

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호(O)

농업분야창의도전형 융복합모델연구개발사업 2023년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004516-01

미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발

2024.01.05

주관연구기관 / 서울대학교
공동연구기관 / 경북대학교

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발”(개발기간 : 2023. 04. 01 - 2023. 09. 30)과제의 최종보고서로 제출합니다.

납본일자 2024.01.05.

주관연구기관명 : 서울대학교산학협력단장
공동연구기관명 : 경북대학교산학협력단장



주관연구책임자 : 김영훈
공동연구책임자 : 김수린
참여기관책임자 :

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		농업분야 융복합모델 도전형		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)		시장창출형		연구개발과제번호			
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0607	50%	LB0605	30%	LB0606	20%
	농림식품 과학기술분류	CA15	50%	AB21	40%	RA39	10%
총괄연구개발명 (과제선정 후 해당 시 작성)							
연구개발과제명		미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발					
전체 연구개발기간		2023. 04. 01 - 2023. 09. 30(0년 6개월)					
총 연구개발비		총 50,000 천원 (정부지원연구개발비: 50,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체지원연구개발비: 천원, 그 외 지원연구개발비: 천원)					
연구개발단계		기초[○] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 작성)	착수시점 기준(1) 종료시점 목표(3)		
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	○ 미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발					
	전체 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 12대 국가전략 기술인 첨단바이오의 핵심 분야이자 그린바이오 산업을 통해 신(新)혁신성장 동력 육성 및 사회경제적 문제 해결을 위한 창의적인 연구주제로서 미생물 정밀발효기술을 활용하여 축산분야의 현안 문제를 해결하고자 하는 새로운 개념의 원천기반기술 확립 ○ 식량안보와 지속가능성을 고려하여 미래 농축산 분야 이슈의 전반적 해결을 위한 미생물 정밀발효 기술 기반의 가축용 대체사료원료 자원화 및 기초 기반기술 개발 ○ 축산현장 맞춤형 기술 개발을 통한 그린바이오산업의 발전 및 확대 기반 구축 ○ 1단계 개념연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획 ○ 2단계 선행연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 정밀발효를 이용한 미생물 단백질의 양돈용 대체사료원료 효용성 검증 ○ 3단계 심화연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료(단백질과 유지를 중심으로) 현장적용 및 상용화 기술 개발 					

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	28
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	31
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	81
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	82
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	83

별첨 자료 (참고 문헌 등)

최종보고서							보안등급		
							일반[○], 보안[]		
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		농업분야첨가도전형 농업분야합모델		
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			내역사업명 (해당 시 작성)		시장창출형		
공고번호		농축 2023-22호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		RS-2023-00230039		
					연구개발과제번호				
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0607	50%	LB0605	30%	LB0606	20%		
	농림식품과학기술분류	CA15	50%	AB21	40%	RA39	10%		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문							
		영문							
연구개발과제명		국문	미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발						
		영문	Development of the alternative ingredients of animal feeds using microbial precision fermentation technology						
주관연구개발기관		기관명	서울대학교 산학협력단			사업자등록번호	119-82-03684		
		주소	(02886) 서울시관악구 관악로 1			법인등록번호	114371-0009224		
연구책임자		성명	김영훈			직위	교수		
		연락처	직장전화				휴대전화		
	전자우편					국가연구자번호			
연구개발기간		전체	2023. 04. 03 - 2023. 09. 30(0년 6개월)						
		단계 (해당 시 작성)	1단계	2023. 04. 03 - 2023. 09. 30(0년 6개월)					
			n단계						
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()		합계		연구개발 비외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	
총계		50,000					50,000		50,000
1단계	1년차	50,000					50,000		50,000
	n년차								
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고		
							역할	기관 유형	
공동연구개발기관		경북대학교 산학협력단	김수린	부교수			공동연구	대학	
위탁연구개발기관									
연구개발기관 외 기관									
연구개발담당자 실무담당자		성명	김영훈			직위	교수		
		연락처	직장전화				휴대전화		
	전자우편					국가연구자번호			

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

2024 년 1 월 5 일

연구책임자: 김 영 훈



주관연구개발기관의 장: 서울대학교 산학협력단장



공동연구개발기관의 장: 경북대학교 산학협력단장



위탁연구개발기관의 장: (직인)

농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

연구개발 목표 및 내용	1단계 (해당 시 작성)	목표	(개념연구) 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세 기획(대체사료원료 개발의 로드맵 및 개념연구)
		내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료(단백질, 유지를 중심으로) 소재 발굴 ○ 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토 ○ 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축 ○ 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출
	n단계 (해당 시 작성)	목표	
		내용	

연구개발성과	
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구에서 제안하는 미생물 대체사료원료는 새로운 식량안보 기술로 활용될 수 있으며 특히 지속가능한 축산업의 미래기술로 활용이 가능함. ○ 미생물 유래 대체사료원료 확보에 활용함으로써 새로운 대체사료원료 개발과 함께 축종별 특성에 맞는 가공적성 및 소화율 개선에 도움을 주는 제조 기술의 보급이 가능함. ○ 미생물 대체사료원료로 품질 향상 및 영양학적 균형을 충족하여 제조된 신규 대체사료원료 디자인 기술을 제공하여, 산업화의 발판이 될 수 있음 ○ 식용가능한 농산물 및 식품 폐자원에 미생물 단백질과 유지 생산을 적용함으로써 융복합 소재를 구명하고 새로운 가축 사료영양 기술이 자리 잡을 수 있음.

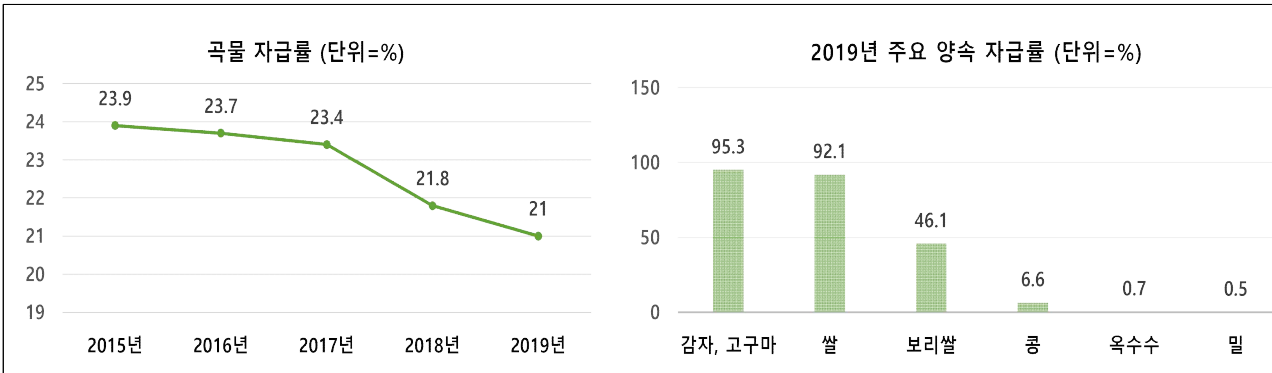
연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 ·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	미생물		정밀발효기술		가축사료		미생물 단백질		미생물 유지			
영문핵심어 (5개 이내)	Microorganisms		Precision fermentation technology		Animal feeds		Microbial protein		Microbial oil			

1 연구개발과제의 개요

1. 연구배경 및 필요성

○ 불안정한 배합사료 원료 수급

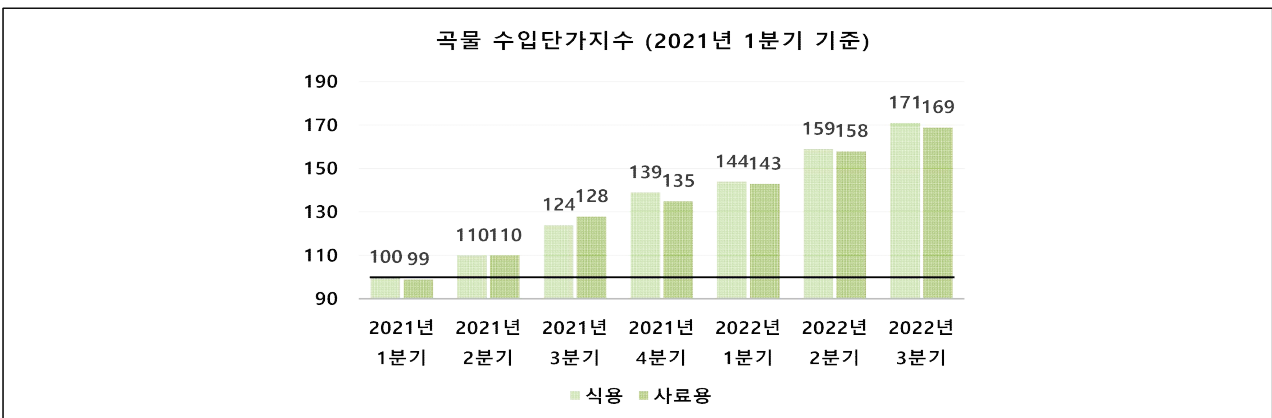
- 국내 사료용을 포함한 곡물 자급률은 2017년 23.4%, 2018년 21.8%, 2019년 21.0%로 해마다 감소하고 있으며 앞으로도 감소할 것으로 예상됨
- 우리나라는 가축용 배합사료 제조시 사용되는 원료의 90% 이상을 수입에 의존하고 있음
- 가축용 배합사료 주요 원료로는 콩, 옥수수, 밀이 있으며 이들의 자급률은 2019년 기준 각각 6.6%, 0.7%, 0.5%로 매우 낮은 수치이며 앞으로 더 감소할 것으로 예상됨
- 사료원료내 지질 원료로 첨가하는 식물성 유지의 경우 84.9%를 수입하고 있어 해외 의존도가 매우 높은 상태임
- 낮은 곡물자급률로 인해 절대다수를 해외 수입에 의존하고 있는 국내 가축용 배합사료 산업은 불가피하게 국제 곡물 가격 및 세계정세에 영향을 많이 받고 있는 것이 현재 국내 축산업의 현실임



<국내 곡물 자급률 현황 1)>

○ 급등하는 곡물 수입 단가

- 사료용 곡물 수입 단가는 매년 지속적으로 상승하였으며 최근 몇 년간 러시아 우크라이나 전쟁, 기후변화로 인한 작황 부진, 코로나19 출현, 국제유가 상승, 환율 상승 등 다양한 사건에 영향을 받아 계속해서 상승하고 있는 것을 확인함 2)



<국내 식용 및 사료용 곡물수입단가 지수 현황 3)>

- 러시아 우크라이나 전쟁 및 2022년 5월 인도의 밀 수출 금지 발표와 같이 주요 곡물 수출 국가의 내부 상황에 의해 수급이 불안정해질 수 있음
- 예상치 못한 해외 정세로 인해 곡물 단가가 급상승하면 수급에 문제가 생기며 또한 국내 사료산업

1) 농림축산식품부, 한국농촌경제연구원

2) 김정환, “식량 자급률 최저인데...3분기 곡물값 7% 더 뛴다”, 매일경제, 2022년 5월 8일

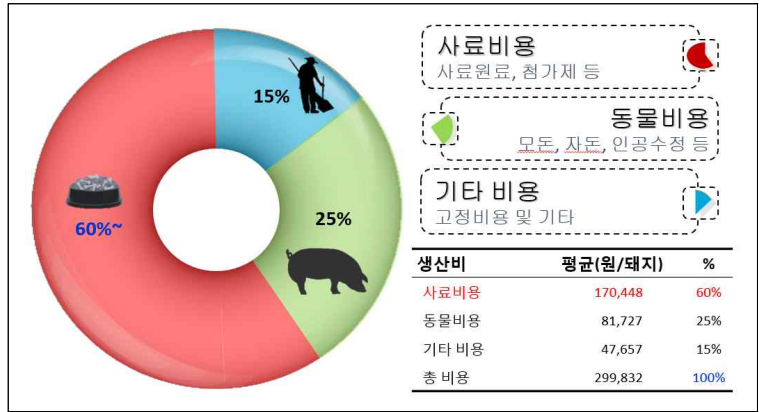
3) 농림축산식품부, 한국농촌경제연구원

에 엄청난 영향을 미치는 악순환이 반복되고 있음

- 또한, 가축생산을 위한 사료 곡물 농경지의 증가는 인간을 위한 작물 수확량과 생산면적 감소를 야기할수 있으며 목초지에서 비료 사용으로 인한 아산화질소 방출로 대기 중 온실가스(전체 온실가스 배출량의 12%) 배출에 따른 환경오염에 대한 우려도 지속적으로 제기되고 있음

○ **국내 축산업계가 직면하고 있는 문제**

- 축산업에서 사료비는 축산물 생산비의 60% 이상을 차지하므로 사료값 상승은 축산업에 큰 위기를 뜻함
- 현재 국제 곡물가 상승에 따라 사료값이 폭등하고 있으며 이에 따라 축산농가의 생산비 부담이 늘고 있음
- 한우, 젖소, 육우 농가의 경우 조사료 가격도 인상하여 가중된 고통을 감내하고 있음



〈생산단계에서 사료비용이 차지하는 비율〉

- 사료는 정부의 보조가 적어 곡물가격의 상승에 대한 부담을 고스란히 농가가 져야 하는 상황이며 외상으로 사료를 구매하는 농가의 경우 이자 비용까지 감당해야 하므로 사료값 상승이 농가의 경영에 미치는 영향이 큼
- 최근 러시아 우크라이나 전쟁이 장기화됨에 따라 미래의 지속적인 곡물가격 상승은 불가피 할 것으로 전망됨
- 또한, 사료원료내 단백질 및 지질 원료는 축종별/사양별 특성에 따라 첨가농도에 따른 장점이 보고됨에도 불구하고 첨가시 생산가격의 급등과 연결되어 제한적으로만 사용 가능함
- 따라서 국내 낮은 곡물 자급률 및 세계 정세에 따라 급등하는 곡물가격으로 인한 농가의 부담을 해결하기 위하여 사료원료 대체제의 개발이 반드시 필요한 시점임
- 최근까지 원료사료 중에서 현재 가장 기본적으로 사용되고 있는 옥수수-대두박을 대체할 원료사료를 찾기 위한 연구가 세계 곳곳에서 진행되고 있으며, 이미 많은 대체원료들이 대안으로 제시되었으나 아직 이러한 여러 원료 중에서 확실하게 그 대체효과를 입증 받은 경우는 없고 그 가능성만 꾸준히 제기되고 있는 실정임
- 또한, 선발된 저가 대체사료원료의 배합은 소화율 악화, 영양소 함량의 변동과 불균형, 또는 항-영양 인자들로 인해 생산성 감소 및 축산물 품질저하를 초래할 수 있는 위험성을 내포하고 있음
- 이러한 문제점을 해결하고 환경 및 안정적인 생산과 연계하여 지속가능한 대한민국의 축산 발전을 도모하기 위해서는 보다 효율적인 가축용 대체사료원료의 개발이 시급한 실정임
- 따라서 국내 낮은 곡물 자급률 및 세계 정세에 따라 급등하는 곡물 가격으로 인한 농가의 부담을 해결하기 위하여 대체사료원료의 개발이 필요함

○ **미생물 유래 유용성분 소재화 기술의 대두**

- 농생명 바이오소재는 생물체로부터 분리, 정제 기술 혹은 생명공학 기술을 생산과정에 이용하여 기존 화학합성에 의해 생산되는 제품을 대체할 수 있는 농업 소재를 말함
- 농생명 바이오소재 개발 원천기술의 개발은 바이오식품/사료, 바이오 환경 그리고 바이오에너지 등의 다양한 분야로 확장할 수 있음
- 이러한 농생명 바이오소재 중 세포 수준에서 특정 형질을 직간접적으로 조절하는 연구가 정밀농업이며, 정밀농업으로 적용할 수 있는 요소들의 구조적 특성에 대한 분석 및 제어와 적용할 수 있는 분야에 관한 연구는 타겟 생체에 따라 다양하며 점점 그 중요성이 주목받고 있으며 활용 가능성이 넓어질 것으로 예상됨
- 미생물 세포의 경우 주로 단백질 제품을 개발하거나 전체 발효 등의 방식으로 오래전부터 상용화가 이루어져 옴

- 미생물 단백질의 경우 공간의 차지가 작고 경제적이란 장점이 있지만, 인체 내 무해성 등 안전성에 관한 연구가 미진하여, 기존에 잘 알려진 GRAS^ 산업미생물을 대상으로 초기 산업화 단계에 있음 (*GRAS: Generally Recognized As Safe)
- 미생물 유래 유효 물질의 다양한 유도체 및 복합물의 발굴, 포트폴리오화와 그의 작용 기작 연구 기술 확립 및 다양한 각테일법의 조합 기술 개발 등 정밀발효기술과 연계된 다양한 연구들이 시도되고 있음



〈단백질 원료별 2020-2035 성장 전망〉

○ 가축사료용 대체원료 생산을 위한 미생물의 새로운 가능성 부각

- 배합사료에 사용하기 위한 원료사료는 아래와 같이 몇 가지의 조건을 충족해야 함

- 1) 우선 가격적인 조건이 기존에 배합사료에 쓰이는 원료보다 저렴하여야 함
- 2) 세계적으로 원료의 생산량이 많아 꾸준한 물량을 확보하는데 어려움이 없어야 함
- 3) 수출입을 위한 저장성 또한 우수해야 함
- 4) 동물의 성장에 기존의 사료에 비해 부정적인 영향을 미쳐서는 안됨

- 따라서 최근까지 다양한 대체 원료 가능물질들이 대두되었지만 가격적인 측면에서 저렴한 대체원료의 단점은 원료 내에 포함되어 있는 영양소의 조성이 가축이 이용하기 어려운 형태이거나, 항 영양 인자를 함유하고 있다는 문제가 발생하였음
- 또한, 대체원료로 제시된 원료들에 대한 영양소 함량, 항 영양인자에 대한 기본적인 정보는 제시되어 있지만, 이들 대체원료에 대한 축종 및 연령별 적정 첨가수준 및 영양소의 이용성을 증가시킬 방안에 대한 연구결과들은 아직 미진함. 이러한 시점에서 대체원료의 이용가능성과 사료원료로서 대체원료사료의 이용성을 증대시킬 수 있는 정확하고 구체적인 연구가 시급히 요구됨
- 최근 미생물 유래 영양성분은 축산분야에서도 새로운 대체사료원료 적용을 통한 사료공급 안정화 및 식량 위기 극복의 방안으로 새롭게 각광받고 있음

Bacteria	Yeast	Fungi	Algae
<i>Methylophilus methylotrophus</i> <i>Methylomonas</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Brevibacterium</i> <i>Rhodobacter capsulatus</i> <i>Bacillus</i> <i>Lactobacillus</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> <i>Pichia pastoris</i> <i>Kluyveromyces marxianus</i> <i>Candida utilis</i> <i>Torulopsis corallina</i> <i>Geotrichum candidum</i>	<i>Aspergillus oryzae</i> <i>Fusarium venenatum</i> <i>Sclerotium rolfsii</i> <i>Polyporus</i> <i>Trichoderma</i> <i>Scytalidium acidophilum</i>	<i>Spirulina</i> <i>Chlorella</i> <i>Scenedesmus</i> <i>Porphyrium</i> <i>Dunaliella</i> <i>Arthrospira</i>

〈가축사료 대체원료로 활용 가능한 미생물 자원〉

- 미생물 단백질 기반 대체육은 자연적인 조건 영향이 적고, 지속·연속적인 생산이 가능해 경제적·효율적이며, 다양한 농산 부산물을 바이오매스로 활용하여 대량생산이 가능하다는 이점이 있음
- 특히 대사공학기술을 활용하여 단백질 함량을 높이고 안전성 위험 인자의 발현을 선택적으로 줄일 수 있는 정밀 생산 디자인이 가능하며 배양단계에서 영양성분 이외의 부분을 다양한 기능성 소재로 재활용 할 수 있는 업사이클(Up-cycle) 순환기술로도 적용이 가능함
- 특히, 미생물(미세조류, 곰팡이, 박테리아 등)을 활용한 대체 단백질 생산이 환경오염, 식량난, 동물

복지의 대안으로 급격하게 부상하고 있음. 이중 마이코프로테인(Mycoprotein)은 곰팡이(*Fusarium venenatum*)에서 생산되는 단백질의 일종으로 가축 유래의 동물성 단백질과는 달리 콜레스테롤이 없고 지방함량이 적은 것이 특징으로 건물 기준 25% 수준의 식이섬유를 함유하고 있는 등 영양적 가치도 매우 높아 다양한 대체식품의 단백질 소재로 활용되고 있음

- 최근 들어 독립영양 미생물(Autotrophic Microorganisms)을 사용하여 경제성이 높은 차세대 미생물 단백질의 개발 가능성이 보고됨에 따라 수소영양박테리아(Hydrogenotrophs) 또는 메탄영양박테리아(Methanotrophs) 등을 이용하여 고순도의 친환경 에어프로테인(Air protein)을 생산하는 시도가 계속되고 있음. 이러한 미생물 단백질은 향후 농축산업 신소재 활용과 관련된 미래 신산업을 창출할 수 있는 가능성을 보유하고 있음
- 단백질의 경우 식물 추출 식물성단백질과 미생물(효모, 해조류, 곰팡이, 박테리아 등)로부터 제조되는 미생물단백질, 식용곤충으로부터 제조되는 곤충단백질, 그리고 동물 세포 배양을 통한 동물세포 단백질로 분류되며 소재별 대체육의 지속가능성, 시장성 등을 정리한 표는 아래와 같음

<대체소재별 지속가능성과 시장성>

		미생물 기반	식물 추출	동물 세포 배양
지속 가능성	온실가스		감소	
	동물 복지		해당 없음	
	안전성	검증 진행(일부 완료)		검증 진행
시장성	단백질 품질	1.0	0.96	0.92
	단백질(100%) 당 비용(\$/kg)	13.0	2.0	300

- 실제, 식물 추출 단백 소재 기반의 대체육 제품은 제품유형별 시장규모 중 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 신규 대체단백 소재로 미생물을 기반으로 한 대체육 제품의 비중이 증가하고 있는 추세임. 동물 세포 배양의 경우 연평균 시장규모 증감률은 19.5%로 식물 추출 및 미생물 단백질에 비해 매우 높은 수치이지만 여전히 시장에서는 가장 낮은 비중을 차지하는 분야임

<세계 대체단백질 제품유형별 시장규모4>

구분	2018(단위:백만달러)		2019	2025	연평균 증감률
		비중(%)	(단위:백만달러)	(단위:백만달러)	
식물단백질 기반제품	8395.8	87.2	8962.5	14319.8	8.1
곤충단백질 기반제품	607.5	6.3	722.9	2470.1	22.7
해조류단백질 기반제품	517.6	5.4	553.8	894	8.3
미생물단백질 기반제품	102.2	1.1	106.5	143.1	5.0
동물세포단백질 기반제품	0	0	0	31.6	19.5
합계	9623.1	100	10345.7	17858.6	9.5

- 식량안보를 측정하는 주된 지표는 단백질의 이용률, 질(quality), 단백질 생산시 환경에 미치는 영향 등이 있음. 미생물을 이용한 친환경적이고 양질의 단백질 생산을 통해 식량안보 강화에 기여 가능
- 미생물 단백질 생산은 식물성 단백질이나 남세균과 같은 조류 단백질에 비해 에너지 효율이 높아 농업미생물을 활용한 새로운 그린바이오산업 창출에 기여 가능

※ 1년 동안 평균 태양광 대비 biomass 효율은 대체로 5%를 넘지 않으나 독립영양세균인 수소산화세균의 경우 10%를 상회함

※ 미생물 단백질 생산의 에너지 효율이 높은 이유는 계절변화에 영향을 받지 않고 외부 환경자원 소모 없이 영양분을 효율적으로 사용할 수 있기 때문

○ 안전성과 특정영양성분 결핍에 따른 미생물 유래 대체원료 생산 기술의 보완이 필요한 시점

- 식품 소재의 급성장으로 인하여 산업계에서 다양한 용도로 활용되고 있으나 단백질과 지방 등 미생물 유래 대체영양원료의 잠재적 독성 가능성 및 인체 및 환경에 대한 영향이 명확히 밝혀져 있지 않아 안전성 규명이 주요 이슈로 부상하고 있으며 특히 관련 식품 소재의 심사 및 등록에 관한 정책적 지원이 다소 미흡하여 이들에 대한 세부적인 법규가 필요함
- 기존의 동물모델을 이용한 미생물 유래 대체원료의 독성평가의 경우 미생물 유래 대체원료 및 사료

4) 한국농촌경제연구원(2020)

의 조제 및 투여에 의한 미생물 유래 대체원료의 물성 변화 가능성 및 저용량의 장기 노출에 의한 생체 내 독성 유발 가능성이 배제되어 있으므로, 미생물 유래 대체원료 소재의 안전성은 여전히 논란이 되고 있으며 이들의 다양한 산업동물 및 반려동물을 대상으로 안전성 및 위해성을 평가할 수 있는 기술 및 표준화 시험법은 부족한 실정임

- 미생물 유래 대체원료 소재의 신속하고 정확한 안전성 평가를 활용한 신규 가축용 대체사료원료의 안전성 평가기술 구축은 연구개발 프로세스를 최적화하고 개발을 가속화시켜, 신규 대체육용 식품 소재의 인허가에 필요한 시간과 비용을 최소화 것으로 예상됨
- 신규 가축용 대체사료원료의 안전성 평가 기술 구축은 우리나라 축산기업이 글로벌 회사와 규모나 기술적인 측면에서 큰 격차가 나는 국면을 전환할 수 있는 전환점이 될 수 있음
- 대한민국 식품산업이 세계적으로 발전할 수 있는 가능성이 높은 분야이며, 이러한 부분을 지원하기 위해 대체/예측을 활용한 신규 가축용 대체사료원료의 안전성 평가 기술 구축은 인력의 효율적인 운용이 가능하게 함으로써 국내 중소기업의 국외시장 진출 발판을 마련할 것으로 예상됨
- 대체원료 관련 시장의 확대와 과학기술의 발전으로 인해 기존 곡물 유래 단백질 및 지방에 가까운 식감과 영양조성을 모사하는 미생물 발효기술이 개발되고 있으나, 실제 곡물 유래 사료원료 제품에 존재하는 영양성분에는 차이가 있음
- 예를 들어 최근 미국 듀크대(Duke University) 연구진이 대사체학(metabolomics) 기법을 이용하여 식물성 단백질의 영양학적 프로파일을 조사한 결과, 190개의 대사물질 중 171개(아미노산, 다이펩타이드, 비타민, 페놀, 포화 및 불포화지방산 등)는 실제 축산육과 차이를 보임. 즉, 인간의 건강에 중요한 대사물질($\omega-3$ 지방산 docosahexaenoic acid, creatine, spermine, anserine, cysteamine, glucosamine, squalene 등)의 경우 동물성 단백질에서 독점적으로 또는 더 많은 양이 검출됨
- 사료원료의 영양성분은 구조적 및 이화학적 특성 차이로 서로 다른 안정성을 보이며, 사료제조공정에는 다양한 가공방법(열, 고압, 염 등)이 사용될 수 있음. 따라서 영양성분 별 사료가공적성 개선, 공정 중 안정성이 담보된 대체사료원료 개발이 요구됨

○ 첨단바이오 산업 확대 속 농생명 미래기술의 국가비전과의 연계성

1) 나고야의정서에 따른 국내 토종 미생물자원 및 신규 사료대체원료 소재 확보의 중요성 강조

- 고부가가치 미생물자원 선점을 둘러싼 국제경쟁이 치열한 지금 국내에서는 산업적 활용성이 높은 미래 고부가 미생물자원의 발굴 및 산업화가 미비하여 대부분의 유용 물질 및 기능성 미생물을 외국에서 수입하고 있는 실정임으로 국내 토종미생물을 이용하여 미래 미생물 유래 사료원료 생산을 위한 미래 고부가 미생물자원의 발굴 및 DB 구축은 수입대체 효과를 증대시키고 국가 간 자원 경쟁력을 확보 할 수 있으며 향후 포스트 FTA시대를 대비한 농업미생물 분야의 선도핵심기술을 보유하는데 기여할 것으로 판단됨
- 우리나라에서 미생물 유래의 기능성 영양물질 생산 기술은 초기 진입 단계로 타 경쟁국과 비교해 아직 기술도입기 수준이나 최근 바이오헬스 산업 분야를 국가비전 산업으로 집중 투자를 위한 정부 차원의 정책 추진이 가시화되고 있으며, 특히 산업동물뿐만 아니라 반려동물의 생애주기 맞춤형 건강기능성 식품분야으로도 연계될 수있는 향후 신성장 가능한 산업분야로 예측되고 있어 추가적인 연구 및 정책지원이 필요함
- 특히, 단백질 대체 소재에 대해 선진국에서의 기술선점이 두드러지고 있어 환경오염과 같은 소비자의 염려를 줄이면서 고급 축산물 생산을 통한 식량 안보 등 국가 경쟁력 확보를 위한 필수적이고 핵심적인 미래 식품소재 기술개발 분야에 대한 국가 단위의 연구개발이 필요한 시점임

2) 기존 미생물 연구 분야가 최근 축산 분야를 포함하는 농생명 생태계 전반의 영역으로 확장

- 국가적 위기상황 중 하나인 식량문제, 농업 환경오염, 지속가능한 농업 생태계 보전 등 심화되고 있는 농생명 관련 국가적 문제를 미생물을 통해 해결책을 도출하고 활용할 수 있을 것으로 전망됨
- 특히 미생물 정밀발효 기술은 농림수산, 축산, 작물 등 농업의 근간이 되는 분야뿐만 아니라, 이로

부터 생산된 농생명의 융·복합 기술까지 다양한 기반 기술을 제공하여 그 확장성이 높을 것으로 전망됨

- 곰팡이, 효모, 세균 등 다양한 미생물자원의 중요성으로 인해 이미 다국적 농식품 기업들은 대학들 간의 다양한 파트너십 구축을 통해 미생물 유래 기능성 원료 생산과 관련된 산업 적용 연구를 수행 중임
- 따라서 국내의 경우 글로벌 기술 패권 경쟁 시대를 맞아 국가 농축산업 경쟁력을 갖추기 위해 국가 차원의 그린바이오산업의 일환으로 미생물 연구 진흥계획 수립이 필요함

3) 미생물 유래 대체사료원료 개발은 식량안보 등 공익적 측면에서 정부의 체계적인 지원 필요

- 환경문제, 식량안보 대응 및 축산 대체사료원료 생산 연구는 공공성이 목적으로 민간의 연구투자에 어려움이 있으므로 R&D 추진 필요
- 다양한 연구자들에게 기술 보급, 분석지원, 데이터 제공 등 성공적인 연구 추진을 위한 목적별 원료 생산을 위한 미생물 인프라 시스템 구축이 필수적으로 요구됨

2. 국내외 연구현황

○ 미생물을 활용한 가축용 대체사료원료 개발

- 세균, 효모, 곰팡이, 미세조류 등 다양한 미생물들을 사료원료의 대체제로써 사용함으로써 수입의존도가 높은 가축 사료원료를 대체하여 장기적으로 지속가능한 축산 확립 가능
- 단백질 및지방 함량이 높은 종 선발 후 대사공학기술을 통한 원하는 영양소 함량 최대화 후 사용 가능

〈미생물 구성 (% 건조 중량) 5〉

Composition	Fungi	Yeast	Bacteria	Algae
Protein	50-65	45-55	30-45	40-60
Fat	1-3	2-6	2-8	7-20
Ash	3-7	5-10	9-14	8-10
Nucleic acid	8-12	6-12	7-10	3-8

- 대량 배양조건 탐색 및 대량배양을 통한 공급의 안정화 확보 가능
- 산업화가 가능한 미생물에 따른 대체원료소재 생산의 특징은 다음과 같음

종 류	장점	단점
세균	분해가 용이한 세포벽, 고함량 단백질	높은 NA 함량, 작은 균체 크기, 저밀도 성장
효모	균체크기, 낮은 NA, 높은 이용성및 수용성	낮은소화율/단백질함량, 느린성장률
곰팡이	배양, 균체회수 용이	느린성장률과 단백질 함량
미세조류	배양, 균체회수 용이, 고함량 단백질	난분해성세포벽, 중금속오염

- 정밀생산디자인을 통해 안전성 위협인자의 발현을 선택적 감소 가능
- 곡물과 달리 기후변화에 영향을 받지 않으며 수확을 위해 필요한 토지의 면적이 현전하게 적음
- 연 3~4회 수확이 가능한 일반적인 곡물과 달리 여러번 수확이 가능함
- 농작물의 경우 토양 비옥화를 위한 비료화과정을 수행하게 되는데 이때 질소, 인을 사용하여 막대한 양의 온실가스들이 생성되지만 이러한 비료화 과정이 필요하지 않으므로 환경에 미치는 영향이 적음
- 미생물을 이용한 대체사료원료 소재로서의 장점과 단점은 아래와 같으며 아직 광범위한 소재화는

5) Brinton, M. M., and L. Warren. "Single cell protein in industrial microbiology." McGraw-Hill Book Company 408 (1976).

시도되지 않고 있는 실정임

<미생물 유래 대체사료원료 개발의 장단점>

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> - 높은 생산성과단백질함량/영양적 가치가 높음 - 유전공학적으로 형질전환 가능 - 기후와 상관없이 적은 면적에서 대량 연속생산가능, 정밀발효 - 경제적 가치가 없는 폐기물을 이용한 생산 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 세포의 불활성화, 독성물질 포함(곰팡이독소, 내독소등) - 세포벽 성분의 난분해성, 소화기관 자극, 알러지 반응 - 높은 핵산(nucleic acid) 비율: 안전성에 중요한 요인 - 비선호특성(미생물 자체 색깔, 풍미)

가축용 핵심 대체사료원료 중 “미생물 단백질” 소재 개발

- 세계 단백질 관련 식품 시장 규모는 2017년 110억달러(약 13조원)에서 2025년 278억달러(약 33조원)로 연평균 성장률 12.3%를 기록할 것으로 예측되면서 해외에서는 이미 단백질 관련 식품 시장 규모가 가파른 성장세에 있음
- 특히, 기존의 식물성 단백질 생산뿐만 아니라 독립영양 미생물 배양을 통한 친환경 식용 단백질 생산 기술도 실용화에도 성공할 정도로 국내기술 대비 우수한 기술력을 확보하고 있음.
- 식용 가능한 세균 등 다양한 미생물 후보군들이 존재하며 탐색을 통한 대체단백질 소재 발굴 필요
- 잠재적인 대체 단백질 선별 후 안전성 검토 및 단백질 소재의 사료적용을 위한 영양성분 분석 및 영양학적 우수성 검토 필요
- 대량 생산기술 개발과 사료화 공정을 통한 지속적인 공급시스템 확보 가능
- 농산업 폐자원을 활용한 경제배지 확립 및 생산수율 최적화 기술 개발 가능
- 산업동물(단위가축 및 반추가축) 및 반려동물 실증연구를 통한 실제 영양대사 유효성 검증 필요

○ **곰팡이(Fungi) 유래 미생물 단백질 생산**

- 곰팡이 유래 미생물단백질 소재는 마이코프로테인 (mycoprotein)이라고 명명되어 있으며 국내외 대체단백질 소재로 주목 받고 있음. 주로 사상균 (Filamentous fungi) 배양 또는 발효를 통해 얻은 균사를 단백질 소재로 사용하며 GRAS (Generally Recognized As Safe)로 알려진 안전한 진균류인 *Aspergillus oryzae*, *A. niger*, *Fusarium venenatum*, *Trichoderma reesei* 등이 연구에 사용되고 있음
- 곰팡이는 쉬운 배양 방법, 상대적으로 큰 사이즈로 인한 수확 용이, 낮은 수분 활성도, 높은 단백질 함량, 좋은 아미노산 구성 등 다양한 이점을 가지고 있으므로 사료 내 단백질원으로 사용이 용이할 것으로 판단됨 6)
- 다양한 기질을 활용 가능하며 현재까지 완두콩 부산물 7), 감자 부산물 8), 설탕 부산물 9), 대추 부산물 10) 등과 같은 당을 포함한 다양한 농업산업폐기물을 이용한 친환경적인 배양 실험들이 성공적으로 진행되었음. 사료원료 생산을 위해 농업산업폐기물에 진균 배양할 경우 보다 경제적이고 친환경

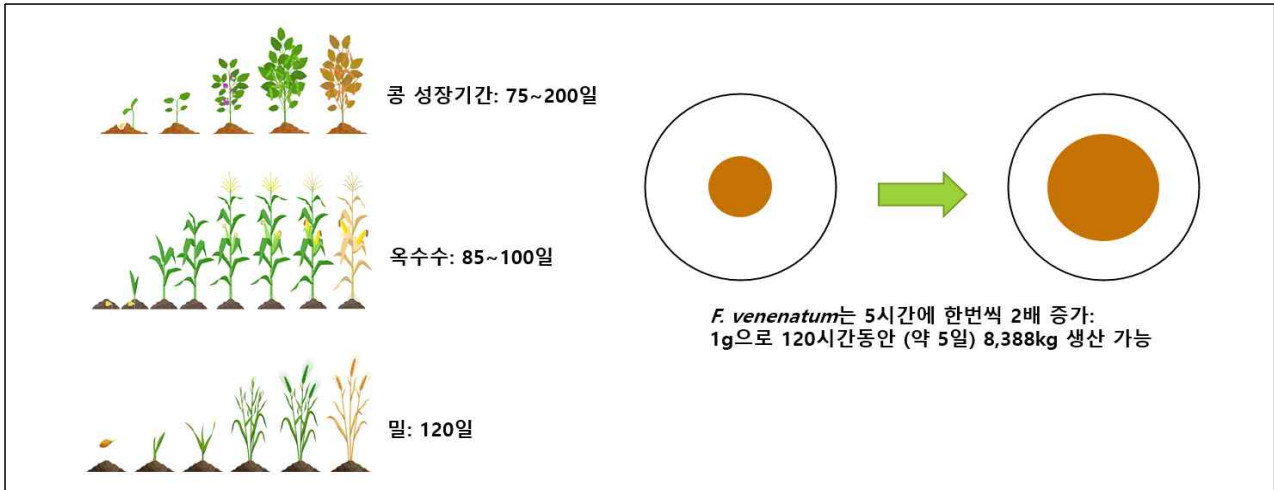
6) Onyeaka, Helen, et al. "Single Cell Protein for Foods and Feeds: A Review of Trends." The Open Microbiology Journal 16.1 (2022).
 7) Souza Filho, Pedro F., et al. "Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi." Fungal biology and biotechnology 5.1 (2018): 1-10.
 8) Spiller, Marc, et al. "Environmental impact of microbial protein from potato wastewater as feed ingredient: Comparative consequential life cycle assessment of three production systems and soybean meal." Water research 171 (2020): 115406.
 9) Saejung, Chewapat, and Pongsathorn Salasook. "Recycling of sugar industry wastewater for single-cell protein production with supplemental carotenoids." Environmental technology 41.1 (2020): 59-70.
 10) Reihani, Seyedeh Fatemeh Seyed, and Kianoush Khosravi-Darani. "Mycoprotein production from date waste using *Fusarium venenatum* in a submerged culture." Applied Food Biotechnology 5.4 (2018): 243-352.

