

과 제 구 분	공동연구	과 제 번 호	PJ01558403	
과학기술분류	LB0302	품목표준코드	MC-03-MC33	
주 관 과 제 명	농경지 토양미생물 변동 평가 및 지표개발			
과 제 책 임 자	성 명	직 급	소속기관 및 부서	
	김 도 현	농업연구관	국립농업과학원	
연 구 기 간	2021 ~ 2025	참여연구기관	-	
세부과제명		부 서	세부책임자	연구기간
2) 강원 농경지 토양미생물 변동 조사		농업환경연구과	이재형	'21~'25
키 워 드	농경지 토양, 미생물 다양성, 종풍부도, 종다양성			

ABSTRACT

Soil microbial diversity is a fundamental determinant of ecosystem stability and resilience against environmental stress and pathogens. This study was conducted to quantify microbial characteristics and establish standardized assessment criteria tailored to Korean agricultural soils. From 2021 to 2025, microbial community dynamics were monitored across various land-use types (upland, orchard, paddy, and greenhouse) in Gangwon Province. Using the Illumina MiSeq platform and the DADA2 pipeline, 16S rRNA and ITS gene sequences were analyzed to calculate core microbial indices: species richness (Chao1), evenness (Pielou's J), and diversity (Shannon). These indices were transformed into scores using the Cumulative Distribution Function (CDF). A final Soil Microbial Quality Index (SMQI), ranging from 0 to 100 and classified into five levels (lv1-lv5), was developed by applying weights derived from Principal Component Analysis (PCA).

The monitoring results revealed that while fungal richness in Gangwon's upland soils tended to be lower than the national average, other land-use types generally maintained average diversity levels. Across all surveyed sites, Pseudomonadota (Bacteria) and Ascomycota (Fungi) were the dominant phyla, indicating a stable core community structure. Regional variations were observed in the abundance of genome quantification and nitrogen cycle-related genes, with the central region (including Gangwon) showing lower values in upland soils compared to southern regions, reflecting temporal and spatial fluctuations.

In conclusion, the SMQI developed in this study provides a robust framework for objectively evaluating the biological health of agricultural soils. These findings offer essential baseline data for sustainable soil management and ecological stability assessment in response to evolving agricultural environments.

1 연구목표

본 연구는 「친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률」 제10조 및 제11조에 따른 농어업 자원 보전과 환경 개선, 그리고 실태조사 및 평가라는 법정 의무를 충실히 이행하고, 농업 생태계 내 탄소 순환의 50%, 유기물 분해의 100%, 질소 및 인 순환에 절대적인 기여를 하는 토양 미생물의 역할을 과학적으로 구명하는 데 그 목적이 있습니다. 최적의 농업환경 유지를 위해 기존의 물리·화학적 분석을 넘어 미생물 생태학적 관점에서의 토양 해석 및 관리 기술 개발이 절실한 시점에서, 국내외 기술 동향인 16S rRNA 유전자 시퀀싱 기반의 군집 분석과 미국의 국가 마이크로바이옴 이니셔티브(NMI) 등 글로벌 표준에 부합하는 연구 체계를 구축하고자 합니다. 이를 위해 본 연구는 2021년 밭 토양미생물 특성 조사 및 변동 요인 해석을 시작으로, 2022년 과수원, 2023년 논, 2024년 시설재배지, 그리고 2025년 다시 밭 토양에 대한 심층 조사를 연차별로 수행함으로써 전국 단위의 농경지 미생물 분포 조사 체계를 확립하고, 축적된 데이터를 바탕으로 유해 미생물 분석 및 토양 건강성을 상징하는 과학적 지표를 개발하는 데 집중할 것입니다. 결과적으로 본 연구를 통해 도출된 데이터는 농업환경보전 종합관리를 위한 기초 자료로서 전국 농경지의 미생물상 변화를 합리적으로 예측하고, 친환경 농업 실천이 생물다양성에 미치는 긍정적 효과를 정량적으로 입증함으로써 지속 가능한 농업 실현과 고부가가치 농업 환경 조성의 핵심적인 토대가 될 것입니다.

2 재료 및 방법

<제2세부과제: 강원 농경지 토양미생물 변동 조사>

(시험 1) 강원지역 농경지 토양 미생물 모니터링 및 변동평가

본 연구의 목적을 달성하기 위해 강원도 내 주요 농경지(논, 밭, 과수원, 시설재배지 등)를 대상으로 유형별 각 25지점을 조사 대상지로 선정하였다. 시료 채취는 각 조사 지점의 대표성을 확보하기 위해 W자형 또는 대각선 방향으로 5~10개 지점을 정하여 표토(0~15cm)를 채취한 뒤, 이를 골고루 혼합한 복합 시료를 분석에 활용하였다. 채취된 토양 시료는 현장에서 즉시 냉장 보관하여 실험실로 운반하였으며, 미생물 군집 분석용 시료는 -80°C 초저온 냉동고에 보관하고, 효소 활성 및 일반 미생물 분석용 시료는 분석 목적에 따라 풍건(Air-dry) 또는 4°C 냉장 상태로 전처리하여 사용하였다. 농경지별 토양 미생물의 정밀한 군집 구조를 파악하기 위해 차세대 염기서열 분석법(Next Generation Sequencing, NGS)을 수행하였다. 각 토양 시료에서 DNA 추출 키트를 이용하여 총 DNA(Total Genomic DNA)를 추출하였으며, 추출된 시료는 유전체 분석 전문 기관인 '마크로젠(MacroGen)'에 의뢰하여 분석을 진행하였다. 세균(16S rRNA) 및 진균(ITS region) 영역에 대한 앰플리콘 시퀀싱(Amplicon Sequencing) 데이터를 바탕으로 속(Genus) 이상의 단위에서 분류 군별 분포와 우점종을 확인하였으며, 생물다양성 지수를 산출하여 농경지 유형별 미생물 생태계의 차이를 규명하였다. 또한 토양 생태계의 기능적 건전성을 평가하기 위해 미생물의 전반적인 대사 활성을 나타내는 탈수소 효소(Dehydrogenase) 활성을 측정하였다. 아울러 토양 내 비료 효율 및 환경 부하와 밀접한 관련이 있는 질소 순환 과정을 심층 분석하기 위해, 질화 작용 및 탈질 작용, 질소 고정과 관련된 주요 기능성 유전자의 점유율과 활성 변화를 추적하였다. 이를 통해 강원도 농경지 토양의 양분 순환 능력을 정량적으로 평가하고 변동 요인을 해석하기 위한 기초 데이터로 활용하였다.

