±0.4	0.7±0.1
	초장 (cm)	착협고 (cm)	엽수 (개)	이삭수 (개)	이삭길이 (cm)	이삭굵기 (cm)	함수율 (%w.b.)
	208.8±20.5	95.6±8.7	9.6±0.9	1.0±0.0	30.3±3.7	4.1±0.5	81.16

\* 작동시험 방법 : 탈과롤러 형태에 따른 풋옥수수 연속 수확작업 및 성능비교·분석

※ 작업조건 : 작업속도 2수준(0.13 m/s, 0.19) 엔진 2,000 rpm, PTO 540 rpm 고정

\* 2차 작동시험 결과 및 보완사항

※ 풋옥수수 이삭이 위치한 높이 부근의 줄기를 벨 수 있도록 예취날 추가 적용 및 이송성능 향상

☞ 찰옥수수 대비 줄기길이 및 착협고가 낮은 단옥수수 수확 시 1단 예취날로만 작업

※ 대학찰 옥수수의 경우 탈과율이 7~14%로 기계수확 적응성이 미흡한 것으로 분석됨.

☞ 풋옥수수 이삭과 줄기가 연결되어있는 대가 타품종 대비 길기 때문에 탈과효율이 저하됨.

※ 스크류타입 롤러는 표면에 홈이 성형되어있어 풋옥수수 이삭과 마찰면적이 민무늬 타입 롤러보다 크기 때문에 더 높은 탈과율을 나타낸 것으로 판단됨.

☞ 스크류타입 롤러의 경우 홈 성형으로 인해 양산이 어려움. 따라서 스크류타입 대비 탈과성능이 미흡하게 나타난 민무늬타입 롤러를 수확기에 적용하고 탈과각도, 탈과롤러 속도 등 다른 요인의 최적화를 통해 목표 탈과성능을 달성할 예정임.

표 5. 2차 풋옥수수 수확기 통합시험장치 작동시험 결과

탈과롤러 형태	작업속도(m/s)	탈과율(%)
민무늬타입	0.13	7.8
	0.19	1.7
스크류타입	0.13	14.0
	0.19	7.5



a. 작업광경



b. 재배양식 및 생육조사



c. 예취날 2개 적용



d. 민무늬타입 롤러



e. 스크류타입 롤러

그림 22. 통합시험장치 2차 작동시험

- 통합시험장치 주요부 3차 작동시험

\* 시험장소 : 충청북도 괴산시 농가 소재 풋옥수수 재배포장

※ 공시품종 : 대학찰(찰옥수수)

표 6. 3차 작동시험 공시작물(대학찰) 물성 및 재배양식

	조건 (cm)	주간 (cm)	두둑높이 (cm)	두둑폭 (cm)	줄기경(cm)		
					상	중	하(밑단)
	101.1	36.1	15.9±0.9	44.2±2.3	1.7±0.2	1.4±0.1	0.6±0.1
	초장 (cm)	착협고 (cm)	엽수 (개)	이삭수 (개)	이삭길이 (cm)	이삭굵기 (cm)	함수율 (%w.b.)
	184.2±15.3	50.4±12.1	6.4±0.7	1.0±0.0	39.5±4.0	4.8±0.6	57.15

표 7. 통합시험장치 주요부 구동조건

예취날(rpm)		이송벨트 유압모터 (rpm)	탈과롤러(rpm)		수확물 이송벨트(rpm)	
상	하		좌	우	1차	2차
1,373.7	1293.7	33.67	372.7	419.7	100	117

\* 작동시험 방법 : 탈과롤러 형태에 따른 풋옥수수 연속 수확작업 및 성능비교·분석

※ 작업조건 : 작업속도 3수준(0.12 m/s, 0.16, 0.21), 엔진 2,000 rpm, PTO 540 rpm 고정

\* 3차 작동시험 결과 및 보완사항

※ 대학찰 옥수수의 경우 탈과율이 57~70%로 2차 작동시험 대비 향상되었으나 수확 후 처리작업이 필요한 것을 고려하였을 때, 기계수확 적응성이 부족한 것으로 판단됨.

☞ 일미찰, 황금맛찰 등 다른 품종과의 탈과율 성능 비교·분석하여 기계수확에 적합한 풋옥수수 도출 필요

※ 풋옥수수 이삭 탈과 후 1차 횡이송 컨베이어에서 2차 컨베이어로 이삭이 이송될 때 높은 경사각으로 인해 낙하 및 미수집 현상이 발생한 것으로 나타남.

☞ 차후 시작기 제작 시 수집부 2차 컨베이어 경사각 완화를 통한 미수집 현상 발생 방지 필요

※ 수집된 풋옥수수 이삭의 상태 확인 결과 손상률이 0~1%로 나타나 Bottom-up 타입의 탈과 메커니즘이 기계수확에 적합한 것으로 판단됨.

표 8. 3차 풋옥수수 수확기 통합시험장치 작동시험 결과

탈과롤러 형태	작업속도(m/s)	탈과율(%)	수집률(%)	손상률(%)
민무늬타입	0.12	67.8	63.7	0.0
	0.16	69.5	63.3	0.0
	0.21	57.2	60.1	0.0



a. 시험포장



b. 작업광경-1



c. 작업광경-2

그림 23. 통합시험장치 3차 작동시험 작업광경



a. 미탈과 수확물                      b. 수확물 미수집 발생                      c. 수집부 이송벨트 경사각  
 그림 24. 통합시험장치 3차 작동시험 보완사항 도출

- 풋옥수수 수확기 탈과부 설계 요인 최적화 시험

\* 시험장소 : 전라북도 전주시 농업공학부 발농업기계종합연구동

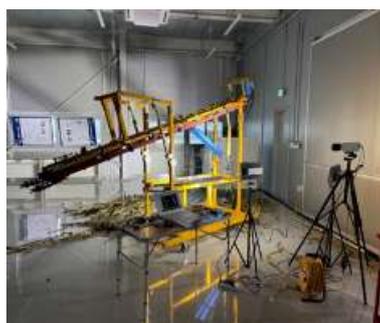
※ 공시품종 : 대학찰(찰옥수수)\_괴산 공시작물 활용

\* 시험요인 : 탈과각도 3수준(130°, 135, 140), 탈과롤러 회전속도 3수준(120 rpm, 150, 180)

※ 옥수수 알곡 함수율 22~24% 조건에서 자주식 옥수수 수확기의 탈곡통 회전속도를 356rpm으로 구동하였을때, 손상률이 감소하는 결과가 나타남. 풋옥수수 수확시기 이삭 함수율이 70~80% 인 것을 고려하여 회전속도를 1/2~1/3 수준으로 설정

\* 시험방법 : 초고속 카메라 활용, 탈과각도에 따른 줄기로부터 풋옥수수 이삭이 분리되는 시간 측정

※ 촬영된 영상은 해상도 1,280×720 mm, Framerate[FPS] 600, Frame to acquire 9,000 조건으로 변환



a. 시험요인                                      b. 작업광경-1                                      c. 작업광경-2  
 그림 25. 풋옥수수 수확기 탈과부 설계요인 최적화 시험

\* 풋옥수수 수확기 탈과부 설계 요인 최적화 시험결과

※ 탈과각도 130°, 탈과롤러 회전속도 180 rpm일 때 탈과 소요시간은 1.00 s로 가장 양호하게 나타났으며, 탈과롤러 회전속도가 증가함에 따라 탈과 소요시간이 감소하는 것으로 분석됨.

☞ 탈과각도의 경우 요인에 따른 탈과 소요시간의 차이는 나타나지 않았으며, 풋옥수수 수확기의 탈과부 성능은 탈과 롤러 회전속도에 주로 영향을 받는 것으로 판단됨.

표 9. 탈과부 시험요인에 따른 탈과 소요시간

구 분		탈과롤러 회전속도(rpm)		
		120	150	180
탈과각도 (°)	130	1.34s	1.29s	1.00s
	135	2.22s	1.53s	1.12s
	140	1.31s	1.19s	1.09s

2) 2차년도 수행과정 및 수행내용(국립농업과학원)

○ 풋옥수수 수확기 수집부 시뮬레이터 요인시험

- 풋옥수수 수확작업의 편의성을 고려하여 연속으로 풋옥수수를 수집할 수 있는 수집부 시뮬레이터 요인시험 수행
  - \* 두루기계통상 협조를 통한 통합 시험장치 설계·제작
  - \* 시험장소 : 전라북도 전주시 농업공학부 발농업기계종합연구동
    - ※ 공시품종 : 대학찰(찰옥수수)\_괴산 공시작물 활용
  - \* 시험요인 : 이송속도 3수준(0.18 m/s, 0.24, 0.30), 이삭 투입량 270개
    - ※ 관행작업에서 주로 쓰이는 파렛트상자 대비 대량의 풋옥수수를 수집할 수 있는 500 kg 톤백 적용
  - \* 시험방법 : 이송속도에 따른 풋옥수수 손상률, 이삭 수량 및 무게 계측 오차율 측정 및 분석



a. 시험요인



b. 작업광경



c. 이삭 수량 및 무게 계측



d. 풋옥수수 이삭 톤백 적재



e. 손상률 분석

그림 26. 풋옥수수 수확기 수집부 시뮬레이터 요인시험

\* 풋옥수수 수확기 수집부 시뮬레이터 요인시험 결과

※ 이송속도(0.18 m/s, 0.24, 0.30)에 상관없이 손상률 0%, 수량 계측 오차율 2% 미만으로 나타났으며, 풋옥수수 최대 적재수량은 약 800개, 최대 적재무게는 약 180 kg으로 측정됨.

☞ 당초 수집부의 적재 목표인 500~1,000 kg에 미치지 못하였지만, 풋옥수수의 10 a당 생산량이 500~600 kg이며 10 a 작업 시 톤백을 3번만 교체해도 되기 때문에 기계발식용 풋옥수수 수확기 대비 수집작업 효율성은 향상될 것으로 판단됨.

표 10. 수집부 시험요인에 따른 성능분석

구 분	손상률(%)	수량 계측 오차율(%)
이송속도 (°)	130	0.0
	135	0.0
	140	0.0

○ 풋옥수수 수확기 시작기 1차 포장성능시험

- 풋옥수수 품종에 따른 시작기의 수확성능을 측정 및 분석하기 위하여 일미찰 품종을 대상으로 포장성능 시험을 수행함.

\* 두루기계통상 협조를 통한 통합 시작기 설계·제작

\* 시험장소 : 경상남도 밀양 남부작물부 소재 풋옥수수 시험포장

※ 공시품종 : 일미찰(찰옥수수)

\* 시험요인 : 작업속도 3수준(0.10 m/s, 0.13, 0.17), 엔진 1,500 rpm, PTO 540 rpm 고정

※ 주요부 구동조건 : 탈과롤러 회전속도 180 rpm, 수집부 이송속도 0.30 m/s 고정

\* 시험방법 : 작업속도에 따른 10 m 구간 수확작업 후 탈과율, 수집률, 손상률 등 측정 및 분석

\* 시험결과

※ 공시품종 및 포장조건은 아래 표 11과 같으며, 정식 후 84일째 수확으로 수확 적기 대비, 건조 상태로, 이삭의 함수율은 62.4%으로 분석됨

표 11. 시작기 1차 포장성능시험 공시작물(일미찰) 물성 및 재배양식

	조건 (cm)	주간 (cm)	두둑높이 (cm)	두둑폭 (cm)	줄기경(cm)		
					상	중	하(밑단)
	47.7	25.9	21.7±1.5	94.5±1.9	7.0±0.6	17.8±1.4	26.8±1.7
	초장 (cm)	착협고 (cm)	엽수 (개)	이삭수 (개)	이삭길이 (cm)	이삭굵기 (cm)	함수율 (%w.b.)
	200.4±13.2	67.9±9.4	10.7±0.8	2.2±0.4	35.1±3.1	5.5±0.6	62.36



a. 일미찰 시험포장

b. 작업광경

c. 풋옥수수 탈과 작업 확인

그림 27. 풋옥수수 수확기 시작기 1차 포장성능시험

※ 작업속도 요인별(0.10 m/s, 0.13, 0.17) 시작기의 일미찰 수확성능 분석 결과 작업속도 0.13 m/s이 탈과율 98.22%, 수집률 92.44% 및 손상률 1.78%로 가장 양호하였으나, 이물질 혼입률은 20.31%로 미흡한 것으로 분석됨 이는 탈과 메커니즘 특성상 회전 중인 탈과롤러가 풋옥수수 이삭을 줄기로부터 분리함과 동시에 줄기의 잎, 검불과 접촉하게 되어 부산물도 같이 분리 및 수집되어 발생하는 것으로 판단됨.

표 12. 작업속도 요인별 일미찰 수확성능 분석(%)

구 분	수확성능						수확정도				이물질 혼입률	
	탈과율	미탈과율	계	수집률	미수집률	계	정상	찌힘	멍	계		
작업 속도 (m/s)	0.10	98.20	1.80	100.0	89.03	10.97	100.0	98.20	1.80	0.0	100.0	22.16
	0.13	98.22	1.78	100.0	92.44	7.56	100.0	98.22	1.78	0.0	100.0	20.31
	0.17	100.0	0.0	100.0	88.60	11.40	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	26.19

※ 그림 28은 일미찰 대상 수확작업 시 발생한 보완사항을 나타낸 것이다. 전기모터로 구동되는 회전 예취날의 경우, 연속작업 시 부하가 발생하여 멈춤 현상이 발생함. 따라서 1차년도 통합시험장치 성능평가 시 멈춤현상이 발생하지 않았던 유압모터를 다시 적용하기로 함. 풋옥수수 이삭의 탈과 과정에서 1차 수평 이송 컨베이어 벨트에 낙하하지 않은 현상이 발생하여 탈과부에 가이드 적용이 필요한 것으로 판단됨 또한 이삭과 같이 분리된 잎, 검불 등이 수집부 동력 전달 축에 끼임 현상이 발생하여 이물질로부터 축과 접촉을 방지하는 가이드 장치가 필요한 것으로 분석됨.



a. 예취날 멈춤

b. 풋옥수수 이삭 미수집

c. 수집부 이물질 끼임

그림 28. 풋옥수수 수확기 시작기 1차 포장성능시험 보완사항 도출

○ 풋옥수수 수확기 시작기 2차 포장성능시험

- 풋옥수수 최대 주산지 강원도의 주요 재배 품종인 미백찰을 대상으로 포장성능 시험 수행

\* 시험장소 : 강원도 홍천 옥수수연구소 소재 풋옥수수 시험포장

※ 공시품종 : 미백찰(찰옥수수)

\* 시험요인 : 작업속도 2수준(0.17 m/s, 0.32), 엔진 2,000 rpm, PTO 750 rpm 고정

※ 주요부 구동조건 : 탈과롤러 회전속도 180 rpm, 수집부 이송속도 0.30 m/s 고정

\* 시험방법 : 작업속도에 따른 10 m 구간 수확작업 후 탈과율, 수집률, 손상률 등 측정 및 분석

\* 시험결과

※ 공시품종 및 포장조건은 아래 표 13과 같으며, 이삭의 함수율은 45.9%으로 측정되어 수확 적기와 비교 시, 건조상태로 판별됨.

표 13. 시작기 2차 포장성능시험 공시작물(일미찰) 물성 및 재배양식

	조건 (cm)	주간 (cm)	두둑높이 (cm)	두둑폭 (cm)	줄기경(cm)		
					상	중	하(밑단)
	69.9	34.1	평지재배		5.4±0.6	15.3±2.0	26.6±2.2
	초장 (cm)	착협고 (cm)	엽수 (개)	이삭수 (개)	이삭길이 (cm)	이삭굵기 (cm)	함수율 (%w.b.)
	195.3±18.4	85.9±10.1	10.8±1.1	1.4±0.5	31.6±2.5	5.1±3.3	45.85



a. 미백찰 시험포장



b. 작업광경



c. 수확성능 조사

그림 29. 풋옥수수 수확기 시작기 2차 포장성능시험

※ 작업속도 요인별(0.17 m/s, 0.32) 시작기의 미백찰 수확성능 분석 결과 작업속도 0.32 m/s에서 탈과율 96.66%, 수집률 90.42%로 작업속도 0.17 m/s와 비교 시 작은 수확성능 차이를 나타내었으나, 수집률 목표성능인 95%에 비해 미흡한 것으로 분석됨. 0.13 m/s 작업속도에서도 목표성능에 미치지 못한 것을 보았을 때, 수집부 설계 개선이 필요한 것으로 판단됨 .

표 14. 작업속도 요인별 미백찰 수확성능 분석(%)

구 분	수확성능						수확정도				
	탈과율	미탈과율	계	수집률	미수집률	계	정상	찍힘	명	계	
작업 속도 (m/s)	0.17	96.83	3.17	100.0	92.69	7.31	100.0	96.83	3.17	0.0	100.0
	0.32	96.66	3.34	100.0	90.42	9.58	100.0	96.66	3.34	0.0	100.0

○ 풋옥수수 수확기 시작기 3차 포장성능시험

- 초당옥수수 및 단옥수수 종류의 풋옥수수 품종은 찰옥수수 대비 초장 및 착협고가 낮은 특성이 있음. 따라서 찰옥수수 품종의 수확작업 때와는 다른 줄기예취 및 이송 높이를 설정해야하며 본 포장성능시험에서는 초당옥수수를 대상으로 단옥수수 기계 수확 적응성을 확인함.