경적인 배양이 가능할 것으로 예상됨. 곰팡이는 phytase, cellulase, lipase, keratinase 등과 같은 다양한 효소를 생산 및 분비를 하는데 이 분비된 효소들은 고분자인 폐기물을 저분자로 분해하는데 활용되거나 동물의 소화를 도울 수 있는 첨가제의 역할도 할 수 있는 이점을 가지고 있음

<배합사료 주요원료와 영양성분 비교 11)>

영양성분	<i>F. venenatum</i> KACC 49797 (A3/5)	콩	옥수수	밀
수분	0.00	0.00	0.00	0.00
조회분	3.24	5.28	1.34	1.79
조단백질	22.26	40.23	8.52	12.86
조지방	20.24	20.05	4.03	1.73
탄수화물	54.26	27.89	83.42	83.62
조섬유	45.64	6.55	2.69	2.77
라이신	4.367	1.56	0.26	0.42
메치오닌	0.207	0.41	0.17	0.23
트레오닌	0.965	1.46	0.31	0.39
시스틴	0.234	0.44	0.19	0.33

- 배양 시간의 경우 식물의 경우 몇 개월 동안 재배가 필요하지만, 진균의 경우 단순 영양분 공급을 통하여 단시간 내 배양이 가능하여 많은 양의 단백질을 빠른 시간 내에 생산할 수 있는 이점이 있음. 예를 들면, *F. venenatum*를 사료원료로 사용할 경우 이론적으로 1g으로 5일간 총 8,388kg의 biomass 생산이 가능하며 연속배양 방법의 도입을 통해 효과적이며 지속적인 생산도 가능함. 또한, 식품의 경우 최근 보고에 따르면 2050년까지 소고기의 20%를 곰팡이를 포함한 미생물 기반 육류로 대체할 경우 연간 산림 벌채가 56% 감소할 수 있음이 보고됨. 이는 마이코프로틴이 지속가능성 높은 대체소재로서의 가능성을 제시하고 있음

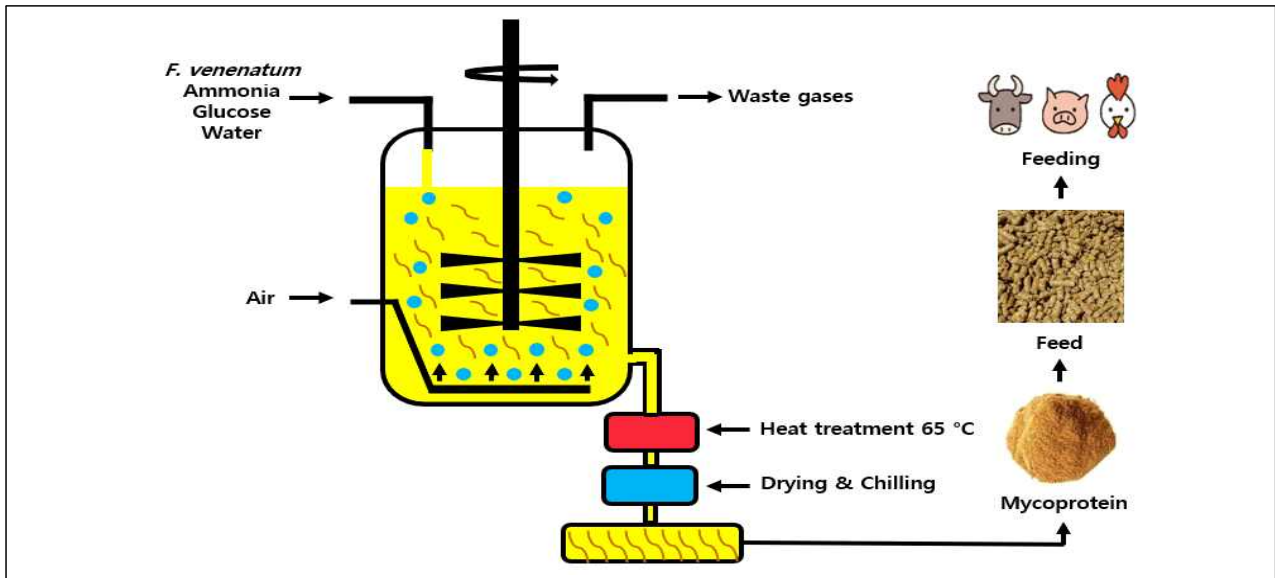


<기존의 사료원료와 미생물의 생산속도 비교 12) 13)>

- Nature's Fynd 기업이 옐로스톤 국립공원 화산열천수에서 분리한 *F. venenatum* flavolapis 곰팡이를 활용한 대체단백질 사업 진행 중
- Marlow foods 기업에서 *F. venenatum*을 이용하여 대체단백질 사업 진행 중
- Mycorena 기업이 *F. venenatum*과 같은 사상균을 이용하여 대체단백질 사업 진행 중
- University of Tsukuba의 하가와라 다이스케 교수 연구팀이 누룩곰팡이를 활용한 대체단백질 생산 개발 중
- Mycel 기업이 곰팡이를 기반으로 한 대체단백질 개발 진행 중
- 국내외 단백질 함량이 높은 곰팡이를 이용하여 식품용 대체단백질원으로 활용하기 위한 연구들이 진행 중이며 이를 식품이 아닌 사료원료의 단백질원으로 사용할 시 농업산업폐기물과 같은 값싼 재

11) 농사로, 한국표준사료성분표
 12) KOSIS 국가통계포털, 농업생산량
 13) 강원도청, 식량작물 생산실적

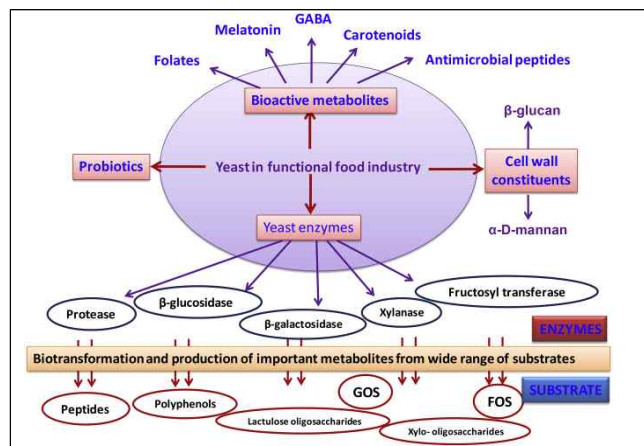
료로 용이하게 배양 가능할 것임이 예상됨



〈효과적이고 지속적인 생산을 위한 배양기 설계 도면〉

○ 효모(Yeast) 유래 미생물 단백질 생산

- 상기 mycoprotein의 경우 대량배양이 어려운 곰팡이라는 점과 곰팡이 배양시에 발생하는 이취가 제품개발에 걸림돌임. SCP(Single Cell Protein)로 불리는 효모균체단백질은 단백질 함량이 50%에 이르며, 탄수화물 40%, 지질 2%, 회분 8%로 대체육 단백질 소재로 최적의 조성비를 가지고 있음.
- 특히 효모균체단백질의 아미노산 함량을 보면 필수아미노산(루신, 발린, 라이신 등)의 비중이 높고, 성인 기준 amino acid score가 대부분의 아미노산에서 2 내외임.
- 황 함유 시스테인과 메치오닌의 함량이 높아 가공시에 다양한 풍미에 기여할 수 있음.
- 또한 높은 water/oil absorption capacity, foaming capacity/stability, emulsion activity/stability 와 같이 대체육 가공시에 가공적성을 향상시켜 줄 수 있는 증점제 및 유화제로써의 기능성을 가지고 있음
- 게다가 높은 항산화활성(DPPH scavenging activity, beta-carotene bleaching activity, total phenolic contents, FRAP)과 다양한 건강기능성 소재를 함유하고 있음
- 효모균체단백질로 가장 많이 사용하는 효모 균주는 *Saccharomyces cerevisiae*로, 양조 및 제빵에서 오랫동안 사용해온 안전하고 유용한 식품 소재이며, 가장 잘 알려진 진핵세포 모델로써 유전적, 생태학적 정보가 풍부하여, 최근에는 정밀대사디자인을 통해 다양한 식품, 바이오, 제약, 에너지 소재 생산의 세포공장으로도 사용되고 있음
- *S. cerevisiae*로 대표되는 효모 구성성분의 기능성 식품 소재화 가능성은 효모의 다양한 필수아미노산, 비타민, 무기질 및 대사물질들 뿐만 아니라 세포벽을 구성하는 베타글루칸과 글루코만

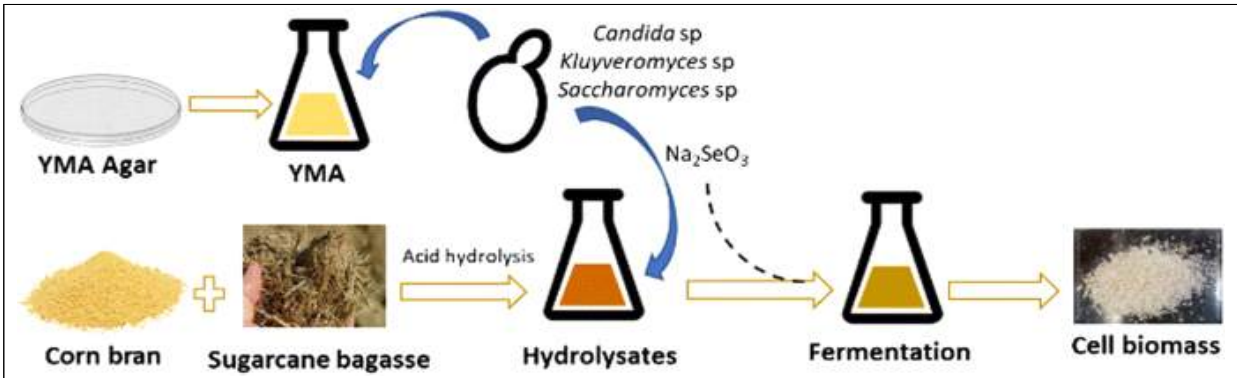


〈효모 구성성분의 기능성 식품 소재화 및 바이오소재 생산을 위한 세포공장으로의 활용 14) 15)〉

14) Rai, Amit Kumar, Ashok Pandey, and Dinabandhu Sahoo. "Biotechnological potential of yeasts in functional food industry." Trends in Food Science & Technology 83 (2019): 129–137.
 15) Rai, Amit Kumar, and Kumaraswamy Jeyaram. "Role of yeasts in food fermentation." Yeast diversity in human welfare (2017): 83–113.

난의 면역증진효과로 대표될 수 있으며, 이러한 기능성을 바탕으로 *S. cerevisiae* var *boulardii*는 진균류 중에는 유일하게 probiotics로 사용되고 있음

- 한편, *Candida utilis*와 *Kluyveromyces marxianus* 또한 SCP 생산에 사용될 수 있는 안전한 효모 균주로 최근 높은 단백질 함량과 넓은 기질 범위 등으로 관심이 높아지고 있음.
- 효모균체단백질을 생산하기 위한 연구는 우수한 효모 종을 발굴하고, 효모균체 생산을 위한 값싸고 친환경적인 배지를 활용하는 방향으로 진행되고 있으며, 최근에는 효모 배양 배지에 첨가물(셀레늄 등)을 넣어 기능성이 향상된 균체단백질 생산 연구도 수행되고 있음



〈효모기반 SCP 생산 개요 1)우수 효모 종 발굴, 2)농업부산물 기반 값싼 원재료 활용 16)〉

- 이처럼 효모균체단백질은 영양학적으로 우수하고 산업적인 대량생산이 용이하기 때문에 대체육 단백질 소재로 활용될 수 있으며, 부가적인 가공적성 기능성과 다양한 건강 기능성을 바탕으로 타 단백질소재에 비해 경쟁력이 높음
- 최근 이스라엘의 스타트업 FFW사는 SCP로 만든 대체육 시제품을 선보이기도 했고, 미국의 Arbiom사는 목재를 원료로 SCP를 생산하는 공정이 이론적으로 가장 낮은 수준의 온실가스를 배출하는 단백질 생산 공정임을 홍보하며 연구개발 중에 있음
- 우리나라 또한 수급조절 및 저장시설 부족 등의 이유로 생산량 30%가 폐기되고 있는 농산폐기물 및 가공부산물 등을 원료로 SCP 생산 공정을 개발하는 것이 지속가능한 식품소재 생산을 위해 유망한 전략이 될 수 있음. 특히 우리나라에서 생산량이 많은 벵집, 미곡부산물, 과수전정지 등과 폐기채소류 및 껍질류가 대표적인 원료가 될 수 있음

○ 미세조류(Microalgae) 유래 미생물 단백질 생산

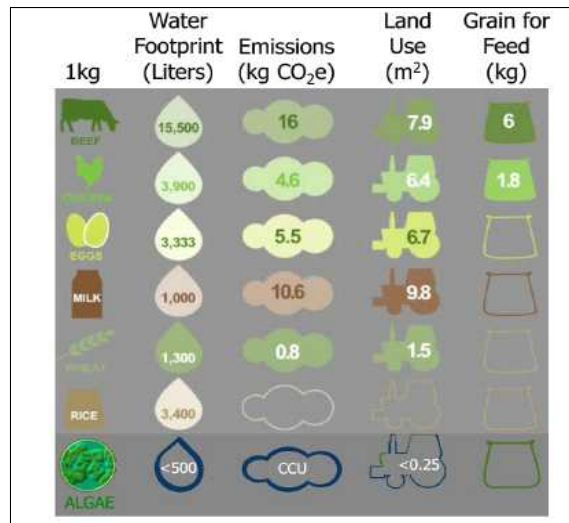
- 미세조류는 거대조류와 비교하여 매우 작은 조류를 뜻하는 용어로, 이를 이용한 미생물 단백질은 물, 햇빛, 이산화탄소만으로도 대량 증식이 가능하며 여러 생리 기능 활성 물질을 보유, 영양학적 특성을 보유하기 때문에 거대조류와 유사한 소재로서의 장점을 보유함
- 미세조류는 다른 단백질원과 비교했을 때 많은 장점을 가지고 있음
 - ① 환경친화적 배양 가능. 다른 자원에 비해 생산할 때 적은 양의 물이 소비되고, 땅을 황폐화하지 않음. 또한, 광합성을 통해 성장하기 때문에 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 대기 중 탄소농도를 낮추는데 기여 할 수 있음. 특히, 이러한 점은 탄소 저감 정책을 추진하는 한국의 정책과 잘 융합될 수 있을 것으로 사료됨
 - ② 빠른 성장과 높은 단백질 함량. 미세조류는 매우 빠르게 성장(4일-20일)하여 생산량(productivity)이 굉장히 높음. 또한, 종(species)에 따라, 배양조건에 따라 단백질 함량이 상이하지만 일반적으로 건중량 대비 10%가 넘게 단백질로 구성되어 있고, 많게는 60%까지 차지함
 - ③ 영양학적 우수함. 미세조류 바이오매스 내에는 단백질 외에도 항산화물질인 아스타잔틴(astaxanthin), 루테인(lutein), 베타카로틴(beta-carotene) 등은 물론 혈중 콜레스테롤 저감에 효과적인

16) Martiniano, Sabrina Evelin, et al. "Effect of selenium uptake on growth metabolism in yeasts for the production of enriched single-cell protein using agro-industrial by-products." Biomass Conversion and Biorefinery (2020): 1-9.

17) <https://algaebiomass.org/>

인 오메가-3(omega-3) 지방산, 면역증진에 도움을 주는 베타글루칸(beta-glucan) 등도 포함되어 있기 때문에 대체단백질원으로 섭취시 추가적인 건강적 이득도 기대할 수 있음. 특히 아스타잔틴, 베타카로틴 등은 각각 붉은색과 주황색을 띠기 때문에 대체단백질을 활용할 때 육류의 색상을 구현하기 위한 천연 항산화 색소로 활용이 가능할 것으로 예상됨

- 이러한 장점들 덕분에 미세조류 유래 단백질 수요량은 지속하게 증가할 것으로 전망되고 있으며, 2054년에는 대체단백질 시장의 20%를 차지할 것으로 예측됨
- 미세조류가 카로티노이드와 단백질을 비롯한 각종 생리활성 물질을 생산하는데 효과성이 있다고 평가됨에 따라 식품업계와 사료업계를 중심으로 빠른 성장세가 나타나고 있음. 실제로, 2018년 기준 17억 달러 규모로 형성된 미세조류 관련 제품은 2019~2027년 동안 연평균 5% 성장을 거듭해 2027년 기준 약 27억 달러 규모로 성장이 전망됨
- 미세조류 관련 제품 시장이 아직 초기 시장 형성 단계인 점을 고려할 때 다양한 업종에서 최종제품을 생산하기 위한 소재로 활용도가 높아짐에 따라 글로벌 시장은 지속적으로 성장세를 유지할 것으로 전망됨
- Geb Impact Technology(홍콩): 미세조류 유래 식품 브랜드인 Eiyoka 런칭, 미세조류에서 추출한 아스타잔틴 및 *Arthrospira platensis*, *Euglena gracilis*를 활용한 식품 개발



<원료 생산이 환경에 미치는 영향 17)>

<조류 건중량 대비 화학구성표(지질, 단백질, 탄수화물) 18)>

Substrates	Lipids (%)	Proteins (%)	Carbohydrates (%)	References
Macroalgae				
Green algae				
<i>Codium fragile</i>	1.8	10.9	32.3	Jung et al. (2011b)
<i>Enteromorpha linza</i>	1.8	31.6	37.4	Jang et al. (2012)
<i>Ulva Lactuca</i>	6.2	20.6	54.3	Kim et al. (2011)
Red algae				
<i>Gelidium amansii</i>	0-3.1	15.6-16.3	61-67.3	Jung et al. (2011b); Park et al. (2011a)
<i>Porphyra tenera</i>	4.4	38.7	35.9	Jung et al. (2011b)
<i>Gracilaria verrucosa</i>	3.2	15.6	33.5	Jung et al. (2011b)
Brown algae				
<i>Laminaria Japonica</i>	1.8-2.4	9.4-14.8	51.9-59.7	Jung et al. (2011b); Kim et al. (2011)
<i>Hizikia fusiforme</i>	0.4-1.5	5.9-13.9	28.6-59	Jang et al. (2012); Jung et al. (2011b)
<i>Saccharina japonica</i>	0.5	19.9	44.5	Jang et al. (2012)
<i>Sargassum fulvellum</i>	1.6	10.6	66	Jang et al. (2012)
<i>Ecklonia stolonifera</i>	2.4	13.6	48.6	Jung et al. (2011b)
<i>Unduria pinnatifida</i>	1.8-2.0	15.9-18.3	40.1-52	Jang et al. (2012); Jung et al. (2011b)
<i>Sargassum fuvelum</i>	1.4	13	39.6	Kim et al. (2011)
Microalgae				
<i>Scenedesmus obliquus</i>	12-14	50-56	10-17	Becker (1994)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	16-40	8-18	21-52	Becker (1994)
<i>Chlorella vulgaris</i>	14-22	51-58	12-17	Becker (1994)
<i>Porphyridium cruentum</i>	9-14	28-39	40-57	Becker (2007)
<i>Spirogyra sp.</i>	11-21	6-20	33-64	Becker (1994)
<i>Prymnesium parvum</i>	22-38	28-45	25-33	Becker (1994)
<i>Porphyridium cruentum</i>	9-14	28-39	40-57	Becker (1994)
<i>Anabaena cylindrica</i>	4-7	43-56	25-30	Becker (1994)
<i>Spirulina Platensis</i>	16	42	11	Sydney et al. (2010)
<i>Euglena gracilis</i>	14-20	39-61	14-18	Becker (2007)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	11	29	13	Sydney et al. (2010)
<i>Dunaliella salina</i>	6-9	12-57	32-55	Becker (2007); Feinberg (1984)
<i>Chlamydomonas</i>	23	17	59	Feinberg (1984)
<i>Cyclotella cryptica</i>	18	13	67	Feinberg (1984)

- Triton(미국): 대체 육류 및 식물성 제품을 위한 미세조류(*Chlamydomonas reinhardtii*) 유래 소재 생산, 발효 기술을 통한 햄 및 기타 육류 유사 단백질 생산

18) Milledge, John J., et al. "A brief review of anaerobic digestion of algae for bioenergy." Energies 12.6 (2019): 1166.



〈Triton사에서 생산 중인 미세조류 유래 분말 3종 19〉

- Sophie' s bionutrients(싱가포르): 식물성 해산물 제품 생산 회사로, 식물성 생선 필레(Fillets), 새우, 크랩 케이크, 연어, 참치 통조림(Toona) 등 생산, 미세조류를 활용한 고단백 식물성 밀가루 생산 및 식물성 패티 및 식물성 우유 개발



〈Sophie' s bionutrients사에서 생산 중인 미세조류 유래 분말(왼쪽) 및 분말을 활용한 식물성 패티(가운데)와 식물성 우유 20〉

- Odontella(프랑스): 미세조류(*Odontella aurita*) 및 해조류를 활용한 생선, 갑각류 등의 해산물 대체품 생산, 미세조류 및 해조류 추출 성분을 활용한 식물성 연어 개발
- Terravia(미국): AlgaVia 브랜드 설립, 미세조류 유래의 지질이 풍부한 유제품, 계란 및 오일 대체 분말 생산, 단백질이 풍부한 단백질 대체 분말
- Algama(프랑스): 미세 해조류에서 추출한 단백질로 동물성 단백질을 대체할 식물 기반 단백질 원료 개발에 집중, 최근 약 310만 유로(약 42억어원)의 투자금 유치
- 국외 미세조류 기술 개발 현황

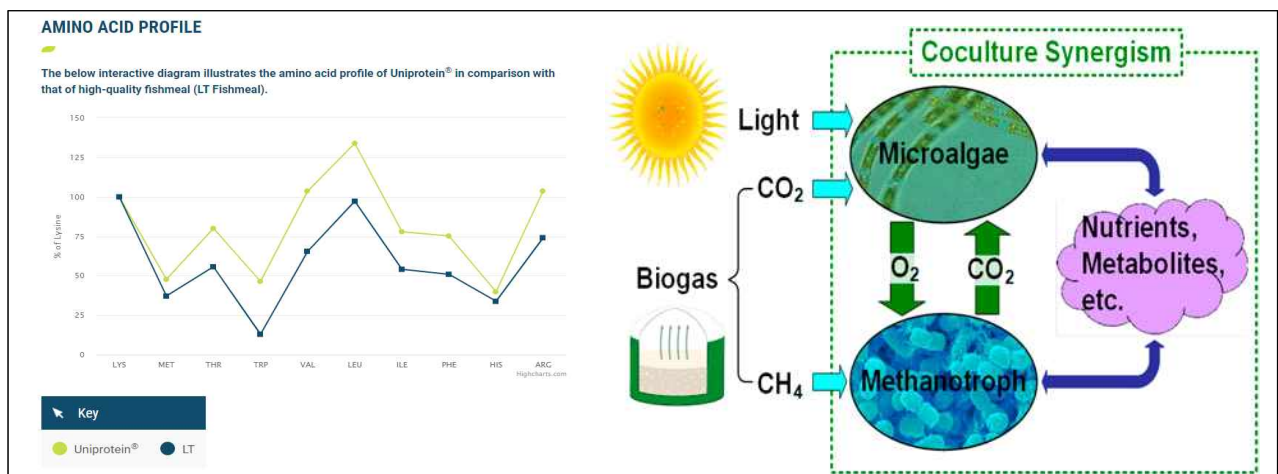
특허명	출원번호	요약
Method for making plant-based meatloaf or tofu using single cell proteins fro microalgae	15930753	○ 미세조류를 이용한 식물성 단백질 추출 및 식물성 단백질 이용
Protein concentrates and isolates, and processes for the production thereof from macroalgae and/or microalgae	12943858	○ 단백질 농축물 및 단백질 분말 생산
High-protein gelled food products made using high-protein microalgae	14808175	○ 미세조류를 이용한 고단백 겔형 과자 개발
Fractionation of proteins and lipids from microalgae	13707754	○ 미세조류로부터 단백질과 지질 분리 방법 제시 ○ 조류에서 펩티드 및 아미노산류 추출
Microalgal biomass protein enrichment method	16254463	○ 헤테로트로픽 조건 하에 성장한 미세조류의 단백질 농축을 위한 방법 제시
High protein and high fiber algal food materials	12684893	○ 단백질 및 섬유질이 풍부한 미세조류를 이용 ○ 발효를 통한 고단백, 고섬유질 식품 소재 제조

19) <https://www.tritonai.com/>

20) <https://sophiesbionutrients.com/>

○ 메탄영양세균(Methanotroph) 유래 미생물 단백질 생산

- 메탄영양세균이란 온실가스중 두 번째로 많다고 알려져 있는 메탄을 탄소원과 화학적 에너지로 사용하여 증식하는 세균 및 고세균으로 호기적 및 혐기적 환경에서 잘 성장함
- 메탄영양세균은 주로 메탄이 생성되는 환경에서 자주 발견되며 일부 메탄영양세균은 대기중의 메탄도 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 다양한 기업에서 환경오염과 식량위기에 대응하기 위하여 메탄영양세균을 이용한 단백질 생산기술에 대한 연구들을 진행 중에 있음
- 메탄을 화석연료로 사용시 화학반응식은 $CH_4 + 2O_2 > CO_2 + 2H_2O$ 이며 메탄영양세균의 증식에 사용시 화학반응식은 $CH_4 + 1.454 O_2 + 0.105 NH_3 > 0.520 X (biomass) + 0.480 CO_2 + 1.69 H_2O$ 으로 이를 통해 메탄을 biomass 생산에 사용할 때 화석연료로 사용 때보다 방출되는 CO_2 양이 약 52%가 절감된 것을 확인할 수 있으며 biomass 생산 후 부산물로는 깨끗한 물이 생성됨을 확인할 수 있음
- 메탄영양세균은 미세조류와의 공동 배양을 통해 효율적이고 환경친화적인 배양도 가능함. 식물성 단백질은 필수아미노산인 메치오닌과 라이신이 부족한데 반해 세균, 곰팡이, 동물성 단백질은 좋은 아미노산 구성을 가지고 있는 것으로 알려져 있음. 이들을 활용하면 기후변화 위기에 대응할 수 있을 뿐만 아니라 세균을 통한 양질의 단백질을 얻을 수 있을 것으로 기대됨
- 최근에는 공기 중에 존재하는 대기성분을 이용하는 독립영양 미생물 유래 에어프로테인의 기술 산업화가 성공하여 지속 가능한 친환경 단백질 소재로 새롭게 각광받고 있음. 하지만 현재까지 이들 독립영양 미생물 유래의 단백질에 대한 생산과 순도에 관한 연구가 있을뿐 이들의 인체 기능성 및 안전성 검증에 관한 연구는 진행되지 않고 있음
 - ※ 솔라푸드(핀란드): 수소영양박테리아 활용 솔레인(Solein) 생산(순도 65%)
 - ※ 키버디(미국): 수소영양박테리아 활용 에어프로테인(Air Protein) 생산(순도 80%)
 - ※ 디랙스(영국): 발전소에서 배출하는 탄소를 활용한 단백질 생산
 - ※ Calysta(미국): 메탄영양박테리아 *Methylococcus capsulatus*에서 추출한 단백질로 수산양식/축산 사료용 단백질 생산
- Unibio 기업이 Uniprotein이라는 메탄을 유일한 탄소 및 에너지원으로 사용하여 메탄영양세균을 배양함으로써 단백질 함유량이 높은 biomass (대략 72%가 단백질)를 생산하여 동물 사료의 원료로 사용하고 있음
- 국립생물자원관과 윤석환 카이스트 교수진과 공동연구로 이탄습지에서 메탄을 분해하는 능력이 뛰어난 *Methylomonasa* sp. strain JS1과 *Methylocystis* sp. strain MJC1를 발견했음
- 수소산화 미생물 3종의 배양조건에 따른 단백질 함량, 아미노산의 조성 연구 수행
- 독립영양 성장 조건하에서 암모늄과 이산화탄소를 이용하는 미생물 군집의 집적배양을 통한 단백질 생산 연구 수행
- 수소산화 미생물 집적배양을 통한 질소원 고정 조건별 단백질 생산능력 및 관련 주요 미생물 군집 연구 수행



<Unibio사의 메탄영양세균을 이용하여 생산한 Uniprotein 제품과 어분 사이 아미노산 비교 21)>(왼쪽)과 <미세조류 *Chlorella sorokiniana*와 메탄영양세균 *Methylococcus capsulatus*의 공동배양 22)> (오른쪽)

기축용 핵심 대체사료원료 중 “미생물 유지” 소재 개발

- 미생물 유지(Single Cell Oil) 생산을 위한 최적의 식용 미생물 후보군 탐색 필요
- 미생물 유지 소재의 안전성, 기능성 검토 및 고부가가치 고도불포화지방산 생산능 검토
- 고도불포화지방산 생산 최적화를 위한 지방대사 관련 정밀 대사 조절 기술 개발 필요
- 천연 미생물 유지 표준 제조방법 확립 및 정밀 대사조절 기술개발 필요
- 식이 보충제 활용을 위한 미생물 유지 추출 및 대량 생산공정기술 개발을 통한 공급 안정화 가능
- 농산업 폐자원을 활용한 경제배지 확립 및 생산수율 최적화 기술 개발 가능
- 산업동물(단위가축 및 반추가축) 및 반려동물 실증연구를 통한 실제 영양대사 유효성 검증 필요
- 동식물성 유지생산과의 경제성 비교분석 필요

○ 곰팡이 유래 미생물 유지 생산

- 미생물 유지 생산 관련 연구는 대부분 바이오매스 대비 20% 이상의 유지를 생산하는 효모(oleaginous fungi)를 대상으로 수행되어 왔으나 최근에는 사상성 곰팡이(filamentous fungi)를 이용한 바이오디젤(biodiesel) 연구도 주목 받고 있음. 다양한 사상성 곰팡이들을 대상으로 배양학적 및 대사공학적 접근을 통한 미생물 유지 생산 최적화 연구가 수행되어 왔지만 배양과 추출단계에서의 경제성 문제로 적극적으로 산업화되지는 못함
- 대부분의 사상성 곰팡이들은 생태계에서 식물과 기생/부생/공생의 관계를 가지며 진화해 왔으므로 식물체 분해능력이 뛰어나 농업부산물 순환자원 활용 측면에서도 곰팡이를 이용한 미생물 유지 및 단백질 생산은 경제적 · 환경적 측면에서 매우 유용함

〈사상성곰팡이를 활용한 유지 생산 최적화 연구 23〉

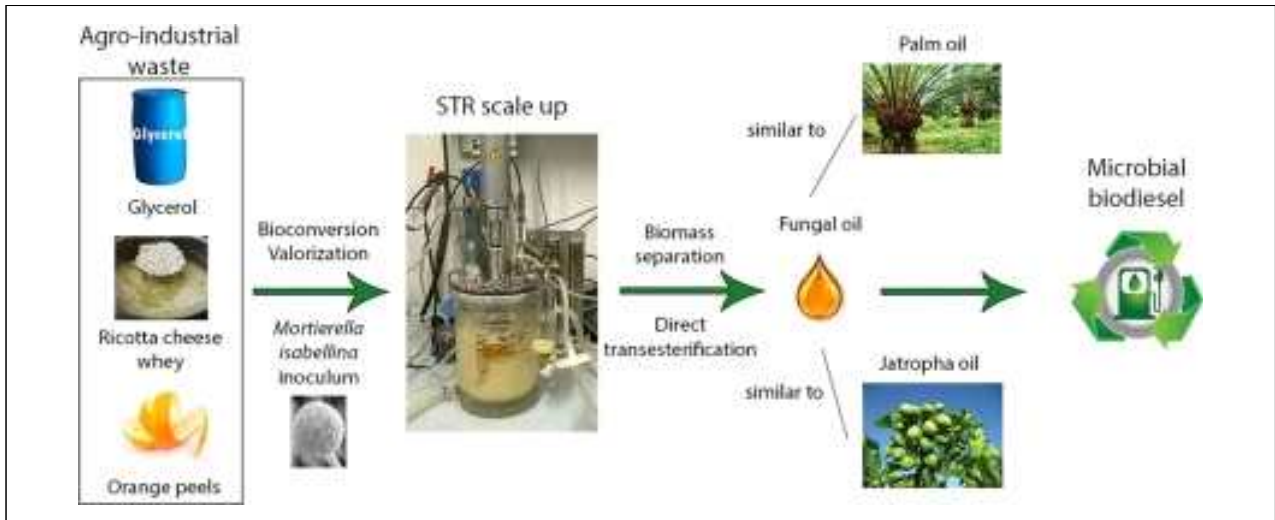
Strain(s)	Carbon substrate/Culture medium	Inoculum density	C/N	Initial pH	Temp. (°C)	Cultivation period (hour)	Agitation speed (rpm)	Aeration rate	Culture mode	Medium/working vol.	Lipid yield/content	References
<i>Mortierella alpina</i> ATCC 32222	10% of soluble starch, mixture of KNO ₃ and yeast extract at 2:1 (w/w) at C/N ratio 5.2-9.0 and 1% of linseed oil.	5% mycelial suspension of 1.0-1.5 × 10 ⁸ cells per mL	—	6.0	20°C (72 h) + 12°C (120 h)	72 + 120	200	—	Batch	—	Total PUFA of 943.2 mg/g carbon	Jang et al. (2005)
<i>Entomophthora exitalis</i> NRRL 3742	Semi-defined medium containing 15g/L glucose	—	—	6.0	30°C	—	—	2 L air/min	Batch	4 L	25% (w/w) DB	Kendrick and Randle (1992b)
<i>Trichoderma viride</i> NRC 314	PD liquid medium supplemented with 5% (50 g/L) dextrose	1 mL of 10 ⁷ -10 ⁸ spores/mL	—	5.0	28°C	120	0	—	Batch	50 mL	43% (w/w) DB	Al and El-Ghomy (2014)
<i>Mucor ctenidius</i> (<i>Thamnidium ctenidius</i>) SCIM 3.009	60 g/L glucose, 3.0 g/L NH ₄ NO ₃	10% (v/v) seed culture	—	6.5	30°C	100	220	1.5 vvm	Batch	3.5 L	13.6 ± 0.37 g/L (66.02%, w/w, DB)	Liu et al. (2010)
<i>Rhizopus arrhizus</i> (<i>Mortierella rouxi</i>) MTCC 3866 and <i>Mortierella</i> sp. 1b	Semisynthetic medium including 5g/L yeast, 30 g/L soluble starch, 1 g/L KNO ₃ and 20 mL/L sesame oil	—	—	5.5	28 ± 2°C	144	250	—	Batch	250 mL	44.5 and 49.83% (w/w) DB, respectively	Somathekar et al. (2003)
<i>Umbelopsis isabellina</i> (<i>Mortierella isabellina</i>)	68.1 g/L commercial glucose	100 mL of 24-h culture	200	6.0	28°C	160	250-300	0.5 vvm; DOC > 20% v/v	Batch	2 L	~12.5 g/L	Chatzifragkou et al. (2010)
<i>Galactomyces geotrichum</i> Strain 38	10 g/L rapeseed oil, 5 g/L yeast extract, 0.3 g/L metal salts and 10 mg/L vitamin B12 in 2.7 L volume	300 mL	—	6.5	30°C	214	100	1.5 vvm	Batch	3 L	23.65 mg/g	Grygier et al. (2020)
<i>Mortierella alpina</i> NRRL-A-10995	60 g/L glycerol, 5.0 g/L yeast extract and 3.30 g/L metal salts added at 5 mL/h	—	—	6.0	20°C	336	180-200	pO ₂ of 10-50%	Batch/Continuous	2.0 L	AA 25% (w/w) of lipids	Mironov et al. (2018)
<i>Cunninghamella echinulata</i> ATHUM 4411 and <i>Mortierella isabellina</i> ATHUM 2935	80 g/L Xylose	—	285	6.0	28°C	192 and 216, respectively	180	—	Batch	50 mL	57.7 and 65.5% (w/w) DB, respectively	Fokas et al. (2005)
<i>M. circinaloides</i> ATCC 12168	20 g/L glucose, 1 g/L yeast extract, 1.5 g/L NH ₄ Cl, 6g/L KH ₂ PO ₄ and 1.2 g/L MgSO ₄ 7H ₂ O	1.16 × 10 ⁴ spores/L	865.8	3.0	20-25°C	144	180	—	Batch	100 mL	—	Xia et al. (2011)
<i>Mucor circinaloides f. iustanicus</i> CBS 277.49	Sterilized whole thin stillage (Total solids = 6.1%) from Corn-ethanol plant	10% (v/v) [prepared from 0.2% (v/v) of a ~8 × 10 ⁴ spores/mL suspension in 500 mL YM]	—	6.0	37°C	48	—	1.4 vvm	Batch	5 L	46% (w/w) DB	Mitra et al. (2012)

- 사상성 곰팡이에 의해 생성되는 미생물 유지는 palmitic acid, oleic acid, linoleic acid를 주 성분으로 하는 triacylglycerol로 주로 구성되며 곰팡이 종과 배양 조건에 따라 다양한 함량을 갖지만 일반적으로 oleic acid 및 linoleic acid의 함량이 높아 식물성 유지의 대체제로 활용될 수 있음

21) <https://www.unibio.dk/end-product/amino-acid-profile/>

22) Roberts, Nathan, et al. "A microalgae-methanotroph coculture is a promising platform for fuels and chemical production from wastewater." *Frontiers in Energy Research* 8 (2020): 563352.

23) *Front. Microbiol.*, 2021



<농업 부산물과 사상성 곰팡이를 활용한 미생물 유지 생산 예시 24)>

- 특히 마이코프로테인 균주로 가장 많이 활용되고 있는 *Fusarium* sp.는 외부에서 활용가능한 다양한 탄소원을 활용하여 세포 내 지질물질을 활발하게 축적하는 생리학적 특성을 갖고 있어 다른 GRAS 곰팡이인 *A. oryzae*나 *R. oligosporus*에 비해 높은 유지 함량을 갖고 있음. 본과제에 공동 참여하는 서울대학교 연구팀에서는 *Fusarium* sp.에 의해 생성/축적되는 주요 지질물질이 식물성 유지와 유사한 palmitoyl-oleoyl-linoleoyl-glycerol이며 최대 바이오매스의 5-10%의 지질 물질 확보가 가능함을 밝힘

<식용 가능한 세 가지 곰팡이의 영양 성분표 25)>

Nutrients	<i>F. venenatum</i>	<i>A. oryzae</i>	<i>R. oligosporus</i>
Energy (kcal)	348	297	295
Protein (g)	48	45.7	49.7
Total dietary fiber (g)	25	16.2	14.6
Carbohydrate (g)	12	24.3	21.5
Fat (g)	12	1.9	1.1
Calcium (g)	0.2	0.2	0.2
Phosphorus (g)	1.2	0.2	0.2
Zinc (mg)	30.4	5.0	5.9
Potassium (g)	2.8	1.4	0.5
References	[4,76]	[73]	[73]

- 최근 *Fusarium* sp.에서의 유지 생성 관련 연구에 따르면 이 곰팡이는 생식과정을 준비하는 동안인 특정 영양성분에서의 고형 배양 기간동안 매우 높은 수준의 지질을 축적함. 따라서 *Fusarium* sp. 대상으로 균주 개량 및 특정 배양 조건을 확립한다면 마이코프로테인 생성과 동시에 과량의 유지 생산 또한 가능할 수 있음

○ 효모 유래 미생물 유지 생산

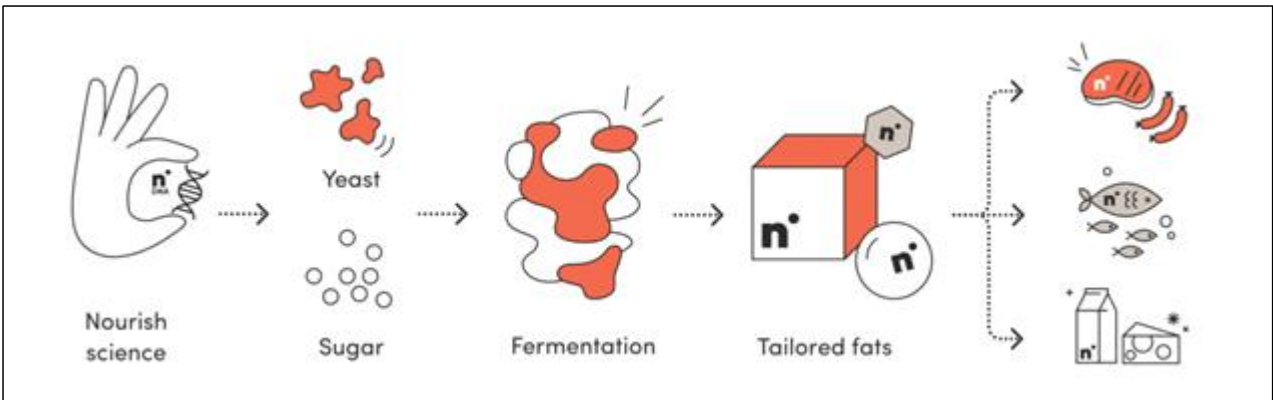
- 효모 유래 균체단백질은 단백질 함량이 50%에 이르며 탄수화물 40%, 지질 2%, 회분 8%로 영양학적으로 유익한 조성비를 가지고 있음. 높은 항산화 활성(DPPH scavenging activity, beta-carotene bleaching activity, total phenolic contents, FRAP)과 다양한 건강기능성 소재를 함유하고 있음. 황 함유 아미노산인 시스테인과 메치오닌 함량이 높아 가공시 다양한 풍미를 가질 수 있는 장점을 보유함
- *Lipomyces*와 *Mortierella*와 같은 효모 등은 미생물 유지 생산 능력이 뛰어난 것으로 알려져 있음

24) Carota, Eleonora, et al. "Bioconversion of agro-industrial waste into microbial oils by filamentous fungi." *Process Safety and Environmental Protection* 117 (2018): 143-151.

