

연구개발사업계획(안) 제안서

제안과제명	식물생장촉진세균을 이용한 친환경 토양중금속오염 정화기법 개발					
제안기관 (제안자명)	김사열 (경북대학교 산학협력단) ※ 예시 : 홍길동(oo 대학교 산학협력단)					
담당자	부서	연구협약팀	직위	주무관	성명	김정은
	전화	053)950-2227	팩스	053)950-5522	E-mail	kke@knu.ac.kr
연구기간	2021. 3 ~ 2021. 12 ※ 2021년도 연구 추진 예정 기간					
예상 연구비	30,000 천원(참여기업체명: , 부담금: 천원) ※ 산학협력연구개발사업 과제는 참여기업체명 및 기업체 부담금(현금, 현물)을 기재 바람					
과제분류 (해당사항에 ■표)	<input type="checkbox"/> 환경정책연구 <input type="checkbox"/> 조사연구 <input checked="" type="checkbox"/> 현안기술개발연구 <input type="checkbox"/> 산학연협력연구					
연구분야 및 세부연구분야 (해당사항에 ■표)	하폐수 처리		상수도 및 정수		수질관리	
	<input type="checkbox"/> 물리화학적 처리 <input type="checkbox"/> 생물학적 처리 <input type="checkbox"/> 막처리 및 재이용 <input type="checkbox"/> 하수처리시스템 <input type="checkbox"/> 질소 및 인 제거 <input type="checkbox"/> 하폐수 처리 기타 <input type="checkbox"/> 축산폐수 처리		<input type="checkbox"/> 막분리 <input type="checkbox"/> 정수처리 및 수질관리 <input type="checkbox"/> 고도정수처리 <input type="checkbox"/> 상수관망		<input type="checkbox"/> 수질오염 <input type="checkbox"/> 수질모델 <input type="checkbox"/> 수질관리기타	
	자연환경분야		폐기물관리		대기관리	
	<input type="checkbox"/> 환경정책 <input type="checkbox"/> 생활환경 <input type="checkbox"/> 건강위해성 <input type="checkbox"/> 생태관리 <input type="checkbox"/> 소음관리 <input type="checkbox"/> 환경영향평가 <input type="checkbox"/> 환경오염사고대비 <input type="checkbox"/> 사전오염예방기술 <input type="checkbox"/> 청정기술개발		<input type="checkbox"/> 매립 및 침출수 처리 <input type="checkbox"/> 슬러지 처리 <input type="checkbox"/> 소각 및 열분해 <input type="checkbox"/> 재활용 및 자원화 <input type="checkbox"/> 음식물쓰레기 처리 <input type="checkbox"/> 폐기물관리 기타		<input type="checkbox"/> 대기오염측정 및 관리 <input type="checkbox"/> 대기오염모델링 및 위해도 <input type="checkbox"/> 대기오염 처리기술 <input type="checkbox"/> VOCs 및 악취처리	
	토양지하수오염관리 및 처리		기타환경분야		기후변화대응분야	
<input checked="" type="checkbox"/> 오염토양 처리 및 관리 <input type="checkbox"/> 폐광토양오염 및 오염지하수처리 <input type="checkbox"/> 지하수 환경관리		<input type="checkbox"/> 기타		<input type="checkbox"/> 온실가스배출량산정 <input type="checkbox"/> 온실가스배출량감축연구 <input type="checkbox"/> 배출권 거래 <input type="checkbox"/> 기타		

연구의 목적 및
필요성

○ 연구의 배경 및 필요성

1) 대구 지역 토양 중금속 오염 현황

① 달성폐광산

- 대구 달성군 가창면 상원리 소재의 달성광산은 일제강점기 시대인 1916년 중석(텅스텐) 채굴이 시작된 광산이다. 하지만 1975년 이후 매장량이 소진돼 폐광된 광산이다. 이후 1998년에 달성군이 폐광 지역에 자연정화시설을 설치하였으며, 현재 광해 공단이 운영하고 있다. 하지만 해당 시설은 사실상 기능을 상실한 채 방치 중이다. 이러한 폐광 유출수로 인한 오염을 막고자 달성군은 ‘달성 폐광산 침출수 정화시설’을 유치하여 사업을 추진할 계획에 있으나, 이미 현재까지의 폐광 침출수로 인한 중금속오염은 하천 및 토양으로 침습하여 정화작업이 신속히 필요한 상황이다.



그림 1. 달성폐광산 자연정화시설

② 주한미군기지 주변 지역

- 2018년 환경부에서 실시한 ‘주한미군 주변 지역 환경오염조사’에 따르면 대구 남구의 캠프 헨리·캠프 위커·캠프 위커 H-805 인근 토양에서 적용기준을 초과한 구리, 카드뮴, 비소, 납, 아연 등이 검출되었다. 2022년 반환예정인 캠프 위커 부지의 경우, 토지 개발 및 활용을 위하여 토지정화작업이 필요할 것으로 예상된다.

③ 안심 뉴타운 지역(구 안심 연료단지)

- 안심 뉴타운 개발지역인 구) 안심 연료단지 주변 터는 다량의 중금속과 유류오염이 심각한 실정이다. 다행히 2019년 10월 20일 ‘토양치환공법’으로 토양 정화작업을 실시할 것으로 합의되었지만, 이미 오염된 주변 토양 및 지하수의 오염을 100% 제거하기는 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 뉴타운 주변에 중금속 고축적 식물 식재 등을 통한 생물학적 정화기법이 병행된다면, 추후 중금속오염 완

화에 큰 효과가 있을 것으로 기대한다.



