

영역	2	어젠다	2	대과제	3
과제 및 세부과제명		과제구분	연구분야	수행기간	과제책임자 및 세부과제 책임자
농업미생물 자원 확보 및 실용화 기술 개발		기관고유	미생물	'20~'23	버섯연구소 백일선
1) 작물 생육촉진용 미생물 개발 및 현장 적용연구		기관고유	미생물	'20~'23	버섯연구소 백일선
2) 복합 병 방제용 미생물 개발 및 현장 적용연구		기관고유	미생물	'20~'23	버섯연구소 문지영
색인용어	친환경농업, 미생물, 생육촉진, 병 방제				

### 1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발대상 기술의 경제적·산업적 중요성 및 연구개발의 필요성

- 1) 농업미생물은 화학비료와 농약을 대체할 수 있는 가장 중요한 친환경농업의 자원이며, 친환경 재배작물 농가에서는 작물생육촉진, 양분공급(생물비료), 병충해방제(생물농약) 등을 목적으로 유용한 미생물을 활용하고 있음.
- 2) 친환경농산물에 대한 수요 증대, 친환경농업 및 녹색성장에 따른 유용미생물의 수요와 시장 증가로 작물 생육촉진 및 병방제에 활성을 가지는 미생물제 개발이 확대되고 있으며, 미생물제로 가장 많이 상용되는 바실러스는 내생포자를 생성하여 제제화하기 용이한 미생물로 활용도가 높음(Nicholson, 2002; Cawoy *et al.*, 2011).
- 3) 식물호르몬 생산, 질소고정능, 박테리오클로로필 함량 우수 등 농업적 기능성이 우수한 미생물을 지속적으로 탐색하고 선발할 필요가 있음.
- 4) 최근에는 건강한 작물 주변의 마이크로바이옴을 정밀 진단하여 미생물군집을 인공적으로 토양에 처리하여 병을 방제하고 수량을 증가시키는 식물 마이크로바이옴 연구가 이루어지고 있음.
- 5) 경작지 건전토의 미생물 분포는 호기성세균, 방선균, 사상균, *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Azotobacter* sp. 탈질균, 암모니아산화균, 아질산산화세균 등 있음(Suh and Shin, 1997).
- 6) 밭토양에서 분리된 인산가용화균은 *Bacillus pumilus*, *Breviacillus* sp., *Paenibacillus peoriae*, *Cedecea davisae*, *Pseudomonas chlororaphis*, 시설재배지 토양에서 분리한 인산가용화균은 *Bacillus lentimorbus*, *Bacillus megaterium*, *Cellulimonas biazotea*, *Cellulomonas turbata* 등이 있음(Shu and Kwon, 2008).

- 7) 식물에 대한 양분흡수는 토양의 pH에 의해 영향을 받으며 작물마다 적합 재배 pH는 다르지만 일반적으로 pH 6.5 내외에서 토양의 미네랄 및 칼슘이 풍부하므로 토양의 산성화를 막는 것이 중요함.
- 8) 국내에 등록된 토양개량 및 작물생육용 미생물제는 173종, 병충해방제용 미생물제는 103종으로 알려져 있으며(2019), 국내에서 개발된 생물농약의 90% 이상이 *Bacillus* sp.로 펩타이드계의 항균물질을 생산함.
- 9) 토양근권미생물은 작물의 뿌리생육 발달에 유리한 토양환경을 조성하며 토양 내 유해균과 길항작용으로 유익균을 증가시키는 역할을 함.
- 10) 유익한 토양미생물은 각종 양분을 가용화하며 유기질을 분해하여 토양 내 유기물 함량을 높여주므로 토양개량제로서의 생물비료 개발이 지속적으로 필요함.
- 11) 농업 현장에서 미생물비료(biofertilizer)로 가장 많이 활용되고 있는 광합성세균은 IAA 생성, 질소고정 등의 역할을 함.
- 12) 세계 미생물제품 시장 규모는 2,590억 달러(297조원, 2016년)이고, 그 중 농업미생물 시장은 23억 달러(2조6,400억원, 2015년) 수준임. 농업미생물 시장은 연간 평균 15.5% 성장하여 2020년까지 47억 달러(5조4,300억원)까지 성장할 것으로 예상됨. (Global Agricultural Microbials Market - Growth, Forecasts and Trends (2016-2021), Research and Markets)
- 13) 국내 미생물 시장 규모는 3.4조원(2016)이며, 그 중 미생물비료가 297억, 미생물농약이 139억으로 증가되고 있는 실정임.
- 14) 국내 미생물 시장의 대표 기업으로는 팜한농, 그린바이오텍, 대유(농업용), CTC바이오, 대호(축산용), 대상, CJ, 국순당, 오투기, 샘표(식품용) 등이 있으며 이들 기업은 연평균 3.5%의 성장을 보이고 있음.
- 15) 전 세계적으로 생물다양성이 감소되는 위기상황으로 1992년 생물다양성협약(CBD; Convention on Biological Diversity)이 채택됨. 생물다양성협약은 생물 및 유전자원에 대한 국가의 주권적 권리가 인정되고, 이용으로부터 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유를 규정함.
- 16) 2010년 UN 생물다양성협약 10차 총회에서 '생물 및 유전자원에 대한 접근 및 그것으로 인하여 발생하는 이익의 공유'를 다룬 나고야의정서(ABS; Nagoya Protocol on Access and Benefit Sharing)가 채택됨. 우리나라도 2018년 8월 18일, 나고야의정서 이행을 위한 유전자원법이 전면 시행됨. 따라서 외국의 생물 및 유전자원을 사용할 때 제공공에게 사전에 통보하여 허가를 받고, 발생한 이익에 대하여 대가(로열티)를 지불해야 함. 이로 인한 분쟁이 생겼을 경우, 우리나라는 환경부 국립생물자원관에서 대응, 교육 등을 수행함