25) J. Future Foods, 2021

로 이들의 발효를 통해 효과적인 미생물 유래 유지(Single cell oil)의 생산이 가능할 것으로 판단됨. 대량생산 공정 및 농업산업부산물과 같은 폐기물을 사용한 생산 기술 개발을 통한 경제적이고 지속가능한 생산을 가능하게 할 수 있음

- 효모의 발효를 통해 생산된 미생물 유지는 사료원료의 지질원으로 사용될 수 있으며 발효에 사용된 효모균체단백질 또한 사료원료의 단백질원으로 사용할 수 있을 것이라 판단됨
- 팜유는 기름 야자나무 열매에서 추출한 식물성 유지로서 식물성 유지임에도 불구하고 포화지방의 비율이 50% 정도로 높아 식품(마아가린 등), 화장품(립스틱 등), 세정제 등 전세계적으로 다양한 용도로 사용되고 있음. 미국 농업부(USDA)에 따르면 세계 식물성 유지 소비 규모는 1.620만 톤으로, 그 중 팜유가 40%로 가장 많은 비중을 차지하며 우리나라의 경우 팜유 수입량이 연간 55만톤으로 수입 의존도가 높은 상황임. 특히 인도네시아에서 전세계 팜유 50% 이상을 생산하고 있는데, 팜유 생산을 위한 팜유플랜테이션(palm oil plantation)이 열대우림 파괴 및 생물 다양성 훼손을 초래할 뿐만 아니라 원주민 거주지 훼손, 아동 노동 등의 인권침해를 유발하고 있다는 사실이 알려지면서 팜유 대체 유지 개발이 가속화되고 있음
- 최근에는 게이트 재단의 투자로 C16 Bioscience사에서 효모 기반 팜유 대체 오일 실용화 연구에 착수하였으며, 영국의 스타트업 Clean Plam Oil사는 2023년에 팜유와 매우 유사한 효모 오일을 상용화하겠다고 발표함. 현재 유지 생산에 뛰어난 oleaginous yeast들이 목재를 원료로 유지를 생산할 수 있도록 다양한 연구개발이 진행되고 있으나, 국내에서는 아직 관련 연구가 전무하여 우리나라 맞춤형 농식품폐기물을 원료로한 지속가능한 유지생산 전략 수립이 요구됨
- C16 Biosciences 기업에서 개발한 효모와 산업 부산물을 활용하여 합성 팜유를 생산함
- 실로메(Xylome) 기업은 *Lipomyces starkey*라는 유전자 변형 효모에 옥수수 시럽을 공급하여 기름을 생산함
- 제로 에이커 팜스(Zero Acre Farms) 기업은 사탕수수와 사탕무에서 추출한 천연 식물 설탕을 배양액에 첨가하여 미생물이 이를 지질로 전환하는 과정을 통해서 지질을 생산하는 기술을 개발함

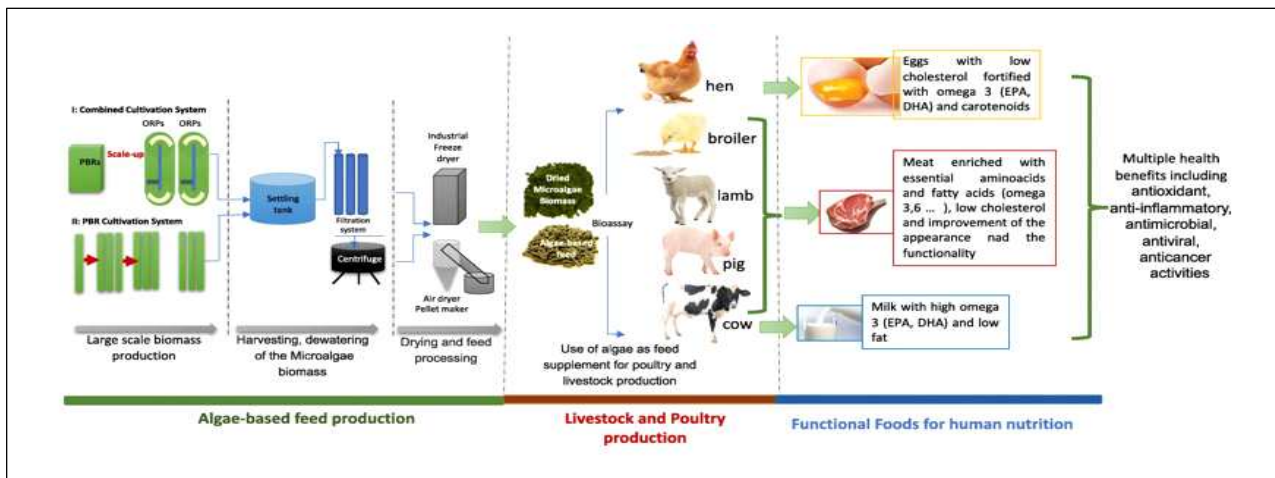


<호주 Norish Ingredient사의 효모 기반 맞춤형 대체오일/지방 생산전략>

- Kiberdi 기업은 직접공기포집(DAC) 기술을 활용하여 포집한 탄소를 이용해 효모를 발효하여 지질을 생산하는 기술을 개발 중임
- University of Bath에서 유전자 조작 기술을 사용하지 않은 효모를 이용하여 지질 생산 연구 진행 중임
- 일본의 미나미알프스사에서 농업산업폐기물과 효모 *Lipomyces*을 이용하여 지질을 생산하는 기술 개발 중임
- 서울대, 우석대 연구진이 단세포지질 생산 미생물을 선별 후 지방질 생합성 및 축적 매커니즘 연구를 통한 단세포지질의 생산성 향상 및 대량생산 가능성을 제시함
- 국내외 다양한 기업들에서 효모를 활용한 미생물 유래 지질을 생산하는 연구들이 진행 중에 있는 것을 확인하였으며 사료원료로 사용을 위한 효모 배양시 농업산업부산물과 같은 폐기물 사용하여 경제적 및 친환경적인 배양을 가능하게 할 것으로 보이며 미생물 유래 지질 생산 완료 후 효모균체 단백질 또한 사료원료의 단백질원 이용 가능할 것임이 예상됨

○ 미세조류 유래 미생물 유지 생산

- 미세조류는 매우 작은 조류를 뜻하며 물, 햇빛, 이산화탄소만으로도 대량 증식이 가능하다는 장점이 있음. 균체 단백질 함량은 40-60%로 높은 편으로 *Chlorella*, *Arthrospira*, *Dunaliella*, *Tetraselmis*, *Phaeodactylum*, *Skeletonema*, *Scenedesmus* 등은 높은 단백질 함량과 메티오닌 라이신 함량으로 가축사료의 단백질원으로 적합하다고 알려져 있음
- 또한 미세조류는 항산화, 항고혈압, 항응고, 항종양 및 면역 자극 특성을 가진 생리활성 펩타이드를 생산한다고 알려져 있으며 26). 미세조류의 탄수화물은 주로 xylose, mannose, glucose, galactose, rhamnose로 이루어져 있으며 이들 중 glucose가 총 탄수화물의 47-85%를 차지한다고 알려져 있음 27). 탄수화물의 종류 중에서 *Chlorella* sp.에서 발견되는 beta-1-3-glucan은 항산화 역할을 할 수 있는 수용성 섬유질로 알려져 있음 28)
- 미세조류는 지방 함량이 7-20%로 다른 미생물에 비해서 높은 편이라서 사료원료의 훌륭한 지질원으로 여겨짐. Strain과 배양조건에 따라 다르지만 미세조류는 건조중량의 50% 또는 그 이상의 지질을 생산할 수 있음 29)
- 또한 최근에는 지질생산을 많이 하는 종 선별 및 유전자 교정을 통해 지질합성을 극대화하는 기술들이 발전하고 있음. 가축은 오메가-3 지방산을 체내에서 합성이 불가능하므로 사료를 통해서 섭취를 해야하는데 미세조류에는 eicosapentaenoic acid (EPA), alpha-linolenic acid (ALA), arachidonic acid (AA), docosahexaenoic acid (DHA), linoleic acid (LA) 등과 같은 불포화지방산 함량이 높을 뿐만 아니라 *Isochrysis*, *Nannochloropsis*, *Tetraselmis*, *Arthrospira* 는 필수 지방산 함량도 높은 것으로 알려져있음 30) 31)



<사료원료용 미세조류 모식도 32)>

- 미세조류는 옥수수, 콩과 같은 곡물들에 비해 단위면적당 에너지 생산량이 높으며 배양시 이산화탄소를 사용하므로 대기 내 탄소를 처리할 수 있다는 장점이 있음. 현재 미세조류의 높은 지질 함량

26) Navarro F, Forjón E, Vázquez M, Montero Z, Bermejo E, Castaño M, et al. Microalgae as a safe food source for animals: nutritional characteristics of the acidophilic microalga *Coccomyxa onubensis*. *Food Nutr Res*. 2016;60(1):30472.

27) Markou G, Angelidaki I, Georgakakis D. Microalgal carbohydrates: an overview of the factors influencing carbohydrates production, and of main bioconversion technologies for production of biofuels. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2012;96(3):631-45.

28) De Morais MG, Vaz BDS, De Morais EG, Costa JAV. Biologically active metabolites synthesized by microalgae. *Biomed Res Int*. 2015;2015:835761.

29) Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sust Energ Rev*. 2010;10:217-32.

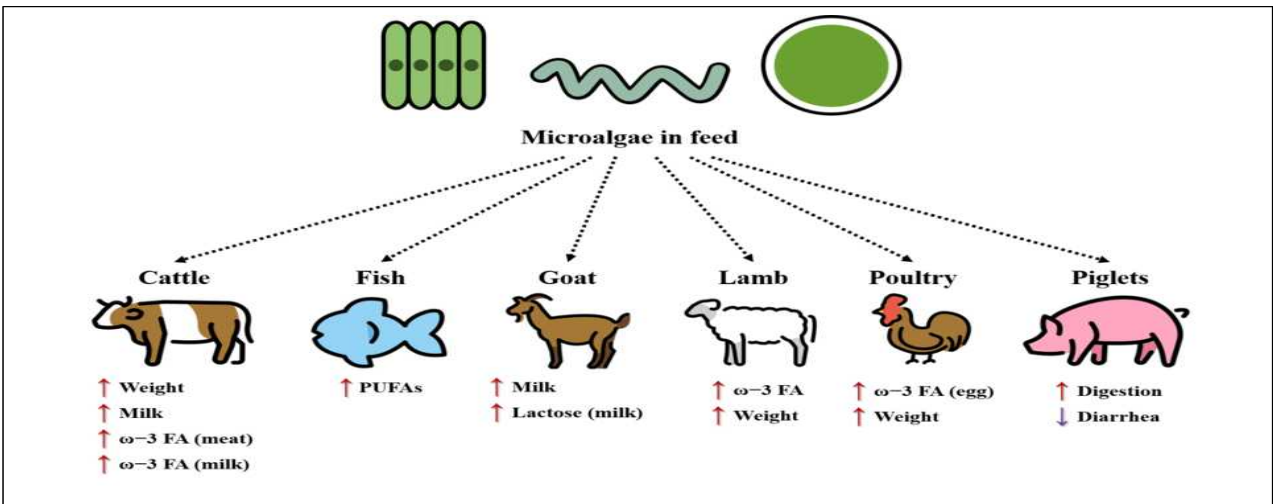
30) López G, Yate C, Ramos FA, Cala MP, Restrepo S, Baena S. Production of Polyunsaturated Fatty Acids and Lipids from Autotrophic, Mixotrophic and Heterotrophic cultivation of *Galdieria* sp. strain USBA-GBX-832. *Sci Rep*. 2019;9:10791.

31) Peltomaa E, Johnson MD, Taipale SJ. Marine cryptophytes are great sources of EPA and DHA. *Mar Drugs*. 2018;16.

32) Saadaoui, Imen, et al. "Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production." *Journal of Animal Science and Biotechnology* 12.1 (2021): 76.

으로 인해 미국의 석유회사 엑손모빌을 포함한 다양한 회사들이 친환경 바이오연료를 생산하는데도 사용하고 있음. 미세조류를 배양 후 사용하여도 되지만 미세조류에서 바이오연료 생산을 위한 지질을 추출한 후에 부산물을 사료원료에 사용할 수도 있음

- 현재 다양한 연구기관에서 미세조류를 소, 돼지, 닭, 양 등 다양한 동물들에게 급여하는 실험을 진행중에 있으며 그 결과 달걀, 고기, 우유의 질을 높여주었으며 인간이 섭취하였을 때 항암, 항산화, 항바이러스 효과를 줄 수 있다는 것이 밝혀지고 있음 33)
- Seaweed For Dogs 기업 오메가-3를 포함한 불포화지방산이 높은 *Nannochloropsis* sp을 이용하여 강아지의 신체 건강, 관절 건강, 피부 건강, 염증 개선, 인지 기능 개선 소화 기능 개선 등 다양한 효과를 위한 사료첨가제를 판매 중임
- King kanine 기업은 강아지의 관절 건강, 피부 건강, 면역 시스템 증진, 시력 증진, 소화 기능 개선 등 다양한 효과를 위한 미세조류가 함유된 사료첨가제를 판매 중임



<미세조류가 가축에 미치는 효과 34)>

- Point Pet 기업은 반려견의 관절 건강을 위한 미세조류를 이용하여 만든 간식을 판매 중임
- Monge 기업은 효모, 미세조류의 지질, 프리바이오틱스 등을 이용하여 만든 반려동물용 간식을 판매 중임
- Al Nawadir 기업은 미세조류를 포함하여 제조한 전연령용 반려견 사료를 판매 중임
- 다양한 회사에서 불포화지방산 함량이 높은 미세조류를 이용하여 반려동물용 사료, 사료첨가제 및 간식 등을 생산하고 있음



<다양한 미세조류를 이용한 반려동물용 식품>

33) Barkia I, Saari N, Manning SR. Microalgae for high-value products towards human health and nutrition. Mar Drugs. 2019;17(5):304.

34) Amorim, Matheos Lopes, et al. "Microalgae proteins: Production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed." Critical Reviews in Food Science and Nutrition 61.12 (2021): 1976-2002.

3. 본 과제의 중요성

○ 연구과제의 타당성

- 급등하는 사료원료 가격에 대응하기 위하여 아래와 같은 방향성을 제시하고자 함

방향성	방법	이유
신규 사료원료 대체 국가보존형 신규 미생물 소재 확보	○ 국내 토종 세균, 효모, 곰팡이, 미세조류들에서 잠재적으로 사용 가능한 미생물 확보	○ 해외에서 분리하여 등록된 미생물이 아닌 국내 보유한 미생물 발굴 및 사용하여 국가 경쟁력 확보가 필요함
잠재적인 미생물 사료원료 생산 단계별 위해요소 분석 및 안전성 검증과 규제 확립	○ 미생물 배양 단계별 위해요소 분석을 통한 제품표준화 및 안전성 검증 절차 구축	○ 미생물 배양시 가축에 유해한 물질 및 곰팡이 독소 생성 여부 등을 확인하여 가식성 및 유해성 검증이 필요함
식용가능한 농업폐자원을 활용한 경제적인 미생물 대량생산 공정 확립	○ 버려지는 농산업 부산물 및 배양육 폐배지 속 영양분을 활용하여 경제적인 배양 방법 및 안전성 검증 절차 구축	○ 농축업, 식품회사 및 인공배양육 회사에서 제품 생산 후 버려지는 식품부산물 및 배양육 폐배지에 잔존하는 영양소를 미생물 배양에 사용시 경제적인 생산 가능

○ 국가연구개발 계획과의 연계성

방향성	방법
12대 국가전략기술 발표('22)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현재 정부는 글로벌 기술 패권 경쟁 시대에서 우리나라 기술 주권을 지키기 위한 국가전략기술 육성방안으로써 12대 국가 전략기술을 발표함. 이는 반도체디스플레이, 이차전지, 첨단로봇 및 제조, 수소, 차세대통신, 첨단바이오, 우주항공 및 해양, 양자, 인공지능, 사이버보안, 첨단모빌리티, 그리고 차세대원자력을 담고 있음 ○ 첨단바이오 분야는 합성생물학, 감염병 백신 치료, 유전자 세포 치료, 디지털 데이터 분석활용을 기반으로 데이터 기반 기술이 포함됨 ○ 따라서 국가 주도의 주요 정책 중 하나인 첨단바이오 분야 중 미생물 정밀발효 기술은 농업 주권확보 뿐만 아니라 식량안보 와도 직결될 수 있으며, 그 자체로도 높은 성장 잠재력을 보유하고 있음 ○ 이러한 미생물 유래 고부가가치 대체원료 소재화 기술은 단기간 기술자립이 용이하지 않은 기술로 기술확보 유무에 따라 차후 다양한 농축산 분야에 있어서 국가 경쟁력의 격차 극복에 있어서 필수 역량으로 부상할 가능성이 큼
제3차 국가생명연구자원관리 활용 기본 계획('20-' 25)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 바이오 연구가 효율적으로 수행될 수 있도록 생명연구자원을 체계적으로 확보하고 연구 산업현장에 원활히 공급하여 활용 등을 지원하고자 함 ○ 범부처 바이오 연구 데이터 통합 수집·제공 체계 마련을 위한 '국가 바이오 데이터 스테이션' 조성 등 데이터 기반 바이오 연구 환경

	<p>구축을 위하여 이와 연계되는 미생물 유래 고부가가치 대체원료 소재화 개발 및 관련 인프라 확보가 필수적임</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 이러한 미생물 유래 고부가가치 대체원료 소재화 연구를 통한 인프라 및 통합 DB를 활용하여 주기적인 연구·산업계 의견 수렴을 통한 소재 분야별 자원 전략 마련 등 수요자 맞춤형 농축산용 소재 활용 촉진 전략 수립이 가능할 것으로 예상됨
<p>그린바이오 융합형 新산업 육성방안('20.9.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 그린바이오 산업을 통해 신(新)혁신성장 동력 육성 및 사회경제적 문제 해결을 제시하였고 이에 관련된 핵심 기술로는 미생물 정밀발효기술이 필수적임 ○ 5대 산업기반(* 마이크로바이옴, 대체식품·메디푸드, 종자산업, 동물용의약품, 기타 생명소재)을 토대로 기업 지원 및 상생의 산업 생태계 조성을 위하여 그 중 미생물 유래 대체사료원료소재 확보를 통한 농축산업의 전반적인 향상 및 농생명 산업의 획기적인 발전을 도모할 수 있음 ○ 이러한 미생물 정밀발효 기술의 연계 및 확대는 심지어 지역 단위의 축산 관련 그린바이오 중점 육성지역을 선정하여 연구기관·기업 집적화 및 산·학·연 공동연구 생태계 조성에 기여할 수 있음
<p>제3차 농림식품과학기술 육성 종합 계획</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미생물 유래 고부가가치 대체원료 소재화 사업은 「제3차 농림식품과학기술 육성 종합계획」의 21개 세부과제중 6개 과제와 높은 부합성을 보이고 있으므로, 농림식품과학기술의 획기적인 육성을 위해서는 반드시 필요한 사업임
<p>제3차 농업생명공학육성 중장기기본계획('13- '22)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농촌진흥청에서 농업생명공학 기초 인프라, 원천기술 및 산업적 응용기술, GMO 안전성 분야 등을 대상 분야로 본 기본계획을 수립함 ○ '농업주도 바이오경제, 풍요로운 미래사회' 를 비전으로 2022년 세계 4위권 농업생명공학 강국 진입 및 고부가 농축산업 구현 목표로 하고 있으며, 이를 위하여 농생명 마이크로바이옴 사업이 추진이 필요함 ○ 농축산업의 글로벌 기술 경쟁력 확보 및 지식기반형 미래성장 산업화를 위해 생명공학기술 및 활용여건 변화에 따른 투자분야 확대가 필요하며, 그 중 미생물 유래 고부가가치 대체사료원료 소재화 사업이 중요한 역할을 수행할 것으로 기대
<p>농업생명자원의 보전·관리 및 이용에 관한 법률</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국가는 농업생명 연구자원의 종합적이고 체계적으로 보존·관리하도록 지원해야 하며 사업추진시 농축산 관련 미생물 생산기술 확보 및 DB 구축 등이 법령에 근거하여 지원해야 함 ○ 이를 바탕으로 볼 때, 미생물 유래 고부가가치 대체사료원료 소재화 연구는 정부 주도의 사업이어야 하며, 이는 정부 최근 과학기술 개발 정책에도 부합함

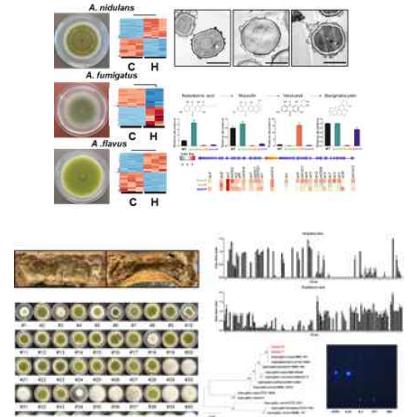
3) 본 과제수행을 위한 선행연구

주관연구기관 서울대학교	
<p>동물 및 공생배양물 유래 신규 미생물(메탄산화균 포함) 실물자원 발굴</p>	<ul style="list-style-type: none"> MALDI Biotyper 및 16S rRNA sequencing 기반의 초고속 컬처로믹스 분석법을 통해 산업동물/반려동물 유래 마이크로바이옴 실물자원을 분리동정 및 기존의 NGS metagenome 결과와 비교 분석 공생배양미생물 유래 프로바이오틱스 yeast 및 bacteria 확보. 이들의 공생배양 단계별 미생물 군총 변화를 컬처로믹스와 NGS기반의 메타지노믹스 상호분석 결과를 이용한 모니터링 기술 확립 건강한 젖소 반추위 액에서 133종의 메탄산화균을 분리하는 작업을 수행하였고, 이들의 단백질 생산등 신규 기능성 평가 검토  
<p>마이코프로테인 균주 지질 대사 관련 멀티오믹스 연구 기반 확립</p>	<ul style="list-style-type: none"> <i>Fusarium</i> sp. 대상으로만 15년간의 연구를 통해 균학적 연구 기반과 곰팡이 발달과정 및 탄소대사과정 연구를 위한 전사체, 단백질체, 대사체 등 멀티오믹스 연구 기반 확립 마이코프로테인 균주로 가장 많이 활용되고 있는 <i>Fusarium</i> sp.가 생성/축적하는 주요 지질물질 (palmitoyl-oleoyl-linoleoyl-glycerol) 구조를 최초로 구명하였으며 액상/고상 배양법 확립 <i>Fusarium</i> sp. 지질 축적 및 분해와 관련된 유전학적 연구를 통해 관련 유전자 및 대사과정에 대한 풍부한 선행 연구 결과 및 노하우를 축적하고 있음 
<p>마이코프로테인 균주 개량 및 고도화를 위한 연구 기반 확립</p>	<ul style="list-style-type: none"> 산업동물에게 유해할 수 있는 <i>Fusarium</i> sp. 생성 2차대사산물 생합성 및 조절과정에 대한 선행 연구 수행 마이코프로테인 균주 고도화를 위한 후보 특성인 탄소원 활용능, 포자생성능, 지질 생성 및 분해능, 균사 생산능 등에 관여하는 유전자 및 신호전달과정에 대한 선행 연구 결과 다수 확보 CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein complexes (RNP)를 활용 non-LMO <i>Fusarium</i> sp. 균주 개량을 위한 기술 확보 
<p>축산 적용실험을 위한 양돈실증 및 영양대사 분석시설 구축</p>	<ul style="list-style-type: none"> 돼지 사료내 영양소 변화를 통한 돼지의 성장단계별 성장, 소화생리, 장관형태 등에 대한 연구를 통해 사료내 영양소 변화 요인과 소화생리의 상관관계 규명 돼지에 여러 가지 스트레스 상황(사료, 환경, 질병 등)을 인공적으로 만들어주어 돼지의 성장단계별 면역반응, 장내미생물변화, 장관밀착연접 관련 단백질 유전자발현변화 등에 대한 연구를 통해 여러 가지 스트레스 상황과 대사생리 및 장관건강의 상관관계 규명 

공동연구기관 경북대학교

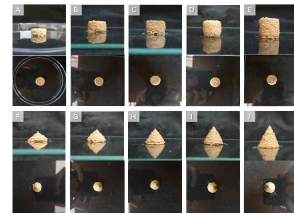
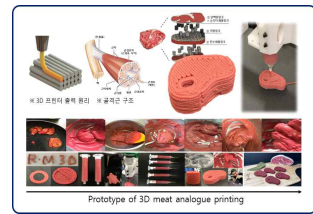
마이코프로테인 균주 개량 및 배양을 위한 연구기반 확립

- *Aspergillus* spp. 대상으로만 15년간의 연구를 통해 사상성 진균의 성장 및 발생 관련 연구를 위한 연구기반 구축
- 마이코프로테인 균주 개량에 필요한 *Aspergillus* spp. 균주의 균사 성장, 포자 형성 및 이차대사산물에 관여하는 조절자 및 신호전달 과정에 관한 다수의 선행연구 결과 확보
- 전통 식품 유래 GRAS인 *A. oryzae* 균주 선별, 개량기술 확보 및 배양 방법 확립



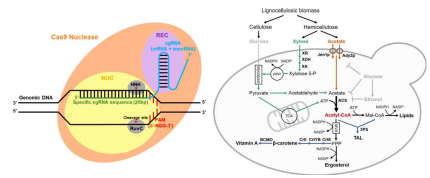
단백질 육조직화 및 사료 소재화 연구기반 확립

- 다당류의 근섬유 소재화 및 조직화 기술 개발, 3D 프린팅 활용 인공 근섬유 조직화 기술 개발, 3D 프린팅 믹스올로지 기술 구축, 식육단백질 모방 인공근섬유 컨셉 제시를 통해 3D 프린트용 food ink 물성 제어 기술 및 소재화 관련 기술을 보유하고 있음.
- 곤충 단백질의 식품용 잉크 소재화를 위하여, 곤충 소재의 향기 성분 분석 및 이취 저감화 기술을 개발하고, 곤충 단백질과 밀의 믹스올로지 기술을 구축



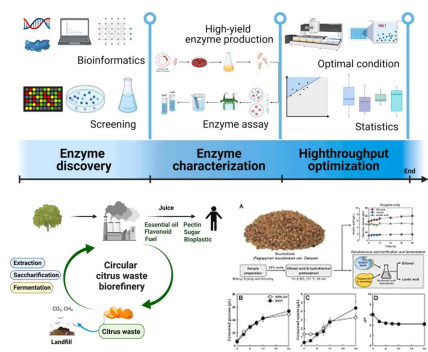
기능성 식품소재의 대량생산을 위한 야생 효모균주의 개량 및 정밀발효 전략

- *Saccharomyces cerevisiae* 및 야생효모 균주를 대상으로 15년간의 연구를 통해 유전자가위 기반 genome editing 기술 및 노하우 확보
- 합성생물학 기반 DBTL cycle을 통한 균주 성능 향상 전략 및 식품에 활용 가능한 food grade engineering 기술 확보



농식품 폐기물의 전처리 및 효모 발효를 통한 자원화 업사이클링 전략

- 감귤박, 메밀박, 커피박과 같이 국내에서 대량으로 발생하는 식품가공폐기물의 생물학적인 업사이클링 전략 확립
- 특히 식품폐기물로부터 미생물이 이용가능한 탄소원을 추출하기 위한 전처리 및 효소당화 방법 확립
- 전처리된 식품폐기물을 발효하여 lactic acid, mucic acid 등의 유기산 및 바이오화학소재를 생산하는 균주의 개발 및 산업화를 위한 대량 발효공정 및 분리정제 방법 확립



2 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구개발과제의 최종 목표

최종목표	<p>미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 12대 국가전략 기술인 첨단바이오의 핵심 분야이자 그린바이오 산업을 통해 신(新)혁신성장 동력 육성 및 사회경제적 문제 해결을 위한 창의적인 연구주제로서 미생물 정밀발효기술을 활용하여 축산분야의 현안 문제를 해결하고자 하는 새로운 개념의 원천기반기술 확립 ○ 식량안보와 지속가능성을 고려하여 미래 농축산 분야 이슈의 전반적 해결을 위한 미생물 정밀발효 기술 기반의 가축용 대체사료원료 자원화 및 기초 기반기술 개발 ○ 미생물 정밀발효 기술 인프라 및 기초 기반기술을 통한 그린바이오 산업 전반에 대한 지원과 미생물 유래 기능소재의 농축산 적용을 위한 안전성/생체효용성 평가 ○ 축산현장 맞춤형 기술 개발을 통한 그린바이오산업의 발전 및 확대 기반 구축
세부 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계 개념연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획 ○ 2단계 선행연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 정밀발효를 이용한 미생물 단백질의 양돈용 대체사료원료 효용성 검증 ○ 3단계 심화연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료(단백질과 유지를 중심으로) 현장적용 및 상용화 기술 개발

가축맞춤형 생체효용성/안전성 평가 모델 시스템

가축에 적합한 생체효용성 및 안전성 평가자료 확보

미생물 정밀발효 기술을 이용한 생산효율

대사공학기술을 이용한 대체사료원료 생산 및 독성제거 기술

미생물 대체사료원료의 기술 고도화를 위한 원천기술 확보

오믹스 분석 기반의 영양대사 유효성 검증

생물정보학을 활용한 메타게놈 분석 장내균총과 생체 변화의 상관성 분석

폐자원 활용을 통한 업사이클 순환기술 개발

식용가능한 폐자원을 활용한 미생물 대체사료원료의 대량생산기술 확립

미생물 대체사료원료 연구는 단순히 미생물 유래 원료 생산에 머무르는 것이 아닌 대체원료와의 생체 영양 균형 및 안전성 평가, 사료적용 고도화를 위한 식용가능 폐자원 활용 등의 업사이클 기술과 연계

2) 연구개발과제의 단계별 목표

<p>1단계 개념연구 목표</p>	<p>■ [1단계] 개념연구: 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료(단백질, 유지를 중심으로) 소재 발굴 ○ 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토 ○ 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축 ○ 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출
<p>2단계 선행연구 목표</p>	<p>■ [2단계] 개념연구: 미생물 정밀발효를 이용한 미생물 단백질의 양돈용 대체사료원료 효용성 검증(미생물단백질 대상의 선행연구)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 미생물(곰팡이, 효모를 중심으로) 유래 대체단백질 원료 생산기술 확립 ○ 미생물 유래 대체단백질 원료의 영양학적 특성 및 안전성 검토 ○ 미생물 타입별 맞춤형 정밀발효기술 구축 및 사료화 기술 개발 ○ 양돈산업에 적용을 위한 미생물 유래 대체단백질 원료의 효용성 실증평가
<p>3단계 심화연구 목표</p>	<p>■ [3단계] 심화연구: 미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 현장적용 및 상용화 기술 개발(미생물단백질과 미생물유지 대상의 심화연구)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 가축사료용 미생물 유래 대체 단백질 소재 기술 개발 ○ 가축사료용 미생물 유래 대체 유지 소재 기술 개발 ○ 미생물 소재 표준 제조방법 확립 및 정밀 대사디자인 기술개발 ○ 미생물 유래 소재 대량 생산기술 및 신규 기능성 검토 ○ 가축사료 적용을 위한 상용화 기술개발 및 동물 생체유효성 검증



3) 연구개발과제의 내용

[1단계] 개념연구: 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획

- 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료(단백질, 유지를 중심으로) 소재 발굴
- 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토
- 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축
- 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립
- 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립
- 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출

4) 연구개발과제 수행일정

* 최종목표 및 세부목표 안에 기술이전, 사업화 계획 등에 대한 로드맵 등 제시

1단계 개념연구														
추진내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
가축사료 적용을 위한 식용 가능한 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료소재 발굴														김영훈(서울대학교)/ 김수린(경북대학교)
축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립														김영훈(서울대학교)/ 김수린(경북대학교)
미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출														김영훈(서울대학교)/ 김수린(경북대학교)

1) 연구수행 결과 (국내외 자료수집 및 기술로드맵 도출)

[1차년도: 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획]

가축용 핵심 대체사료원료를 위한 “미생물 정밀발효” 기술 상용화 전략

○ 미생물 정밀발효 기술전략을 위한 시사점

- 정밀발효 기술은 대사공학기술을 접목하여 미생물이 기존에 생산 가능한 단백질, 지질 등의 물질을 더 효율적으로 생산할 수 있도록 최적화하거나 외래 유전자를 도입하여 기존에 미생물이 생산하지 않는 특정 물질을 생산할 수 있도록 프로그래밍한 뒤, 발효 조건의 최적화를 통해 안전성 위험 인자의 발현은 줄이고 목적 산물의 생산을 극대화할 수 있는 기술임. 생산된 특정 물질을 분리 및 정제하여 사용하거나 고생산한 세포 자체를 사용할 수 있음³⁵⁾.
- 해외의 경우 미생물 혹은 재조합 미생물을 활용하여 정밀발효기술 기반으로 목적 산물을 생산, 제품화까지 성공한 사례가 다수 존재하며 시장규모가 확대되고 있는 반면 국내의 경우 관련 연구들이 진행되고 있으나 산업화까지는 다소 시간이 소요될 것으로 예상됨.
- 현재 정밀발효 기술은 기능성 식품 소재 생산 및 단백질, 지질 대체 식품 생산에 주요하게 활용되고 있으며 관련된 대부분의 연구가 식품 산업 적용을 목표로 설정하고 있음.
- 이러한 정밀 발효 기술을 활용하여 미생물 기반 대체사료원료를 생산한다면 농업부산물과 같은 다양한 기질을 이용함으로써 생산 단가 및 환경에 대한 부담을 낮출 수 있으며 지속적이며 안정적으로 사료 원료를 생산 가능하다는 장점이 존재하지만 축산업 적용을 위한 정밀발효기술의 개발은 전무함.
- 정밀발효 기반 가축 맞춤형 대체사료원료 생산 기술의 개발을 통해 신규 산업 개척 및 국가경쟁력 확보가 가능할 것으로 예측됨.

○ 미생물 정밀발효 기술(국내 산업화 기술 수준)

- 인테이크는 정밀발효 기술을 기반으로 알부민 생산 기술을 확보하였으며 제품개발을 위한 연구를 진행중임. 상용화를 위해서는 2년 정도의 시간이 소요될 것으로 예상됨³⁶⁾³⁷⁾.
- 국내 신세계푸드, CJ제일제당 연구진에 의해 마이코프로테인 근연 사상균에서의 CRISPR-Cas9 RNP(ribonucleoprotein complexes)를 활용한 유전자 교정 연구 수행 중임.

○ 미생물 정밀발효 기술(국외 산업화 기술 수준)

- 영국의 Marlow Foods사는 사상균인 *Fusarium venenatum*을 이용하여 닭고기 대체육 제품인 퀴(Quorn)을 개발하여 1985년부터 판매하고 있음.
- 국의 네이처스핀드(Nature's Fynd)사는 사상균인 *Fusarium flavolapis*을 이용하여 대체 크림치즈와 대체육 기반 패티를 개발하여 2012년부터 판매하고 있음.
- 핀란드의 스타트업 Onego Bio는 재조합 *Trichoderma reesei*를 이용하여 오브알부민을 생산하는 기술을 개발하였으며 이를 활용하여 Single Cell Protein을 활용하여 난백 단백질을 대체하고자 함. *T. reesei* 기반 ovalbumin 생산에 대한 환경전과정평가(LCA)를 수행하여 지속가능성 또한 확인하였음³⁸⁾³⁹⁾.

35) Bajić, Bojana, et al. "Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agro-industrial residues and by-products." *Foods* 12.1 (2022): 107.

36) <https://www.intakefoods.kr/tech/>

37) <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2023013115200004150>

38) <https://www.onego.bio/>

39) Cao, Lizhen, et al. "Engineering *Yarrowia lipolytica* to produce nutritional fatty acids: Current status and future perspectives." *Synthetic and Systems Biotechnology* 7.4 (2022): 1024-1033.

- 네덜란드의 Fooditive사는 미생물 정밀발효를 통해 카제인을 생산하였으며 제품화에 성공하여 비건을 위한 최초의 비동물성 카제인을 생산함 40).
- 미국의 Motif FoodWorks사는 효모 *Pichia pastoris*를 이용하여 동물성 미오글로빈을 생산하는 기술을 개발하였음. 정밀발효기술 기반 대체 단백질 생산 연구를 위해 Vectron Biosolutions와 함께 연구 수행 중임 41).
- 미국의 The every company사는 효모 *Pichia pastoris*를 이용하여 대체 계란 흰자 단백질을 생산하는 기술을 개발하고 Every EggWhite라는 제품을 생산하였음. FDA GRAS 인증으로 안전성을 검증하였으며 정밀발효 기반 대체 계란 흰자를 사용하여 마카롱을 제조함으로써 실제 계란 흰자와 특성이 동일 한 것을 확인하였음 42)43)44).
- 미국의 Perfect day는 재조합 *T. reesei* 기반 정밀발효기술을 바탕으로 유단백질 생산 기술을 개발하였음. FDA GRAS 인증으로 안전성을 검증하였으며 대체 유단백질을 이용하여 유당이 들어있지 않은 다양한 유제품 (아이스크림, 케이크믹스, 크림치즈 등)을 개발하여 현재 시중에 판매 중임 45).
- 호주의 스타트업 Nourish ingredients는 효모 발효를 기반으로 육류 대체 지질 생산을 위한 기술을 개발하였으며 제품 개발을 위한 연구를 진행 중임. 대체육의 코코넛 오일을 대체하여 맛과 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 주목받고 있음 46).
- 중국의 Angel Yeast은 현재 단백질 함량이 높은 효모 선별 및 배양에 관한 연구를 진행 중임. 식물성 대체육 개발 과정에서 콩 단백질을 효모 단백질로 대체하는 데 성공하였으며 효모 단백질은 식물 단백질에서 부족한 일부 필수 아미노산을 보충할 수 있음 47)48).