(시험 2) 강원지역 농경지 토양 미생물 특성

토양 내 미생물의 풍부도와 다양성은 토양 생태계의 안정성에 기여하고 환경변화나 외부 스트레스 및 병원균의 침입에 대한 회복력 증가 등에 영향을 미칠 가능성이 높다(Chen et al., 2022). 토양미생물 특성 지수는 물리·화학과 달리 단위가 없는 상대 수치이며, 지금까지 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 통용되는 기준을 확립하지 못한 실정으로, 국내 농경지 토양 대상 분석 방법에 한한 기초적인 평가 기준 및 산출 방법을 제시하고자 하였다. 미생물 군집 분석 시 보편적으로 활용하는 종 풍부도, 균등도 및 다양성의 미생물 특성 지수를 활용하였다. 토양의 성분을 등급으로 산정하고 평가하는 방법 중 하나인 '코넬 포괄적 토양 건강 평가(CASH)'를 참고하여 누적분포함수(CDF)를 이용한 미생물 특성 지수별 Quality Index (QI)를 계산하여 점수에 따라 상대적 등급 기준을 설정하였다. 이는 국내 농경지 토양인 밭('21), 과수원('22), 논('23), 시설재배지('24)를 대상으로 설정하였으며, 각각 224, 229, 210, 210개의 토양 시료를 사용하여 분석하였다. 따라서 각 농경지 토양 시료 내에서 누적분포함수에 따라 미생물 특성 지수의 범위 및 등급이 산출되었다. 이때 사용되는 미생물 특성 지수는 미생물의 기본적인 군집 구조를 설명하는 가장 핵심적인 세 가지 축의 종 풍부도, 균등도, 다양성을 반영하기 위하여 세 가지 특성 지수를 활용하였다. 첫 번째 미생물 특성 지수인 종 풍부도는 Chao1 지수를 사용하였는데, 이는 관찰된 종의 수(observed species)에 한 번만 관찰된 종(singletons)과 두 번만 관찰된 종(doubletons)의 정보를 활용해 추정하는 지수로 단순 관찰된 종의 수보다 실제 종 풍부도를 더 잘 대변한다고 알려져있어 흔히 사용됨. 또한 보편적으로 함께 사용되는 ACE (Abundance- based Coverage Estimator) 지수와 매우 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 두 번째 미생물 특성 지수인 종 균등도는 Pielou's J 지수를 사용하였는데, 이는 희귀종의 기여도를 상대적으로 높게 평가하는 특징이 있어, 군집 내 희귀종들의 분포까지 고려하여 균등도를 평가하며 Shannon 다양성 지수를 기반으로 하였다. 각 지수별로 CDF를 계산하여 0~1 사이의 점수를 5개 등급으로 구분하였다. 세 개의 지수를 종합하고, 각 지수의 주성분 분석(PCA)을 통한 가중치(PC)를 계산하여 최종적으로 SMQI (Soil Microbial Quality Index)를 설정하였고, 이 값에 따라 등급을 산정하여 토양 내 미생물 안정성을 평가하였다. 다만 상대값인 미생물 특성 지수를 고려하여 반드시 제시하는 표준 분석방법을 따라야 정확한 측정이 가능하므로 분석 방법으로 토양 내 미생물의 16S rRNA V3-V4, ITS2(3-4) 유전자를 대상으로 Miseq (Illumina) 분석을 통한 염기서열 확보하였다. 생성된 염기서열을 분석하기 위해 DADA2 pipeline을 따랐으며 R 프로그램에서 수행하였다. 저품질 시퀀스 제거 및 양 말단 시퀀스 길이를 정리하기 위하여 filterAndTrim(minQ = 2, maxN = 0, truncLen = c(280,200) maxEE = c(5,5))을 수행하였고, 에러모델 학습(learnErrors), 중복 제거 및 고유 서열화(derepFastq), 노이즈 제거 및 ASV 추론(dada), 염기쌍 병합(mergePairs), 키메라 제거(removeBimeraDenovo)를 수행하였다. 염기서열 수 균일화를 위해 rarefy_even_depth를 수행하였고 이때 sample size는 각 농경지의 분석된 염기서열 수의 따라 다르게 적용되었다. 미생물 특성 지수인 종 풍부도(Chao1), 다양성(Shannon)을 계산하기 위하여 plot_rochness를 수행하였고, Pielou's J는 $H'(Shannon)/\ln(S: \text{observed species})$ 로 계산하였다. 계산된 미생물 특성 지수는 $\pm 1.5 \times IQR$ 을 통해 특이값을 제거하였고, CDF는 ecdf(x) 함수를 통해 계산하였다.

3 결과 및 고찰

<제2세부과제: 강원 농경지 토양미생물 변동 조사>

(시험 1) 강원지역 농경지 토양 미생물 모니터링 및 변동평가

연도별 대상농경지 및 시료수는 표 1과 같다.

