

2025년 식품R&D동향보고서(포스트바이오틱스 분야)

포스트바이오틱스 시장 동향과 멀티오믹스 기반 기능성 평가 기술 개발 전략

2025. 12.



CONTENTS

2025년 식품 R&D 동향보고서(포스트바이오틱스 분야)
포스트바이오틱스 시장 동향과 멀티오믹스 기반 기능성 평가 기술 개발 전략

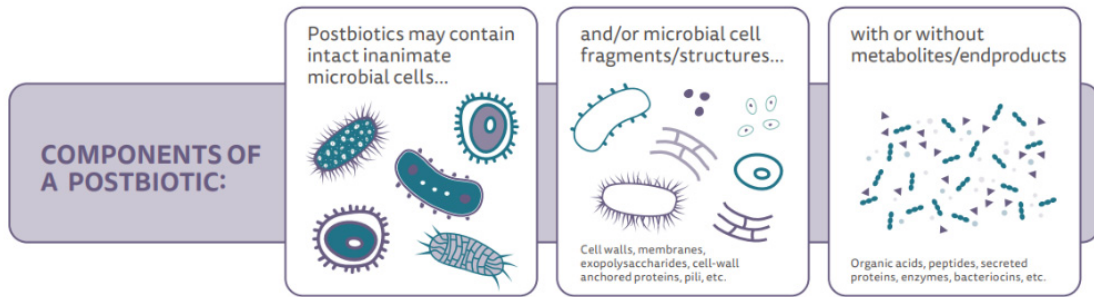
01	포스트바이오틱스 개요	
	1.1. 포스트바이오틱스 개념	1
	1.2. 포스트바이오틱스 주요 화합물과 기능	2
	1.3. 포스트바이오틱스 연구의 중요성과 안전성	3
	1.4. 포스트바이오틱스 연구개발 동향	3
	1.5. 포스트바이오틱스 작용 기전	6
	1.6. 특정 건강 분야 연구 동향	8
	1.7. 포스트바이오틱스 제제의 기술 동향	10
02	프리바이오틱스, 포스트바이오틱스 기능성 연구개발 동향	
	2.1. 개요	14
	2.2. 포스트바이오틱스(Postbiotics) 연구 개발 동향	15
	2.3. 기술 및 안전성 관리 동향	18
	2.4. 시장 및 산업 전망	23
03	멀티오믹스 기반 프리/ 포스트바이오틱스 기능성 평가 기술 개발 동향	
	3.1. 프리/포스트바이오틱스 기능성 평가기술 현황	25
	3.2. 골다공증·근감소증 질환 타겟 프리/ 포스트바이오틱스 개발 동향	28
	3.3. 축산 및 수의학분야 프리/ 포스트바이오틱스 기능성 평가 기술 개발 동향	36
	3.4. 동물복지를 위한 새로운 기능성평가 생체대체모델 발굴	38
04	향후 멀티오믹스 기반 프리/포스트바이오틱스 개발 전망	
	4.1. 축산분야 프리/포스트바이오틱스 연구개발 전망	40
05	출처	



1 포스트바이오틱스 개요

1.1. 포스트바이오틱스 개념

- 포스트바이오틱스(postbiotics)는 “숙주에게 건강상 이익을 제공하는 비활성화된 미생물 및/또는 그 성분으로 이루어진 제제”로 정의됨(ISAPP, 2021). 이 포스트바이오틱스의 정의는, 비활성화된 미생물의 전체 또는 그 구성 성분이 대사산물의 존재 여부와 관계없이 포함되어야 함을 의미한다.



[그림 1-1] 포스트바이오틱스의 구성 요소(Salminen et al., 2021)

- 포스트바이오틱스는 건강에 유익한 미생물인 프로바이오틱스(probiotics)가 식이섬유 또는 올리고당류인 프리바이오틱스(prebiotics)를 영양원으로 이용하여 생성한 대사산물로서 프로바이오틱스와 유사한 유익한 특성을 갖는 위장 건강에 중요한 조절물질이며, 각각의 프로바이오틱스 미생물이 다양한 포스트바이오틱스 대사물질을 생성하며, 이를 섭취시 장 항상성 회복과 건강을 유지할 수 있다 (Carrie et al., 2019).
- 최근 포스트바이오틱스가 급부상하는 이유는 프로바이오틱스의 장점인 살아있는 균이 갖는 한계성 때문이다. 프로바이오틱스는 기존의 단점과 한계를 뛰어 넘는 포스트바이오틱스로 진화하면서 건강 기능성 식품산업에 있어 차세대 고효율 신성장 동력이 될 수 있다.



[표 1-1] 프로바이오틱스와 포스트바이오틱스의 특징 비교

	프로바이오틱스	포스트바이오틱스
작용 성분	건강에 유익한 효과를 나타내는 살아있는 미생물	유익 미생물의 대사과정에서 생성된 대사산물 & 미생물 구성 성분
안정성	- 온도에 약해 보관, 유통 단계에서 사멸 - 위산과 담즙에 약해 장에 도달하기 전 대부분 사멸 - 살아있는 균의 수가 일정하게 유지되지 않고 감소	- 온도, pH 등에 영향받지 않는 높은 안정성 - 위산과 담즙에 영향을 받지 않고 장까지 도달 - 다양하고 풍부한 대사산물에 의한 일정한 효과
작용 시간	장 점막에 부착하는 시간 필요	장 점막 부착 과정 없이 바로 효과

출처: 피그앤포크 뉴스, 2024

- 포스트바이오틱스의 대사산물들은 위산과 담즙산에 영향을 받지 않고 장까지 이동하여 장내 유해균을 억제시키며, 장을 보호하는 역할을 통해 질병예방 차원이나 치료개념에 더 가깝게 다가설 수 있다. 특히 포스트바이오틱스는 소아 및 중증의 병에 걸리거나 면역력이 약화된 환자들에게 사용이 가능하며, 다양하게 적용할 수 있는 응용분야가 많다는 장점이 있다 (Hong., 2021).
- 포스트바이오틱스는 장내 마이크로바이옴 균형 유지와 장 건강 개선에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

1.2. 포스트바이오틱스 주요 화합물과 기능

- 포스트바이오틱스는 프로바이오틱스(유익균)가 프리바이오틱스(먹이)를 분해하고 대사하는 과정에서 생성되거나, 미생물 세포 자체의 구성 성분을 포함하는 생명력이 없는 유익 성분을 총칭한다.
- 아래 표에 나오는 화합물들은 숙주의 건강에 직접적이고 다양한 긍정적인 영향을 미친다.

[표 1-2] 포스트바이오틱스의 주요 화합물과 기능

화합물 유형	주요 예시	주요 기능
단쇄지방산	부티르산(Butyric acid), 초산(Acetic Acid) 프로피온산(Propionic Acid)	<ul style="list-style-type: none"> • 장 건강 핵심: 대장 상피세포의 주 에너지원 역할을 하여 장 점막을 튼튼하게 한다. • 면역 및 항염: 염증을 조절하고 면역 체계를 강화 작용한다. • 대사 조절: 혈당 조절 및 체중 관리에 기여할 수 있다.
유기산	젖산(Lactic Acid)	<ul style="list-style-type: none"> • 내 환경 개선: 장내 pH를 낮춰 유해균의 증식을 억제하며, 유익균이 잘 자랄 수 있는 환경을 조성한다.
항균 펩타이드	박테리오신(Bacteriocins)	<ul style="list-style-type: none"> • 해균 억제: 특정 유해균을 직접적으로 공격하고 장내 미생물 균형을 유지 하는데 도움을 준다.
비타민	비타민 K, B군	<ul style="list-style-type: none"> • 양소 공급: 숙주의 필수 영양소 합성에 기여한다.
효소	미생물 유래 효소	<ul style="list-style-type: none"> • 화 효율 개선: 숙주가 소화하기 어려운 식물 유래 탄수화물 등의 분해를 돕는다.



1.3. 포스트바이오틱스 연구의 중요성과 안전성

- 프로바이오틱스의 경우 장까지 살아서 도달하여 유해균을 억제 및 대사산물 생성 활동을 해야 하므로 위산/담즙, 개인의 장내 환경에 따라 효과와 생존율이 크게 달라진다.
- 반면, 포스트바이오틱스의 경우 생존율에 구애받지 않고 투여량에 비례하여 일관된 효과를 낸다. 또한 포스트바이오틱스는 이미 유효 성분(대사산물)이 만들어져 있는 상태이므로, 프로바이오틱스가 장내에서 활성화되어 대사산물을 생산하기를 기다릴 필요가 없어 더 빠르고 직접적인 효과를 기대할 수 있다.
- 뿐만 아니라, 프로바이오틱스의 경우 냉장 보관 및 유통 과정 중 생존율 유지가 핵심적인 부분이지만 포스트바이오틱스의 경우 열, pH 변화에 강해 상온 보관이 가능하며 다양한 식품 및 의약품에 적용이 가능하다.
- 안전성에 있어 프로바이오틱스는 면역 기능이 저하된 사람의 경우 장내 유익균이 전신으로 이동하여 패혈증(Sepsis) 등 감염을 일으킬 위험이 있으며 항생제 내성 유전자를 다른 미생물에게 전달할 잠재적 위험이 있음. 또한 생균의 일시적인 증식 과정에서 복부 팽만, 가스 등의 불편함이 나타날 수 있다.
- 반면, 포스트바이오틱스의 경우 살아있는 균이 아니므로 감염이나 증식에 따른 위험이 없어 안전성이 매우 높으며 항생제 내성 유전자를 다른 균에게 전달할 위험이 없음. 또한 살아있는 균의 활동이 없으므로 소화 불량 같은 부작용 발생률이 상대적으로 매우 낮다.
- 안전성과 일관된 건강 증진 효과로 포스트바이오틱스는 기존 바이오틱스 제품의 한계를 뛰어넘는 차세대 마이크로바이옴으로 각광받고 있다.

1.4. 포스트바이오틱스 연구개발 동향

1.4.1. 화학구조 및 대사체

- 포스트바이오틱스는 살아있는 미생물이 아닌, 프로바이오틱스 등의 미생물로부터 유래된 생리활성 화합물의 혼합물 또는 제제이다. 따라서 포스트바이오틱스의 화학적 구성은 미생물 자체의 구조적 거대 분자와 미생물이 분비한 작은 대사산물로 분류된다.

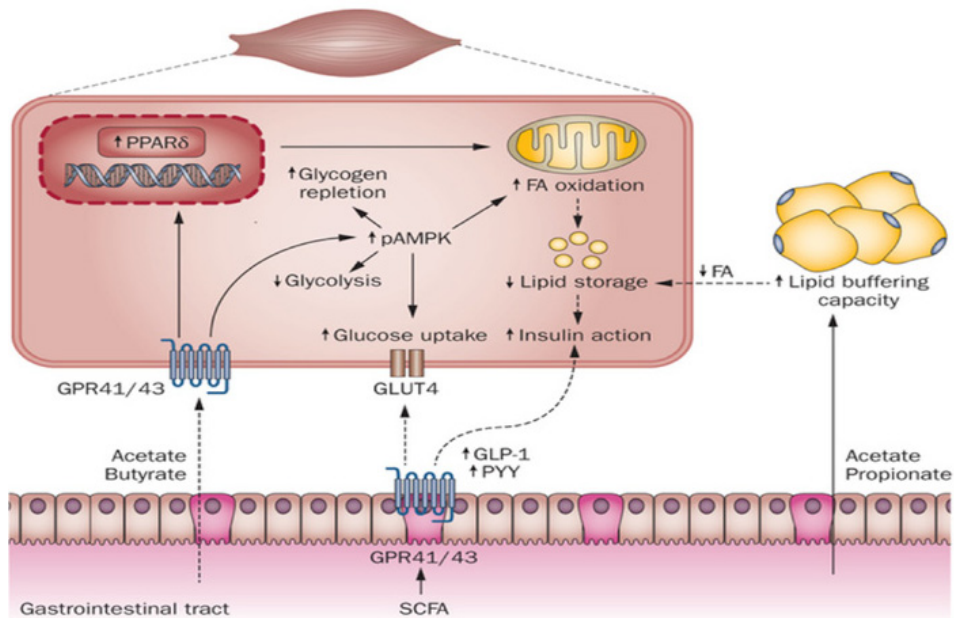
1.4.2. 주요 대사산물 (Metabolites)

- 미생물이 프리바이오틱스(식이섬유 등)를 발효하는 과정에서 생성되어 숙주의 세포에 직접적인 신호 전달을 하는 핵심 성분을 말한다.



1) 단쇄지방산 (Short-Chain Fatty Acids, SCFAs)

- 장내 유익균들이 식이섬유를 분해하여 생성하는 6개 이하의 탄소원자로 이루어진 지방산을 말한다. 이들은 장 상피세포의 주요 에너지원으로 활용되며, 장내 환경을 산성으로 만들어 유익균의 증식을 촉진하는 역할을 한다고 보고되었다.
- 프로피온산(propionic acid), 부티르산(butyric acid), 초산(acetic acid), 푸마르산(fumaric acid), 카프릴산(caprylic acid) 등이 대표적인 예시이다.
- SCFA는 간, 폐, 생식기, 뇌와 같은 장외 부위의 면역에 직간접적으로 영향을 미치며, 감염, 장 염증, 자가면역, 식품 알레르기, 천식, 암 치료 반응 등 다양한 질환과 관련이 있는 것으로 알려져 있다.



[그림 1-2] 단쇄지방산. (Biotechpack)

2) 비타민 (Vitamins)

- 미생물에 의해 합성되거나 미생물 체내에 농축된 다양한 유기 및 무기 화합물임. 이는 숙주의 결핍된 영양소를 보충하거나 체내 흡수를 돕는다.
- 비타민 B군(biotin, cobalamin, folate, niacin, pantothenate, pyridoxine, riboflavin, thiamin)에 대한 생합성 유전자 보유종이 다수 존재하였다.

3) 항균펩타이드 (Antimicrobial peptides)

- 리보솜에 의해 합성되는 작은 단백질(펩타이드)로, 아미노산 잔기로 이루어져 있음. 보통 양전하를 띠는 아미노산(라이신, 아르기닌 등)을 많이 포함하여 음전하를 띠는 세균 세포막에 쉽게 결합한다.



- 항균펩타이드인 박테리오신은 특정 유해균의 세포막에 구멍을 형성하거나 에너지 생산을 방해하여 선택적으로 사멸시키는 천연 항생 물질로 작용한다.