○ 미생물 정밀발효 기술(관련 국외내 특허동향)

- 효모에서 유래된 단백질은 높은 단백질 함량과 풍부한 필수 아미노산을 함유하고 있어 단백질 대체 소재로써 가능성을 보여줌. 현재, 효모 단백질을 이용하여 사료의 대체소재를 개발한 직접적인 특허는 존재하지 않으나, 대체 식품에 관련된 연구가 있어서 사료에도 적용될 수 있는 잠재적 가능성을 보여줌.
- 효모 단백질을 사료의 대체 소재로 적용하기 위해서는 다량의 단백질을 생산할 수 있는 공정이 필요함.
- High protein food compositions (국제공개번호 WO 2021/138482) 특허에서 동물성 단백질 대신에 미생물 단백질을 포함하는 인공 육류 제품을 개발함.
- Yeast protein (국제공개번호 WO 2019/207111) 특허에서 효모에서 단백질을 추출하는 방법을 개발했으며, 특히 미생물 유래 단백질의 단점 중 하나인 핵산 함량을 낮추고 단백질 추출 수율과 순도를 개선함. 연구에 사용된 효모는 *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia jadinii*, *Kluyveromyces marxianus* 등이 있음.
- Methods and compositions for egg white protein production (국제공개번호 WO 2016/077457) 특허에서는 *Pichia pastoris*로부터 난백 단백질 조성을 제조하기 위해 2개 이상의 난백 단백질을 생산할 수 있는 방법을 개발함.
- Compositions comprising a casein and methods of producing the same (국제공개번호 WO WO 2016/029193) 특허에서는 *Kluyveromyces* sp., *Pichia* sp., *Saccharomyces* sp. 등의 효모 균주를 사용하여 유제품 대체 단백질인 카제인을 생산하기 위한 재조합 미생물을 개발하고 유제품 대체

40) <https://www.fooditivegroup.com/>

41) <https://madewithmotif.com/>

42) <https://theeverycompany.com/>

43)

<https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/03/23/The-EVERY-Co-unveils-world-s-first-animal-free-egg-white-road-tested-in-holy-grail-application-the-macaron>

44) GRAS notice 967, Soluble egg-white protein produced by *Pichia pastoris* strain

45) GRAS notice 863, Non-Animal Whey Protein from Fermentation by *Trichoderma reesei*

46) <https://nourishing.io/science/>

47) <https://www.medifonews.com/news/article.html?no=167841>

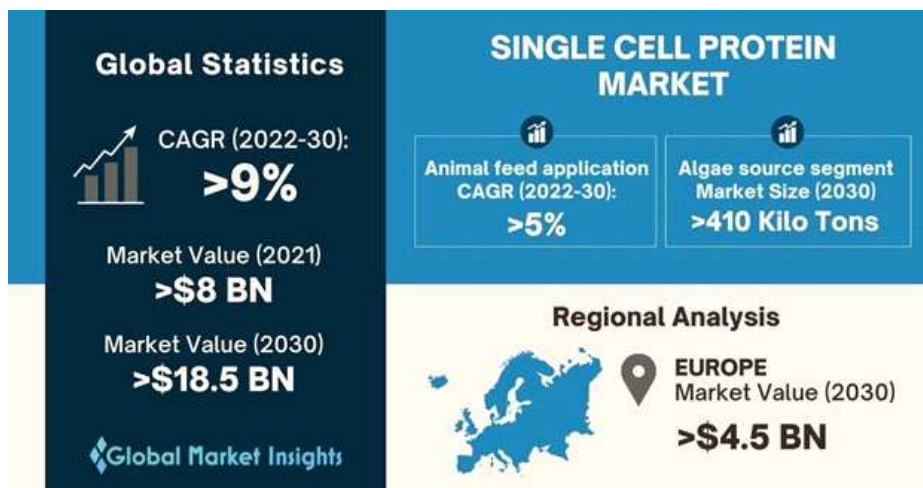
48) <https://en.angelyeast.com/>

물을 제조하였음.

- Edible fungus (GB2557886A) 특허에서는 통풍 및 신장 결석을 유발하는 RNA 함량이 감소된 *Fusarium venenatum*을 개발하여 단백질 대체제로 이용하고자 함.
- Optimized strains of *Yarrowia lipolytica* for high eicosapentaenoic acid production (국제공개 번호 WO WO 2016/029193) 특허에서는 전체 중량의 50% 이상이 지질인 재조합 *Yarrowia lipolytica*를 개발하였음.

가축용 핵심 대체사료원료를 위한 “박테리아 단백질/지방 대체 소재” 고도화 전략

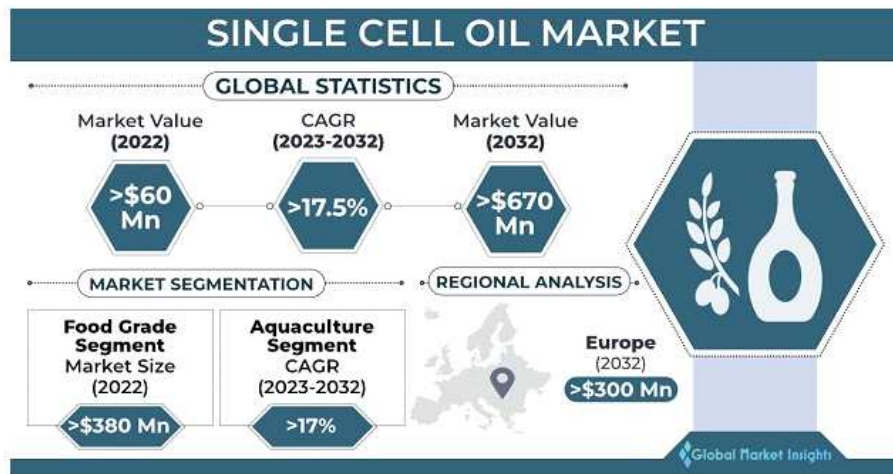
- Single cell protein (SCP)는 죽고 건조되어 있는 식용 가능한 미생물을 뜻하며 이에는 박테리아도 포함됨. 탄소원으로는 탄화수소, 알코올, 초산, 탄산가스, 수소, 농산폐기물 등이 활용될 수 있으며 생산된 SCP는 음식이나 사료 첨가제 및 단백질의 대체원으로 사용됨. 박테리아 SCP는 건조 중량의 50-80%라는 높은 함량의 단백질과 라이신과 메치오닌을 포함한 필수아미노산들을 함유하고 있음(49).
- SCP 시장은 미국 달러로 2021년에 80억 달러 규모였으며 이는 2022년부터 2030년까지 복합 연간 성장률이 9%일 것으로 예상됨. 이는 동물 사료에 주로 적용될 것으로 예측되며 동일 기간 복합 연간 성장률이 5%일 것으로 예측되고 있음.
- 현재 SCP 시장을 이끄는 회사로는 Novus International, BEC Feed Solutions Pty LTD., Evonik industries AG, Lallemand Inc, Angel Yeast Co., Ltd, Alltech Inc., Unibio A/S, Biomin holding GmbH 등이 있음.
- Single cell oil (SCO)는 미생물을 활용해서 생산한 유지를 뜻하며 전 세계적인 탈탄소화 (decarbonization) 노력과 함께 바이오연료 생산이 주목받으며 함께 SCO 생산도 주목을 받고 있음. SCO 생산에는 주로 효모와 미세조류가 사용되지만 몇몇 박테리아도 사용되고 있음.
- 주로 양어사료에 사용되고 있으며 양어사료에의 사용은 2032년까지 17%의 성장률이 예측되고 있음. SCO는 불포화지방산, 오메가-3, 오메가-6와 같은 지방산들을 많이 함유하고 있어서 이러한 사료를 먹은 물고기들은 성장률도 높다는 장점이 있음.
- SCO 시장은 2022년에 6천만 달러를 기록했으며 2023년부터 2032년까지 복합 연간 성장률이 17.5%로 예상되고 있음.
- 현재 SCO 시장을 이끄는 회사로는 DIC Corporation, Cargill Incorporated, Alltech, Goerlich Pharma GmbH, Cellana, Inc., Xiamen Huison Bliotech CO., Ltd 등이 있음.



<Single cell protein 시장 현황 50>

49) Anupama, R. P., & Ravindra, P. (2000). Value-added food: single cell protein. *Biotechnology advances*, 18(6), 459-479.

50) <https://www.gminsights.com/industry-analysis/single-cell-protein-market>



<Single cell oil 시장 현황 51>

○ 박테리아를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국내 기술 수준)

- 국립생물자원관과 윤석환 카이스트 교수진의 공동연구로 이탄습지에서 메탄을 분해하는 능력이 뛰어난 *Methylomonasa* sp. strain JS1과 *Methylocystis* sp. strain MUC1를 발견하였으며 이를 메탄을 활용한 박테리아 SCP 생산에 활용할 수 있을 것으로 예상됨.

○ 박테리아를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국외 기술 수준)

- 동물사료에 단백질원으로 사용하기 위하여 Imperial Chemical Industries에서 처음으로 박테리아 단백질을 사용하여 Pruteen이라는 제품을 제조하였음. 이 제품은 70%의 단백질을 함유하고 있었으며 돼지 사료에 사용이 됐지만 Pruteen 제조에 사용된 균인 *Methylophilus methylotrophus*는 메탄올을 기질로 사용하여 자라는 균이므로 제조 비용의 증가와 함께 다른 값싼 제품들과 경쟁에 밀려 사라짐 52).
- 미국의 Air protein 기업이 수소박테리아를 활용하여 이산화탄소를 단백질로 전환하는 사업 진행 중. 수소독립영양생물(Hydrogenotrophs)과 공기중에서 포집한 이산화탄소와 수소를 활용하여 단백질을 생산하고 있음 53).
- 핀란드의 Solar Foods 기업이 수소박테리아를 활용하여 이산화탄소를 단백질로 전환하는 사업 진행 중. 미국의 Air protein 회사는 이산화탄소를 포집한 후에 사용했다면 이 곳은 공기 중의 이산화탄소를 이용함 54).
- 현재 버려지는 농축산 폐기물, 메탄 등을 재활용하여 SCP를 생산하기위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며 대표적인 예로 감자 전분 생산 부산물을 활용한 생산이 있음. 이는 two-step으로 진행되었으며 *Aspergillus niger*를 활용하여 감자 부산물의 섬유질을 분해하고 *Bacillus licheniformis*를 활용하여 박테리아 SCP를 생산함 55).
- 고무 공장에서 발생하는 폐수는 관계용수로 사용되기에는 chemical oxygen demand가 높으므로 *Rhodospseudomonas palustris*를 활용하여 chemical oxygen demand를 낮추고 생산된 biomass는 박테리아 SCP로 이용하는 기술을 개발함 56).

51)

https://www.gminsights.com/industry-analysis/single-cell-oil-market?gclid=CjwKCAjw-b-kBhB-EiwA4fvKrLI9uc2VvC9TF7sVBkU3CFsqxViMaCj9UvJgEAKHUG0zt56tAHccRBoCnwcQAvD_BwE

52) Johnson, E. A. (2013). Biotechnology of non-Saccharomyces yeasts—the ascomycetes. Applied microbiology and biotechnology, 97, 503-517.

53) <http://weekly.chosun.com/news/articleView.html?idxno=15420>, <https://www.airprotein.com/>,

<https://www.sommeliertimes.com/news/articleView.html?idxno=18027>,

54) <https://www.econovill.com/news/articleView.html?idxno=383338>, <https://solarfoods.com/>

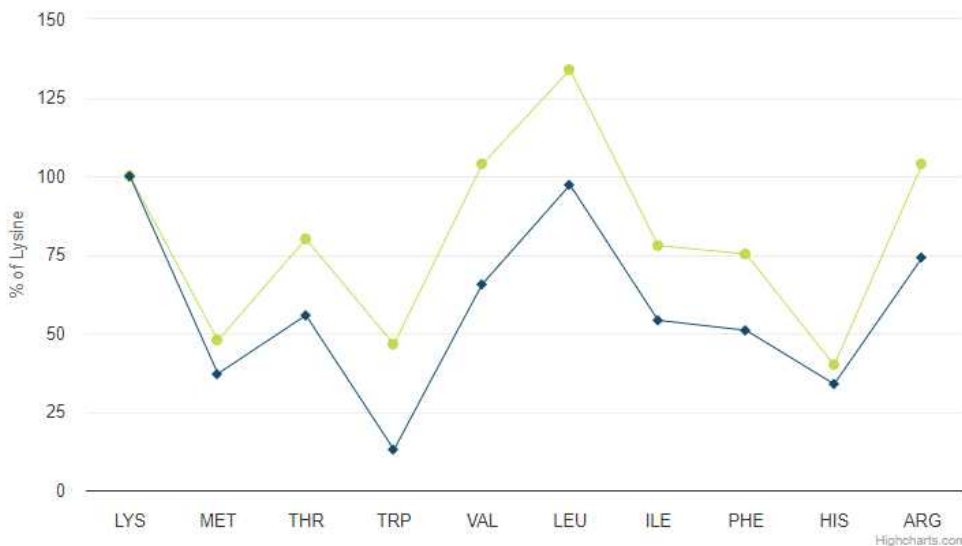
55) Liu, B., Li, Y., Song, J., Zhang, L., Dong, J., & Yang, Q. (2014). Production of single-cell protein with two-step fermentation for treatment of potato starch processing waste. Cellulose, 21, 3637-3645.

56) Kornochalart, N., Kantachote, D., Chairapat, S., & Techkarnjanaruk, S. (2014). Use of

- 다양한 박테리아들이 SCP 생산에 활용되고 있으며 그중 지구온난화를 가속화하는 온실가스로 알려진 메탄을 탄소원으로 사용하는 Methanotroph (메탄자화균)도 포함됨. Methanotroph는 메탄을 탄소원과 화학적 에너지로 사용하여 증식하는 세균 및 고세균을 뜻하며 주로 메탄이 생성되는 환경에서 자주 발견됨. 몇몇 Methanotroph는 대기 중의 메탄도 이용할 수 있다고 알려져 지면서 다양한 기업에서 값싼 원료인 메탄을 SCP 생산의 기질로 사용함으로써 환경오염과 식량난에 대응하려는 노력을 활발하게 진행 중이지만 메탄의 낮은 용해도로 인해 어려움을 겪고 있으며 다양한 기업들이 이를 해결하기 위해 노력하고 있음.
- 미국의 Calysta사에서는 메탄영양박테리아 *Methylococcus capsulatus*에서 추출한 단백질을 축산 및 수산양식의 사료용 단백질로 활용.
- 덴마크의 Unibio사에서는 Uniprotein이라는 동물 및 양어 사료용 단백질 제품 개발 중
- 핀란드의 VTT Ltd에서는 농장에서 발생한 메탄을 *Methylococcus capsulatus*, *Methylosinus trichosporium*, *Methylocystis parvus*을 배양하는데 활용하여 사료첨가용 미생물 오일 및 단백질을 생산하려는 연구 진행 중
- 이외에도 다양한 글로벌 회사들이 박테리아를 활용하여 단백질을 대체하기 위한 기술을 개발하고 있으며 박테리아에 유전자 조작을 통한 아미노산, 비타민, 지방산, 글루타치온 등 영양에 유익한 물질들을 증가 시키려는 시도들도 논의되고 있음 57).

AMINO ACID PROFILE

The below interactive diagram illustrates the amino acid profile of Uniprotein® in comparison with that of high-quality fishmeal (LT Fishmeal).



<Unibio사의 메탄영양세균을 이용하여 생산한 제품과 어분 사이 아미노산 비교 58)>

Rhodospseudomonas palustris P1 stimulated growth by fermented pineapple extract to treat latex rubber sheet wastewater to obtain single cell protein. Annals of Microbiology, 64, 1021-1032.

57) Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. Frontiers in microbiology, 8, 2009.

58) <https://www.unibio.dk/end-product/amino-acid-profile/>

<박테리아 single cell protein 생산과 관련된 회사 59)>

Company, Country	Microorganism	Substrate	Patent, web site/references
Algaeon ^b	<i>Euglena gracilis</i>	CO ₂	http://algaeon-inc.com/
Amoco (BP), USA ^a	<i>Candida utilis</i>	Ethanol	Rudravaram et al., 2009
Bega Cheese Ltd ^b	<i>Saccharomyces</i>	Wheat	http://www.smh.com.au/business/bega-snaps-up-vegamite-as-part-of-460m-deal-20170118-gtu7wk.html
Billyeast, FR ^c	<i>Kluyveromyces</i>	Whey	Rudravaram et al., 2009
BlueBio Tech Int. GmbH, DE ^b	<i>Spirulina, Chlorella</i> sp.	CO ₂	www.bluebiotech.de
Blue Green Foods ^b	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	CO ₂	https://bluegreenfoods.com/
Calysta Inc., UK ^b	Soil microbes	Methane	www.calysta.com
Cangzhou Tianyu Feed Additive Co. Ltd., CN ^b	Yeast powder (n.a.)	n.a.	www.cztmy.com
CBH Qingdao Co., Ltd, CN ^b	Bacterial fermentation (n.a.)	n.a.	www.cbhcn.com
Cyanotech, USA ^b	<i>Spirulina platensis</i>	Sodium bicarbonate, CO ₂	www.cyanotech.com/ US19920959649, US19960641159
E3Live ^b	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	CO ₂	https://www.e3live.com/
Earthrise, USA ^b	<i>Spirulina</i> sp.	CO ₂	www.earthrise.com/
E.I.D Parry Ltd., Parry Nutraceuticals Division, IN ^b	<i>Arthrospira platensis, Chlorella vulgaris</i>	CO ₂	www.parrynutraceuticals.com/#
Euglena Co. Ltd. ^b	<i>Euglena</i>	CO ₂	http://www.euglena.jp/erv/
FEBICO ^b	<i>Spirulina, Chlorella</i>	CO ₂	http://www.febico.com/
Flint Hills Resources ^b	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Corn	https://www.fhr.com/newsroom
Hainan Simai Enterprising Ltd. ^c	<i>Spirulina</i>	CO ₂	
Imperial Chemical Industries, UK (now: AkzoNobel, NL) ^a	<i>Methylophilus</i>	Methanol	Rudravaram et al., 2009; Johnson, 2013
IFF, FR ^c	<i>Candida tropicalis</i>	n-alkanes	Rudravaram et al., 2009
Kanegafuchi, JP ^c	n.a.	n.a.	Rudravaram et al., 2009
Klamath Valley Botanicals LLC ^b	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	CO ₂	http://klamathvalley.com/
KnipBio ^b	<i>Methylobacterium extorquens</i>	methanol	www.knipbio.com
Lallemand Inc., CA ^b	Yeast and bacteria	n.a.	www.bio-lallemand.com
LeSaffre, FR ^b	Yeast	n.a.	http://www.lesaffre.com/
Liquichemica, IT ^b	<i>Candida maltosa</i>	n-alkanes	Rudravaram et al., 2009
Marlow Foods Ltd, UK ^b	<i>Fusarium venenatum</i>	Glucose syrup	www.quorn.co.uk
Mayanar Spirulina Factory ^c	<i>Spirulina</i>	CO ₂	
Mondelez Int. ^b	Yeast	brewer's spent grain	http://www.mondelezinternational.com/
Nucelis ^b	<i>Yarrowia lipolytica</i>	n.a.	https://www.nucelis.com/
Nutrinisic ^b	Bacteria	starch, brewing, other waste waters	http://nutrinisic.com/ ZA201003590
Phillips Petroleum Company USA (Chiy) ^b	<i>Fichia</i> sp., <i>Torula</i> sp.	Sugar feed stock	Rudravaram et al., 2009
Qingdao Zhongtai Poultry Ind. Professional Cooperatives, CN ^c	Lactic acid bacteria	Whey, Whey & soybean meal, wheat & rice bran, beer lees, jujube, urea	CN102894183 CN102987056
Roquette Klütze GmbH & Co ^b	<i>Chlorella</i>	CO ₂	http://www.algomed.de/en/homepage/
Shanghai Gentech Ind. Group Co. Ltd, CN ^d	n.a.	n.a.	CN103843971
Shanghai Trany Green Food Co, CN ^b	<i>Aspergillus oryzae, Saccharomyces cerevisiae, Trichoderma</i> sp.	Bean dregs and soybean processing water; Soybean dregs, Bean waste water	CN103098979 CN103156051
Skotan S.A., PL ^b	<i>Yarrowia lipolytica</i>	n.a.	http://www.skotansa.pl/
Skystone Feed Yixing Co, CN ^b	<i>Aspergillus niger</i>	Blue-green algae	CN103749957
Tangshan Top Bio-Technology Co., Ltd., CN ^b	<i>Saccharomyces</i> sp.	n.a.	www.tuopobio.com
Taiwan Chlorella Manufacturing Co. ^c	<i>Chlorella</i>	CO ₂	
TerraVia, USA ^b	Alga	n.a.	http://algavia.com/
UniBio A/S, DK ^b	Methanotrophic bacteria	Natural gas	www.unibio.dk PA199900690
Unilever ^b	Yeast	brewer's spent grain	www.unilever.com
Vega Pharma Ltd., CN ^b	Bacterial	n.a.	www.vegapharma.com

n.a. not available.

^aCompany inactive or has merged or been taken over by another company, with a new name.

^bActive in SCP production.

^cCurrent activities in SCP unknown.

^dActive through partners.

<박테리아 및 박테리아 SCP 생산시 사용된 기질 60)>

Organism	Substrate	Protein content (%)	References
<i>Bacillus cereus</i>	Ram horn	68	Kurbanoglu and Algur, 2002
<i>Bacillus licheniformis</i>	Potato starch processing waste	38	Liu et al., 2014
<i>Bacillus pumilis</i>	Potato starch processing waste	46	Liu et al., 2013
<i>Bacillus subtilis</i>	Ram horn	71	Kurbanoglu and Algur, 2002
	Soy bean hull	12	Wongputtisin et al., 2012, 2014
<i>Corynebacterium ammoniagenes</i>	Glucose + fructose	61	Wang et al., 2013
<i>Corynebacterium glutamicum</i> ^a	n.a.	57–70	Zhang et al., 2013
<i>Cupriavidus necator</i>	Synthetic growth medium	40–46	Kunasundari et al., 2013
<i>Escherichia coli</i>	Ram horn	66	Kurbanoglu and Algur, 2002
<i>Haloarcula</i> sp. IRU1	Petrochemical waste water	76	Taran and Asadi, 2014
<i>Methylococcus capsulatus, Raistonia</i> sp., <i>Brevibacillus agri, Aneurinibacillus</i> sp.	Methane (Natural gas)	67–73	reviewed in Overland et al., 2010
<i>Methylomonas</i> sp.	Methane salt broth	69	Yazdian et al., 2005
<i>Rhizospheric diazotrophs</i> (whole microbial community)	Brewery wastewater	>55	Lee et al., 2015
<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	Latex rubber sheet wastewater	55–65	Kornochoalert et al., 2014

n.a. not available.

^aCommercial products, Prosin, and Protide, produced by CJ (Liao cheng) Biotech Co., Ltd., China.

59) Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009.

60) Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009.

<박테리아 SCP 생산과 관련된 국제 특허 61>

Patent number	Title	Publication date	Assignees & Inventors
US201519779A	Microorganisms for the enhanced production of amino acids and related methods	2015-07-16	Calysta Inc; Doss, B.D., Giver, L.J., Luning, E.G., Regitsky, D.D., Saville, R.M., Resnick, S.M., Silverman, J.A.
CN104489281A	Method for preparing single-cell protein feed additive by processing wastes	2015-04-08	Jiangsu Qianyaotang Traditional Chinese Medicine Res. Inst. Co. Ltd.; Zhang K., Zhang Z.
CN104472867A	Method for preparing single-cell protein feedstuff by utilizing waste liquid in production of ginkgo leaf extracts and application	2015-04-01	Jiangsu Qianyaotang State Medical Res. Inst. Co. Ltd.; Zhang, K., Zhang, Z.
CN104450513A	Full-automatic factory full-wave band closed circulating water real-time monitoring breeding device	2015-03-25	Zhu Zuyang; Zhu Z.
US2015044327A	Methylophs for aquaculture and animal feed	2015-02-12	Knipbio; Marx, C. J., Feinberg, L.F.
US201633384A	Carbohydrate-enriched recombinant microorganisms	2015-01-16	Calysta Energy Lic; Calysta Inc; Giver, L.J., Mueller, J., Regitsky, D.D., Saville, R.M., Silverman, J.A.
CN103918874A	Method for improving quality of manioc wastes by using mixed fermentation technology	2014-07-16	U. of Sichuan Agricultural; Chen, X., Jia, G., Liu, G., Tang, J., Tang, X., Zhao, H.
CN103484395A	Bacterial strain used for preparing single-cell protein from methanol, and applications of bacterial strain	2014-01-01	Henan Coal Chemical Ind. Group Inst. Co.; Chao, Y., Jiang, Y., Jiao, Z., Li, N., Li, W., Li, Z., Song, C., Su, M., Wang, Y., Wei, L., Zhang, X.
CN103156051A	Method using composite bacterium to ferment bean dregs to manufacture protein feed	2013-06-19	Shanghai Tramy Green Food Co. Ltd.; Li, L., Shen, J., Yuan, H.
US2014323694A	Multiphase porous flow reactors and methods of using same	2013-05-23	Calysta Energy Inc; Gosse, J.L., Harwood, T., Thust, S., von Keitz, M.G.
CN102987054A	Production process of fermented feed	2013-03-27	Qingdao Tianrui Ecological Technology Co. Ltd.; Qu T.
CN102987056A	Fermentation method for whey fermentation liquor for fermenting feed	2013-03-27	Qingdao Zhongtai Poultry Ind. Professional Cooperatives; Qu T.
CN102978271A	Method for producing carotenoid and single-cell protein via transforming cellulose pyrolytical liquid and levo-glucosan through photosynthetic bacteria	2013-03-20	Nanjing Normal U.; Chen, Y., Liu, J., Sun, H., Wei, M., Zhao, Y.
CN102972622A	Preparation method of whey fermented forage	2013-03-20	Qingdao Tianrui Ecological Technology Co. Ltd.; Qu T.
CN102960538A	Unicellular protein feed prepared from fermented dragon fruit peel and production method of unicellular protein feed	2013-03-13	Guangxi Zhuang Autonomous Region Ct for analysis and test research; Lu, A., Mo, J.
CN102894183A	Preparation method of whey fermented feed	2013-01-30	Qingdao Zhongtai Poultry Ind Professional Cooperatives; Qu T.
CN101507489A	Preparation method of composite zymoprotein	2009-08-19	Jiangxi Purun Mechanical Co. Ltd.; Yang, T.
US2009114602A	Biosolids-based food additive for animal feed, methods of production, and business application thereof	2009-05-07	Nutrisinc Corp; Oberon Fmr Inc; Procell Investments Ltd.; Logan, A.J., Swenson, R.P. Jr., Seth, S.T.
US2004241790A	Method of fermentation	2004-07-09	Cockbain Julian; Norferm Da; Statoil Asa; Statoilhydro Asa; Bioprotein As; Calysta As; Eriksen, H., Joergensen, L., Strand, K.
US2003138878A	Method	2003-07-24	Golding L., Johannessen A., Kleppe G., Larsen J., Moen E., Norferm Da Stavanger, Statoil ASA; Moen, E., Larsen, J., Kleppe, G., Johannessen, A.

*Search was made using the PatBase Express (www.patbase.com) database with the basic search, using key words "single cell protein" and checked manually.

가축용 핵심 대체사료원료를 위한 “곰팡이 단백질/지방 대체 소재” 고도화 전략

- 곰팡이는 가공 부산물 및 폐기물을 포함한 다양한 기질을 활용할 수 있다는 특징이 있음. 곰팡이를 활용하여 단백질 및 지방을 대체하기 위한 연구들이 많이 진행되고 있음. 곰팡이는 높은 함량의 단백질 및 필수 아미노산을 함유하고 있음.

<EU 사료 카탈로그에서 사료로써 사용가능하다고 허용한 진균 유래 조단백질 62>

균주	특징
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Saccharomyces ludwigii</i> , <i>Saccharomyces carlsbergensis</i> , <i>Saccharomyces uvarum</i> , <i>Kluyveromyces fragilis</i> , <i>Kluyveromyces lactis</i> , <i>Candida utilis/Pichia jadinii</i> , <i>Torulasporea delbrueckii</i> , <i>Brettanomyces ssp.</i>	설탕 시럽, 당밀, 알코올, 곡물, 양조 잔여물, 과즙, 전분, 암모니아 등을 기질로 하여 균을 배양하고 조단백질 얻음. 효모 세포들은 모두 불활성화 및 사멸 처리.
<i>Yarrowia lipolytica</i>	식물성 유지 등을 기질로 하여 균을 배양하고 조단백질 얻음. 균 불활성화 및 사멸 처리.
<i>Aspergillus niger</i>	효소 생산을 위해 맥아와 밀에 배양 후 발효 부산산물로부터 얻은 조단백질. 균 불활성화 및 사멸 처리.

- 단백질 생산량이 높은 다양한 돌연변이 균주 생산 및 활용하려는 노력이 계속되고 있으며 특히 *Aspergillus*와 *Fusarium*에 대한 연구들이 활발하게 이루어지고 있음
- EU 사료 카탈로그에서 사료로써 사용가능하다고 허용된 곰팡이 유래 조단백질은 크게 세가지 그룹이

61) Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009.
62) Commission Regulation (EU) No. 68/2013 on the Catalogue of feed materials. *Official Journal of the European Union* L 29, 30 January 2013, pp. 1-64.

있으며 그 중에 *A. niger*가 포함되어있음⁶³⁾. *A. niger* 뿐만 아니라 *A. oryzae*의 가축 사료로써의 효능에 대한 연구도 많이 이루어지고 있음.

〈*Aspergillus* SCP 생산에 효과적인 부산물 기질〉

균주	부산물	단백질 (%)	참고 문헌
<i>A. niger</i>	옥수수대	–	64)
	사과박	17–20	65)
	선인장배	5.2	66)
	쌀겨	11	67)
	스틱 워터	49	68)
	폐액	50	69)
	바나나 폐기물	18	70)
	감자 가공 부산물	38	71)
<i>A. flavus</i>	잭후르츠 씨 폐기물	–	72)
	쌀겨	10	73)
<i>A. oryzae</i>	쌀겨 (deoiled)	24	74)
	잭후르츠 씨 폐기물	–	75)
<i>A. terreus</i>	전분 가공 폐수	35	76)
	코코야의 구슬줄기 가공 폐수	21–24	77)
	바나나 껍질	–	78)
	Eichornia	–	79)

- 63) Commission Regulation (EU) No. 68/2013 on the Catalogue of feed materials. Official Journal of the European Union L 29, 30 January 2013, pp. 1-64.
- 64) Singh, A., Abidi, A. B., Agrawal, A. K. & Darmwal, N. S. Single cell protein production by *Aspergillus niger* and its evaluation. *Zentralbl Mikrobiol* **146**, 181-184 (1991).
- 65) Bhalla, T. C. & Joshi, M. Protein enrichment of apple pomace by co-culture of cellulolytic moulds and yeasts. *World J Microbiol Biotechnol* **10**, 116-117 (1994).
- 66) Gabriel, A.; Victor, N.; Preez, J.C. Cactus pear biomass, a potential lignocellulose raw material for single cell protein production (SCP). *Int. J. Curr. Microbio. Appl. Sci.* 2014, 3, 171–197.
- 67) Valentino, M.J.; Ganado, L.S.; Undan, J.R. Single cell protein potential of endophytic fungi associated with bamboo using rice bran as substrate. *Adv. Appl. Sci. Res.* 2016, 7, 68–72.
- 68) Kam, S.; Kenari, A.A.; Younesi, H. Production of single cell protein in stickwater by *Lactobacillus acidophilus* and *Aspergillus niger*. *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 2012, 21, 403–417.
- 69) Chiou, P.W.S.; Chiu, S.W.; Chen, C.R. Value of *Aspergillus niger* fermentation product as a dietary ingredient for broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2001, 91, 171–182.
- 70) Baldensperger, J.; Le Mer, J.; Hannibal, L.; Quinto, P.J. Solid state fermentation of banana wastes. *Biotechnol. Lett.* 1985, 7, 743–748.
- 71) Liu, B., Li, Y., Song, J. *et al.* Production of single-cell protein with two-step fermentation for treatment of potato starch processing waste. *Cellulose* **21**, 3637–3645 (2014).
- 72) Chakraborty, A., Bhowal, J. Bioconversion of Jackfruit Seed Waste to Fungal Biomass Protein by Submerged Fermentation. *Appl Biochem Biotechnol* **195**, 2158–2171 (2023).
- 73) Valentino, M.J.; Ganado, L.S.; Undan, J.R. Single cell protein potential of endophytic fungi associated with bamboo using rice bran as substrate. *Adv. Appl. Sci. Res.* 2016, 7, 68–72.
- 74) Ravinder, R.; Linga, V.; Ravindra, P. Studies on *Aspergillus oryzae* Mutants for the Production of Single Cell Proteins from Deoiled Rice Bran. *Food Technol. Biotechnol.* 2003, 41, 243–246
- 75) Chakraborty, A., Bhowal, J. Bioconversion of Jackfruit Seed Waste to Fungal Biomass Protein by Submerged Fermentation. *Appl Biochem Biotechnol* **195**, 2158–2171 (2023).
- 76) Souza Filho, P.F., Zamani, A. & Taherzadeh, M.J. Edible Protein Production by Filamentous Fungi using Starch Plant Wastewater. *Waste Biomass Valor* **10**, 2487–2496 (2019).
- 77) Duru CC, Uma NU (2003). Production of fungal biomass from cormel process waste-water of cocoyam (*X. sagittifolium* (L.) Schott) processing using *Aspergillus oryzae* obtained from cormel flour. *J. Sci. Food Agric.* **83**: 850-857.
- 78) Jaganmohan, P.; Purushottam, D.; Prasad, S.V. Production of Single Cell Protein (SCP) with *Aspergillus terreus* Using Solid State Fermentation. *Eur. J. Biol. Sci.* 2013, 5, 38–43.
- 79) Jaganmohan, P.; Purushottam, D.; Prasad, S.V. Production of Single Cell Protein (SCP) with *Aspergillus terreus* Using Solid State Fermentation. *Eur. J. Biol. Sci.* 2013, 5, 38–43.

○ 곰팡이를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국내 기술 수준)

- 국내 같은 경우 일부 기업에서 곰팡이를 활용한 가축 생산과 같은 기술을 개발하고 있지만 식용 가능한 곰팡이에 대한 개발은 미미한 편임.
- 국내 Mycel 기업이 곰팡이를 기반으로 한 대체육 개발 진행 중 80)
- 본 연구에 참여하는 손호경 교수 연구팀이 선행연구를 통해 해당 곰팡이가 사료 내 단백질원으로서의 사용을 용이하게 하기 위해서 균사 성장 극대화 방법을 모색함.

○ 곰팡이를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국외 기술 수준)

- 영국의 Marlow Foods사는 *F. venenatum*을 활용하여 Quorn 대체육 제품을 상용화 하였으며 1985년부터 현재까지도 판매하고 있음.
- 미국의 Nature' s Fynd사는 미국 옐로스톤 국립공원 화산 열천수에서 분리한 *F. flavolapis*를 활용하여 대체육 기반 패티를 개발하여 상용화하였으며 2012년부터 현재까지도 판매하고 있음.
- 미국의 Prime roots 기업이 Koji 곰팡이를 활용한 베이컨 생산 사업 진행 중 81).
- 일본의 University of Tsukuba의 하가와라 다이스케 교수팀이 누룩곰팡이를 활용한 대체육 생산 개발 중 82).
- *Aspergillus* spp.를 활용하여 SCP를 대량 생산하기 위한 연구들도 진행 중에 있으며 경제적인 생산을 위해 다양한 가공 부산물 및 폐기물을 기질로 활용하려고 하고 있음. 또한 가축의 사료원료로 쓰기 위한 연구들도 진행 중임 83).
- *A. oryzae*에 ethyl methyl sulfonate를 처리하여 생성된 돌연변이 균주가 쌀겨에 배양 시 야생형보다 더 높은 단백질 함량 (24%) 을 가지고, 핵산 함량은 감소한 것을 확인함 84).
- *A. oryzae*에 X선, 태양 복사 및 표백제를 처리하여 생산한 돌연변이 균주가 코코야의 구슬 줄기 가공 폐수를 기질로 하였을 때 *A. oryzae* 야생형보다 더 높은 단백질을 가진 것을 확인함 85).
- *A. niger*의 cellulase 생산성을 더 높인 돌연변이 균주 *A. niger* H3를 감자 전분 가공 부산물을 활용하여 배양했을 때 감자 부산물의 80.5%의 cellulose가 분해되었고, 총 단백질 함량은 38%에 달했음 86).
- *A. oryzae* phytase를 성장기가 끝난 돼지에게 양분이 충분한 기초 식단과 함께 제공하였을 때 돼지의 성장, 사료 효율, 인의 관 소화 흡수율 및 지육의 등지방이 개선됨 87).
- *A. oryzae*와 phytase를 함께 발효한 발효 산물을 섭취한 영계의 경우, 회장의 *Clostridium perfringens*의 수가 감소되고, 염증 관련 mRNA의 발현을 억제됨으로서 염증 반응이 줄 88).
- *A. oryzae*와 *S. cerevisiae*를 젓먹이송아지배합사료에 함께 첨가하여 사료로 제공하였을 때 송아지의 영양분 소화율이 증가하고 이로 인해 이유식 스트레스가 감소함 89).

80) <https://mycelproject.com/platform/platform.php>

81) <https://mbhibl.tistory.com/60>

82) <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5542541>

83) Uwineza, C. et al. Cultivation of edible filamentous fungus *Aspergillus oryzae* on volatile fatty acids derived from anaerobic digestion of food waste and cow manure. *Bioresour Technol* 337, 125410 (2021).

84) Uwineza, C. et al. Cultivation of edible filamentous fungus *Aspergillus oryzae* on volatile fatty acids derived from anaerobic digestion of food waste and cow manure. *Bioresour Technol* 337, 125410 (2021).

85) Duru CC, Uma NU (2003). Production of fungal biomass from cormel process waste-water of cocoyam (*X. sagittifolium* (L.) Schott) processing using *Aspergillus oryzae* obtained from cormel flour. *J. Sci. Food Agric.* 83: 850-857.

86) Liu, B., Li, Y., Song, J. et al. Production of single-cell protein with two-step fermentation for treatment of potato starch processing waste. *Cellulose* 21, 3637-3645 (2014).

87) Dang, D.X.; Kim, I.H. Effects of adding high-dosing *Aspergillus oryzae* phytase to corn-wheat-soybean meal-based basal diet on growth performance, nutrient digestibility, faecal gas emission, carcass traits and meat quality in grow-ing-finishing pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 2021, 105, 1056-1062.

88) Chuang, W.Y.; Lin, W.C.; Hsieh, Y.C.; Huang, C.M.; Chang, S.C.; Lee, T.T. Evaluation of the combined use of *Saccharomyces Cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* with phytase fermentation products on growth, inflammatory, and intestinal morphology in broilers. *Animals* 2019, 9, E1051.

89) A. Di Francia, F. Masucci, G. De Rosa, M.L. Varricchio, V. Proto. Effects of *Aspergillus oryzae* extract and a *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product on intake, body weight gain and digestibility in buffalo calves. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 140, 1-2, 67-77.

- *A. oryzae*를 대두박을 기질로하여 배양한 배양액과 대사산물을 양에게 제공하였을 때 양의 영양분 소화율이 개선되고 휘발성지방산으로 인해 반추위 내에 에너지 공급이 증가됨 90).

○ 곰팡이를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (관련 국외 특허)

- 최근 사상성 진균의 용도와 관련하여 등록된 특허는 300여개 정도이며, 특허를 등록한 주요 회사로는 Dupont, DSM, AB Enzymes, Novozymes, Toray Industries가 있음.
- *Aspergillus* 종은 식품 분야 관련 특허가 많이 등록되어 있으며 식품뿐만 아니라, 그들이 생산하는 대사산물의 다양한 활용 용도에 대해서도 특허가 많이 등록되어 있음 *A. oryzae*는 *Trichoderma reesei*와 함께 수세기동안 효소 분야에서 특허가 많이 등록 되어져 있음.
- 사상성 진균의 가축 사료로서 용도와 관련된 대부분의 특허들은 가축에게 적용되었을 때의 소화율에 집중하고 있음. 이 특허들 중 대다수는 중국에 의해 등록되었고, 최근 들어 그 수가 증가하고 있음
- *A. oryzae*로부터 얻은 amylase를 젖소 사료에 첨가하여 젖소의 영양분 이용성을 증가 시킨 특허 (WO2003068256A1) 및 이와 유사한 특허들은 이미 오래 전 등록된 바가 있지만, *A. oryzae*로부터 얻은 단백질과 유지 자체를 사료로 적용한 특허는 없는 상황임.

가축용 핵심 대체사료원료를 위한 “효모 단백질/지방 대체 소재” 고도화 전략

- 효모는 높은 단백질 함량 및 비타민 B군을 포함한 비타민 등이 풍부한 영양성분을 포함하고 있으며, 효모의 세포벽에는 섬유질이 많이 포함되어 장건강에 도움을 줄 수 있음 91).