\* 시험장소 : 강원도 양구군 농가 소재 풋옥수수 시험포장

※ 공시품종 : 초당옥수수

\* 시험요인 : 작업속도 3수준(0.12 m/s, 0.17, 0.22), 작업속도 3수준(0.12 m/s, 0.17, 0.22), 엔진 2,000 rpm, PTO 540 rpm 고정

※ 주요부 구동조건 : 탈과롤러 회전속도 180 rpm, 수집부 이송속도 0.30 m/s 고정

\* 시험방법 : 작업속도에 따른 10 m 구간 수확작업 후 탈과율, 수집률, 손상률 등 측정 및 분석

\* 시험결과

※ 공시품종 및 포장조건은 아래 표 15와 같으며, 착협고는 약 37 cm로 조사되었으며, 이삭의 함수율은 80.4%으로 측정되어 수확 적기의 함수율을 나타냄.

표 15. 시작기 3차 포장성능시험 공시작물(초당옥수수) 물성 및 재배양식

	조건 (cm)	주간 (cm)	두둑높이 (cm)	두둑폭 (cm)	줄기경(cm)		
					상	중	하(밑단)
	79.2	20.5	9.9±0.7	59.7±1.9	7.6±0.8	19.5±1.2	20.4±1.5
	초장 (cm)	착협고 (cm)	엽수 (개)	이삭수 (개)	이삭길이 (cm)	이삭굵기 (cm)	함수율 (%w.b.)
	169.3±15.5	37.5±6.1	7.3±0.7	1.6±0.5	31.2±4.1	5.7±3.6	80.40



a. 초당옥수수 시험포장



b. 작업광경



c. 수확물 상태

그림 30. 풋옥수수 수확기 시작기 3차 포장성능시험

※ 아래 표 16과 같이 시작기의 작업속도에 따른 수확성능의 경우 작업속도가 0.12m/s일 때 탈과율이 99.1%, 손상률 0.0%로 가장 양호하였으나, 작업능률을 고려하여 탈과율 98.4%, 수집률 96.0% 및 손상률 0.7%로 나타난 작업속도 0.22m/s가 적합할 것으로 판단됨. 이물질 혼입률의 경우, 찧옥수수 품종 대상과 마찬가지로 목표 성능인 이물질 혼입률 5% 이하로 나타나지 않았는데, 이는 탈과 롤러의 설계 개선이 필요한 것으로 판단됨.

표 16. 작업속도 요인별 초당옥수수 수확성능 분석(%)

구 분	수확성능						수확정도				이물질 혼입률	
	탈과율	미탈과율	계	수집률	미수집률	계	정상	찌힘	멍	계		
작업 속도 (m/s)	0.12	99.1	0.9	100.0	95.4	4.6	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	18.3
	0.17	98.4	1.6	100.0	95.3	4.7	100.0	98.2	1.8	0.0	100.0	19.5
	0.22	98.4	1.6	100.0	96.0	4.0	100.0	99.3	0.7	0.0	100.0	19.5

※ 표 17은 찧옥수수 이삭 탈과각도에 따른 수확성능을 나타낸 것으로 작업속도 0.22 m/s를 고정조건으로 측정 및 분석하였음 탈과각도에 따른 탈과율 및 손상률의 편차는 2% 내로 나타났으나, 수집률의 경우 편차가 최대 10%까지 나타남. 탈과율, 수집률 및 손상률을 종합적으로 고려하였을때, 탈과각도는 130°가 적합할 것으로 판단됨.

표 17. 탈과각도 요인별 초당옥수수 수확성능 분석(%)

구 분	수확성능						수확정도				이물질 혼입률	
	탈과율	미탈과율	계	수집률	미수집률	계	정상	찌힘	멍	계		
탈과 각도 (°)	130	100.0	0.0	100.0	99.05	0.95	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	21.4
	135	98.4	1.6	100.0	95.97	4.03	100.0	99.3	0.7	0.0	100.0	19.5
	140	100.0	0.0	100.0	89.05	10.95	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	19.0

○ 찧옥수수 수확 메커니즘(Top-down 방식, Bottom-up 방식)에 따른 수확성능 비교·분석

- 선행연구문헌을 참고하여 Top-down 방식의 기개발 식용 찧옥수수 수확기와 본 연구수행을 통해 개발한 Bottom-up 방식의 가변 제어형 식용 찧옥수수 수확기의 수확성능을 비교·분석함.

\* 시험장소 : 강원도 양구군 농가 소재 찧옥수수 시험포장

※ 공시품종 : 찧옥수수(일미찰), 단옥수수(고당옥·초당옥수수)

※ 찧옥수수의 경우, Top-down 방식 대비 Bottom-up 방식의 메커니즘이 작업속도 및 탈과율이 더 높은 것으로 나타났으며, 손상률이 낮게 나타나는 것으로 분석되었음. 이물질 혼입률의 경우 Top-down 방식 메커니즘의 성능이 더 우수하게 분석되었는데 이는, 찧옥수수 이삭 수집 전, 줄기를 파쇄하는 방식으로 작업하기 때문에 수집되는 부산물이 감소하여 나타나는 것으로 판단됨.

표 18. 수확 메커니즘에 따른 찧옥수수 수확성능 분석

메커니즘	작업속도	수확성능		수확정도	이물질 혼입률
		탈과율	수집률	손상률	
Top-down 방식	0.09 m/s	98.5%	-	8.6%	4.6%
	0.12 m/s	95.7%	-	5.0%	8.6%
	0.14 m/s	90.4%	-	7.0%	4.3%
Bottom-up 방식	0.10 m/s	98.2%	89.0%	1.8%	22.2%
	0.13 m/s	98.2%	92.4%	1.8%	20.3%
	0.17 m/s	100.0%	88.6%	0.0%	26.2%

\* 출처 : 식용 찧옥수수 수확 기계화 기술 개발(2020, 국립농업과학원)

※ 찧옥수수 대비 착협고가 낮은 단옥수수의 경우, Bottom-up 방식의 메커니즘이 이물질 혼입률을 제외한 수확성능이 더 우수한 것으로 나타났으며, 특히 손상률이 크게 감소한 것으로 분석됨.

표 19. 수확 메커니즘에 따른 단옥수수 수확성능 분석

메커니즘 (품종)	작업속도	수확성능		수확정도	이물질 혼입률
		탈과율	수집률	손상률	
Top-down 방식 (고당옥)	0.10 m/s	100.0%	-	32.7%	3.5%
	0.13 m/s	91.6%	-	35.4%	2.5%
	0.17 m/s	94.1%	-	25.2%	2.6%
Bottom-up 방식 (초당옥수수)	0.12 m/s	99.1%	95.4%	0.0%	18.3%
	0.17 m/s	98.4%	95.3%	1.8%	19.5%
	0.22 m/s	98.4%	96.0%	0.7%	19.5%

\* 출처 : 식용 찧옥수수 수확 기계화 기술 개발(2020, 국립농업과학원)

○ 시작기 작업능률 및 경제성 분석

- 찧옥수수 품종에 따른 시작기의 포장성능 시험 결과 수확성능이 양호하였던 초당옥수수 품종을 대상으로 시작기의 작업성능 및 경제성을 분석함.

\* 수확기의 작업성능은 농업과학기술 연구조사분석기준의 아래 식 (1)과 같이 농작업기계 포장성능 산출식을 이용하여 분석함.

$$\text{포장작업성능(시간/10a)} = \left(\frac{50}{v} + t\right) \times \left(\frac{20}{3600 \times b}\right) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, v : 평균작업속도(m/s)  
 t : 평균회행시간(s)  
 b : 평균작업폭(m)

\* 경제성 분석은 관행 수확작업 및 식용 풋옥수수 수확기 이용 시 소요되는 비용을 고정비와 변동비로 구분하여 분석함 트랙터는 80마력급 기준 69,000천원, 시작기는 2,000천원을 적용함. 관행 인력에 의한 풋옥수수 수확작업은 고정비가 제외되었으며, 식용 풋옥수수 수확기의 고정비는 감가상각비, 이자, 수리비의 합으로 계산하였으며 표 20과 같음. 시간당 변동비는 연료비, 인건비, 유회유비 등의 합으로 표 21과 같이 계산하였으며, 관행 인건비 산출은 농가구입가격지수(2022)의 남·여 소요 작업시간을 참고하여 계산함.

표 20. 고정비 산출방법

항 목	내 용	참 고
연간사용시간	- 트랙터 299.9시간(139.9+160) - 옥수수 수확기 160.0시간	농업기계 이용실태 조사(2019)
감가상각비	- 내구연수 12년(트랙터), 9년(수확기) - 기계 구입가격/내구연수	농업과학기술 경제성분석 기준자료집(2022)
이 자	- 기계 구입가격/2의 5%	
수리비	- 기계 구입가 6%	

표 21. 변동비 산출방법

항 목	내 용	참 고
연료비(경유)	1,187(원/ℓ)	농업과학기술 경제성분석 기준자료집(2022)
인건비 남자	136,314(원/일)	농가구입가격지수(2022)
운전자 인건비	인건비 남자의 1.4배	트랙터 운전자
인건비 여자	103,681(원/일)	농가구입가격지수(2022)
연이율	5%	-
수리비 계수	6%	-
유회유비	연료비의 30%	-

\* 작업성능 분석

※ 시작기의 풋옥수수 수확 작업성능은 평균작업속도 0.22m/s, 유효작업폭 0.7m, 평균 회행시간 27.7초 일 때 약 2.0시간/10a로 관행 17.5시간/10a와 비교하여 약 8.8배 노력절감 효과가 있는것으로 분석됨.

표 22. 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 작업성능 분석

작 물	작업속도(m/s)	작업폭(m)	회행시간(평균, s)	작업성능(시간/10a)
풋옥수수 (초당옥수수)	0.22	0.7	27.66±4.08	2.00

\* 경제성 분석

※ 경제성 분석결과, 227,897원/10a로 관행 436,342원/10a 대비 약 47.8% 비용절감 효과가 있는 것으로 분석됨.

표 23. 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 경제성 분석

구분		트랙터(80마력급)	옥수수 수확기	관행(인력)
구입가격(원)		69,000,000	20,000,000	-
내구년수(년)		12	9	-
연간사용시간(시간/년)		299.9	160	-
연간고정비 (원/년)	감가상각비	5,750,000	2,222,222	-
	수리비	4,140,000	1,200,000	-
	이 자	1,725,000	500,000	-
	소 계	11,615,000	3,922,222	-
시간당고정비(원/시간)		38,730	24,514	-
시간당 변동비 (원/시간)	유류비	26,850	-	-
	인건비	23,855	-	24,933.8
	소 계	50,705	-	24,934
시간당비용(원/시간)			113,948	24,934
작업성능(시간/10a)			2.0	17.5
소요경비(원/10a)			227,897	436,342
지수(%)		52.2		100

\* 인건비 : 남자 136,314원/일, 여자 111,232원/일('21년 12월 ~'22년 9월 평균, 출처 : 통계청 농가구입가격지수)

\* 연료비(원/L) : 경유 1,187원, 휘발유 1,043원(출처 : 2022. 농업과학기술 경제성 분석 기준자료집)

○ 식용 풋옥수수 기계 수확 품위평가

- 국립식량과학원 중부작물과의 협조를 통해 시작기를 활용해 수확한 미백찰 및 초당옥수수의 품위평가를 수행함.

표 24. 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 경제성 분석

품종	반복	총립수	정상립	정상립비율 (%)	찍힘	찍힘비율 (%)	명 (알곡손상)
초당옥수수	1	384	382	99.5	2	0.5	0
	2	396	396	100.0	0	0.0	0
	3	388	388	100.0	0	0.0	0
	평균	389	389	99.8	1	0.2	0
미백찰	1	362	362	100	0	0.0	0
	2	382	382	100	0	0.0	0
	3	378	378	100	0	0.0	0
	평균	374	374	100	0	0.0	0

## 2절 풋옥수수 수확기 설계 · 제작 및 성능시험

### 1) 1차년도 수행과정 및 수행내용(두루기계통상)

- 트랙터 부착을 위한 풋옥수수 수확기 주요부 통합시험장치 3-point hitch 프레임 설계
  - 70마력~100마력의 트랙터로 작업이 가능하도록 좌우 이송(유압실린더:  $\varnothing 60 \times 200 \text{ST-2EA}$ )이 가능한 좌우 이송 히치 프레임으로 설계하여 수확기 상하좌우 위치 조절 가능 및 경사지 적응성 향상

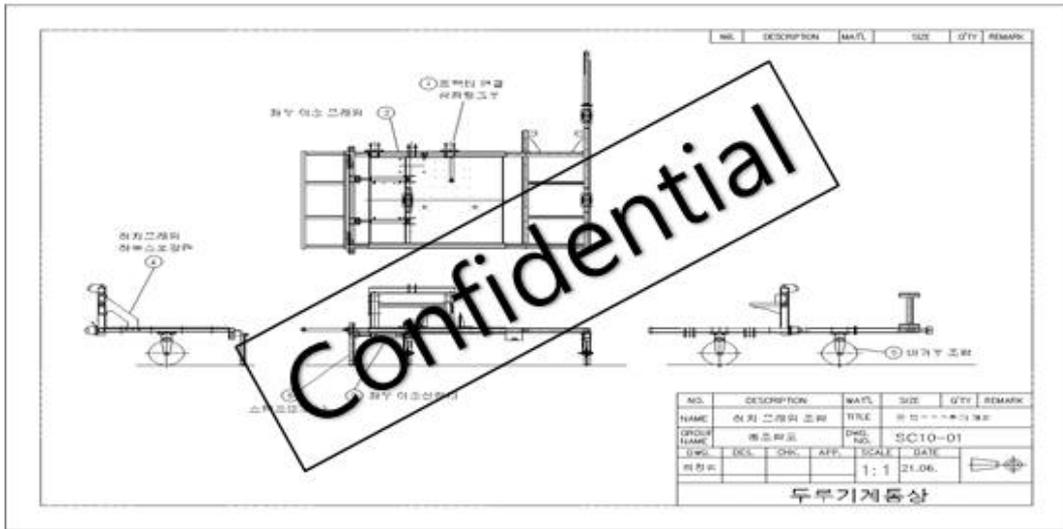


그림 31. 풋옥수수 통합시험장치 프레임 설계

- 풋옥수수 품종별 특성을 고려한 가변 예취부 설계
  - 풋옥수수 기계 수확시 품종에 따라 착엽고가 다른 것에 대한 대응을 하기 위해 줄기 절단 시 유압실린더( $\varnothing 70 \text{ MM X } 150 \text{ST-1EA}$ )의 동작을 통한 상하 상승하강 X-바 리프트 장치의 설치 및 절단날( $\varnothing 14"$ ) 수동 높이 조절 기능 적용을 통한 줄기 절단 성능향상



그림 32. 가변 제어형 예취부 설계

○ 풋옥수수 이삭 절단 후의 협지 및 이송장치 설계

- 이삭의 절단 후 협지벨트(W 45 mm X L 7,567 mm-2EA)의 중심부로의 원활한 이송 및 유도를 위해 전방에 소익벨트(13T-2EA)를 설치하고, 절단된 줄기를 이송하는 과정에서 이삭의 탈과롤러를 통과중에 줄기의 농침을 방지하기 위하여 벨트에 우레탄고무를 코팅 제작하여 협지력을 높이고 원활한 이송이 가능하도록 설계함.

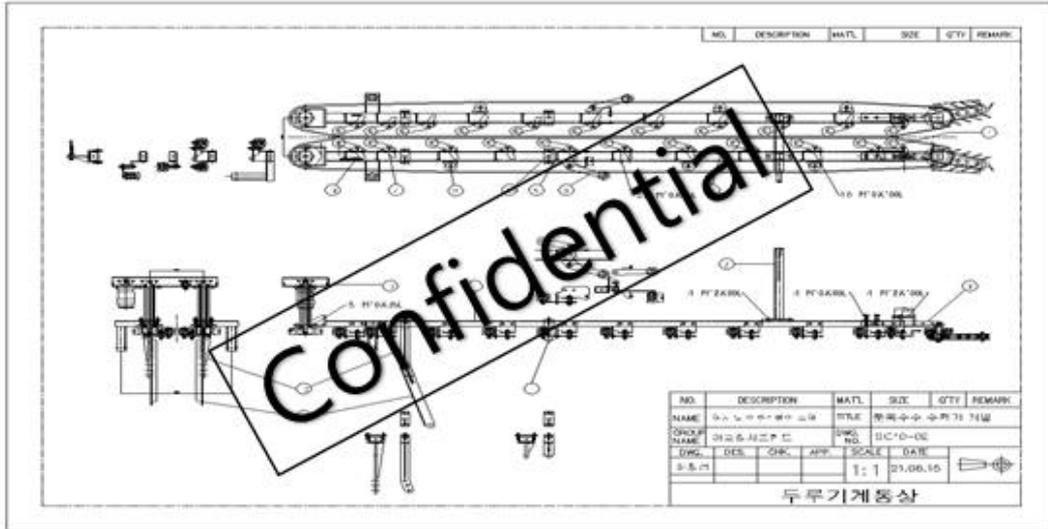
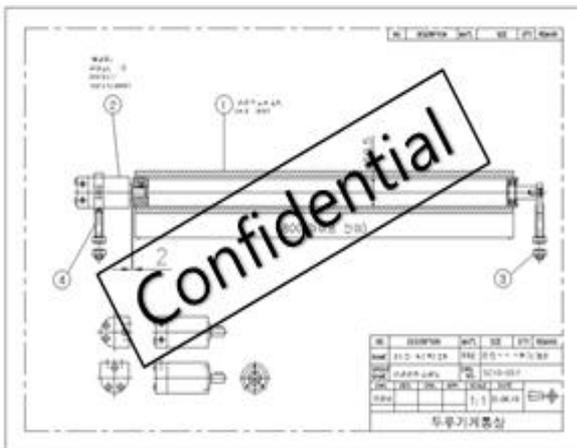


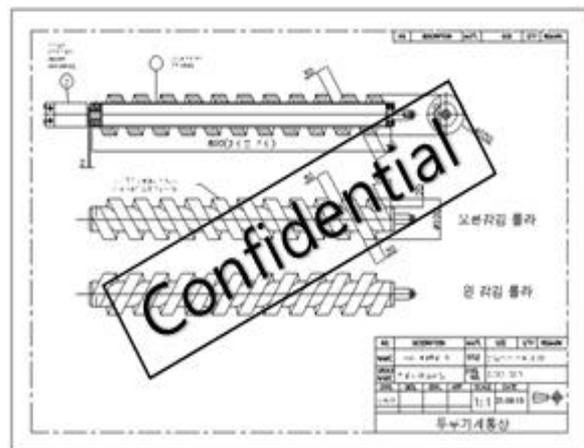
그림 33. 협지 이송벨트 설계

○ 풋옥수수 탈과 장치 설계

- 줄기 절단후 이송중 줄기에 매달린 풋옥수수의 원활한 탈과가 이루어지도록 설계
  - \* 원통( $\varnothing 60.5$  mm)의 탈과롤러에 10MM두께로 우레탄 고무 코팅을 통한 탈과성능을 향상
  - \* 원통( $\varnothing 60.5$  mm)의 탈과롤러에 나선을 감아(리드각 30, 피치: 30 mm, 두께 20 mm)리드각에 따른 탈과 성능의 향상 유도. 주요 동력은 유압모터구동(30CC-2EA, 정역회전 사용)
  - \* 초기 탈과롤러 회전수는 370~400 rpm으로 설정
  - ※ 국립농업과학원의 탈과부 최적화 설계시험 후 탈과롤러 회전수 조정



a. 민무늬 타입



b. 스크류 타입

그림 34. 탈과롤러 설계

○ 풋옥수수 파쇄 절단 장치(파쇄날) 설계

- 절단 및 이송된 줄기로부터 이삭이 탈과 후 후방으로 배출되는 줄기는 그대로 낙하하여 지면에 배출되는 줄기를 좀 더 잘게 파쇄하여 후처리 작업을 생략화함.