1.4.3. 구조적 화합물 (Structural Compounds)

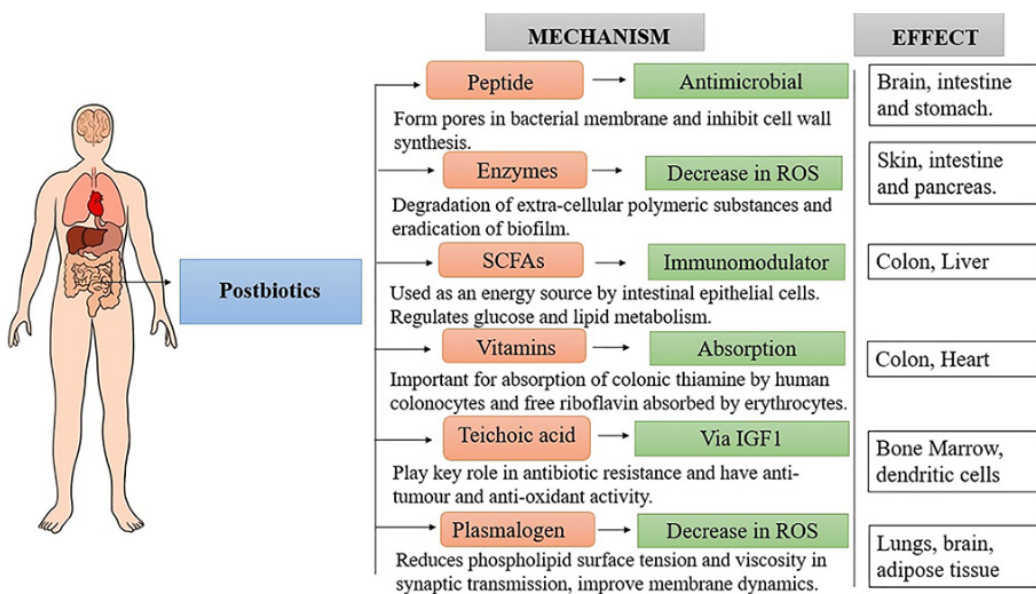
- 미생물이 열처리 등으로 비활성화 되었을 때도 남아있는 균체 자체의 구성 요소를 말한다.

1) 세포벽 구성 요소 (Cell Wall Components)

- 아세틸글루코사민과 아세틸무람산이 펩타이드 사슬로 연결된 고분자인 펩티도글리칸과 Gram 양성균 세포벽에 존재하는 인산 폴리머인 테이코산이 있다.
- 이러한 구조물들은 숙주의 병원체 인식 수용체와 직접 결합하여 선천 면역 세포를 활성화시키고 면역 조절 신호를 보낸다.

2) 세포외 다당류 (Exopolysaccharides)

- 미생물이 생산하는 세포외다당류(exopolysaccharides, EPS)는 세포벽 주변의 캡슐(capsule)이나 점질(slime) 형태로 존재한다. 이들 EPS는 구조적 특성 덕분에 다양한 물성을 가지며, 배양액에서 쉽게 수확이 가능하여 산업적으로 높은 가치를 가진다.
- 균주에 따라 구조가 다른 포도당, 갈락토스, 람노스 등의 단당류가 반복적으로 결합된 복잡한 다당류로 장 점막을 덮는 점액층을 강화하여 물리적 장벽 기능을 개선하고, 장 점막 세포의 성장을 촉진하여, 면역 조절 기능을 가진다.



[그림 1-3] 포스트바이오틱스 작용의 메커니즘



1.5. 포스트바이오틱스 작용 기전

- 포스트바이오틱스는 복합 제제로서 다양한 작용 기전을 가진 여러 생리활성 화합물을 함유하고 있으며, 이를 통해 포스트바이오틱스는 인체 건강에 유익한 효과를 가져오지만, 대부분의 경우 명확하게 밝혀지지 않았으며, 포스트바이오틱스의 주요 작용 기전은 다음과 같다.

1.5.1. 상주 미생물군의 조절

- 젖산 및 박테리옌과 같은 포스트바이오틱스의 직접적인 항균 활성은 생체 내 연구에서 입증되었다. 미생물 군집 구성원이 소비하는 젖산 전달과 같은 메커니즘을 통해 포스트바이오틱스에 의한 미생물 군집의 간접적인 조절은 유익한 역할을 하는 SCFA 및 부티르산의 생성으로 이어진다.
- 포스트바이오틱스는 처리 후에도 변하지 않는 fimbriae 및 lectin과 같은 접착소를 제공하는 경우 상주 미생물과 접착 부위를 놓고 경쟁할 수도 있다.
- 포스트바이오틱스는 대사산물 및 박테리옌으로 장내 병원균을 길항하고 바이오필름 형성을 방지하며 특정 미생물을 불활성화 한다.

1.5.2. 상피장벽 기능 개선

- 특정 비피도박테리움 종은 자가포식 및 칼슘 신호 전달 경로를 통해 밀착 접합 기능을 촉진하는 미토겐 활성화 단백질 키나아제(MAPK) 및 단백질 키나아제 B(Akt)와 같은 신호 전달 경로를 유도한다. 또한 단쇄 지방산은 잠재적으로 상피 장벽 기능을 조절하고 리포폴리사카라이드 유도 파괴로부터 보호할 수 있다.

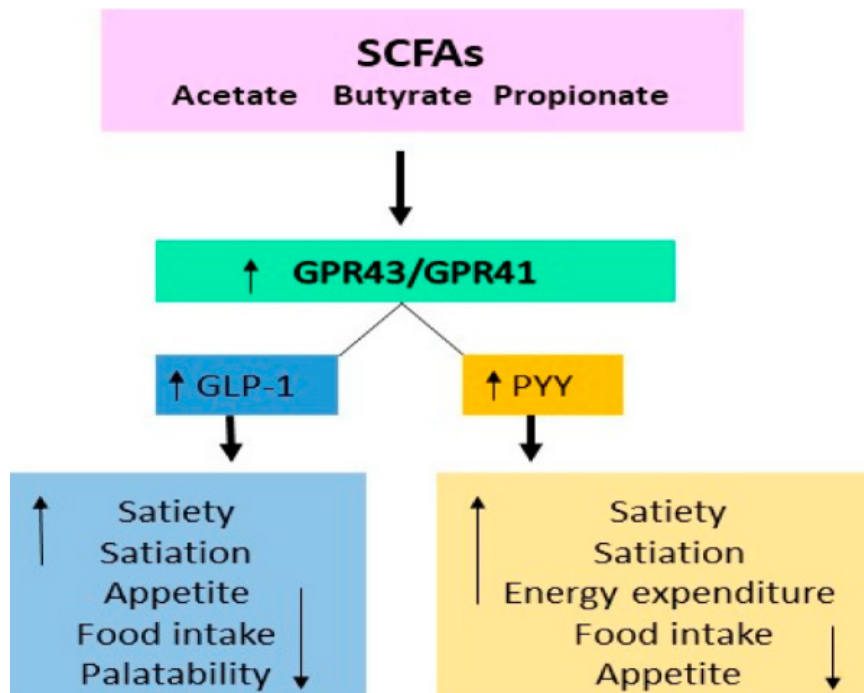
1.5.3. 국소 및 전신 면역 반응의 조절

- 면역 조절 활동은 특정 면역 세포 패턴 인식 수용체(PRR)인 톨유사 수용체(TLR), 뉴클레오타이드 결합 올리고머화 도메인(NOD) 수용체, C형 렉틴과 상호 작용하는 미생물 관련 분자 패턴(MAMP)에 의해 발휘되며, 이는 국소 및 전신 수준에서 다양한 사이토카인과 면역 조절제를 생성한다. 이러한 MAMP는 파괴되거나 변형되지 않는 한 포스트바이오틱스에서도 발생할 수 있다.
- 전신 면역 반응은 젖산, 트립토판의 인돌 유도체, 히스타민, 분지쇄 지방산 및 SCFA와 같은 포스트바이오틱스 제형에 존재하는 미생물 대사산물에 의해 조절된다.



1.5.4. 전신 대사 반응의 영향

- 가장 많이 연구된 포스트바이오틱스인 단쇄지방산(SCFA)은 장내 박테리아에서 유래된 대사산물로, 숙주 대사 조절 인자로 알려져 있으며, 제2형 당뇨병 및 비만을 포함한 심혈관 질환의 잠재적 조절 및 예방 인자로 제시되어 왔다.
- 가장 풍부한 단쇄지방산인 아세트산은 장 호르몬인 글루카곤 유사 펩타이드-1(GLP-1)과 펩타이드 YY(PYY)의 분비를 통해 숙주의 에너지 대사 및 기질 대사에 긍정적인 영향을 미쳐 식욕을 조절하고, 지방 분해 및 염증성 사이토카인의 전신 수치를 감소시키며, 에너지 소비와 지방 산화를 증가시킨다.
- 프로피오네이트는 인슐린 민감도와 포도당 내성을 향상시키고 지질 대사를 조절하는 반면, 부티르산은 글루타치온을 상향 조절하여 건강한 사람의 대장에서 산화 스트레스에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.
- SCFA는 신호 전달 분자로서 장 건강에 중요할 뿐만 아니라, 전신 순환계에 진입하면 말초 조직의 대사에 직접적인 영향을 미치며, 지방 조직, 에너지 대사, 골격근 조직 및 간을 긍정적으로 조절하고 포도당 항상성 및 인슐린 민감도 개선에 기여할 수 있다.



[그림 1-4] SCFA의 항비만 효과



- 포스트바이오틱스를 통한 장내 미생물군 조절은 체중 감소를 촉진하고 콜레스테롤 수치를 낮춘다. 박테리아 벽의 구성 요소인 무라밀 디펩타이드(MDP)와 같은 포스트바이오틱스는 GLP-1 분비를 조절하고, 인슐린 민감도를 증가시키며, 포도당 내성을 개선한다.
- Amuc_1100(*Akkermansia muciniphila* 세포벽 구성 요소)과 MDP는 선천 면역 활성화를 통해 심장 대사 이점을 증진하는 유망한 후보이다.
- 설치류에 살아있는 *A. muciniphila*를 적용하면 비만, 포도당 불내성, 인슐린 저항성, 지방간 및 장 투과성이 감소했다.
- 저온 살균은 비만, 인슐린 저항성 및 포도당 내성에 대한 효과를 증가시킨다.

1.5.5. 신경계를 통한 체계적 신호 전달

- 포스트바이오틱스는 다른 관련 신경계에도 사용되며, 포스트바이오틱스로서 플라스말로겐을 경구 투여하면 생쥐에서 신경교세포 활성화를 억제하여 기억력 감퇴를 억제하고, 경증 알츠하이머병 환자의 인지 기능을 개선하였다.
- 우울증과 장내 미생물군 변화 사이의 연관성은 임상 연구를 통해 밝혀졌지만, 미생물군-장-뇌 축의 이러한 양방향 관계의 인과적 역할은 아직 확립되지 않았다.
- 장내 미생물군은 바이오마커의 잠재적 원천이자 우울증 치료의 표적이 될 수 있으므로, 포스트바이오틱스는 새로운 항우울제 접근법에 잠재적으로 활용될 수 있다.

1.6. 특정 건강 분야 연구 동향

1.6.1. 어린이 건강

- 포스트바이오틱스는 프로바이오틱스에 비해 특정한 이점을 제공하기 때문에 소아과 환경에서 유익하다. 신생아 및 미숙아와 같은 민감한 집단에서 포스트바이오틱스를 사용하는 것은 이 집단의 미생물군 건강을 개선하는 가장 좋은 솔루션인 것으로 보인다.
- *Bifidobacterium breve* C50과 *Streptococcus thermophilus* O65가 생성하는 생리활성 화합물을 프리바이오틱스 올리고당(갈락토올리고당과 프룩토올리고당의 비율 9:1)과 함께 유아에게 투여한 결과, 분비성 면역글로불린 A(SIgA)의 대변 농도가 유의미하게 증가하였다. 이러한 조합은 비피도 박테리아 수를 증가시키고, 대변과 pH를 감소시켰으며, 전체 미생물 구성에 영향을 미쳐, 미생물 군집 형성은 모유 수유만 한 유아에서 관찰된 것과 유사했다. 이러한 조합 분유를 섭취한 유아는 잘 성장했으며, 분유는 내약성이 우수했다.



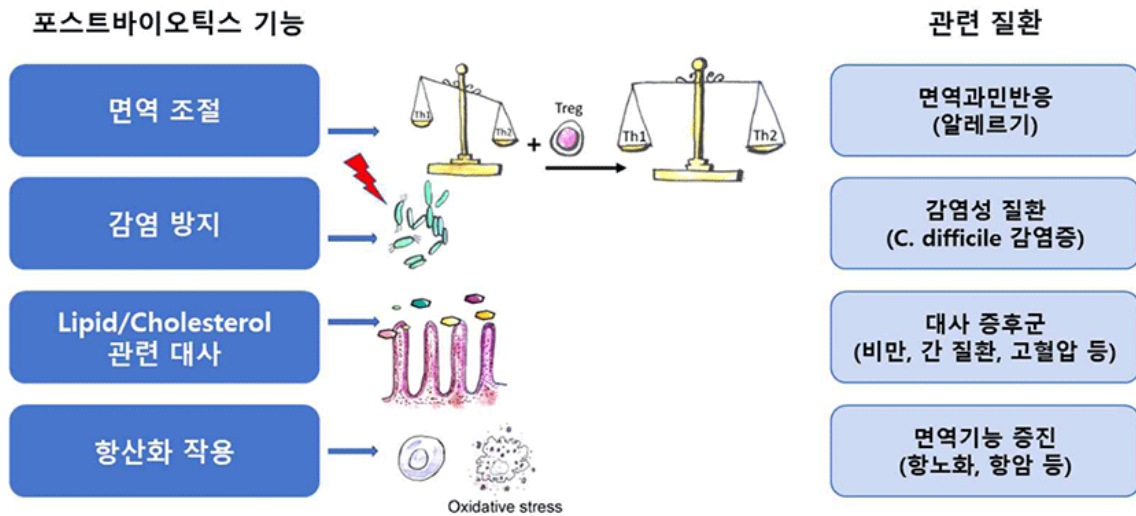
- 포스트바이오틱스는 국소적인 면역 조절, 항염증, 영양 증진, 항균 효과를 나타낸다. 국소 효과는 점액 생성 증가로 인한 장 장벽 기능을 개선하는 것이며, 염증 감소, 림프구와의 상호작용, 면역 및 IgA 생성 조절, 그리고 유익균 증식 촉진 등이 있다.