<축종별 미생물 첨가제 및 대체제 연구 현황>

축종	종 분류	미생물	대체 및 첨가율	효과	참고 문헌
소	젖소 및 수소	<i>A. oryzae</i> , <i>Bacillus natto</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Saccharomyces</i> 등	500 g/head/day 또는 100 g/100 kg BW/day 첨가	우유 량과 유질 향상, 우유 내 요소 농도 감소, 단백질 소화 량 증가(by-pass 효과), 휘발성 지방산, 전분 흡수를 감소	국내 특허: 등록 번호 10-0322481
	축우	<i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> 등	성우는 100 g/head/day, 송아지는 50 g/head/day 첨가	사료섭취량 및 증체량 증가, 장내 균총 변화(비피더스균 및 락토바실 리스균 증가, 대장균 감소)	국내 회사: ㈜ 하농 https://hanong.imweb.me
	송아지	<i>Y. lipolytica</i>	30 g/day 첨가	체중 증가 및 몸길이가 개선	국외 논문: Czech, Anna, et al. (2016)
돼지	새끼 돼지	<i>C. utilis</i> <i>Y. lipolytica</i>	조 단백질의 40% 대체 사료의 3% 첨가	소화기능 향상 및 성장 속도 유지 체중 증가	국외 논문: Cruz, Ana, et al. (2019), 국외 논문: Czech, Anna, et al. (2016)
어류	연어	<i>C. utilis</i> , <i>K. marxianus</i> <i>C. utilis</i>	어분 조 단백질의 40% 대체 사료의 25% 대체	성장 능력 및 영양소 보 유력 유지 체중 증가 량 증가	국외 논문: Øverland, Margareth, et al. (2013) 국외 회사: Borregaad https://www.borregaad.com 국외 논문: Sahlmann, Christian, et al. (2016)
복극 곤돌매기		<i>R. toruloides</i>	사료의 식물성 기름 대체	근육과 간 조직의 지방함량, 최종 무게 및 최종 길이 등 성장인자 유지	국외 논문: Brunel, Mathilde, et al. (2022)
나일 필라델피아		<i>Y. lipolytica</i>	사료의 5% 첨가	성장 및 선천적 면역 반응 향상	국외 논문: Neuls, Luciane, et al. (2021)

- 유지성 효모의 뛰어난 유지 생산 능력으로 효모는 사료원료의 지질원 또는 단백질원으로 사용될 잠재성을 지니고 있어, 효모를 이용한 사료 첨가제 또는 대체제 연구가 주목받고 있음.

○ 효모를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국내 기술 수준)

- 국내 부경대학교, 경상대학교, 부산대학교 연구진은 해양효모 중 불포화 지방산을 함유한 두 종의 해양효모 *Debarymyces* sp. Y-14와 *Candida* sp. Y-16을 선정하여 물벼룩(*M. macrocopa*)에 먹이로 투여하여 먹이의 유효성과 먹이의 선호도를 방사성 안전 동위원소를 사용하여 검증하였음. 다른 실험구와 시판용 먹이사료인 *Erythrobacter* sp. Sπ-1을 먹이로 투여한 대조구에 비해 물벼룩의 필수 지방산과 필수 아미노산의 함량이 높았으며, 이는 치어의 먹이 사료로서 영양적인 면에서 우수한 사료 대체제로 이용될 수 있음을 시사함 92).

90) Guo Long, Zhang Duihong, Du Ruifang, Li Fadi, Li Fei, Ran Tao. Supplementation of *Aspergillus oryzae* Culture Improved the Feed Dry Matter Digestibility and the Energy Supply of Total Volatile Fatty Acid Concentrations in the Rumen of Hu Sheep. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9.

91) <https://www.pethealth.kr/news/articleView.html?idxno=5609>

〈물벼룩 체내의 아미노산 및 지방산 조성〉

	Diets			Moinamacrocopa		
	Str- I	Y-14	Y-16	Str- I	Y-14	Y-16
Non-essential						
Alanine	2.9(14.8)	3.9(8.4)	3.8(8.2)	2.5(6.9)	3.5(7.1)	2.0(6.6)
Aspartic acid	0.5(2.6)	4.3(9.3)	4.1(8.9)	3.7(10.2)	4.8(9.8)	3.0(9.9)
Cysteine	0.6(3.1)	0.1(0.4)	0.6(1.3)	0.5(1.4)	0.7(1.4)	0.5(1.7)
Glutamic acid	0.8(4.1)	5.2(11.2)	4.3(9.3)	4.2(11.5)	5.7(11.6)	3.3(10.9)
Glycine	1.5(7.7)	2.6(5.6)	2.5(5.4)	2.7(7.4)	3.4(6.9)	2.0(6.6)
Serine	0.2(1.0)	1.8(3.9)	1.6(3.5)	2.0(5.5)	3.2(6.5)	1.9(6.3)
Proline	0.9(4.6)	1.6(3.5)	1.7(3.7)	1.9(5.2)	2.5(5.1)	1.5(5.0)
Tyrosine	0.4(2.0)	1.6(3.5)	1.4(3.0)	1.7(4.7)	1.8(3.7)	1.4(4.6)
Essential						
Arginine	0.1(0.5)	2.6(2.8)	3.4(7.4)	1.5(4.1)	2.6(5.3)	1.8(5.9)
Histidine	3.6(18.3)	4.4(9.5)	4.8(10.4)	2.8(7.7)	2.9(5.9)	1.6(5.3)
Isoleucine	1.6(8.2)	3.1(6.7)	2.5(5.4)	1.5(4.1)	1.8(3.7)	1.2(4.0)
Leucine	2.1(10.7)	3.7(8.0)	3.2(6.9)	2.4(6.6)	4.7(9.6)	3.0(9.9)
Lysine	0.2(1.0)	2.8(7.8)	4.7(10.7)	1.8(4.9)	2.9(5.9)	1.5(5.0)
Methionine	0.9(4.6)	1.4(1.5)	1.1(2.4)	0.8(2.2)	1.3(2.6)	0.9(3.0)
Phenylalanine	1.0(5.1)	2.1(4.5)	1.7(3.7)	1.8(4.9)	1.8(3.7)	1.4(4.6)
Threonine	0.3(1.5)	3.0(6.5)	2.4(5.2)	2.4(6.6)	2.6(5.3)	1.6(5.3)
Valine	1.9(9.7)	3.3(7.1)	2.6(5.6)	2.1(5.8)	3.2(6.5)	1.7(5.6)
Total	19.6	34.9	46.2	36.4	49.2	30.3

	Diets			Moinamacrocopa		
	Str- I	Y-14	Y-16	Str- I	Y-14	Y-16
Capric acid C10:0	-	2.8	1.48	-	-	-
Lauric acid C12:0	-	1.1	-	-	-	0.6
Myristic acid C14:0	0.7	0.9	1.6	3.5	-	2.8
Myristoleic acid C14:1	-	-	-	-	-	1.5
Pentadecanoic acid C15:0	-	-	0.6	-	-	1.7
cis- 10-Pentadecenoic acid C15:1	-	-	-	-	-	1.3
Palmitic acid C16:0	2.6	22.9	15.8	22.2	17.5	14.9
Palmitoleic acid C16:1	1.6	1.4	11.2	9.8	8.5	14.0
Magaric acid C17:0	-	1.1	0.4	-	-	1.0
Magaroleic acid C17:1	-	-	0.99	-	-	1.3
Stearic acid C18:0	5.2	10.1	4.3	8.5	-	5.3
Oleic acid C18:1	70.5	39.1	39.4	24.5	25.7	28.9
Elaidic acid C18:1, trans-9	9.9	10.4	17.7	13.7	6.7	11.3
Linoleic acid C18:2	-	3.5	2.1	-	-	0.6
Linolenic acid C18:3	-	-	-	-	-	1.0
Arachidic acid C20:0	-	-	-	2.9	-	0.8
Eicosenoic acid C20:0	-	-	-	-	-	-
cis-11, 14, 17-Eicosatrienoic acid C20:3	-	3.6	1.4	-	-	3.9
Heneicosanoic acid C21:0	-	-	-	-	-	-
EPA C20:5	-	-	0.4	4.3	-	2.1
Tricosanoic acid C23:0	-	-	-	-	-	-
Lignoceric acid C24:0	-	-	-	-	-	-
DHA C22:6n3	-	3.6	-	-	5.5	0.6
Unknown	9.6	3.2	2.7	10.6	36.2	6.5

-, not detected

- (주)하농은 효모, 고초균, 유산균, 아미노산, 각종효소, 유기산 등 대사산물을 다량 함유하는 고농축 복합 생균제인 ‘부러운팜’ 제품을 개발함. ‘부러운 팜’ 제품은 *Bacillus licheniformis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus plantarum* 각 10^8 cfu/g 이상을 포함하며, 축우에 이 제품을 급여(성우는 100g/head/day, 송아지는 50g/head/day)하였을 때, 사료섭취량 및 증체량이 증가하였고 유익한 장내 균총의 변화 효과가 나타남 93).

○ 효모를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국외 기술 수준)

- 연어의 경우 *S. cerevisiae*, *C. utilis* 및 *K. marxianus*와 같은 효모 식이에 관한 연구가 진행되었음. 순수 어분 식단과 비교하여 어분 대체물로서 분무건조한 효모를 일정량 포함한 식단을 매일 5시간동

92) 김무찬 외. (2006) 물벼룩(Moina macrocopa)배양을 위한 해양효모의 유효성에 대한 안전 동위원소의 증거

93) <https://hanong.imweb.me/>

안 89일간 제공한 결과, *S. cerevisiae*는 다소 단백질이 부족한 반면 *C. utilis*와 *K. marxianus*는 연어의 성장 성능이나 영양소 보유에 큰 영향을 주지 않고 연어의 식단에서 어분의 조단백질의 최대 40%를 대체할 수 있는 것으로 밝혀짐 94).

〈효모 식이에 따른 연어 성장능력과 배설물 건조물〉

	FM diet	CU diet	KM diet	SC diet	P-value
Start weight, g ¹	27.8 ± 0.2	27.7 ± 0.0	27.7 ± 0.0	27.6 ± 0.1	0.38
Final weight, g	92.4 ± 2.8 ^a	88.6 ± 1.1 ^{ab}	81.3 ± 3.1 ^b	78.8 ± 2.1 ^b	0.01
Specific growth rate, %	1.36 ± 0.03 ^a	1.32 ± 0.01 ^{ab}	1.22 ± 0.04 ^{ab}	1.19 ± 0.03 ^b	0.01
Daily feed intake, % of BW	0.95 ± 0.02 ^a	0.91 ± 0.01 ^a	0.89 ± 0.03 ^a	1.07 ± 0.03 ^b	0.002
Feed conversion ratio	0.70 ± 0.01 ^a	0.70 ± 0.01 ^a	0.73 ± 0.00 ^a	0.90 ± 0.01 ^b	<0.001
Fecal dry matter, %	16.0 ± 0.6 ^a	12.5 ± 0.3 ^b	12.3 ± 0.4 ^b	18.3 ± 1.0 ^a	0.001

¹Average ± standard error of the mean.

^{a,b,c}Means in a row with no superscripts in common differ.

FM: fish meal, CU: *C. utilis*, KM: *K. marxianus*, SC: *S. cerevisiae*

- 초기 평균 무게가 12g인 새끼 농어들을 대상으로 현재 어류 사료의 유일한 단백질 공급원인 어분을 *S. cerevisiae*로 대체하는 실험을 진행한 결과, 최대 50% 수준까지 성장을 및 사료 섭취량에 영향을 끼치지 않고 대체가 가능했으며 30% 대체 수준에서 사료 전환율 및 단백질 효율이 크게 향상됨 95).

〈실험 사료를 먹인 농어의 성장 및 사료 효율〉

Diet:	D0	D10	D20	D30	D50	D50M
Initial weight (g)	12.0	11.9	11.9	11.9	12.0	11.9
Final weight (g)	40.7±1.0ab	42.8±0.4ab	42.9±0.8ab	45.6±0.9b	40.9±1.8ab	39.2±0.8a
Feed intake (g kg ⁻¹ day ⁻¹)	37.9±4.8	41.5±0.2	44.4±1.3	42.9±0.4	39.5±2.2	38.9±1.0
Specific growth rate (%)	1.46±0.03ab	1.52±0.01ab	1.53±0.02ab	1.60±0.02b	1.46±0.05ab	1.42±0.02a
Feed intake: weight gain	1.48±0.01a	1.35±0.01bc	1.38±0.02b	1.28±0.02c	1.42±0.0ab	1.43±0.01ab
Weight gain: protein intake	1.38±0.01a	1.52±0.02bc	1.44±0.0ab	1.61±0.03c	1.49±0.03ab	1.45±0.01ab
Protein retention (% protein intake)	20.8±0.6a	25.6±0.6bc	24.0±0.2bc	26.5±0.6c	24.7±0.8bc	22.8±0.2ab
(g kg ⁻¹ weight gain)	150.7±2.8a	168.9±2.5c	167.2±0.7bc	164.5±0.9bc	165.8±1.4bc	157.6±2.4ab
Energy retention (% energy intake)	26.0±1.9	29.8±0.9	27.1±1.6	30.7±2.3	27.6±0.4	25.8±1.2
(MJ kg ⁻¹ weight gain)	8.3±0.4	8.9±0.1	8.6±0.3	8.7±0.3	8.6±0.1	8.4±0.3

D0: 0% of dietary N from yeast, D1: 10% of dietary N from yeast, D2: 20% of dietary N from yeast, D3: 30% of dietary N from yeast, D4: 40% of dietary N from yeast, D5: 50% of dietary N from yeast, D50M: 50% of dietary N from yeast supplemented with methionine

Values are means±s.d. For each row, values followed by different letters are significantly different (P<0.05).

- 노르웨이의 바이오 정제 회사인 Borregaard와 the Norwegian University of Life Sciences (NMBU)는 가문비나무를 기질로 수입 단백질을 대체할 수 있는 고품질 사료 원료용 효모를 개발하였음. 바이오 정제 회사인 보레가르드(Borregaard)에서 추출한 가문비나무 설탕을 이용하여 효모 *Candida utilis*를 배양하였으며 대서양 연어를 대상으로 사료의 25%를 효모로 대체한 결과 대조군보다 높은 성장률을 나타냈음 96)97).

94) Øverland, Margareth, et al. "Evaluation of *Candida utilis*, *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as protein sources in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)." *Aquaculture* 402 (2013): 1-7.

95) Aires Oliva-Teles, Paula Gonçalves, Partial replacement of fishmeal by brewers yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in diets for sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles, *Aquaculture*, Volume 202, Issues 3-4, 2001, Pages 269-278.

96) Sahlmann, Christian, et al. "Yeast as a protein source during smoltification of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), enhances performance and modulates health." *Aquaculture* 513 (2019): 734396.

97) <https://www.borregaard.com/company/news-archive/growing-yeast-to-animal-feed-from-trees/>

〈어류 사료 또는 효모 기반 식단에 대한 평균 초기 및 최종 어류 중량〉

Fresh water	Control	Yeast
Initial fish weight (g)	80	85
Final fish weight (g)	105	115
Weight gain (g)	25	30
RWG (%)	31	35

Calculated weight gain is presented as mean weight gain per fish and relative weight gain (RWG) is presented in percentage terms.

- USDA/ARS Catfish Genetics Research Unit에서 효모유래단백질 0, 25, 50, 75, 100, 125 g/kg이 첨가된 사료를 메기에게 공급한 후 체중 증가, 식품 전환 비율, 신체 구성 및 생존율을 비교하는 실험을 진행한 결과 100 g/kg까지 메기 성장에 유의적인 차이가 없는 것을 확인함. 이를 통해 효모 유래 단백질이 메기 사료에서 부분적으로 단백질 대체가 가능하며 지속가능한 단백질 대체원임을 확인함 98).
- Norwegian University of Life Sciences 연구팀이 효모 *Candida utilis*를 목질계 바이오매스를 기질로 하여 배양한 후 새끼 돼지 사료에 첨가하였을 때 조단백질의 40%까지 효모 단백질로 대체 가능한 것을 확인하였음. 또한 효모 단백질의 첨가에 따라 소화기능이 향상되며 성장 속도가 유지되는 것을 확인하였음 99).

○ 효모를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (관련 국외 특허)

- Microbial-based process for high-quality protein concentrate (국제공개번호 WO 2013/082574) 특허에서는 호기성 배양을 통한 식물계 셀룰로오스를 생체 이용 단백질로 전환함으로써 고품질 단백질 농축물 (HQPC)를 제조하기 위한 미생물 기반의 공정을 개발함. 본 연구에는 흑효모 균주인 *Aureobasidium pullulans*를 이용하였고 고품질 단백질 농축물을 제조하여 어분 대체물로서 용도를 제공함.

○ 효모를 이용한 지방 대체 소재 생산 (국내 기술 수준)

- 해외에서는 미생물 유래 유지 생산 기술 개발을 통해 제품개발까지 성공한 사례가 나타나고 있으며, 적극적인 투자가 이루어지고 있으나 국내에서는 아직 미생물 유래 유지 생산 기술 개발 단계에 있으며, 제품화된 사례는 없음
- 서울대, 우석대 연구진이 단세포유지 생산 미생물 선별, 지방질 생합성 및 축적 메커니즘 연구를 통한 단세포유지의 생산성 향상 및 식품산업에서의 상업적 대량 생산 가능성 제시함 100).
- 두산, 풀무원, 우석대학교 연구진이 주로 동물성 자원에서 생성되는 아라키돈산을 토양미생물을 활용하여 생산할 수 있는 대량생산 기술개발 및 연구 중 101).

98) Peterson, B. C., N. J. Booth, and B. B. Manning. "Replacement of fish meal in juvenile channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diets using a yeast-derived protein source: the effects on weight gain, food conversion ratio, body composition and survival of catfish challenged with *Edwardsiella ictaluri*." *Aquaculture Nutrition* 18.2 (2012): 132-137.

99) Cruz, Ana, et al. "Candida utilis yeast as a protein source for weaned piglets: Effects on growth performance and digestive function." *Livestock Science* 226 (2019): 31-39.

100) 김용노, 윤석후, 한국식품과학회지, 미생물에 의한 단세포유지의 생산과 이용, 2015

101) 김선기, 한국식품과학회지, 추출방법이 모르티에렐라(*Mortierella*)속 유래 단세포유지 지방질과 아라키돈산 추출수율에 미치는 영향, 2015

함량 높아 *Y. lipolytica*를 이용한 사료대체제 개발에 대한 연구들이 활발히 진행 중임 108).

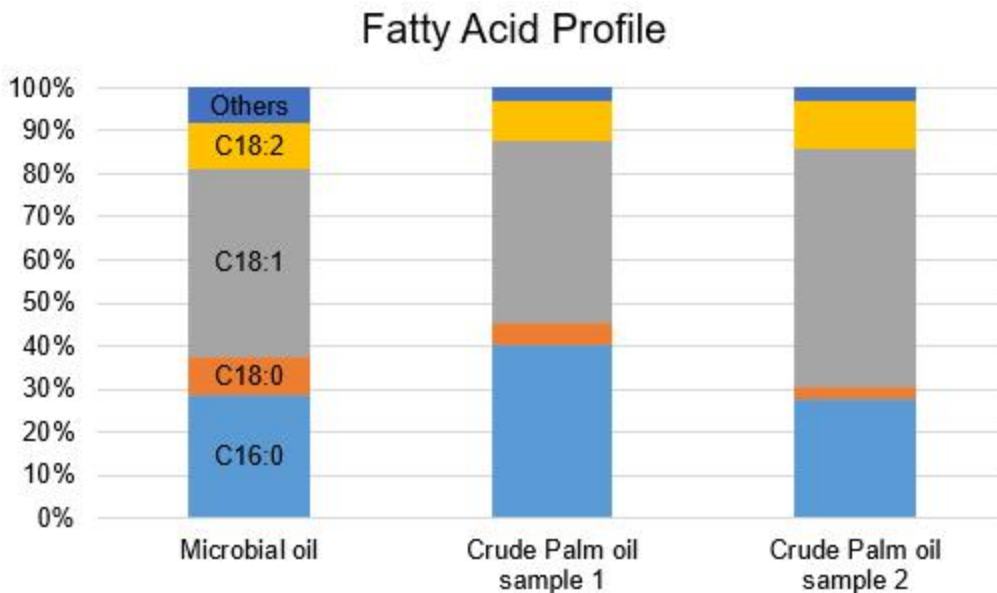
- *Y. lipolytica*를 식이 보충제로한 연구들이 새끼 돼지, 칠면조 암탉 및 송아지들을 대상으로 최근 몇 년 동안 수행됨. 새끼 돼지를 대상으로 39일과 56일 동안 3% 농도의 *Y. lipolytica*를 섭취시켰을 때 체중이 증가함. 송아지를 대상으로 한 연구에서는 매일 30g의 *Y. lipolytica* 바이오매스를 급여하였을 때 체중과 몸 길이가 개선됨 109).
- 북극 곤들매기 사료에서 식물성 기름을 *R. toruloides* 효모 바이오매스로 대체한 결과 근육과 간 조직의 지방 함량에 차이가 없었으며 최종 무게, 최종 길이 및 특정 성장 인자에서 특별한 차이 없이 동안 비슷한 성장을 보였음. 따라서 유지성 효모인 *R. toruloides*를 이용해 식물성 기름 대체가 가능해보이나 어류 사료에 *R. toruloides*를 광범위하게 사용하기 위해서는 추가 연구가 필요함 110).

○ 효모를 이용한 지방 대체 소재 생산 (관련 국내 특허)

- 효모 유래 지질을 이용한 대체 사료 개발 연구는 미흡하나, 재조합 기술을 이용한 효모의 지질 생산에 대한 개발과 식품 분야에서 팜유 대체를 위한 효모 지질의 개발이 지속되고 있음.
- 지방산 함량 개선을 위한 형질전환 효모 및 그의 제조방법(공개특허 10-214-0052156) 특허에서는 *Saccharomyces cerevisiae*에 지방산 생합성 경로의 신장단계를 과발현하여 지방산 자체의 함량을 증진하여 지방산 생합성의 효과적인 생산 방법을 개발함.

○ 효모를 이용한 지방 대체 소재 생산 (관련 국외 특허)

- 효모는 지방산, 스테롤, 세라마이드, 그리고 인지질과 같은 지질화합물의 합성에 주로 사용 되었으며, 특히 *Saccharomyces cerevisiae*는 지질 생합성 경로의 많은 유사성 때문에 각광받는 지질화합물의 생산원임 111). 유지 생산 능력이 뛰어난 유지성 효모(*Lipomyces*, *Mortierella* 등)를 이용하여 효모 유래 지질의 생산이 가능할 것으로 보여짐.



〈*Rhodotoridium toruloides*에서 분리한 오일의 지방산 프로파일〉

108) Neuls, Luciane, et al. "Immunomodulatory effects of *Yarrowia lipolytica* as a food additive in the diet of Nile tilapia." *Fish & Shellfish Immunology* 119 (2021): 272-279.

109) Czech, Anna, et al. "Nutritional value of *Yarrowia lipolytica* yeast and its effect on growth performance indicators in piglets." *Annals of Animal Science* 16.4 (2016): 1091-1100.

110) Brunel, Mathilde, et al. "Oleaginous yeast *Rhodotorula toruloides* biomass effect on the metabolism of Arctic char (*Salvelinus alpinus*)." *Frontiers in Molecular Biosciences* 9 (2022): 931946.

111) 김태한. *Saccharomyces cerevisiae* 효모를 이용한 지질 화합물의 생산

- 효모 유래 지질을 이용한 대체 사료 개발 연구는 미흡하나, 재조합 기술을 이용한 효모의 지질 생산에 대한 개발과 식품 분야에서 팜유 대체를 위한 효모 지질의 개발이 지속되고 있음.
- Microbially produced palm oil substitutes (국제공개번호 WO 2021/163194) 특허에서는 유지성 효모인 *Rhodotoridium toruloides*에서 분리한 오일의 지방산 프로파일을 제공하여 식물 유래 팜 오일의 대안의 가능성을 제시함.
- Method of increasing lipid accumulation in *Metschnikowia pulcherrima* cells(국제공개번호 WO 2014/12439) 특허는 유지성 효모에서 오일은 얻는 방법에 대한 개발이며, *pulcherrima*의 포자 형성을 차단하여 오일을 축적하도록 유발하고 높은 세포 밀도로 오일이 풍부한 세포를 형성하는 방법을 개발함.
- Production of polyunsaturated fatty acids in oleaginous yeasts (국제공개번호 WO 2004/101757) 특허에서는 *Yarrowia lipolytica*에 이종의 $\omega-6$ 및/또는 $\omega-3$ 생합성 경로를 도입하여 PUFAs (polyunsaturated fatty acids)를 생성함.
- 효모 균주로부터 바이오디젤을 생산하는 방법 (공개번호 10-2013-0001209)에서는 피치아 (*Pichia*) 속의 새로운 효모 분리물로부터의 오일 및 바이오디젤을 추출 및 생산하였음.

가축용 핵심 대체사료원료를 위한 “미세조류 단백질/지방 대체 소재” 고도화 전략

- 미세조류는 약 30-80%의 단백질을 가지고 있어 기존의 동물성 단백질을 대체할 수 있는 물질로 주목받고 있음.
- *Chlorella vulgaris*는 50% 정도, *Spirulina platensis*는 전체 구성 중 60~70%가량이 단백질로 구성되어 있음. 이는 전통적인 식물성 단백질인 콩(37%)이나 동물성 단백질인 우유(36%), 어류(24%), 닭(24%), 소(42%) 보다 높은 함량임 112). 또한 미세조류의 아미노산 구성은 WHO/FAO에서 정의한 균형 잡힌 단백질 기준에도 부합함.
- 일반적으로 미세조류 평균 생산 속도는 20~22g dry weight/m²/day이며, 성장 최적조건 하에서는 30g dry weight/m²/day에 달함.
- 미세조류는 빛에 대한 요구도가 일반 고등식물 보다 낮으며, 제초제나 살충제 없이 일년 내내 생산가능한 장점이 있음. 또한 지구 내 담수가 해수에 비해 부족한 상황에서, 미세조류는 염수에 대한 저항성을 가짐.
- 미세조류 배양 시에 일반 농업에 사용되는 무기비료가 사용되는데, 절반 이상의 비료가 지하수로 빠져나가 악영향을 미치는 농업과 달리, 광생물반응기에서 배양되는 미세조류는 비료를 오염이나 낭비 없이 100% 활용 가능함.
- 이산화탄소 흡수량 측면에서 미세조류의 흡수량은 연간 50 t/ha~600 t/ha로, 일반 고등식물의 7배~100배에 달하는 양으로, 이로부터 탄소세 절감 효과와 교토의정서에 의한 이산화탄소 배출 규제로부터 안전성을 가질 수 있음 113).
- 광합성 효율(photosynthetic efficiency, PE)의 경우 일반 녹색 식물의 최대 이론적 PE는 13%인데 반해, 간단한 구조를 가지는 미세조류 PE 값은 실질적으로 더 높은 것으로 나타났음. 또한 육상 식물 중 빠르게 번식하는 스위치 그래스(*Panicum virgatum*)는 태양에너지를 바이오매스 연료로 바꾸는 효율이 1W/m²인 반면, 미세조류는 50배 이상의 효율을 가짐. 따라서 미세조류는 기존의 농업보다 잠재적으로 비용 효율성이 높은 자원 중 하나로 인정받고 있음.
- 글로벌 시장조사업체인 Industry research의 '미세조류 시장보고서'에 따르면 2020년 글로벌 미세조류 시장은 2020년 약 35억 달러였으며, 연평균 3%가량의 성장률을 보이며 2031년에는 약 42억 달러 규모에 이를 것으로 전망함 114).
- FAO의 미세조류 생산 보고서에 따르면, 전세계 조류 생산량은 1950년 보다 60배 이상 증가하여

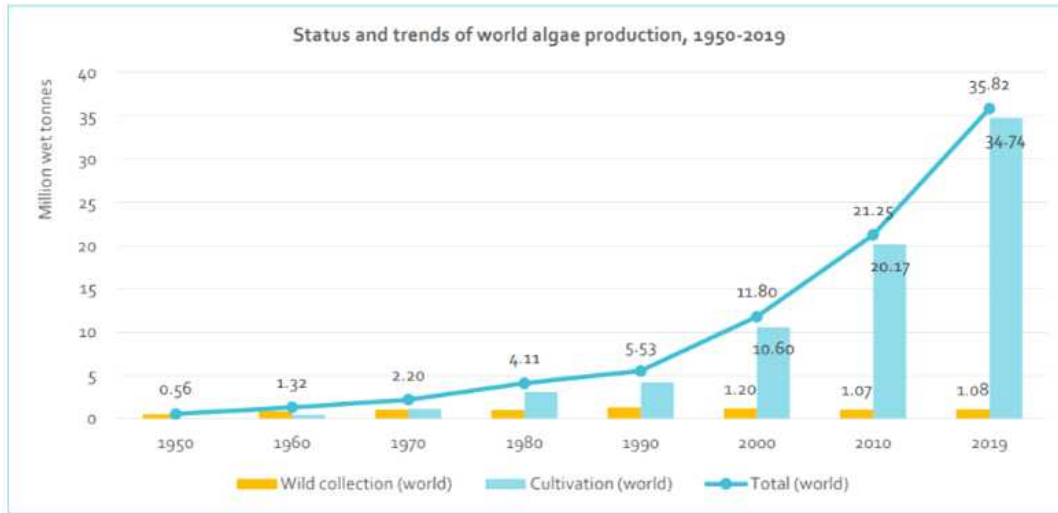
112) Geada, P., Moreira, C., Silva, M., Nunes, R., Madureira, L., Rocha, C. M., ... & Teixeira, J. A. (2021). Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties. *Bioresource Technology*, 332, 125125.

113) 해양미세조류 이용 바이오디젤 생산기술개발 최종보고서, 해양수산부, 2019.10.31

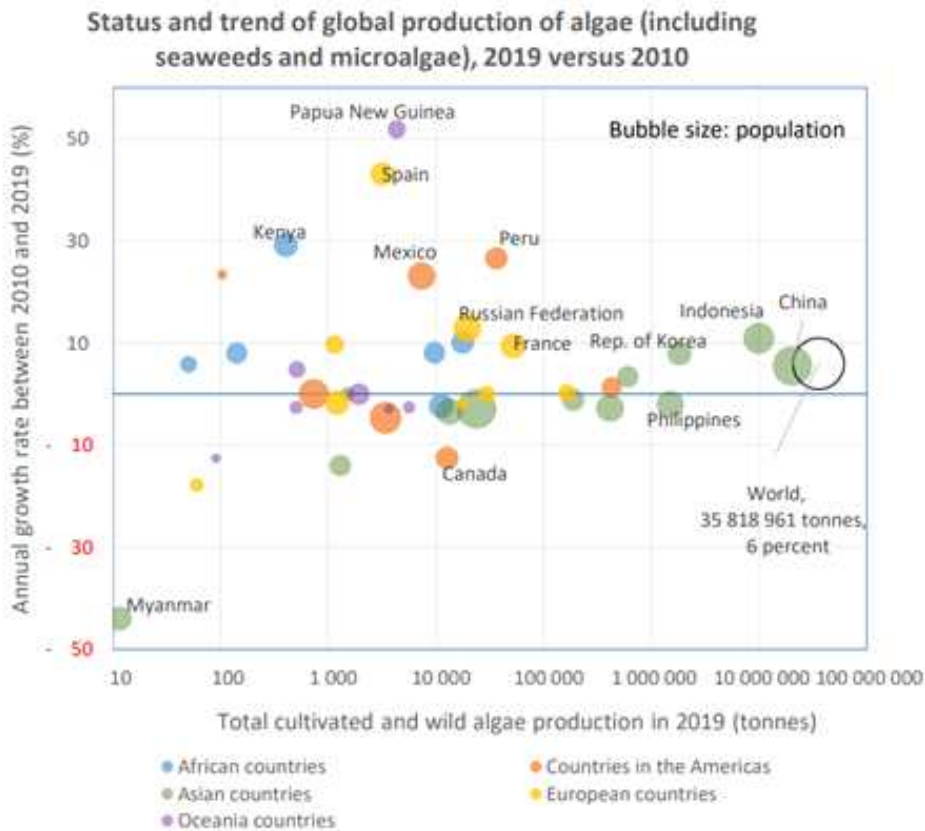
114) Microalgae-based Products Market, Global Industry Report, 2031, November 2018, 438 pages. (transparencymarketresearch.com).

2019년 3,582만 톤에 달함 115). 가장 우세한 생산량을 차지하는 대륙권은 아시아권(전체 97%)으로, 그 중에서도 중국(전체 56%)이 압도적임.

- 한국의 경우 삼면이 바다인 지리적 장점과 국내 연구기관, 학교 및 기업의 활발한 연구로 인해 높은 생산량 순위(전체 5.09%)를 가지고 있으며, 국내의 *Chlorella* sp. 및 *Spirulina* sp. 등을 활용한 미세조류 기반 제품 시장규모는 2010년 기준 클로렐라 제품 수출액이 약 19만 달러에서 2020년 65만 달러까지 연평균 12% 성장률을 보이며 증가하였음.



<전세계 미세조류 생산량 (1950-2019년) 116>



<국가별 미세조류 생산량 및 연간성장률 (2019년) 117>

116) Global seaweeds and microalgae production(1950-2019), FAO, June 2021

117) Global seaweeds and microalgae production(1950-2019), FAO, June 2021

<기존 단백질 공급원과 미세조류의 지리적 측면 생산성 비교>

Feedstock	Yield (t/hectare)	Reference
Corn	9.4	[66]
Soybean	2.7	[67]
Wheat	5.7	[68]
<i>Nannochloropsis</i> sp. ϕ	80.3	[69]
<i>Nitzschia</i> sp. ϕ	78.8	[70]
<i>Isochrysis galbana</i> ϕ	86.1	[71]
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> ϕ	63.7	[72]

○ 미세조류를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (국외 기술 수준)

- 1 kg의 고기를 생산하기 위해, 소나 양은 8kg의 사료가 필요하고, 돼지와 닭은 4~16 kg의 사료가 요구됨. 따라서 늘어나는 수요에 대비하기 위한 새로운 원료 공급원이 필요하며, 그 중 미세조류는 높은 함량의 단백질뿐만 아니라, 가축의 성장에 중요한 지방산(오메가-3, 오메가-6, EPA, DHA)의 함량도 높은 급원임 118).
- 현재 사료의 일부를 미세조류로 대체하는 연구 결과, 다양한 종류의 가축(반추동물, 돼지, 가금류)에게 급여하였을 때 육질과 지방산 조성이 개선되었고, 기호성이 떨어지지 않으며 도축 시 수율 변화에도 악영향이 없는 것으로 밝혀지고 있음 119).

<가축 사료 대체 원료로 첨가된 미세조류 관련 연구 120>

급여동물	미세조류종류	첨가량	효과
송아지	<i>S. limacinum</i>	15 g/kg ~ 30 g/kg (가축무게대비)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 높은 오메가-3 함량 ■ 경미한 해조류 향미
젖소	<i>A. platensis</i>	사료내 콩단백질대체	<ul style="list-style-type: none"> ■ 도축률 변화 없이 높은 오메가-3 및 오메가-6 함량
염소	<i>C. vulgaris</i>	5~10 g/day	<ul style="list-style-type: none"> ■ 우유생산량 증가 및 우유 내 lactose 함량 증가
어린양	<i>Schizochytrium</i> <i>sp.</i>	사료대비 2%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 다가불포화지방산함량 증가 ■ 특히 오메가-3 함량 증가 두드러짐
산란계	<i>Porphyridium</i> <i>sp.</i>	사료대비 5-10%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 계란내 높은 다가불포화지방산 함량 ■ 계란의 노란 어두운색으로 변화
가금류	<i>A. plantensis</i>	사료대비 14-17%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 가축 무게 증가 및 색깔 짙어짐
가금류	<i>Staurosira</i> <i>sp.</i>	사료대비 7.5-10%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 사료제형형성 어려움 및 아미노산 추가 급여가 필요
가금류	<i>Desmodesmus</i> <i>sp.</i>	사료대비 15%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 가축성장에 도움
토끼	<i>A. plantensis</i>	사료대비 5-15%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 일반사료와 비교하여 체중차이 없었음
어류	<i>Entomoneis</i> <i>spp.</i>	사료대비 2.5%-5%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 다가불포화지방산함량 증가
어린돼지	<i>Desmodesmus</i> <i>sp.</i>	사료대비 10%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 일반사료와 비교하여 차이 없었음
어린돼지	<i>A. plantensis</i> <i>C. vulgaris</i>	항생제대체 1% 급여	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>C. vulgaris</i> 섭취로 설사 발생률 감소 ■ 용모 높이 증가 및 소화율 증가

118) Dineshbabu, G., Goswami, G., Kumar, R., Sinha, A., & Das, D. (2019). Microalgae-nutritious, sustainable aqua-and animal feed source. *Journal of Functional Foods*, 62, 103545.

119) Madeira, M. S., Cardoso, C., Lopes, P. A., Coelho, D., Afonso, C., Bandarra, N. M., & Prates, J. A. (2017). Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: A review. *Livestock Science*, 205, 111-121.

120) Amorim, M. L., Soares, J., Coimbra, J. S. D. R., Leite, M. D. O., Albino, L. F. T., & Martins, M. A. (2021). Microalgae proteins: Production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(12), 1976-2002.

○ 미세조류를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (관련 국내 특허)

- 미세조류 내에서 지질과 색소, 단백질 추출과 동물 영양 및 사료 분야에 응용 관련 특허 수는 중국이 가장 강세를 보였으며, 특히 단백질 추출과 가축 사료 분야에서 가장 두각을 나타냈음. 미세조류를 활용하는 특허의 경우 중국-미국-일본-한국의 순으로 특허수가 많은 경향이 있음.
- 특허번호 1020170012860에서는 탈지 미세조류로부터 단백질을 추출하여 단백질 고함량 사료 조성물을 제조하는 특허를 등록하였음.
- 특허번호 1020110048092에서는 미세조류에 초음파 처리를 하여 단백질 수율이 증가한 단백질 가수분해물 제조 방법에 대한 특허를 등록하였음.
- 특허번호 1020140013050에서는 미세조류에 초음파 처리를 하여 단백질 수율이 증가한 단백질 가수분해물 제조 방법에 대한 특허를 등록하였음.