표 1. 대상농경지 및 시료 채취 수

연도	대상농경지	시료(점)
2021	밭	25
2022	과수원	25
2023	논	25
2024	시설재배지	25
2025	밭	25

2021년의 전국 발토양 세균의 OTU기반 분석 결과(그림 1), 평균 종 풍부도(Chao)는 4,725(범위 1,487~7,402), 다양성 지수(Shannon)는 6.59(3.8~7.4), 균등도 지수(Simpsoneven)는 0.058(0.005~0.148)이었다. 강원지역의 풍부도와 다양성 지수는 전국의 평균치의 수치를 보여주었다. 발토양 곰팡이의 전국 평균 종 풍부도는 430(77~922), 다양성 지수는 3.6(1.7~5), 균등도 지수는 0.043(0.006~0.194)이었으며, 강원지역 곰팡이의 종 풍부도는 전국대비 낮은 경향이었고, 다양성 지수는 전국 평균 수준이었다.

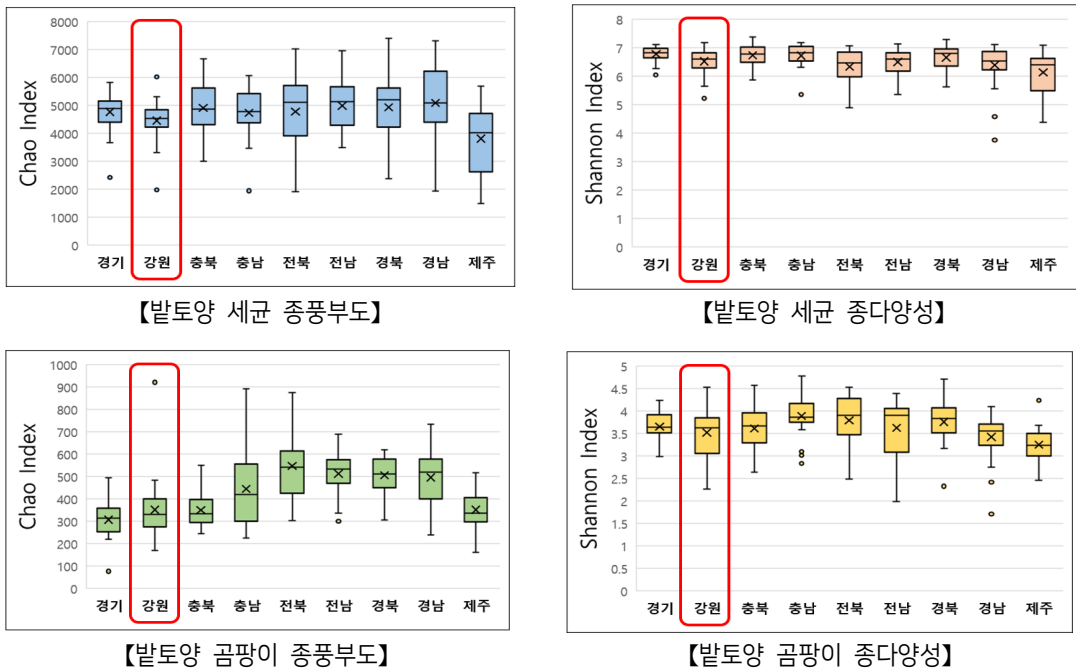
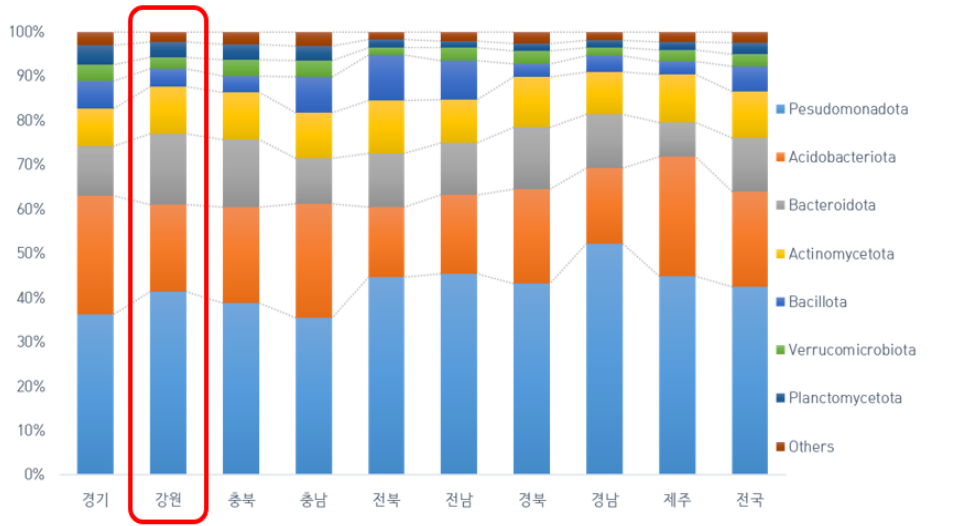
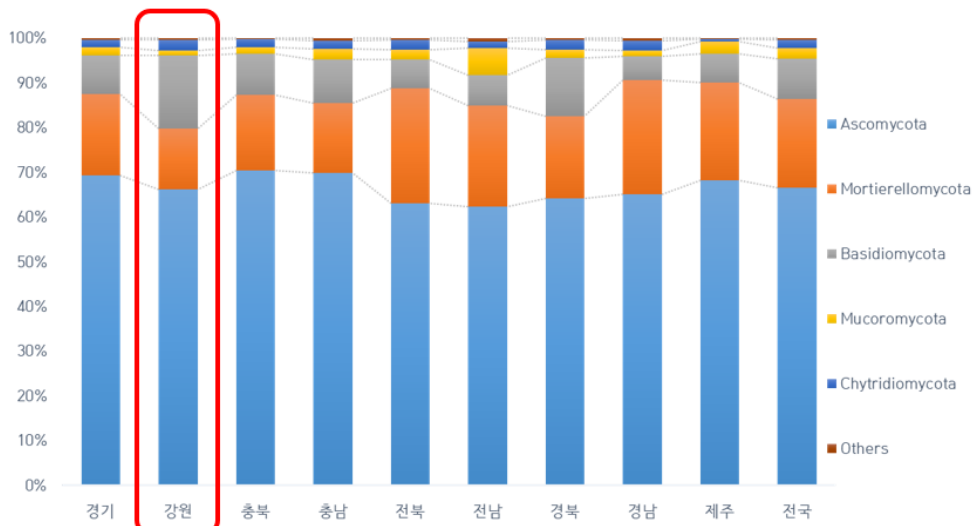


그림 1. 발토양 미생물 군집 분석 및 변동평가(2021)

강원지역 발토양의 세균 문(Phylum)은 *Pseudomonadota*의 다른 지역보다 분포가 높고 *Acidobacteriota*의 경우 다소 낮게 나타났으며, 곰팡이 우점 문은 *Ascomycota*의 경우 전국 평균과 유사하였고 *Mortierellomycota*는 다소 낮게 나타났다(그림 2).