[그림 1-5] 지큐랩 우리아이 포스트바이오틱스 시리즈

1.6.2. 대사 장애가 있는 성인 건강

- 현대 의학에서 가장 흔한 질병은 대사 장애이다. 부적절한 식단, 좌식 생활, 신체 활동 부족으로 인해 정상적인 생리적 대사 과정이 방해받으면 대사 장애가 발생한다. 대사 장애로는 비만, 당뇨병, 이상 지질혈증, 골다공증, 대사 증후군이 있으며, 전 세계적으로 유병률이 증가하고 있어 실질적인 공중 보건 문제가 되고 있다.
- 대사 질환의 발병 기전은 장내 미생물총의 구성에 영향을 받는다. 일부 연구에서는 대사 질환의 발병을 장내 미생물총의 불균형 또는 변화 및 박테리아 다양성과 연관 지을 수 있으며, 포스트바이오틱스는 장내 미생물총에 유익한 효과를 나타내기 때문에 인기를 얻고 있다.
- 포스트바이오틱스의 유익한 효과는 항염, 항균, 면역 조절, 항비만 및 지질 대사 조절, 장내 미생물 불균형 조절, 항암, 항고혈압 및 항산화 활동을 포함한 여러 메커니즘을 통한 면역 체계 강화와 같은 것으로 문헌에 보고되었다.



[그림 1-6] 포스트바이오틱스의 생체내 기능과 질환 개선 효능

1.7. 포스트바이오틱스 제제의 기술 동향

1.7.1. Cell-Free Supernatants

- Cell-free supernatants(CFS)는 미생물이 배양 과정에서 분비한 생리활성 물질만을 분리·정제하여 얻은 세포 외 배양액으로, 포스트바이오틱스 가운데 가장 활발히 연구되는 분야다 (Żółkiewicz et al., 2020).
- CFS는 유기산, 펩타이드, 세포외다당(EPS), 항균 펩타이드, 단백질 분비물 등 다양한 대사산물을 포함한다.
- 생균 유지가 필수적인 프로바이오틱스 대비 안정성(heat-stability), 저장 용이성, 제형 다양성 확보 측면에서 기술적 장점을 가진다.

[표 1-3] CFS의 주요 기능 및 응용 잠재력

기능	핵심 작용	활용 미생물	응용 분야
항염증 및 항산화	염증성 사이토카인(TNF- α) 감소, 항염증성 사이토카인(IL-10) 증가	<i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactocaseibacillus casei</i>	염증성 장질환(IBD), 대사성 질환 관리
항균 및 감염 예방	병원성 세균 침입 억제, 장내 환경 변화 유도, 장벽 기능 강화	<i>Lactobacillus</i> 및 <i>Bifidobacterium</i> 계열	설사, 장염 등 감염성 장 질환 예방 및 치료 소재
항암 활성 후보	대장암 세포 침입 억제, 산화 스트레스 감소 및 종양 성장 억제 (<i>in vivo</i>)	<i>L. casei</i> , <i>Lactocaseibacillus rhamnosus GG</i>	항종양 소재 연구
장 장벽 강화 및 조직 재생	장 흡수면적 증가, 장 점막 내 염증 지표 감소, 장 조직 발달 촉진	<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	장 건강 기능성 소재
효모 유래 CFS 기능	스트레스 유도 장 연동운동 장애 정상화, 장 상처 회복 촉진	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Saccharomyces boulardii</i>	장 건강 기능성 소재



- CFS는 생균을 사용하지 않으면서도 다양한 생리활성을 부여할 수 있는 안전하고 기술적으로 유연한 포스트바이오틱스 플랫폼으로 평가된다. 향후에는 배양 조건 최적화, 특정 대사산물의 성분 규명, 산업정 정제 기술 고도화, 임상 근거 확보 등이 핵심 연구 방향이 될 것으로 보이며, 기능성 식품, 의약품, 피부 장벽 강화 소재 등 다양한 산업 분야에서 활용 잠재력이 높다.

1.7.2. Exopolysaccharides (EPSs)

- Exopolysaccharides(EPSs)는 미생물이 성장 과정에서 생성·분비하는 고분자 물질로, 세포벽 외부에 존재하는 이질적인 생체고분자 집합체를 의미한다 (Żółkiewicz et al., 2020).
- 현재 식품산업에서는 안정제, 유화제, 수분 결합제 등 기능성 소재로 활용되고 있으나, 생물학적 기능은 아직 완전히 규명되지 않았다. 그럼에도 불구하고 최근에는 EPSs의 면역조절 가능성이 주목받으며 제약 및 기능성 식품 분야에서 활용 가능성이 확대되고 있다.

[표 1-4] EPSs의 주요 생물학적 기능성

기능	주요 작용 메커니즘 및 효과	미생물/물질 예시	응용 분야
면역 조절	T 세포 및 NK세포 증식 촉진, 대식세포 활성화, 장 점막 내 IgA 농도 증가	<i>L. plantarum</i> 유래 EPSs, <i>L. casei</i> 유래 EPSs	염증성 장질환(IBD), 대사성 질환 관리
선천 면역 활성화	대식세포 표면 Dectin-1 수용체를 통한 면역세포 활성화	β -glucan 계열 EPS	설사, 장염 등 감염성 장 질환 예방 및 치료 소재
항균 및 항산화	직접적인 항균 특성, 철 이온 결합능을 통한 항산화 활성화	발효 두리안 <i>Lactobacillus</i> 균주 유래 EPSs, <i>Lactobacillus helveticus</i> 유래 EPS	항종양 소재 연구
지질 대사 및 심혈관 보호	장내 콜레스테롤 흡수 저해, 죽상동맥경화 진행 억제, 혈압 및 혈당 안정화	<i>Lactobacillus kefiranofaciens</i> 가 생산하는 kefiran	장 건강 기능성 소재
장 건강 증진	유익균 부착능 향상, 카로티노이드 생체 이용률 증가	β -glucan	장 건강 기능성 소재

- EPSs는 면역조절, 항산화, 항균, 지질 대사 조절 등 다면적 기능성을 보유한 주요 포스트바이오틱스 물질군으로 평가되며, 기능성 식품 및 의약품 분야에서의 산업적 활용 잠재력이 높다. 향후 연구는 구조적 다양성과 생리활성 간의 상관성 규명, 특정 EPSs의 정제·표준화 기술 개발, 임상 근거 확보 등을 중심으로 심화될 것으로 전망된다.

1.7.3. Enzyme

- 미생물은 활성산소종(ROS)에 의해 발생하는 산화적 스트레스에 대응하기 위해 다양한 항산화 효소 (glutathione peroxidase, superoxide dismutase, catalase 등)를 생산하며, 이러한 효소들은 포스트바이오틱스의 기능성 소재로 활용 가능성이 주목되고 있다 (Żółkiewicz et al., 2020).



[표 1-5] 주요 기능 및 응용 잠재력

구분	핵심 내용	관련 균주	응용 잠재력
항산화 활성	GPx 등 효소 보유로 강한 항산화 활성	<i>Limosilactobacillus fermentum</i> , <i>L. plantarum</i>	산화 스트레스 개선
항염 효과 증대	유전자재조합을 통해 효소 발현을 높인 균주는 기존 균주 대비 우수한 항염 효과를 나타냄	<i>Lactobacillus</i> 균주 (SOD, Catalase 발현)	크론병, 염증성 장질환 모델
항암 효과	특정 효소 발현 균주가 동물 모델에서 대장암 억제 효과를 보임	Catalase 발현 <i>Lactococcus lactis</i>	항암 소재 개발
효소 비교	Catalase 고발현 균주가 SOD 발현 균주보다 더 강한 염증 완화 효과를 보임	Catalase, SOD	항염 능력 예측

- 한계: 순수 항산화 효소 자체를 단독 포스트바이오틱스 제제로 활용한 *in vivo* 연구는 부족하며, 대부분은 효소를 생산하는 미생물 또는 이들로부터 유래한 물질을 기반으로 연구가 진행되고 있다.

1.7.4. Cell Wall Fragments

- Cell wall fragments는 세포벽 유래 성분으로, 대표적인 포스트바이오틱스 소재이다. 특히, 그람 양성균의 lipoteichoic acid(LTA) 등은 강한 면역반응 유도 특성을 지니고 있어 기능성 연구가 활발히 진행중이다 (Żółkiewicz et al., 2020).

[표 1-6] 주요 효과 및 위험성

구분	주요 효과	특징 및 위험성	응용 잠재력
면역 조절 특성	면역 자극 기능. IL-12 억제, IL-10 증가와 같은 면역조절 작용 보고	균주 특성 및 환경에 따라 효과 상반되며 일부 연구에서 장 염증 악화 및 조직 손상을 초래할 수 있음이 제시됨	염증 조절
피부 질환 방어	국소 적용 시 β -defensin, cathelicidin 등 항감염 펩타이드 분비를 촉진하여 피부의 비특이적 방어 기전 강화 유도	<i>Lactibacillus</i> , <i>Bifidobacterium</i> 등 LTA 생성 균주 관련 연구	피부 감염 및 염증 질환

- LTA는 조건에 따라 과도한 염증 반응을 유발할 수 있는 위험성이 있어, 향후 포스트바이오틱스 소재로 개발하기 위해서는 균주 특이성, 용량, 적용 부위별 안전성 검증이 필수적이다.

1.7.5. Bacterial Lysates

- Bacterial lysates(BLs)는 환경에 흔히 존재하는 그람양성·그람음성 세균을 화학적 또는 기계적 방법으로 분해하여 얻은 물질로, 장-폐 축(gut-lung axis)을 기반으로 면역계를 조절하는 대표적 포스트바이오틱스 제제이다 (Żółkiewicz et al., 2020).



[표 1-7] 주요 기능 및 응용 분야

구성 요소	작용 효과	주요 대상 질환
면역 반응 촉진	화장에서 수지상세포(DCs) 활성화	소아 상기도 감염의 반복적 재발 억제
만성 호흡기/ 알레르기 질환 개선	다면적 면역 조절 기능	만성폐쇄성폐질환(COPD) 악화 빈도 감소, 알레르기 비염 발생 빈도 감소, 아토피 피부염 증상 완화
감염성 질환 예방 및 면역 발달	미생물 자극 모사를 통한 면역 발달	천명 빈도 및 소아 천식 악화 비율 감소
기타 기능성	피부, 안구, 점막 등 다양한 부위 적용 가능성	안구 건조증 증상 완화 (열처리된 <i>Lacticaeibacillus paracasei</i>)

- 향후 BLs는 표준화 제조기술 확립, 작용기전의 세분화 등을 중심으로 의약·건강기능식품 분야에서 산업적 활용성이 더욱 증가할 것으로 전망된다.

1.7.6. Metabolites Produced by Gut Microbiota

- 장내미생물은 비타민, 방향족 아미노산(AAA) 유래 물질, 폴리페놀 대사산물 등 다양한 생리활성 물질을 생성하며, 이들은 높은 생체이용률과 항산화 능력 및 신호전달 기능을 통해 숙주-미생물 간 상호작용에 중요한 역할을 한다 (Żółkiewicz et al., 2020).

[표 1-8] 주요 대사산물

구성 요소	주요 역할 및 효과	응용 분야
미생물 유래 비타민	엽산, 비타민 B12, 비타민 K 등을 생성하여 전신 대사 및 세포 기능 조절에 기여 (<i>L. helveticus</i> CD6는 엽산 생성 및 항산화 활성화)	빈혈 위험 감소, 응고 인자 형성, 전신 대사 조절
방향족 아미노산 (AAA) 대사산물	신장, 뇌 심혈관계 등 다양한 장기에 영향	신장 질환 및 대사 질환 치료
폴리페놀 대사산물	폴리페놀이 장내미생물에 의해 전환되어 생성되는 생리활성 물질	개인 맞춤 영양, 만성질환 예방

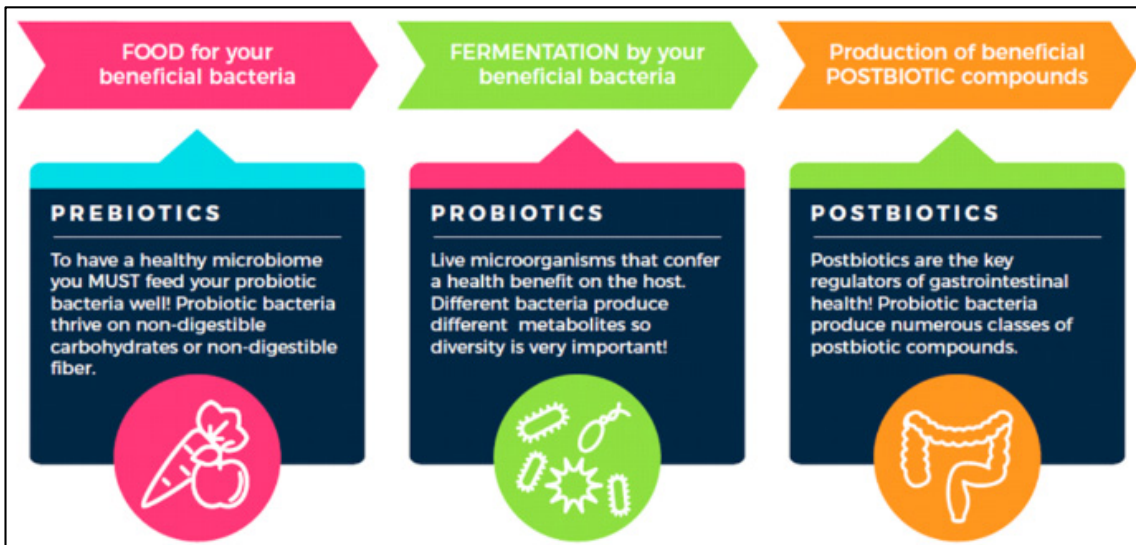
- 종합적으로, 장내미생물 유래 대사산물은 대사·염증·항산화·에너지 조절 등 다면적 생리활성을 수행하는 핵심 포스트바이오틱스 자원으로 평가된다. 향후 엽산, B12, 폴리페놀 유래 물질과 같은 대사산물 기반 기능성 소재는 개인 맞춤형 영양 전략, 만성질환 예방, 항노화 분야 등에서 산업적 활용성이 더욱 확대될 것으로 전망된다.



2 프리바이오틱스, 포스트바이오틱스 기능성 연구개발 동향

2.1. 개요

- 기존의 살아있는 균임 프로바이오틱스(Probiotics) 중심이었던 마이크로바이옴 시장이 성숙기에 접어들어 따라, 단순 생균 섭취의 한계를 넘어서는 새로운 기술적 대안이 요구되고 있다. 특히 생균이 갖는 체내 생존율(Viability)의 변동성, 보관 및 유통 과정에서의 안정성(Stability) 확보 문제, 그리고 면역 취약 계층에 대한 안전성(Safety) 이슈를 근본적으로 해결하기 위해 연구 개발의 중심축이 빠르게 이동하고 있다.
- 이에 따라 미생물의 성장 동력이 되는 ‘프리바이오틱스(Prebiotics, 먹이)’와 미생물 대사 활동의 결정체인 ‘포스트바이오틱스(Postbiotics, 대사산물 및 사균체)’가 차세대 핵심 소재로 급부상하고 있다. 이러한 변화는 마이크로바이옴 산업이 단순한 ‘장 건강(Gut Health)’ 개선을 넘어, 장내 미생물과 숙주의 상호작용을 통해 전신 대사 조절, 면역 시스템 강화, Gut-Brain Axis 등 고도화된 헬스케어 솔루션을 지향하는 ‘차세대 바이오틱스(Next-Generation Biotics)’ 시대로 진화하고 있음을 의미한다 (Cunningham M et al., 2021).



