

제232회 한림원탁토론회

전략기술시리즈 (V)

식탁 위 숨겨진 건강 비밀 : 마이크로바이옴이 열어가는 미래

일 시 : 2024년 12월 24일(화), 15:00

장 소 : 한림원회관 B1 강당

(온·오프라인 동시 진행)



모시는 글

마이크로바이옴은 의료, 환경, 농업 등 다양한 분야에서 활용될 수 있는 가능성을 가지고 있으며, 해외 주요 국가들은 국가적 차원의 대규모 프로젝트 추진 등 경쟁력 강화를 위한 노력을 펼쳐오고 있습니다. 우리나라도 마이크로바이옴 분야의 중요성과 가능성에 대한 인식을 바탕으로 정부 차원의 지원을 추진해 오고 있지만 전략적으로 극복해 가야 할 과제들이 여전히 남아 있습니다. ‘전략기술시리즈’ 다섯 번째 토론회로 개최되는 이번 한림원탁토론회에서는 의료, 농생명 분야 등의 마이크로바이옴 연구 및 활용 동향, 관련 산업의 미래에 대해 살펴보고 마이크로바이옴 분야의 경쟁력 강화를 위한 방향에 대해 논의하고자 하오니 많은 관심과 참여를 부탁드립니다.

2024년 12월

한국과학기술한림원

한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 마련하고 국가사회 현안문제에 대한 과학기술적 접근 및 해결방안을 도출하기 위해 개최되고 있습니다.



Program

사회 장경구 연세대학교 의과대학 조교수

시 간	프로그램	내 용
15:00~15:05 (5분)		개 회
		주제발표
15:05~15:50 (45분)	발표자	<p>농생명 분야에서 마이크로바이옴의 중요성 이주훈 서울대학교 농생명공학부 교수</p> <p>마이크로바이옴의 농업적 활용 김상범 농촌진흥청 농업미생물과 과장</p> <p>질병 극복의 열쇠: 마이크로바이옴 연구의 현재와 미래 방예지 서울대학교 의과대학 조교수</p>
		지정토론 및 자유토론
15:50~17:00 (70분)	좌 장	최상호 서울대학교 식품바이오융합연구소 소장
	토론자	김지현 연세대학교 생명시스템대학 교수
		김명희 한국생명공학연구원 마이크로바이옴융합연구센터 센터장
		유웅재 POSTECH 생명과학과 조교수
		질의응답
17:00		폐 회

참여자 주요 약력

▣ 사 회



장 경 구

연세대학교 의과대학 해부학교실 조교수

- 前 New York University 연수연구원
- 前 UC Davis 연수연구원
- 前 서울대학교 농업생명과학연구원 책임연구원

▣ 좌 장



최 상 호

서울대학교 식품바이오융합연구소 소장

- 前 국무총리실 식품안전정책위원회 전문위원
- 前 서울대학교 식중독균유전체 연구사업단 단장
- 前 서울대학교 식품안전성및독성연구센터 센터장

참여자 주요 약력

주제발표자



이 주 훈

서울대학교 농생명공학부 교수

- 식품의약품안전처 식품위생심의위원회 위원
- 前 한국미생물생명공학회 총무간사
- 前 한국연구재단 국책연구본부 차세대바이오단 전문위원



김 상 범

농촌진흥청 농업미생물과 과장

- 농어업농어촌특별위원회 바이오경제특위 위원
- 前 한국식품과학회 운영위원



방 예 지

서울대학교 의과대학 미생물학교실 조교수

- 대한면역학회 학술위원
- 前 University of Texas Southwestern Medical Center 전임강사
- 前 University of Texas Southwestern Medical Center 연수연구원

참여자 주요 약력

토론자



김 지 현

연세대학교 생명시스템대학 교수 및 연세 이윤재 펠로우

- 연세마이크로바이옴연구원장, 前 연구처장/산학협력단장
- 한국과학기술한림원 농수산학부 정회원 및 운영위원
- 前 다부처 유전체사업 미생물유전체전략연구사업단 단장



김 명 희

한국생명공학연구원 마이크로바이옴융합연구센터 센터장

- 일류 경제도시 대전 기획자문위원회 위원
- 前 한국결정학회 회장
- 前 한국미생물·생명공학회 간사장



유 응 재

POSTECH 생명과학과 조교수

- 前 Vanderbilt University Medical Center 연구교수
- 前 UC Davis 연수연구원

I

주제발표

주제발표 1 농생명 분야에서 마이크로바이옴의 중요성

- **이주훈** 서울대학교 농생명공학부 교수

주제발표 2 마이크로바이옴의 농업적 활용

- **김상범** 농촌진흥청 농업미생물과 과장

주제발표 3 질병 극복의 열쇠: 마이크로바이옴 연구의 현재와 미래

- **방예지** 서울대학교 의과대학 조교수

주제발표 1
농생명 분야에서 마이크로바이옴의 중요성



이 주 훈

서울대학교 농생명공학부 교수

KAIST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

농생명 분야에서 마이크로바이옴의 중요성

서울대학교 농생명공학부
이 주 훈

 서울 대 학 교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

Table of Contents

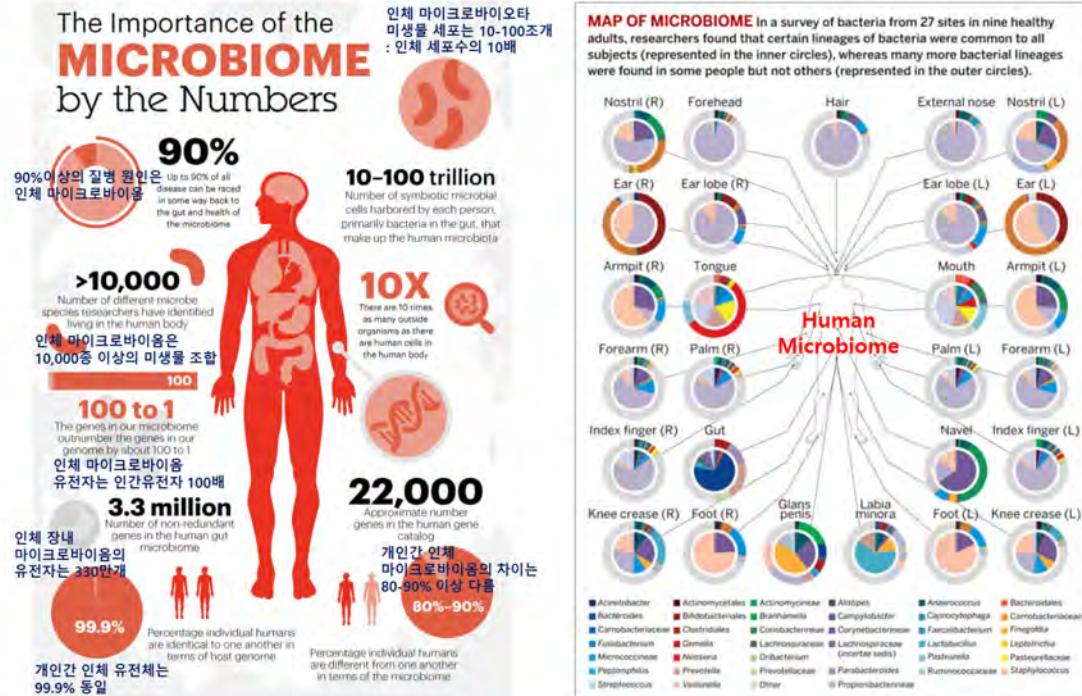
1. 마이크로바이옴이란?
(정의 및 건강과의 상관관계)
2. 농생명 마이크로바이옴의 중요성
(배경, 정의 및 중요성)
3. 식품 분야에서의 농생명 마이크로바이옴
(식품마이크로바이옴의 정의 및 활용)

01

마이크로바이옴이란?

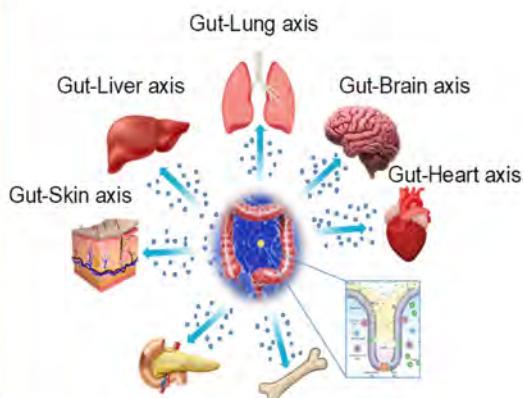
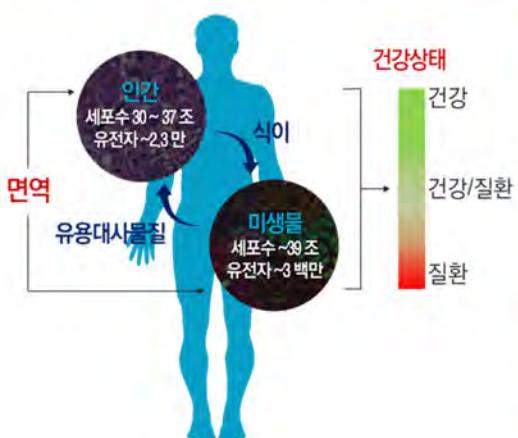
정의 및 건강과의 상관관계

01-1. 마이크로바이옴이란?



제232회 한림원탁토론회

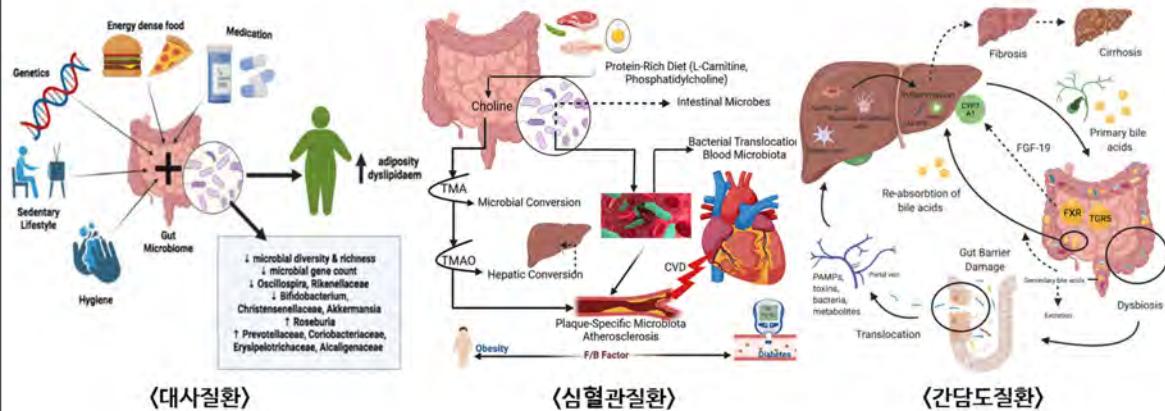
01-2. 마이크로바이옴과 건강



- 특정 환경에 존재하는 **미생물군집 (Microbiota)**과 이의 **유전체정보 (Genome)**를 의미
- 장내 마이크로바이옴이 인체의 다양한 장기들의 생리를 조절한다는 연구가 발표되면서 이에 따른 건강과 다양한 질환 발생에 중요한 역할을 한다는 근거들이 밝혀지고 있음
- 기존 의약품의 한계와 문제점 극복 가능성을 찾고 있으며, 그에 따라 신개념 마이크로바이옴 치료제 및 진단기술 확보 전략 마련 중