그림 2. 안심뉴타운 중금속오염 관련 기사(헬로TV 발췌)

④ 그 외 오염지역 및 완충녹지의 문제점

- 2019년 대구염색공단 대구배출사업단에서 오염 대기를 무단 배출하는 등 공단 주변 지역은 지속해서 오염에 노출될 가능성이 있다. 이러한 지역에 오염 정화 효과가 높은 식물로 완충녹지를 구성할 경우 지역사회의 환경 오염 저감에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 여겨진다.
- 대구시는 서구 염색공단 등에 완충녹지를 조성하는 등 오염 방지를 위해 노력하고 있다. 하지만 지속적인 관심 부재와 관리부실로 제 역할을 하지 못하는 완충녹지(울산 울주군에 '생명의 숲' 파괴, 경기도 광주 하남시 완충녹지 파괴 등)는 여전히 많은 실정이다.
- 현재 완충녹지 조성 및 관리에 관한 세부 법령은 존재하고 있지 않다. 완충녹지가 제대로 임무를 수행하기 위해서는, 오염정화에 특화된 식물의 식재와 지속적인 관리가 필수적이다. 하지만 현재 완충녹지 조성 시 고려해야 할 목본 및 초본의 구성에 따른 자료는 전혀 없는 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 얻은 결과는 완충녹지 조성 시 고려되어야 할 식물 선택과 관리 강화에 관한 법령 제정에 중요한 기초자료가 될 것이다.

2) 식물-미생물을 이용한 친환경 중금속 정화기법

① 식물정화법(Phytoremediation)

- 식물은 움직일 수 없으므로 환경 오염에 직접 노출될 수밖에 없다. 하지만 식물은 다양한 오염 환경에서 생존을 도모하기 위한 다양한 방어 체계를 체내에 가지고 있다. 실제로 식물은 중금속, 유기 오염 물질, 방사성 물질 등 다양한 오염원을 세포 내 액포에 저장하거나, 안전한 물질로 분해하는 체계 등을 통해 오염된 환경을 극복하며 생

존한다. 이러한 식물의 능력을 이용하여 오염된 토양을 정화하는 기술을 식물정화법이라고 한다.

- 식물정화법은 1986년 우크라이나 체르노빌의 방사성 물질 제거를 위해 해바라기를 사용한 이래, 다양한 중금속 환경정화를 위해 유채, 포플러 등을 사용하여 토양 정화를 위한 시도가 이어지고 있다. 식물정화법은 기존의 물리·화학적 토양정화방법보다 친환경적이고, 2차 오염이 없으며, 경제적이라는 장점이 있어 주목받고 있다.

② 식물생장촉진근류세균(PGPR; Plant growth-promoting rhizobacteria)

- 식물은 움직일 수 없는 단점을 극복하기 위해 주변 생물과 긍정적인 상호협력 관계를 맺는다. 이중 식물의 뿌리 및 근권에 서식하며 식물의 성장과 스트레스 저감에 큰 도움을 주는 미생물을 PGPR이라고 한다. PGPR은 옥신 등 식물생장호르몬 분비하고, 토양 양분 가용화 및 질소 고정 등을 통하여 식물의 성장을 촉진할 수 있다. 또한, 스트레스 환경에 처한 식물에 유도저항성(ISR; induced systemic resistance)을 일으켜, 다양한 환경에 대한 저항성을 높여 척박한 환경에서 식물이 성공적으로 생존할 수 있게 도와준다. 이러한 식물-PGPR간의 협력관계를 잘 이용한다면 농업, 환경정화 등 다양한 분야에 친환경적인 이용이 가능할 것이다.



그림 3. *Bacillus* sp. KNUC0118 의한 식물생장촉진효과

③ 식물-PGPR을 이용한 강화된-식물정화법(Enhanced-phytoremediation)

- 식물은 다양한 오염에 대한 방어 체계를 가져 오염된 환경을 극복할 수 있지만, 오염의 정도가 한계수위를 넘으면 생장이 불량하거나 고사하는 등의 문제를 갖고 있다. 식물에 의한 토양 오염물질 흡수는 식물의 성장과 매우 큰 상관관계를 가지고 있으므로, 식물의 성공적인 성장은 토양 정화의 효율을 높이기 위해 해결해야 할 과제이다.

- 최근 기존의 식물정화법에 PGPR을 도입한 강화된-식물정화법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. PGPR은 식물의 성장촉진 및 환경 스트레스에 대한 저항성을 높여줄 수 있으므로, 오염된 토양에서 식물의 성공적인 성장을 도울 수 있다. 또한, PGPR은 탄산칼슘 형성 등을 통해 토양을 알칼리화하여 중금속이 지하수로 흘러나오는 것을 방지하거나, 중금속을 독성이 없는 형태로 전환하는 등 다양한 메커니즘을 통하여 토양오염 정화에도 도움을 줄 수 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서 식물-PGPR을 이용한 강화된-식물정화법은 기존 식물정화법의 한계를 탈피하여 성공적인 친환경 토양 정화에 도움을 줄 것으로 주목받고 있다.

3) 연구의 필요성

- 달성 폐광산, 미군반환기지, 안심 뉴타운의 사례에서 볼 수 있듯이, 대구지역도 중금속오염으로부터 자유롭지 않다. 현재 안심 뉴타운 등 일부 지역에서 대규모 토양오염정화가 이루어지고 있지만, 대부분 물리·화학적인 처리방법에 의존한 방법이 대부분이다. 이러한 방법은 처리지역 외 주변 지역의 토양오염원 제거가 어렵고 지하수까지 침투한 오염물질 제거가 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 따라서 장기적으로 토양오염을 정화하고, 지속해서 발생할 수 있는 추가 오염에 대비할 수 있는 친환경 토양정화법의 연구 및 적용이 절실한 실정이다.
- 식물-PGPR을 활용한 식물정화법은 오염지역 내 녹지 조성을 통해 토양 정화를 할 수 있음과 동시에, 현재 큰 문제로 대두되고 있는 이산화탄소 감축, 미세먼지 제거 등 추가적인 이로운 효과를 얻을 수 있는 좋은 방법이 될 것으로 연구가 매우 필요하다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는, 오염지역 녹지 조성과 관련된 법령 제정 등에 좋은 자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