[그림 2-1] 프리바이오틱스, 프로바이오틱스 및 포스트바이오틱스 개념도(Dr. Ohhira's Probiotics)



2.2. 포스트바이오틱스(Postbiotics) 연구 개발 동향

- 포스트바이오틱스 분야는 살아있는 미생물을 사용하는 기존 프로바이오틱스의 한계를 극복하기 위해, 열처리 사균체와 발효대사산물을 활용하는 방향으로 진화하고 있다. 이는 생균이 아니기 때문에 체내에서 감염을 일으킬 우려가 없어 안전성(Safety)이 뛰어나며, 외부 환경에 민감하지 않아 안정성(Stability) 또한 획기적으로 강화된 차세대 기능성 원료로 각광받고 있다.

2.2.1. 국내 연구개발 및 제품 동향

- 국내 기업들은 단순 유산균 사균체를 넘어, 특정 질환이나 증상 개선에 도움을 줄 수 있는 고기능성 개별인정형 원료 개발에 주력하고 있다.
- 일동바이오사이언스는 자사가 보유한 프로바이오틱스 균주를 열처리 가공한 포스트바이오틱스 원료인 ‘RHT3201(*L. rhamnosus* IDCC 3201 열처리배양건조물)’을 개발하였다. 해당 원료는 인체적용 시험을 통해 아토피 피부염 중증도 지수(SCORAD)를 유의하게 개선함을 입증하여 국제 학술지에 게재되었으며, 이를 바탕으로 식약처 개별인정을 획득했다 [15]. 또한 ‘BBR4401(*B. breve* IDCC 4401 열처리배양건조물)’은 동물 모델 및 임상 연구에서 혈중 콜레스테롤 저하 효과를 확인하여 관련 학술지에 보고된 바 있다 (Kim MG, et al., 2020; Kim M, et al., 2023).
- 엔테로바이옴은 차세대 유익균으로 꼽히는 *Akkermansia muciniphila* EB-AMDK19의 열처리 사균체를 연구 중이다. 최근 임상 연구에서 해당 사균체 섭취가 호흡기 증상(기침 등) 완화에 도움을 줄 수 있음을 확인하여 *Nutrients* 저널에 결과를 발표하였으며, 이를 근거로 식약처로부터 개별인정형 원료 승인을 획득하였다 (Lee HW, et al., 2024).

[표 2-1] 국내 포스트바이오틱스 기능성 원료 현황 (개별인정형 기준)

구분	원료명	기능성
개별인정형	<i>Lactiseibacillus rhamnosus</i> IDCC3201 열처리배양건조물(RHT3201®)	면역과민반응에 의한 피부상태 개선
	<i>B. breve</i> IDCC 4401(BBR4401) 열처리배양건조물	혈중 콜레스테롤 개선
	<i>Lactiseibacillus paracasei</i> subsp. <i>paracasei</i> 327(K-1) 열처리배양건조물	배변활동 원활
	<i>Akkermansia muciniphila</i> EB-AMDK19 열처리배양건조물	기관·기관지 상태(기침) 개선

- 포스트바이오틱스 원료는 생균 대비 뛰어난 물리화학적 안정성(Stability)을 확보한다는 점이 핵심 경쟁력이다. 열처리 과정을 거쳐 사멸된 상태이므로 냉장 유통(Cold Chain) 의존도를 낮추고 고온 및 위산 환경에서의 변질 우려를 해소한다. 이러한 높은 저장 안정성 덕분에 정제, 분말, 츄어블, 캡슐,



액상 등 다양한 제형 개발이 용이해졌고, 섭취 편의성이 극대화되어 소비자 접근성을 대폭 확장하는 주요 동력이 되었다.

- 또한, 시장 트렌드는 단순한 ‘장 건강’을 넘어 ‘기능성 세분화(Segmentation)’로 진화하고 있다. 과거에는 배변 활동 원활이 주된 소구점이었다면, 최근에는 개별인정형 원료를 앞세워 피부 면역 개선, 혈중 콜레스테롤 조절 등 구체적인 건강 고민을 해결하는 솔루션으로 자리 잡고 있다. 대표적으로 일동제약 등은 자사의 기능성 원료를 적용하여 전문 라인업을 구축하는 등, 단순 영양 보급이 아닌 ‘목적형 헬스케어 제품’으로서의 포지셔닝을 강화하고 있다.

[표 2-2] 국내 포스트바이오틱스 제품 개발 현황

제품명	제품사진	판매원	원료	기능성	제형	일일 섭취량
포스트바이오틱스 유산균 WCS		뉴트리코어	L..rhamnosus IDSS 3201 열처리배양건조물	면역과민반응에 의한 피부상태 개선에 도움을 줄 수 있음	정제	1정 (800 mg)
장건강 포스트 솔루션		일동생활 건강(주)	L..rhamnosus IDSS 3201 열처리배양건조물	면역과민반응에 의한 피부상태 개선에 도움을 줄 수 있음	분말	1포 (2 g)
지큐랩 포스트바이오틱스 츠어블		일동생활 건강(주)	L..rhamnosus IDSS 3201 열처리배양건조물	면역과민반응에 의한 피부상태 개선에 도움을 줄 수 있음	츠어블 정제	3정 (3.6 g)
지큐랩 콜레스테롤 솔루션		일동제약(주)	B. breve IDCC 4401 (BBR4401) 열처리배양건조물	혈중 콜레스테롤 개선에 도움을 줄 수 있음	캡슐	1캡슐 (450 mg)
여에스더 포스트바이오틱스 2X		에스더 포물러	유산균배양건조물, 포스트바이오틱스덴탈락	배변활동 원활 (*기타가공품)	분말	1포 (5 g)

2.2.2. 국외 연구개발 및 제품 동향

- 해외에서는 미국, 유럽, 일본을 중심으로 포스트바이오틱스가 열처리 유산균 및 발효물 기반의 안전하고 안정성 소재로 주목받고 있다. 특히 *L. plantarum* L-137, *L. paracasei* MCC1849, 열처리된 *Akkermansia muciniphila* 등을 활용하여 면역 조절, 장 건강, 피부 기능성 등 특정 기능을 타깃으로 한 연구가 꾸준히 확대되고 있으며, 기업들은 이러한 과학적 근거를 바탕으로 기능성 표시 식품 및 건강



보조식품 시장을 주도하고 있다.

- 먼저 미국에서는 Cargill이 효모 발효 공정을 통해 얻은 포스트바이오틱스인 ‘EpiCor®’를 보유하고 있다. 이는 발효물 기반 포스트바이오틱스로서 GRAS 인증을 획득하여 안전성을 인정받았으며, 면역 및 장 건강 기능성을 중심으로 다양한 건강보조식품에 널리 적용되고 있다 (Inchingolo F, et al., 2019). 일부 열처리 유산균 계열 원료들도 기능성 표시 제품에 적용되며 시장 진입이 확대되는 추세이다.
- 다음으로 유럽에서는 ISAPP가 2021년 포스트바이오틱스 정의를 제시한 이후, 사균체와 발효물 기반 원료의 Novel Food 등록과 안전성·기능성 평가 논의가 활발히 이루어지고 있다. 특히 벨기에의 The Akkermansia Company는 저온살균된 *Akkermansia muciniphila*가 대사 질환 개선에 효과적이라는 연구 결과를 바탕으로, 체중 관리 및 포도당 대사 조절을 돕는 차세대 포스트바이오틱스 솔루션을 상용화하며 주목받고 있다 (Plovier H, et al., 2017).
- 한편 일본은 Morinaga, Yakult, Kirin 등 주요 기업을 중심으로 연구 개발이 활발하다. 특히 Kirin Holdings사는 독자 개발한 *Lactococcus lactis* strain Plasma (LC-Plasma)를 통해 pDC (Plasmacytoid Dendritic Cell) 활성화를 통한 면역 기능성 표시 식품(Foods with Function Claims, FFC) 시장을 선도하고 있다 (Tsuji R, et al., 2018). 이 외에도 *L. paracasei* MCC1849, *B. longum* 등을 활용한 면역 및 피부 기능성 연구가 진행되며, 사균체 기반 제품이 캡슐, 정제, 유제품 등 다양한 형태로 상용화되고 있다.

[표 2-3] 국외 포스트바이오틱스 기능성 원료 현황

원료명	제조사(국가)	주요소재	기능성
IMMUSE®	Kirin Holdings (일본)	<i>Lactococcus lactis</i> strain Plasma (LC-Plasma)	면역 기능 유지
EpiCor®	Cargill (미국)	건조 효모 발효물 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	면역 조절 장 건강 지원
Pasteurized Akkermansia	The Akkermansia Company (벨기에)	Pasteurised <i>Akkermansia muciniphila</i>	대사질환 (비만, 혈당) 관리

- 제품 측면에서는 열처리 균체의 높은 안정성을 활용하여 정제, 캡슐, 분말, 음료 등 카테고리 확장이 이루어지고 있으며, 일부 기업은 프로바이오틱스와 프리바이오틱스를 결합한 시너지 포뮬러 (Synbiotic/Post-synbiotic) 제품을 개발하는 흐름이 나타나고 있다.



[표 2-4] 국외 포스트바이오틱스 제품 개발 현황

제품명	제품사진	판매원	원료	기능성	제형	일일 섭취량
Healthy Origins EpiCor		Epicor	Dried Yeast Fermentate (Saccharomyces cerevisiae)	면역 기능 유지	캡슐	1캡슐 (500 mg)
Renzo's Roll Call Immunity		Renzo's	Lactococcus lactis strain Plasma (IMMUSE – Postbiotic)	면역 조절	츄어블 정제	1정
The Akkermansia Company Gestion Du Poids		Metagenics	Pasteurised Akkermansia muciniphila	장 건강 지원 / 혈당 관리	정제	1정
Complete Biotic		THORNE	Heat-Treated Bifidobacterium longum CECT7347 (ES1)	장내 유익균 증식 / 장 건강 지원	분말	1포 (1 g)
AMABIE Sparkling Immunity Tonic		AMABIE	Lactococcus lactis strain Plasma (IMMUSE – Postbiotic)	에너지, 집중력 강화	음료	1캔 (355 mL)

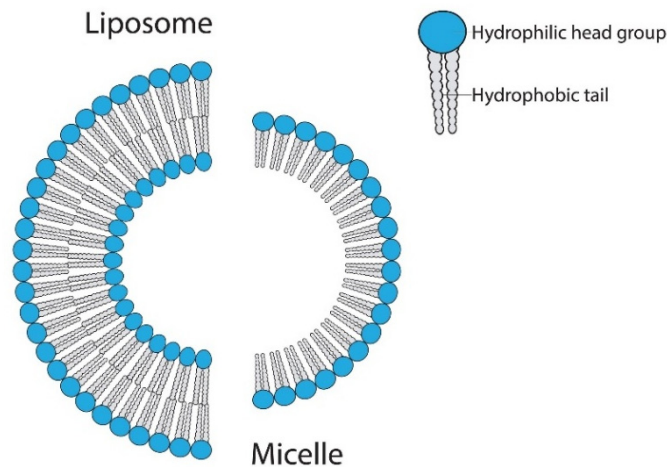
2.3. 기술 및 안전성 관리 동향

2.3.1. 기술 동향

- 마이크로바이옴 산업은 특정 균주의 탐색 단계를 넘어, 확보된 유효 성분을 체내에서 안정적으로 보존하고 목표 부위까지 전달하는 기술 경쟁 체제로 전환되고 있다. 특히 프로바이오틱스가 가진 생존성 한계를 보완하기 위해 개발된 포스트바이오틱스는 제조 단계에서 안정성이 높다는 장점이 있으나, 생체 이용률을 높이기 위한 제형 기술의 고도화가 필수적이다. 이러한 요구에 따라 제약 분야에서 발전해 온 나노 기반 전달 기술과 비열처리 기반 가공 기술이 식품 및 헬스케어 제품 개발에 빠르게 도입되며 기능성 제품의 기술 수준을 높이고 있다.
- 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스의 체내 활용도를 높이기 위한 대표적 기술로 나노 인캡슐레이션이 부상하고 있다. 그 중심에는 인지질 이중층으로 구성된 미세 캡슐 내부에 단쇄지방산이나 펩타이드와 같은 포스트바이오틱스 유래 활성 성분을 봉입하는 나노 리포솜 기술이 있다. 나노 리포솜은 세포막과



유사한 구조로 위산에 의한 분해를 최소화하고 장 점막에서의 흡수 가능성을 높여 생체 이용률 개선에 기여한다. 또한 단쇄지방산처럼 강한 향을 가진 성분의 관능적 한계를 줄이는 데에도 활용 가능성이 있다. 최근에는 천연 인지질이나 식물성 지질이 자가조립하도록 설계된 친환경 기반 리포솜 공정이 연구되고 있으며, 향후 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스 제형화에 적용될 가능성이 점차 확대되고 있다.



[그림 2-2] 나노 인캡슐레이션 기반 전달 기술

- 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스는 열에 민감한 생리활성 성분을 포함할 수 있기 때문에 기존의 고온 살균 방식이 성분 변성 위험을 높일 수 있다. 이를 해결하기 위한 기술로 초고압살균(HPP, High Pressure Processing)이 주목받고 있다. 초고압살균은 약 6,000 bar 수준의 고압을 적용하여 미생물을 사멸시키는 동시에 열처리 대비 저분자 활성 물질의 손상을 줄일 수 있다는 점에서 유리하다. 또한 열에 의한 맛과 향 변화가 적어 품질 유지에 강점이 있으며, 제품 특성에 따라 방부제 사용을 줄이고 냉장 유통 의존도를 완화할 가능성을 가진 기술로 평가된다. 이러한 장점 덕분에 포스트바이오틱스의 안정성을 높이기 위한 공정 옵션으로 활용 범위가 점차 넓어지고 있다.
- 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스의 정밀한 전달을 위해 미세유체(Microfluidics) 기반 공정 기술이 중요한 역할을 하고 있다. 미세유체 기술은 마이크로 단위의 채널 내부에서 유체 흐름을 정밀하게 조절하여 균일한 나노입자나 캡슐 구조를 연속적으로 생산할 수 있다. 이 기술을 활용하면 장내 특정 pH 조건이나 특정 부위에서 활성 성분이 방출되도록 설계할 수 있어, 정밀한 타겟팅이 필요한 고급 기능성 제품 개발에 활용된다. 특히 질환 특이적 영양 설계가 필요한 메디푸드나 마이크로바이옴 치료제 플랫폼과의 기술적 연계성이 높아 향후 중요성이 더욱 커질 것으로 전망된다.