【발토양 세균 분포 비율】



【발토양 곰팡이 분포 비율】

그림 2. 발토양 세균 및 곰팡이 분포 비율

강원지역 세균 유전자(16s rRNA)의 qPCR 정량 분석 결과, 유전자 수는 다른 지역에 비해 전반적으로 낮은 경향을 보였고, 아질산환원균과 관련된 유전자(nirK)는 비교적 높은 것으로 조사되었으며, 일산화질소 환원균 관련 유전자(cnorB)의 분포 또한 세균 유전자 및 아질산환원균 유전자의 지역별 변동 양상과 비슷한 경향을 보였다. 반면, 아산화질소 환원균 관련 유전자(nosZ)와 암모니아산화균(amoA), 진균(ITS) 유전자의 경우 지역 간 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았으며, 전반적인 변동 폭 또한 크지 않은 것으로 보였다(그림 3).

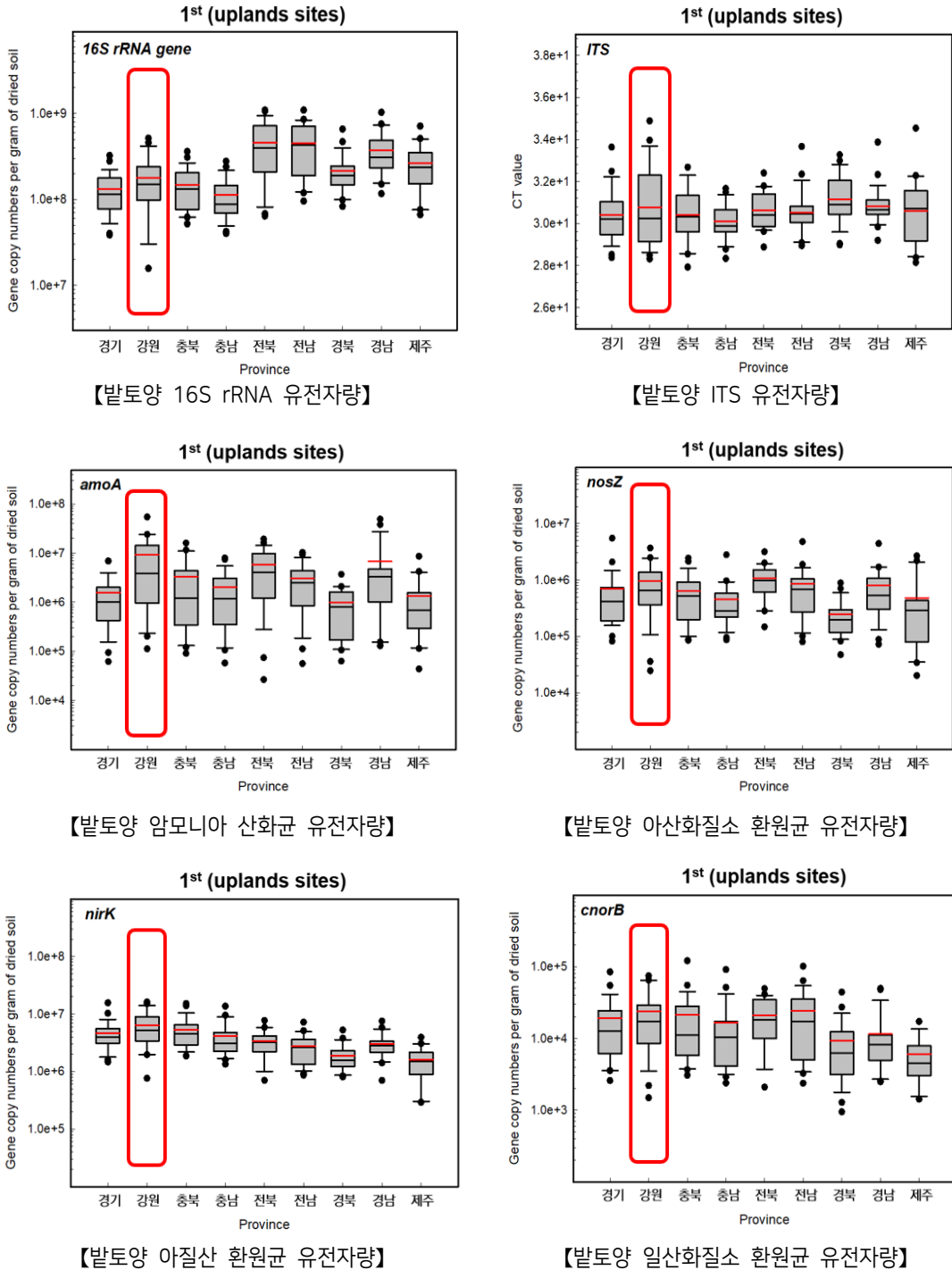
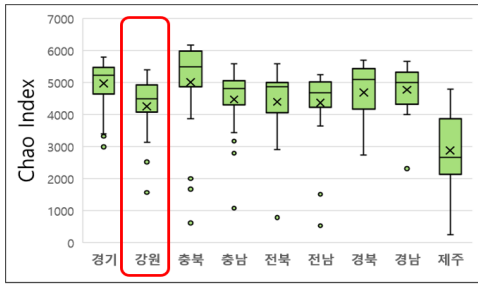
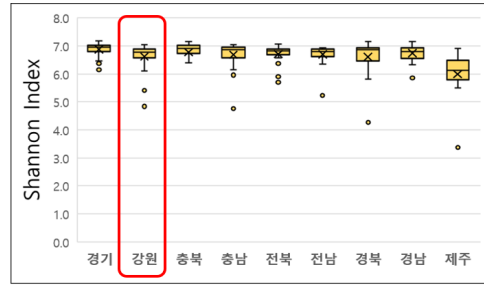