○ 연구의 목적

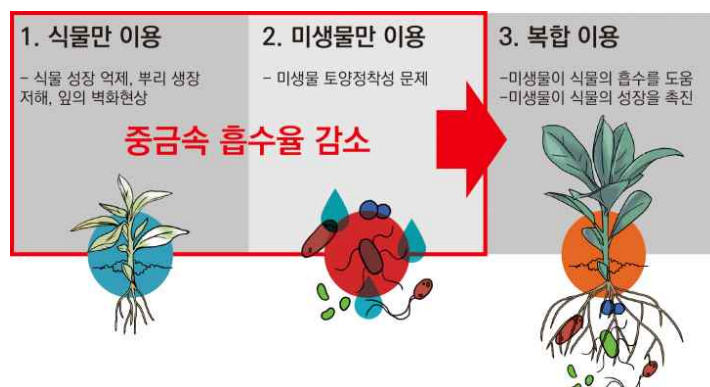


그림 4. 연구의 목적 도안

- 본 연구는 ‘**식물-식물생장촉진근류세균(PGPR)을 사용하여 중금속 오염 토양을 정화**’ 하는 데 그 목적이 있다. 이를 위하여 1) 식물에 생장촉진 효과가 있는 PGPR 후보군을 설정하고, 2) PGPR에 의한 식물 생장촉진, 중금속 저항성 증진 및 중금속 흡수 효과에 대해 실험실 내 환경에서 검증한 뒤, 3) 실제 중금속오염토양환경에 적용하여 재검증하고자 한다.
- 본 연구의 결과는, 완충녹지대 조성에 관한 법률에 좋은 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

○ 국내외 선행연구 동향 기술

1) 국내 선행연구

- 생물정화법에 관한 국내연구는 주로 대학이 중심이 되어 수행됐다. 국내대학에서 추진된 연구는 이화여대, 경원대 중심으로 사격장의 중금속 오염토양의 식물이용 생물학적 토양정화기법을 연구하였고, 광주과학기술원, 경기대, 광운대 등 환경공학과를 중심으로 환경 복원과 관련된 연구를 수행하였다.
- 그 외 2013년 국립산림과학원과 포스텍, (주)화이젠이 공동으로 중금속을 무독화하는 신품종 포플러를 개발, 경북 봉화군 금오광산 0.6 ha에 이를 시범 식재한 결과 중금속 흡수 능력과 나무의 생존율이 기존 일반 포플러 대비 25% 정도 높게 나타났으며, 기존 포플러 대비 1.4~1.8배 정도의 중금속(카드뮴, 비소) 흡수율 증가하는 것으로 보고하였다.
- 2017년 충북대학교의 한지현 등에 의해 봉의 꼬리라는 국내의 자생하는 양치식물을 이용하여 비소 오염원에 대한 복원을 실행하였다.
- 식물-미생물을 이용하여 오염토양정화를 시도한 연구의 경우, 충북대학교(사동민)에서 주로 수행되었다. 하지만 국내에서 진행된 식물정화법 연구의 경우, 식물 그 자체만을 이용하여 토양을 정화한 사례가 대부분이며, 식물-PGPR을 이용하여 토양 중금속정화에 관한 연구를 시도한 예는 극소수이다. 식물-PGPR을 적절히 활용하여 토양 중금속정화에 이용한다면 더 효과적인 토양 정화가 가능할 것으로 기대한다.

2) 국외 선행 연구

- 생물학적 토양정화법은 90년대부터 미국, 독일, 네덜란드 등 환경기

	<p>술선진국에서 오염된 토양복구, 오염지하수, 침출수, 오·폐수 등의 오염된 수질정화 그리고 대기 정화 등에 광범위하게 적용됐으며, 기존의 물리-화학적 토양정화기법을 대체하기 위해 노력하고 있다. 하지만 아직 실제 환경에 생물학적 토양정화기법을 사용하는 예는 극히 드문 실정이다. 미국의 경우, 토양 중금속정화 사업 중 생물학적 토양정화기법을 사용한 경우는 1%에 불과하다.</p> <p>- 식물-미생물을 활용하는 강화된 식물정화법의 등장과 함께, 선진국에서는 식물-PGPR을 이용한 토양 정화 및 생태 복원 연구를 앞다투어 추진하고 있다. 특히 독일, 미국, 캐나다를 중심으로 강화된 식물정화법의 적용과 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있다.</p> <p>- 중국의 경우 2016년부터 생물학적 토양정화기법에 관한 연구를 국가 단위에서 추진하고 있다. 실례로 2004~2015년까지는 1-2건 정도의 특허가 존재하지만, 2016년부터 서서히 증가한 특허 수는 2017년에는 32건으로 2004~2015년에 비해 약 400배 증가하였다.</p> <p>- UN의 지속 가능한 발전을 위한 ‘2030 아젠다’의 수행을 위해 선진국들은 앞다투어 생물정화법에 관한 연구를 수행하고 있다. 특히 식물을 이용한 생물정화법은 이산화탄소 감축, 미세먼지 감소 등 다양한 이로인한 추가효과가 있어 더욱 주목받고 있다.</p>
<p>주요 연구내용</p>	<p>○ 연구의 목표</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 식물 성장촉진 및 환경 스트레스 저항성을 일으키는 PGPR 자원 확보. 2) 식물-PGPR을 활용하여 고효율 토양중금속 정화기술 개발. 3) 실제 토양환경 적용 가능성 모색 및 정책 제안 <p>○ 연구 추진전략 및 방법</p> <p>1) 연구 추진전략</p> <div data-bbox="427 1585 1315 2069"> <div> <p>1 단계 기초연구</p> <ul style="list-style-type: none"> • 실험에 사용할 PGPR 자원 선정 • 실험에 사용할 식물 자원 선정 • 식물관련 PGPR자원 특성 확인 </div> <div> <p>2 단계 시험 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> • PGPR에 의한 식물 성장 촉진 효과 확인 • PGPR에 의한 식물 중금속 저항성 증대 효과 확인 • PGPR에 의한 식물 중금속 저항성 증대 메커니즘 규명 • 식물 체내 중금속 흡수량 증가 및 토양 정화 여부 검증 </div> </div>