- 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스 산업은 소재 중심 경쟁에서 벗어나 전달 효율과 안정성을 동시에 확보하는 기술 중심의 경쟁으로 전환되고 있다. 나노 리포좀 기술은 생체 이용률을 높이고 관능적 품질을 개선하는 주요 제형 기술로 활용 가능성이 있으며, 초고압살균과 같은 비열처리 공정은 기능성 성분의 손상을 줄이면서 제품 안전성과 유통 편의성을 확보하는 데 기여한다. 미세유체 기반 공정 기술은 각각 고순도 원료 확보와 정밀한 성분 방출 조절이라는 측면에서 차세대 기능성 제품 개발의 확장성을 보여준다. 이러한 첨단 공정 기술의 융합은 향후 마이크로바이옴 기반 기능성 시장을 고부가 가치 영역으로 이끄는 핵심 동력으로 작용할 것으로 예상된다.

2.3.2. 안전성 동향

- 국제적으로 프로바이오틱스에 대한 안전성 확보 기준은 비교적 명확히 정립되어 있다. FAO/WHO는 식품 분야 프로바이오틱스의 안전성 평가를 위해 균주 수준의 명확한 동정, 독성 관련 유전자 여부 평가, 임상시험 기반의 기능성 검증을 권고하고 있으며, 이는 이후 여러 국가에서 기준 수립의 참고 자료로 활용되고 있다. 유럽연합(EU)은 새로운 미생물 균주를 식품에 적용할 때 QPS(Qualified Presumption of Safety) 제도를 운영하여 균주의 계통, 독소생성 여부, 항생제 내성 등 주요 정보를 검토해 안전성을 판단한다. 미국의 경우 프로바이오틱스가 식품 또는 식이보충제 성분으로 사용될 때 GRAS(Generally Recognized As Safe) 또는 NDI(New Dietary Ingredient) 절차를 통해 독성시험, 품질자료 등을 기반으로 안전성을 심사한다.
- 국내에서는 식약처가 「건강기능식품의 기준 및 규격」을 통해 프로바이오틱스 고시형 원료와 인정 균주 목록을 명시하고 있으며, 2022년 발간된 「프로바이오틱스 안전성 평가 가이드」에서 신규 균주의 기능성원료 인정 신청 시 요구되는 독성, 항생제 내성, 유전체 분석 등 안전성 평가자료 요건을 구체화 하였다.

	종 류(학 명)
<i>Lactobacillus</i>	<i>L.acidophilus</i> , <i>L.gasseri</i> , <i>L.delbrueckii</i> ssp. <i>bulgaricus</i> , <i>L.helveticus</i>
<i>Lactocaseibacillus</i>	<i>L.casei</i> , <i>L.paracasei</i> , <i>L.thamnosus</i>
<i>Limosilactobacillus</i>	<i>L.fermentum</i> , <i>L.reuteri</i>
<i>Lactiplantibacillus</i>	<i>L.plantarum</i>
<i>Ligilactobacillus</i>	<i>L.salivarius</i>
<i>Lactococcus</i>	<i>Lc.lactis</i>
<i>Enterococcus</i>	<i>E.faecium</i> , <i>E.faecalis</i>
<i>Streptococcus</i>	<i>S.thermophilus</i>
<i>Bifidobacterium</i>	<i>B.bifidum</i> , <i>B.breve</i> , <i>B.longum</i> , <i>B.animalis</i> ssp. <i>lactis</i>

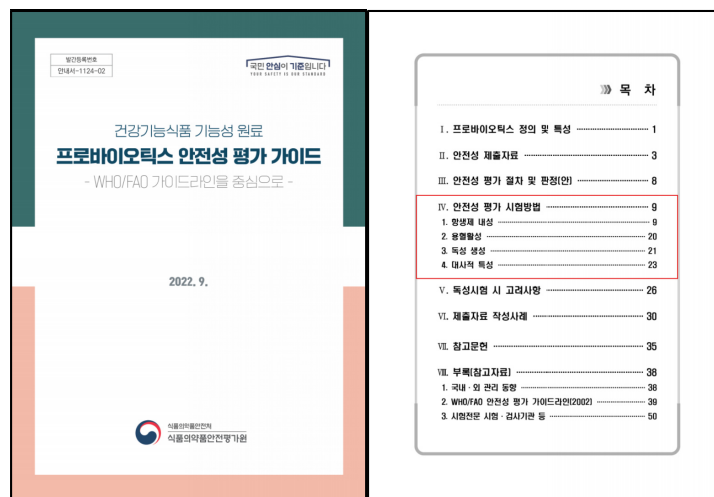
[그림 2-3] 프로바이오틱스 고시형 원료와 인정 균주 목록



- 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스의 경우, 현재 독립된 안전성 평가 가이드라인이 마련되어 있지는 않다. 포스트바이오틱스 소재는 사균체 기반, 발효물 기반 등 형태가 다양하므로, 현행 제도에서는 소재 특성에 따라 기존 식품원료 또는 개별인정형 기능성 원료 심사체계 내에서 안전성을 검토하는 방식이 적용된다. 예를 들어 새로운 미생물 유래 소재로서 식경험이 부족한 경우에는 원재료 특성에 따라 유전체 정보, 독성유전자 여부, 항생제 내성, 용혈성 등 평가항목을 요구할 수 있으며, 필요 시 동물·인체 안전성 자료 제출이 요구되기도 한다.
- 다만 이러한 평가 항목은 ‘포스트바이오틱스’라는 범주에 대해 제도적으로 별도로 마련된 것이 아니라, 소재의 성격이 미생물 유래인지, 발효물인지, 일반 식품원료인지에 따라 기존 제도 틀을 적용하는 방식으로 이해된다. 즉, 포스트바이오틱스라는 명칭 자체가 규제 카테고리 관리되는 것은 아니며, 안전성 평가는 개별 원료의 특성에 따라 기존 기준을 활용해 검토되는 구조라고 정리할 수 있다.

2.3.3. 규제 동향

- 국내 건강기능식품 제도에서 현재 명확하게 고시형 기능성 원료로 제도화된 영역은 프로바이오틱스이다. 「건강기능식품의 기준 및 규격」에는 프로바이오틱스의 고시형 원료 정의, 인정 균주, 기능성 내용, 1일 섭취량 등이 체계적으로 정리되어 있으며, 2022년 발간된 「프로바이오틱스 안전성 평가 가이드」에서는 신규 균주 인정 시 요구되는 독성, 항생제 내성, 유전체 분석 기준이 구체적으로 제시되어 있다.



[그림 2-4] 프로바이오틱스 안전성 평가 가이드

- 반면 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스는 국내 제도에서 독립된 기능성 원료 카테고리로 규정되어 있지 않다. ISAPP 등 국제 학술기구에서 과학적 정의가 명확히 정립되어 있고 산업계에서도 용어는 널리 사용되고 있으나, 식약처 고시 상에는 “프리바이오틱스 기능성” 또는 “포스트바이오틱스 기능성”이

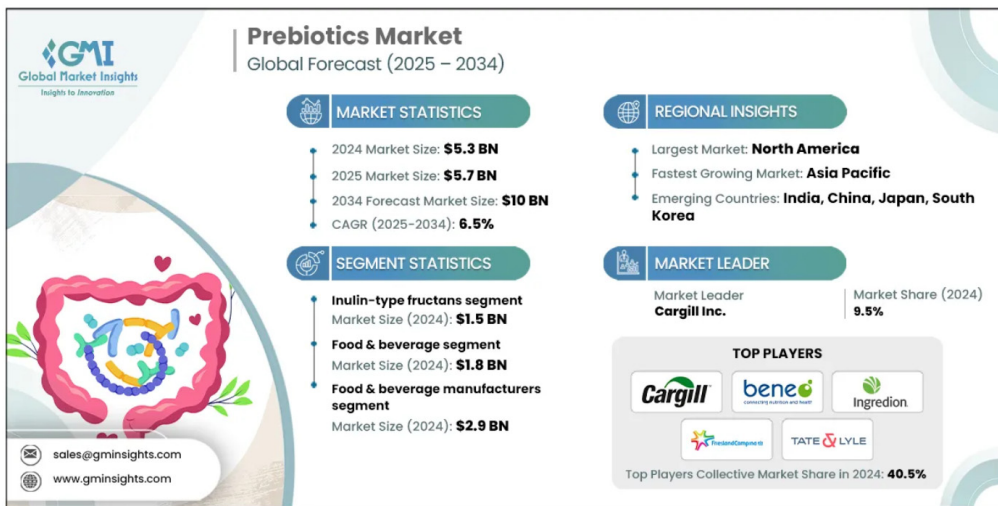


별도로 존재하지 않는다.

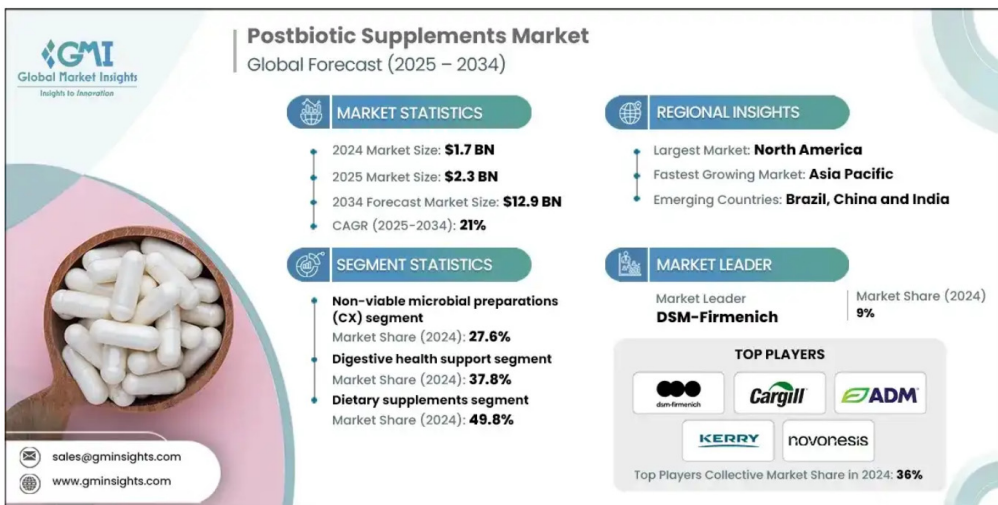
- 프리바이오틱스로 활용되는 구아검가수분해물, 난소화성말토덱스트린, 이눌린과 프락토올리고당 등은 고시형 기능성 원료에 포함되어 있지만, 이는 해당 성분이 프리바이오틱스이기 때문이 아니라 식이섬유로서 장내 유익균 증식, 배변활동 개선, 혈당과 지질 조절 가능성이 검증되었기 때문이다. 반대로 차전자피처럼 식이섬유이지만 프리바이오틱스 활성은 제한적이거나 불명확한 소재도 존재하여, 프리바이오틱스를 단순히 식이섬유와 동일한 영역으로 보기는 어렵다. 즉, 국내에서는 프리바이오틱스 개념이 일부 식이섬유와 올리고당 기능성 원료와 교차하지만, 제도적으로는 독립된 카테고리 관리 되지 않는 구조라고 정리할 수 있다.
- 포스트바이오틱스 또한 제도적으로 별도의 기능성 원료 분류가 존재하지 않는다. 포스트바이오틱스 개념에 해당하는 소재는 사균체(heat-killed) 기반 또는 발효물 기반 형태로 다양한 연구가 이루어지고 있으나, 현행 제도에서는 각각 일반 식품원료 또는 개별인정형 기능성 원료 심사 체계 내에서 소재 특성에 따라 평가된다. 실제 사례로, *Bifidobacterium breve* IDCC 4401(열처리배양건조물)은 사균체 특성을 바탕으로 포스트바이오틱스 범주에 포함될 수 있으나, 제도적으로는 ‘포스트바이오틱스’라는 명칭이 기능성 원료 분류에 사용되지 않는다. 이에 따라 이 원료는 ‘열처리배양건조물’로 표시되어 개별인정형 기능성 원료로 승인되었다.
- 국외에서도 유사한 구조를 보인다. ISAPP는 프리바이오틱스를 “숙주 미생물에 의해 선택적으로 이용되어 건강 이득을 주는 기질”, 포스트바이오틱스를 “생명력이 없는 미생물 또는 그 성분을 포함한 제제로서 숙주에 건강상 이득을 주는 물질”로 정의하여 학술적 기준을 제시하고 있다. 또한 Codex Alimentarius 체계에서도 프리바이오틱스 개념을 기술한 제안서가 일부 존재하지만, 이는 공식적인 규제 카테고리가 아니라 참고적 정의에 가까운 수준으로 이해된다. 그러나 미국 FDA나 EU EFSA 모두 프리바이오틱스, 포스트바이오틱스를 독립된 기능성 원료 범주로 관리하는 제도는 확인되지 않는다. 미국에서는 관련 소재가 식이보충제 또는 식품 성분으로서 GRAS(Generally Recognized As Safe) 또는 NDI(new Dietary Ingredient) 제도를 통해 안전성을 평가받고 있으며, EU에서는 EFSA가 Novel Food 또는 QPS(Qualified Presumption of Safety) 제도를 통해 새로운 미생물 또는 발효물 기반 소재의 안전성을 평가하고 있다.
- 종합하면, 현재 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스는 국내외 모두 학술적 개념과 산업적 활용은 정착되고 있으나, 규제 측면에서는 식이섬유, 프로바이오틱스, 발효물 등 기존 제도 내에서 소재 특성에 따라 개별적으로 검토되는 단계로 볼 수 있다. 향후 관련 규정이나 평가 기준의 변화 여부는 추후 제도 동향을 지속적으로 확인할 필요가 있다.

2.4. 시장 및 산업 전망

- 글로벌 바이오틱스 산업은 기존 생균 중심 성장 단계에서 벗어나 기능성 근거 강화와 안전성 확보 그리고 발효 기반 기술 혁신을 중심으로 구조가 재편되는 흐름을 보이고 있다. Global Market Insights 자료에 따르면 프리바이오틱스 시장은 2024년 약 53억 달러 규모로 추산되며 2025년부터 2034년까지 연평균 6.5%의 안정적 성장을 이어갈 것으로 전망된다. 동일 출처에 따르면 포스트바이오틱스 시장은 2024년 약 17억 달러 수준에서 2034년까지 연평균 21% 성장할 것으로 예상된다. 이러한 성장의 배경에는 단순 장 건강 중심 소비에서 벗어나 면역 대사 스트레스 인지 기능 등 복합적 건강 요구가 증가하고 있다는 변화가 자리하고 있다.