그림 3. 발토양 유전자량 비교

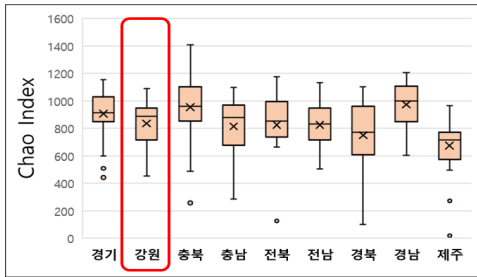
2022년도 강원 지역 과수원토양은 곰팡이의 경우 전국 평균 중 풍부도 839(18~1,409), 종 다양성 4.0(1.4~5.5), 균등도 지수 0.037(0.007~0.333) 대비하여 타 지역에 비해 다소 낮은 경향이였다(그림 4).



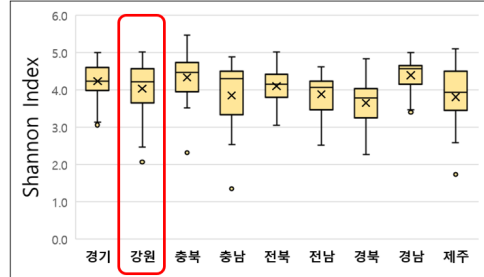
【과수원토양 세균 종풍부도】



【과수원토양 세균 종다양성】



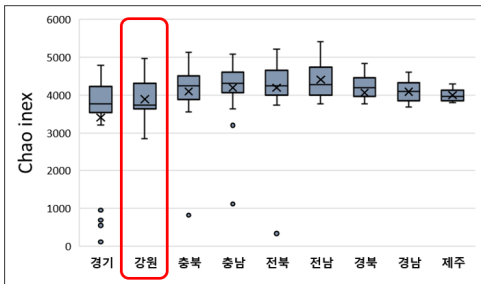
【과수원토양 곰팡이 종풍부도】



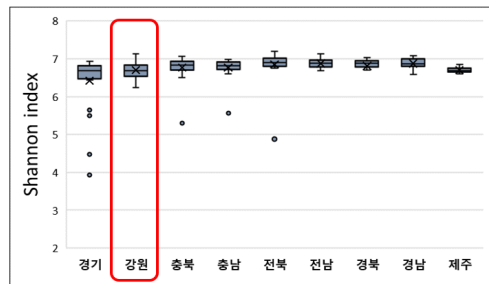
【과수원토양 곰팡이 종다양성】

그림 4. 과수원 토양 미생물 군집 분석 및 변동평가(2022)

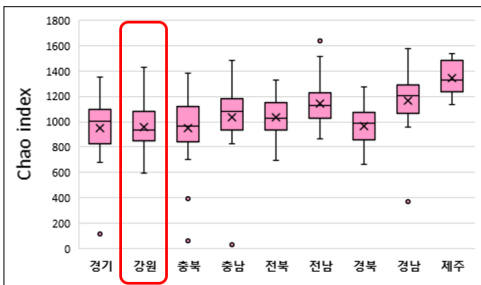
2023년도 강원 지역 논 토양 세균은 세균의 종 풍부도와 다양성은 전국 평균과 비슷하고, 곰팡이 종 풍부도와 다양성은 다소 낮은 경향이 있었다(그림 5).