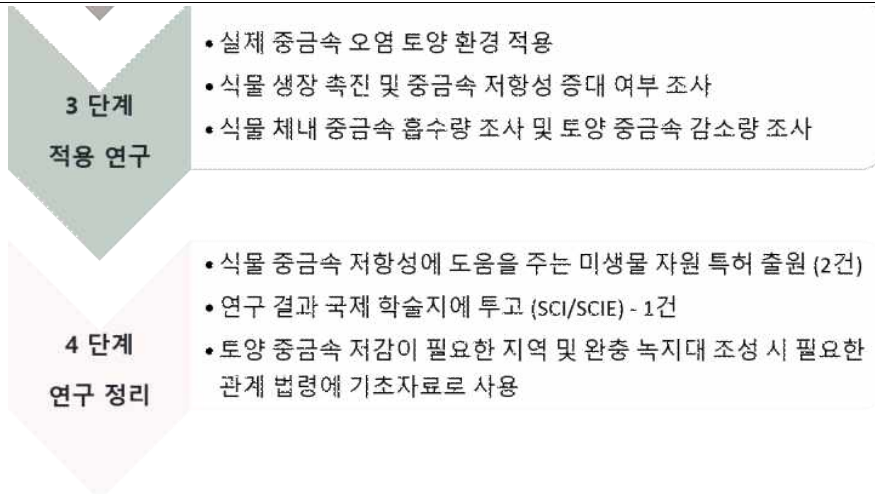


그림 5. 추진 체계

2) 연구 추진 방법

- 실험에 사용할 미생물 및 식물자원 선정
 - 다년간 식물 성장촉진 및 환경 저항성 증대로 연구된 PGPR 자원 사용
 - 장항 및 석포 제련소에서 분리한 500여 종의 PGPR 자원 사용
 - 각종 문헌 등을 통해 중금속 흡수 효과가 높은 식물자원 선정(유채 등 십자화과 식물, 해바라기)
- 식물 성장촉진 효과 검증
 - 식물의 생체중 및 건체중 측정
 - 식물의 줄기 및 뿌리 길이 측정
- 식물의 환경 저항성 증대 효과 검증
 - 중금속 환경에 식물 식재
 - 식물의 건체중 및 생체중 증감 효과 검증
- 식물의 환경 저항성 증대 메커니즘 조사
 - 분광광도계(실험실 보유)를 이용하여 항산화 효소 분비량 조사
 - Real-time PCR(실험실 보유)을 이용하여 식물의 방어유전자 발현 양상 조사
- 식물 및 토양중금속 함량 측정
 - ICP/MS(경북대 보유)를 사용하여 중금속 함량 측정

○ 주요 연구내용

1) 실험에 사용할 PGPR 자원 선정 및 특성 확인

- 장항제련소 및 석포제련소에서 분리한 미생물 자원 약 500종 및

실험실에서 연구 중인 식물유용 미생물 자원 (*Ochrobactrum lupini* KUDC1013, *Paenibacillus polymyxa* E681, *Bacillus megaterium* KNUC251 등) 20종을 이용하여 본 연구를 수행.

● 식물과 연관된 미생물 특성 확인

- 식물 생장촉진과 관련된 인산 가용능, siderophore 생산능을 선별 배지를 통해 확인
- 미생물이 분비하는 식물생장호르몬(옥신) 함량을 UV-분광광도계를 사용하여 정량 분석
- 토양 알칼리화와 관련된 미생물의 탄산칼슘 형성 여부를 선별 배지를 통해 확인

● 식물 선정

- 실제 중금속 축적이 높은 것으로 알려진 유채, 갯 등의 십자화과 식물과 해바라기를 대상으로 연구를 시행

2) PGPR에 의한 식물 생장촉진 효과 및 중금속 저항성 증가 효과 확인

● PGPR의 식물 생장촉진 효과 확인 (*in vitro*)

- 식물의 생체중/건체중 증가량 확인
- 식물의 뿌리 및 줄기 길이 증가량 확인

● PGPR에 의한 식물의 중금속 저항성 및 흡수력 증대 효과 확인

- 고농도의 카드뮴(0.3 mM) 및 납(1.5 mM) 함량에 대한 식물의 생체중 및 건체중 감소 여부 조사
- 식물의 활성산소억제와 관련된 효소(ascorbate peroxidase 등)의 함량 조사
- 식물의 환경 스트레스와 관련된 방어유전자 발현량을 Real-time PCR을 통하여 조사
- ICP/MS를 통하여 식물 체내 및 토양 중금속(Cd, Pb) 축적량 확인

3) 실제 중금속에 오염된 토양에 적용하여 정화 효과 확인

● 식물-PGPR에 의한 토양중금속 정화 효과 확인

- 실제 중금속오염토양환경에 식물-PGPR 처리
- PGPR처리에 따른 식물 생장촉진 효과 확인
- ICP/MS를 통하여 식물 체내 및 토양 중금속(Cd, Pb) 축적량 확인

4) 연구 정리 및 정책 제언

- 식물 생장촉진 및 환경 스트레스에 대한 저항성 증대에 관련된 미생물 자원 특허 출원

- 국제학술지(SCI/SCIE)에 연구결과를 보고
- 완충녹지 및 중금속 제거를 위한 생태시설 조성 시 초본류 구성에 관한 정책에 기초자료로 활용

○ 선행연구 결과

- 본 연구실은 2008~2020년, 총 12년의 기간 동안 독도를 대상으로 1) 외래종 유입에 대한 피해도 조사, 2) 독도 환경 평가, 3) 미생물 군집 조사, 4) 독도의 식물-미생물 간의 상호작용 조사, 5) 탄산칼슘 형성 세균(CFB, calcite-forming bacteria) 조사, 6) 신종미생물 발굴 및 특성 조사 등 다양한 연구를 수행해 왔다. 특히 독도는 높은 염분 농도, 토양 산성화, 낮은 토양 영양분 등 식물이 살기에 적합하지 않은 생태를 갖고 있다. 하지만 실제 독도에는 총 61종의 식물군이 독도 전역에 골고루 분포하여 성공적으로 정착하고 있다. 본 연구실은 척박한 독도의 환경에서 식물이 성공적으로 정착하게 된 원인으로, PGPR이 식물의 성장과 환경 저항성 증진에 도움을 주었을 것으로 생각하여 지속적인 연구를 추진해 왔다.