[그림 2-5] 프리바이오틱스 시장 전망 (Global Market insights)



[그림 2-6] 포스트바이오틱스 시장 전망 (Global Market insights)



- 산업 측면에서는 글로벌 기업들이 프로바이오틱스 프리바이오틱스 포스트바이오틱스를 하나의 포트폴리오로 통합하려는 움직임을 보이고 있다. 이는 장내 미생물의 개인차가 크고 기능성 발현 기전이 다층적이라는 점에서 합리적 접근으로 평가된다. 실제로 미국과 유럽의 기업들은 인체적용시험 기반 원료 검증 마이크로바이옴 데이터 분석 디지털 헬스 서비스 결합 등을 통해 기능성 라인업을 확장하고 있으며 이러한 전략은 기존의 단일 균주 중심 경쟁에서 벗어나 과학적 차별성을 확보하기 위한 핵심 전략으로 자리하고 있다.
- 기술 혁신 역시 시장 전망을 결정하는 중요한 요소다. 발효공정의 정밀화는 프리바이오틱스 생산 효율을 높이고 있으며 고순도 HMO와 신규 올리고당의 대량 생산 기술은 제품군 확대 속도를 크게 높이고 있다. 포스트바이오틱스 분야에서도 산업 내 대표적 참고 모델로 활용되는 원료들이 등장하고 있다. 열처리 유산균 기반 LC Plasma 발효물 기반 EpiCor 그리고 파스퇴르 처리된 Akkermansia muciniphila 등이 이에 해당하며 이들은 안전성과 제조 표준화를 바탕으로 다양한 제품 개발의 기준점 역할을 하고 있다. 더불어 코팅 나노캡슐화 제어방출과 같은 전달기술은 기능성 유지와 복용 편의성을 높이는 방향으로 고도화되고 있다.
- 소비자 요구 역시 시장 변화를 뚜렷하게 반영한다. 장 건강이라는 전통적 영역에 국한되지 않고 피부 건강 정서 상태 수면 질 인지 기능과 같은 라이프스타일 기반 기능성에 대한 관심이 증가하고 있으며 특히 젊은 소비자층은 과학적 근거 체감 가능한 효과 그리고 브랜드 스토리까지 고려하는 경향을 보이고 있다. 고령화 역시 바이오틱스 수요 증가를 구조적으로 뒷받침하는 요소가 되고 있으며 의료 영양 분야의 확장도 산업의 성장 동력으로 작용하고 있다.
- 규제 환경은 아직 프리바이오틱스와 포스트바이오틱스를 독립 범주로 정의하지 않지만 포스트바이오틱스의 경우 대부분 국가에서 공통적으로 별도 카테고리가 존재하지 않는다는 점이 이미 문헌에서 정리되고 있다. 향후 기능성 표기 기준 마련 안전성 평가 체계 구체화 원료 데이터베이스 구축과 같은 제도적 변화가 도입될 가능성이 있으며 이는 초기 시장 진입 기업에게 기회와 진입장벽을 동시에 제공할 것으로 예상된다.
- 종합하면 글로벌 바이오틱스 산업은 기능성 다층화 기술 기반 경쟁력 강화 소비자 중심 전략이라는 세 가지 축을 바탕으로 고부가가치 시장으로 이동하고 있다. 특히 포스트바이오틱스는 높은 성장률과 안정성 그리고 제조 표준화 가능성을 바탕으로 향후 5년에서 10년 동안 바이오틱스 시장 내 핵심 성장 세그먼트가 될 가능성이 크다.



3 멀티오믹스 기반 프리/포스트바이오틱스 기능성 평가 기술 개발 동향

3.1. 프리/포스트바이오틱스 기능성 평가기술 현황

- 1950년대 분자생물학과 유전체학의 기초가 확립된 이후, 1995년 Haemophilus influenzae 유전체가 최초로 완전 해독되면서 차세대 염기서열분석(Next Generation Sequencing, NGS)이 본격적으로 도입·확산되었다. 이를 계기로 미생물 연구는 개별 균주 중심에서 군집(커뮤니티) 수준의 분석으로 급격히 확장되었고, 장내 마이크로바이옴 구성 변화와 dysbiosis 정상화가 건강·질병에 미치는 영향이 부각되면서 메타유전체학·대사체학 등 멀티오믹스를 활용한 인체 연계 연구가 폭발적으로 증가하고 있다.
- NGS와 생물정보학의 발전으로 유전체의 고속 해독과 기능 해석이 가능 해졌으며, 더 나아가 유전체 설계·개량을 통한 목적 지향적 미생물 개체 개발까지 기술 수준이 고도화되었다.
- 유전체·메타유전체 연구는 고부가가치 미생물 자원 발굴을 가속화하고 있으며, 개별 유전자 기능과 군집 특성 파악을 통해 의료·보건, 환경, 식품·산업 등 다양한 분야로 응용 가능성을 확대하고 있다.
- 단일 균주 기초연구를 넘어, 특정 환경에서의 전체 미생물 유전체 정보를 통합적으로 분석하는 마이크로바이옴 연구가 주류로 자리 잡았다. NGS 발전과 함께 도입된 메타유전체(metagenome) 개념은 특정 환경 내 전체 미생물 유전체를 서열 기반으로 확보·분석하는 표준 연구 플랫폼으로 정착되었으며, 그 결과 장 건강 증진을 넘어 다양한 질환을 타겟으로 하는 미생물 기반 제품 개발이 활발히 이루어지고 있다.
- 이러한 글로벌 추세 속에서 2007년 미국 NIH는 Human Microbiome Project(HMP)를 시작하여 인간 마이크로바이옴 참조 데이터베이스를 구축하고 인체 마이크로바이옴 연구의 기초를 마련하였다.
- 유럽연합은 MetaHIT(Metagenomics of the Human Intestinal Tract) 프로젝트를 통해 인간 장내 미생물 유전체를 분석하고 건강·질환 연관성을 규명하는 동시에, 신규 분석기술 개발과 데이터베이스 구축을 병행하였다. 현재는 국제 인간 마이크로바이옴 컨소시엄(International Human Microbiome Consortium, IHMC)을 중심으로 미국·유럽·일본·한국 등 다국적 연구진이 협력하여 대규모 코호트·멀티오믹스 데이터를 축적하고 있으며, 인체 적용 가능성이 높은 평가 프레임과 표준화된 분석 체계가 빠르게 정착되고 있다.



- 이와 같은 연구 생태계의 확장은 생균을 직접 투여하는 전략(프로바이오틱스)을 넘어, 기질을 활용해 군집 조성을 간접적으로 재조율하는 프리바이오틱스, 그리고 미생물 유래 비생균성 생체활성물질을 활용하는 포스트바이오틱스 등 복합 전략으로 자연스럽게 확장되는 계기가 되었다.
- 프리바이오틱스는 장내 미생물이 선택적으로 이용하여 숙주 건강에 유익한 변화를 유도하는 기질로 정의되며, 소장에서 소화·흡수되지 않은 채 대장에 도달하여 특정 유익균의 에너지원으로 사용되는 성분을 의미한다. 이와 같은 특성으로 프리바이오틱스는 균주 자체를 투여하는 접근과 달리 장내 생태계를 간접적으로 재조절하는 전략으로 자리매김하였고, 프로바이오틱스의 한계를 보완하는 예방·관리형 영양 솔루션으로 활용 범위가 확대되고 있다.
- 프리바이오틱스 섭취는 *Bifidobacterium* 등 유익균의 선택적 증식과 SCFA(특히 부티르산) 생성 증가, 담즙산·ทริป토판(인돌) 대사 경로의 균형화로 이어져 장 점막 장벽 강화, 저등급 염증 완화, 배변 습관 개선 및 혈당·지질 등 대사 지표 개선에 기여하는 것으로 보고되어 왔다. 기존 올리고당 소재의 한계를 보완하기 위해 모유 올리고당(HMOs)을 활용한 프리바이오틱스 개발 연구도 활발히 진행되고 있다.
- 포스트바이오틱스는 프로바이오틱스의 발효 과정에서 생성된 대사산물과 불활성(사균)화된 미생물을 포함하는 제제로, 생균 투여 없이도 장 장벽 강화, 면역 균형 조절, 염증 완화 등의 건강 이점을 유도하는 접근으로 주목받고 있다. 기존 프로바이오틱스·프리바이오틱스·신바이오틱스 범주에 속하지 않는 비생균성 생물활성 물질을 포괄하는 개념으로 사용되며, 열 불활성화된 *Lactobacillus* 제제가 소아 감염 예방 및 치료에 도움을 주었다는 임상·전임상 근거가 축적되고 있다.
- 사균체(paraprobiotics)는 열·압력 등 처리로 불활성화한 미생물체를 활용하는 방식으로, 국내외에서 사균체를 첨가한 두유·발효 음료 등 다양한 제품이 개발되고 있다. 발효유아식(Fermented Infant Formula, FIF)은 발효 과정에서 생성된 유기산·펩타이드 등 기능성 발효물질을 이용하는 형태로, 생후 6개월 이후 유아식에 적용한 사례들이 보고되어 왔다.
- 최근에는 원균의 종·주(株) 특성 및 안전성 검증, 불활성화 공정의 표준화 및 밸리데이션, 주요 작동 성분의 지표화를 통해 재현성 있는 효능-기전 연계를 확보하려는 노력이 강화되고 있다. 다만 제품의 범용화를 위해서는 사람 대상 체계적 임상시험이 지속적으로 요구되며, 대상자 특성과 표적 지표에 따른 맞춤형 포뮬레이션 설계, 그리고 식품·유아식·동물영양 등 응용 영역별 품질·안정성 기준 확립이 병행되어야 한다.

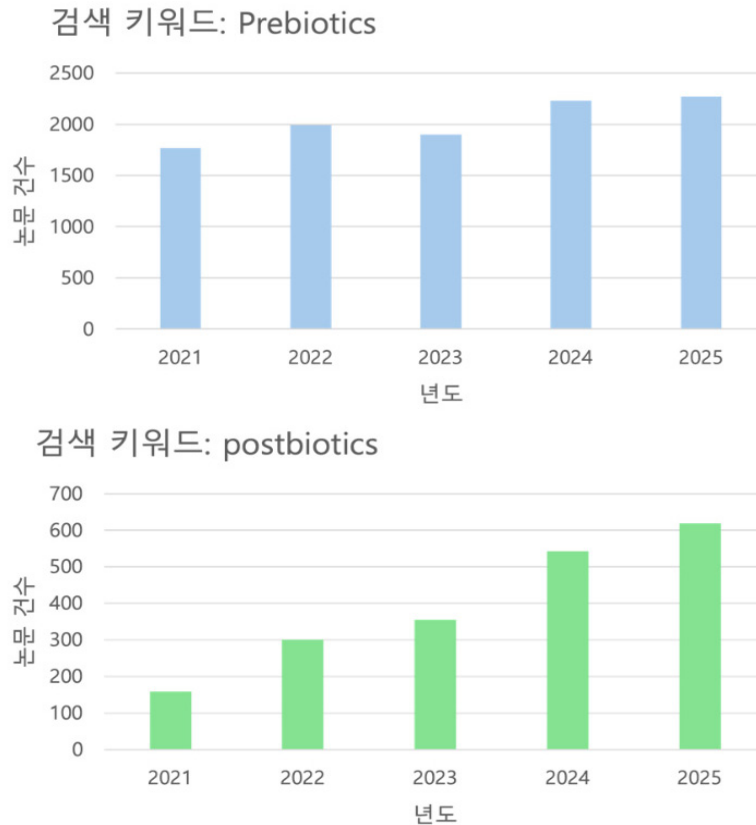


[표 3-1] 프리바이오틱 활성을 지닌 난소화성 올리고당(NDO) (Hwang et al., 2019)

Fructooligosaccharide (FOS)	Inulin
Galactooligosaccharide (GOS)	Resistant starch
Xylooligosaccharide (XOS)	Sugar alcohol
Mannanooligosaccharide (MOS)	Cyclodextrin
Soybean oligosaccharide (SOS)	Raffinose
Isomaltooligosaccharide (IMO)	Lactosucrose
Glucosaccharide	Isomaltulose
Gentioligosaccharide	Glycosylsucrose
Pecticoligosaccharide	Lactulose

[표 3-2] 포스트바이오틱스의 종류와 유용효과 (Hong, 2020)

종류	유용효과
단쇄지방산	식이섬유를 분해하여 생성되는 6탄소 미만 지방산으로, 장 상피세포의 주요 에너지원이며 장내 pH를 낮춰 유익균 증식을 돕는다(젖산, 초산, 부티르산, 프로피온산 등).
항균펩타이드	유산균이 생성하는 박테리오파지는 내성 위험이 낮고, 장내 유해균 성장을 억제하는 천연 항생제 역할을 한다.
천연비타민	프로바이오틱스 및 장내미생물은 비타민 B군, 비타민 K 등 필수 영양소 합성에 기여하며, 체내 흡수율을 높인다.
복합아미노산, 펩타이드	류신, 라이신 등 필수아미노산과 다양한 올리고·폴리펩타이드를 생성하여 단백질 대사와 근육·면역 기능에 관여한다.
신경전달물질	세로토닌, GABA 등 신경전달물질 생성에 관여하여 불안·우울·스트레스 조절과 인지 기능에 영향을 줄 수 있다.
효소	소화가 어려운 식물성 탄수화물을 분해하고, 비배당체 화합물로 전환하여 생리활성을 높인다(배당체 가수분해효소, 다당체 분해효소 등).
미네랄	미생물 유래 셀레늄은 일반 합성 셀레늄보다 흡수·이용률이 높고, 항산화 기능을 통해 노화 억제와 피부 보호에 기여한다.
세포파쇄물	펩티도글라이칸, 헤파타당체, 테이코산 등 세포벽 구성성분 및 CpG-ODN 등은 TLR-9 경로를 통해 선천면역을 자극하고 IgA 분비를 유도한다.