나. 연구개발대상 기술의 국내·외 현황

1) 국내 연구 현황

- 가) 작물 생육촉진 및 병방제 복합기능성 *Bacillus velezensis* GH1-13(농약과학회지, 2016)
- 나) 토착 광합성세균(*Rhodospseudomonas palustris* 32-J)의 딸기 수량증진 및 과실품질 증진 효과(제주도원, 2015)
- 다) *Arthrobacter woluwensis* ED의 토마토 생장촉진 효과(한국미생물학회지, 2014)
- 라) *Bacillus* sp.가 생산하는 Fusaricidin 대량생산기술 개발(생명공학연구원, 2014)
- 마) 전남 주요 원예작물인 배추, 양파를 대상으로 농촌진흥청에서 개발한 농업미생물 *Bacillus subtilis* (B91281) *Pseudomonas* sp.(P91282), *Kluyvera* sp.(K91283)의 현장효과 검증(전남도원, 2014)
- 바) 토착 광합성세균 선발 및 대량배양조건 확립 연구(제주도원, 2013)
- 사) 난용성인산염 가용화 효모와 항진균 효과를 가진 세균 혼합배양액을 이용한 고추 병해의 생물학적 방제(한국미생물학회지, 2013)
- 아) 유용미생물 처리가 고추의 생육 및 과실성분에 미치는 영향(한국유기농업학회지, 2012)
- 자) 바실러스 생성 면역활성 유도물질 동정 및 합성(농과원, 2011)
- 차) 한국전통 젓갈에서 분리한 *Bacillus subtilis* JKk238은 고추역병, 딸기흰가루병 작물의 뿌리생육 발달에 유리한 토양환경을 조성하며 lipopeptide계 항균물질을 생산함(홍살림, 2007)
- 카) *Bacillus* sp. SD-10이 생산하는 항균물질에 의한 푸른곰팡이 저해 활성(생명과학회지, 2004)
- 타) 우리나라는 균주 16만여주를 보유한 세계 5위 미생물자원 보유국(Linhuan Wu et al., 2016)이고 신규 미생물 발굴 능력이 우수하지만(발효미생물 종가프로젝트 예비 타당성 추진을 위한 사업계획 보완 및 타당성 분석, 과학기술정책연구원, 2011), 미생물제품으로 사업화나 실용화가 미흡한 수준임.
- 파) 국내 미생물농약 연구는 1980년을 전후로 기초연구가 시작되어 인삼뿌리썩음병, 모잘록병, 역병, 잣빛곰팡이병 등의 방제를 위한 연구가 수행되었음.
- 하) 국내 최초의 미생물농약은 2003년에 등록된 오이흰가루병 방제용 '탑시드액상수화제' ((주)그린바이오텍), 배추좀나방 방제용 '솔빛채액상수화제'임. 현재 생물농약은 살균용 17종, 살충용 12종이 등록되어 있음.
- 가) 벼 도열병 방제제로 Kasugamycin(*Streptomyces kasugaensis*에서 분리된 항생제), Blastidicin-S (*St. griseochromogenes*에서 유래)가 많이 사용되고 있으며, 다양한 식물병원균에 억제효과를 나타내는 미생물유래 물질들(polyoxin, validamycin, mildiomyacin, natamycin, oxytetracyclin, streptomycin)이 개발되어 있음.
- 나) 항생기작 기반의 미생물농약과 달리, 식물에 면역기능을 부여하여 병 저항력을 높이는 미생물제는 여러가지 병에 대해 복합 방제가 가능함. 병 저항성을 유도하는 생육촉진근권세균(PGPR; Plant Growth Promoting Rhizobacteria)은 식물 세포가 미생물의 유도저항성 신호물질을 감지하여 저항성물질과 조직의 강화를 통해 면역기능을 유도하는 원리임.