그림 6. 독도 환경 내 식물-미생물 상호작용 연구

- 본 연구실은 총 12년의 연구 기간 총 SCI(E) 24편, 학술진흥청 등재지 11편의 논문을 출판하였으며 총 7건의 특허를 등록, 4건의 특허를 출원 하였다. 또한, 매년 3건 이상의 포스터를 국제학회에 발표하고 있다.

Table 1. 2007년 이후 연구 업적

주제	주요 업적		
	SCI(E)	학술등재지	특허 등록
식물-미생물 상호작용	8	2	6
탄산칼슘 형성 세균	5	6	5
신종미생물	5	—	—
미생물 다양성 분석	2	3	—
유전체 분석 및 유전자 조작	4	—	—
총 계	24	11	11

Induced Systemic Tolerance by Microbial VOCs

Host plant: *N. tabacum* Abiotic stress Source: 1 mM CsCl



(-) Control

Escherichia coli K12

Deinococcus soli N5

그림 7. 방사선 내성 PGPR에 의한 식물 세습 저항성 증가

- 본 연구실은 2018년 이래 식물-방사선 내성 PGPR간의 상호작용에 의한 방사성 세습 제거에 관한 연구를 수행해오고 있다. 중금속에 저항성이 높은 세균 분리를 위해 장항제련소와 석포제련소 인근 토양에서 약 500개의 균주를 분리하였으며, 분리된 균주에 대한 식물 생장촉진 효과 및 환경 저항성 증대 효과에 관한 연구를 수행하고 있다. 그 중 *Deinococcus soli* N5 균주는 휘발성 물질을 분비하여, 고농도 세습에 대한 식물의 저항성을 증진한다는 것이 밝혀져 추가적인 연구가 진행 중이다.
- PGPR을 이용한 다년간의 연구 경험은 본 연구를 성공적으로 수행하는 데 큰 도움이 될 것으로 생각한다.

○ 연구결과의 기대효과 및 파급효과

1) 기술적 측면

- ① 범세계적인 친환경 환경정화 기술 확보의 기대에 부응
 - 범세계적으로 요구되는 친환경적이고 지속 가능한 토양 중금속정화 기술 확보
- ② 향상된 식물정화기법 발굴
 - 식물-PGPR을 함께 사용함으로써, 기존 오염 환경에서 생육 장애를 겪던 식물정화법의 한계를 탈피
 - 기존 식물정화법 대비 고효율 토양중금속 제거 방안 발굴

2) 과학적 측면

- ① 생태계 자정작용에 대한 이해 증진
 - 오염 토양 내의 식물-미생물 상호작용 연구는 생태계 내 자정작용 메커니즘을 좀 더 명확히 이해할 수 있는 중요한 기초연구가 됨

② 토양중금속 저감에 효율적인 생물자원 확보

- 중금속 흡착 가능 및 식물 저항성 증진과 관련된 미생물 자원 발굴 및 이를 응용하는 연구에 중요한 기반 자료 구축
- 유용 유전체 정보를 다양한 연구진과 공유하여 좀 더 발전된 생물정화 기법 개발 가능

③ 과학인력 양성

- 본 연구를 통해 세계적 흐름에 맞는 생물학적 정화기술 전문가 양성

3) 사회·경제적 측면

① 친환경적이고 경제적인 중금속정화 기법

- 기존에 사용되던 물리-화학적인 처리 기법보다 비용이 경제적이며, 2차 오염 피해에 대한 피해가 없음

② 완충녹지 조성 관련 법령 제정에 기초자료로 사용

- 현재 완충녹지 조성과 관련한 구체적인 법령은 부족한 실정임
- 조성된 완충녹지는 식물의 특성과 관련 없이

③ 대규모 식물 관광자원 개발 가능

- 대부분의 중금속오염 지역의 경우, 그 오염부지의 크기가 크기 때문에 식물을 이용한 아름다움 경관 조성으로 지역사회에 새로운 관광자원 창출이 가능
- 친환경 기법의 사용으로 ‘친환경 개발도시’의 이미지 확보 가능

④ 토양 정화에 따른 이용 가능 용지 확보

- 중금속오염 토양 생물학적 정화기술은 광산 유역, 공장 유역, 쓰레기 매립지 등 전국 각지에 다양한 중금속오염 지역에 사용 가능 및 이를 통하여 사용 가능 부지 확대에 기여
- 중금속 정화지역은 주거지역 및 다양한 형태로 조성 가능

⑤ 지역사회 일자리 창출을 통한 경제 활성화

- 생물학적 처리 기법을 통해 흡수된 중금속을 처리하는 신산업 창출 가능
- 식물에 의한 토양정화법은 식물 모니터링 등 인력이 필요하므로, 공장 등 산업 단지에 적용과 이를 관리할 수 있는 일자리 창출 가능

(3) 환경적 측면

① 지속가능한 중금속오염토양 생물학적 정화법 확립

	<ul style="list-style-type: none"> - 식물-미생물을 이용한 방법으로 지속가능하고 친환경적인 복원방법 확보 - 물리-화학적 처리방법에서 야기되는 2차 부산물에 의한 피해로부터 안전 - 기존 환경과 가장 적합한 자생 식물 종을 이용한 정화기법으로 외래종 유입에 의한 생태계 교란으로부터 비교적 안전 <p>② 지구온난화 대응 기대에 부응한 친환경 기법</p> <ul style="list-style-type: none"> - 식물을 이용한 방법으로 토양 오염물질 제거 외에도 이산화탄소(CO₂) 감축에도 도움을 주어, 범세계적인 온실가스 감축의 기대에 부응함 <p>③ 식물을 이용한 복원기술로 지역 조경 개선에 대한 기대 부응</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대규모 오염지역을 식물을 이용하여 정화하는 기법으로 지역에 새로운 경관 조성 가능. - 공장 지역 토양중금속 정화, 대기오염 개선, 경관 조성 등 공장 지역에 맞는 맞춤형 친환경 정화기술 확보 <p>④ 황폐해진 토양중금속 오염지역의 생물 종 다양성 증대 등 생태 복원에 기여</p> <ul style="list-style-type: none"> - 환경 복원을 통한 생물 종 다양성 증대 등 지역사회의 건강한 생태계 조성에 기여
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