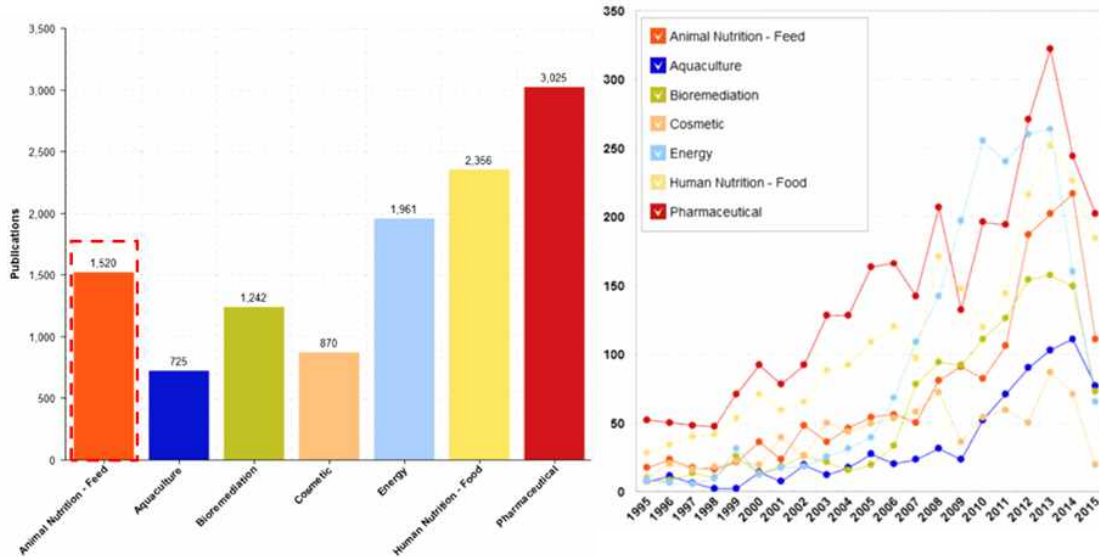
	CHINA	UNITED STATES	JAPAN	KOREA	FRANCE	GERMANY	RUSSIAN FEDERATION	INDIA	TAIWAN	SPAIN	UNITED KINGDOM
Process: Bioengineering	581	413	58	59	14	25	10	8	8	2	14
Process: Conversion	236	170	38	40	14	19	17	1	6	10	2
Process: Extraction	1168	220	166	185	50	18	27	25	31	26	14
Process: Growing technologies	750	212	34	106	29	33	8	20	16	22	11
Process: Harvesting Dewatering	1468	312	96	134	57	25	12	23	20	27	15
Products: Fuels	808	517	162	188	47	44	32	16	22	27	20
Products: Lipids	535	334	72	99	54	25	3	24	10	10	13
Products: Other products	76	13	10	12	4	2	6	0	1	0	0
Products: Pigments	820	315	216	160	53	28	21	44	20	23	10
Products: Polysaccharides	518	167	98	36	62	27	3	9	13	6	8
Products: Proteins	1058	245	94	80	42	27	10	9	15	6	9
Application: Cosmetic	232	115	132	90	110	36	14	3	6	13	9
Application: Animal Nutrition - Feed	907	157	128	97	26	28	31	9	13	12	13
Application: Aquaculture	538	81	11	23	9	5	4	3	6	5	4
Application: Bioremediation	712	163	97	71	19	25	24	4	15	19	6
Application: Energy	757	511	140	182	42	38	28	21	19	27	21
Application: Human Nutrition - Food	1180	289	315	207	69	37	15	24	19	16	7
Application: Pharmaceutical	1358	474	330	181	106	57	47	36	39	16	24

<공정, 상품, 응용 분야별 국가별 미세조류 관련 특허 수 (2020년 기준) 121>

○ 미세조류를 이용한 단백질 대체 소재 생산 (관련 국외 특허)

- 미세조류의 가축 사료 분야 적용에 관한 출원은 지난 5년간 꾸준히 수가 증가하고 있으며, 2020년 기준 해당 분야의 특허 수는 1,520건임. 가축사료 분야 내에서도 타깃으로 하는 물질에 대해서 변화가 있는데, 이전의 출원 목적은 carotenoid와 같은 색소성분을 주 타깃으로 하여 계란, 우유의 품질을 향상시키거나 동물 성장을 촉진하는 것이었으나, 최근에는 단백질 성분 적용 관련 특허가 증가하고 있음.
- 특허번호 (PCT/US2011/031412)에서 미세조류로부터 알부민, 글루테린, 프롤라민 선택적 추출 방법 제시
- 특허번호 (PCT/EP2012/000472)에서 단백질 함량이 높은 *Spirulina*로부터 phycocyanin을 추출 방법 제시
- 특허번호 (13540205)에서 양성/소수성 용매를 이용하여 미세조류로부터 단백질 추출 방법 제시
- 특허번호 (17802560)에서 미세조류의 유전자재조합을 통해 단백질, 폴리펩타이드 등을 생산하는 방법 제시
- 특허번호 (201510362122)에서 미세조류내 단백질을 효과적으로 추출하기 위한 세포벽 파괴 방법 제시

121) 특허정보검색서비스(KIPRIS) 홈페이지에서 '미세조류*단백질*추출', '미세조류*지방*추출'로 검색 (2023년 7월 기준)



〈연도별 미세조류 응용과 관련된 분야별 전세계 출원수 122〉

○ 미세조류를 이용한 지방 대체 소재 생산 (국내 기술 수준)

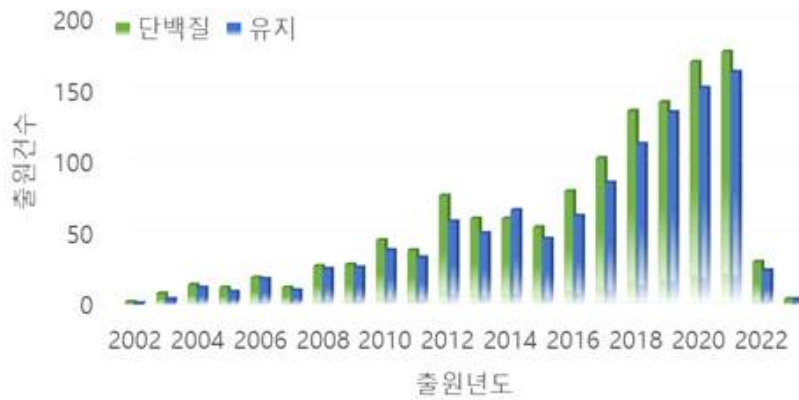
- 국내 미세조류 연구는 바이오매스로써 바이오연료 생산에 대한 연구가 많으며, 그 외 미세조류를 대량으로 배양하고 수확하는 기술, 유용성분(오일, 색소, 기능성 성분)을 추출하여 화장품 및 건강기능성 식품으로 적용 기술, 수질개선이나 해양생물 성장을 위한 촉진제로써 연구되고 있음.
- 파이코일바이오텍코리아(주)에서 PSP 배양기술 기반 울릉도 근해 채집 자연종 미세조류 종(PB75)을 이용한 EPA함유 오메가-3 지방산 생산 사업화 기술개발중이며 배양기술을 활용한 미세조류 유래 폴리사카라이드 생산사업화 기술 개발 중
- 극지연구소에서 극지 미세조류 유래 천연 세포보호 물질의 안정적 대량 확보 및 효능 분석중
- 한국생명공학연구원에서 미세조류 유래 다중 불포화 지방산(PUFA) 생산 공정 구축 및 해양미세조류 유래 오일 기반 기능성 화장품 소재 산업화 진행 중. 또한 해양 미세조류의 배양 공정, 오일 대량생산 연구 및 원료 표준화 작업 중
- 무진기공(주)에서 물리적인 방법을 활용한 미세조류 오일 추출 기술 개발 중

○ 미세조류를 이용한 지방 대체 소재 생산 (관련 국내 특허)

- 미세조류로부터 단백질 및 지질을 추출하는 기술과 적용에 관한 출원 동향을 살펴보았을 때, 2012년 이후부터 활발하게 출원이 되고 있으며, 그 이후로 꾸준히 증가하여 2020년 한 해 단백질 추출 관련 169건, 지질 추출 관련 151건이 출원됨¹²³⁾. (2022년 출원의 경수 공개 기한이 지나지 않아 누락될 수 있음).
- 특허번호 (1020160072753)에서 고온 및 고압 조건, 에탄올 및 에틸아세테이트 용매를 활용하여 미세조류 내 지질 추출하는 방법 제시
- 특허번호 (1020140152791)에서 양이온 계면활성제-자성 나노입자 복합체를 활용하여 미세조류 수확 및 지질 추출 방법 제시
- 특허번호 (1020160073179)에서 마이크로웨이브를 이용하여 미세조류로부터 지질을 추출하는 방법 제시
- 특허번호 (1020130164891)에서 투명광생물반응기로 미세조류내 지질 및 환원당 함량 증진 방법 제시

122) Patent Landscape Report: Microalgae-Related Technologies, WIPO(World Intellectual Property Organization), 2016 (www.wipo.int)

123) 특허정보검색서비스(KIPRIS) 홈페이지에서 '미세조류*단백질*추출', '미세조류*지방*추출'로 검색 (2023년 7월 기준)



〈국내 미세조류 단백질 및 지질 추출 관련 연도별 출원 동향 (2002-2022)〉

○ 미세조류를 이용한 지방 대체 소재 생산 (관련 국외 특허)

- 특허번호 (201110123014)에서 미세조류 배양액에 특별성분 추가방법을 제시함으로써 단백질 및 지방 함량 62% 증가하는 방법 제시
- 특허번호 (201410649618)에서 미세조류 대규모 배양시 호르몬을 첨가하여 미세조류내 지방이 빨리 축적되게 하는 방법 제시

산업동물 및 반려동물 핵심 사료원료 대체를 위한 고도화 전략

[단위동물]

○ 양돈산업 시장 동향

- 국내 양돈생산비의 절반 이상이 사료비로 구성되며, 원료사료의 90% 이상은 수입되고 있어 국내 축산업 경쟁력에 큰 걸림돌이 되고 있음.
- 낮은 자급률은 국제 곡물 가격 및 국제 정세에 따라 큰 영향을 받기 때문에 배합사료의 가격적 안정성이 떨어짐.
- 국내의 사료용을 포함한 곡물 자급률은 2017년 23.4%, 2018년 21.8%, 2019년 21.0%로 해마다 감소하고 있으며 자급률을 높이기 위한 정책이 시행되고 있으나 아직 미비함.
- 국내 주요 곡물인 옥수수, 밀 및 대두의 자급률은 각각 0.7%, 0.5%, 7.5%로 굉장히 낮은 상태임.
- 주요 단백질원으로 사용되는 대두박의 가격은 수입대두 및 수입대두박의 가격뿐 아니라 잡박의 가격과 국내 대두유 판매량까지 다양한 요소가 가격에 영향을 미치며, 현재 세계적인 이상기상과 우-러 전쟁으로 인하여 가격이 급등하고 공급이 불안정함.
- 현재까지도 사료의 대부분을 차지하는 옥수수-대두박을 대체할 연구가 많은 국가에서 진행되고 있으나 확실한 효과를 나타내는 성과는 아직 나타나지 않음.
- 위에 제시된 대체 원료사료는 영양소 함량이 불안정하고 기존의 원료와 비교하여 항-영양인자 등의 문제가 명확하게 연구되지 않아 생산성 감소 및 축산물의 품질저하를 초래할 가능성도 있음.
- 따라서 낮은 곡물자급률, 불안정한 수입곡물가격 등의 문제에 직면한 농가의 부담을 줄이고 국내 축산물의 경쟁력 제고를 위한 사료 대체원료의 개발이 필요함.

○ 양돈산업 사료원료 현황 (동물성 단백질)

- 현재 가축사료에서 주로 이용되는 어분, 육골분, 혈액, 우유, 계란, 우모분 등의 단백질원은 대체적으로 동물성 식품 생산과정에서의 부산물로 이루어짐.
- 동물성 단백질원은 다양한 아미노산 뿐만 아니라 지방, 비타민 및 미네랄 등 다양한 영양소가 풍부하게 들어있어 동물의 성장과 건강에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 기호성과 소화율이 높아 대부분의 동물사료에 첨가되어 있음 (124)(125).

124) Hedegaard, C. J., Strube, M. L., Hansen, M. B., Lindved, B. K., Lihme, A., Boye, M., & Heegaard, P. M. (2016). Natural pig plasma immunoglobulins have anti-bacterial effects: potential for use as feed

- 대표적인 동물성 단백질인 어분은 2000년대 들어 가축사료 뿐 아니라 양어사료에도 사용되면서 수요가 증가하고 있지만, 어획량의 감소로 높은 단가를 유지하고 있음.
- 동물성 단백질은 다른 단백질원과 비교하였을 때, 제품의 단백질이나 아미노산 함유량의 변동이 심해 품질의 일정함에 주의를 기울여야 하며, 유통 및 보관과정에서도 변이가 발생할 수 있어 관리에 주의가 필요함.
- 세계적으로 문제가 되는 아프리카돼지열병(ASF)을 비롯한 다양한 전염성 질병발생의 매개가 될 수 있기 때문에 관리에 주의가 필요함 126).
- 총 단백질 함유량이 동물성 단백질이 높고 발효 가능한 단백질 또한 동물성 단백질에서 많으며, 동물성 단백질을 섭취 후 소화되지 못하고 하부장기로 이동시 염증이 나 설사를 일으킬 수 있으며, 분으로 배출될 경우 환경오염을 일으킬 가능성이 높은 것으로 알려짐.

○ 양돈산업 사료원료 현황 (식물성 단백질)

- 식물성 단백질원은 상대적으로 저렴한 가격과 높은 단백질 함량으로 사료단백질의 대부분을 구성하고 있음.
- 사료 내 식물성 단백질원은 대부분 대두박이며 단백질 함량이 좋고 아미노산 조성 및 이용율이 우수하며 상대적으로 합리적인 가격에 공급되지만, 국내 및 세계의 정세에 따라 가격변동이 심함.
- 대두박의 단백질함량, 조성 및 가격은 다른 단백질원의 성능을 평가하는 표준으로 사용됨.
- 단백질원료의 대체물질로 글루텐밀 (corn gluten meal), 옥수수 글루텐 피드 (corn gluten feed), 옥수수 배아 (corn germ) 등이 주로 사용됨.
- 단백질원료 대체물질에 대한 AID, SID 등과 같은 사료 가치평가연구는 미흡, 단백질원료 대체제의 영양소 함량만으로 영양적 가치를 판단할 수 없음.
- 식물성 단백질은 단백질의 구조나 항영양인자 등의 영향으로 소화율이 상대적으로 떨어지고 돼지에 있어 필수아미노산이 부족하므로 라이신이나 메티오닌 등의 추가급여가 필수적임 127).

○ 양돈산업 사료원료 현황 (곤충단백질)

- 어분, 육골분, 혈분, 가금 부산물 등의 동물성 단백질 원료의 가격 상승으로 인해 현재 이를 대체할 수 있는 곤충 단백질이 주목받고 있음 128).
- 우리나라 곤충산업의 성장 및 육성을 뒷받침 하기위한 법적 근거를 마련하기 위해 2010(곤충산업의 육성 및 지원에 관한 법률) 제정.
- 곤충을 사료로 사용할 경우 품질관리에 필요한 성분 등록사항으로 수분, 조지방, 조회분 및 조단백질이 있으며 휘발성 유기태질소 함량이 0.5%미만이어야 하며, 안정성 관련 성분으로 납, 수은 카드뮴을 검사 해야함.

○ 대체 원료로 곤충단백질 사용의 영양학 및 경제적 가치

- 단백질, 불포화지방산, 비타민, 미네랄 및 섬유질이 풍부하여 영양적 가치가 매우 높으며 대두박, 어분과 유사한 지방(30-40% DM) 및 단백질 함량(40-60% DM)으로 양돈 및 양계 사료의 단백질과 지방 공급원으로서의 가능성이 있음 129).
- 높은 소화율을 가지며 필수 아미노산을 갖추고 있어 적은 양으로도 단백질 요구량을 충족시키며 이로 인하여 암모니아와 온실 가스 배출 양이 상대적으로 적음 130).

supplement for treatment of intestinal infections in pigs. PLoS One.

125) Fischer, M., Pikalo, J., Beer, M., & Blome, S. (2021). Stability of African swine fever virus on spiked spray-dried porcine plasma. *Transboundary and Emerging Diseases*.

126) Grant, G. (1989). Anti-nutritional effects of soyabean: a review. *Progress in food & nutrition science*.

127) 남정현, 김두리, 현지용, 진희정, 최윤상, 조진호, 천지연. (2022). 사료용 곤충의 고단백질 대체원료 기술개발 현황. *한국식품영양과학회지*.

128) Jang WW, Chung TH, Choi IH. (2019). Growth performance and economic evaluation of insect feed powder-fed ducks. *J Environ Sci Int*.

129) Hong, J., Han, T., & Kim, Y. Y. (2020). Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an alternative protein source for monogastric animal: A review. *Animals*.

- 빠른 성장과 짧은 생애주기, 제약이 적은 사육환경으로 경제적 가치가 높음 131).
- 대표적으로 연구되고 있는 곤충은 거저리(*Tenebrio molitor*)와 동애등애(*Hermetia illucens*) 등이 있으며, 동애등애는 음식물쓰레기나 가축분뇨 등으로 배양할 수 있음 132).

〈국내 사료로 이용 가능한 곤충 11종〉

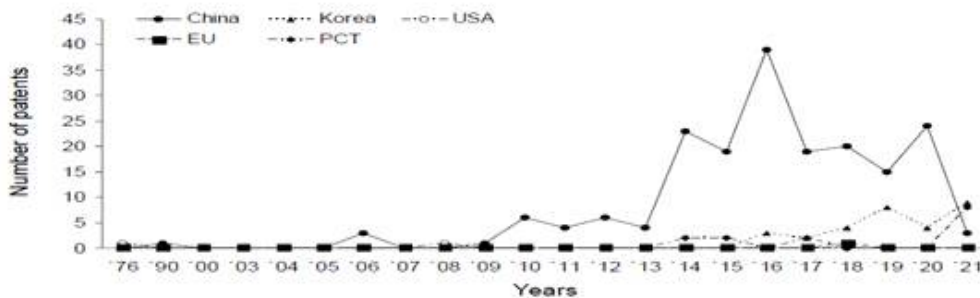
Table 1. Proximate compositions of insects allowed for feeding in Korea

	Life stage	Proximate composition (%)					References
		Protein	Lipid	Fiber	Ash	Moisture	
<i>Tenebrio molitor</i>	Larva, pupa	46~57	24~37	4~7	3~4	5~8	
<i>Zophobas atratus</i>							
<i>Zophobas morio</i>							
<i>Gryllus bimaculatus</i>	Larva, adult	58~60	14~16	6~7	6	5~7	
<i>Teleogryllus emma</i>							
<i>Oxya chinensis sinuosa</i>	Larva, adult	64~66	6~11	8~9	4~5	6~9	MAFRA, 2020
<i>Locusta migratoria</i>							
<i>Hermetia illucens</i>	Larva, pupa	40~43	28~30	7~8	9~15	7	
<i>Bombyx mori</i>	Larva, pupa	52	28	5	5	7~8	
blood worm	Larva	57	6~7	3	9	7	
<i>Musca domestica</i>	Larva, pupa	57~63	7.3~25	6~7	5.3~12	-	
White fish meal	-	69.6	7.6	-	16.0	4.6	Kim et al., 2000
Soybean meal	-	47.6	1.8	-	6.0	9.6	

- *Tenebrio molitor* larvae and *Pteticus tenebrifer* larvae를 이유자돈의 대두박과 어분의 대체 단백질 원료로 한 연구가 진행되었으며 육성돈에 있어서도 이를 급이 하여 회장의 소화율을 측정하는 연구가 진행되었음 133).

○ 국내외 곤충시장과 특허출원

- 국내 곤충시장 134): 곤충 유래 사료는 반려동물, 양돈, 양계 양어용으로 다양하게 이용되고 있으며 국내에서는 (주)리얼네이처팜, (주)씨아이에프 등의 기업에서 반려동물, 양돈 양계, 양어 사료를 생산하고 있음. 국내 곤충 관련 산업의 경우 해외보다 성장이 미약하지만 지속적인 성장이 가능할 것으로 보임.
- 국외 곤충시장: 유럽과 북미 등에서 사료용 곤충과 관련된 기업의 투자가 지속적으로 증가하고 있음. 주요 기업으로는 프랑스 인섹트(Ynsect), 영국 인섹트 테크놀로지 그룹, 네덜란드 프로틱스가 있음.
- 사료용 곤충 제조기술과 관련된 특허 조사결과 중국 189건, 한국 30건, PCT 12건, 미국 2건, 유럽 1건, 일본 0건 순으로 나타남.



〈특허출원 동향〉

130) Fischer, M., Pikalo, J., Beer, M., & Blome, S. (2021). Stability of African swine fever virus on spiked spray-dried porcine plasma. *Transboundary and Emerging Diseases*.

131) Yu, M., Li, Z., Chen, W., Rong, T., Wang, G., Li, J., & Ma, X. (2019). Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: Effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs. *Meat Science*, 158, 107837.

132) DASSEY, Adam J.; THEEGALA, Chandra S. Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications. *Bioresource technology*, 2013, 128: 241-245.

133) Yu, M., Li, Z., Chen, W., Rong, T., Wang, G., Li, J., & Ma, X. (2019). Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: Effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs. *Meat Science*, 158, 107837.

134) Jang WW, Chung TH, Choi IH. (2019). Growth performance and economic evaluation of insect feed powder-fed ducks. *J Environ Sci Int*.

〈국내에서 판매하는 곤충〉

Table 2. List of insect feed sold in Korea

Type	Product image	Product name	Insect	Manufacturer
Swine				
Poultry		Multi-worm	<i>Hermetia illucens</i>	C.I.E.F
Fishery				
		KOHEN ROSH 13	<i>Hermetia illucens</i>	Real nature farm
		Pet Guard Boyangdaecheop Harmony Insect Mealworm	<i>Tenebrio molitor</i>	Woosung Feed
Pet		INSECTUP hypo-allergenic	<i>Hermetia illucens</i>	FitPet
		LAPOG Real Insect	<i>Hermetia illucens</i>	ATbio
		WELLSOME	<i>Hermetia illucens</i>	OSP

○ 곤충 단백질의 단점 및 향후 방향

- 곤충의 영양학적 가치는 입증되었지만, 곤충산업이 지속해서 큰 성장을 하기 위해선 선결과제를 해결해야함.
- 시설투자비 및 운영비 부족, 사육 및 질병관리 기술부족, 수요예측이 어려워 전체 생산량을 결정하지 못한다는 점이 있음.
- 항생제 내성이나 병원균, 곰팡이독소 및 중금속 오염에 대한 안정성 문제도 있음 (135)(136).
- 대량의 곤충을 안정적으로 공급하고 생산효율을 향상시켜 시장가격을 낮추기 위해 대규모 생산체제 구축 (137).
- 곤충을 단백질 대체 원료로 안정적인 대량 생산을 위한 가공, 저장 등의 표준적인 과정 확립.
- 단위동물의 곤충사료 제품의 영양적, 기능적 가치를 규명하기 위한 추가 연구가 필요.

○ 양돈산업 사료원료 현황 (미세조류)

- 주로 *Bacillariophyceae* (eukaryotic diatom), *Clorophyseae* (green algae), *Cyanophyceae* (blue green algae), *Chrysophyceae* (golden algae) 사용중.

○ 대체 원료로 미세조류 사용의 영양학 및 경제적 가치

135) Van Broekhoven, S., Gutierrez, J. M., De Rijk, T. C., De Nijs, W. C. M., & Van Loon, J. J. A. (2017). Degradation and excretion of the Fusarium toxin deoxynivalenol by an edible insect, the Yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *World Mycotoxin Journal*, 10(2), 163-169.

136) Spínola, Maria P., Mónica M. Costa, and José AM Prates. (2022). Digestive constraints of *Arthrospira platensis* in poultry and swine feeding. *Foods*. 2984.

137) Yu, M., Li, Z., Chen, W., Rong, T., Wang, G., Li, J., & Ma, X. (2019). Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: Effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs. *Meat Science*, 158, 107837.

- 생육환경 조건이 비교적 용이하며 식량문제와 경쟁관계가 없고 물, 햇빛, 이산화탄소만으로도 빠르게 자라며 대량 증식이 가능해 높은 생산성을 가짐 138).
- 가축의 영양소 요구량을 충족하고 고농도의 단백질, 탄수화물, 지방을 함유하고 있으며 비타민 및 미네랄도 공급됨 139).
- 해양 미세조류는 다량의 EPA 및 DHA와 n-3 지방산을 안정화하기 위해 자연적으로 발생하는 많은 카로티노이드(carotenoid)를 포함. 카로티노이드(베타카로틴 또는 아스타잔틴)는 식물성 플랑크톤, 조류 및 식물 내에서 주로 생산되는 지용성 색소로 육류의 색상 구현을 위한 항산화색소로 활용 가능함 140).
- 단위동물 기준 사료와 비교하여 조단백질(CP) 함량은 건조물질의 최대 71%이며 약 14-38.2%의 CP 함량을 가짐. 이는 옥수수 CP의 약 4.5배 수준에 달함 141).
- 가축 사료에 주요 쓰이는 종으로 *Schizochytrium* sp., *Chlorella* sp., *Arthrospira* sp., *Isochrysis* sp. 와 *Porphyridium* sp.가 있으며, *Arthrospira*는 뛰어난 영양성분과 적은 탄수화물 함량으로 소화율이 높아 전 세계 생산량의 50%를 사료 보충제로 쓰이고 있음 142).
- 3세대 바이오 연료(Biofuel) 생산을 위한 공급원료로 주목받고 있으며 대기에 존재하는 이산화탄소를 고정하여 대기로 배출되는 온실 가스(GHG) 균형을 낮추고 탄소 발자국이 줄어들며 지속 가능한 사료를 생산할 수 있으며 실제로 생산된 미세조류 중 30% 정도는 동물사료첨가제로 판매되었음 143)144).
- 국내연구로는 낙동강 수계에서 분리한 토착 미세조류(*Parachlorella* sp)의 초기 육계의 성장 및 면역에 미치는 효과를 분석한 연구가 있으며 육계의 성장에는 영향을 미치지 않았지만 혈액 내 PBMC에서 일부 사이토카인과 주요 세포이동 관련 수용체 유전자의 발현을 증가함. 이는 미세조류가 육계의 면역을 직간접적으로 조절하였다는 것을 시사함 145).

Dietary algae inclusion	Corn and soybean saved, 1,000 t	Land saved, 1,000 ha
5%	575	188-283
10%	1,150	375-567
20%	2,300	750-1,134

- 국외연구로는 이유자돈의 경우 장내 건강을 위해 prebiotic function으로 사용했으며 육성, 비육돈에 있어서는 단백질과 탄수화물 대체 공급원으로 사용하였음. 가금류에 있어서도 15% 미만의 함량으로 여러 생산적 측면에서 긍정적인 효과를 나타내며 기존 단백질 공급원의 대체물로 사용됨 146).

138) Kalogeropoulos N. Chiou A. Gavala E. Christea M. Andrikopoulos N. K. (2010). Nutritional evaluation and bioactive microconstituents (carotenoids, tocopherols, sterols and squalene) of raw and roasted chicken fed on DHA-rich microalgae. *Food Res. Int.*43:2006-2013.

139) Becker, E. W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge: Cambridge University Press. 301

140) Becker, E. W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge: Cambridge University Press. 301

141) Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., & Takriff, M. S. (2014). An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 21, 1-10.

142) Guill-Guerrero, J.L., Navarro-Juárez, R., López-Martínez, J.C., Campra-Madrid, P., and Reboloso-Fuentes, M.M. (2004). Functional properties of the biomass of the three microalgal species. *Journal of Food Engineering*. 65, 511-517.




143) Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., & Takriff, M. S. (2014). An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 21, 1-10.

144) Silveira, C. F., de Assis, L. R., de Sousa Oliveira, A. P., & Calijuri, M. L. (2021). Valorization of swine wastewater in a circular economy approach: Effects of hydraulic retention time on microalgae cultivation. *Science of The Total Environment*, 789, 147861.




145) Leng X. Hsu K. Austic R. Lei X. G. (2014). Effect of dietary defatted diatom biomass on egg production and quality of laying hens. *J. Anim. Sci. Biotech.*5(1): 3.

146) <https://www.databridgemarketresearch.com/>

<양돈 및 양계 사료에 미세조류를 포함하였을 때 절약되는 경작 가능한 토지 면적>

Physiological phases	Function	Main effects
 Post-weaning piglets	Additive	- Improvement of feed conversion ration ratio and weight gain. - Increase of villus height in the jejunum. - Increase of dry matter, N apparent total tract and ileal digestibility. - Variation of effects in feces consistency. - Reduce of feed intake without affecting the performance.
 Growing/ Fattening pigs	Additive	- Increase of EPA, DHA and n-3/n-6 ration in muscle. - Increase of dry matter digestibility. - Improvement of lactobacillus intestinal population. - No negative effects on animal performances. - No effects in carcass characteristics and quality.
	Ingredient	- Increase of EPA concentrations in muscle. - No effects on performances. - Increase of back fat thickness.
 Breeders	Additive	- Increase of ovarian development. - Increase of volume and count in sperm ejaculate. - Increase of sperm mobility. - Improvement of immune system of foetuses

<미세조류를 첨가한 사료를 돼지와 닭에게 급이 하였을 때 생애주기에 따라 나타나는 효과 147).>

Physiological phases	Function	Major effects
 Broilers	Additive	- Increase of omega-3 in meat. - Improvement of growth rate, performance and body weight. - Increase of lactobacillus intestinal population. - Improvement of immune characteristics. - Improvement of fatty acids in meat. - Increase of digestible methionine value. - Changes in muscle color (more pigmentation).
 Laying hens	Additive	- DHA enriched eggs. - Change of color of yolk color (darker, orange-red, intense). - Decrease of cholesterol levels in yolk. - Layer performance and egg quality not affected. - Enrichment of fatty acids (n-3) in eggs.
 Ducks	Additive	- Improvement in body weight. - No differences in performances. - DHA increase in breast meat.

○ 대체 원료로 미세조류 사용의 시장 전망과 한계점

- 앞으로 2029년까지 사료 시장에서 미세조류의 비중은 더 확장될 것임. 데이터 브리지 마켓 리서치 (Data Bridge Market Research)는 사료 시장의 미세조류가 2021년 110억 달러 규모였으며 예측 기간 동안 CAGR 8.00%로 2029년에는 203억 6000만 달러 규모에 이를 것으로 예상하고 있음.
- 건강 및 영양상의 이점과 미세조류에 대한 인식이 높아짐에 따라 다양한 동물, 미생물 및 인간을 먹이기 위한 사료 및 식품으로 사용되어 사료 시장에서 미세조류의 성장은 촉진될 것임 148).

147) Mirzaie, S., Zirak-khattab, F., Hosseini, S. A. and Donyaei-darian, H. (2018). Effects of dietary Spirulina on antioxidant status, lipid profile, immune response and performance characteristics of broiler chickens reared under high ambient.

148) Lum K. K. Roneker K. R. Lei X. G. (2012). Effects of various replacements of corn and soy by defatted microalgal meal on growth performance and biochemical status of weanling pigs. J. Anim.

- 한계점으로는 높은 생산비용 및 투자비용으로 단위동물 사료에 사용하는 것을 목표로 하는 미세조류의 제조, 건조 및 운송에 새롭고 보다 경제적이고 지속 가능한 기술을 개발하는 것이 필수적임.



<미세조류 산업시장 전망 149>

○ 양돈산업 사료원료 현황 (미생물 단백질)

- 미생물 단백질은 천연물에서 추출된 고품질의 단세포 단백질 (Single cell protein)으로 효모, 박테리아, 곰팡이, 조류 등을 번식시켜 건조한 미생물 사체로 구성됨.

○ 대체 원료로 미생물 단백질 사용의 영양학 및 경제적 가치

- 미생물의 빠른 증식 속도와 큰 생산량을 특징으로 세균은 30분에서 2시간, 효모는 40분에서 3시간, 조류는 3시간에서 6시간 안에 두 배로 늘어남 150).
- 환경의 변화에 크게 상관 없이 증식이 가능함 151).
- 미생물 단백질은 사료나 식품 원료로서 효율적으로 사용될 수 있으며 미생물 단백질은 식물이나 동물 원료와 달리 전부 사용될 수 있음. 이는 자원의 효율적인 활용으로 기존의 식물과 동물 원료보다 더욱 유용하다는 장점이 됨 152).

○ 대체 원료로 미생물 단백질 사용의 시장 전망 및 한계점

- 미생물을 이용하여 생산되는 단백질로, 글루탐산, 에센셜 아미노산, 비타민 등 다양한 영양소를 함유하고 빠른 증식으로 다양한 산업 분야에서 활용할 수 있다는 장점이 있음.
- 하지만, 미생물로부터 생산되는 제품으로 안전성 평가 및 규제 정책 등의 문제를 극복해 나가야 함.

[반추동물]

○ 반추동물 산업 시장 동향

- 국내 한우 산업에 있어서 사료 가격은 지속적으로 상승하고 있으며 특히, 2023년 1월의 경우 2020년 대비 사료값이 44% 이상 상승하며 생산비 중 사료비의 비중이 35.1%를 차지함.
- 낙농의 경우 사료비의 비중이 55%를 차지하고 있어 사료비가 생산비의 절대적인 부분을 차지하고 있으며 이는 농가 수입 감소와 우유값 상승으로 이어지고 있음.

Sci.90(Suppl. 3):701(Abstr.).

149) Anupama, Ravindra, P. (2000). Value-added food: single cell protein. *Biotechnol. Adv.* 18, 459-479.

150) Bhalla, T.C., Joshi, M. (1994). Protein enrichment of apple pomace by co-culture of cellulolytic moulds and yeasts. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 10, 116-117.

151) Zhou, Y.-M., Chen, Y.-P., Shen, Y. (2017). Single cell protein-feed: Taking orange waste as raw material for fermentation. In: *Advanced Materials and Energy Sustainability*. World Sci, pp. 323-335.

152) 그린포스트 코리아. Available from: <https://www.greenpostkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=114595>.

- 낙농가의 경우 2001년부터 2020년까지 20년간 우유 생산비가 76% 상승하였으며 근본적인 원인으로 는 87% 상승한 사료비로 보고 있음.
- 반추가축의 경우 광우병 등의 문제로 저가의 동물성 단백질 원료를 사용할 수 없고 식물성 단백질 원료를 수입에 의존하여 사용하고 있음. 기후변화나 국제 환경 변화에 사료 가격이 지속적으로 영향을 받고 있으며, 특히 국내 식물성 단백질 원료의 생산이 전무한 상황으로 사료비의 상승이 불가피한 상황임.
- 또한, 반추가축의 특성상 조단백질 함량이 높은 양질의 조사료 급여가 송아지와 육성우 단계에서 필요하나 국내 양질의 조사료 생산이 전무하여 절대적인 수입에 의존하면서 농가의 생산성 및 반추가축의 생산성에도 영향을 미치고 있음.

○ 반추동물의 사료원료 현황 (비단백태 질소화합물)

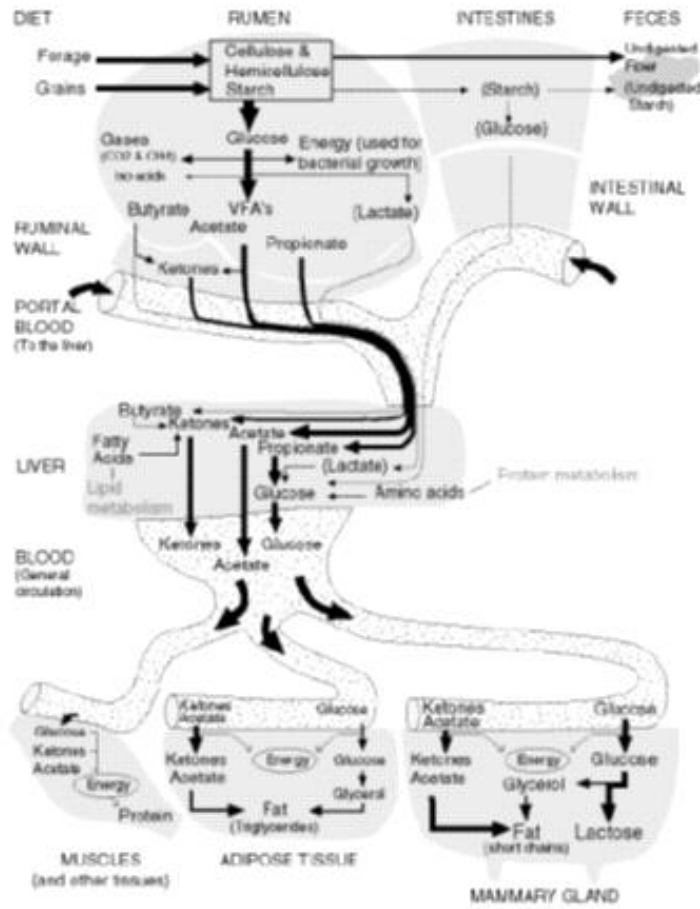
- 반추동물의 특성상 반추위 내에서 비단백질인 요소와 암모니아를 통해 미생물 단백질 합성이 가능하여 요소와 암모니아가 반추동물의 단백질 원료로 사용되고 있음
- 요소와 암모니아 같은 저렴한 질소원은 후기 비육우 등에서는 단백질 대체 원료로 사용 가능하나 생체 단백질 합성이 필요하고 반추위가 충분히 발달하지 못한 송아지와 육성우 단계에서는 비단백태 질소화합물은 좋은 단백질 공급원으로 사용이 어려움
- 특히, 착유우의 경우 유단백 합성에 좋은 단백질 공급원이 아니므로 저가 사료에서 주로 사용하고 있음

○ 반추동물의 사료원료 현황 (식물성 단백질)

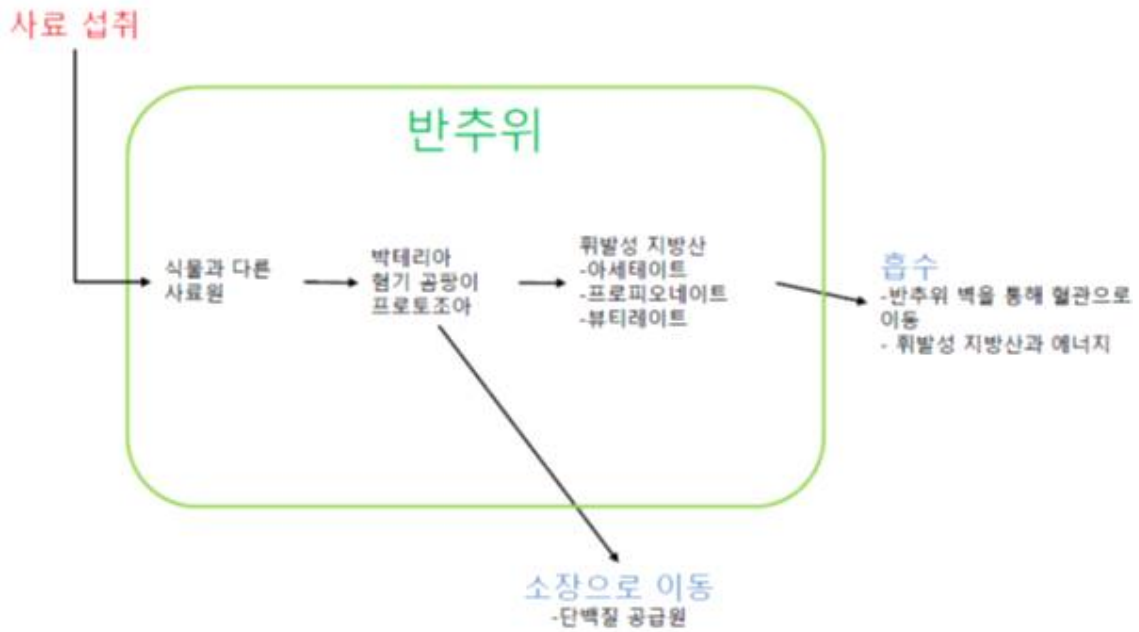
- 식물성 단백질원은 반추동물에서 사용이 가능한 유일한 단백질 원으로 반추가축 사료단백질의 대부분을 구성하고 있음.
- 반추가축의 양질의 단백질 공급원은 대두박이며 단백질 함량이 좋고 아미노산 조성 및 이용율이 우수하지만, 기후변화나 국제 정세 등에 따라 가격변동이 심함.
- 대두박의 단백질함량, 조성 및 가격은 다른 단백질원의 성능을 평가하는 표준으로 사용됨.
- 단백질원료의 대체물질로 글루텐밀(corn gluten meal), 옥수수 글루텐 피드(corn gluten feed), 옥수수 배아(corn germ)등이 주로 사용됨.
- 반추가축의 경우 단백질 함량이 높은 양질의 조사료를 식물성 단백질 원료로 사용하며, 단백질 함량이 높은 알팔파 (CP 15~22%)와 티모시(6~11%) 같은 조사료는 100% 수입에 의존하고 있어 사료비의 높은 비중을 차지하고 있음.
- 착유우의 경우 육성기 양질의 조사료 급여와 고능력우의 곡물위주의 사료 급여에 따른 고창증 등의 질병 예방을 위해서 양질의 조사료 급여가 반드시 필요함.
- 고능력 착유우와 비육우 육성을 위해서는 송아지 후기와 육성기 초에 반추위에 양질의 조사료 급여를 통한 사육 방법이 반드시 필요함.