[그림 3-1] 프리바이오틱스 및 포스트바이오틱스 논문 게재 추이
 (Pubmed; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>)

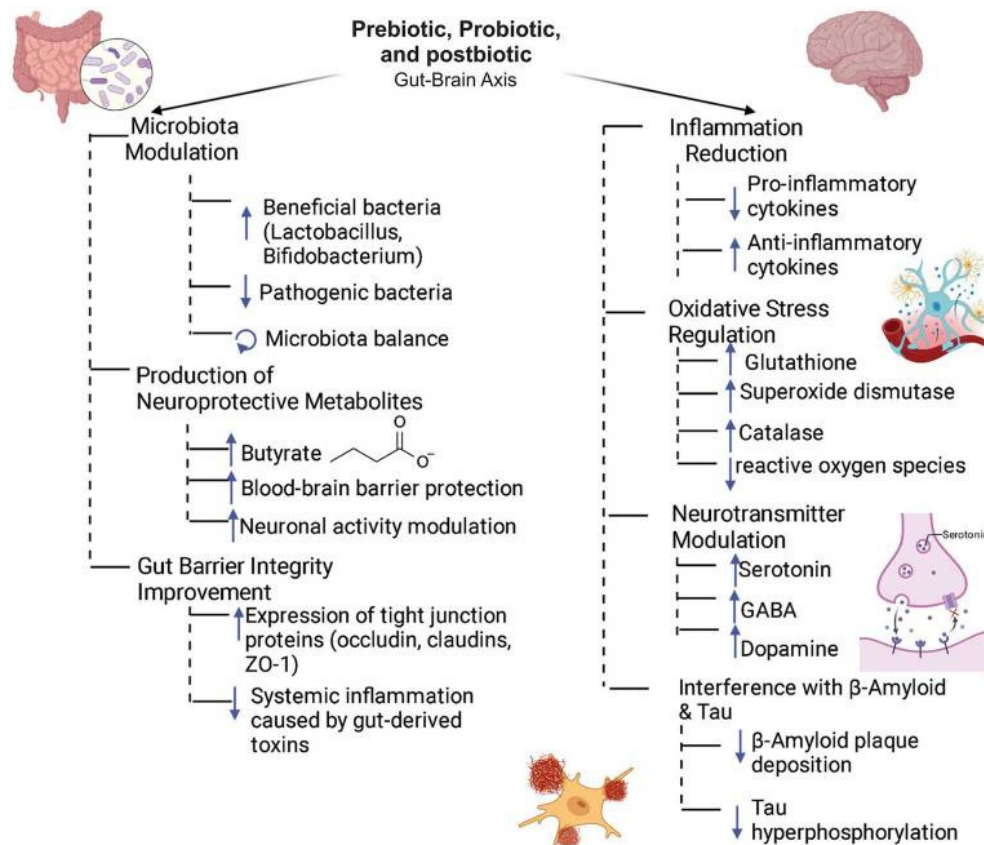
3.2. 골다공증·근감소증 질환 타겟 프리/포스트바이오틱스 개발 동향

3.2.1. 근력개선 기능성

- 포스트바이오틱스는 염증 조절과 인슐린 감수성 개선을 통해 골격근 질량과 기능을 조절할 수 있어, 근육 기능 보존 및 근감소증 예방에 기여할 수 있다는 보고가 있다 (Muriel et al., 2022).
- 암 악액질은 체중·근육 감소와 전신 염증을 특징으로 하며, 암 환자의 삶의 질과 예후에 크게 영향을 미친다 (Herremans et al., 2019). 최근 연구에서는 악액질과 관련하여 장내 미생물군의 역할이 부각되고 있으며, 미생물 불균형이 염증 증가와 근육 소모 악화와 연관된다는 보고가 제시되고 있다 (Panebianco et al., 2023).
- 프리/포스트바이오틱스는 SCFA, 담즙산, 트립토판-인돌 대사 경로를 조절함으로써 염증과 에너지 대사를 개선하고, 이를 통해 근력·지구력 향상에 기여할 수 있는 것으로 제안된다 (Lucas et al., 2018).



- 급성 백혈병·C26 모델에서 이눌린형 프락탄(ITF)과 *L. reuteri*를 병용한 신바이오틱스 투여 시 장 장벽 및 면역기능 회복, 염증 감소, 근육 소모·악액질 지표 완화, 생존 연장 효과가 보고되었다 (Bindels et al., 2016).
- 노화와 함께 근육량·근기능 상실은 신체적 허약과 낙상 위험 증가로 이어지며, 삶의 질을 크게 저하시킨다 (Lee et al., 2021).
- 포스트바이오틱스는 C2C12 세포에서 MuRF1, NF- κ B 활성을 억제하고, 노화 마우스 모델에서 AKT, NF- κ B 및 FOXO3a 신호 전달 경로를 조절하여 노화 관련 근감소를 완화했다는 연구 결과가 보고되고 있다 (Baek et al., 2023; Han et al., 2023).
- 프리바이오틱스의 경우, 노화 랫드 모델에서 이눌린과 대두단백 동시 섭취가 속근 비대, 미토콘드리아 활성 증가, MuRF1 발현 억제를 통해 연령 관련 근손실을 완화했다는 결과가 제시되었다 (Salles et al., 2023).



출처: Patricio-Martínez, Aleidy et al., 2025

[그림 3-2] Gut-muscle-brain axis 역할과 프리/포스트바이오틱스의 기능성



[표 3-3] 근력 개선에 대한 프리/포스트바이오틱의 효과

논문/출처	실험 모델	연구방법	주요 결과
K Tominaga et al., 2021	마우스 근육 감소 유도 모델	1-Kestose(프리바이오틱 올리고당) 2~4주간 경구 투여. 장내 비피도박테리아, 근육량, 운동능력 평가	비피도박테리아 ↑, 근육량·체력 ↑, 근육 소실 예방
Kim M et al., 2025	노화 유도 근감소증 마우스	Heat-killed <i>L. plantarum</i> HY7715 및 EVs 8주간 투여. Grip strength 및 근육분화 유전자 분석	근력 ↑, 근육 재생/분화 ↑, 근소실 유전자 억제, 항염·미토콘드리아 활성화 ↑
Wang T et al., 2025	노화 마우스	<i>Parabacteroides distasonis</i> 사균체 8주 투여. 악력·지구력, 근섬유, 면역/염증 평가	근력·지구력·근육기능 ↑, 근섬유 성장, 장내미생물 및 면역기전 개선

3.2.2. 뼈 건강 기능성

- 뼈는 신체 지지와 운동 기능을 담당할 뿐 아니라, 골격근이 부착되는 주요 구조로서 근·골 축(muscle-bone unit)의 핵심 요소이다.
- 폐경 후 여성에서는 에스트로겐·프로게스테론 감소로 골흡수 증가와 골형성 감소가 동반되어 골손실이 가속화되는 것으로 보고된다 (Baker et al., 2017).
- 여러 임상 연구에서 프리바이오틱스가 칼슘·마그네슘 등 미네랄 흡수율을 증가시키고 골형성 마커(조골세포 활성화 등)를 촉진한다는 근거가 제시되었다 (Chen Y et al., 2025; Weaver, 2015).
- 프락토올리고당(FOS), 갈락토올리고당(GOS) 등 프리바이오틱스를 섭취하면 장내 미생물 균형이 개선되고 SCFA, 특히 부티르산 생성이 증가하여, 뼈 미네랄 밀도(BMD) 증가 및 골손실 억제 효과가 동물·인체 연구에서 확인되었다 (Lucas et al., 2018; Zaiss et al., 2019).
- 최근에는 엔지니어드 포스트바이오틱스(예: 나노포스트바이오틱스)를 활용한 연구에서 폐경 유도 동물 모델의 대퇴골 및 척추 BMD가 유의하게 증가하고, 골손실 예방과 골 재생 촉진에 긍정적 효과를 보였다는 결과가 보고되었다 (Yu et al., 2024; Harahap et al., 2023).
- 포스트바이오틱스를 난소제거(OVX) 모델에 투여했을 때 대퇴골 및 전체 골밀도가 증가하고, 폐경 후 호르몬 저하로 인한 골손실이 개선되었다는 결과도 제시되고 있다 (Montazeri et al., 2025).



[표 3-4] 뼈 건강과 골격근 대사 관련 매커니즘에 대한 포스트바이오틱스의 효과

참고 논문	포스트바이오틱스	연구 대상 및 방법	주요 효과 및 결과
Menard O et al. (2005)	Bifidobacterium breve M-16V cell lysate	노년 쥐에 6주간 M-16V 사균체 투여	골분해세포 감소, 골형성세포 활성화
Caggianiello G et al. (2016)	Exopolysaccharides from Lactobacillus plantarum	근감소증 모델 쥐에 8주간 EPS-LP 경구 투여	근육량 증가, 에너지 대사 효소 활성화
Lucas S et al. (2018)	Sodium butyrate (SCFA postbiotic)	노령 쥐에 12주간 부티르산 식이 보충	뼈 손실 억제, 근육 기능 개선, Treg 면역 효과
Wang Z et al. (2021)	Bacteriocin from Lactobacillus fermentum	골절 치유중인 쥐에게 6주간 박테리옌 투여	골 재생 촉진, 골형성세포 활성화
Montazeri S et al. (2025)	Lactobacillus plantarum cell lysate	난소제거(OVX) 쥐에 8주간 사균체 투여	골밀도 상승, 염증성 사이토카인 감소

[표 3-5] 뼈 건강과 골격근 대사 관련 매커니즘에 대한 프리바이오틱스의 효과

참고 논문	프리바이오틱스	연구 대상 및 방법	주요 효과 및 결과
Weaver CM et al. (2015)	Galacto-oligosaccharides (GOS)	골절이 있는 노인 환자에게 6개월간 GOS 보충	골밀도 증가, 혈청 칼슘 및 미네랄 흡수 증가
Vogt LM et al. (2015)	Xylo-oligosaccharides (XOS)	폐경 후 여성에 12주간 XOS 섭취	칼슘 흡수 증가, 골질 개선, 파골세포 감소
Lucas S et al. (2018)	Fructo-oligosaccharides (FOS)	난소제거(OVX) 쥐에 8주간 FOS투여	SCFA 생산 증가, 골밀도 증가, 골소실 억제
Seifert S et al. (2019)	Isomalto-oligosaccharides (IMO)	노령 여성 집단에 3개월 IMO 섭취	골밀도 개선, 장내 미생물 다양성 향상
Chen Y et al. (2025)	Inulin	노령 쥐에게 4주간 이눌린 공급 실험	장내 유익균 증식/SCFA 증가, 골대사 효소 활성화

3.2.3. 근육 및 뼈 건강 관련 국내외 임상시험 동향

- ClinicalTrials.gov(CTG) 검색 결과, 근육·뼈 건강과 관련하여 프리바이오틱스 또는 포스트바이오틱스 효능을 평가하는 임상시험은 전 세계적으로 약 21건이 등록되어 있었다(2025년 기준).
- ‘Prebiotics’, ‘Postbiotics’, ‘Sarcopenia’, ‘Muscle’ 키워드로 검색 시 총 6건의 임상이 확인되었으며, 스페인·영국·중국·한국 등에서 수행되었다. 이 중 프리바이오틱스가 5건, 포스트바이오틱스가 1건이었다.
- ‘Prebiotics’, ‘Postbiotics’, ‘Osteoporosis’, ‘Bone’ 키워드로 검색 시 10건의 임상이 확인되었고, 우루과이·미국·그리스·스페인·호주·중국 등에서 진행되었다. 이 가운데 프리바이오틱스가 9건, 포스트바이오틱스가 1건으로 나타나, 뼈 건강 영역에서는 아직 프리바이오틱스 연구가 상대적으로 우세한 양상을 보인다.
- 이러한 임상시험 동향은 프리/포스트바이오틱스가 근육 기능 저하와 골다공증을 동시에 겨냥하는 통합형 영양 전략으로 활용될 수 있음을 시사하며, 향후 국내 연구·제품 개발에서도 참고할 수 있는 근거를 제공한다.



[표 3-6] 국내외 프리/포스트바이오틱스 근육 건강 임상시험 현황 (ClinicalTrials.gov)

개입/치료제	임상시험 ID	제목	임상단계	연구설계	연구시작	지역
<ul style="list-style-type: none"> · Refined olive oil(38.6 mg hydroxytyrosol and tyrosol/kg oil) · Virgin olive oil rich in phenolic compounds(156 mg hydroxytyrosol and tyrosol/kg oil) · Maltodextrin · Prebiotic (FOS and inulin) 	NCT05485402	Dietary Strategy to Tackle Sarcopenia in Early Elderly Subjects (FOOP-Sarc)	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: TRIPLE · Primary Purpose: PREVENTION · Type: Intervention 	2022.9.1	Spain
<ul style="list-style-type: none"> · Prebiotic food supplement · Protein supplement · Maltodextrin (placebo) 	NCT04309292	Protein and Skeletal Muscle in Older Twins: Role of the Gut Microbiome	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: PREVENTION · Type: Intervention 	2021.4.29	United Kingdom
<ul style="list-style-type: none"> · symbiotic · whey proteic · symbiotic placebo · whey protein placebo 	NCT06347835	Biomarker Identification and Nutritional Intervention of Primary Sarcopenia Based on Gut-muscle Axis	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: DOUBLE · Primary Purpose: TREATMENT · Type: Intervention 	2024.4.1	China
<ul style="list-style-type: none"> · Prebiotic · Placebo 	NCT06411964	Galactooligosaccharide and Aging	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: DOUBLE · Primary Purpose: BASIC_SCIENCE · Type: Intervention 	2024.5.2	United Kingdom
<ul style="list-style-type: none"> · GI Biome #7 · Placebo 	NCT05735418	The Effect of GI Biome #7 on Gut Microbiome and Health of the Elderly	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: TREATMENT · Type: Intervention 	2023.1.13	South Korea
<ul style="list-style-type: none"> · Whey postbiotics derived from kefir lactic acid bacteria · Placebo powder 	NCT06230302	Efficacy and Safety of Kefir Whey Postbiotics	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: TREATMENT · Type: Intervention 	2023.12.26	South Korea

[표 3-7] 국내외 프리/포스트바이오틱스 뼈 건강 임상시험 현황 (ClinicalTrials.gov)