주요연구내용에
대한 국내외
기술현황

1) 국내 기술현황

① 국내 토양정화공법 사용현황

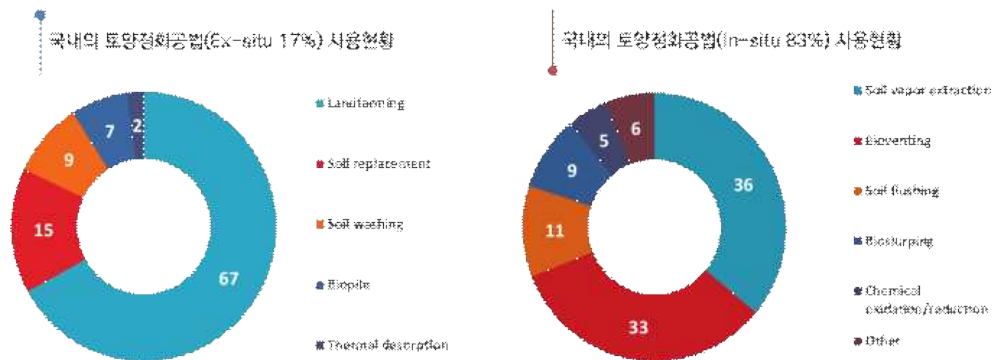


그림 8. 국내 토양정화공법 사용현황

- 국내 토양 중금속오염 복원의 연구는 물리-화학적 기법에 의존한 기술개발이 다수를 차지하고 있다. 하지만 물리-화학적 토양 정화기법은 비용이 많이 들고, 2차 오염을 일으킬 수 있다는 우려가 지속함에 따라 최근 식물, 미생물, 동물(곤충) 등을 이용한 친환경 토양 중금속 정화기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 아직 미국, 중국 등 선진국보다 연구가 미비한 실정이며 지속적인 연구를 통해 선진국 수준의 친환경 토양 정화기법 기술의 확보가 시급한 실정이다.

② 국내 토양정화시장 성장 추이

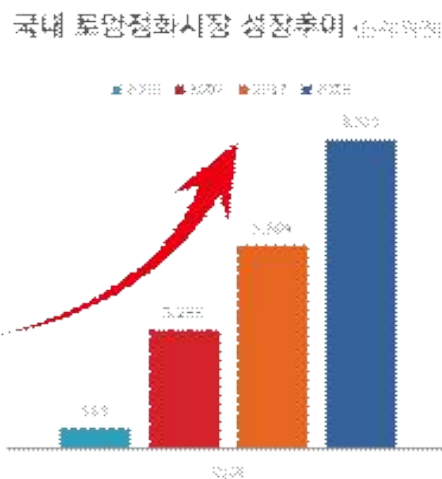


그림 9. 국내 토양정화시장 성장 추이(2018)

- 국내 토양정화시장의 성장 추이를 보면 2005년에는 569억, 2007년에는 3,283억, 2018년에는 8,525억으로 약 10년 전인 2007년에 비해서 259% 증가함을 알 수 있다. (환경부, 토양환경평가. 2018) 이

는 국내에서 토양오염 복원을 위한 많은 경비를 사용했음을 알 수 있다. 하지만 대부분의 토양오염 복원은 물리-화학적 처리를 기반으로 하였으며, 친환경 토양정화기법을 통해 토양을 정화한 사례는 드문 실정이다.

- 토양중금속 생물정화와 관련된 특허는 Kipris(www.kipris.or.kr) 검색결과 총 30건이 등록되었다. 하지만 대부분의 특허가 미생물 혹은 식물 한 종만을 사용하여 생물정화를 시도하였으며, 식물-미생물을 사용한 예는 단 1건(사동민, 2014년)에 불과하였다.

2) 국외 기술현황

- 생물학적 토양정화법은 90년대부터 미국, 독일, 네덜란드 등 환경기술선진국에서 오염된 토양복구, 오염지하수, 침출수, 오·폐수 등의 오염된 수질정화 그리고 대기 정화 등에 광범위하게 적용됐으며, 기존의 물리-화학적 토양정화기법을 대체하기 위해 노력하고 있다. 하지만 아직 실제 환경에 생물학적 토양정화기법을 사용하는 예는 극히 드문 실정이다. 미국의 경우, 토양중금속 정화 사업 중 생물학적 토양정화기법을 사용한 경우는 1%에 불과하다.

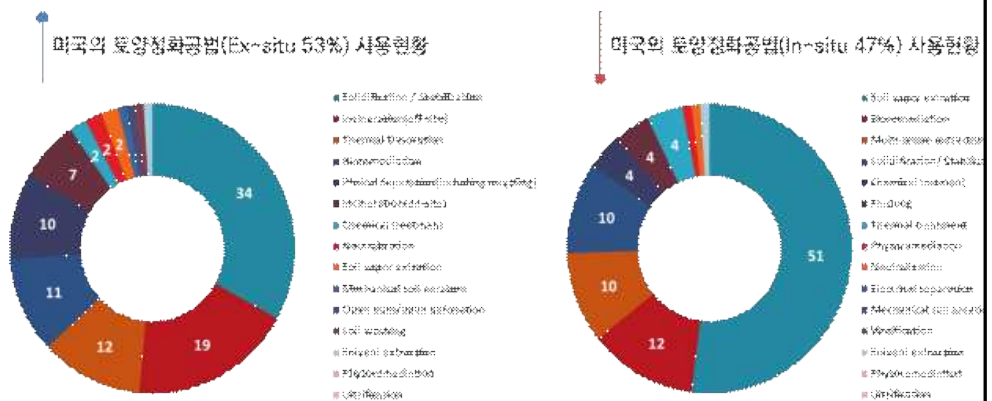


그림 10. 미국의 토양정화공법 사용현황(2018)