제232회 한림원탁토론회

01-3. 마이크로바이옴과 인체 질환 상관관계



▣ 마이크로바이옴-대사질환 / 심혈관질환 /간담도질환 등 다양한 만성질환 상관관계 연구가 진행됨에

따라 표적 질환의 범위가 더욱 넓어지고 있음

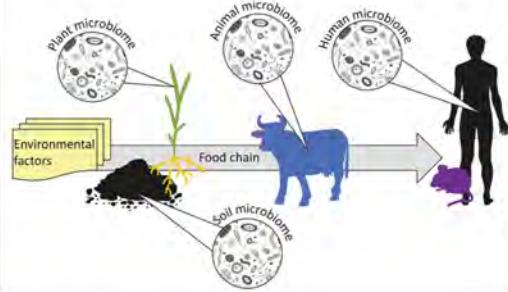
▶ 기존 마이크로바이옴 기전 관련 소재/서비스 개발 현황

02

농생명 마이크로바이옴의 중요성

배경, 정의 및 중요성

02-1. 농생명 마이크로바이옴의 배경

농생명 마이크로바이옴의 역할 및 중요성	농생명 마이크로바이옴 연구 현황
<p>농생명 마이크로바이옴은 국민 건강 증진과 식량안보 확보의 근간이 되는 중요한 자원</p> <ul style="list-style-type: none"> ▣ 농생명 마이크로바이옴은 농축산물 뿐 아니라 식품을 소비하는 인간에게 막대한 영향 ▣ 인체 마이크로바이옴을 통해 건강을 유지하기 위해서는 유익한 농생명 마이크로바이옴 기반의 건강한 농산물 및 식품 확보가 중요 	<p>통합 DB의 구축 및 활용 미흡</p> <ul style="list-style-type: none"> ▣ 개별 연구자의 단기 연구 중심 추진으로 인프라 개발 및 통합 DB 구축·활용은 미흡 ▣ 포스트게놈 다부처 유전체 사업을 통해 구축된 유전체 정보 관련 인프라는 마이크로바이옴과 호환되지 않음 <p>연구 성과의 공유 및 활용 제한</p> <ul style="list-style-type: none"> ▣ 마이크로바이옴 연구는 기능 및 구체적 메커니즘 정보 등 축적된 데이터 기반이 필수 ▣ 주요국들은 데이터 신뢰성 확보, 공동 활용 관리, 표준기구가 참여한 표준물질의 생산 등을 지원하여 기초연구 토대 및 공유 플랫폼 구축 ▣ 한국은 농생명 마이크로바이옴 데이터/자원의 표준화, 평가/검증 시스템의 미흡으로 R&D 성과에 대한 확산 및 활용 제한 <p>새로운 분석 기술의 등장</p> <ul style="list-style-type: none"> ▣ 과학기술 발전으로 새롭게 등장한 멀티오믹스 기술 등 신기술 반영이 필요한 단계

제232회 한림원 토론회

02-2. 농생명 마이크로바이옴 정의 및 범위

- ▶ 농생명 마이크로바이옴은 동·식물, 토양, 식품 등에서 공존하는 미생물과 그 유전정보 전체를 포함하는 미생물 군집
- 농생명이란 동물과 식물, 토양 그리고 그로부터 유래되는 식품을 의미
 - 농생명 마이크로바이옴이란 동물과 식물, 토양 그리고 식품을 포함하여 그 주위를 둘러싼 환경을 포함하는 개념



제232회 한림원 토론회

02-3. 농생명 마이크로바이옴의 분야

중점 추진 분야

식품 마이크로바이옴

식품 소재개발, 발효식품 균주 개발, 안전성 검증 기술 개발을 위한 마이크로바이옴 활용 기술



주요 기술

- 멀티오믹스 분석 및 평가
- 마이크로바이옴 조절 및 질환 별 효능 규명
- 식이소재 기반 전달체 활용 효능 극대화
- 오믹스 기반 대사회로 개설계

동물 마이크로바이옴

동물 및 동물 유래 마이크로바이옴과 실물 자원을 활용한 멀티오믹스 기반 축산 활용 기술



주요 기술

- 건강한 가축의 생산성 향상 기술
- 동물 유래 마이크로바이옴을 활용한 고기능성 바이오신소재 기술
- 가축 생산환경의 지속가능성 제고를 위한 마이크로바이옴 제어기술
- 반려동물 건강기능성 상용화 기술

식물 마이크로바이옴

식물에 존재하고 있는 미생물 또는 미생물 유전정보 기반, 미생물 군집 간의 상호작용 오믹스 분석 및 활용 제품 기술



주요 기술

- 미생물 군집 제어 및 기작 규명
- 식물 생장 및 생산성 제어
- 유용성분 증진 및 극대화
- 작물 병해 방제 기작 규명 및 응용

02-4. 농생명 마이크로바이옴 분야 개요

식품 마이크로바이옴

▶ 마이크로바이옴 활용 식품 안전성 및 품질 향상 연구

- ▣ NGS의 발달로 인해 유전체 및 메타유전체 분석이 가능해짐에 따라 마이크로바이옴을 활용한 식품 안전성 및 품질 향상 연구 활발
- ▣ 마이크로바이옴 기술을 활용하여 제품의 맛, 향, 품질의 균일화 연구 진행

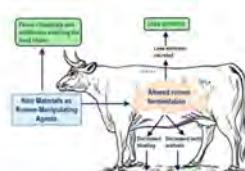
▶ 마이크로바이옴 기술을 활용한 제품의 맛, 향, 품질의 균일화

- ▣ 자연발효 식품인 사워도우 제품의 균일화를 위한 마이크로바이옴을 활용하여 기능성 및 품질 향상 연구 진행 중
- ▣ 지역별, 품종별 밀의 균종이 다르므로 이를 마이크로바이옴 연구를 통해 균일화 시도

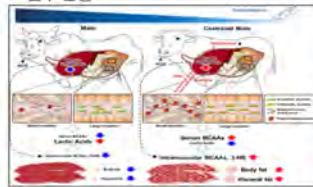
동물 마이크로바이옴

▶ 상업용 가축 생산성 및 강건성 향상 기술

- ▣ 항생제 대체재 개발 연구가 활발히 진행 중
- ▣ 가축 성장 촉진 및 사료 효율 개선, 강건기능 개선, 육질 개선 등 마이크로바이옴 기술 기반 기축용 생균제 연구 활발히 진행 중



- ▣ 거세우와 비거세우의 마이크로바이옴 조성의 차이 분석을 통한 국내 쇠고기 육질 향상에서 장내 미생물의 역할에 대한 연구 진행



식물 마이크로바이옴

▶ 식물-근권미생물 상호작용 연구를 통한 식물 병충 저항력 강화

- ▣ 벼, 고추 등 작물 중심으로 16s RNA 염기서열 분석을 통한 식물-근권미생물 상호작용, 미생물 군집 등 다양성 분석 연구를 중심으로 진행 중

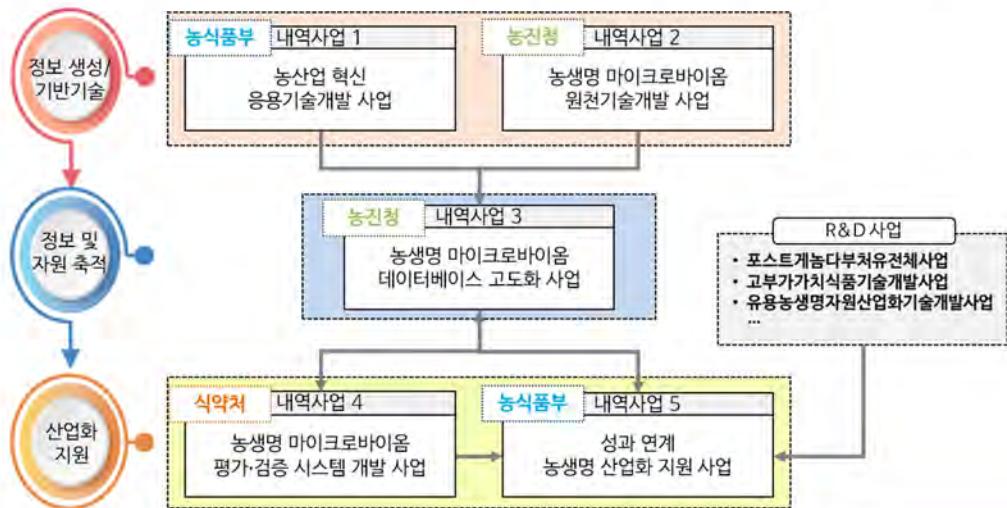


- ▣ 마이크로바이옴을 활용한 토양 비옥도 향상, 양분 흡수 개선, 해충과 질병에 대한 식물 저항력 강화 등 연구 진행

02-5. 농생명 마이크로바이옴 정부 사업 (2024-2028)

▶ 사업 성과연계를 고려하여 내역사업 구성

- 정보 생성/기반기술: 내역사업 1과 2를 통한 농생명 마이크로바이옴 정보 및 실물자원 확보
- 정보 및 자원 축적: 내역사업 3을 통한 사업 내 성과 축적 및 타 공공데이터 연계 기반의 민간 보급 확산
- 산업화 지원: 농생명 마이크로바이옴 정보/실물자원을 대상으로 내역사업 4와 5를 통해 산업화 기반 조성 및 지원



제232회 한림원 토론회

02-6. 농생명 마이크로바이옴 관련 빅데이터

- 농업생명공학정보센터(NABIC), 생명자원정보시스템(BRIS) 등 빅데이터 플랫폼을 통해 농생명자원 데이터 축적 및 활용 지원 중
- 그린바이오 기업의 제품 평가·실증 등 제품화 과정을 종합적으로 지원하기 위해 분야별로 산업 거점 육성 중, 다만 현재 미생물 제형화 시설이 부족한 상황