- 다) 식물에 병 저항성을 유도하는 바실러스 세균으로 *B. subtilis*, *pumilus*, *amyloliquefaciens*, *thuringiensis*, *mycooides*, *pasteurii*, *sphaericus*, *cereus*가 보고되어 있음. (KIC News 14(4), 2011)
- 라) 2006년에 개발된 *B. vallismortis* EXTN-1은 식물의 자체 방어기작을 활성화시켜 병 저항성 단백질 활성화, 세포조직 강화, 과민감 반응, 생육촉진 효과를 나타낸다고 보고됨. (농과원, 2006) 이 균주는 동부한농으로 기술 이전되어 엑스텐 입제, 상토, 액제, 유기 비료 등 10여종의 관련 제품으로 실용화됨.
- 마) 바실러스 세균으로부터 동정된 저분자 환형펩타이드(cyclic peptides)를 토대로 합성된 신규물질(H3)을 0.1~1.0 ppm 농도로 처리할 경우, 세균성 무름병균(*Pectobacterium carotovora*)을 97% 이상 방제한다고 보고됨.
- 바) *B. amyloliquefaciens*가 노지고추의 탄저병에 대해 36.5%의 방제가를, *Chryseobacterium* sp.이 세균성 점무늬병에 대해 47.6%의 방제가를 나타낸다고 보고됨(경북도원, 2015).
- 사) 키다리병 방제용 미생물 처리방법은 먼저 종자를 24~36시간 물에 침지 후, 미생물제에 36~48시간 처리하는 것이 효과가 좋았음. 전남 지역에서 활용되고 있는 고초균, 광합성균, 유산균, 효모는 탄저병, 시들음병에 항균활성을 보였음. (전남도원, 2014)

## 2) 국외 연구 현황

- 가) 광합성세균 *Rhodospseudomonas palustris*에 의한 벼 수량 증진 및 메탄배출 저감 효과 (Applied soil ecology, 2016)
- 나) *B. amyloliquefaciens* FZB42균주 대사 산물에 의한 병원균 억제 및 식물 전신유도 저항성에 대한 연구(Chowdhury 등, 2015)
- 다) PGPRs과 지렁이 분변토에 의한 발작물의 수량 및 품질 향상, 토양의 질 향상(중국, 2015)
- 라) 시설재배토양 및 논토양은 인산부족현상이 빈번하게 발생되는데 이는 난용성인산염이 가용화되지 못해 발생됨. 토양의 난용성인산염은 세균에 의해 유효인산으로 전환되며 관련된 세균은 *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Rhizobium*, *Meosorhisobium*, *Sinorhizobium* 등(Asea et al., 1988; Salih et al., 1989; Rodriguez and Fraga, 1999)
- 마) 세계 각국은 미생물관련 특허법을 강화하여 기능성 미생물의 자원 확보를 위해 탐색에 심혈을 기울이고 있음
- 바) 네덜란드 Koppert사는 작물생육촉진 미생물로 *Trichoderma* sp., 독일 EBi-Tep사에서는 *Bacillus subtilis* FZB45 균주를 상용화함
- 사) 국외 생물농약 연구개발은 1970년 초반에 본격 시작되었으며, 대표적인 제품으로 Harpin (미생물 추출 단백질, Eden bioscience사), Serenade(바실러스, Agrquest사), Triatum (곰팡이, Koppert사)가 있음.

아) 식물에 전신획득저항성을 부여하는 Harpin 단백질은 *Pectobacterium amylovora*가 생산하며 식물병 방제, 생육촉진 효과가 보고됨. Harpin 유전자를 대장균에 형질전환시켜 대량생산하며 Massenger라는 상표로 상용화됨.