\* 구동방식은 유압모터(50CC-1EA)를 구동하여 원주상 2개의 평판날 회전을 통한 줄기파쇄

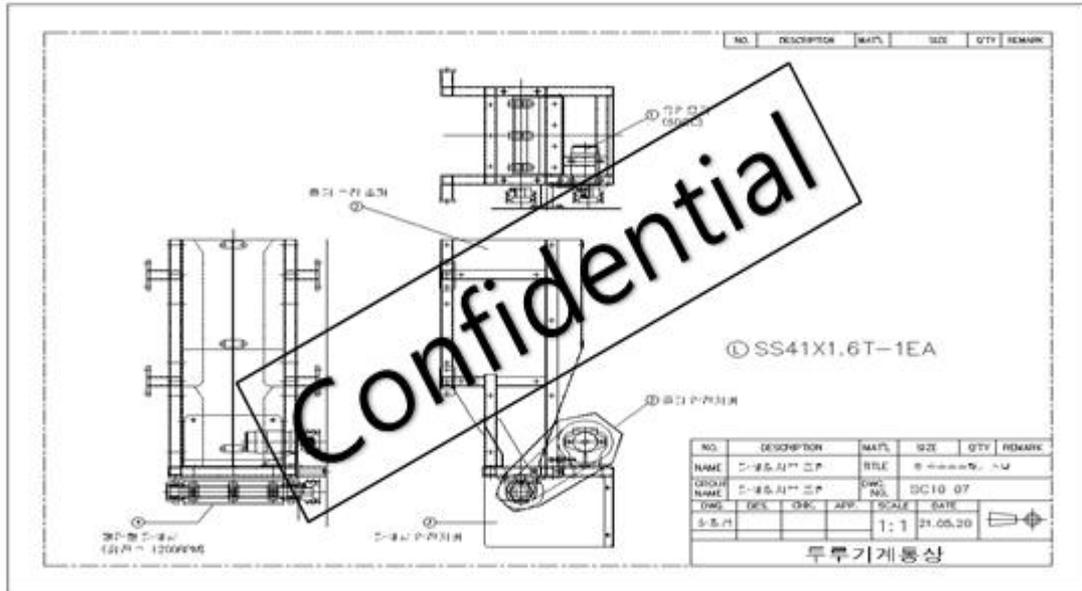
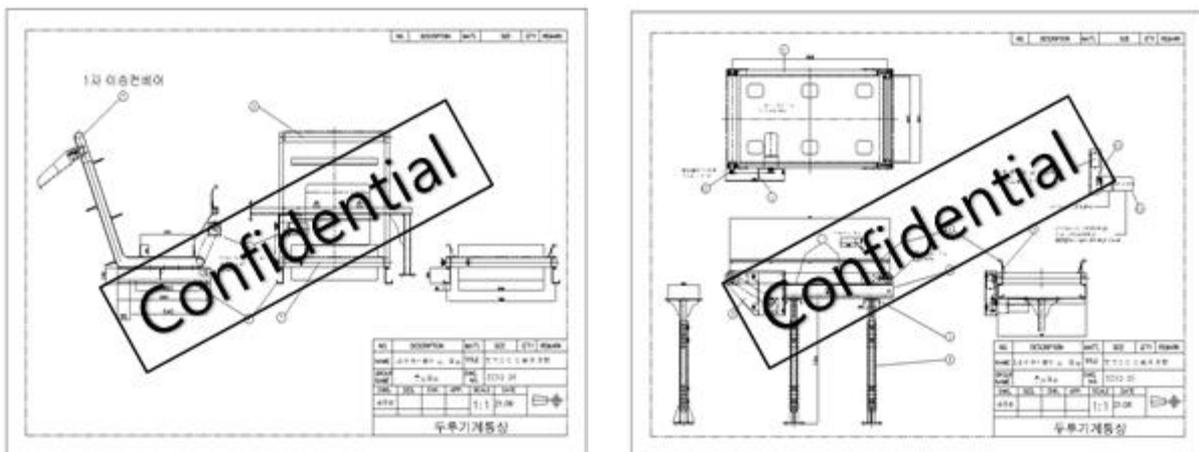


그림 35. 풋옥수수 줄기 파쇄장치 설계

○ 풋옥수수 탈과 후 황이송 컨베이어 장치 설계

- 탈과된 이삭을 상자에 수집하기 위하여 1차, 2차 이송벨트를 설치하고 동력은 트랙터 배터리(DC12V)를 사용하여 구동



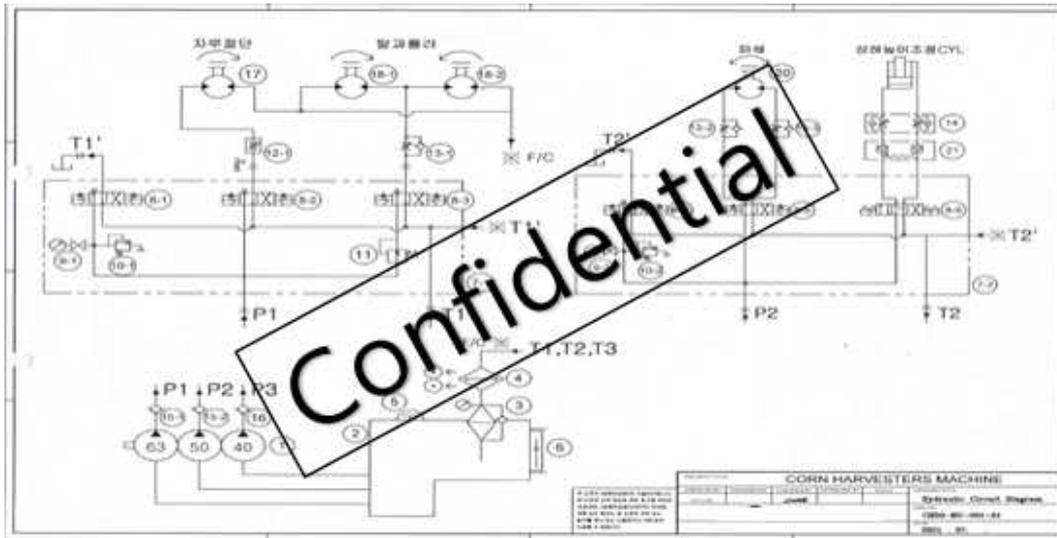
a. 1차 이송벨트

b. 2차 이송벨트

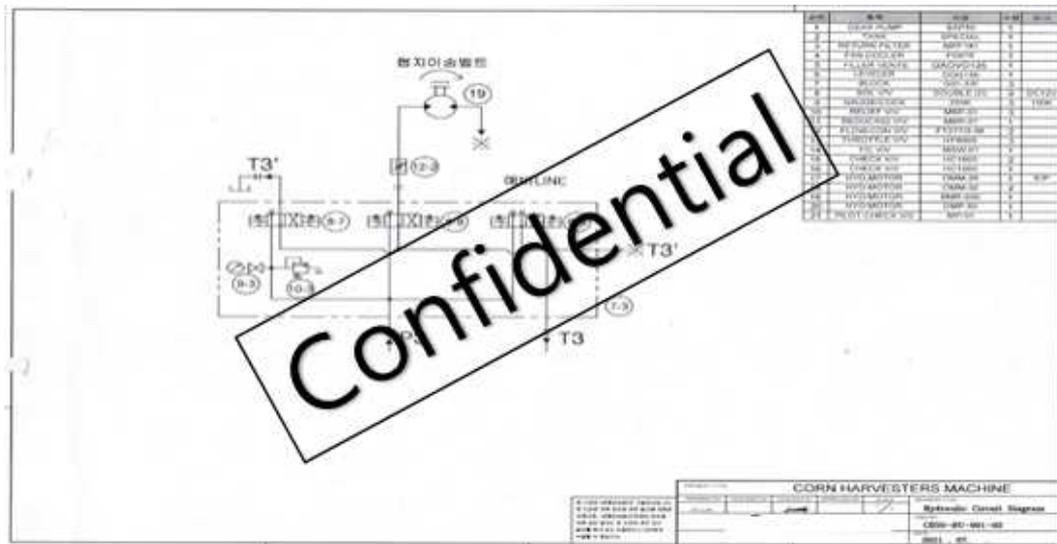
그림 36. 풋옥수수 이삭 수집부 설계

○ 각 시스템 부위별 구동을 위한 유압탱크 및 유압구동제어 시스템 설계

- 트랙터 운전석에서 각 부위의 기능별 조작이 가능하도록 컨트롤 박스를 설치하고 공급전원은 트랙터 배터리(DC12V)를 사용



a. 회로도-1



b. 회로도-2

그림 37. 유압회로 설계도

○ 콧옥수수 수확기 주요부 통합 시험장치 제작

- 예취+이송+탈과+수집+줄기파쇄 일관작업형 주요부 통합시험장치 설계·제작
  - \* 유압펌프 및 유압모터를 통한 줄기 이송협지벨트, 탈과롤러, 리프트 장치, 줄기 파쇄부 구동
    - ※ 수집부 제외 주요부 유압모터 이용 구동으로 인한 기계 수확 부하 적응성 미흡
- 통합시험장치 개선사항 도출
  - \* 주요부 유량 소요량 및 무게 경량화를 통한 콧옥수수 수확기 운용 편의성 향상
    - ※ 주요부 동력전달체계 일원화를 통한 소요 유량 저감



a. 예취부, 이송부, 탈과부



b. 수집부 및 파쇄부



c. 유압펌프 및 컨트롤 장치

그림 38. 가변 제어형 풋옥수수 수확기 통합시험장치

## 2) 2차년도 수행과정 및 수행내용(두루기계통상)

○ 풋옥수수 수량 및 무게계측 시스템 적용 수집 자동화 기술 개발

- 풋옥수수 수확작업 시 편의성을 위해 연속작업을 고려한 500 kg 톤백마대를 적용하여 수집부를 설계함. 수집 메커니즘은 줄기로부터 분리된 풋옥수수 이삭이 수평 컨베이어 벨트에 낙하하면 경사진 컨베이어를 통해 톤백에 적재하는 방식으로 실시간으로 풋옥수수 이삭 무게 및 수량을 확인할 수 있도록 로드셀을 적용함.



그림 39. 수량 및 무게계측 시스템 적용 수집부 설계

○ 트랙터 부착을 위한 풋옥수수 수확기 시작기 3-point hitch 프레임 설계

- 1차년도 통합시험장치의 프레임을 활용하였으며, 측면 부착형 수확기의 안정성을 고려하여 축 변경이 가능한 바퀴 2개를 프레임에 추가로 적용함. 각 지역의 선호 재배양식에 상이한 조간거리, 두둑폭 등을 고려하여 유압실린더를 통해 트랙터와 수확기의 수평 이격거리를 조절할 수 있게함.

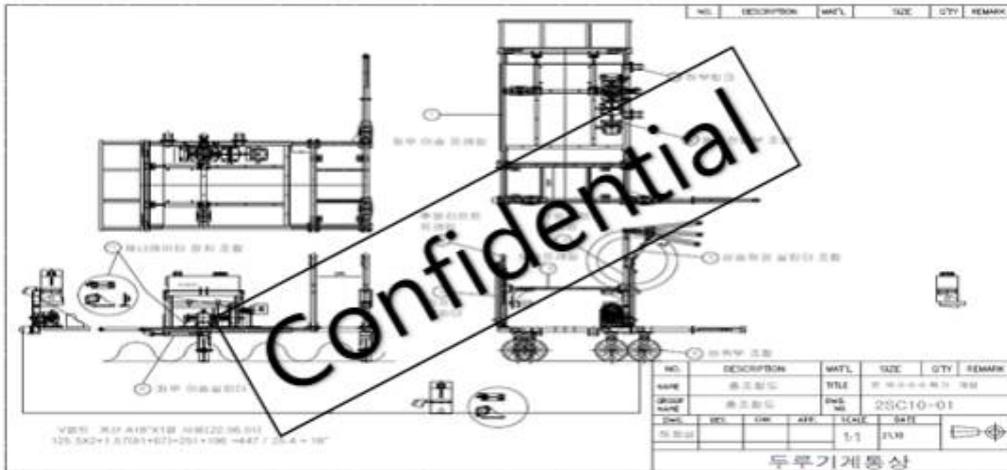


그림 40. 풋옥수수 수확기 시작기 3-point hitch 프레임 설계

○ 풋옥수수 수확기 시작기 시스템 동력 체계 구축

- 풋옥수수 수확기의 주요부를 구동시키기 위한 유압펌프 및 제네레이터 가동을 위해 메인기어박스를 적용함. 유압펌프를 통해 예취·이송부 리프트 상하 제어용 유압실린더 및 이송부 컨베이어 벨트와 탈과부의 탈과롤러 구동용 유압모터를 구동함. 1년차에 설계 및 제작한 통합시험장치 대비 소요 유량을 저감하기 위해 이송부 컨베이어 벨트와 탈과롤러는 하나의 개별 유압모터에서 하나의 유압모터로 구동되도록 설계함. 따라서 소요유량이 저감됨에 따라 수확기의 무게가 저감되어 운용 편의성이 증가됨. 제네레이터는 예취부의 회전 예취날 구동용 전기모터 및 수집부 수평 및 경사 컨베이어벨트 구동용 전기모터, 로드셀이 적용된 무게계측시스템에 전원을 공급함.

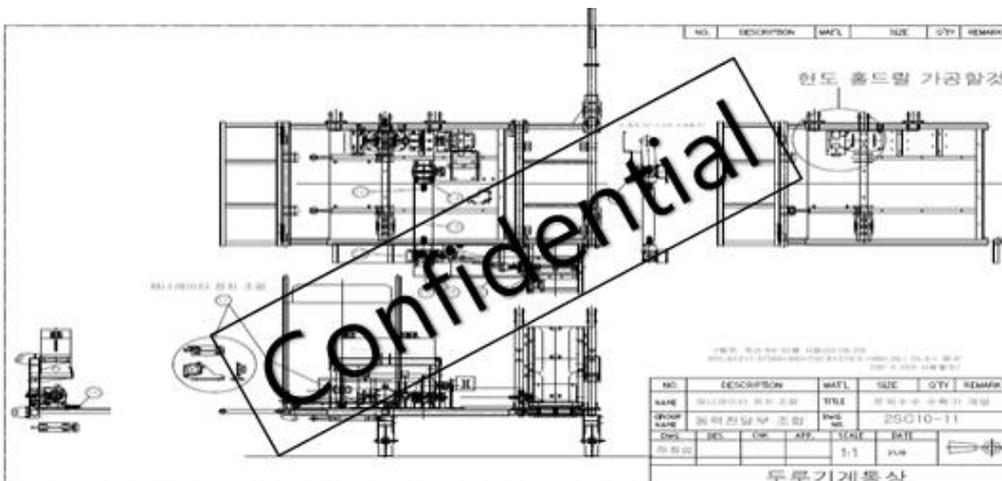


그림 41. 풋옥수수 수확기 시작기 동력 체계 구축

○ 일관작업형 풋옥수수 수확기 시작기 설계 및 제작

- 1차년도 통합시험장치 설계 내용기반, 풋옥수수 줄기 예취, 줄기 이송 및 풋옥수수 이삭 탈과, 수집과 동시에 무게 및 수량계측이 가능한 시작기를 설계 및 제작함.