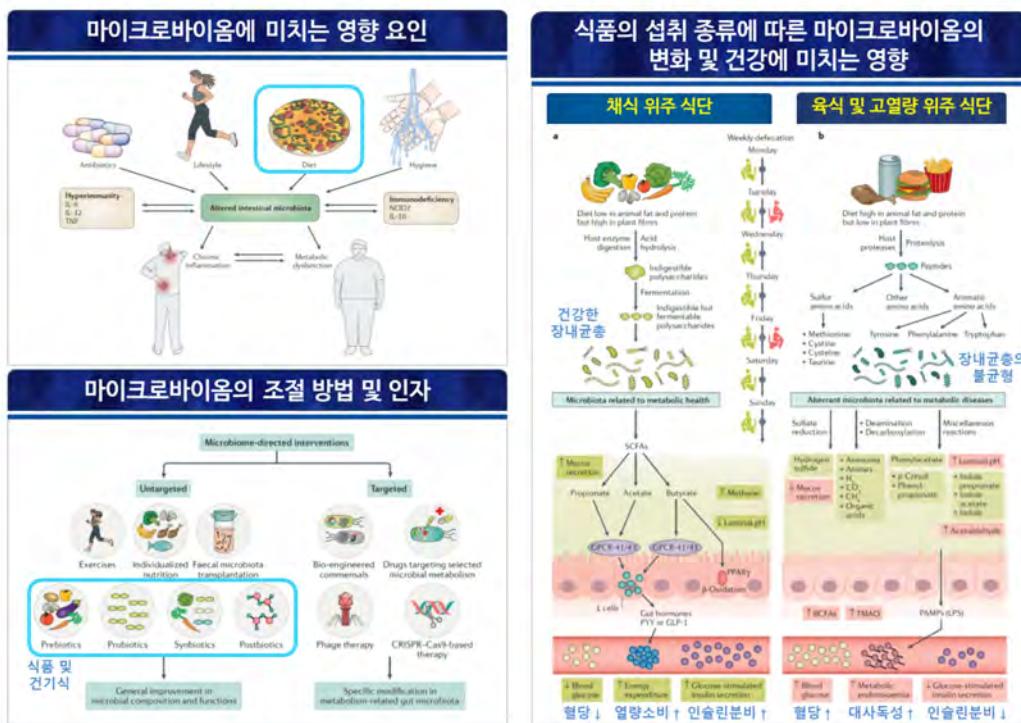
제232회 한림원 토론회

03

식품 분야에서의 농생명 마이크로바이옴

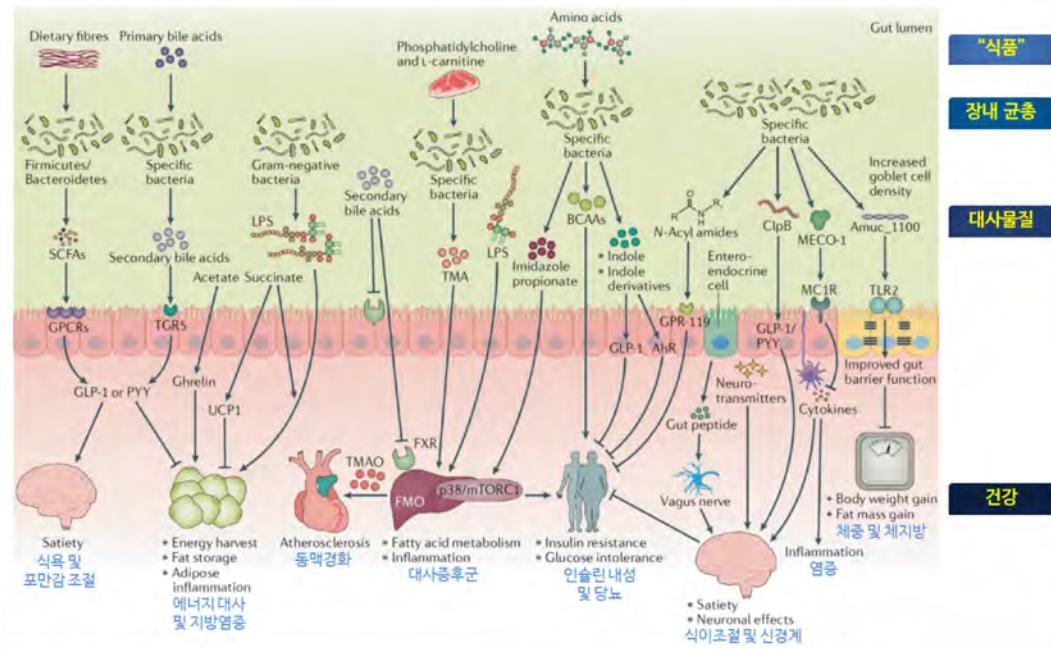
식품마이크로바이옴의 정의 및 활용

03-1. 식품이 장내 마이크로바이옴에 미치는 영향



03-2. 식품-마이크로바이옴-대사물질-건강의 연계성

식품, 장내 마이크로바이옴, 식품 대사물질, 그리고 건강의 상관 관계



제232회 한림원탁토론회

16

03-3. 마이크로바이옴에 있어서 식품의 중요성

마이크로바이옴을 위한 식물 및 동물 기반 식품의 종류



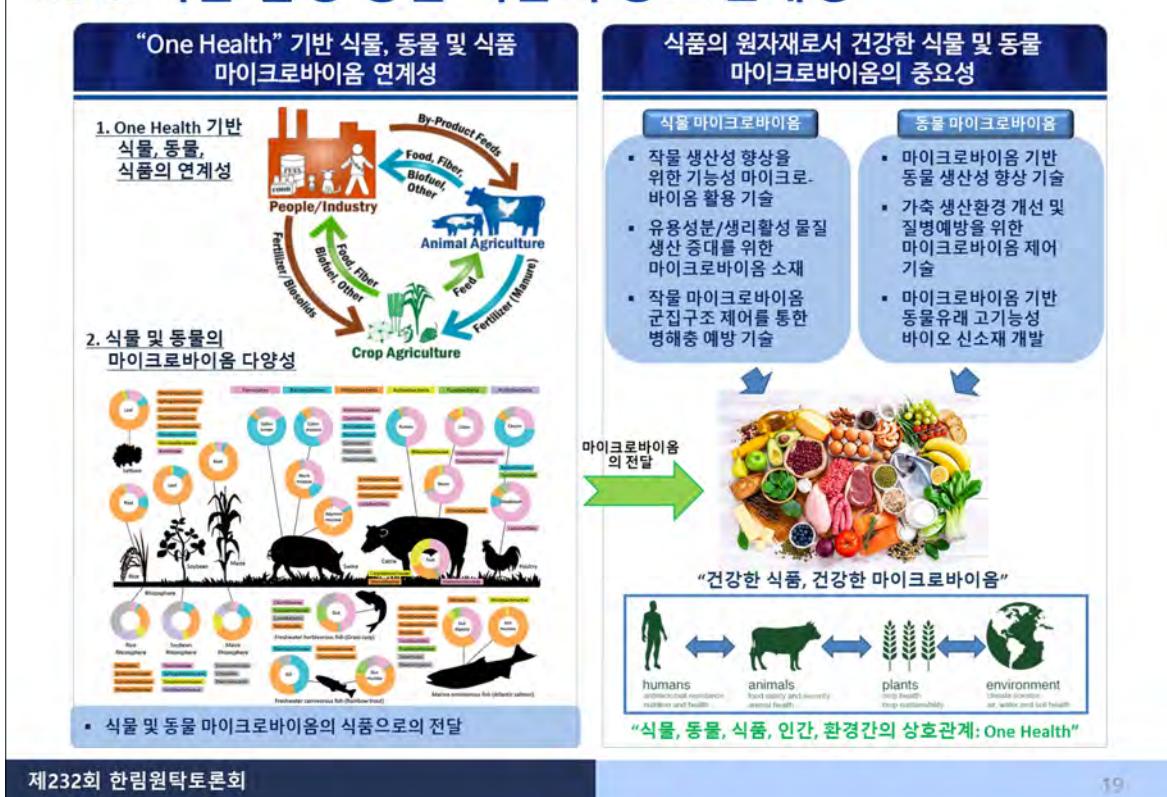
제232회 한림원탁토론회

17

03-4. 마이크로바이옴 기반 개인 맞춤형 식단 디자인



03-5. 식물-환경-동물-식품의 상호 연계성



감사합니다

주제발표 2

마이크로바이옴의 농업적 활용

• • •



김상범

농촌진흥청 농업미생물과 과장

KAIST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

마이크로바이옴의 농업적 활용

김상범

농촌진흥청

국립농업과학원 농업미생물과

Table of Contents

1. 농업미생물과 마이크로바이옴
2. 마이크로바이옴의 농업연구 사례
3. 축산 마이크로바이옴
4. 농업 마이크로바이옴 연구의 미래

01

농업미생물과 마이크로바이옴



농업 마이크로바이옴

Human gut microbiome

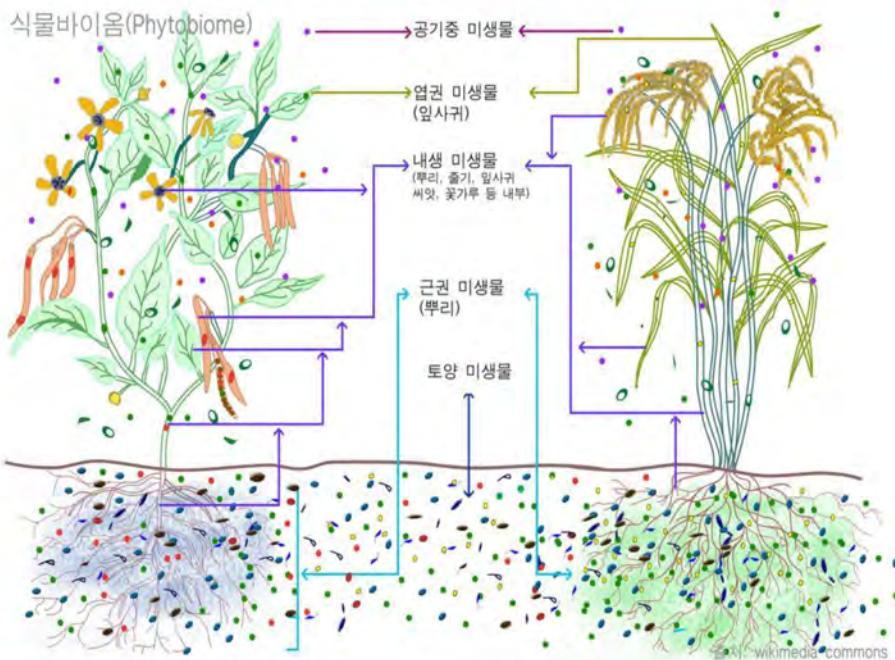


Plants wear their guts on the outside



(Janzen, 1985)

모든 식물은 마이크로바이옴과 공생관계



제232회 한림원탁토론회

Phytobiome (미국식물병리학회)



제232회 한림원탁토론회

마이크로바이옴의 농업연구 사례

제232회 한림원탁토론회

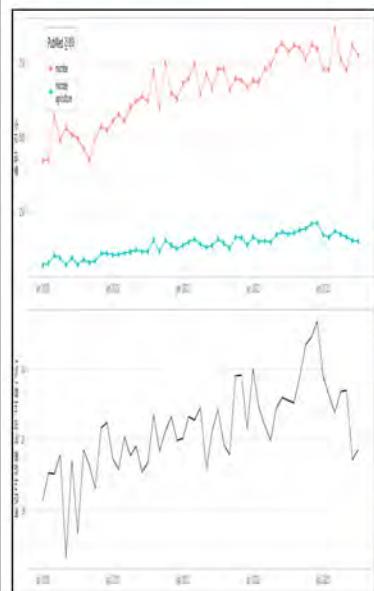
< 2019년 ~ 2023년(7월) 까지 NCBI에 등록된 미생물 관련 논문 분석 >

* 검색키워드: microbe (총 36,381건), microbe agriculture (총 7,587건)

논문 수는 꾸준히 증가 (미생물: 500 → 750, 농업 미생물 80 → 200)

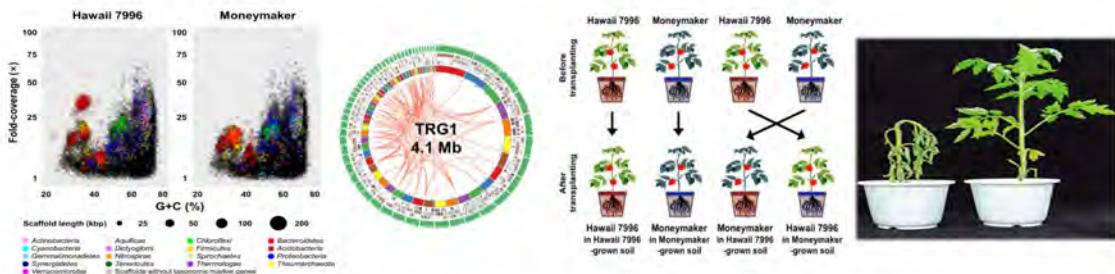
미생물 연구 중 농업 관련이 차지하는 연구 비율은 15%에서 23%로 증가

키워드 조사에서 최근 미생물은 군집 레벨에서 연구, 지속가능한 농업에 큰 중점을 두고 있음



Microbe (63,578 키워드)	Microbe, agriculture (18,661 키워드)
	

<CASE 1> 핵심 마이크로바이옴 구명 (우장춘 프로젝트)



<핵심균주 동정 및 유전체 정보 확인>

<풋마름병 저항성 토양 이식 → 병 발생 억제>

병 저항성 관련 마이크로바이옴의 구조 · 기능을 세계 최초로 구명

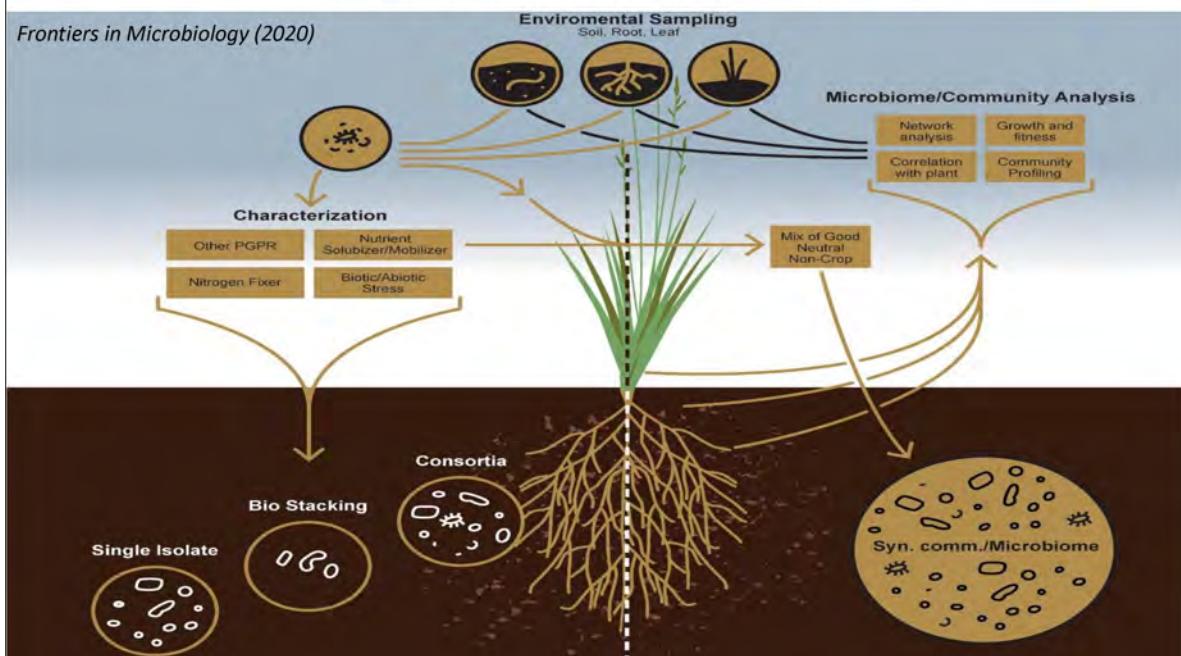
병 저항성 식물에서 서식하는 특정 미생물이 병 발생과 확산 억제(Nature Biotechnology, 2018)