<조사료의 영양성분 153>

구분	CP(%)	에너지(Mcal/lb)	ADF(%)	Ca(%)	P(%)
Alfalfa	15~22	0.8~1.1	24~34	0.9~1.5	0.2~0.3
Perennial	10~15	0.8~1.0	28~38	0.9~1.5	0.2~0.3
Orchardgrass	7~10	0.7~1.0	30~40	0.3~0.5	0.2~0.3
Timothy	6~11	0.6~1.0	30~40	0.3~0.5	0.2~0.3
Bermudagrass	6~11	0.7~1.0	28~38	0.3~0.5	0.15~0.3
Grass/legume mix hay	12~18	0.8~1.0	27~36	0.8~1.2	0.2~0.3



〈반추동물의 영양소 소화 및 이동〉



〈반추동물과 반추미생물의 공생관계〉

○ 반추동물 사료에서 미생물 단백질 전망

- 국내의 경우 단백질 함량이 높은 양질의 조사료 생산이 전무한 상태로 볏짚과 동계작물인 라이그라스를 활용하여 조사료 급여를 하고 있어 조사료를 통한 단백질 급여가 매우 어려움.
- 따라서, 볏짚과 같은 저급 조사료 급여와 함께 미생물 단백질을 통해 육성기 단백질 급여 부족을 극복하고 사료비에서 높은 비중을 차지하는 단백질 원료를 가격이 높고 가격 변동이 높은 대두박 등의 원료를 대체할 수 있는 미생물 단백질을 활용하는 경우 대체 원료로서의 가치가 높음.
- 반추위 내 미생물은 반추가축의 소장에서 80%가 소화되며 전체 흡수가능한 단백질의 50~80%를 차지하고 있어 반추 위 내 단백질 합성이 매우 중요함. 따라서, 반추위 내 미생물 합성을 위한 아미노산의 공급이 중요하며 이를 위해 효모 유래 단백질은 반추위 미생물 합성에 유용한 아미노산 공급이 가능한 자원으로 판단됨.

〈반추위 미생물 아미노산과 대두박, 맥주 효모의 아미노산 비교 (g/100g protein)〉

AA	Rumen Fluid associated bacteria	Rumen Particle associated bacteria	Rumen Protozoa	Soybean meal	Dried Brewing Yeast
Ala	7.21	6.73	4.18	5.43	3.70
Arg	4.59	4.87	4.50	3.41	2.74
Asp	11.92	11.58	13.37	-	4.15
Cys	1.41	1.76	1.90	-	0.46
Glu	12.85	12.68	14.43		5.46
Gly	5.56	5.29	4.30	1.71	1.97
His	1.87	1.92	1.78	1.26	1.30
Ile	5.52	5.56	6.47	2.09	1.40
Leu	7.59	8.15	7.96	3.58	2.89
Lys	7.62	7.49	10.93	2.87	4.54
Met	2.37	2.26	2.23	0.66	0.69
Phe	5.17	5.58	5.50	2.38	1.63
Pro	3.64	3.94	3.32	-	-
Ser	4.53	4.46	4.12	2.09	2.76
Thr	5.60	5.28	4.97	1.83	2.12
Trp	1.27	1.24	0.82	-	-
Tyr	5.20	5.23	4.96	1.75	
Val	5.97	5.80	4.93	2.17	1.82

【수산물 양식】

- 증가하는 수산물 소비량에 비해 어업을 통해서 공급할 수 있는 수산물의 양은 한정되어 있으므로 양식 산업을 통해 부족한 공급량을 채우고 있음.
- 양식 산업에 사용하는 양어사료는 전체 양식 생산단가의 30-60%를 차지하는 것으로 알려져 있어 양어사료의 단가 상승은 수산물 가격 증가 및 수입 감소로 이어질 수 있음.
- 양어는 육상 동물들과 생리학적으로 달라 사료의 조성이 다르며 육상 동물에 비해 요구하는 에너지가 낮음.
- 양어 사료의 특징으로는 높은 함량의 고도불포화지방산 (EPA, DHA) 이 있으며 양어는 이러한 지방산들을 직접 합성할 수 없어 사료를 통해 먹어야 함.
- 양어 사료의 대표적인 특징으로는 60%이상의 높은 단백질 함량이 있으며 이는 사료단가의 40-70%를 차지할 만큼 차지하는 비율이 높음.
- 따라서 단백질 사료원을 적절하게 사용하는 것이 사료 가격 및 전체적인 수입을 결정하게 됨.

○ 양식어류산업 사료원료 현황

- 양어 사료에 주로 사용되는 단백질원으로는 어분이 있으며 어분은 물고기를 찌거나 말려서 만든 가루를 뜻하며 멸치, 정어리, 전갱이 등이 사용됨.

- 하지만 어분에 주로 사용되는 물고기들이 기후변화 및 무분별한 남획으로 인해 어획량이 지속적으로 감소함에 따라 이러한 어분을 대체할 수 있는 대체 사료원료 개발 연구가 진행되고 있음 154).
- 현재 식물성 단백질원인 대두박, 채종박, 면실박, 아자박 등을 대체 단백질원으로 사용하기 위한 연구들을 진행하고 있지만 트립신저해인자, 렉틴, 대두항원 단백질 등 다양한 항영양인자 함유로 인해 어려움을 겪고 있음.
- 동물성 단백질원 육골분, 혈분, 우모분 등 다양한 부산물들을 활용하려는 노력이 진행되고 있으며 다양한 대체원료를 개발하기 위한 연구들이 진행되고 있지만 아직까지 영양소 흡수율 및 가격으로 인한 장애물로 인해 어려움을 겪고 있음.
- 생산단가에 가장 영향을 많이 미치는 단백질을 효과적으로 대체할 수 있는 사료대체원료가 개발이 된다면 이는 수산물 가격의 감소 및 수요의 증가를 불러올 것으로 기대됨.

[반려동물]

- 국내 반려동물 가구의 수는 지속적으로 증가하고 있으며 2020년 기준 국내 반려동물 가구 수는 약 604만 가구로 추정되며 이는 전체 가구의 약 30%에 해당하는 수치임 155).
- 반려동물 산업에 다양한 분야가 존재하지만 가장 큰 비중을 차지하며 가장 중요한 산업은 반려동물의 사료 분야임.
- 강아지는 잡식동물인 반면 고양이는 육식동물로 필요한 단백질 양이 약 2배정도 많으며 강아지 사료 단백질 요구량의 경우 성견 사료엔 18%, 자견 사료엔 22.5% 이며 고양이 사료내에서는 성묘 사료엔 26%, 자묘 사료엔 30%임.
- 단백질원으로 동물의 살코기, 부산물, 우지, 육골분 등이 사용되며 그 외에 탄수화물원으로는 옥수수, 밀가루, 전분 등이 사용됨.
- 최근 원재료 가격 상승으로 인해 사료값들이 계속해서 증가하고 있으며 이러한 이유로는 사료의 기본 재료인 곡물, 육류 가격 등의 상승이 있음. 특히 러시아, 우크라이나 전쟁으로 밀과 옥수수 같은 곡물 가격이 급등하며 곡물 자체의 상승뿐만 아닌 가축의 사료값 상승으로 인한 가축 부산물 가격상승 등의 연쇄적인 여파로 반려동물 사료값이 급등하였음.
- 시장점유율 1위 기업인 로얄캐닌을 포함한 네슬레 퓨리나, 내추럴발란스 코리아, 하림펫푸드 등의 업체들이 작년과 비교하여 올해 사료 가격이 20-30%가량 오른 것을 확인할 수 있음.
- 이러한 이유로 반려동물 사료 내 단백질원 대체원료 연구가 필요한 실정임.

○ 반려동물산업 사료원료 현황 (식물기반 단백질)

- 곡류 무첨가, 새로운 단백질 원료에 대한 관심 증가에 따라 식물 기반 단백질 원료 인기 상승 156).
- 10마리 암컷 비글의 사료 내 식물 기반 단백질 원료를 포함한 실험 진행결과 영양소 소화율이나 대변 특성에 부정적 영향을 미치지 않았으며, 대변 대사 물질에 유익한 변화를 줄 수 있는 대체 단백질 원료임을 밝혀짐

○ 반려동물산업 사료원료 현황 (곤충단백질)

- 육류는 반려견 식이 알레르기 원인 중 가장 높은 비율임.
- 곤충은 지속 가능하고 영양 밀도가 높아 가장 뜨거운 관심을 받는 육류 대체 단백질임.
- 면적 당 상대적으로 많은 단백질을 생산할 수 있고 사료와 물 사용도 저감 가능함. 대표적인 예로 귀뚜라미, 밀웬, 동애등에가 있으며 동애등에의 경우 2017년도 대비 2021년 판매액 1262% 증가함.
- 동애등에 유충 함유 식품을 반려견에 급여 시 혈중 콜레스테롤 10% 감소하였으며 밀웬 단백질 분말 또한 육류보다 단백질이 풍부하며 탄수화물, 지방, 당 함량은 낮은 고영양단백질임.
- 우수한 영양성분에도 불구하고 곤충의 식품화 관련 규제, 생산 및 소비자들의 수용에 있어 제한적이라는 문제점이 존재함 157).

154) https://www.nifs.go.kr/mixfeed/web/sub/02_02.jsp

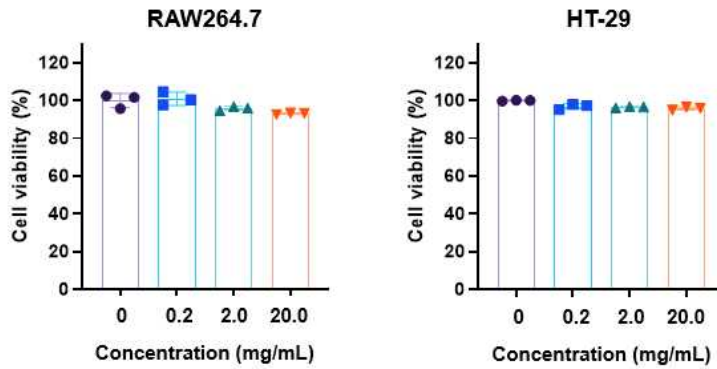
155) 황원경, 손광표 (2021). 2021 한국 반려동물보고서. KB 금융지주 경영연구소.

156) 최혁. 해양자원 유래 기능성식품 연구 분석: 펫푸드 원료를 중심으로. 한국기타키토산학회지, 27(1), 10-15. 10.17642/jcc.27.1.2. (2022)

[선행연구를 통한 차후년도 연구 상세기획 도출결과]

○ 생체대체모델을 이용한 미생물 단백질의 안전성 평가법 확립

- C. elegans 및 마우스 동물모델을 이용한 in vivo 실험을 위해 공동연구진에서 제공하는 F. venenatum 유래 mycoprotein의 독성 유무를 판단하게 위해 RAW264.7 대식세포를 대상으로 MTT assay를 실시한 결과 농도별 처리에 따라 세포의 수는 유의적으로 변화가 없었음. 따라서 이러한 결과는 본 연구결과에 의해 1, 2차년도에 주로 활용될 F. venenatum 유래 mycoprotein은 독성이 없는 것으로 관찰되었으며 향후 **2단계 선행연구에 신속하게 적용이 가능**할 것으로 판단되었음.

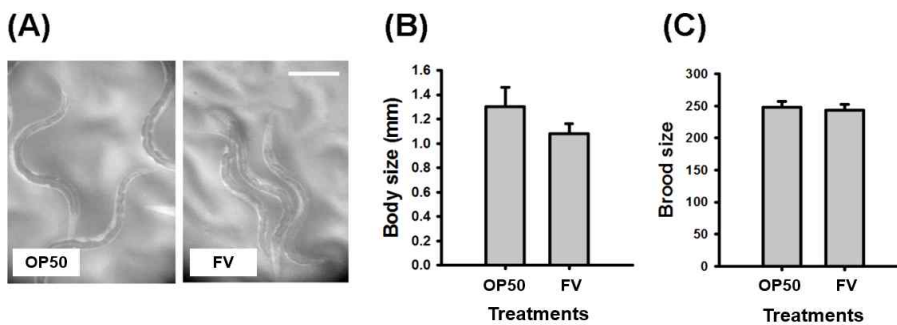


<다양한 농도의 F. venenatum 유래 곰팡이단백질을 처리하였을 때 MTT assay를 이용한 RAW264.7 대식세포 및 HT-29 장상피세포의 독성검사>

- 또한, F. venenatum 유래 mycoprotein의 생체에 미치는 physiological한 영향 여부를 판단하기 위해 mycoprotein (20 mg/mL)을 C. elegans wild-type에 노출시켰을 때 외형적인 변화와 함께 brood size, egg lagging 등의 생리 및 번식학적 측면에서도 유의적인 차이를 발견할 수 없었음. 또한, C. elegans wild type N2 Bristol strain이외에도 fer-15;fem-1와 glp-4;sek-1 변이주들도 F. venenatum 유래 곰팡이단백질의 처리에 따른 특이적인 변화를 확인할 수 없었던 바 본 연구에서 사용되는 곰팡이단백질은 독성이 미비하며 생체에 활용하는 것이 안전한 것으로 판단되었음.

○ 생체대체모델 C. elegans을 이용한 미생물 단백질의 기능성 평가법 구축

- 상기 기술한 연구결과를 바탕으로 선발된 선충종과 변이주 실험을 통한 수명연장 결과를 바탕으로 최종적으로 기존에 알려진 고기능성 프로바이오틱스 균주인 L. rhamnosus GG를 대상으로 항노화 평가를 실시함.

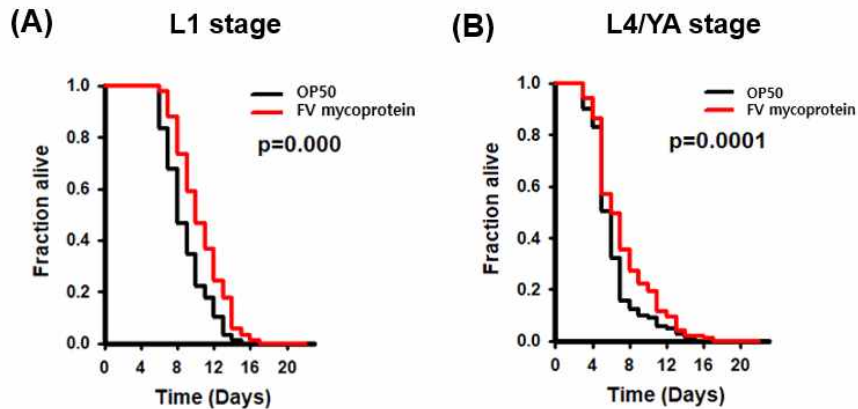


<F. venenatum 유래 곰팡이단백질(20 mg/mL)을 처리하였을 때 C. elegans 생체 physiology 변화탐색. (A) C. elegans body shape의 변화, (B) C. elegans body size의 변화, (C) C. elegans brood size의 변화>

- 1차적으로 생애주기별에 따른 항노화 효능을 평가하기 위하여 L1 stage(청년기)와 L4/young adult

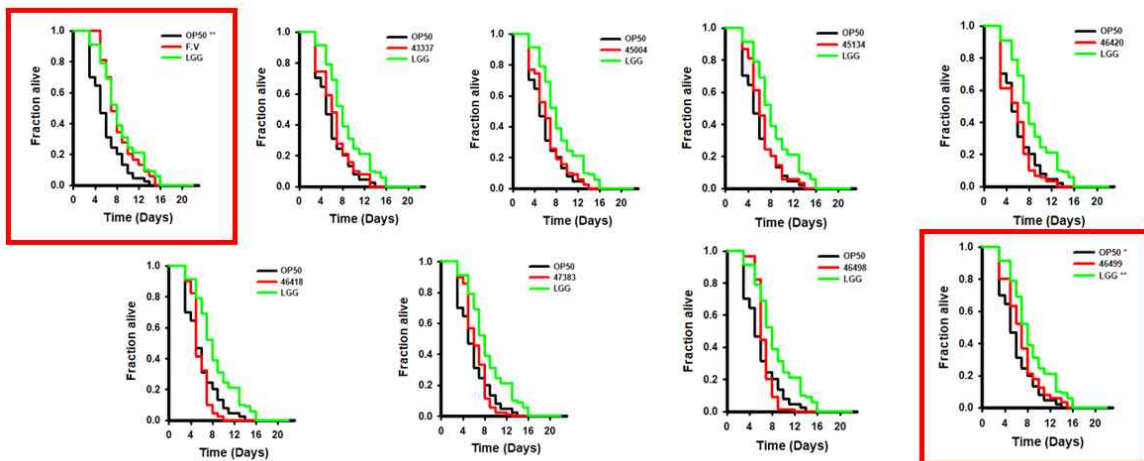
157) Reilly, L. M., He, F., Rodriguez-Zas, S. L., Southey, B. R., Hoke, J. M., Davenport, G. M., De Godoy, M. R. Use of legumes and yeast as novel dietary protein sources in extruded canine diets. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 667642 (2021)

stage(성년기)로 나뉘서 각각 *F. venenatum* 유래 mycoprotein (20 mg/mL)을 노출시켰을 때 흥미롭게도 L1과 L4/young adult stage 모두 수명연장 효과가 관찰되었음. 따라서 *F. venenatum*에서 분리한 미생물단백질의 경우 모든 연령대에서 활용이 가능하다고 판단되었음.



<*F. venenatum* 유래 곰팡이단백질(20 mg/mL)로 처리하였을 때 *C. elegans* 항노화 활성 평가. (A) L1 stage, (B) L4/young adult stage>

- 또한 *F. venenatum* 균주 이외에도 공동연구진에서 제공받은 *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus luchuensis* 등에서 분리한 수용성 단백질 fraction을 대상으로 1.00 mg/mL의 농도를 *C. elegans*에 처리하여 항노화 효능을 관찰하였음. 흥미롭게도 *Aspergillus luchuensis* 46490에서 *F. venenatum* 유래 mycoprotein과 유사한 항노화 활성이 관찰되었음. 따라서 기존의 Quorn제품에 사용되던 *F. venenatum* 균주이외에도 한국전통식품에서 분리한 *Aspergillus luchuensis* 유래의 mycoprotein도 향후 새로운 미생물 단백질 자원으로 활용이 가능할 것으로 판단됨.



<*F. venenatum*과 한국전통식품에서 분리한 곰팡이 유래 수용성 단백질 fraction (1.00 mg/mL)로 처리에 따른 *C. elegans* 항노화 활성 평가>

○ 곰팡이 단백질의 안전성 및 영양학적 유용성 탐색

- 곰팡이 유래의 독소 mycotoxin는 인체에 유해한 영향을 미칠수 있어 우리나라에서도 사료내 곰팡이 독소를 엄격하게 관리하고 있음. 본 연구과제에서 사용된 곰팡이 단백질 생산균주인 *Fusarium venenatum* KACC 49797의 경우 푸모니신, 제랄레논, 데옥시니발레놀등 독성인자의 검출이 거의 관찰되지 않아 2차년도 선행연구의 미생물 단백질 사료원료로 사용이 가능할 것으로 판단되었음.

〈사료내 곰팡이 독소 허용기준과 비교〉

사료관리법 및 사료 등의 기준 및 규격		
목록	<i>F. venenatum</i> KACC 49797	허용기준 (ppb)
푸모니신 (B1+B2)	8.6	5,000 ~ 60,000
제랄레논	5 이하	100 ~ 3,000
데옥시니발레놀	200 이하	900 ~ 10,000
※ 한국SGS 곰팡이 독소 정량 의뢰		

- 안전성이 확보된 곰팡이의 경우 쉬운 배양 방법, 상대적으로 큰 사이즈로 인한 수확 용이, 낮은 수분 활성도, 높은 단백질 함량, 좋은 아미노산 구성 등 다양한 이점을 가지고 있으므로 사료 내 단백질원으로 사용이 용이할 것으로 판단됨. 특히 동물용 사료에 필수인 라이신 함량이 높아 저단백사료 적용의 경우 천연 아미노산 보충원료로 활용이 가능함.

〈배합사료 주요원료와 영양성분 비교〉

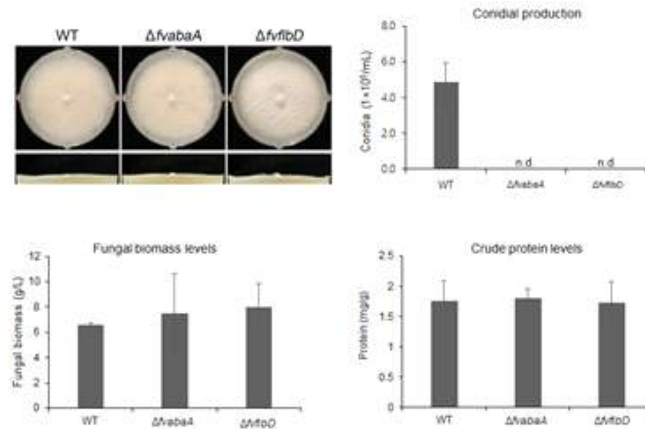
영양성분	<i>F. venenatum</i> KACC 49797 (A3/5)	콩	옥수수	밀
수분	0.00	0.00	0.00	0.00
조화분	3.24	5.28	1.34	1.79
조단백질	22.26	40.23	8.52	12.86
조지방	20.24	20.05	4.03	1.73
탄수화물	54.26	27.89	83.42	83.62
조섬유	45.64	6.55	2.69	2.77
라이신	4.367	1.56	0.26	0.42
메치오닌	0.207	0.41	0.17	0.23
트레오닌	0.965	1.46	0.31	0.39
시스틴	0.234	0.44	0.19	0.33

- Phytase, cellulase, lipase, keratinase 등과 같은 다양한 효소를 생산 및 분비를 하는데 이 분비된 효소들은 동물의 소화를 도울 수 있는 첨가제의 역할도 할 수 있는 이점을 가지고 있음.
- 특히, 곰팡이 뿐만 아니라 효모의 경우도 기존 동물사료원료로 사용중인 대두박, 채종박과 비교하였을 때 단백질 소화율이 유가하게 관찰되는 것을 확인하였음.
- 이러한 연구결과는 향후 기존 사료원료를 5-10% 대체하였을 때 기존사료와 유사한 소화율 및 생산성이 관찰될 수 있을 것으로 판단되며 이러한 대체를 통해 다양한 경제성 분석이 가능할 것으로 판단되어 향후 첨가수준 결정이 매우 중요한 요소일 것으로 판단됨.

○ 곰팡이의 균사 성장 극대화 방법 모색

- 본 연구에 참여하는 손호경 교수 연구팀이 선행연구를 통해 해당 곰팡이가 사료 내 단백질원으로서의 사용을 용이하게 하기 위해 균사 성장 극대화 방법을 모색함 .
- 기존 *F. graminearum*에서 *AbaA*와 *FibD* 유전자들을 삭제한 변이체에서 모든 포자생성과정이 억제되었고 *FibD* 삭제변이체에서 균사량이 많아짐이 확인됨 (158) (159). 따라서 BLASTp를 기반으로 분석을 통하여 *F. venenatum*대상 *AbaA*와 *FibD*의 올소로그를 찾은 후 삭제변이체를 제작함.
- *AbaA*와 *FibD* 삭제변이체 대상 포자생성여부, 균사 생성 정도 및 곰팡이 바이오매스, 총 단백질 함량 측정을 진행함. 측정 결과 *AbaA*와 *FibD* 삭제변이체에서 모두 포자생성이 억제되었고 야생형 균주에 비해 상대적으로 곰팡이 바이오매스 증가가 확인되었음. 그러나 삭제변이체에서 총 단백질 함량의 큰 변화는 보이지 않음.

158) Son H, Kim MG, Min K, Seo YS, Lim JY, Choi GJ, et al. *AbaA* regulates conidiogenesis in the ascomycete fungus *Fusarium graminearum*. PLoS One. 2013;8(9):e72915.
 159) Son H, Kim MG, Chae SK, Lee YW. FgFibD regulates hyphal differentiation required for sexual and asexual reproduction in the ascomycete fungus *Fusarium graminearum*. J Microbiol. 2014;52(11):930-9.

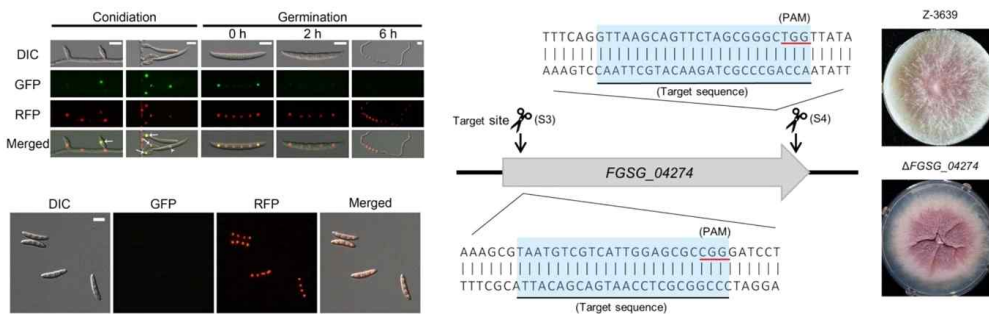


〈AbaA와 FibD 유전자 삭제변이체 형질〉

- Quorn 균주인 *F. venenatum* A3/5을 대상으로 CRISPR/Cas9과 AMA1 벡터 시스템을 이용하여 PKS12 유전자 기능을 knock-out하여 aurofusarin 색소 합성을 억제하는 연구가 존재함 (160). 그러나 유전학을 기반으로 하여 곰팡이를 단백질/지방 대체 소재로 이용하기 위한 연구는 존재하지 않음.

○ 곰팡이의 단백질 함량 극대화 방법 모색

- 식물성 대체육으로 많이 이용되는 콩에서는 단백질/지질 대체 소재로 이용하기 위한 연구가 상대적으로 많이 진행되어 왔음. 대표적으로 콩에서 RNA 간섭과 CRISPR-Cas9 시스템을 이용하여 유비퀴틴화 과정에 관여하는 유전자를 사일런싱한 결과 단백질 함량이 최대 7배까지 증가한 사례가 있음 (161).
- 유비퀴틴화는 유비퀴틴이 다른 단백질에 결합함으로써 단백질의 분해를 촉진하는 과정으로, 대부분의 진핵생물에서 잘 보존되어 있음. 따라서 *F. graminearum*에서 유비퀴틴화 관여 유전자를 삭제할 경우 비정상적인 유비퀴틴-프로테아좀 시스템 작동으로 인해 단백질 함량이 증가할 것으로 기대됨.
- 본 연구에 참여하는 손호경 교수 연구팀이 마이코프로틴 균주로 가장 많이 활용되고 있는 *Fusarium* sp.를 대상으로 CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein complexes (RNP)를 활용한 형질전환 시스템을 확립하였고 genome editing 연구 수행 중 (162). 해당 기술을 활용하여 non-LMO *Fusarium* sp. 균주 개량을 하고 추후 **3단계 심화연구에서 합성생물학을 적용한 정밀발효기술에서 혁신적으로 적용**할 예정이다.



〈CRISPR-CAS9 RNP 이용한 형질전환〉

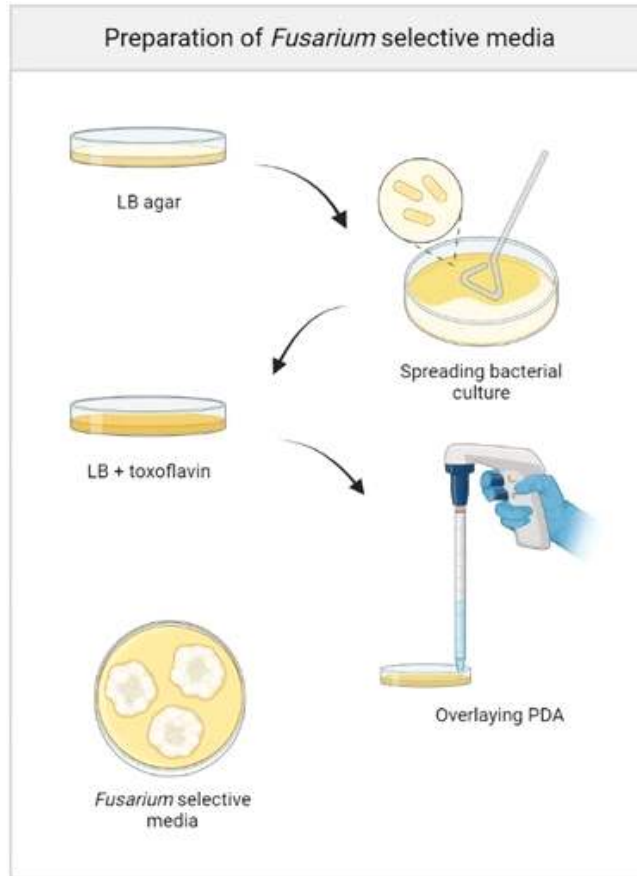
○ 대체단백질 소재로 사용가능한 후보 곰팡이 균주 확보 방법 모색

- 본 연구에 참여하는 손호경 교수 연구팀이 선행연구를 통해 국내 청정지역 대상 *Fusarium* 균주 확보를 위해 *Fusarium* selective media 제작.

160) Wilson FM, Harrison RJ. CRISPR/Cas9 mediated editing of the Quorn fungus *Fusarium venenatum* A3/5 by transient expression of Cas9 and sgRNAs targeting endogenous marker gene *PKS12*. Fungal Biol Biotechnol. 2021;8(1):15.

161) Shen B, Schmidt MA, Collet KH, Liu ZB, Coy M, Abbitt S, et al. RNAi and CRISPR-Cas silencing E3-RING ubiquitin ligase AIP2 enhances soybean seed protein content. J Exp Bot. 2022;73(22):7285-97.

162) Lee N, Park J, Kim JE, Shin JY, Min K, Son H. Genome editing using preassembled CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein complexes in *Fusarium graminearum*. PLoS One. 2022;17(6):e0268855.

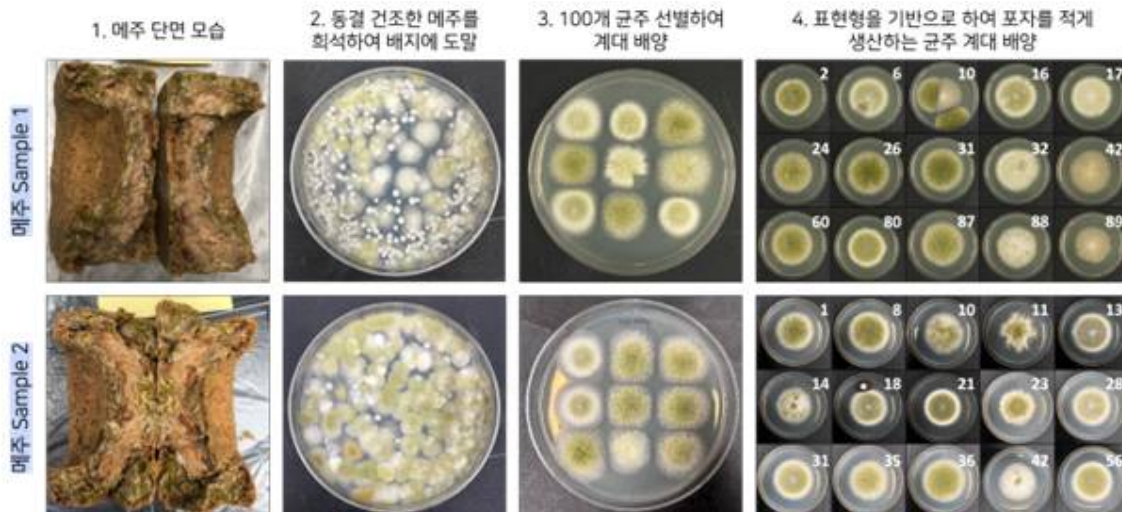


<Fusarium selective media 제작 과정>

- 대체단백질 생산을 위한 곰팡이를 확보하기 위하여 국내 청정지역 대상으로 *Fusarium* 균주들을 확보하고자 함. 대체단백질 생산에 용이하게 사용되는 *Fusarium* 균주들만 특이적으로 분리하기 위해 *Fusarium* selective medium을 개발함.

○ 전통 방식으로 제조된 메주에서 토종 *Aspergillus oryzae* 분리

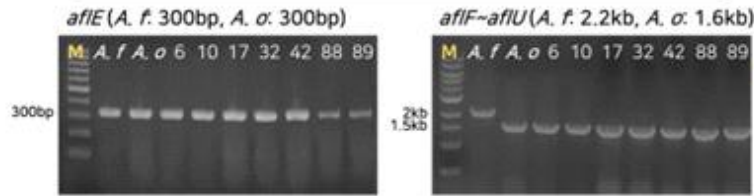
- 본 연구에 참여하는 박희수 교수 연구팀이 재래식 메주의 대표적인 제조 시기인 11~12월 사이에 제조된 메주와 된장 제조 시기인 1~2월 사이의 메주에서 미생물 단백질로 사용 가능한 한국 토종 *Aspergillus* 후보 균주 선발 진행
- 사상성 진균의 포자는 주요 감염원이므로 재래식 메주에서 포자를 적게 생산하는 균 선발
- 선발된 균주들을 활용하여 ITS 영역 염기서열 분석을 통해 아플라톡신 생산 유무 및 효소 활성 검사 수행
- 추후 **3단계 심화연구에서 합성생물학을 적용한 정밀발효기술에서 혁신적으로 적용**할 예정임.



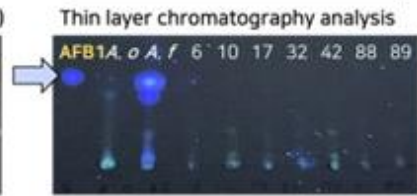
<표현형을 기반으로 A. oryzae 선발>

메주 Sample 1

Aflatoxin synthetic gene cluster 확인

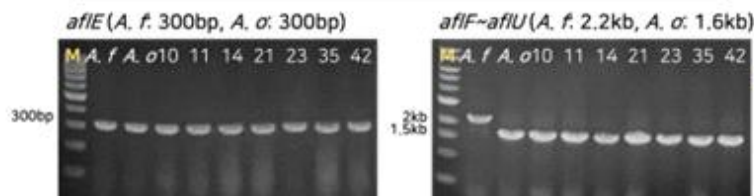


Aflatoxin 생산 유무 확인



메주 Sample 2

Aflatoxin synthetic gene cluster 확인



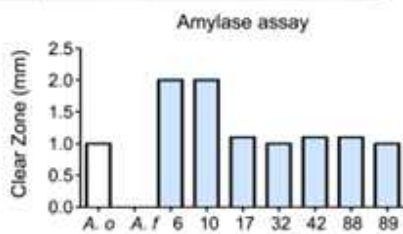
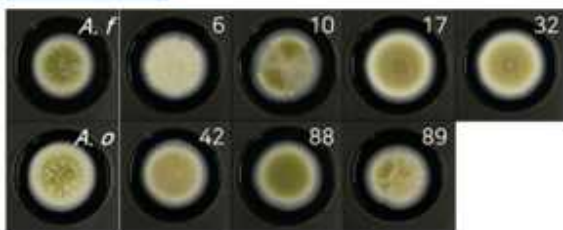
Aflatoxin 생산 유무 확인



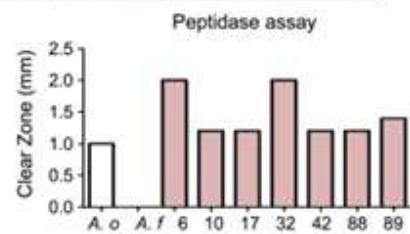
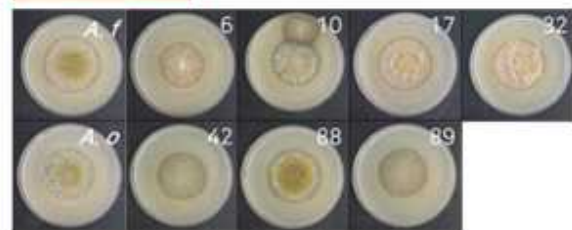
<아플라톡신 생성 유전자 유무 분석>

12월 제조 메주

Amylase assay

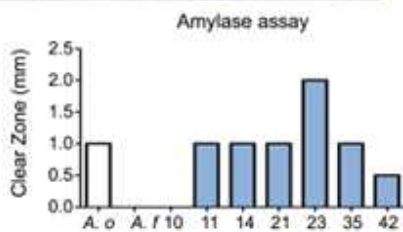
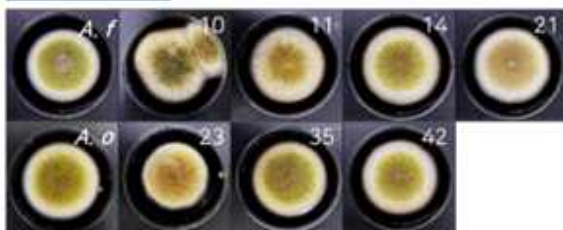


Peptidase assay

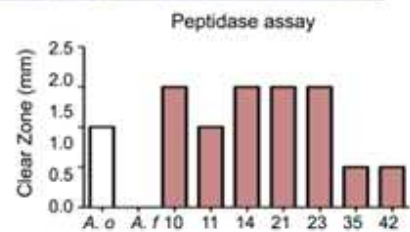
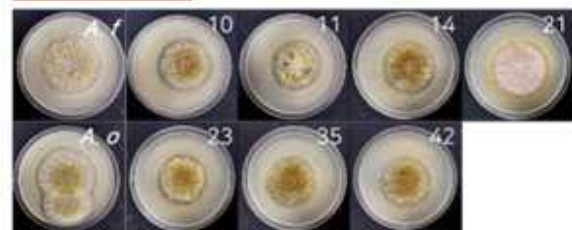


1월 제조 메주

Amylase assay



Peptidase assay



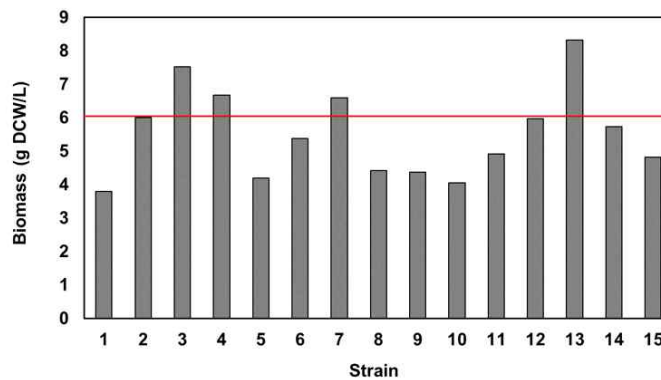
<대표 균주의 효소 활성 검사>

○ 농식품폐자원을 활용한 미생물단백질을 위한 효모 대량생산 시스템 확립

- 감글가공부산물은 발효를 위한 전처리가 쉽고 국내에서 매년 5만톤 이상 발생하므로 원료 수급이 용이하다는 장점이 있음. 또한 감글박은 한국표준사료성분표에 사료로 등록되어 있으며, 조섬유 함량이 건물기준 25%로 높아 대체 사료 원료를 생산하기 위한 원료로써 사용될 수 있음.
- 발효를 통한 미생물 단백질 생산을 위해 감글박 전처리 조건을 수립하였음. 연구실 보유 효모 균주 중 식용 가능한 균주 16종을 선정하여 감글박 당화물에서 발효 후 세포 성장을 비교함.