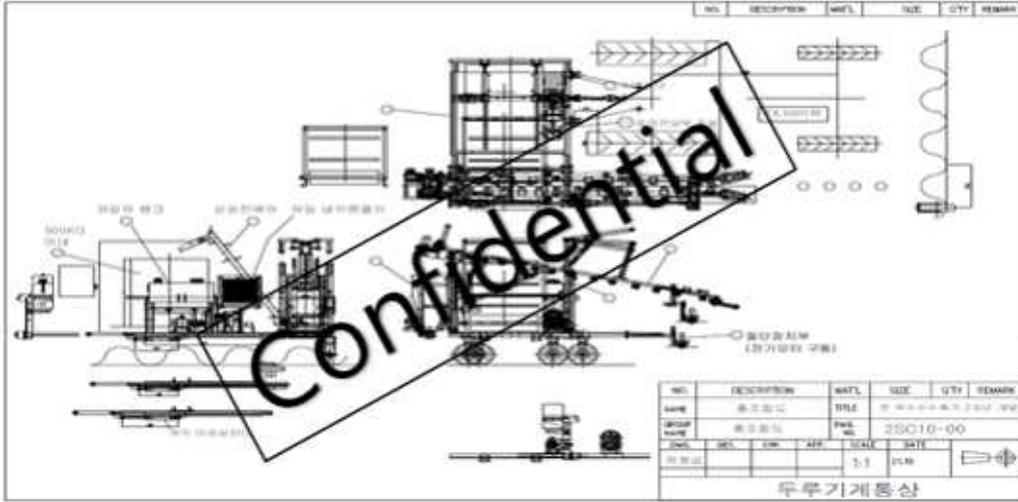


그림 42. 풋옥수수 수확기 시작기 제작

○ 일관작업형 풋옥수수 수확기 시작기 설계 및 제작

- 1차년도 통합시험장치 설계 내용기반, 풋옥수수 줄기 예취, 줄기 이송 및 풋옥수수 이삭 탈과, 수집과 동시에 무게 및 수량계측이 가능한 시작기를 설계 및 제작함.

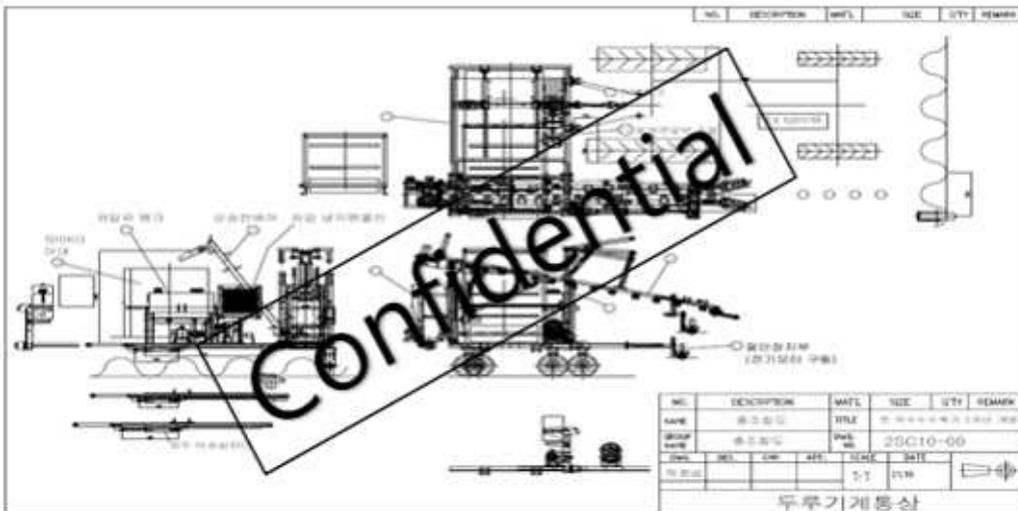


그림 43. 풋옥수수 수확기 시작기 제작

○ 풋옥수수 수확기 시작기 제작

- 예취+이송+탈과+수집+줄기파쇄 일관작업형 수확기 시작기 설계·제작

\* 유압펌프 및 모터, 발전기 적용을 통한 주요부 구동



a. 시작기 주요부-1



b. 시작기 주요부-2

그림 44. 가변 제어형 풋옥수수 수확기 시작기



그림 45. 가변 제어형 풋옥수수 수확기 시작기 동력 전달체계

### 3절 풋옥수수 수확기 탈과부 설계 최적화 및 모델 개발

#### 1) 1차년도 수행과정 및 수행내용(서울대학교산학협력단)

- Top-down 방식 풋옥수수 수확기의 수확성능 시험 평가 및 작업부하 도출
  - 기개발된 풋옥수수 수확기(Top-down 방식) 매커니즘 파악

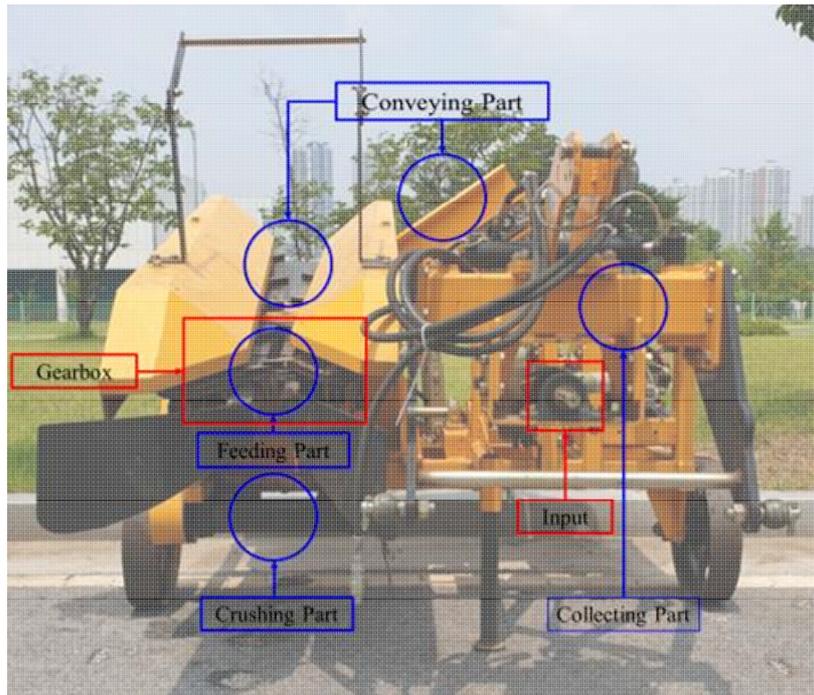


그림 46. Top-down 방식 풋옥수수 수확기

표 25. Top-down 방식 풋옥수수 수확기 제원

항목	제원
Harvest 방식	Full-feed 방식
Size(Length * Width * Height), mm	1,710 * 2,150 * 1,200
Weight, kg	645

- \* 기개발된 풋옥수수 수확기(Top-down 방식)을 이용한 풋옥수수 수확 부하 계측
  - ※ 계측용 트랙터에 기개발된 풋옥수수 수확기를 부착하여 풋옥수수 수확시험 수행
  - ※ 괴산군 농업연구소 내 재배된 풋옥수수(품종:고당옥)를 대상으로 수확시험 수행
  - ※ 트랙터와 수확기를 3점 히치(CAT2)를 통해 연결
  - ※ 트랙터의 동력취출장치(PTO)를 통하여 수확기에 동력 공급
  - ※ 트랙터의 동력취출장치(PTO)에 토크미터를 부착하여 풋옥수수 수확 시 발생하는 토크와 회전속도 계측

표 26. 센서 및 DAS 제원

	항목	Specifications
PTO Torquemeter	Model; Company, National	MW_B_5000N_PCM16; MANNER Sensortelemetrie, Germany
	Measuring range, Nm	-5,000 ~ 5,000
	Maximum speed, rpm	2,000
	Accuracy, %	0.10
GPS	Model; Company, National	Duro; Swift Navigation, USA
	Velocity accuracy, m/s	0.03 (rms)
	Time accuracy, ns	60 (rms)
	Max velocity, m/s	515
DAQ	Model; Company, National	Q.brixx_A107; Gantner Instruments, Austria
	Maximum module	16
	Analog Input	4
	Sampling rate, Hz	10,000



a. 시험포장



b. 시험광경-1



c. 시험광경-2



d. 토크미터 설치 및 계측기 연결



e. 센서 및 계측기 개념도

그림 47. 팥옥수수 수확 부하계측 시험



표 27. 풋옥수수 수확시험을 통해 구축한 LDD

Load level	Torque, Nm	Speed, RPM	Duration, hr	Frequency, %
1	33.4	1171.5	219.3	4.6
2	42.0	1170.2	2367.9	49.3
3	56.9	1170.5	1394.8	27.1
4	70.7	1170.2	636.0	13.3
5	86.0	1169.6	144.5	3.0
6	99.6	1171.2	26.9	0.6
7	116.8	1170.9	5.3	0.1
8	131.7	1171.6	5.3	0.1
Sum			4,800	100.0

○ 풋옥수수의 물리적 특성을 반영한 이산요소법(DEM) 모델 개발

- 풋옥수수(품종:대학찰)의 물리적 특성 측정을 통해 풋옥수수의 macro-parameter 정의
  - \* 풋옥수수 줄기의 무게와 형상, 직경 등 macro-parameter 측정
  - \* 풋옥수수 자체의 특성을 측정함으로써 시뮬레이션 상의 풋옥수수 형상, 무게, 크기 등 정의
  - \* 측정된 macro-parameter의 정규성 검증을 통해 각 macro-parameter를 대변할 수 있는 대푯값 도출



그림 50. 풋옥수수 이산요소모델링을 위한 macro-parameter 측정

표 28. 풋옥수수 줄기와 풋옥수수의 macro-parameter > specimen: 40

Macro-parameter	Average	Standard deviation
풋옥수수 줄기의 길이, mm	1553	120.50
node의 길이, mm	14	-
inter node의 길이, mm	180	-
node의 단경, mm	26.28	2.55
node의 장경, mm	28.23	3.64
inter node의 단경, mm	18.25	1.36
inter node의 장경, mm	19.62	1.74
풋옥수수 상단 직경, mm	25.24	1.99
풋옥수수 중단 직경, mm	35.70	2.10
풋옥수수 하단 직경, mm	38.19	2.77
풋옥수수의 중량, g	139.90	21.12

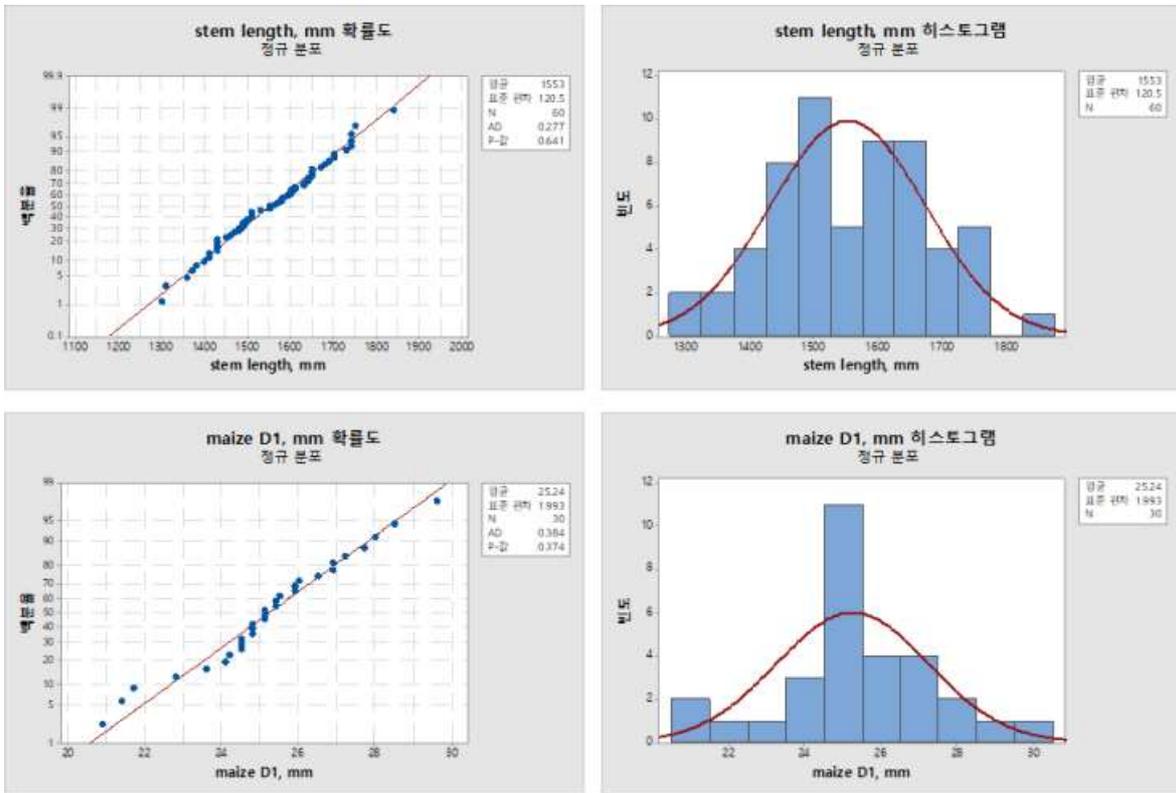


그림 51. Macro-parameter 측정 데이터의 정규성 확인 및 검증

- 풋옥수수(품종:대학찰)의 물리적 특성 측정을 통해 풋옥수수의 micro-parameter 정의
  - \* 신뢰성 있는 풋옥수수 micro-parameter 도출을 위해 모든 시험 줄기의 길이는 70 mm으로 절단
  - \* 만능재료시험기(UTM)를 이용한 풋옥수수 줄기의 압축 시험 수행
  - \* 만능재료시험기(UTM)를 이용한 풋옥수수 줄기의 3점 굽힘 시험 수행
  - \* 만능재료시험기(UTM) 시험 하강속도는 10 mm/min으로 설정
  - \* 압축/3점 굽힘 시험을 수행하기 위하여 별도의 지그 설계 및 제작