제232회 한림원탁토론회

핵심 미생물 인공조합

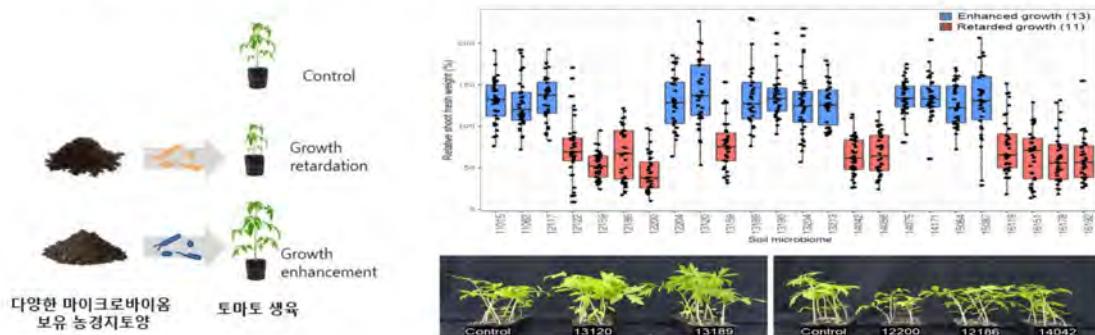
Synthetic community (SynCom)

일종의 FMT



<CASE 2> 미생물 인공조합 기반 토마토 생육 증진

< 근권(根圈) 마이크로바이옴 분석 및 생육 촉진 마이크로바이옴 선발 >



< 핵심 미생물 (keystone) 분리 >

Paraburkholderia sp. FT54, *Variovorax* sp. PMC12, *Leifsonia* sp. T36S-04

제232회 한림원탁토론회

<CASE 2> 미생물 인공조합 기반 토마토 생육 증진

생육증진 효과 검정 → 토마토 개화와 과실의 성숙이 빠르고, 수량 11% ↑



제232회 한림원탁토론회

<CASE 3> 미생물 인공조합 기반 과수화상병 방제

< 사과 유래 Anti-*Erwinia* 미생물 선발 >



< 메타게놈 분석 >

- ◆ 과수화상병과 경쟁관계인 미생물
- ◆ 비발병 미생물군집에서 물질대사가 활발한 미생물

미생물 상호작용 네트워크

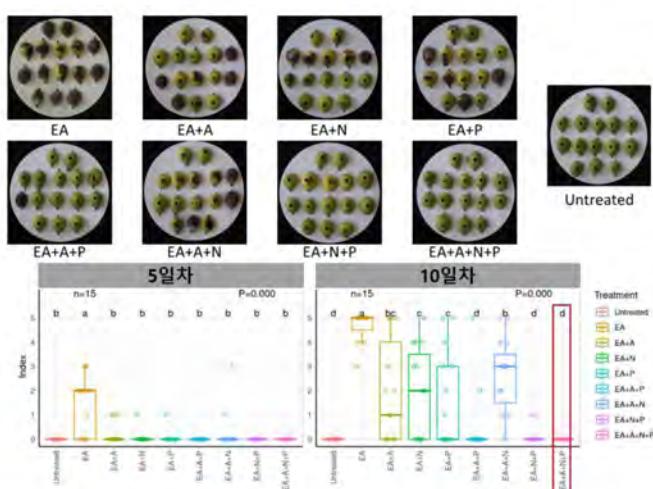


Category	Pathway	log ₂ FC	P adj
Aromatic compound degradation	Toluene degradation III (aerobic) (via p-cresol)	2.993.32	3.99E-06
	Catechol degradation to 2-hydroxypentadienoate II	1.472.48	0.000573
	Methylcatechol degradation (ortho cleavage)	1.905.38	0.000804
	Catechol degradation II (meta-cleavage pathway)	2.041.65	0.001093
	Superpathway of salicylate degradation	1.928.15	0.001215
	Catechol degradation I (meta-cleavage pathway)	2.454.65	0.001908
Sugar acid degradation	D-galacturonate degradation I	2.896.16	4.87E-05
	Superpathway of β -D-glucuronides degradation	645.45	0.003219
Nitrogen compound metabolism	Urea cycle	2.406.85	3.97E-06
	Porphyrin compound biosynthesis	2.695.71	0.000447
	Proteinogenic amino acid biosynthesis L-isoleucine biosynthesis IV	1.350.13	0.000499

<CASE 3> 미생물 인공조합 기반 과수화상병 방제

항생능력 + 네트워크 + 물질대사 우수 인공조합은

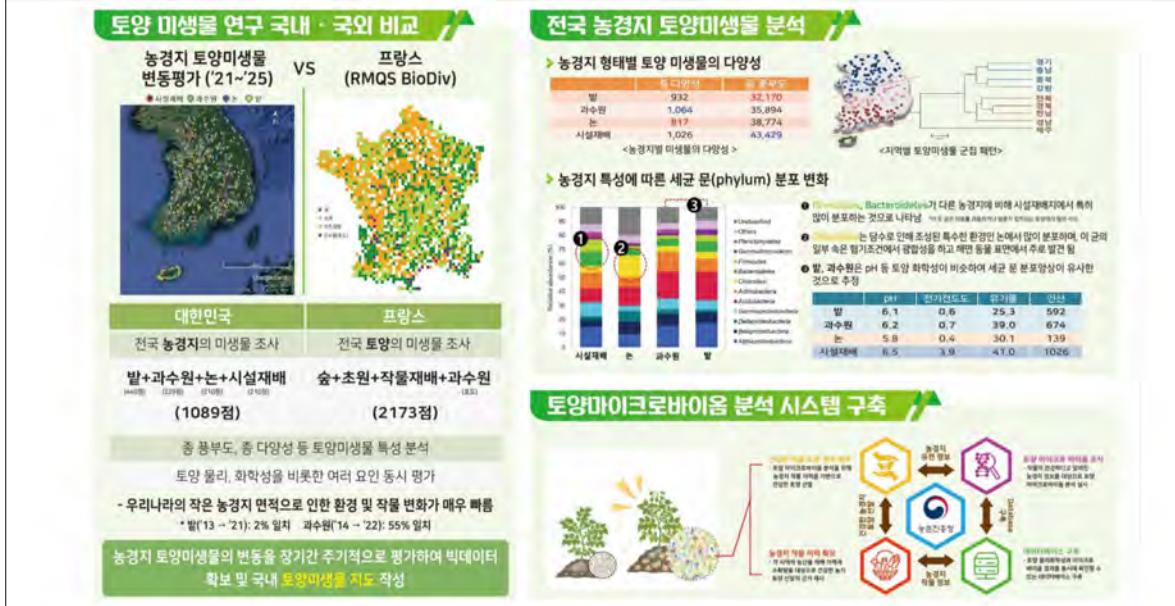
어린 사과 과실에서 과수화상병 억제능이 탁월



처리구 약어 요약
 Ea : 과수화상병원균
 A : Anti-*Erwinia*
 N : Network
 P : Pathway (물질대사)

<CASE 4> 마이크로바이옴 기반 농경지 지표 개발

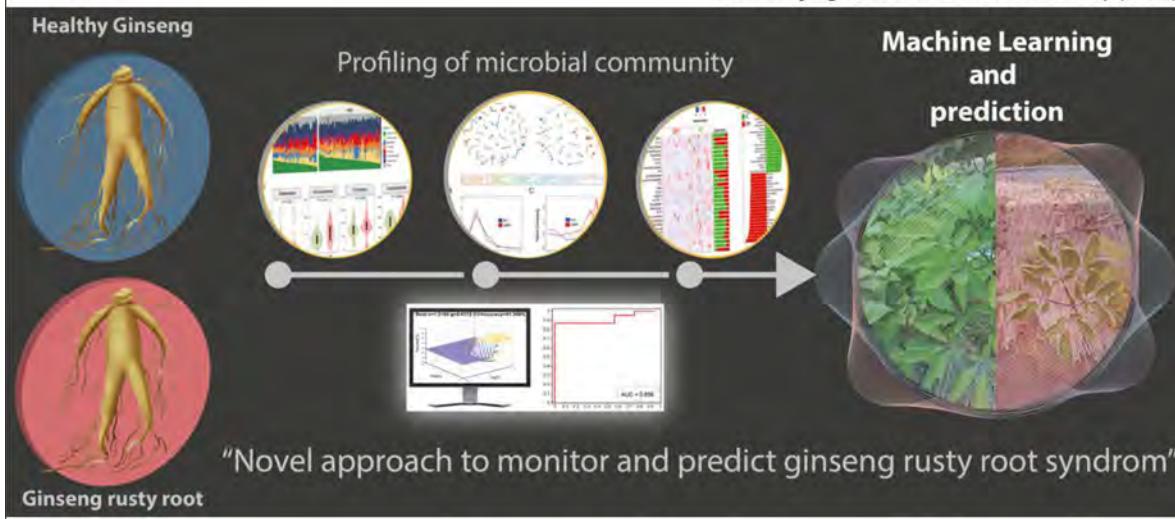
핵심 미생물 · 특성 및 미생물 군집의 풍부도 · 다양성 등을 평가하여
토양의 질적(건강) 평가지표로 활용



<CASE 5> 마이크로바이옴 기반 토양 판별법 개발

인삼 재배 전 인삼뿌리썩음병 발생 여부를 예측할 수 있는 머신러닝 모델 개발
→ 토양 마이크로바이옴+머신러닝을 활용한 판별(예측)법 개발(확률 90.99%)

Journal of Agricultural and Food Chemistry (2021)



03

축산 마이크로바이옴

축산 현안

가축질병



동물복지 및 환경문제



지속 가능한
축산발전을 위한
새로운 미래전략
발굴

낮은 생산성



국민건강



과거와 다른 대한민국 축산 앞에 놓여진 다양한 도전을 슬기롭게 이겨내기 위해
대한민국 축산의 패러다임 대전환이 필요한 시점

■ 마이크로바이옴

Gut microbiota

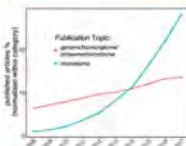
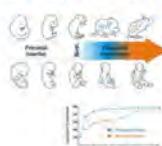
- 장내 존재하는 미생물 균형 분포

Gut microbiome

- 장 환경에서의 미생물 균형
뿐만 아니라 미생물 유래의
유전자원, 환경자원 등의
상호작용을 총체적으로 포함

$10^{13\sim 14}$ 미생물 존재, 대략 1,000~35,000종 분포

총 무게 1.5~2.5kg / Genome 크기는 진핵세포의 150배 이상



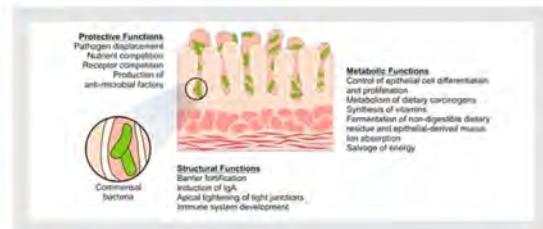
■ 동물건강과 장내미생물

단위동물

사료 급여, 장관 길이 및
우점 균주의 차이에 따라
촉종별 장내미생물
분포 분석이 필요

반추동물

장내미생물 뿐만 아니라
반추 위 발효패턴 등
질병관련 기능성 분석을
위한 미생물간의
상호작용 분석이 필요



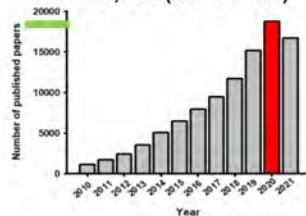
장내미생물과 동물 건강기능성 간의 상호작용 구명

Grenham et al., Frontiers in Physiology, 2011; Research trends, 2018

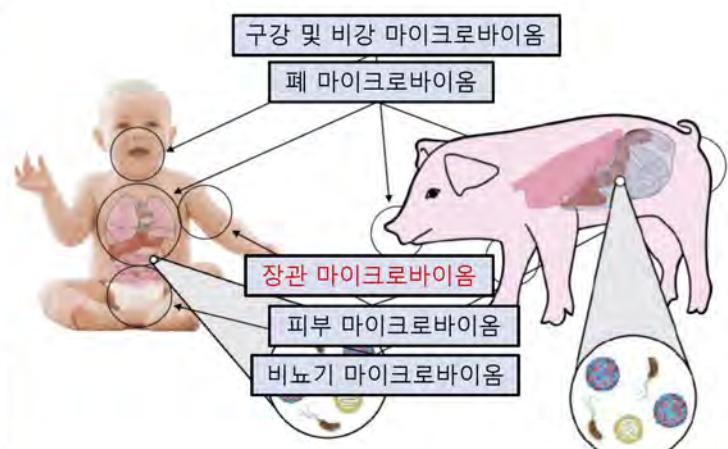
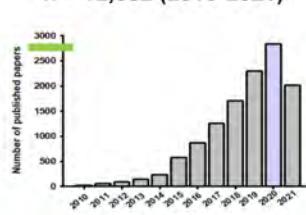
제232회 한림원탁토론회