다. 국내외 연구현황 비교 및 필요 연구 분야

연구현황 비교		필요연구 분야 · 내용
국 내	국 외	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작물 뿌리생육 발달에 영향을 미치는 미생물에 대한 연구</li> <li>○ 제제화하기 쉬운 특성을 가진 <i>Bacillus subtilis</i>에 대한 연구가 집중됨</li> <li>○ 식물병원성균에 대한 항균활성 우수 균주 선발, 실용화</li> <li>○ 항균활성 기작뿐만 아니라 농작물의 면역기능을 강화하는 미생물제 개발연구 진행</li> <li>○ 주로 미생물 배양액의 농도, 처리횟수별 방제효과 검정</li> <li>○ 일부 대학에서 토양미생물군 유래 신기능성물질 분리, 신규물질 합성 연구 진행</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미생물이 토양환경 및 대기 환경에 미치는 영향 분석</li> <li>○ 미생물의 자원 확보 및 탐색에 심혈을 기울임</li> <li>○ 생명공학 기법을 활용하여 미생물의 유용물질 생산 연구 수행</li> <li>○ 미생물의 대사경로를 변경하여 유용물질 생산을 극대화시키는 등 배양액의 효과보다 미생물이 생산하는 물질에 초점</li> <li>○ 식물 근권미생물 연구를 위한 토양 마이크로바이옴 분석 활발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 토양 미생물 다양성을 위한 유용미생물 혼합 처리 효과 분석</li> <li>○ 작물 생육 단계별 적합 미생물 및 처리기준 연구</li> <li>○ 미생물 자원 확보를 위해서는 다양한 장소에서 미생물 분리가 필요</li> <li>○ 적용범위가 넓은 복합 기능성 유용미생물 발굴</li> <li>○ 우수 균주 실용화, 산업화 연구(고활성, 환경스트레스 내성 균주 발굴)</li> <li>○ 우수 균주의 유효물질 동정</li> </ul>

2. 연구개발 목표 및 내용

가. 정성적 성과 목표

연차	목 표
1차년도 (2020년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물 생육촉진용 유용미생물 수집 및 특성검정</li> <li>- 미생물자원 수집 및 복합 병 방제용 우수 균주 선발</li> <li>- 우수 균주 분리동정</li> </ul>
2차년도 (2021년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선발 미생물 작물 생육효과 검정(pot test)</li> <li>- 선발 균주 병 방제효과 검정(pot test)</li> <li>- 우수 미생물 적합 배양조건 구명</li> </ul>

2020 농업과학기술개발 ■ 시험연구계획서

연차	목 표
3차년도 (2022년)	- 선발미생물의 토양 정착능 검정 - 토양 내 선발미생물 밀도조사를 위한 특이 프라이머 제작 - 개발 미생물제 작물 적용 시험(field test)
4차년도 (2023년)	- 유용미생물 제제화 연구
최종	작물 생육촉진용·복합 병 방제용 미생물제 개발 및 현장적용 연구

나. 정량적 성과 목표

성과지표명	연도	1년차 (2020년)		2년차 (2021년)		3년차 (2022년)		4년차 (2023년)		계	
		목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적
논문게재	SCI										
	비SCI					1		2		3	
학술발표	국제							2		2	
	국내			2		2				4	
균주특허등록						1		1		2	
홍보				2		2		2		6	
계				4		6		7		17	

다. 종합연구내용

세 부 과 제	주 요 연 구 내 용	연 구 목 표	수행기간
1) 작물 생육촉진용 미생물 개발 및 현장적용연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작물생육촉진용 미생물 수집·선발 및 특성검정</li> <li>○ 작물적용시험(pot, 포장)</li> <li>○ 유용미생물제 제제화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작물생육촉진용 미생물 선발</li> <li>○ 유용미생물제 개발</li> </ul>	'20~'23
2) 복합 병 방제용 미생물 개발 및 현장적용연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 유용미생물 수집 및 자원 확보</li> <li>○ 선발 균주 분리·동정</li> <li>○ 선발 균주 병 방제 효과 검정</li> <li>○ 적합 배양조건 구명</li> <li>○ 선발 미생물 작물 적용시험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 유용미생물 수집</li> <li>○ 우수 균주 생물자원 등록</li> <li>○ 선발 균주의 작물적용효과 확인</li> <li>○ 선발 균주 최적 배양조건 설정</li> <li>○ 선발 미생물의 필드 적용가능 확인</li> </ul>	'20~'23