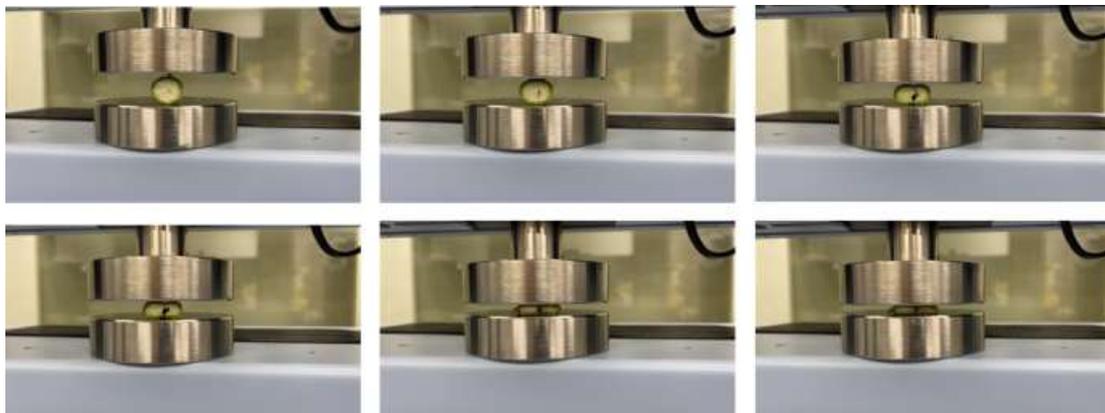


그림 52. 풋옥수수 줄기의 compression test 수행

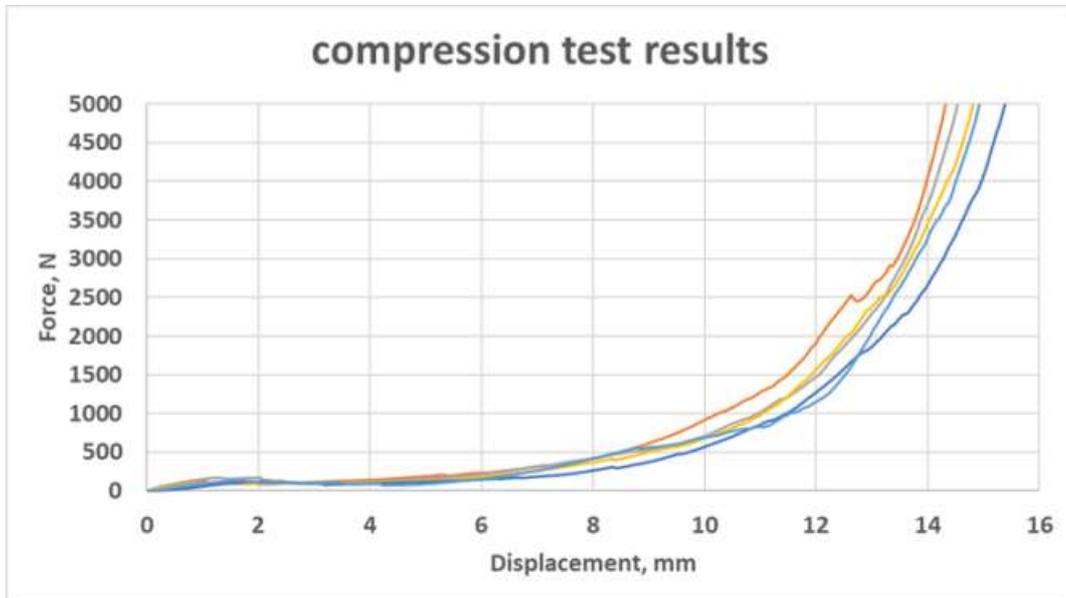


그림 52. 압축 시험을 통해 측정한 풋옥수수 줄기의 하중-변형량 관계

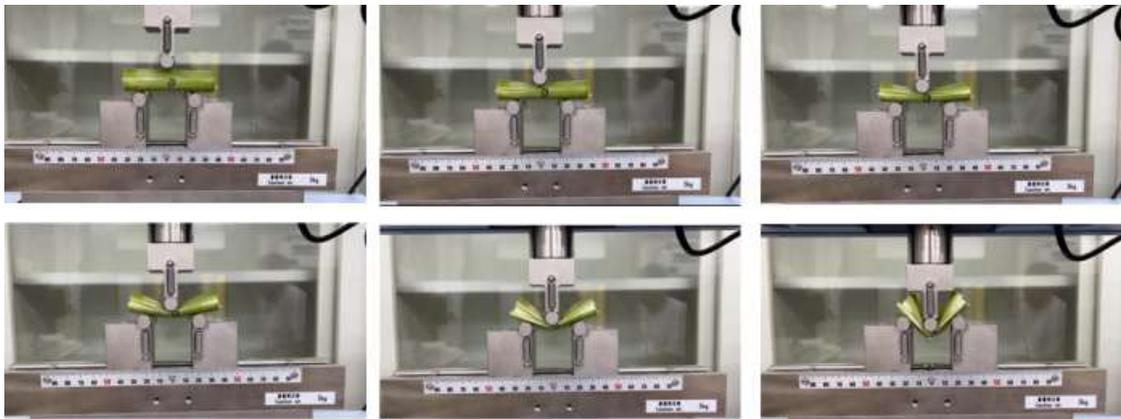


그림 53. 풋옥수수 줄기의 3점 굽힘 시험 수행

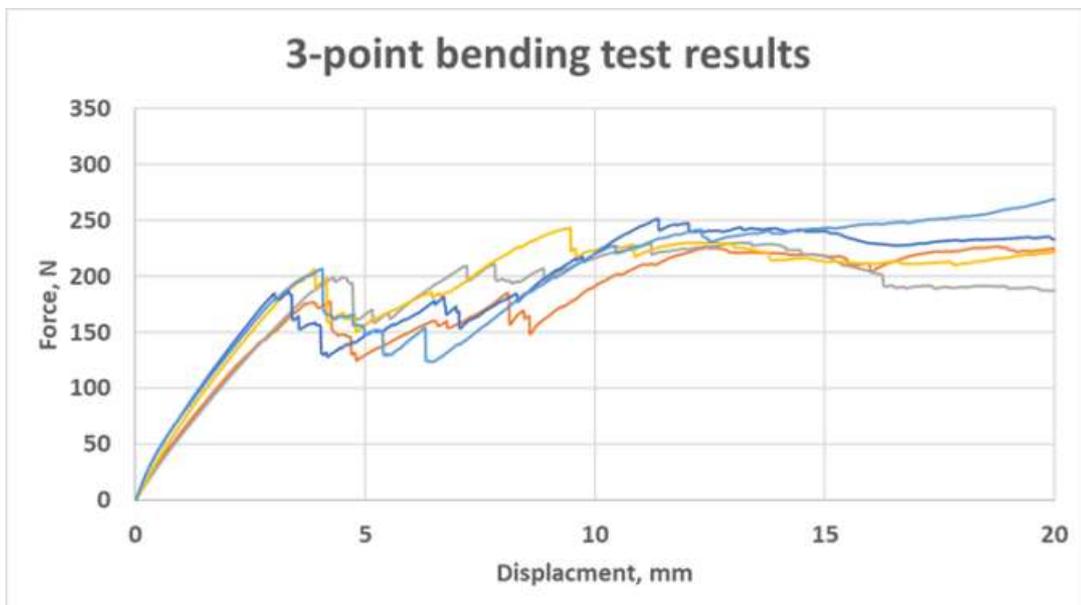


그림 54. 3점 굽힘 시험을 통해 측정한 풋옥수수 줄기의 하중-변형량 관계

- 측정한 parameter를 통해 풋옥수수 Multi-sphere particle 모델링을 진행하고, 시뮬레이션 결과와 시험결과를 비교하며 parameter study 수행
- \* 측정한 풋옥수수의 macro-parameter를 이용하여 이산요소모델의 shape parameter 결정
- \* 이산요소모델의 shape parameter를 이용하여 풋옥수수 이산요소모델 생성
- \* 풋옥수수 이산요소모델은 줄기 길이 방향으로는 동일한 micro-parameter를 갖는 입자만 결합(bonding)하여 접촉(contact)하도록 지정(particle 1 - particle 1 & particle 2 - particle 2)
- \* 풋옥수수 이산요소모델은 줄기 반경 방향으로는 서로 다른 micro-parameter를 갖는 입자만 결합(bonding)하여 접촉(contact)하도록 지정

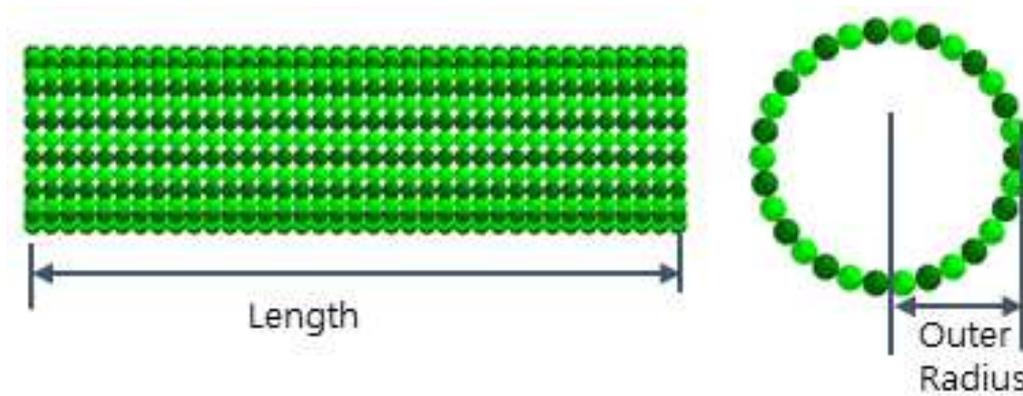


그림 55. 풋옥수수 이산요소모델의 shape parameter를 통해 생성한 풋옥수수 줄기 모델

표 29. Particle 1 - particle 1 & particle 2 - particle 2 접촉 시 bonding model parameter

Normal stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	5e+11
Shear stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	2.5e+10
Normal strength, Pa	3.7e+08
Shear strength, Pa	3.7e+08
Bonded disk scale	1

표 30. Particle 1 - particle 2 접촉 시 bonding model parameter

Normal stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	1e+11
Shear stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	5e+10
Normal strength, Pa	3.7e+07
Shear strength, Pa	3.7e+07
Bonded disk scale	1

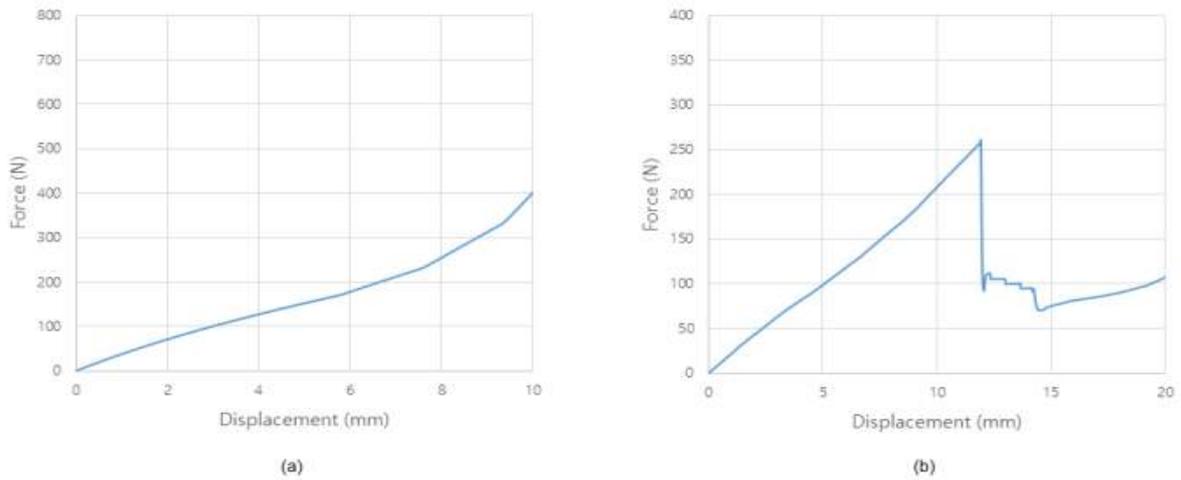


그림 56. 이산요소모델의 하중-변형량 관계: (a) compression test (b) 3-point bending test

- 기개발된 풋옥수수 수확기(Top-down 방식)의 구조 안정성 확인 및 평가
  - \* 트랙터 PTO에서 전달한 동력이 기어박스로 전달되기까지의 동력전달개념 확인

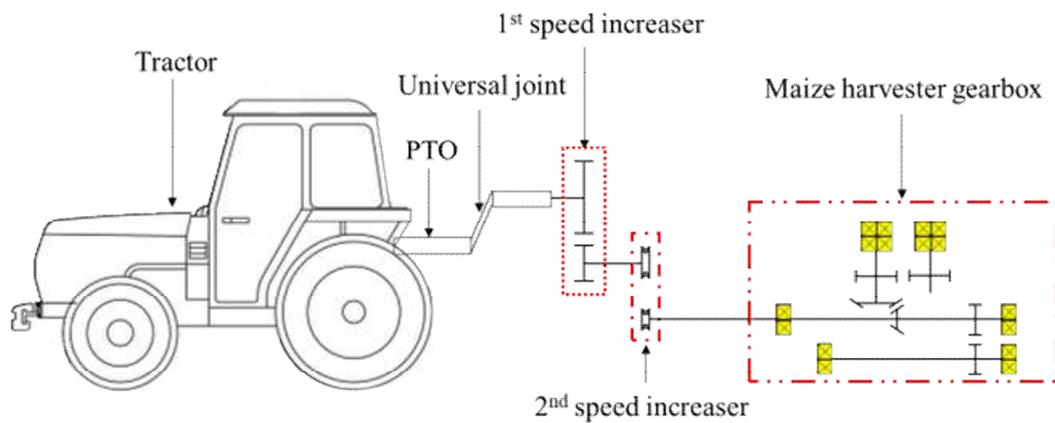


그림 57. 트랙터에 부착된 풋옥수수 수확기의 동력 전달 개념도

- \* 기개발된 풋옥수수 수확기의 기어박스 2D도면을 이용하여 3D 모델링 수행

표 31. Specification of bevel gear set

Items	Drive	Driven
Module, mm		3
Pressure angle, degree		20
Outer pitch diameter, mm	45	90
Number of teeth	15	30
Net face width, mm		25.8
Shaft angle, degree		90
Material		SCM415
Quality		11 (AGMA)

표 32. Specification of spur gear set 1 and 2

Items	Spur gear set 1		Spur gear set 2	
	Drive	Driven	Drive	Driven
Module, mm		3		3
Pressure angle, degree		20		20
Center distance, mm		87		78
Number of teeth		29		26
Tip diameter, mm	93	92.808	84	83.808
Pitch circle diameter, mm		87		78
Root diameter, mm	79.500	79.308	70.500	70.308
Face width, mm		20		20
Material	SCM415			
Quality	8 (ISO)			

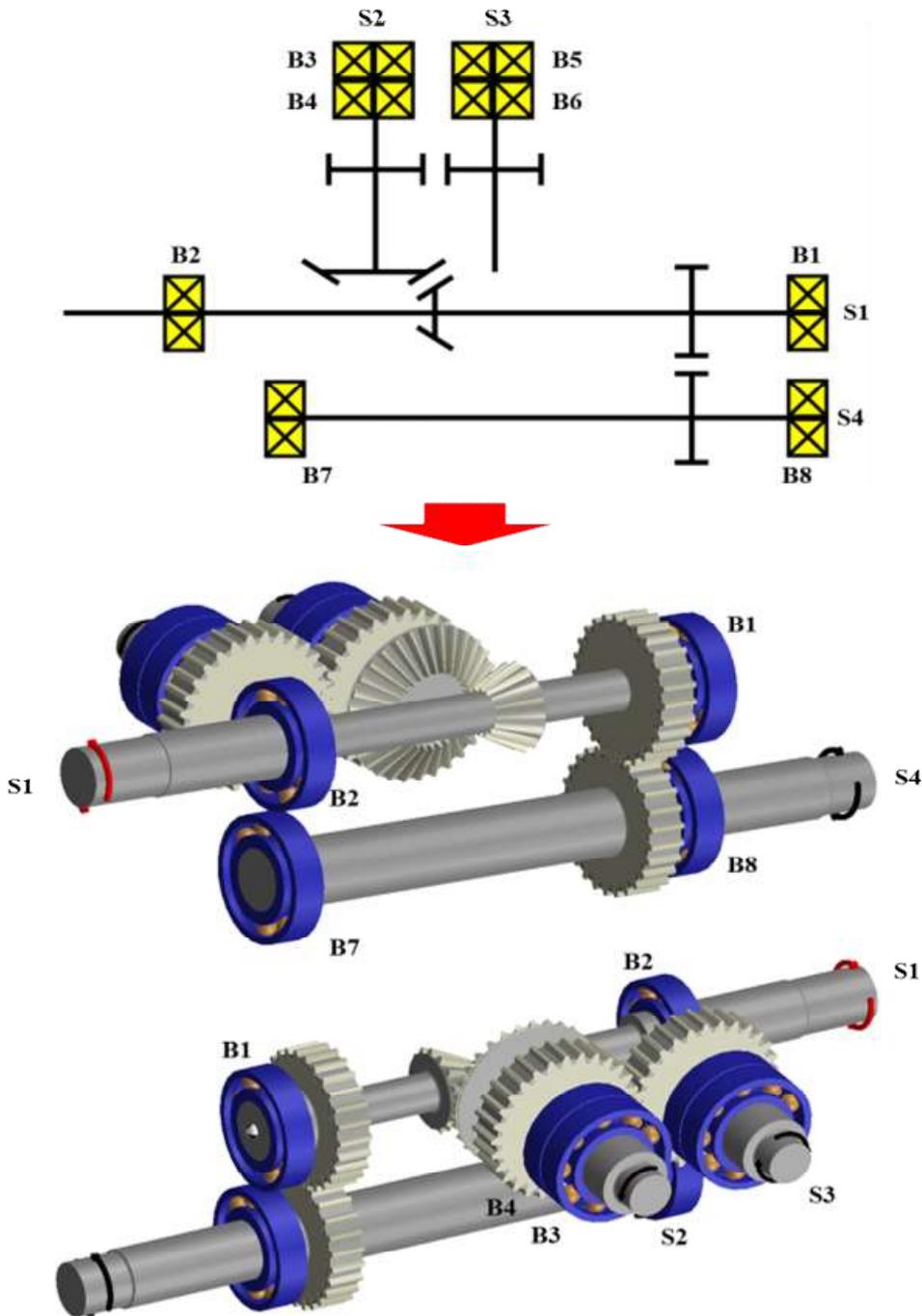


그림 58. 상용 소프트웨어를 이용한 기어박스 3D 모델링

- 뜻옥수수 수확시험을 통해 계측한 부하 데이터를 이용하여 기어의 강도평가 수행
  - \* LDD 부하 스펙트럼을 Input(S1)에 입력하여 기어의 강도평가 수행
    - ※ spur gear의 강도평가는 ISO 6336:2006을 기반으로 수행
    - ※ bevel gear의 강도평가는 ANSI/AGMA 2003-B97을 기반으로 수행
  - \* 기어의 강도평가 결과, spur gear set 1의 접촉안전계수가 가장 낮게 나오는 것을 확인
  - \* 접촉안전계수가 낮게 나오는 이유를 확인하기 위하여 spur gear set 1의 치면하중분포 (Face Load Distribution)해석을 수행하였으며, 매우 심한 edge contact이 발생함을 확인
    - ※ face load distribution은 다음 4개의 이론을 사용하여 계산
      1. Bending based on Mindlin plate theory
      2. Compression based on Timoshenko beam theory
      3. Root rotation based on an empirical theory
      4. Root shear based on an empirical theory
  - \* Face load distribution이 기어 강도에 미치는 영향을 수치적으로 파악하기 위하여 face load factor( $K_{HB}$ ) 계산
    - ※ Face load factor( $K_{HB}$ ) 계산 결과, edge contact으로 발생하는 maximum load per unit length는 최대 약 8.36 배로 나타남