- 미국 내 식물이용 환경오염정화기술시장은 1998년 3,000~4,900만 달러에서 1999년 5,000~8,600만 달러까지 약 2배의 성장을 기록하였다. 2005년의 시장규모는 2억 3,500~4억 달러로 1998년에 비해서 7년 동안 약 10배 증가한 성장을 보였다.
- 현재까지 생물정화법을 이용하여 오염을 정화한 예는 극소수다. 하지만 미국, 중국, 유럽 등에서 생물정화법을 물리·화학적 처리방법과 병행하여 사용함으로써, 점차 생물정화법 사용을 늘리려는 시도가 이어지고 있다. 친환경적이고 지속가능한 발전이 필요한 시기에 생물정

	화법의 연구는 필수적인 실정이다.		
연구성과 활용방안	○ 연구성과 지표 및 목표		
	성과 지표	성과 목표(정량적 기재)	
	국제학술지(SCI/SCIE) 논문 투고	1건 이상	
	특허 출원	2건 이상	
	토양중금속 정화에 효과가 있는 미생물 자원 기탁	5종 이상	
	○ 연구성과 활용내용(계획)		
	활용내용(계획)	활용기관	활용 가능 기간/대상
	중금속오염 토양 정화 녹지 조성	대구시청 환경정책과	2년 이상/안심 뉴타운 등
	공단 주변 완충녹지 조성	대구시청 환경정책과	2년 이상/염색공단 등
	폐광산 지역 토양 정화 녹지 조성	한국광해공단	2년 이상/달성폐광산 등
	완충녹지 조성 시 식물 종 구성에 관한 세부 법률 제안	대구시청 환경정책과	기간 제한 없음/완충 녹지 조성 지역
	중금속오염지역 정화 녹지 조성을 위한 법률 제안	대구시청 환경정책과	기간 제한 없음/중금속 정화녹지 조성 지역
주요 키워드 (3개 이상)	영 문	Enhance-phytoremediation, Bioremediation	
		Heavy metal contamination	
	한 글	강화된-식물정화기법, 생물정화법	
		중금속 오염	

[첨부] 연구성과 활용계획서 1부.

이상과 같이 연구개발사업계획(안) 제안서를 제출합니다.

2020 년 10 월 12 일

제출자 김 사 열

대구녹색환경지원센터장 귀하



연구성과 활용계획서

연구사업수행의 필요성

1) 지역 내 토양 중금속 오염 피해에 경각심과 시민 관심 고취

가. 대구지역은 달성 폐광산, 주한미군기지 주변 지역, 안심 뉴타운 지역 등과 같은 지역에서 토양의 중금속 오염이 진행됐음

나. 이외에도, 2019년 대구염색공단 대구배출사업단 오염 대기 무단 배출 사건 등, 지속해서 오염에 노출될 가능성이 있는 곳들이 지역 내에 산재하여 있음

2. 기존 토양중금속 정화기법과는 차별화된 정화기법 개발 필요

가. 기존의 토양중금속 정화는 물리, 화학적 기법을 중심으로 수행됐지만 이러한 방법으로는 토양 내 유해 중금속을 완전히 제거할 수 없을뿐더러, 높은 비용 소모와 정화과정에서 발생하는 2차 오염의 위험성이 발생함

나. 기존 생물학적 토양중금속정화기법의 경우, 식물 혹은 미생물만을 단독적으로 처리하여 중금속 감소 효과를 검증하는 연구가 수행됐음

다. 기존의 기술의 경우, 중금속에 의한 피해로 식물의 생육에 문제가 발생하여 여러 가지 문제점이 노출되며 실제 환경에서 높은 효율의 중금속 감소 효과를 얻기 어려움

라. 미생물만을 단독으로 처리하여 토양중금속을 정화하려는 시도 역시 토양 정착성이 매우 저하 등의 이유로 토양중금속 정화 효과가 급격히 떨어지는 결과를 보였다.

마. 이들 기술의 장점을 살리고 단점을 보완하는 개선된 친환경 생물학적 토양 정화기법의 개발이 필요함. 식물-PGPR를 토양에 복합처리 한다면, 기존에 생물학적 토양정화기법의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대

3. 녹지 조성과 활용의 중요성

가. 식물-PGPR을 활용한 식물정화법은 오염지역 내 녹지 조성을 통해 토양 정화를 할 수 있음과 동시에, 현재 큰 문제로 대두되고 있는 이산화탄소 감축, 미세먼지 제거 등 추가적인 이로운 효과를 얻을 수 있는 좋은 방법이 될 것으로 연구가 매우 필요함

	<p>나. 지역 내 토양 중금속오염에 대하여 정화 효과가 높은 식물로 완충녹지를 구성할 경우 지역사회의 환경 오염 저감에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 여겨짐</p> <p>다. 대구시 또한, 이러한 환경 사업을 중요성을 인지하고 공단지역에 완충녹지를 조성하는 등의 노력을 기울이고 있음</p> <p>라. 하지만 위처럼 조성된 환경 녹지는 지속적인 관리와 관심의 부재 및 사업구상 단계의 문제로 제 기능을 발휘하지 못하는 실정임</p> <p>마. 현재 완충녹지 조성 시 고려해야 할 기초자료는 전혀 없는 실정이다.</p> <p>바. 본 연구를 통하여 얻은 결과는, 오염지역 녹지 조성과 관련된 법령 제정 등에 좋은 자료가 될 수 있을 것으로 기대함</p>
<p>연구사업수행 시 예상되는 기대효과</p>	<p>○ 요약</p> <div data-bbox="512 875 1382 1576" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <ol style="list-style-type: none"> 1. 중금속 오염지역 복원: 도심 내 완충녹지 및 토양중금속 오염지역에 대한 장기적이고 친환경적인 정화 기법확립 2. 고활성 유용 미생물 확보를 통한 미래 원천 기술 확보: 지역 유래 유용 미생물 자원 발굴과 이를 통한 대구시의 친환경 도시 이미지를 재고 3. 토양중금속 효과를 겸한 도시 조경 효과: 대구시에서 다방면으로 추진 중인 녹화사업에 적용 가능성 4. 법령 제정을 위한 기반 자료를 제공하며, 대구시민의 환경에 대한 의식을 고취하고 대구시민의 삶의 질 증진에 기여 </div> <p>○ 분야별 기대효과</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 기술적 측면 <p>가. 범세계적인 친환경 환경정화 기술 확보의 기대에 부응</p> <p>나. 기존의 생물정화기법을 탈피한 차세대 생물학적 정화기술 확보</p> <p>다. 토양중금속 저감에 효율적인 생물자원 확보</p> 2. 경제·사회적 측면