축산 마이크로바이옴 연구

"Human Microbiome" n = 100,068 (2010-2021)



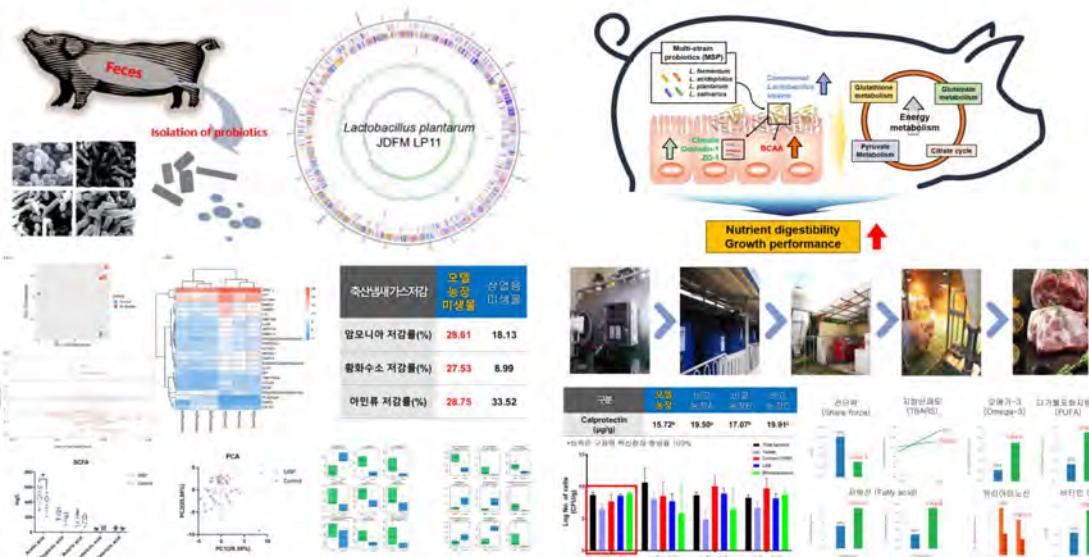
"Animal Microbiome" n = 12,082 (2010-2021)



동물(축산) 마이크로바이옴 연구결과는 빠르게 축적되고 있으며

인체 마이크로바이옴과 연계하여 지속적으로 발전 가능함

연구(활용) 사례



농가의 돼지에서 장내미생물 및 프로바이오틱스 균주를 분리, 동정 → 미생물 급여시
장내미생물 다양성 및 숙주 장관 면역활성 증가, 축산냄새 가스저감 및 출하돈의 육질개선

Chang et al. FSAR (2018); Shin et al. PLoS ONE (2019); Lee et al. Animal Microbiome (2024)

마이크로바이옴 연구 발전방향

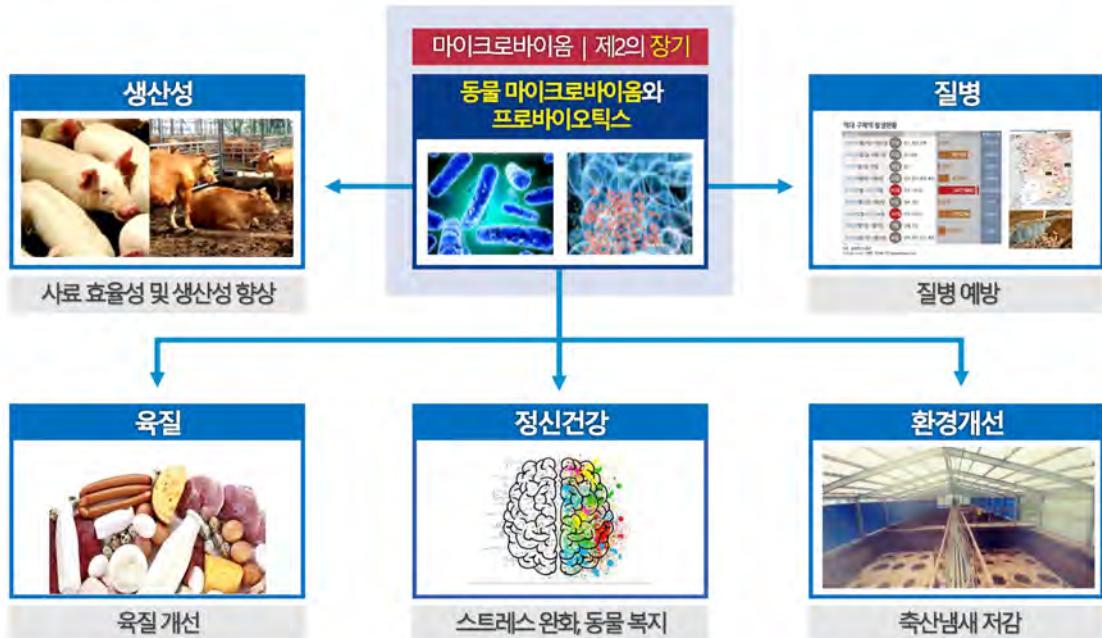
[AS-IS]

- 단순 메타지놈 기반의 16S rRNA 분석에 의한 유용 미생물 발굴의 한계
 - 경제동물, 반려동물 대상 유용 미생물 소재 개발 및 상용화 저조
 - 마이크로바이옴 정보의 활용성 저하

[TO-BE]

- 다양한 멀티오믹스 분석을 기반으로 하는 **기능성 유용미생물 발굴**
 - 난배양성 혐기미생물 소재의 **자원화** 및 현장 적용성 제고
 - **가축 전용 DB구축 및 공유**를 통한 관련 연구 활성화 유도
 - 다양한 축산 연구분야(육종, 사양, 번식, 가공 등)와의 **협력 연구시스템 구축** 필요

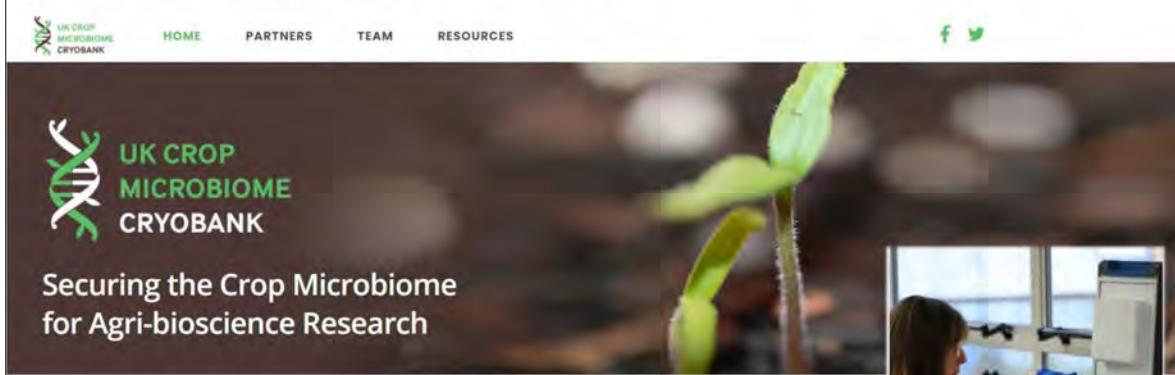
기대/파급효과



04

농업 마이크로바이옴 연구의 미래

작물 마이크로바이옴 뱅크 구축



- 마이크로바이옴 시료 보존 인프라 구축
- 표준화 프로토콜 수립, 이에 기반한 연구 수행
- 마이크로바이옴 최적화 보존 기술 개발
- 마이크로바이옴 데이터-실물자원 간 유기적 연계

< 시료 보존 기술 >

제232회 한림원탁토론회

마이크로바이옴 활용성 제고



- 실물자원 보존 뱅크 구축 (Cryobank, CABI)
- 데이터 보존 · 분석 시스템 운영 (MGnify, EMBL-EBI)
- 작물 마이크로바이옴 제제 개발 (CABI-Rothamsted research)

제232회 한림원탁토론회

농수축산신문

2024년 12월 6일 금요일 022면 오피니언

농업 마이크로바이옴 연구의 미래방향

기고



이 선 우

동아대 음용생물공학과 교수

- 마이크로바이옴은 열지 않은 보물상자
- 토양 미생물총 정보에 근거해 토양비옥도 · 생산성을 진단하고 부족한 미생물을 채워주는 것이 가능할 것
- 작물별로 맞춤형 미생물총을 형성하는 기술 개발
→ 농약, 비료 절감 등 친환경적 생산성 향상을 주도
- 농업 마이크로바이옴 연구는 가장 복잡한 생태계에 대한 연구이므로 장기간의 연구와 투자가 필수적

우리의 먹거리가 생산되는 농과 밭을 맨눈으로만 본다면 기름진 흙과 그 속에 뿌리를 내리고 푸르게 자라는 각종 작물로 덮여있다고 할 수 있다. 그러나 같은 현장을 현미경으로 자세히 보고 생물들의 유전정보를 분석하는 도구를 사용하면 흙도 작물도 모두 매우 작은 미생물들로 온통 뒤덮여 있음을 알게 된다. 한 흙 속에 약 1만 종 이상의 다양한 세균들이 1000억 마리 이상 함께 어우러져 살며 작물의 표면, 내부에도 무수히 많은 미생물이 자리잡고 있다. 이런 미생물 집단은 미생물총(microbiota)이라고 하는데 그 미생물총의 모든 유전정보와 그 기능에 연관된 모든 결과물을 마이크로바이옴(microbiome)이라고 부른다.

제232회 한림원탁토론회

감사합니다.



주제발표 3

질병 극복의 열쇠: 마이크로바이옴 연구의 현재와 미래



방 예 지

서울대학교 의과대학 조교수

KAIST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

질병 극복의 열쇠: 마이크로바이옴의 연구의 현재와 미래

방예지

서울대학교 의과대학



SNU
MEDICINE



히포크라테스
(서양 의학의 아버지)

“모든 질병은 장에서 시작된다”

All disease begins in the gut

“음식이 약이다”

Let food be thy medicine
and medicine be thy food

마이크로바이옴
microbiome

Table of Contents



1. 마이크로바이옴과 질병
2. 식이 (Diet)와 마이크로바이옴
 - 고섬유질 식단, 단쇄지방산과 대사질환
 - 적색육위주 식단, TMAO과 심혈관 질환
 - 인공감미료와 혈당조절
3. 마이크로바이옴과 함께 건강지키기
 - 마이크로바이옴 기반 치료제