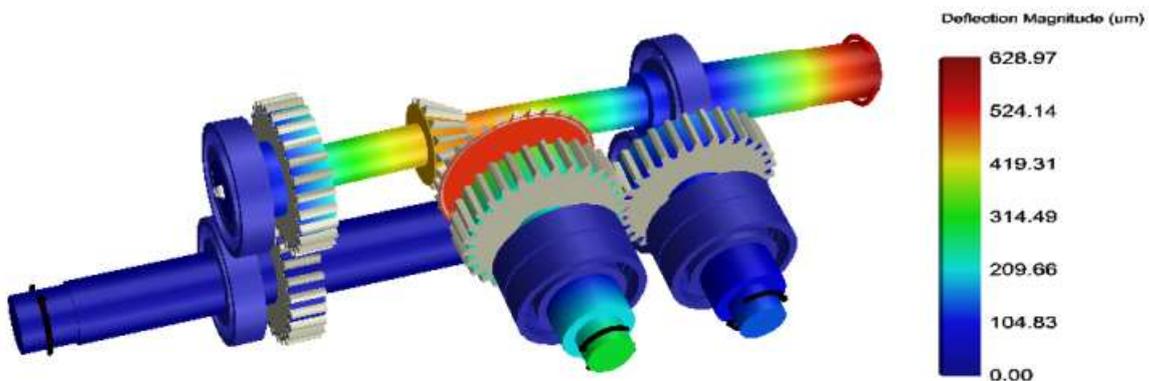


그림 59. 기어박스 3D 모델과 LDD 부하 스펙트럼을 이용한 기어박스 내 변형량 해석 결과

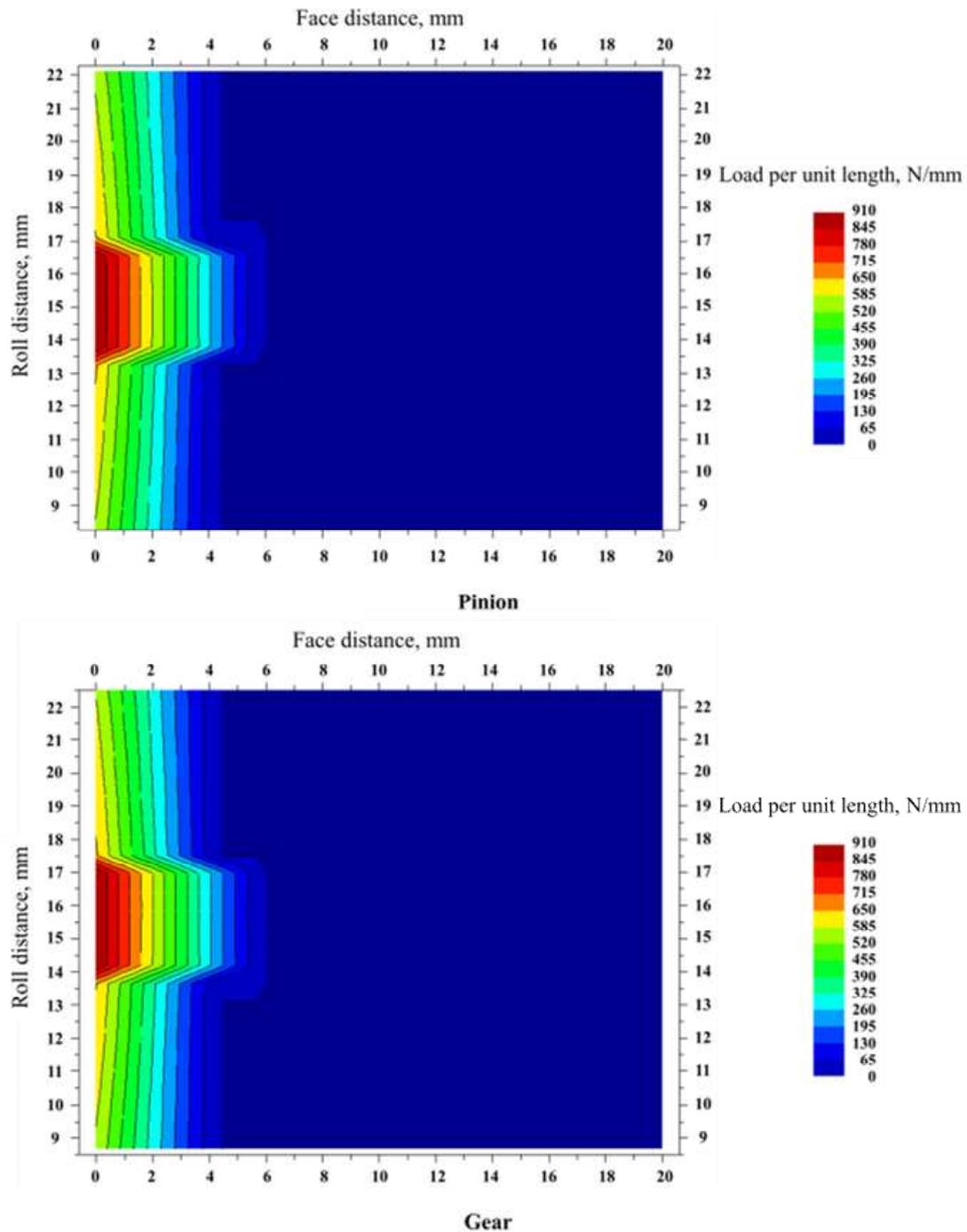


그림 60. Spur gear set 1의 치면하중분포 해석 결과

표 33. Load level에 따른 maximum load per unit length와 face load factor 계산 결과

Load level	Maximum load per unit length, N/mm	Face load factor( $K_{HB}$ )
1	335	8.36
2	395	8.04
3	491	7.66
4	575	7.40
5	664	7.18
6	740	7.03
7	832	6.82
8	910	6.62

표 34. 3D 모델을 이용한 기어의 강도평가 결과

Gear	Safety factor	
	for contact stress	for bending stress
Bevel gear set, pinion	1.60	1.72
Bevel gear set, gear	1.67	1.34
Spur gear set 1, pinion	1.02	2.59
Spur gear set 1, gear	1.02	2.56
Spur gear set 2, pinion	3.04	14.13
Spur gear set 2, gear	3.03	13.95

- 풋옥수수 수확시험을 통해 계측한 부하 데이터를 이용하여 베어링의 수명 해석 수행

\* LDD 부하 스펙트럼을 Input(S1)에 입력하여 베어링의 수명 해석 수행  
bearing의 수명 해석은 ISO 281을 기반으로 수행

\* 베어링 수명 해석 결과, Output2(S2)에 위치한 베어링3&4(B3&4)에서 기대수명을 만족하지 못하는 것을 확인

표 35. 3D 모델과 LDD 부하 스펙트럼을 통해 도출한 베어링 수명 해석 결과

Bearing		Life time, hr
S1	Rolling bearing, B1	32,777
	Rolling bearing, B2	1.3e+5
S2	Rolling bearing, B3	2,503
	Rolling bearing, B4	622
S3	Rolling bearing, B5	4.7e+5
	Rolling bearing, B6	58,963
S4	Rolling bearing, B7	8.6e+9
	Rolling bearing, B8	1.2e+7

표 36. 3D 모델과 LDD 부하 스펙트럼을 통해 도출한 베어링에 작용하는 하중 해석 결과

Bearing	Radial force, N	Axial force, N
Rolling bearing, B1	3,732	1,942
Rolling bearing, B2	2,968	916
Rolling bearing, B3	10,931	5,606
Rolling bearing, B4	19,650	7,657
Rolling bearing, B5	1,967	625
Rolling bearing, B6	4,546	625
Rolling bearing, B7	72	0.4
Rolling bearing, B8	646	0.4

## 2) 2차년도 수행과정 및 수행내용(서울대학교산학협력단)

### ○ 요인시험 장비 성능고도화 및 시험평가

- 통합시험장치 작동시험 결과 기반, 탈과부 성능 고도화 방안 도출

\* 탈과롤러 구동용 유압모터 및 줄기 이송을 위한 컨베이어 벨트 구동용 유압모터는 각각 30 cc, 200 cc 유량 소비가 필요하며, 유압탱크로부터 호스를 통해 공급받아 구동됨. 작업기의 경량화 및 동력 전달체계의 일원화를 위해 컨베이어 이송 벨트 및 탈과롤러를 하나의 유압모터로 구동하는 것이 설계 개선 및 경량화를 통한 성능 고도화가 이루어 질 것으로 판단됨.

※ 컨베이어 벨트 유압모터에 스프로킷 및 아타치 체인, 베벨기어 적용을 통한 탈과롤러 회전



a. 이송부 및 탈과부 개선 전

b. 이송부 및 탈과부 개선 후

그림 61. 풋옥수수 수확기 탈과부 성능 고도화

### ○ 요인시험 장비 다물체 동역학모델과 풋옥수수 이산요소모델의 연성해석모델 개발

- 풋옥수수(품종:대학찰) 줄기 특성이 고려된 DEM 모델 개선

\* 풋옥수수 줄기 DEM 모델 구성

※ 실제 옥수수 줄기는 타원형이고, 여러개의 레이어로 구성

※ 해석의 효율성을 위하여 2개의 레이어로 구성되어 있는 원형으로 모델링

※ 각 입자의 좌표 설정을 통하여 모형화한 후 결합

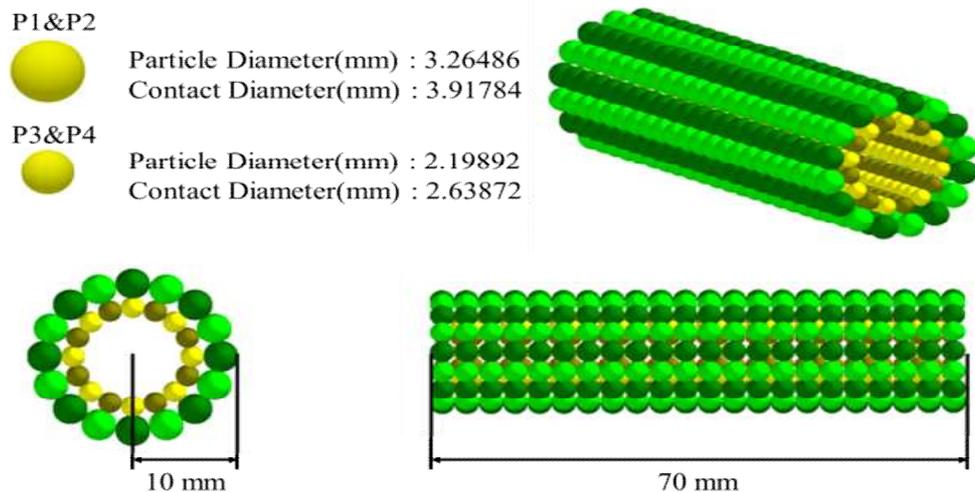


그림 62. 옥수수 줄기의 이산요소모델

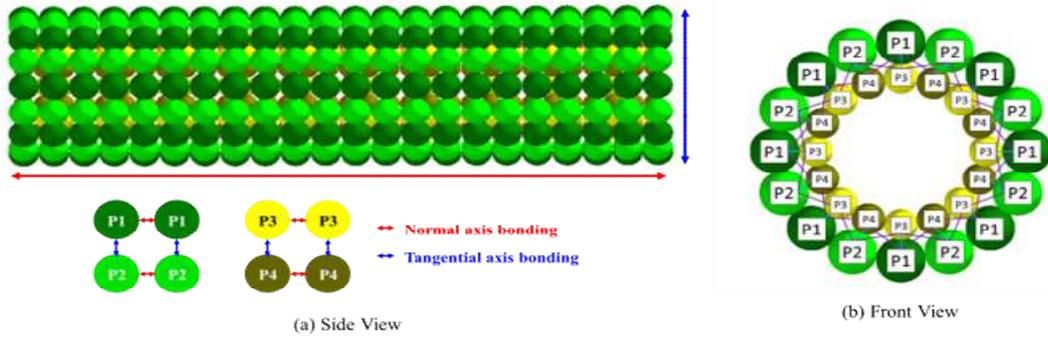


그림 63. 푼옥수수 줄기 이산요소모델의 결합 구성

- \* 만능재료시험기(UTM) 시험과 동일하게 시뮬레이션 수행
- ※ 압축 시뮬레이션 수행을 통하여 법선 방향의 결합 변수 선정
- ※ 3점 굽힘 시뮬레이션 수행을 통하여 법선 방향 결합 변수 선정
- ※ 파라미터 스터디를 통하여 결합 변수 도출
- ※ UTM 시험 결과와 시뮬레이션 결과 비교

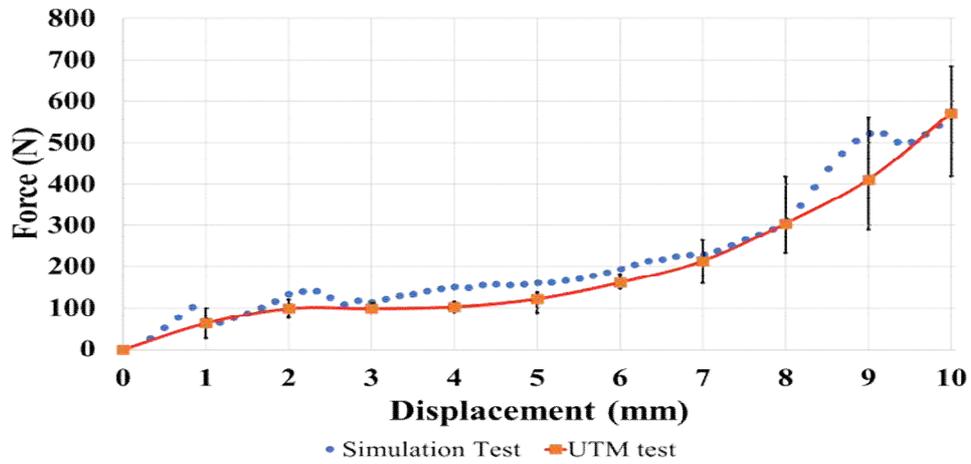


그림 64. 압축 결과 시험 결과 비교

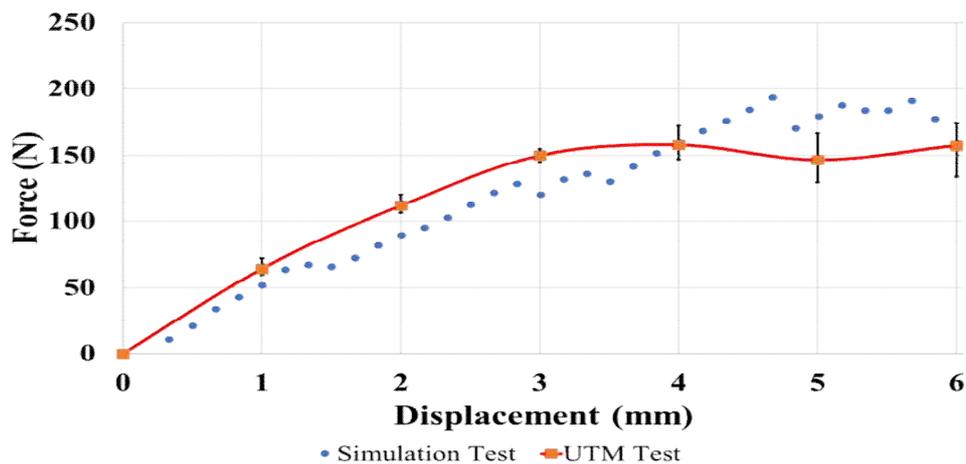


그림 65. 3점 굽힘 시험 결과 비교

표 37. 옥수수 줄기를 구성하는 입자간의 결합 변수

항목	P1-P1, P2-P2	P1-P2	P3-P3, P4-P4	P3-P4	P1-P4, P2-P3	P1-P3, P2-P4
Normal stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	3e+11	2e+10	1e+11	1e+10	1	1e+11
Shear stiffness per unit area, N/m <sup>3</sup>	3e+11	2e+10	1e+11	1e+10	1	1e+11
Normal strength, Pa	1.5e+07	3e+06	1e+06	1e+08	1	1e+10
Shear strength, Pa	1.5e+07	3e+05	1e+06	1e+08	1	1e+10

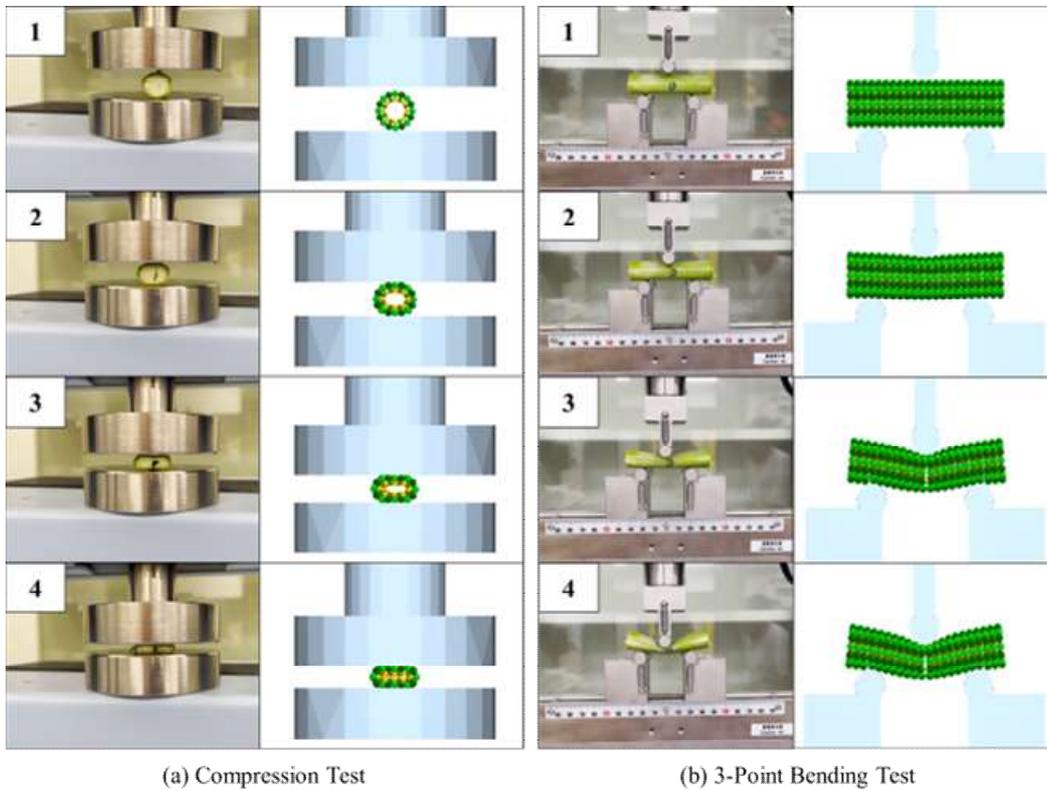


그림 66. UTM 시험 결과와 시뮬레이션 결과 이미지 비교

- 풋옥수수 이삭이삭 특성 시험
  - \* 풋옥수수 줄기 외의 물리적 특성 측정
    - ※ 줄기와 이삭이삭 사이 각도 측정
    - ※ 이삭이삭의 길이 및 무게 측정
    - ※ 이삭의 길이 및 무게 측정

- 풫옥수수 줄기 외의 역학적 특성 측정

- ※ 줄기와 이삭이삭의 탈과 시 최대 하중 측정
- ※ 별도의 지그 설계 및 제작
- ※ push-pull 게이지에 지그를 부착하여 측정



그림 67. 풫옥수수 이삭 물리적&역학적 특성 확인 시험

\* 찰옥수수 특성 시험(I)