〈연구실 보유 효모 균주 16종〉

	SRK number	Strain
1	183	<i>Hanseniaspora uvarum</i>
2	187	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
3	444	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
4	454	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
5	477	<i>Yarrowia lipolytica</i>
6	727	<i>Pichia kluyveri</i>
7	740	<i>Pichia angusta</i>
8	839	<i>Pichia pastoris</i>
9	947	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
10	985	<i>Debaryomyces hansenii</i>
11	993	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
12	1006	<i>Saccharomyces cerevisiae boulardii</i>
13	1075	<i>Kluyveromyces marxianus</i>
14	1226	<i>Ogataea polymorpha</i>
15	1723	<i>Kluveromyces lactis</i>
16	1782	<i>Candida utilis</i>

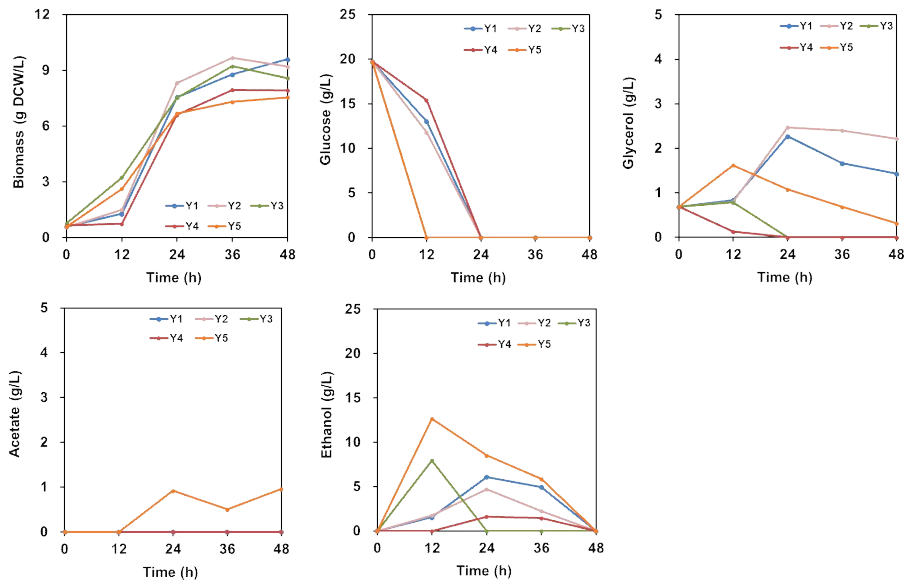


〈감글박 당화물에서 효모 균주 16종의 세포 성장 비교〉

- 감글박 당화물에서 세포 성장이 우수한 효모 5종을 선정하여 감글박 당화물에서의 발효 특성을 비교하였으며 이들을 대상으로 [2단계 선행연구에 신속하게 적용할 예정임](#).

〈세포 성장 우수 균주 5종〉

	SRK number	Strain
Y1	183	<i>Pichia angusta</i>
Y2	187	<i>Ogataea polymorpha</i>
Y3	444	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
Y4	454	<i>Pichia pastoris</i>
Y5	477	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>



<우수 균주 5종의 감귤박 발효 특성 확인>

○ 양돈용 대체사료원 적용을 위한 대두박 및 대체사료원료 일반성분분석

Item ¹	Soybean meal	A	B	C	D	E	F	G
DM	93.85	86.01	89.47	88.82	87.13	88.63	90.25	88.39
GE	4692.00	3873.85	4173.15	4146.87	4042.85	4084.57	4154.51	4882.40
CP	44.56	5.52	8.68	8.33	9.20	8.51	9.16	22.26
CF	5.69	3.55	3.93	4.30	4.47	3.93	3.93	45.64
EE	5.60	9.22	11.50	11.16	11.69	11.97	12.06	20.24
ASH	5.70	2.58	4.11	4.02	3.97	4.00	4.23	3.24

¹DM = dry matter; GE = gross energy; CF = crude fiber; CP = crude protein; EE = ether extract.

○ 양돈용 대체사료원 적용을 위한 대두박 및 대체사료원료 아미노산 구성 비교분석

	Soybean meal	A	B	C	D	E	F	G
Lysine	2.79	0.205	0.460	0.450	0.460	0.400	0.505	4.367
Methionine	0.60	0.055	0.110	0.115	0.105	0.105	0.115	0.207
Threonine	1.73	0.165	0.280	0.285	0.260	0.280	0.285	0.441
Tryptophan	0.69	0.170	0.355	0.340	0.355	0.345	0.390	0.965
Arginine	3.02	0.090	0.135	0.115	0.120	0.105	0.130	0.074
Histidine	1.14	0.235	0.335	0.320	0.365	0.280	0.355	0.804
Isoleucine	1.90	0.085	0.160	0.150	0.170	0.150	0.180	0.467
Leucine	3.21	0.155	0.305	0.300	0.320	0.305	0.330	0.678
Phenylalanine	2.15	0.275	0.520	0.500	0.530	0.500	0.540	0.970
Valine	2.01	0.180	0.315	0.305	0.325	0.310	0.330	1.313
Alanine	1.88	0.200	0.385	0.370	0.395	0.385	0.410	3.256
Aspartic acid	4.73	0.210	0.365	0.350	0.425	0.365	0.385	1.056
Cysteine	0.72	0.665	0.870	0.810	0.930	0.900	0.895	1.550
Glutamic acid	7.35	0.110	0.170	0.170	0.155	0.175	0.170	0.234
Glycine	1.82	0.390	0.730	0.705	0.780	0.715	0.770	1.735
Proline	2.16	0.210	0.385	0.375	0.395	0.370	0.410	0.773
Serine	2.11	0.715	0.740	0.645	0.830	0.640	0.405	0.704
Tyrosine	1.47	0.210	0.380	0.360	0.395	0.365	0.410	0.834

○ 곰팡이 및 효모 유래 미생물 단백질의 양돈용 대체사료원료 활용을 위한 첨가비를 설정(5%)

- 옥수수-대두박 위주의 사료에 대두박 원료의 5%를 대체하여 비교함, **대체원료 감글박 발효 *Saccharomyces cerevisiae*(F)와 *Fusarium venenatum*(G)**의 경우 다른 대체원료에 비해 Gross energy와 Crude protein이 높을 뿐만 아니라 옥수수-대두박 위주의 사료와 필수아미노산 조성을 비교하여 봤을 때, **2단계 선행연구에서 대체원료로서 신속하게 적용이 가능성**이 보임.

Item ¹	CON	A	B	C	D	E	F	G
Ingredient (%)								
Corn	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41
Whey Powder	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Soybean Meal	30.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Replacement Ingredient	-	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Soy Protein Concentrate	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Soybean Oil	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
Limestone	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
Monocalcium Phosphate	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Vitamin-Mineral Premix ²	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
L-Lys-HCl	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
DL-Methionine	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
L-Threonine	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
L-Valine	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Calculated energy and nutrient contents³								
DM, %	89.06	88.67	88.84	88.81	88.73	88.80	88.88	89.37
GE, kcal/kg	4332.35	4291.44	4306.41	4305.09	4299.89	4301.98	4305.48	4341.85
CP, %	23.07	21.12	21.28	21.26	21.31	21.27	21.30	21.96
Lys, %	1.70	1.57	1.58	1.58	1.58	1.58	1.59	1.78
Met, %	0.59	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
Cys + Met, %	0.96	0.91	0.92	0.92	0.91	0.92	0.92	0.92
Thr, %	1.05	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	1.02
Trp, %	0.29	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26

¹CON = basal weaner diet based on corn and soybean meal; A = control citrus peel; B = *Pichia angusta*-fermented; C = *Ogataea polymorpha*-fermented; D = *Wickerhamomyces anomalus*-fermented; E = *Pichia pastoris*-fermented; F = *Saccharomyces cerevisiae* *Cheongdo*-fermented; G = *Fusarium venenatum*.

²Provided per kilogram of diet: vitamin A, 12,000 IU; vitamin D3, 2,500 IU; vitamin E, 30 IU; vitamin K3, 3 mg; D-pantothenic acid, 15 mg; nicotinic acid, 40 mg; choline, 400 mg; and vitamin B12, 12 µg; Fe, 90 mg from iron sulfate; Cu, 8.8 mg from copper sulfate; Zn, 100 mg from zinc oxide; Mn, 54 mg from manganese oxide; I, 0.35 mg from potassium iodide; Se, 0.30 mg from sodium selenite.

³DM = dry matter; GE = gross energy; CP = crude protein; Lys = lysine; Met = methionine; Cys = cysteine; Thr = threonine; Trp = tryptophan.

○ 곰팡이 및 효모 유래 미생물 단백질의 양돈용 대체사료원료 활용을 위한 첨가비를 설정(10%)

- 옥수수-대두박 위주의 사료에 대두박의 10%를 대체하여 비교함, 대체원료 *Fusarium venenatum*의 경우 다른 대체원료에 비해 Gross energy와 Crude protein이 높지만, 옥수수-대두박 위주의 사료와 비교하여 보았을 때, Gross energy에선 큰 차이를 보이지 않고 Crude protein에서 *Fusarium venenatum* 처리구가 옥수수-대두박 처리구에 비해 낮은 수치를 보임.
- 위의 표에서 확인할 수 있듯이 옥수수-대두박 위주의 사료의 대두박 Crude protein의 함량이 44.56% 이고 *Fusarium venenatum*이 22.26%으로 상대적으로 낮기 때문인 것으로 보임, 하지만 *Fusarium venenatum*을 대체원료로 사용함으로써 영양소 요구량을 충족 시킬 수 있다면 대두박 원료 값을 절감할 수 있는 장점이 있음. 이러한 결과를 바탕으로 향후 **2단계 선행연구에서 곰팡이 및 효모 유래 미생물 단백질 대체원료로서 5%와 10% 첨가수준으로 적용하는 것이 가능할 것으로 판단됨**

Item ¹	CON	A	B	C	D	E	F	G
Ingredient (%)								
Corn	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41	47.41
Whey Powder	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Soybean Meal	30.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Replacement Ingredient	-	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Soy Protein Concentrate	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Soybean Oil	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
Limestone	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36

Monocalcium Phosphate	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Vitamin–Mineral Premix ²	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
L–Lys–HCl	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
DL–Methionine	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
L–Threonine	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
L–Valine	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Calculated energy and nutrient contents³								
DM, %	89.06	88.28	88.63	88.56	88.39	88.54	88.70	89.68
GE, kcal/kg	4332.35	4250.54	4280.47	4277.84	4267.44	4271.61	4278.60	4351.35
CP, %	23.07	19.17	19.49	19.45	19.54	19.47	19.53	20.84
Lys, %	1.70	1.44	1.46	1.46	1.46	1.46	1.47	1.86
Met, %	0.59	0.54	0.55	0.55	0.54	0.54	0.55	0.55
Cys + Met, %	0.96	0.86	0.87	0.87	0.86	0.87	0.87	0.88
Thr, %	1.05	0.90	0.92	0.91	0.92	0.91	0.92	0.98
Trp, %	0.29	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

¹CON = basal weaner diet based on corn and soybean meal; A = control citrus peel; B = *Pichia angusta*–fermented; C = *Ogataea polymorpha*–fermented; D = *Wickerhamomyces anomalus*–fermented; E = *Pichia pastoris*–fermented; F = *Saccharomyces cerevisiae Cheongdo*–fermented; G = *Fusarium venenatum*.

²Provided per kilogram of diet: vitamin A, 12,000 IU; vitamin D3, 2,500 IU; vitamin E, 30 IU; vitamin K3, 3 mg; D–pantothenic acid, 15 mg; nicotinic acid, 40 mg; choline, 400 mg; and vitamin B12, 12 µg; Fe, 90 mg from iron sulfate; Cu, 8.8 mg from copper sulfate; Zn, 100 mg from zinc oxide; Mn, 54 mg from manganese oxide; I, 0.35 mg from potassium iodide; Se, 0.30 mg from sodium selenite.

³DM = dry matter; GE = gross energy; CP = crude protein; Lys = lysine; Met = methionine; Cys = cysteine; Thr = threonine; Trp = tryptophan.

(1) 정성적 연구개발성과

- 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료 소재 발굴

→ 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 단백질을 대상으로 원료사료대체 효능평가**가 필요할 것으로 판단됨

- 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토

→ 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 단백질 성분중 아미노산의 질적/양적 평가를 통해 산업동물의 사양단계별 맞춤형 아미노산 공급 비율 결정** 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨.

- 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축

→ 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 곰팡이와 효모의 저비용-고효율 대량 생산을 위해 우선적으로 다양한 농식품유래 폐자원 중 감귤박을 활용하여 배양을 최적화하는 배양형 정밀발효기술 적용이 우선인** 것으로 판단됨

→ 이후 3단계 심화연구를 통해 배양중심의 정밀발효기술 뿐만 아니라 CRSPR/Cas9을 통한 유전자 조작기술에 의한 효모/곰팡이 단백질 최적생산 선도기술 실험이 연계되어 First-in-class 맞춤형 정밀발효기술을 확립하고자 함

- 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립

→ 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 안전성이 검증된 곰팡이와 효모 유래의 단백질을 대상으로 안전성 및 소화율 평가** 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨

→ 본 연구진의 핵심기술인 생체대체모델 예쁜 꼬마선충 *C. elegans*를 이용하여 생체의 안전성 여부 및 관련 유전자 탐색연구를 진행하고 이후 실험동물을 통한 안전성을 거쳐 산업동물에 적용하는 연구기법이 필요한 것으로 판단됨

- 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립

→ 1단계 개념연구를 통해 우선적으로 **양돈분야의 적용점을 예상한 돼지 배합사료 및 원료사료 가격**

- 평년 562원/kg, 21년 613원/kg, 22년 709원/kg

- 옥수수 : 325원/kg, 대두박: 585원/kg

- 일반 육성-비육돈사료 내 옥수수 60%, 대두박20% 정도 포함

=> 325원/kg*0.6+585원/kg*0.2=312원/kg

=> 22년 배합사료 가격 709원/kg중 옥수수/대두박312원/kg (44%)

=> **단백질 원료사료 20% 대체시: 60원/kg 사료비감소 예상**

(단, 단백질 원료사료 대체제의 가격에 따라 달라질 수 있음)

→ 이러한 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 양돈분야에 곰팡이 및 효모 유래 단백질을 대상으로 5%와 10% 원료사료대체에 따른 생산성 비교평가**를 실시하는 것이 적할 것으로 판단됨.

→ 이후 3단계 심화연구를 통해 닭(육계, 산란계), 반추동물(한우, 젖소), 반려동물(반려견, 반려묘), 양어 등에 확장된 미생물 유래 단백질 및 유지성분을 적용하는 로드맵을 고려함

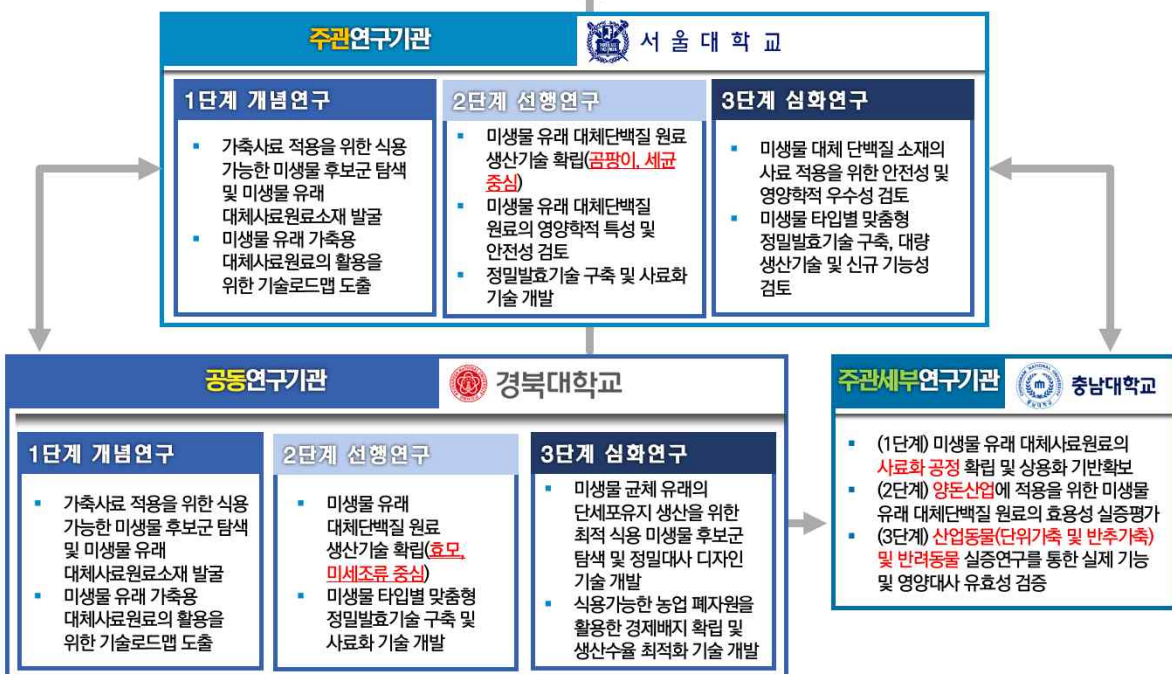
○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출

- 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 **우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 미생물 단백질을 대상으로 양돈산업에 사용되는 원료사료대체 효능평가**를 우선적으로 수행하여 사료내 첨가수준을 예측하고 경제성 실증 실험을 실시할 예정임
- 이후 3단계 심화연구에서 미생물단백질 뿐만 아니라 미생물 유지를 통한 원료사료 대체가능성을 확대 평가하고 닭(육계, 산란계), 반추동물(한우, 젖소), 반려동물(반려견, 반려묘), 양어 등에 다양한 적용을 통해 사료화 공정 확립 및 상용화 기술개발로 연계할 예정임.

미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 현장적용 및 상용화 기술



미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 현장적용 및 상용화 기술 개발



○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 자체 심포지엄 개최

→ 1단계 개념연구를 통해 자체적으로 심포지엄을 개최하여 **미생물 단백질 및 유지를 대상으로 동물 산업에 사용되는 원료사료대체 효능평가**를 토의하고 세부적인 선행연구 및 향후 도출된 과제내용 등을 심도있게 토의함.

Food-Tech 미래인재양성 교육연구팀
미생물 정밀발효를 이용한 대체사료원료 상용화 기술개발 심포지엄

□ 행사 개요
가. 일: 2023년 8월 7일(월)~8일(화)
나. 장: 경북대학교 농업생명과학대학 사과센터 와생통
다. 주: 경북대학교 농업생명과학대학 식품공학부
라. 공동주최: 특수식물연구소, 식물성용산발효연구소
마. 후: IPET 2023년도 농업분야 영도전문형농업전문요원개발사업

□ Program

2023. 8. 7(월) 13:00~18:00	
Opening	김주원 교수(경북대학교)
13:00~14:00	Microbial process for sustainable feed system in animal industry - 김영호 교수 (서울대학교)
14:00~15:00	Nutritional Application for Alternative Feed Ingredients - 송일호 교수 (충청대학교)
15:00~16:00	A transcriptomic and physiological analysis revealed the adaptive mechanism of an alternative feed in the plant pathogenic fungus Fusarium graminearum - 유복경 교수 (서울대학교)
16:00~17:00	Nitrogen metabolism in ruminant - 김승현 교수 (충청대학교)
17:00~18:00	Value of spray-dried plasma as a supplement to seine diets - 양주홍 회장 (주)신진
Closing	박원우 교수(영북대학교, 식품공학부장)
2023. 8. 8.(화) 09:00~12:00	
09:00~11:00	이런 과제 추진 상용화교류 참여 연구자
11:00~12:00	자선도 과제 추진 계획 수립



대체사료원료 상용화 기술개발 자체 심포지엄 프로그램

심포지엄 참석자 단체사진 (1) (참석자 82명)

심포지엄 참석자 단체사진 (2) (참석자 82명)

○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 산업체 연구진과의 소통 및 산업화 적용기술

→ 1단계 개념연구를 통해 선진, 대상, 일동바이오사이언스 등 다양한 **미생물 생산 기업 및 단백질/아미노산 생산기업과의 소통을 통해 산업동물에 적용가능한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발 상호협약**의 (3회)



<선진과의 대체사료원료, 특히 양돈분야에 활용가능한 단백질 성분 적용 분석 회의> (선진: 강주원 박사 참석)



<대상과의 대체사료원료, 특히 효모 및 곰팡이 유래 단백질의 아미노산 생산 적용 회의> (대상: 이희진 박사 참석)



<일동바이오사이언스와의 대체사료원료 생산을 위한 정밀발효시스템 최적화 적용 회의> (일동바이오: 양정우 연구소장 참석)

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성하며, 연구개발과제의 특성에 따라 수정이 가능합니다)

〈핵심성과〉

- [사업화] 사업화·제품화를 위한 기술협의 3건
- [사업화] 기술로드맵 및 세부 연구현황리포트 1건
- [학술] SCI논문 1편(Revision 진행중) 및 국제학술발표 2건 발표
- [학술] 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 자체 심포지엄 개최 1건

< 정량적 연구개발성과표(예시) >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명	연도		1단계 (2023~2023)	n단계 (YYYY~YYYY)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	-	목표(단계별)				-
		실적(누적)				
	-	목표(단계별)				-
		실적(누적)				
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	SCI(E)논문 /논문평균 IF	목표(단계별)	1건/2.0		1	30
		실적(누적)	1건/5.9		1	
	국제 학술발표	목표(단계별)	1		1	60
		실적(누적)	2		2	
	기타 (심포지엄 개최)	목표(단계별)	-		-	10
		실적(누적)	1		1	
계					100	

- * 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문(에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)), 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신물질 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.
- * 2) 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 실제 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다 (연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표(예시) >

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ²⁾ (%)	세계 최고수준 보유국/보유기관	연구개발 전 국내 수준	연구개발 목표치		목표 설정 근거
			성능수준	성능수준	1단계(2023)	2단계 (2024-2027)	
1 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료 발굴	균주	30	90% (미국)	50%	60%	80%	핵심 후보균주의 발굴
2 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토	기술	20	80% (미국)	40%	50%	85%	미생물별 사료원료 특성화 규명
3 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축	기술	30	80% (미국)	30%	40%	90%	미생물 타입별 핵심 정밀발효기 술 확립
4 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립	기술	20	70% (미국)	30%	40%	90%	생체대체모 델 및 인공장환경 모델 플랫폼 기술 구축

- * 1) 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.
- * 2) 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

(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	Molecular characterization of <i>Fusarium venenatum</i> -based microbial protein in animal models of obesity using multi-omics analysis	Communications Biology	이준표 김영훈	-	미국	Nature Publishing	SCIE	2023.09 (In revision)	2399-3642	100

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2023년 한국축산학회 국제 학술대회	이준표	2023.07.06	광주 김대중컨벤션센터	대한민국
2	2023년 한국식품저장유통학회 국제 학술대회	김수린	2023.08.18	제주도 ICC	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		

○ 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

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		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

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) 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)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 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 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

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

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	신정 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)	명 칭	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					

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

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	학술상	제14회 NH축산 학술상	축산분야의 연구 및 발전 공로	김영훈	2023.7.5	한국축산학회

[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)

* 「과학기술기본법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

- 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 자체 심포지엄 개최
- 일자 및 장소: 2023년 8월 7-8일, 경북대학교 농업생명과학대학 사과센터 외성홀
- 핵심내용: 자체적으로 심포지엄을 개최하여 미생물 단백질 및 유지를 대상으로 동물산업에 사용되는 원료사료대체 효능평가를 토의하고 세부적인 선행연구 및 향후 도출된 과제내용 등을 심도있게 토의

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

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도 (%)
<p>[주관]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료 자료 수집 및 상세기획 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립 ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출 	100
<p>[1공동]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료소재 자료 수집 및 정밀발효기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이, 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료(단백질, 유지를 중심으로) 소재 발굴 ○ 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토 ○ 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀 발효기술 구축 	100

4 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) 현황

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

- 주로 생명공학분야에서 적용가능성이 제기되던 미생물 정밀배양 및 대사디자인 기술 연구를 미래축산 선도를 위한 기초연구분야에 적극적으로 도입함으로써 새로운 개념의 미생물 유래 가축용 대체사료원료 생산을 위한 핵심기술을 확보할 수 있을 것으로 판단됨. 또한, 전통적인 축산 연구분야에 미생물학, 면역학, 세포생물학 및 기초 분자유전학 관련 기초연구 시스템이 융복합 됨으로써 기존에 활발하게 연구되지 않은 신규 미생물자원 기반의 “가축용 대체사료원료” 라는 독창적이고 창의적인 연구분야를 개척할 수 있을 것으로 예상됨
- 토종미생물 이용으로 미생물 원료의 수입의존도를 낮추고 더 나아가 국가 간 자원경쟁력 확보 및 생물자원 선진국으로 도약 가능
- 사료원료 대체제로 미생물을 사용함으로써 국제 곡물가격 상승에 따라 급등하는 사료값에 완충 작용을 해줄 것으로 기대됨
- 수입의존도가 높은 사료원료들을 미생물을 활용하여 대체함으로써 국내 사료 공급의 안정화와 식량안보에 기여할 수 있음
- 축산농가의 생산비 부담을 덜어주며 미래 곡물 가격 변동의 불확실성에 대한 공포를 해결해 줄 것으로 예상됨
- 현재까지 미생물 정밀발효 연구분야는 기존의 합성생물학과 연계된 국내 소수 연구진과 국외 선도연구진에 의해 대부분 연구되고 핵심기술이 철저하게 관리되고 있는 실정이며 미생물 유래 가축용 대체사료원료 확보기술은 국내에서는 아직 시도되고 있지 않은 실정임. 이러한 현실을 극복하기 위해 본 연구팀은 축산 분야에서 시도되지 않은 미생물 유래 가축용 대체사료원료 적용기술을 위한 기초과학성 및 현장적용 실증연구를 통해 축산분야에서만 할 수 있는 고유의 동물영양학 핵심 원천연구기술을 새롭게 개척하여 미생물을 활용한 새로운 개념의 가축용 대체사료원료 개발이라는 도전적인 연구분야의 새로운 활로를 선도할 수 있을 것으로 판단됨
- 곡물과 달리 생산에 필요한 토지의 면적이 작아 토지 집약적인 생산 가능하며 계절에 영향을 받지 않고 외부 환경자원의 소모 없이 효율적인 생산 가능한 혁신적 기술의 도입
- 곡물과 달리 비료를 사용하지 않아 환경오염이 적으며 농업 부산물 및 배양육 폐배지를 활용하여 경제적 및 친환경적인 생산 가능
- 본 연구과제 결과에 의해 도출되는 미생물 유래 가축용 대체사료원료 기반의 그린바이오소재 상용화 기술개발 및 과학적 가이드라인 확립을 위한 기초과학성 자료는 향후 다양한 축종을 대상으로 경제성이 높은 대체사료원료 소재화 활용 기술에 적용이 가능하며 지속가능한 축산업을 위한 대사친화형 기능성 사료 개발에 연계한 광범위한 활용을 통해 새로운 후속 응용기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단됨

6 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 본 연구에서 제안하는 미생물 대체사료원료는 새로운 식량안보 기술로 활용될 수 있으며 특히 지속가능한 축산업의 미래기술로 활용이 가능함.
- 미생물 유래 대체사료원료 확보에 활용함으로써 새로운 대체사료원료 개발과 함께 축종별 특성에 맞는 가공적성 및 소화율 개선에 도움을 주는 제조 기술의 보급이 가능함.
- 미생물 대체사료원료로 품질 향상 및 영양학적 균형을 충족하여 제조된 신규 대체사료원료 디자인 기술을 제공하여, 산업화의 발판이 될 수 있음
- 식용가능한 농산물 및 식품 폐자원에 미생물 단백질과 유지 생산을 적용함으로써 융복합 소재를 구명하고 새로운 가축 사료영양 기술이 자리 잡을 수 있음.
- 대학, 산업체, 연구소간의 산학연 협력체계의 활성화 및 식품 소재분야의 전문인력 양성이 가능함.
- 본 연구과제의 연구 결과를 국내외 저명 학술지에 발표하고 국내외 특허를 취득함으로써 국내외 관련 연구자들의 인적, 연구 네트워크를 구성하여 국내 연구 활성화를 유도할 수 있을 것으로 사료됨.

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	1
	비SCIE	
	계	1
국내논문	SCIE	1
	비SCIE	
	계	1
특허출원	국내	1
	국외	
	계	1
특허등록	국내	
	국외	
	계	
인력양성	학사	
	석사	2
	박사	1
	계	3
사업화	상품출시	
	기술이전	2
	공정개발	
제품개발	시제품개발	
비임상시험 실시		
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상
		2상
		3상
	의료기기	
진료지침개발		
신의료기술개발		
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		2 (미생물단백질 및 유지 생산 균주)

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.	1)
	2)

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호	IPET_RS-2023-00230039		
사업구분					
연구분야				과제구분	단위
사업명	농업분야창의도전형 응복합모델 (시장창출형)			주관	
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	미생물 정밀발효를 이용한 가축용 대체사료원료 생산 및 상용화 기술 개발			과제유형	(기초,응용,개발)
연구개발기관	서울대학교			연구책임자	김영훈
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2023. 04. 03 - 2023. 09. 30	50,000		50,000
	2차년도				
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계				
참여기업					
상대국	상대국연구개발기관				

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2023년 9월 21일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
서울대학교 농생명공학부	교수	김영훈

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	김영훈
----	-----

[별첨 1]

I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량

주로 생명공학분야에서 적용가능성이 제기되던 미생물 정밀배양 및 대사디자인 기술 연구를 미래축산 선도를 위한 기초연구분야에 적극적으로 도입함으로써 새로운 개념의 미생물 유래 가축용 대체사료원료 생산을 위한 핵심기술을 확보할 수 있는 기초자료 수집 및 기술로드맵을 전략적으로 구축한 것으로 판단됨. 또한, 전통적인 축산 연구분야에 미생물학, 면역학, 세포생물학 및 기초 분자유전학 관련 기초 연구 시스템이 융복합 됨으로써 기존에 활발하게 연구되지 않은 신규 미생물자원 기반의 “가축용 대체사료원료” 라는 독창적이고 창의적인 연구분야를 개척할 수 있을 것으로 예상됨

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량

본 연구결과 국내외 많은 선도과학자들의 미생물 유래 단백질과 유지 등 사료원료소재화에 관한 관심이 지속적으로 증대되고 있으며 실제 본 연구결과는 최근 SCI(E)논문에 출판을 진행중에 있음(1편 현재 Communication Biology, revision 진행중). 본 연구과제 결과에 의해 도출되는 미생물 유래 가축용 대체사료원료 기반의 그린바이오소재 상용화 기술개발 및 과학적 가이드라인 확립을 위한 기초과학성 자료는 향후 다양한 축종을 대상으로 경제성이 높은 대체사료원료 소재화 활용 기술에 적용이 가능하며 지속가능한 축산업을 위한 대사친화형 기능성 사료 개발에 연계한 광범위한 활용을 통해 새로운 후속 응용기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단됨

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량

현재까지 미생물 정밀발효 연구분야는 기존의 합성생물학과 연계된 국내 소수 연구진과 국외 선도연구진에 의해 대부분 연구되고 핵심기술이 철저히 관리되고 있는 실정이며 미생물 유래 가축용 대체사료원료 확보기술은 국내에서는 아직 시도되고 있지 않은 실정임. 이러한 현실을 극복하기 위해 본 연구팀은 축산 분야에서 시도되지 않은 미생물 유래 가축용 대체사료원료 적용기술을 위한 기초과학성 및 현장적용 실증연구를 통해 축산분야에서만 할 수 있는 고유의 동물영양학 핵심 원천연구기술을 새롭게 개척하여 미생물을 활용한 새로운 개념의 가축용 대체사료원료 개발이라는 도전적인 연구분야의 새로운 활로를 선도할 수 있을 것으로 판단되며 향후 장건강, 항염증, 항균, 수명연장 등과 관련된 다양한 기능성 식품소재에도 활용이 가능할 것으로 판단됨.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량

본 연구과제의 수행을 통해 연구진은 기계화된 연구내용을 100% 수행하였으며 관련된 결과를 성공적으로 도출한 것으로 자체 평가됨.

[별첨 1]

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량

본 연구과제 수행을 통해 SCI(E) 국제논문에 발표하였으며(1편 현재 revision 진행중) 국제학술대회에서 구두발표 및 포스터발표, 수상실적 및 자체 심포지엄 개최 등 연구성과 측면에서도 매우 우수한 것으로 자체 평가됨. 향후 후속연구와 연계하여 기술이전 등 상용화 기술과 연계할 예정임.

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
○ 가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료(단백질, 유지를 중심으로) 소재 발굴	20	100	○ 도출된 결과를 바탕으로 2단계 선행 연구와 연계하여 다양한 미생물 후보군 중에 안전성이 검증된 곰팡이와 효모를 대상으로 대체원료사료화 기술에 적용예정
○ 메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토	10	100	○ 도출된 결과를 바탕으로 2단계 선행 연구에서는 우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 단백질 성분중 아미노산의 질적/양적 평가를 통해 산업동물의 사양단계별 맞춤형 아미노산 공급 비율 결정 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨.
○ 다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축	20	100	○ 도출된 결과를 바탕으로 2단계 선행 연구에서는 우선적으로 곰팡이와 효모의 저비용-고효율 대량생산을 위해 우선적으로 다양한 농식품유래 폐자원 중 감귤박을 활용하여 배양을 최적화하는 배양형 정밀발효기술 적용이 우선인 것으로 판단됨 ○ 이후 3단계 심화연구를 통해 배양중심의 정밀발효기술 뿐만 아니라 CRSPR/Cas9을 통한 유전자조작 기술에 의한 효모/곰팡이 단백질 최적생산 선도기술 실험이 연계되어 First-in-class 맞춤형 정밀발효기술을 확립하고자 함

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
○ 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립	20	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 단계 개념연구를 통해 2단계 선행 연구에서는 우선적으로 안전성이 검증된 곰팡이와 효모 유래의 단백질을 대상으로 안전성 및 소화율 평가 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨 ○ 본 연구진의 핵심기술인 생체대체 모델 예쁜 꼬마선충 <i>C. elegans</i>를 이용하여 생체의 안전성 여부 및 관련 유전자 탐색연구를 진행하고 이후 실험동물을 통한 안전성을 거쳐 산업동물에 적용하는 연구기법을 도입할 예정임.
○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립	10	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계 개념연구를 통해 우선적으로 양돈분야의 적용점을 평가하여 단백질 원료사료 20% 대체시: 60원/kg 사료비감소의 경제적 가치를 가질수있을것으로 판단됨 ○ 이러한 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 우선적으로 양돈분야에 곰팡이 및 효모 유래 단백질을 대상으로 5, 10, 20% 원료사료대체에 따른 생산성 비교평가를 실시하는 것이 적합할 것으로 판단됨.
○ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출	20	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 도출된 결과를 바탕으로 2단계 선행연구에서는 우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 미생물 단백질을 대상으로 양돈산업에 사용되는 원료사료대체 효능평가를 우선적으로 수행하여 사료내 첨가수준을 예측하고 경제성 실증 실험을 실시할 예정임 ○ 이후 3단계 심화연구에서 미생물단백질 뿐만 아니라 미생물 유지를 통한 원료사료 대체가능성을 확대 평가하고 닭(육계, 산란계), 반추동물(한우, 젖소), 반려동물(반려견, 반려묘), 양어 등에 다양한 적용을 통해 사료화 공정 확립 및 상용화 기술개발로 연계할 예정임.
합계	100점	100%	

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

본 연구개발 결과를 종합하였을 때 연구계획서상의 기계화된 연구내용을 100% 성공적으로 수행하였으며 이러한 결과를 바탕으로 국내외 저명학술지 및 학술대회에 발표함으로써 본 연구과제의 중요성과 창의성을 성공적으로 부각시키고 관련 연구를 선도할 수 있는 기술력 및 기초과학성 자료를 확보한 것으로 판단됨.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

논문 평가시 학문분야별 JCR기준 상위논문에 대한 참조가 필요할 것으로 판단됨.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

토종미생물 이용으로 미생물 원료의 수입의존도를 낮추고 더 나아가 국가 간 자원경쟁력 확보 및 생물 자원 선진국으로 도약이 가능할것으로 판단되며 사료원료 대체제로 미생물을 사용함으로써 국제 곡물 가격 상승에 따라 급등하는 사료값에 완충 작용을 해줄 것으로 기대됨. 또한 수입의존도가 높은 사료원료들을 미생물을 활용하여 대체함으로써 국내 사료 공급의 안정화와 식량안보에 기여할 수 있음

IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
④ 대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 우선적으로 안전성이 검증된 곰팡이와 효모 유래의 단백질을 대상으로 안전성 및 소화율 평가 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨 ○ 본 연구진의 핵심기술인 생체대체모델 예쁜 꼬마선충 <i>C. elegans</i>를 이용하여 생체의 안전성 여부 및 관련 유전자 탐색연구를 진행하고 이후 실험동물을 통한 안전성을 거쳐 산업동물에 적용하는 연구기법을 도입할 예정임.
⑤ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 통한 경제성 분석, 농생명 산업화 기반 구축 및 농축산업 활용모델 정립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계 개념연구를 통해 우선적으로 양돈분야의 적용점을 평가하여 단백질 원료사료 20% 대체시: 60원/kg 사료비감소의 경제적 가치를 가질 수있을 것으로 판단됨 ○ 이러한 1단계 개념연구를 통해 2단계 선행연구에서는 우선적으로 양돈분야에 곰팡이 및 효모 유래 단백질을 대상으로 5, 10, 20% 원료사료대체에 따른 생산성 비교평가를 실시하는 것이 적합할 것으로 판단됨.
⑥ 미생물 유래 가축용 대체사료원료의 활용을 위한 기술로드맵 도출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 도출된 결과를 바탕으로 2단계 선행연구에서는 우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 미생물 단백질을 대상으로 양돈산업에 사용되는 원료사료대체 효능평가를 우선적으로 수행하여 사료내 첨가수준을 예측하고 경제성 실증 실험을 실시할 예정임 ○ 이후 3단계 심화연구에서 미생물단백질 뿐만 아니라 미생물 유지를 통한 원료사료 대체가능성을 확대 평가하고 닭(육계, 산란계), 반추동물(한우, 젖소), 반려동물(반려견, 반려묘), 양어 등에 다양한 적용을 통해 사료화 공정 확립 및 상용화 기술개발로 연계할 예정임.

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과목표	사업화지표										연구기반지표											
	지식재산권				기술실시(이전)		사업화				기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책·홍보		기타 (타연구활동등)			
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T 평가기능부	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출		투자유치	논문	SCI			비SCI	논문평균IF		학술발표	정책활용	홍보전시
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건				
가중치												30			60				10			
최종												1		2	1							

목표																				
당해 년도	목표									1	2	1								
	실적									1	5.9	2								1
달성률 (%)										100	100	100								100

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	가축사료 적용을 위한 식용 가능한 세균, 효모, 곰팡이 미세조류 등 미생물 후보군 탐색 및 미생물 유래 대체사료원료 발굴
②	메타분석을 통한 미생물 유래 대체사료원료의 특성 검토
③	다양한 미생물의 특성을 고려한 맞춤형 정밀발효기술 구축
④	대체사료원료의 축산적용을 위한 미생물 유래 대체사료원료의 이용성 및 안전성 평가 플랫폼 확립

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)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술		v				v	v			
②의 기술		v				v			v	
③의 기술				v			v	v		
④의 기술					v			v	v	

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	○ 다양한 미생물 후보군 중에 안전성이 검증된 곰팡이와 효모를 대상으로 대체원료사료화 기술에 적용예정
②의 기술	○ 우선적으로 곰팡이와 효모 유래의 단백질 성분중 아미노산의 질적/양적 평가를 통해 산업동물의 사양단계별 맞춤형 아미노산 공급 비율 결정 실험이 우선적으로 필요한 것으로 판단됨. 이후 유지를 대상으로 특성화 연구를 실시할 예정임
③의 기술	○ 우선적으로 곰팡이와 효모의 저비용-고효율 대량생산을 위해 우선적으로 다양한 농식품유래 폐자원 중 감귤박을 활용하여 배양을 최적화하는 배양형 정밀발효기술 적용이 우선인 것으로 판단됨 ○ 이후 심화연구를 통해 배양중심의 정밀발효기술 뿐만 아니라 CRSPR/Cas9을 통한 유전자조작기술에 의한 효모/곰팡이 단백질 최적생산 선도기술 실험이 연계되어 First-in-class 맞춤형 정밀발효기술을 확립하고자 함
④의 기술	○ 생체대체모델 예쁜 꼬마선충 C. elegans를 이용하여 생체의 안전성 여부 및 관련 유전자 탐색연구를 진행하고 이후 실험동물을 통한 안전성을 거쳐 산업동물에 적용하는 연구기법을 도입할 예정임.

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 (타연구 활용액) (명)	
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T P R O J E C T	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논문				학 술 발 표	정 책 활 용		홍 보 전 시
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	명	건	건			
가중치		20			20		20					20		10		5		5		
최종목표		3			1		1					3		5		3		2		
연구기간내 달성실적												1		2				1		
연구종료후 성과창출 계획		3			1		1					2		3		3		1		

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾			
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간		실용화예상시기 ³⁾	
기술이전시 선행조건 ⁴⁾			

- 1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성
- 2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리
통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리
- 3) 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등
- 4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업분야창의도전형융복합모델 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농업분야창의도전형융복합모델 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.