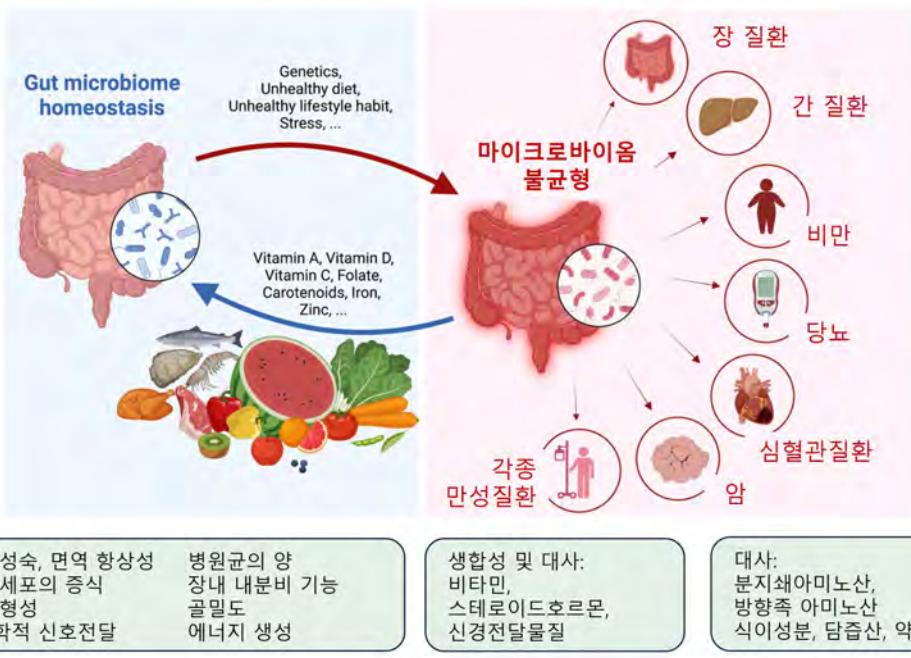
01

마이크로바이옴과 질병

제232회 한림원탁토론회

4

마이크로바이옴 불균형과 각종 질병



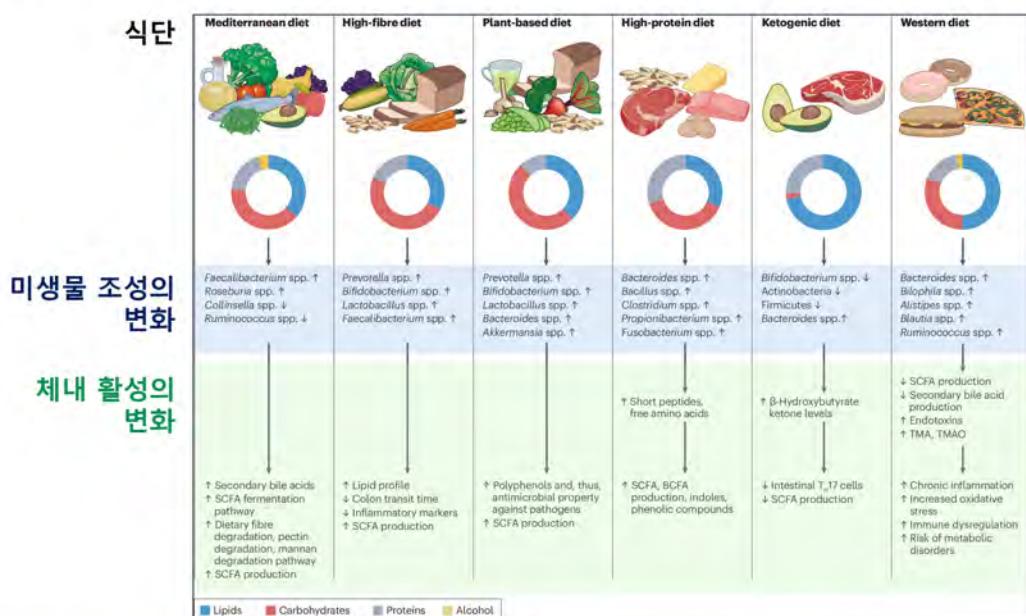
제232회 한림원탁토론회

SNU MEDICINE 5

02

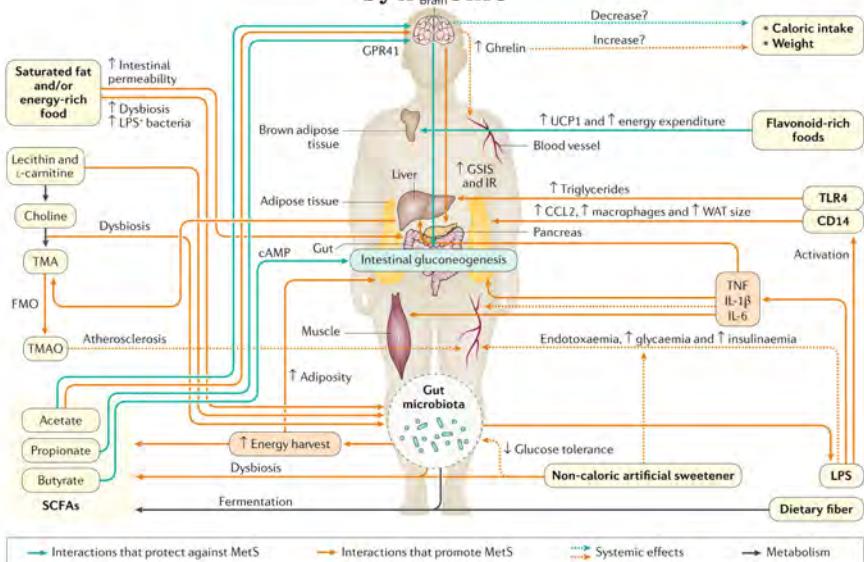
식이와 마이크로바이옴

다양한 식단이 마이크로바이옴에 미치는 영향



Nat Rev Microbiol. (2024) 22, 671-686.

Microbiota - diet interactions in the metabolic syndrome



Nat Rev Gastroenterol Hepatol (2019) 16, 35

제232회 한림원탁토론회

SNU MEDICINE

마이크로바이옴-식이-건강의 복잡한 상관관계

비타민 A의 면역 조절 효능에 마이크로바이옴이 미치는 영향

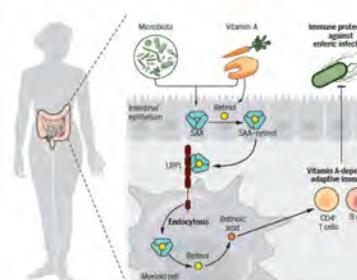
RESEARCH

RESEARCH ARTICLE

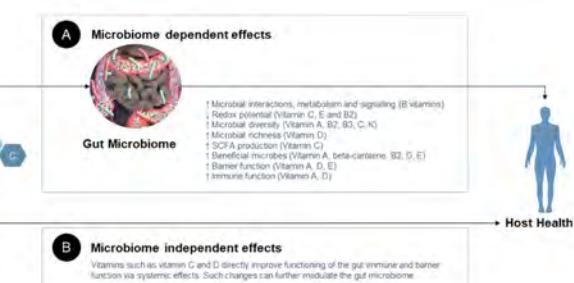
IMMUNOLOGY

Serum amyloid A delivers retinol to intestinal myeloid cells to promote adaptive immunity

Ye-Ji Bang¹, Zehan Hu², Yun Li³, Sureka Gattu¹†, Kelly A. Ruhn⁴, Prithvi Raj⁵, Joachim Herr^{2,3,4,5}, Lora V. Hooper^{1,6,7}



Science (2021) 373, eabf9232



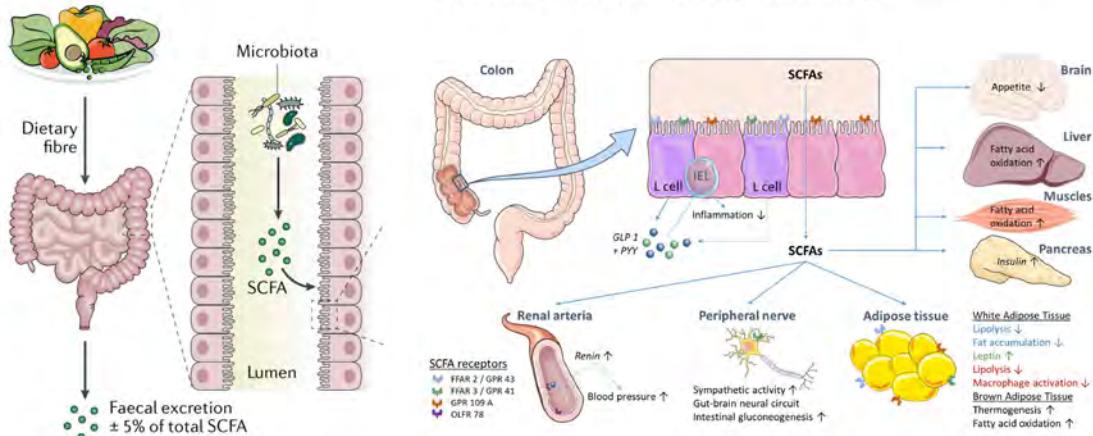
Nutrition Research (2021) 95, 35

제232회 한림원탁토론회

SNU MEDICINE

[1] 고섬유질 식단: 단쇄지방산과 대사질환

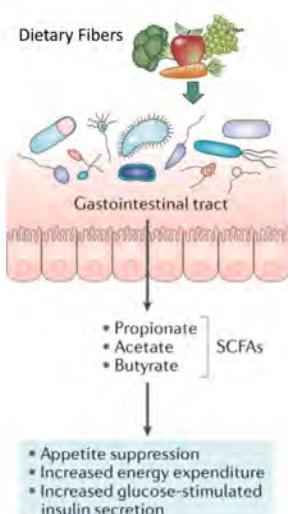
Overview of effects of SCFAs on different tissues and human metabolism



Nat Rev Gastroenterol Hepatol (2019) 16, 461

EBioMedicine (2021) 66, 103293

[1] 고섬유질 식단: 단쇄지방산과 대사질환



Nat Rev Nephrol (2019) 15, 389

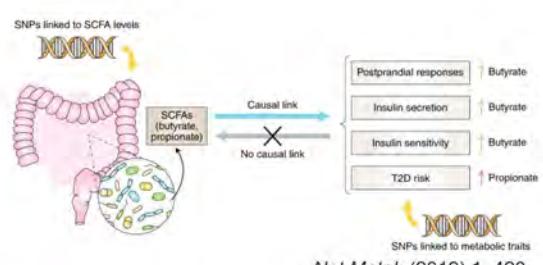
LETTERS
<https://doi.org/10.1038/s41588-019-0350-x>

nature genetics

Causal relationships among the gut microbiome, short-chain fatty acids and metabolic diseases

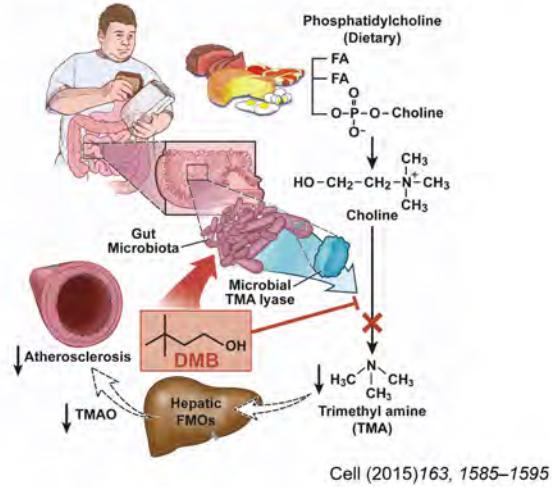
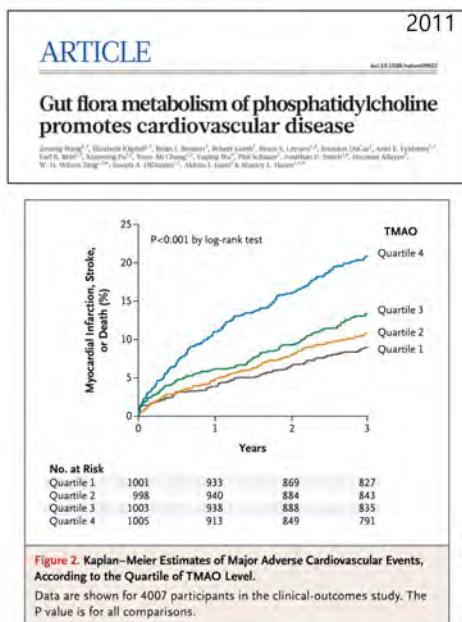
Serena Sanna ^{1,2,3*}, Natalie R. van Zuydam ^{2,3,4}, Anubha Mahajan ^{2,3,5}, Alexander Kurilshikov ^{2,3}, Arnau Vich Vila ^{2,3,4}, Urmo Viola ², Zlatan Mujagic ², Ad A. M. Masclee ², Daisy M. A. E. Jonkers ², Marije Oosting ², Leo A. B. Joosten ^{2,4}, Mihai G. Netea ^{2,5}, Lude Franke ^{2,3}, Alexandra Zhernakova ², Jingyuan Fu ^{2,6}, Cisca Wijmenga ^{2,3,6,7*} and Mark I. McCarthy ^{2,3,8,9*}

Nat Genet
(2019) 51, 600



Nat Metab (2019) 1, 420

[2] 적색육위주 식단: TMAO 와 심혈관질환



- TMAO (트리메틸아민-N-옥사이드) 상승 → 심혈관 질환 위험과 사망률 증가
- 장내 마이크로바이옴에 따른 TMAO 수치 변화 확인

[3] 인공감미료와 혈당 조절



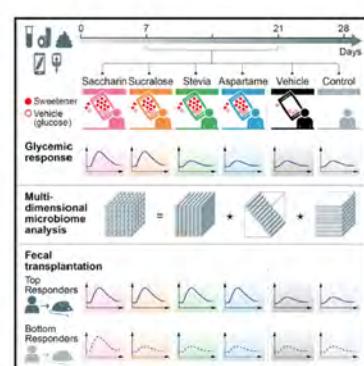
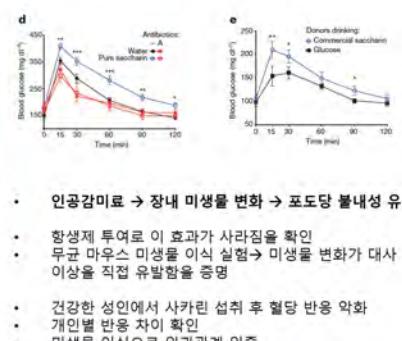
ARTICLE (2014)

Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota

Author: Suez J^{1,2}, Falony G^{1,2}, David Zeev^{1,2}, Gil Bitterman-Schapiro^{1,2}, Orly Shai¹, Ori Mashiach¹, David Lewin¹, Nir Zmora^{1,2,3}, Shlomo Gilad¹, Adina Weinberger¹, Yael Kuperman¹, Alon Harmelin¹, Bina Kolodkin-Gal¹, Hagit Buzaglo¹, Zivie Halperin¹, Eran Segal¹, Eran Elinav¹

Cell (2022)

Personalized microbiome-driven effects of non-nutritive sweeteners on human glucose tolerance

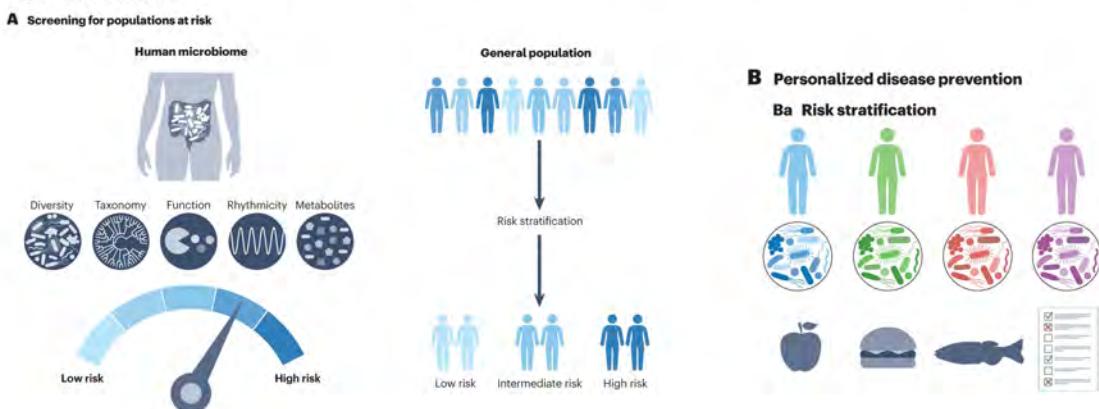


03

마이크로바이옴과 함께 건강지키기

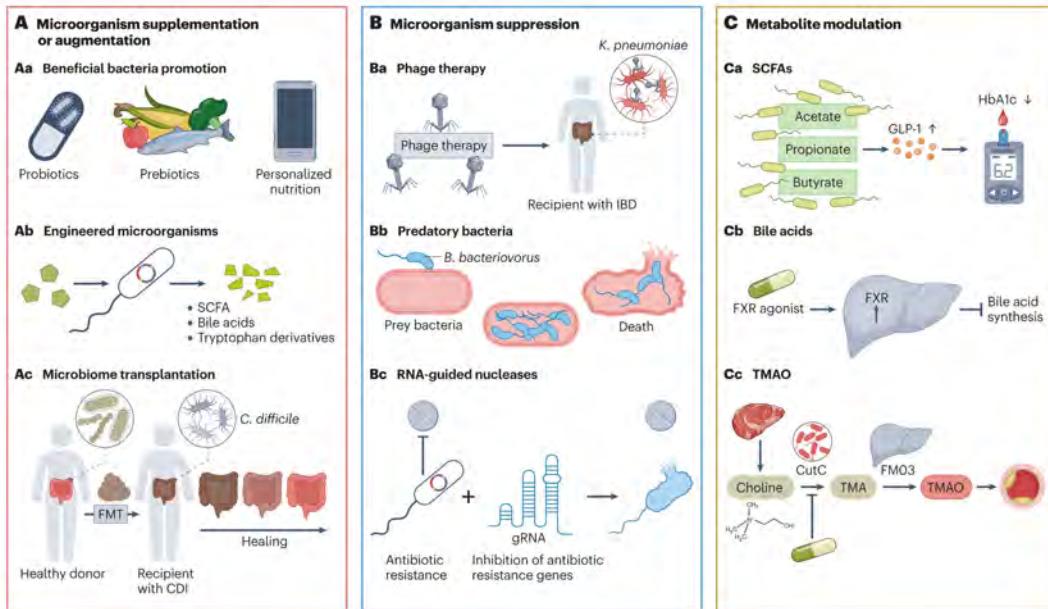
마이크로바이옴을 이용한 질병의 예방

Utilization of microbiome data for screening and personalized prevention of disease



Nat Rev Microbiol (2024) 22, 291

마이크로바이옴을 이용한 질병의 치료

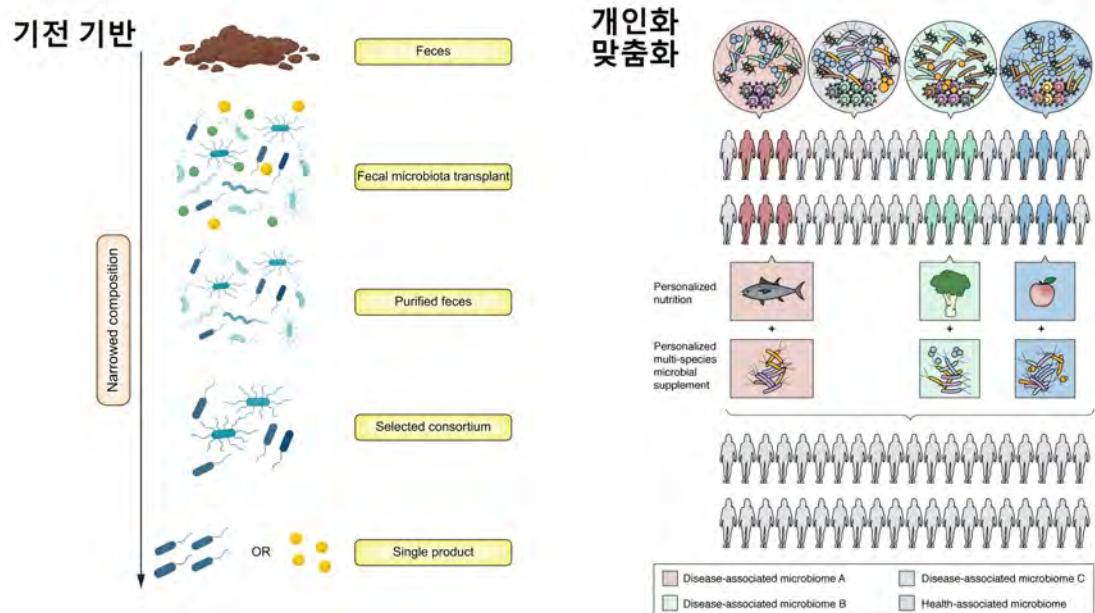


Nat Rev Microbiol (2024) 22, 291

제232회 한림원탁토론회

SNU MEDICINE 16

마이크로바이옴 기반 치료제의 미래



JHEP Reports (2025) 7, 101234

J Exp Med (2019) 216, 20

제232회 한림원탁토론회

SNU MEDICINE 17

II

토 론

좌 장 **최상호** 서울대학교 식품바이오융합연구소 소장

지정토론 1 **김지현** 연세대학교 생명시스템대학 교수

지정토론 2 **김명희** 한국생명공학연구원 마이크로바이옴융합연구센터 센터장

지정토론 3 **유웅재** POSTECH 생명과학과 조교수

지정토론 1

•••



김 지 현

연세대학교 생명시스템대학 교수

나, 홀로바이옴에서 마이크로바이옴 원헬스까지

우리 선조들은 대대로 농산물을 오래 보존하기 위한 수단으로써 또는 맛과 영양을 위해 발효 음식을 즐겨 만들어 먹었지만, 미생물의 다양한 역할이 과학적으로 밝혀진 것은 겨우 한 세기가 지났을 뿐이다. 또한 돌림병 또는 역병이라고 부르던 몇몇 세균이나 바이러스 등 병원체의 감염에 의한 전염병에 대한 두려움은 인류에게 익숙한 현실이었다. ‘미생물학의 아버지’라고도 불리는 파스퇴르(Louis Pasteur)가 1886년에 세운 연구소에 영입된 메치니코프(Ilya Ilyich Mechnikov)는 면역학 분야의 선구적 발견과 더불어 유산균과 장내 미생물이 건강과 노화에 미치는 영향에 처음으로 주목한 과학자이다. 이후 병원균에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 왔지만, 마이크로바이오타(microbiota)라고 불리는 미생물군집을 이루는 착한 시민인 ‘보통’ 미생물의 중요성과 역할에 대해 관심을 돌리게 된 것은 최근의 일이다. 20세기가 끝나갈 무렵 ‘인간게놈프로젝트(Human Genome Project; HGP)’를 추진하는 과정에서 미생물유전체학은 급속도로 발전했으며, 2000년대 들어 제2의 인간게놈프로젝트로 제안한 ‘인체미생물체프로젝트(Human Microbiome Project; HMP)’와 ‘MetaHIT’ 프로젝트를 통해 우리 몸의 미생물에 대한 기초 데이터가 확보되었다. 나아가 지난 20여 년 동안의 과학적 성과로 미생물이 구강·소화기질환, 피부·생식기질환과 여러 염증성 면역질환 및 대사질환뿐만 아니라 심혈관질환, 뇌신경·정신질환 및 각종 암 등과도 관련이 있다는 것이 밝혀지면서 미생물을 이용한 질병

예방, 진단 및 치료에 대한 관심도 커지고 있다. 하지만 우리는 마이크로바이옴(microbiome)에 대해 겨우 얼굴을 익히기 시작한 수준에 이르렀을 뿐이고, 아직도 표준 분석기술 확립과 빅데이터 확보에 목마르다. 중요한 것은 장내 마이크로바이옴은 우리가 즐겨 먹는 먹거리에 의해 크게 영향을 받으며, 음식 유래의 다양한 화합물, 의약품 등이 장내 미생물에 의해 대사되어 우리 몸에 예기치 않은 효과를 미치기도 한다는 것이다. 마이크로바이옴 연구는 이제 인체뿐만 아니라 인간에 영향을 미칠 수 있는 동·식물, 토양, 해양 등 다양한 환경의 생태에 대한 통합적인 연구로도 발전해나가고 있다. 우리나라에서는 과기정통부, 복지부, 질병청, 산업부, 식약처 등에서도 브릿지사업을 포함한 연구개발 및 예비타당성조사를 위한 기획을 수행하고 있고, 농식품부, 농진청, 해수부, 환경부 등에서 마이크로바이옴 기획 및 연구개발 추진이 이루어지고 있다. 여러 정부부처가 관여하고 미생물학, 면역학, 생리학, 식품영양학, 의약학과 유전체학, 컴퓨터생물학, 임상의학 등 여러 분야의 전문가들이 참여하는 마이크로바이옴 다학제 연구는 소통과 협력을 통한 시너지가 필수적이다. 이를 통해 자연환경에서 길러진 작물과 경제동물에서 시작하여 이들이 식품으로 만들어지고 우리의 입으로 들어가 소화되고 흡수되어 우리 몸의 마음의 건강과 질병을 주관하는 과정에 참여하는 여러 마이크로바이옴과 작물, 가축, 식품, 인체의 유기적 관계를 규명하고 응용하는 것을 과학기술적 발전의 핵심으로 삼아야 할 것이다.

지정토론 2

•••



김 명 희

한국생명공학연구원 마이크로바이옴융합연구센터 센터장

우리가 먹는 음식, 장(腸) 마이크로바이옴과 면역 형성의 핵심

미국 국립보건원이 주도하여 수행한 인간 마이크로바이옴 프로젝트(Human Microbiome Project)와 유럽 연합의 MetaHit(Metagenomics of the Human Intestinal Tract) 프로젝트 등을 통해, 마이크로바이옴[미생물 군집(microbiota)과 유전체(genome)의 합성어]은 건강과 질병에 매우 밀접하게 관련되어 있다는 사실을 알게 되었다.

우리 몸속에 사는 미생물의 95% 이상은 장(腸)에 존재한다. 장(腸)은 우리 몸의 면역력을 결정하는 면역세포의 70% 이상이 존재하는 인체의 최대 면역기관으로, 마이크로바이옴은 이러한 장내 환경과 지속적인 상호작용을 통해 장내 점막 면역계의 발달과 성숙에 필요한 역할을 직간접적으로 수행한다. 이를 통해 발생하는 대사 및 면역 물질들은 장(腸)뿐만 아니라 간, 심장, 뇌 등의 인체의 모든 기관과 상호작용을 한다는 사실들이 밝혀지고 있다. 따라서, 이러한 장(腸) 마이크로바이옴의 불균형(Microbiome dysbiosis)은 인간의 대부분 질병과 연관되어 있고 이러한 이유로 마이크로바이옴을 ‘제2의 장기’라고 말하기도 한다.