- ※ 일시 : 2022. 07. 26.(수) ~ 28.(목)
- ※ 장소 : 밀양 남부작물부 시험 필드
- ※ 품종 : 일미찰

표 38. 일미찰 품종 특성 측정

Angle(°)	Force, N	Sub-stalk		
		Diameter, mm	Length, mm	Mass, g
19.12	93.04	13.29	115.85	18.16
Ear				
Diameter_upper, mm	Diameter_middle, mm	Diameter_under, mm	Length, mm	Mass, g
37.88	43.21	46.08	189.53	208.69

\* 찰옥수수 특성 시험(II)

- ※ 일시 : 2022. 08. 08.(월) ~ 09.(화)
- ※ 장소 : 홍천 옥수수 연구소 시험 필드
- ※ 품종 : 미백찰

표 39. 미백찰 특성 측정

Angle(°)	Force, N	Sub-stalk		
		Diameter, mm	Length, mm	Mass, g
30.02	72.88	15.87	113.72	23.05
Ear				
Diameter_upper, mm	Diameter_middle, mm	Diameter_under, mm	Length, mm	Mass, g
38.21	43.95	76.71	187.13	224.82

\* 단옥수수 특성 시험(I)

※ 일시 : 2022. 08. 22.(월) ~ 24.(수)

※ 장소 : 인제 옥수수 농가

※ 품종 : 초당옥

표 40. 초당옥 특성 측정

Angle(°)	Force, N	Sub-stalk		
		Diameter, mm	Length, mm	Mass, g
26.30	49.64	18.01	111.72	25.69