라. 당해년도 세부연구내용

세 부 과 제	연차	연 구 내 용
1) 작물 생육촉진용 미생물 개발 및 현장적용연구	1/4	<p><b>&lt;시험1&gt; 유용미생물 수집 및 특성검정(20)</b>                      가. 수집대상 : 건전토, 버섯수확후배지, 호수 등                      나. 수집미생물 : 세균, 진균류 등 수집대상별 100여 균주                      다. 조사내용 : IAA생성능, siderophore 생성능, 인산가용화능, 질소고정능 등</p> <p><b>&lt;시험2&gt; 생육촉진용 유용미생물 분리·동정(20)</b>                      가. 시험균주 : &lt;시험1&gt; 선발 미생물                      나. 실험내용 : ITS(진균류), 16srRNA, gyrB(세균류), 균주 특이 프라이머, DNA prep., T-vector 삽입, electrophoresis로 band 확인, seq.분석</p>
2) 복합 병 방제용 미생물 개발 및 현장적용연구	1/4	<p><b>&lt;시험1&gt; 유용미생물 수집 및 특성검정(20)</b>                      가. 수집대상 : 유기재배지, 건전토, 버섯수확후배지 등                      나. 수집미생물 : 세균, 진균류 등 수집대상별 100여 균주                      다. 조사내용 : 작물 주요 병원균에 대한 항균활성                      - 잣빛곰팡이병, 뿌리썩음병, 탄저병, 시들음병, 역병 등                      라. 실험방법 : 디스크확산법, 군사 억제력 측정</p> <p><b>&lt;시험2&gt; 항균활성 유용미생물 분리·동정(20)</b>                      가. 시험균주 : &lt;시험1&gt; 선발 미생물                      나. 실험내용 : ITS(진균류), 16srRNA, gyrB(세균류), 균주 특이프라이머, DNA prep., T-vector 삽입, electrophoresis로 band 확인, seq.분석</p>

3. 연구개발결과의 활용방안 및 기대성과

가. 연구개발결과의 활용방안

- 1) 학술발표 및 논문게재
  - 가) 작물 생육촉진 미생물 선발(학술발표, 2021)
  - 나) 유용미생물 배양조건 및 특성 검정(학술발표, 2022)
  - 다) 작물 생육촉진 효과가 있는 미생물 특성(논문게재, 2023)
  - 라) 경기도 토착 미생물의 복합 병 방제효과(논문게재, 2023)
- 2) 균주특허
  - 가) 작물 생육촉진용 미생물(2023)
  - 나) 항균활성 우수 미생물(2023)

2020 농업과학기술개발 ■ 시험연구계획서

3) 영농활용

가) 작물 병 방제를 위한 유용미생물 배양 방법

나. 기대성과

1) 기술적 측면

가) 작물 생육촉진용 우수 미생물 균주 및 특허보유

나) 우수 미생물 작물 적용기술개발

다) 병 방제용 유용미생물제 개발

2) 경제적·산업적 측면

가) 생육촉진용 미생물제 농가적용으로 안전 농산물 생산에 기여

나) 효과적인 병 방제로 친환경 농가의 작물 병해발생 억제

4. 연구원 편성

세 부 과 제	구 분	소 속	직 급	성 명	참여기간	참여비율(%)
1) 작물 생육촉진용 미생물 개발 및 현장적용연구	책임자	버섯연구소	지방농업연구사	백일선	'20~	50
	공동연구자	"	"	문지영	"	20
	"	"	"	원태진	"	15
	"	"	"	남주희	"	10
	"	"	지방농업연구관	정구현	"	5
2) 복합 병 방제용 미생물 개발 및 현장적용연구	책임자	버섯연구소	지방농업연구사	문지영	'20~	50
	공동연구자	"	"	백일선	"	20
	"	"	"	원태진	"	15
	"	"	"	남주희	"	10
	"	"	지방농업연구관	정구현	"	5

5. 연구개발비 소요명세서

(단위 : 백만원)

과제 및 세부과제명	1차년도 (2020)	2차년도 (2021)	3차년도 (2022)	4차년도 (2023)	합 계
○ 농업미생물 자원 확보 및 실용화기술 개발	50	50	50	50	200
1) 작물 생육촉진용 미생물 개발 및 현장 적용연구	25	25	25	25	100
2) 복합 병 방제용 미생물 개발 및 현장 적용연구	25	25	25	25	100