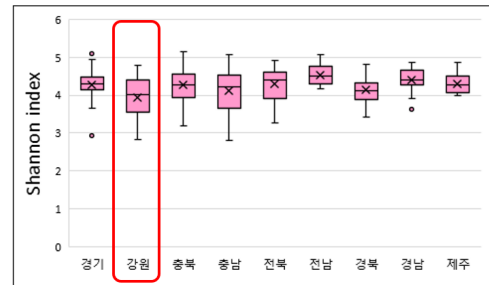
【논토양 세균 종풍부도】



【논토양 세균 종다양성】



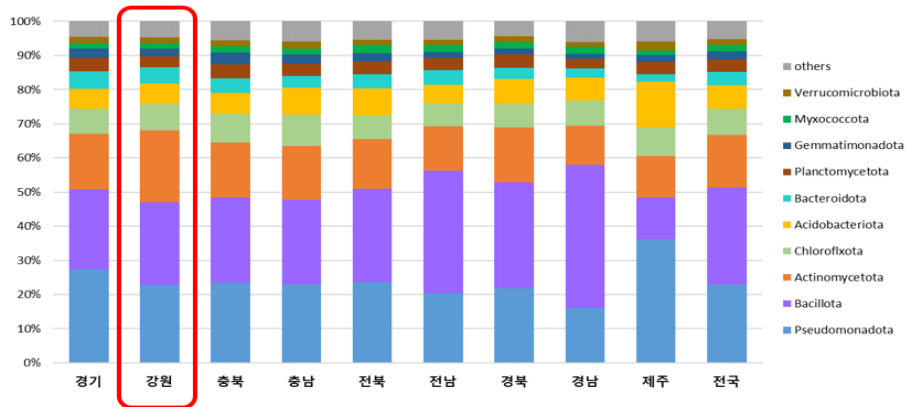
【논토양 곰팡이 종풍부도】



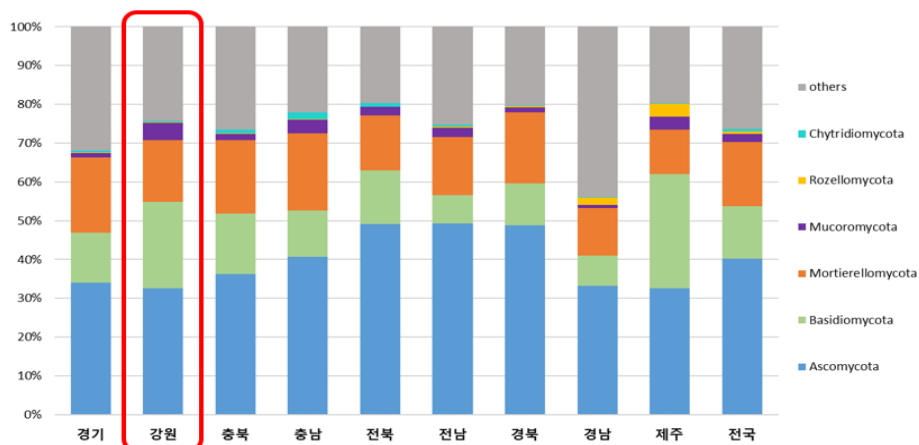
【논토양 곰팡이 종다양성】

그림 5. 논 토양 미생물 군집 분석 및 변동평가(2023)

강원지역 시설재배지 경우 전국 평균수치인 세균 문(Phylum) Pseudomonadota (22.94%), Bacillota (28.42%), Actinomycetota (15.36%), Chloroflexota (7.60%), Acidobacteriota (6.97%)과 우점 곰팡이 문은 Ascomycota (40.16%), Basidiomycota (13.61%), Morterellomycota (16.48%)과 유사하였고, 타 지역과 차이가 없는 것으로 나타났다.(그림 6).



【시설재배지토양 세균 분포 비율】



【시설재배지토양 곰팡이 분포 비율】

그림 6. 전국 시설재배지 토양 세균 및 곰팡이 분포 비율

(시험 2) 강원지역 농경지 토양 미생물 특성

2021년도 밭 토양미생물의 특성 지수별 상대 등급 산정을 위한 지표의 균일성을 위하여 미생물 염기서열 수를 normalization 하였다. 밭 토양 224 지점의 세균은 20,000개 reads로, 곰팡이는 15,000개 reads로 subsample 하였다. 그 결과, 각각 223개의 지점을 대상으로 안정성 지표를 산출하였다. 각 특성 지수는 특이값을 제거하기 위하여 IQR을 제외한 결과 세균 중 풍부도 지수는 222개, 균등도 지수는 215개, 다양성 지수는 211개를 대상으로 CDF를 계산하였고, 곰팡이 중 풍부도 지수는 219개, 균등도 지수는 219개, 다양성 지수는 220개를 대상으로 CDF를 계산하였다(표 2, 3).

표 2. 발 토양미생물(세균)의 특성 지수별 CDF 등급(n=223)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 2427.93	45
	High	0.6~0.8	2184.25~2427.93	45
	Medium	0.4~0.6	1972.16~2184.25	44
	Low	0.2~0.4	1499.38~1972.16	45
	Very Low	< 0.2	< 1499.38	44
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.926	45
	High	0.6~0.8	0.914~0.926	45
	Medium	0.4~0.6	0.902~0.914	44
	Low	0.2~0.4	0.889~0.902	45
	Very Low	< 0.2	< 0.889	44
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 7.129	45
	High	0.6~0.8	6.947~7.129	45
	Medium	0.4~0.6	6.733~6.947	44
	Low	0.2~0.4	6.554~6.733	45
	Very Low	< 0.2	< 6.554	44

표 3. 발 토양미생물(곰팡이)의 특성 지수별 CDF 등급(n=223)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 306.61	45
	High	0.6~0.8	236.51~306.61	45
	Medium	0.4~0.6	186.21~236.51	44
	Low	0.2~0.4	149.15~186.21	45
	Very Low	< 0.2	< 149.15	44
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.753	45
	High	0.6~0.8	0.719~0.753	45
	Medium	0.4~0.6	0.685~0.719	44
	Low	0.2~0.4	0.631~0.685	45
	Very Low	< 0.2	< 0.631	44
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 4.119	45
	High	0.6~0.8	3.838~4.119	45
	Medium	0.4~0.6	3.596~3.838	44
	Low	0.2~0.4	3.314~3.596	45
	Very Low	< 0.2	< 3.314	44

2022년도 과수원 토양미생물의 특성 지수별 상대 등급 산정을 위한 지표의 균일성을 위하여 미생물 염기서열 수를 normalization 하였다. 과수원 토양 229 지점의 세균은 30,000개 reads로, 곰팡이는 7,000개 reads로 subsample 하였다. 그 결과, 각각 220개, 188개의 지점을 대상으로 안정성 지표를 산출하였다.

각 특성 지수는 특이값을 제거하기 위하여 IQR을 제외한 결과 세균 중 풍부도 지수는 211개, 균등도 지수는 206개, 다양성 지수는 205개를 대상으로 CDF를 계산하였고, 곰팡이 중 풍부도 지수는 188개, 균등도 지수는 178개, 다양성 지수는 185개를 대상으로 CDF를 계산하였다(표 4, 5).