- 가. 기존 기법보다 친환경적인 중금속정화 기법확립에 기여
- 나. 기존에 사용되던 물리-화학적 처리 기법보다 비용이 경제적
- 다. 생물학적 처리 기법을 통해 흡수된 중금속을 처리하는 신산업 및 이를 감시하고 관리·감독하는 일자리 창출
- 라. 경관 조성을 통한 대규모 식물 관광자원 개발 가능
- 마. 생태환경 방호지역 같은 정화지역 구축에 활용 가능
- 바. 친환경 기법의 사용으로 ‘친환경 개발도시 대구’의 이미지 확보 가능
- 사. 토양 정화에 따른 이용 가능 용지 확보, 이에 따라 경제적 부가가치 창출 가능
- 아. 방사능 토양오염 저감으로 인한 국민 건강 증대 효과
- 자. 오염지역 인근 주민들의 생활 복지 향상에 활용 가능

3. 환경적 측면

- 가. 지속할 수 있는 중금속 오염토양 생물학적 정화법 확립
- 나. 지구온난화 대응 기대에 부응한 친환경 기법
- 다. 식물을 이용한 복원기술로 지역 조경 개선에 대한 기대 부응
- 라. 황폐해진 토양중금속 오염지역의 생물 종 다양성 증대 등 생태 복원에 기여
- 마. 환경 복원을 통한 생물 종 다양성 증대 등 지역사회의 건강한 생태계 조성에 기여

4. 과학적 측면

- 가. 본 연구를 통해 세계적 경향에 맞는 생물학적 정화기술 전문가 양성

○ 관계 법령

- 기존의 도시공원 및 녹지 등에 관한 법률 (약칭: 공원녹지법) 제14조 1항에 따르면 특별시장·광역시장·특별자치 시장·특별자치 도지사·시장 또는 군수는 쾌적한 도시환경을 조성하기 위하여 국토교통부령으로 정하는 도시공원 또는 녹지의 확보기준에 따라 도시공원 또는 녹지를 확보하도록 노력하여야 한다. 또한, 제14조 2항에 따라 산업입지 및 개발에 관한 법률에 따라 중금속 정화시설 등을 포함하는 대통령령으로 정하는 규모 이상의 개발을 수반하는 개발계획을 수립하는 자는 국토교통부령으로 정하는 기준에 따라 도시공원 또는 녹지의 확보계획을 개발계획에 포함하여야 함
- 이러한 녹지는 공원녹지법 제35조(녹지의 세분)에 따라 완충녹

	<p>지, 경관녹지, 연결녹지로 나뉘며 본 연구의 내용은 1항과 2항의 완충녹지와 경관녹지 항목에 적용될 수 있다. 국토 교통부의 도시·군관리 계획수립지침 4-3-3에 따라 녹지의 설치기준 등이 명시되어 있으나, 위치와 면적, 주변으로 확산하는 형태의 제반 공해의 차단만이 명시되어있으며, 도시공원 및 녹지 등에 관한 법률 시행규칙 (약칭: 공원녹지법 시행규칙)에도 완충녹지에 대하여 녹화면적 및 식생 높이의 기준만 지정되어 있을 뿐 중금속오염과 같은 토양오염지대에 대한 녹지형성의 식생 지정이나 생성된 녹지의 환경정화기능 수행능력에 대한 것은 아직 정립된 기준이나 지침이 전혀 없음.</p> <p>- 본 연구의 내용을 바탕으로 녹지형성이 단순 녹화사업이나 오염원을 차단하는 단계에서 더 나아가 지역 환경을 개선하고 회복하는 공간이 될 수 있도록 관련 법령의 개진을 위한 기초자료가 될 수 있을 것임</p>
연구사업수행결과 활용 가능 기관	<p>- 본 사업 수행으로 얻어진 결과는 공원녹지법 제14조 1항에 따른 각 지자체 (대구광역시) 포함 및 제37조와 39조에 따라 특정 원인 제공자(토양 중금속오염을 유발할 수 있는 시설, 위탁업체 등), 상기에서 관리하는 기관과 시설, 한국광해관리공단 등에서 활용가능함.</p>
연구사업수행결과 활용 가능 기간	<p>- 본 연구로 얻어진 결과는 완충녹지 및 정화녹지 조성시 지속적으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 활용가능 기간에 제한은 없을 것으로 보임.</p>

※ 자료 작성시 유의사항

- 과제 제안서의 내용을 구체적으로 작성(특히, 시·도 및 기업체 제안 과제)
- 연구과제 내실화, 품질강화를 위해 선정된 연구과제는 연구결과물 수요기관이 필요로 하는 방향으로 수행될 수 있도록 연구과제를 제안한 담당자를 해당과제 감독원으로 지정하여 추진

< 참고 > 국고보조사업 평가의견

- 환경정책에 대한 연구사업은 한국환경정책평가연구원 등 국가 연구단체의 데이터를 활용하거나 협력하여 추진하도록 하며 지역적 필요에 따른 연구는 지자체 또는 지역연구단체와 협동추진하는 것이 바람직
- 환경현안조사연구의 예산 삭감이 필요하다고 판단
 - 직접사업비 비중에서 절반이상인 77.6% 차지
- 환경행정에 대한 정책연구와 조사연구 용역사업이 대부분으로 구성
- 사업 대부분이 논문게재 또는 실현되지 않은 현안·정책개발연구 실적에 치중