- 풋옥수수 이삭이삭(미백찰) 특성이 고려된 DEM 모델

\* 이삭이삭 DEM 모델 구성

※ 실제 옥수수 줄기 노드(node)와 이삭은 탄성체이지만, 해석의 효율을 위하여 강체로 구성

※ 노드를 통하여 이삭이삭 및 이삭이 생성

※ 각 입자의 좌표를 설정 및 결합

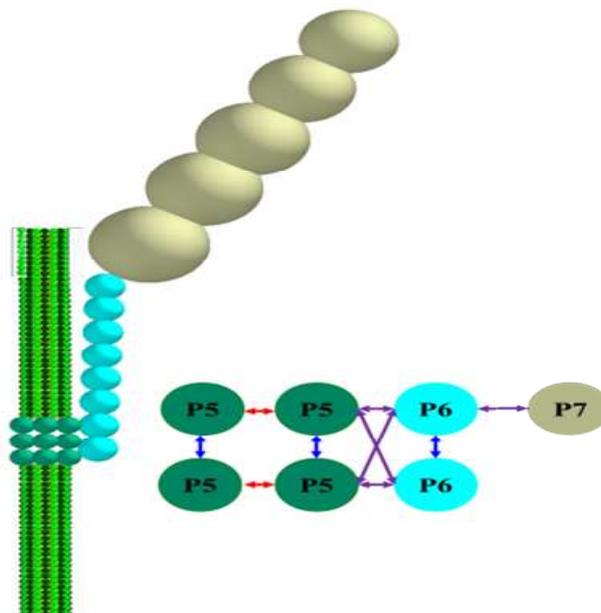


그림 68. 풋옥수수 이삭 이산요소모델의 결합 구성

\* 풋옥수수 줄기와 이삭(품종 : 미백찰) 탈과 시뮬레이션

※ 탈과 시 Max Force : 72N

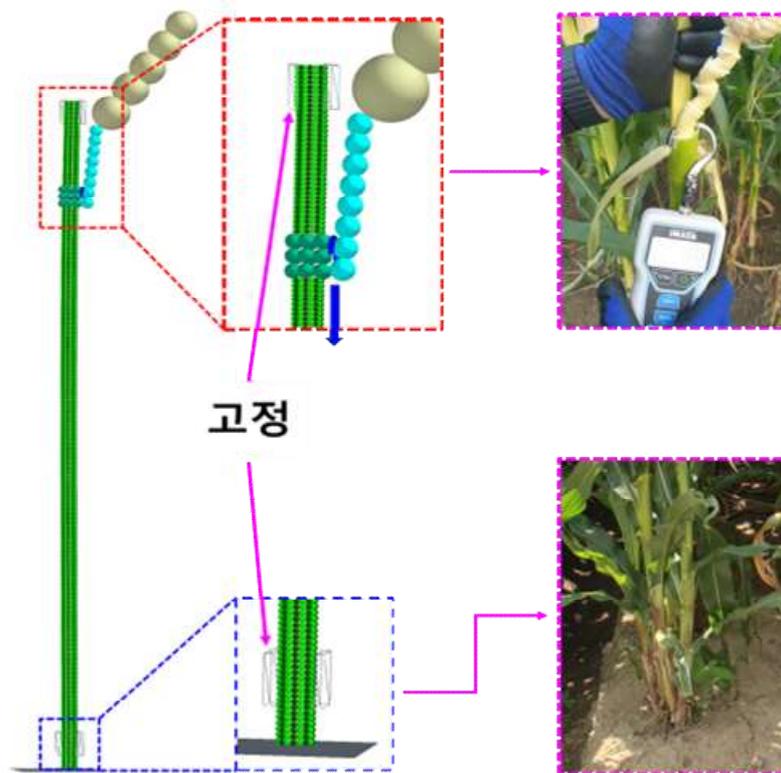


그림 69. 풋옥수수(품종 : 미백찰) 탈과 시뮬레이션 개념도

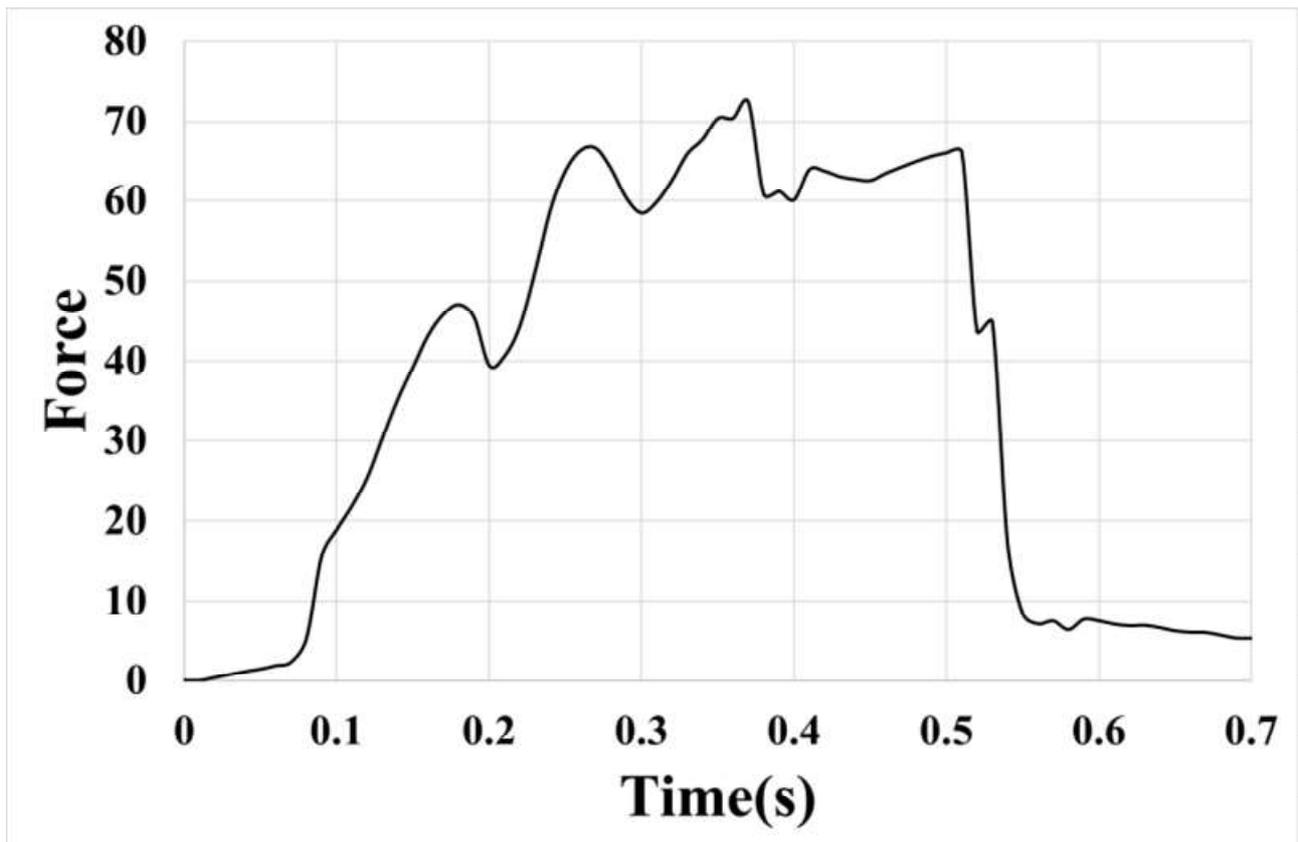


그림 70. 탈과(품종 : 미백찰) 시뮬레이션 Force 결과

○ 풋옥수수 수확기(Bottom-up 방식) 요인시험장비 모델 개발

- 수확기(Bottom-up 방식) 2D 도면을 활용하여 이송부, 탈과부 치수 측정

- CAD프로그램을 사용하여 측정된 치수를 기반으로 3D 모델링

- 요인시험장비 모델 구성

\* 이송부 : 고무벨트 롤러로 인해 접촉되어 있는 고무벨트간의 마찰로 인하여 옥수수 줄기 이송

\* 탈과부 : 실린더 형태의 롤러가 회전하며 이삭 탈과

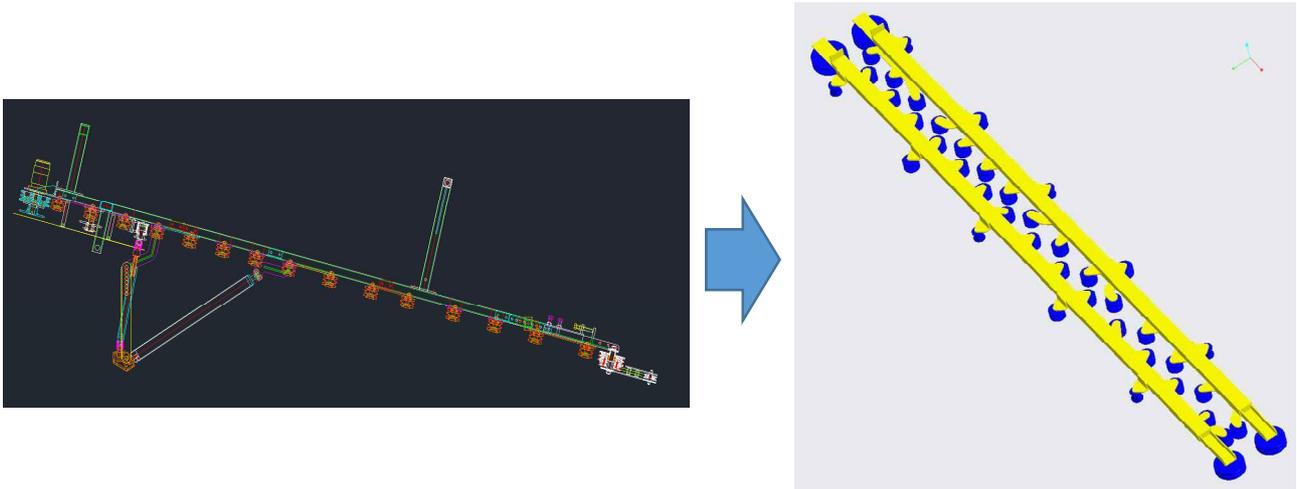


그림 71. 풋옥수수 수확기 요인시험 장비 이송부 3D 모델

- 풋옥수수 수확기(Bottom-up 방식) 장비 요인시험 시뮬레이션 수행

\* 고무벨트를 구성하는 Belt-system과 EDEM 연성해석 불가능

\* 또한, 해석의 효율성을 위하여 이송부의 형상을 고무벨트가 아닌 육면체로 형성

\* 컨베이어 벨트 모션을 사용하여 고무벨트의 움직임을 표현

\* 육면체는 고무벨트와 같이 유연체가 아닌 강체이기에 줄기의 직경만큼 이송부 간격 유지

\* 옥수수 수확 탈과율을 확인하기 위한 해석으로 위와 같은 이송부의 모델 변경은 탈과율을 확인하기 위해서는 고려가능

- 요인시험장비 모델 해석 조건

\* 이송부 속도 : 0.27 m/s

\* 이송부 각도 : 15°

\* 탈과 실린더 속도 : 180 rpm

\* 탈과 실린더 각도 : 45° / 60° / 75°

\* 풋옥수수 DEM 모델 생성 개수 : 3 개

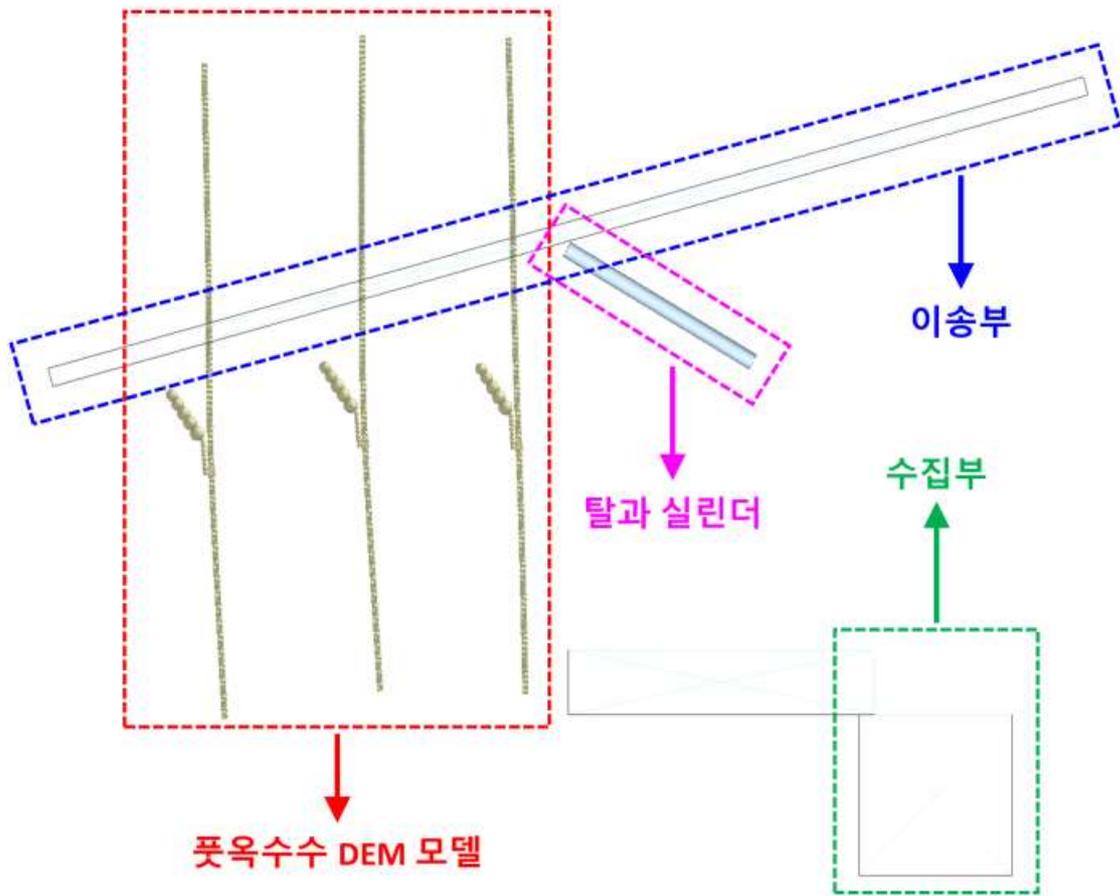


그림 72. 꽃옥수수 수확기(Bottom-up 방식) 요인시험장비 모델 구성

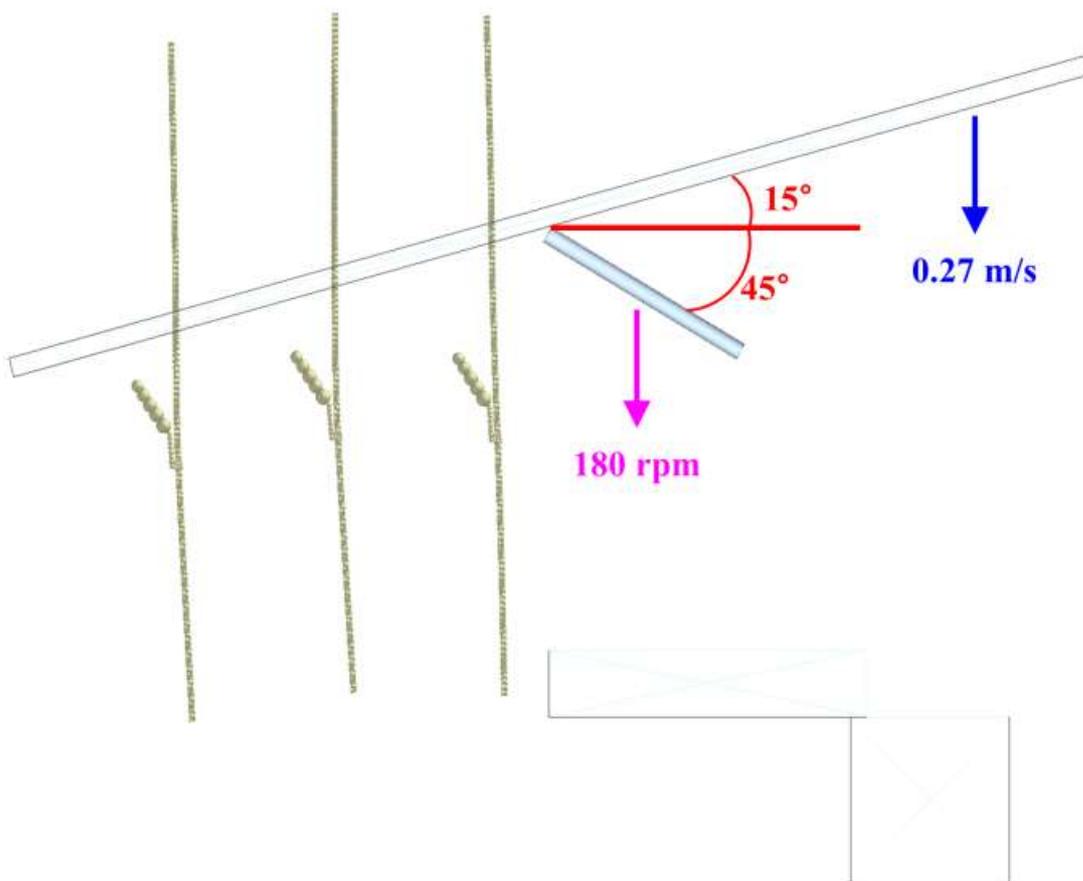


그림 73. 꽃옥수수 수확기(Bottom-up 방식) 요인시험장비 해석 조건

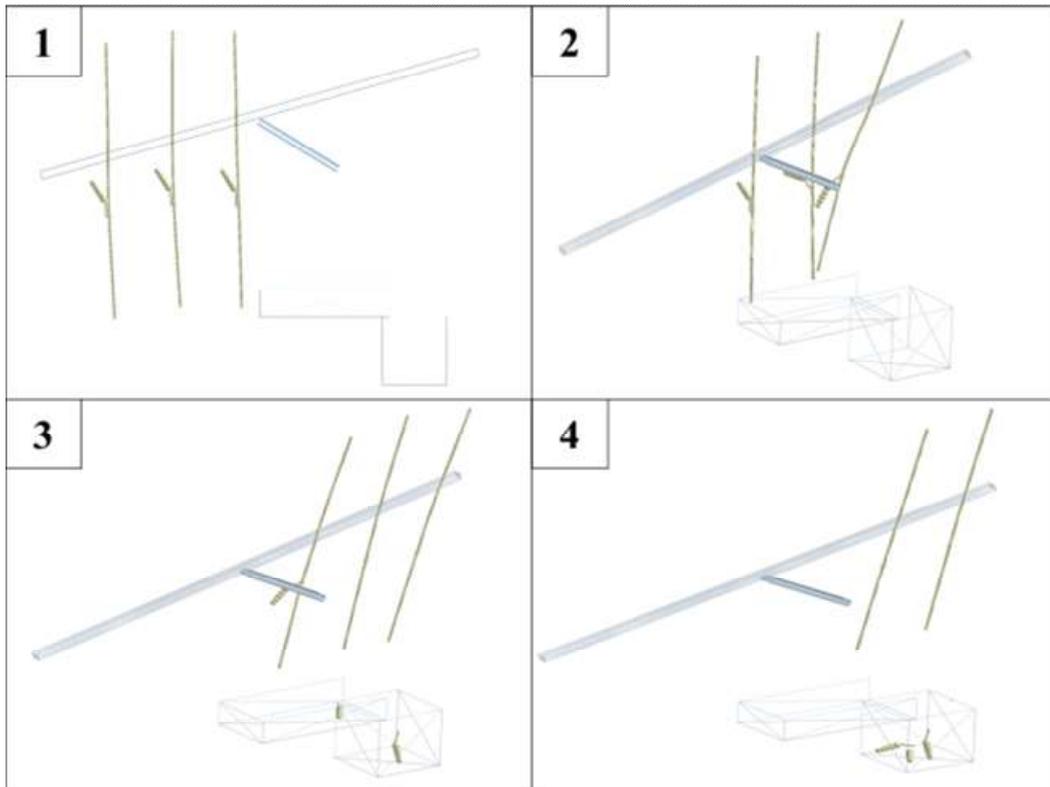


그림 74. 풋옥수수 요인시험장치 모델 탈과 과정

표 41. 풋옥수수 수확기(Bottom-up 방식) 요인시험장치 각도별 해석 탈과율 결과

항목	45°	60°	75°
탈과개수	3	3	2
탈과율(%)	100	100	66.6

○ 경사지 적응 및 안정성 향상을 위한 수확기 실시간 수평 제어기술개발

- 트랙터 3점 힌치부 유압실린더 기능을 고려한 풋옥수수 수확기 체결부 조성 및 실시간 수평 제어 기능

# 3장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

## 1절 연구수행 결과

### (1) 정성적 연구개발성과

---

#### □ 주관기관 1 (국립농업과학원)

- 팥옥수수 수확기 주요부 시험장치 요인시험 및 메커니즘 구명
  - 팥옥수수 수확기 주요부 시험장치 요인시험 및 메커니즘 구명
    - \* 품종에 따른 수확기 범용성 향상을 위한 예취 장치 제작 및 요인시험
  - 식용 팥옥수수 적합 탈과 메커니즘 구명을 위한 시뮬레이터 요인시험
    - \* Bottom-up 방식 탈과 메커니즘 적용 시험장치 제작 및 요인별 성능분석
      - ※ 데이터 분석 중
  - 식용 팥옥수수 수확작업 편의성 고려, 수집부 시뮬레이터 요인시험
    - \* 탈과 후 이송된 팥옥수수의 연속 작업을 위한 적재 시스템 설계
  - 팥옥수수 수확기 주요부 통합시험장치 현장 실증 및 시작기 설계요인 도출
    - \* 주산지 중심 팥옥수수 기계 수확 시험 포장 조성 및 운영

#### □ 참여기관 1 (두루기계통상)

- 팥옥수수 수확기 주요부 시스템 설계 및 개발
  - 트랙터 부착을 위한 옥수수 수확기 통합시험장치 3-point hitch 프레임 설계
  - 팥옥수수 수확기 통합시험장치 주요부 설계 및 해석
  - 팥옥수수 품종별 특성을 고려한 가변 예취부 설계
  - 팥옥수수 이삭 절단 후의 헐지 및 이송장치 설계
  - 팥옥수수 탈과 장치 설계
  - 팥옥수수 배출·파쇄 절단 장치(파쇄날) 설계
  - 팥옥수수 탈과 후 황이송 컨베이어 장치 설계
  - 팥옥수수 수량 및 무게 계측시스템이 적용된 수집 제어 자동화 기술개발
  - 각 시스템 부위별 구동을 위한 유압탱크 및 유압구동제어 시스템 설계

#### □ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단)

- 팥옥수수의 특성을 반영한 이산요소법(discrete element method) 모델 개발
    - 국내 생산 팥옥수수의 물리적 특성 측정을 통해 팥옥수수의 macro-parameter 정의
    - 국내 생산 팥옥수수의 역학적 특성(Young's modulus, poisson's ratio, friction, coefficient, etc.) 측정을 통해 팥옥수수의 micro-parameter 정의
    - Macro-parameter와 micro-parameter를 통해 팥옥수수 Multi-sphere particle 모델링을 진행하고, 시뮬레이션 결과와 시험결과를 비교하며 calibration 진행
-

## (2) 정량적 연구개발성과

□ 주관기관 1 (국립농업과학원)

- 국내학술발표 2건, 특허 출원 3건, 기술이전 1건, 기술료 1.5백만원, 고용창출 4건, 홍보 5건

□ 참여기관 1 (두루기계통상)

- 제품화 1건

□ 참여기관 2 (서울대학교 산학협력단)

- 논문게재(SCI) 1건, 논문게재(비SCI) 2건(1건 수정 후 제출), 국내학술발표 3건, 해외학술발표 1건

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명			연도	(2021)	(2022)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>	논문(SCI)	목표(단계별)			1	1	-
		실적(누적)					
	논문(비SCI)	목표(단계별)	1	1	2	-	
		실적(누적)	1	2	2		
	학술발표	목표(단계별)	1	2	3	15	
		실적(누적)	1	3	3		
	특허출원	목표(단계별)	2	1	3	10	
		실적(누적)	2	3	3		
	특허등록	목표(단계별)	0	3	3	10	
		실적(누적)	0	0	0		
연구개발과제 특성 반영 지표 <sup>2)</sup>	기술실시 (건수)	목표(단계별)	0	1	1	10	
		실적(누적)	0	1	1		
	기술료	목표(단계별)	0	1.5백만원	1.5백만원	15	
		실적(누적)	0	1.5백만원	1.5백만원		
	제품화 (건수)	목표(단계별)	0	1	1	20	
		실적(누적)	0	1	1		
	고용창출	목표(단계별)	1	1	2	10	
		실적(누적)	3	1	4		
	홍보전시	목표(단계별)	0	5	5	10	
		실적(누적)	0	5	5		
계							100

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능 <sup>1)</sup> )	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 <sup>2)</sup> (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치	목표설정 근거	
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준			
1	작업속도	a/hr	20	일본/OSADA	8	2.9	5 이상	농업기계 검정기준
2	수확률	%	30	일본/OSADA	-	95 이상	95 이상	
3	손상률	%	30	일본/OSADA	-	10 이하	5 이하	
4	이물질 함유율	%	10	일본/OSADA	-	10 이하	5 이하	
5	수확물 적재	kg	10	일본/OSADA	-	50 이하	500 ~ 1,000	

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	실 작업 부하를 이용한 식용 옥수수 수확기 설계 하중 도출	농업생명 과학연구	김지태	56(1)	대한민국	경상국립대학교 농업생명과학연구원	비SCIE	2022. 02. 09	Print 1595-5504 Online 2383-8272	100%
2	Maize harvester gearbox design modification for improved fatigue life	Scientific Reports	김지태	(2022)12:15576	England	Nature Publishing Group	SCIE	2022. 09. 16	-	100%
3	이산요소법을 이용한 식용 옥수수 줄기 모델 개발	농업생명 과학연구	이호섭	57(2)	대한민국	경상국립대학교 농업생명과학연구원	비SCIE	2023. 04. 30	게재중	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	(사)한국농업기계학회 추계 학술대회	김지태	2021. 10. 29.	제주 소노벨	대한민국
2	(사)한국농업기계학회 춘계 학술대회	이호섭	2022. 04. 29.	전주 농업진흥청 농업공학부	대한민국
3	(사)한국농업기계학회 추계 학술대회	이호섭	2022. 11. 04.	대구 EXCO	대한민국
4	The XX CIGR World Congress 2022	이호섭	2022. 12. 08.	KYOTO ICC	일본
5	(사)한국농업기계학회 추계 학술대회	우제근	2022. 11. 04.	대구 EXCO	대한민국
6	(사)한국농업기계학회 추계 학술대회	우제근	2022. 11. 04.	대구 EXCO	대한민국

[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	옥수수 수확장치	대한민국	농촌진흥청장, 김재동	21.12.13	10-2021-0177754	-	-	-	-	100	○
2	수확된 옥수수의 무게와 수량을 예측하는 옥수수 수확 장치	대한민국	농촌진흥청장, 김재동	21.12.13	10-2021-0177755	-	-	-	-	100	○
3	옥수수 수확장치	대한민국	농촌진흥청장, 김재동	21.12.01	10-2022-0165422	-	-	-	-	100	○

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타
3										√

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	풋옥수수 수확기	2024년 출시 예정	두루기계통상	-	농업	3년	-	-

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	경상	(특허)옥수수 수확장치_두루기계통상	두루기계통상	22.12.23	1.5백만원	-

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			2021년	2022년	
1	연구과제 수행	국립농업과학원	3	1	4
합계			3	1	4

□ 고용 효과

고용 효과	개발 전	구분		고용 효과(명)
		연구인력	생산인력	
	개발 후	연구인력	4	
		생산인력	-	
연구인력	-			
생산인력	-			

[사회적 성과]

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	가변 제어형 풋옥수수 수확기_농기계보급정책에 활용	농림축산식품부	2023	-

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비
1	국립농업과학원	농업기초기반연구	식용 풋옥수수 수확기 지역 적응성 향상 현장실증	우제근	70,000천원

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	중앙전문지	농수축산신문	발농업 기계화를 제고 농업기계 이용 활성화 도모	2022-06-28
2	중앙전문지	한국농기계신문	마늘양파부터 발농업기계화 우수모델 육성	2022-07-18
3	중앙전문지	한국농기계신문	마늘양파부터 발농업기계화 우수모델 육성	2022-10-04
4	중앙전문지	농축산신문	[전문가 기고]발농업기계 연구성과 및 첨단고도화 연구	2022-11-01
5	중앙전문지	아시아투데이	파종부터 수확까지 기계화...'미래농업 혁신 이끈다	2022-11-11

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

해당사항 없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

해당사항 없음

2절 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
팥옥수수 수확기 주요부 메커니즘 구명 및 요인 시험장치 설계·제작	예취부, 탈과부, 이송부, 수집부 주요 메커니즘 구명 및 시험장치 설계·제작 수행	100
팥옥수수 탈과 가시화 분석 및 성능 요인시험	초고속 카메라 활용 탈과부 가시화 분석 및 요인시험을 통한 중요요인 도출	100
현장 특성을 고려한 제어기술 및 시스템 개발	가변형 예취부, 3점 힌치를 적용을 통한 작업기 수평 제어, 로드셀 활용을 통한 수량 및 무게계측, 수확물 대용량 톤백 수집	100
가변 제어형 식용 팥옥수수 수확기 포장성능 시험 및 작업성능 분석	주산지 중심 포장성능시험 수행 및 예취율, 탈과율, 손상률 등 성능 분석 및 시험 결과 기반, 작업성능 분석	90

## 4장 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

### 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

---

1. 이물질 혼입률 5% 이하 달성의 경우, 회전하는 탈과롤러를 통해 줄기를 훑어내면서 풋옥수수 이삭을 분리하는 수확 메커니즘으로 인해 목표 달성의 어려운 점이 있음
  2. 수확물 적재량 500~1,000 kg 달성의 경우, 풋옥수수 이삭의 단위중량이 곡물 대비, 작기 때문에 부피당 적재량에 한계가 있음
- 

### 2) 자체 보완활동

---

1. 이물질 혼입률 최소화를 위해 탈과롤러 간격 조절, 규격 변경 등 추진 중
  2. 10 a 당 풋옥수수 총 수집량이 약 500~600 kg인 것을 고려하였을 때, 본 수확기의 적재량인 180 kg은 연속작업에 무리가 없을 것으로 판단됨
- 

### 3) 연구개발 과정의 성실성

---

농작물 특성상 한정된 시기에 측정 및 시험이 가능하다. 본 연구의 대상작물인 풋옥수수는 수확시기가 짧으며, 수확 적기에 포장성능시험이 이루어져야하기 때문에 시험시기가 지나면 연구 데이터를 수집이 어렵다. 하지만 옥수수 연구단지, 옥수수 주산단지 등 포장 조성 및 시험을 3차례 진행하였으며, 일미찰 및 초당옥수수 등 다양한 품종을 대상으로 성능 측정 및 분석을 실시, 개선점을 도출하였다.

---

## 5장 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 개발	풋옥수수 수확기 개발을 위한 주요부 메커니즘 구명 및 현장실증	국립농업과학원	국공립 연구소 (비영리)	200	200	100	신규 기술개발	해당 없음	-
	풋옥수수 수확기 설계·제작 및 성능시험	두루기계 통상	중소기업 (영리)	456	346	74.56	신규 기술개발	1-1	74.56
	풋옥수수 수확기 최적 탈과 시스템 개발을 위한 요인시험 장비 및 모델 개발	서울대학교 산학협력단	대학 (비영리)	253	253	100	신규 기술개발	해당 없음	-
<b>계</b>				<b>909</b>	<b>799</b>	-	-	-	-

## 6장 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

### 1. 연구개발성과 핵심기술

구분	핵심기술명
①	상하 높이 제어가 가능한 줄기 예취 및 탈과부
②	풋옥수수 수확 손상 최소화를 위한 회전롤러 적용 탈과부
③	실시간 수확물 수량 및 중량 무게 계측 적용 수집부
④	풋옥수수 탈과 후 잔여 줄기 파쇄부
⑤	줄기에취 및 풋옥수수 자루 탈과, 수확물 수집 및 줄기 파쇄를 일관 작업하는 복합작업형 수확기

### 2. 핵심기술의 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				√		√		√		
④의 기술				√		√		√		
⑤의 기술					√	√	√	√	√	√

### 3. 핵심기술별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	산업재산권 출원 완료 및 산업재산권 등록 추진
②의 기술	수확 시 발생하는 이물질 함유율 저감 방안 적용 및 수확성능 향상
③의 기술	산업재산권 출원 완료 및 산업재산권 등록 추진
④의 기술	풋옥수수 줄기 파쇄 성능 향상 추진 및 수확 후처리 작업 노력 절감
⑤의 기술	산업재산권 출원 완료 및 산업재산권 등록 추진

### 4. 성과창출계획

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE	1				
	비SCIE					
국내논문	SCIE					
	비SCIE	1				
특허출원	국내					
	국외					
특허등록	국내		2	1		
	국외					
사업화	시제품개발	○	○			
	상품출시			○	○	○
	기술이전	○				
	공정개발	○				
	매출액(단위 : 천원)	-	-	450,000	750,000	900,000
	기술료(단위 : 천원)	-	-	16,776	27,960	-

< 별첨 자료 >

해당사항없음

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단 농기계 산업화 기술개발사업 가변 제어형 식용 풋옥수수 수확기 개발의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단 농기계 산업화 기술개발사업 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.