표 4. 과수원 토양미생물(세균)의 특성 지수별 CDF 등급(n=220)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 1947.62	45
	High	0.6~0.8	1783.02~1947.62	44
	Medium	0.4~0.6	1641.24~1783.02	44
	Low	0.2~0.4	1476.64~1641.24	44
	Very Low	< 0.2	< 1476.64	43
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.923	45
	High	0.6~0.8	0.918~0.923	44
	Medium	0.4~0.6	0.913~0.918	44
	Low	0.2~0.4	0.904~0.913	44
	Very Low	< 0.2	< 0.904	43
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 6.916	45
	High	0.6~0.8	6.830~6.916	44
	Medium	0.4~0.6	6.763~6.830	44
	Low	0.2~0.4	6.647~6.763	44
	Very Low	< 0.2	< 6.647	43

표 5. 과수원 토양미생물(곰팡이)의 특성 지수별 CDF 등급(n=188)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 289.78	38
	High	0.6~0.8	201.50~289.78	38
	Medium	0.4~0.6	133.57~201.50	37
	Low	0.2~0.4	54.00~133.57	40
	Very Low	< 0.2	< 54.00	35
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.793	38
	High	0.6~0.8	0.769~0.793	38
	Medium	0.4~0.6	0.739~0.769	37
	Low	0.2~0.4	0.688~0.739	40
	Very Low	< 0.2	< 0.688	35
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 4.285	38
	High	0.6~0.8	3.926~4.285	38
	Medium	0.4~0.6	3.447~3.926	37
	Low	0.2~0.4	2.920~3.447	40
	Very Low	< 0.2	< 2.920	35

2023년도 논 토양미생물의 특성 지수별 상대 등급 산정을 위한 지표의 균일성을 위하여 미생물 염기서열 수를 normalization 하였다. 논 토양 210 지점의 세균과 곰팡이는 각각 15,000개 reads로 subsample 하였다. 그 결과, 각각 202개, 206개의 지점을 대상으로 안정성 지표를 산출하였다. 각 특성 지수는 특이값을 제거하기 위하여 IQR을 제외한 결과 세균 종 풍부도 지수는 201개, 균등도 지수는 194개, 다양성 지수는 197개를 대상으로 CDF를 계산하였고, 곰팡이 종 풍부도 지수는 200개, 균등도 지수는 199개, 다양성 지수는 199개를 대상으로 CDF를 계산하였다(표 6, 7).

표 6. 논 토양미생물(세균)의 특성 지수별 CDF 등급(n=202)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 2038.38	41
	High	0.6~0.8	1780.70~2038.38	40
	Medium	0.4~0.6	1558.75~1780.70	41
	Low	0.2~0.4	1301.08~1558.75	40
	Very Low	< 0.2	< 1301.08	40
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.921	41
	High	0.6~0.8	0.916~0.921	40
	Medium	0.4~0.6	0.912~0.916	41
	Low	0.2~0.4	0.906~0.912	40
	Very Low	< 0.2	< 0.906	40
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 6.902	41
	High	0.6~0.8	6.767~6.902	40
	Medium	0.4~0.6	6.649~6.767	41
	Low	0.2~0.4	6.488~6.649	40
	Very Low	< 0.2	< 6.488	40

표 7. 논 토양미생물(곰팡이)의 특성 지수별 CDF 등급(n=206)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 647.02	42
	High	0.6~0.8	567.82~647.02	41
	Medium	0.4~0.6	499.61~567.82	41
	Low	0.2~0.4	420.42~499.61	41
	Very Low	< 0.2	< 420.42	41
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.735	42
	High	0.6~0.8	0.706~0.735	41
	Medium	0.4~0.6	0.681~0.706	41
	Low	0.2~0.4	0.653~0.681	41
	Very Low	< 0.2	< 0.653	41
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 4.650	42
	High	0.6~0.8	4.420~4.650	41
	Medium	0.4~0.6	4.260~4.420	41
	Low	0.2~0.4	3.987~4.260	41
	Very Low	< 0.2	< 3.987	41

2024년도 시설재배지 토양미생물의 특성 지수별 상대 등급 산정을 위한 지표의 균일성을 위하여 미생물 염기서열 수를 normalization 하였다. 시설재배지 토양 210 지점의 세균은 15,000개 reads로, 곰팡이는 7,000개 reads로 subsample 하였다. 그 결과, 각각 207개, 179개의 지점을 대상으로 안정성 지표를 산출하였다. 각 특성 지수는 특이값을 제거하기 위하여 IQR을 제외한 결과 세균 중 풍부도 지수는 207개, 균등도 지수는 197개, 다양성 지수는 201개를 대상으로 CDF를 계산하였고, 곰팡이 중 풍부도 지수는 166개, 균등도 지수는 172개, 다양성 지수는 174개를 대상으로 CDF를 계산하였다(표 8, 9).

표 8. 시설재배지 토양미생물(세균)의 특성 지수별 CDF 등급(n=207)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 1347.99	42
	High	0.6~0.8	1181.97~1347.99	41
	Medium	0.4~0.6	1038.96~1181.97	42
	Low	0.2~0.4	872.93~1038.96	41
	Very Low	< 0.2	< 872.93	41
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.909	42
	High	0.6~0.8	0.897~0.909	41
	Medium	0.4~0.6	0.888~0.897	42
	Low	0.2~0.4	0.873~0.888	41
	Very Low	< 0.2	< 0.873	41
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 6.426	42
	High	0.6~0.8	6.297~6.426	41
	Medium	0.4~0.6	6.139~6.297	42
	Low	0.2~0.4	5.916~6.139	41
	Very Low	< 0.2	< 5.916	41

표 9. 시설재배지 토양미생물(곰팡이)의 특성 지수별 CDF 등급(n=179)

Microbial Quality Index	Categories	Score	Value range	No. of samples
Chao1 (richness)	Very High	> 0.8	> 105.00	36
	High	0.6~0.8	83.00~105.00	37
	Medium	0.4~0.6	63.00~83.00	36
	Low	0.2~0.4	47.00~63.00	35
	Very Low	< 0.2	< 47.00	35
Pielou's J (evenness)	Very High	> 0.8	> 0.774	36
	High	0.6~0.8	0.733~0.774	37
	Medium	0.4~0.6	0.692~0.733	36
	Low	0.2~0.4	0.649~0.692	35
	Very Low	< 0.2	< 0.649	35
Shannon (diversity)	Very High	> 0.8	> 3.553	36
	High	0.6~0.8	3.251~3.553	37
	Medium	0.4~0.6	2.922~3.251	36
	Low	0.2~0.4	2.568~2.922	35
	Very Low	< 0.2	< 2.568	35