우리가 매일 섭취하는 음식은 장(腸) 마이크로바이옴의 구성과 기능에 많은 영향을 끼친다. 예를 들어, 우리가 섭취한 음식 내의 식이섬유는 인체가 소화 흡수하지 못하는 성분으로 장내 미생물은 이러한 성분을 대사하여 영양분으로 활용하면서 살아간다. 이러한 대사 과정에서 생산되는 짧은사슬지방산과 같은 대사산물들은 우리 몸의 면역체계를 안정화하고 생리 기능을

유지하는 데 중요한 역할을 한다는 사실들이 밝혀지고 있다. 따라서 섭취하는 음식의 종류에 따라 이를 활용하는 다양한 장내 미생물의 구성이 결정되고 이는 기능과 연계되어 우리의 건강 상태와 직간접적으로 연결이 되는 것이다.

우리 몸에 존재하는 미생물들은 태아 시기부터 모체의 식이 상태의 영향을 받아 정착이 시작되며, 생애 주기 동안 지속해서 변화한다. 이 미생물들은 식이 환경, 유전 요인, 약물 복용력, 생활 환경 등 다양한 요인에 의해 지속적인 변화를 겪으며 개인 특이적인 마이크로바이옴으로 형성되어 면역체계 조절, 약물 대사 조절, 뇌/행동 발달 조절, 감염성 질환 예방 등에 중요한 영향을 주는 것이다.

최근 많은 연구를 통해 마이크로바이옴이 인체에 미치는 비밀들이 밝혀지면서, 일상적으로 섭취하는 식품 선택의 중요성이 부각되고 있다. 장내 유의균의 성장을 촉진하고, 장내 마이크로바이옴의 균형을 유지하여 인체의 신진대사 및 면역체계를 강화시킬 수 있는 건강한 식품은 어떤 것들이 있고, 이러한 식품은 장에서 어떻게 마이크로바이옴과 상호작용을 통해 대사되어 면역과 생리를 조절하는 기능이 부여된 물질로 전환되는지에 대한 근원적인 질문들을 탐구하는 “식품생물학(Food biology)”은 미래의 정밀 의료를 실현하기 위한 중요한 한 축을 담당할 것으로 주목받고 있다.

인체의 면역과 생리를 조절하는 마이크로바이옴을 활용한 건강 관리 및 증진 그리고 질병 치료는 미래의 의료 혁신으로 전망되고 있다. 지속적인 연구와 투자를 통한 “식이-장(腸) 마이크로바이옴-인체” 상호작용에 관한 명확한 이해는 건강한 삶을 영위할 방법을 찾을 수 있는 핵심으로 작용할 것이다.

지정토론 3

•••



유 응재

POSTECH 생명과학과 조교수

농산품 및 식품 성분이 마이크로바이옴과 인체 건강에 미치는 영향과 실생활에서의 활용 방안**1. 마이크로바이옴의 개념과 중요성**

정의: 마이크로바이옴은 우리 몸에 서식하는 미생물 군집, 특히 장내 미생물이 건강에 중요한 역할을 함.

영향: 소화, 면역력, 비만, 염증성 질환, 심지어 정신 건강(우울증)까지 연관됨.

2. 식품과 마이크로바이옴의 관계**1) 발효식품**

김치: 유산균이 풍부해 장내 유익균 증가 → 소화 개선, 면역력 강화.

활용법: 김치 계란말이, 김치 샐러드 등 일상 식단에 응용.

된장·청국장: 바실러스균이 소화 돋고 면역 활성화.

요구르트·케피어: 다양한 프로바이오틱스 제공, 소화와 장 건강 개선.

2) 식이섬유

채소·과일: 고구마, 브로콜리, 양배추, 사과, 바나나 등이 프리바이오틱스 역할.

잡곡·견과류: 귀리, 보리, 견과류는 장내 유익균 성장 촉진.

3) 특용작물

인삼·마늘: 진세노사이드와 알리신 성분이 염증 완화 및 장내 환경 개선.

참마·복분자: 장 점막 보호 및 유익균 증식 도움.

3. 나쁜 식습관의 영향

고지방·고당류: 유해균 증가 및 염증 반응 유발.

가공식품: 방부제가 장내 생태계 파괴 → 라면 대신 된장국 추천.

당과 인공 감미료: 장내 균 다양성 감소.

4. 실천 가능한 장 건강 습관

1. 발효식품 매일 섭취: 김치, 요구르트, 청국장 등.

2. 채소와 과일 충분히 섭취: 하루 한 끼는 채소 위주 식사.

3. 가공식품 줄이기: 건강한 식단으로 대체.

4. 충분한 물 섭취: 하루 1.5~2L.

5. 프리바이오틱스 + 프로바이오틱스 조합: 예) 요구르트 + 바나나.

“우리가 먹는 음식이 우리 몸의 건강을 결정합니다. 매일 작은 실천으로 마이크로바이옴과 친구가 되어보세요!”

한림원탁토론회는...



한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 세우고, 동시에 과학기술 현안문제에 대한 해결방안을 모색하기 위한 목적으로 개최되고 있는 한림원의 대표적인 정책토론 행사입니다.

지난 1996년 처음 개최된 이래 지금까지 200회 이상에 걸쳐 초중등 과학교육, 문·이과 통합문제, 국가발전에 미치는 기초과학 등 과학기술분야의 기본문제는 물론 정부출연연구소의 발전방안, 광우병의 진실, 방사능, 안전 방제 등 국민생활에 직접 영향을 미치는 문제에 이르기까지 광범위한 주제를 다루고 있습니다.

한림원은 과학기술 선진화에 걸림돌이 되는 각종 현안문제 중 중요도와 시급성에 따라 주제를 선정하고, 과학기술 유관기관의 최고책임자들을 발제자로 초빙하여, 한림원 석학들을 비롯해 산·학·연·정의 전문가들이 심도 깊게 토론을 진행하고 있습니다.

토론후에는 책자로 발간, 정부, 국회와 관련기관에 배포함으로써 정책 개선방안을 제시하고 정책 입안자료를 제공하여 여론 형성에 기여하도록 힘쓰고 있습니다.

■ 한림원탁토론회 개최실적 (2021년 ~ 2024년) ■

회차	일자	주제	발제자
182	2021. 2. 19.	세계대학평가 기관들의 객관성 분석과 국내대학을 위한 제언	이준영, 김현, 박준원
183	2021. 4. 2.	인공지능 시대의 인재 양성	오혜연, 서정연
184	2021. 4. 7.	탄소중립 2050 구현을 위한 과학기술 도전 및 제언	박진호, 정병기, 윤제용
185	2021. 4. 15.	출연연구기관의 현재와 미래	임혜숙, 김명준, 윤석진
186	2021. 4. 30.	메타버스(Metaverse), 새로운 가상 융합 플랫폼의 미래가치	우운택, 양준영
187	2021. 5. 27.	원격의료: 현재와 미래	정용, 최형식
188	2021. 6. 17.	배양육, 미래의 먹거리일까?	조철훈, 배호재
189	2021. 6. 30.	외국인 연구인력 지원 및 개선방안	이한진, 이동현, 버나드에거
190	2021. 7. 6.	국내 대학 연구 경쟁력의 현재와 미래	이현숙, 민정준, 윤봉준
191	2021. 7. 16.	아이들의 미래, 2022 교육과정 개정에 부쳐: 정보교육 없는 디지털 대전환 가능한가?	유기홍, 오세정, 이광형
192	2021. 10. 15.	자율주행을 넘어 생각하는 자동차로	조민수, 서창호, 조기준
193	2021. 12. 13.	인간의 뇌를 담은 미래 반도체 뉴로모픽칩	윤태식, 최창환, 박진홍
194	2022. 1. 25.	거대한 생태계, 마이크로바이옴 연구의 미래	이세훈, 이주훈, 이성근
195	2022. 2. 14.	양자컴퓨터의 전망과 도전: 우리는 무엇을 준비해야 할까?	이진형, 김도현
196	2022. 3. 10.	오미크론, 기존 바이러스와 무엇이 다르고 어떻게 대응할 것인가?	김남중, 김재경
197	2022. 4. 29.	과학기술 주도 성장: 무엇을 해야 할 것인가?	송재용, 김원준

회차	일자	주제	발제자
198	2022. 6. 2.	더 이상 자연재난은 없다: 자연-기술 복합재난에 대한 이해와 대비	홍성욱, 이호영, 이강근, 고상백
199	2022. 6. 17.	K-푸드의 가치와 비전	권대영, 채수완
200	2022. 6. 29.	벤자민 버튼의 시간, 노화의 비밀을 넘어 역노화에 도전	이승재, 강찬희
201	2022. 9. 26.	신약개발의 새로운 패러다임	김성훈, 최선, 김규원
202	2022. 9. 29.	우리는 왜, 어떻게 우주로 가야 하는가?	문홍규, 이창진
203	2022. 10. 12.	공학과 헬스케어의 만남 – AI가 여는 100세 건강	황희, 백점기
204	2022. 10. 21.	과학기술과 사회 정의	박범순, 정상조, 류석영, 김승섭
205	2022. 11. 18.	지속 가능한 성장과 가치 혁신을 위한 수학의 역할	박태성, 백민경, 황형주
206	2022. 12. 1.	에너지와 기후변화 위기 극복을 위한 기초과학의 역할	유석재, 하경자, 윤의준
207	2023. 3. 15.	한국 여성과학자의 노벨상 수상은 요원한가?	김소영, 김정선
208	2023. 3. 22.	기정학(技政學) 시대의 새로운 과학기술혁신정책 방향	이승주, 이근, 권석준
209	2023. 4. 13.	우리 식량 무엇이 문제인가?	곽상수, 이상열
210	2023. 5. 24.	대체 단백질 식품과 배양육의 현재와 미래	서진호, 배호재
211	2023. 6. 14.	영재교육의 내일을 생각한다	권길현, 이덕환, 이해정
212	2023. 7. 6.	후쿠시마 오염수 처리 후 방류의 국내 영향	정용훈, 서경석, 강건욱
213	2023. 7. 12.	인구절벽 시대, 과학기술인재 확보를 위한 답을 찾아서	오현환, 엄미정

회차	일자	주제	발제자
214	2023. 8. 17.	과학·영재·자사고 교장이 이야기하는 바람직한 학생 선발과 교육	허우석, 오성환, 김명환
215	2023. 10. 27.	과학기술을 통한 삶의 질 향상 시리즈 (Ⅰ) 국민 삶의 질 향상을 위한 과학기술정책의 대전환	정선양, 박상철
216	2023. 11. 9.	과학기술을 통한 삶의 질 향상 시리즈 (Ⅱ) 삶의 질 향상을 위한 데이터 기반 식단 및 의학	박용순, 정해영
217	2023. 12. 5.	과학기술을 통한 삶의 질 향상 시리즈 (Ⅲ) 삶의 질 향상을 위한 퍼스널 모빌리티	공경철, 한소원
218	2023. 12. 19.	새로운 의료서비스 혁명: 디지털 치료제	서영준, 배민철
219	2024. 1. 31.	노쇠와 근감소증	원장원, 권기선, 고흥섭
220	2024. 3. 13.	필수의료 해결을 위한 제도적 방안	박민수, 김성근, 홍윤철
221	2024. 3. 19.	코로나보다 더 큰 위협이 올 수 있다, 어떻게 할까?	송대섭, 신의철
222	2024. 3. 20.	퍼스트 무버(First Mover)로의 필수 요소 - 과학네트워킹	김형하, 이상엽, 조희용
223	2024. 5. 10.	시민, 과학자가 되다	홍성욱, 박창범, 김준
224	2024. 5. 29.	GMO, 지속가능성을 위한 전략	하상도, 김해영
225	2024. 6. 21.	전략기술시리즈 (Ⅰ) K-반도체 위기 극복을 위한 국제 협력 전략	정은승
226	2024. 8. 21.	조류인플루엔자의 위협: 팬데믹의 전조인가?	윤철희, 김우주, 송대섭
227	2024. 8. 28.	전략기술시리즈 (Ⅱ) AI로 과학하기: 새로운 패러다임	문용재, 백민경, 서재민
228	2024. 11. 18.	전략기술시리즈 (Ⅲ) K-방산의 완성: 첨단 항공기 엔진 독자 개발	심현석, 이홍철, 김재환
229	2024. 12. 3.	과학기술 정책은 얼마나 과학적인가?	이정동, 이성주
230	2024. 12. 17.	전략기술시리즈 (Ⅳ) 첨단 바이오, 난치병 치료의 게임 체인저	최강열, 신영기, 천병년
231	2024. 12. 20.	뉴럴링크: 뇌와 세상의 소통	임창환, 정재승



제232회 한림원탁토론회

식탁 위 숨겨진 건강 비밀 : 마이크로바이옴이 열어가는 미래

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로
우리나라의 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.