4 적 요

<제2세부과제: 강원 농경지 토양미생물 변동 조사>

(시험 1) 강원지역 농경지 토양 미생물 모니터링 및 변동평가

- 가. 2021년 강원지역 밭 토양의 세균 종 풍부도와 다양성 지수는 전국 평균치였고, 곰팡이의 종 풍부도는 전국대비 낮은 경향이었음
- 나. 2022년 강원지역 과수원 토양의 세균과 곰팡이의 종 풍부도와 다양성 지수는 전국 평균치의 값을 보여주었음
- 다. 유전체 정량과 질소순환과 관련된 유전자의 양은 강원을 포함한 중부지역에서 전반적으로 높게 나타난 반면, 제주를 포함한 남부지역에서 다소 낮은 값을 나타내었음
- 라. 2023년 강원지역 논 토양의 세균과 곰팡이의 종 풍부도와 다양성 지수는 전국 평균치의 값을 보여주었음
- 마. 논 토양의 세균은 문 수준에서 *Pseudomonadota*가 가장 많이 분포하였고, 곰팡이의 경우 *Ascomycota*의 분포 비율이 가장 높아 밭, 과수원 토양과 유사한 경향을 보여주었음
- 바. 2024년 강원지역 시설재배지 토양의 세균과 곰팡이의 종 풍부도와 다양성 지수는 전국 평균치의 값을 보여주었고 세균 풍부도에서 제주의 수치가 가장 낮았음
- 사. 시설재배지 토양의 세균은 문 수준에서 *Pseudomonadota*가 가장 많이 분포하였고, 곰팡이의 경우 *Ascomycota*의 분포 비율이 가장 높아 밭, 과수원 토양과 유사한 경향을 보여주었음
- 아. 2025년 밭 토양의 세균과 곰팡이의 종 풍부도에서 전국 평균치보다 낮은 값을 보여주었고, 다양성 지수는 전국 평균치의 값을 보여주었음
- 자. 유전체 정량과 질소순환과 관련된 유전자의 양은 강원을 포함한 중부지역에서 전반적으로 낮게 나타났으며 이러한 결과는 2021년 결과와 유사하였음

(시험 2) 강원지역 농경지 토양 미생물 특성

- 가. 강원지역 농경지 토양 미생물 특성을 분석하기 위하여 밭·과수원·논·시설재배지의 토양의 미생물의 염기서열 수를 normalization 하였음
- 나. 각 농경지별 세균과 곰팡이의 특성 지수별 CDF 점수를 활용하여 SMQI 산출식을 개발하였고, SMQI 값에 따라 등급을 산정(값 = 0~100, 등급 = lv1~5)하여 토양 내 미생물 안정성을 평가하였음

5 인용문헌

- Chen, Q. L., et al.. 2022. Nature Communications. Soil biodiversity-ecosystem multifunctionality relationships in South China's agricultural soils.
- Moebius-Clune, B. N., et al. 2016. The Cornell Framework Manual, Edition 3.2. Cornell University. Comprehensive Assessment of Soil Health.
- Callahan, B. J., et al. 2016. Nature Methods, 13(7), 581-583. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data.

Chao, A. 1984. Scandinavian Journal of Statistics, 11(4), 265-270. Nonparametric estimation of the number of classes in a population.

Pielou, E. C. 1966. Journal of Theoretical Biology, 13, 131-144. The measurement of diversity in different types of biological collections.

6 연구결과 활용

연도(연차)	활용방안	제 목	
2022(2년)	학술발표	강원지역 과수원 토양 토양미생물 변동 평가	
	영농활용	강원도 내 농업미생물 배양현황과 원예작물의 처리효과	
2023(3년)	학술발표	강원지역 논 토양 토양미생물 변동 평가	

성과지표	연도	1년차 (2021)		2년차 (2022)		3년차 (2023)		4년차 (2024)		5년차 (2025)		계	
		목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적
학술 발표	국제												
	국내			1	1	1	1					2	2
영농 활용	기술												
	정보			1	1							1	1
계		-	-	2	2	1	1	-	-	-	-	3	3

7 연구원 편성

구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도				
					'21	'22	'23	'24	'25
과제책임자	국립농업과학원	농업연구사	김도현	과제 총괄			○	○	○
과제책임자	국립농업과학원	농업연구관	원항연	과제 총괄	○	○			
세부책임자	농업환경연구과	농업연구사	이재형	세부주관 수행				○	○
세부책임자	농업환경연구과	농업연구사	홍수영	세부주관 수행	○	○	○		
공동연구자	농업환경연구과	농업연구사	이재희	시험수행				○	
	농업환경연구과	농업연구사	이기연	시험수행				○	
	농업환경연구과	농업연구관	서영호	시험설계 지원		○		○	
	농업환경연구과	농업연구관	이재홍	시험설계 지원					○
	환경농업연구과	농업연구관	임수정	시험설계 지원	○	○	○		
	환경농업연구과	농업연구관	고재영	시험설계 지원	○				

구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도				
					'21	'22	'23	'24	'25
공동연구자	농업환경연구과	농업연구관	김경대	시험설계 지원			○		
	환경농업연구과	농업연구사	최병곤	시험수행		○			
	환경농업연구과	농업연구사	허수정	시험수행	○				
	환경농업연구과	농업연구사	조수현	시험수행	○				
	환경농업연구과	농업연구사	김동민	시험수행	○	○	○		
	농업환경연구과	농업연구사	황세정	시험수행					○
	농업환경연구과	농업연구사	김문중	시험수행					○
	농업환경연구과	농업연구사	박석현	시험수행					○
	농업환경연구과	농업연구사	홍수영	평가분석 지원				○	○
	농업환경연구과	공무직	김남호	현장조사 지원			○		
	환경농업연구과	공무직	주원영	현장조사 지원	○		○		
	농업환경연구과	공무직	장미영	현장조사 지원	○			○	○
	농업환경연구과	공무직	김현석	현장조사 지원				○	○