개입/치료제	임상시험 ID	제목	임상단계	연구설계	연구시작	지역
<ul style="list-style-type: none"> · Symbiotic yogurt containing inulin and Lactobacillus rhamnosus control yogurt · Control yogurt 	NCT03420716	Symbiotic Yogurt, Calcium Absorption and Bone Health in Young Adult Women	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: CROSSOVER · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: PREVENTION · Type: Intervention 	2014.9.1	Uruguay
<ul style="list-style-type: none"> · SBD111 medical food · Placebo 	NCT06389539	Synbiotic to Attenuate Resorption of the Skeleton	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: OTHER · Type: Intervention 	2024.8.12	United States
<ul style="list-style-type: none"> · Calcium and vitamin D supplement · Calcium, vitamin D and prebiotic supplement · Calcium, vitamin D and flavonoid supplement 	NCT05421819	Design and Development of a Novel Food Supplement for Osteoporosis Based on Gut Microbiome Mechanisms	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: PREVENTION · Type: Intervention 	2022.06.15	Greece
<ul style="list-style-type: none"> · Yogurt 	NCT05350579	Yogurt Supplementation to Alter Bone Biomarkers, the Gut Microbiota and Inflammation in Older Adults	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: NONE · Primary Purpose: TREATMENT · Type: Intervention 	2019.3.28	United States
<ul style="list-style-type: none"> · β-Cx plus PS plus GOS · β-Cx plus PS 	NCT03469518	Effect of β -cryptoxanthin (β -Cx), Plant Sterols and Galactooligosaccharides on Systemic and Gastrointestinal Markers	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: CROSSOVER · Masking: DOUBLE · Primary Purpose: BASIC_SCIENCE · Type: Intervention 	2017.1.1	Spain
<ul style="list-style-type: none"> · Pendulum WBF-038 · Pendulum Placebo 	NCT05348694	OsteoPreP: Food Supplements for Postmenopausal Bone Health	PHASE4	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: TRIPLE · Primary Purpose: PREVENTION · Type: Intervention 	2022.5.1	Australia





개입/치료제	임상시험 ID	제목	임상단계	연구설계	연구시작	지역
<ul style="list-style-type: none"> · Medical Food SBD111 · Placebo 	NCT05009875	Food Trial Evaluating the Efficacy of SBD111 Versus Placebo for the Clinical Dietary Management of the Metabolic Processes of Osteopenia	Not applicable	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: PARALLEL · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: OTHER · Type: Intervention 	2021.12.15	Australia
<ul style="list-style-type: none"> · PROCEDURE: Biospecimen Collection · PROCEDURE: Bone Mineral Density Test · OTHER: Questionnaire Administration · DRUG: WBF-038(A combination probiotic and prebiotic formulation) 	NCT07044310	5-strain Probiotic Formulation in HR-positive Breast Cancer Receiving Aromatase Inhibitor to Prevent Bone Loss	PHASE2	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: NA · Intervention Model: SINGLE_GROUP · Masking: NONE · Primary Purpose: SUPPORTIVE_CARE · Type: Intervention 	2025.7.25	United States
<ul style="list-style-type: none"> · Soluble corn fiber 	NCT06519877	Fiber and Calcium Absorption in Older Men	PHASE2	<ul style="list-style-type: none"> · Allocation: RANDOMIZED · Intervention Model: CROSSOVER · Masking: QUADRUPLE · Primary Purpose: OTHER · Type: Intervention 	2025.1.1	United States
<ul style="list-style-type: none"> · No intervention is involved 	NCT05763589	Study of the Effects of Soy Exposure in Early Life on Bone Development and Gut Microbiota	-	<ul style="list-style-type: none"> · Observational Model · Time Perspective: p · Observation 	2022.12.16	China



3.2.4. 근력 및 뼈 건강 프리/포스트바이오틱스 지식재산권 현황

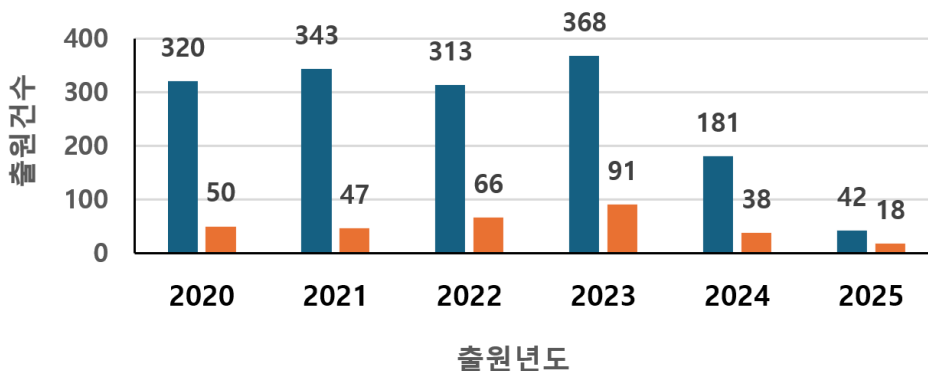
- KIPRIS 특허정보검색서비스를 이용하여 2025년 기준 출원·공개된 특허를 조사하였다.
- 국가별 특허 건수를 비교한 결과, 프리바이오틱스 관련 특허는 미국이 가장 활발하며, 중국·유럽·PCT 국제출원이 뒤를 잇는 양상을 보였다. 포스트바이오틱스 역시 미국과 PCT 출원이 두드러지며, 중국·유럽 순으로 특허 활동이 이루어지고 있다.

[표 3-8] 프리/포스트바이오틱스 키워드 검색 건수 (2025년 기준)

분류	출원건수						합계
	한국	미국	일본	중국	유럽	PCT	
프리바이오틱스	1,329	9,989	460	3,360	3,561	6,987	25,686
포스트바이오틱스	117	390	12	193	105	440	1,257

- 2020~2025년 프리바이오틱스·포스트바이오틱스 특허 출원 추이를 분석한 결과, 2023년까지 지속적인 증가세를 보이다가 2024년에 다소 조정 국면을 보이는 것으로 나타났다. 이는 기술 성숙과 함께 차별화 소재·적응증 발굴 경쟁이 심화되는 과정으로 해석할 수 있다.

특허 출원 동향



[그림 3-1] 연도별 프리/포스트바이오틱스 특허 출원 동향(KIPRIS, 2025)

- 국내 특허를 대상으로 ‘프리바이오틱스+골다공’을 키워드로 검색한 결과 22건, ‘포스트바이오틱스+골다공’은 7건으로 확인되었다.
- ‘프리바이오틱스+근육’ 조합은 143건, ‘포스트바이오틱스+근육’ 조합은 36건이 검색되어, 현재까지는 근육 기능 개선 분야에서 프리바이오틱스 관련 특허 활동이 포스트바이오틱스보다 상대적으로 활발한 것으로 나타났다.



- 이러한 지식재산권 현황은 근골격계 타깃 프리/포스트바이오틱스 시장이 이미 글로벌 경쟁 단계에 있으며, 국내에서도 차별화된 균주·대사산물·조성기술에 대한 선제적 특허 확보가 필수적임을 시사한다.

3.3. 축산 및 수의학분야 프리/포스트바이오틱스 기능성 평가 기술 개발 동향

3.3.1. 축산 분야에서의 적용 및 고도화

- 산업 동물(돼지, 소, 닭 등) 분야에서 프리/포스트바이오틱스는 단순한 생산성 향상을 넘어, 면역 시스템 조절을 통한 질병 저항성 증대와 축산 냄새 저감 등 환경 개선의 목적으로 활용 범위가 확대되고 있다.

1) 프리바이오틱스(Prebiotics)의 기전 중심적 활용

- 병원균 부착 억제: 만난올리고당(MOS)과 같은 프리바이오틱스는 장내 병원성 세균인 *Salmonella*나 *E. coli*의 1형 펴브리아(Type 1 fimbriae)와 특이적으로 결합한다. 이는 병원균이 숙주의 장 상피 세포 만노오스 수용체에 부착하는 것을 물리적으로 차단(Competitive Exclusion)하여 감염을 사전에 예방하는 효과를 낸다(Pourabedin & Zhao, 2015).
- 장 점막 장벽 강화 (Gut Barrier Function): 프리바이오틱스의 발효로 생성된 부티르산(Butyrate) 등의 단쇄지방산(SCFA)은 대장 상피세포의 주요 에너지원으로 사용되며, 융모(Villi)의 높이를 증가시키고 Crypt 깊이를 조절하여 영양소 흡수 면적을 넓힌다. 또한 밀착 연결 단백질(Tight Junction Protein)의 발현을 증가시켜 장 투과성을 감소시킴으로써 장내 독소(LPS)의 체내 유입을 막는다(Markowiak & Ślizewska, 2018).
- 면역 조절 (Immunomodulation): 베타글루칸(Beta-glucan) 등의 다당체는 장 관련 림프 조직 (GALT)을 자극하여 대식세포의 탐식 작용을 활성화하고, 분비형 면역글로불린 A(sIgA)의 생성을 촉진하여 점막 면역을 강화한다. 이는 이유기 자돈이나 어린 병아리의 폐사율 감소에 결정적인 역할을 한다(Markowiak & Ślizewska, 2018; Pourabedin & Zhao, 2015).

2) 포스트바이오틱스(Postbiotics)의 산업적 가치와 차별화

- 사료 가공 공정 안정성 확보: 축산용 사료는 위생과 소화율 향상을 위해 고온(80~90°C) 및 고압의 펠leting 공정을 거친다. 기존 생균제(Probiotics)는 이 과정에서 대부분 사멸하여 효능을 보장하기 어려웠으나, 사균체나 대사산물 기반의 포스트바이오틱스는 열과 산도(pH) 변화에 대한 안정성이 탁월하여 가공 후에도 일관된 효능을 유지할 수 있다는 결정적인 산업적 이점을 가진다(Aguilar-Toalá et al., 2018).



- 천연 항생제 대체 기전 (Bacteriocins): 유산균 유래 펩타이드인 박테리오신(Nisin, Pediocin 등)은 병원성 세균의 세포막에 기공을 형성하여 사멸시키는 기전을 가진다. 이는 항생제 내성 문제를 유발하지 않으면서도 특정 병원균(Listeria, Clostridium 등)을 효과적으로 제어할 수 있는 대안으로 각광받고 있다(Jaumaux et al., 2020).
- 면역 프라이밍 (Immune Priming): 사균체의 세포벽 성분인 펩티도글리칸(Peptidoglycan)과 리포테이코산(Lipoteichoic acid)은 숙주의 장내 면역 세포 표면의 톨유사수용체(TLR)와 결합하여 선천 면역을 "준비 상태(Priming)"로 만든다. 이는 바이러스나 세균 감염 시 더욱 신속하고 강력한 방어 반응을 유도하여 질병 확산을 막는다(Taverniti & Guglielmetti, 2011).

3.3.2. 수의학 분야에서의 기술 개발 동향

- 반려동물의 가족화(Pet Humanization) 트렌드와 동물의 기대 수명 연장에 따라, 수의학 분야에서도 단순 영양 공급을 넘어 만성 난치성 질환의 보조 요법 및 삶의 질 개선을 위한 "Pet-Biotics" 기술 개발이 활발하다(Grześkowiak et al., 2015).
- 특히 멀티오믹스 분석을 통해 질환별 마이크로바이옴 불균형을 규명하고 이를 교정하는 맞춤형 소재 개발이 주류를 이루고 있다(Pilla & Suchodolski, 2020).

1) 피부 질환

- 반려견의 아토피성 피부염은 가장 흔하고 관리가 어려운 만성 질환 중 하나이다. 최근 연구에서는 장내 미생물 불균형이 전신 면역계의 불균형을 초래하고, 이것이 피부의 과민 반응(Th2 세포 우세 반응)을 유도함이 밝혀졌다.
- 특히, Lactobacillus rhamnosus, Bifidobacterium animalis 등의 포스트바이오틱스(사균체 및 세포벽 성분)는 면역 조절 T세포(Treg)를 활성화하고 염증성 사이토카인(IL-4, IL-13) 생성을 억제하여, 스테로이드 사용량을 줄이면서도 피부 소양감과 발적을 완화하는 보조 치료제로 개발되고 있다(Marsella et al., 2012).

2) 신장 질환 관리

- 노령묘(고양이)의 주요 사망 원인인 만성 신장 질환(CKD) 관리에서 마이크로바이옴의 역할이 중요해지고 있다. 신장 기능 저하로 배출되지 못한 요독소(Uremic toxins)가 체내에 축적되면 병증이 악화되는 악순환이 발생한다.
- 이는 장내에서 인돌(Indole)이나 p-크레졸(p-cresol) 같은 요독소 전구체를 생성하는 유해균을



억제하고, 요독소를 흡착하거나 대사적으로 분해할 수 있는 특수 포스트바이오틱스 제제가 개발되고 있다. 이는 혈중 BUN 및 Creatinine 수치 안정화와 생존 기간 연장에 기여한다 (Hall et al., 2019).

3) 정신 건강 및 행동학적 문제

- 최근 1인 가구 증가 등으로 인한 반려동물의 분리 불안, 공격성, 그리고 노령견의 인지 기능 저하(치매) 문제가 대두되면서 "사이코바이오틱스(Psychobiotics)" 개념이 수의학에도 도입되었다.
- GABA(Gamma-aminobutyric acid)를 고농도로 생산하는 유산균 대사산물이나, 뇌 신경 전달 물질(세로토닌, 도파민) 조절에 관여하는 균주 유래 물질을 활용하여 스트레스 호르몬(Cortisol) 수치를 낮추고 정서적 안정을 유도하는 기능성 펩푸드 및 영양제가 출시되고 있다(Mondo et al., 2020).

4) 구강 마이크로바이옴 제어

- 반려동물의 치주 질환은 심장, 신장 등 전신 질환의 원인이 되지만, 매일 양치질을 하거나 마취 후 스케일링을 하는 것에 대한 보호자의 부담이 크다(Niemiec et al., 2020).
- 구강 내 유해균(Porphyrromonas 등)을 억제하고 유익균을 정착시키는 구강 유산균(Weissella cibaria 등) 유래 포스트바이오틱스가 덴탈 껌이나 워터 첨가제 형태로 개발되고 있다. 이는 구취 제거뿐만 아니라 치태 형성 억제에 도움을 주어 노령 동물의 구강 관리에 새로운 대안을 제시한다 (Kim et al., 2020).

3.4. 동물복지를 위한 새로운 기능성평가 생체대체모델 발굴

- 전통적으로 기능성 식품, 사료 첨가제, 신약 후보 물질의 효능 및 안전성 평가에는 마우스(Mouse), 랫드(Rat)와 같은 포유류 모델이 표준(Gold standard)으로 사용되어 왔다 (Van Norman, 2019).
- 그러나 동물 실험에 대한 윤리적 문제 제기와 함께 유럽연합(EU)의 화장품 동물실험 금지, 미국의 FDA 현대화법 2.0(FDA Modernization Act 2.0) 통과 등 전 세계적으로 규제가 강화되고 있다 (Wadman, 2023).
- 이에 따라 3R 원칙(Replacement, Reduction, Refinement)을 준수하면서도, 인체 또는 타겟 동물의 생리적 환경을 더욱 정밀하게 모사할 수 있는 혁신적인 생체 대체 모델(Alternative Models)의 개발이 시급한 과제로 대두되었다 (Marx et al., 2020).



3.4.1. 세포 기간 및 체외 시스템 (In vitro / Ex vivo)

모델명	핵심 특징	주요 활용 분야
장 오가노이드	장 줄기세포를 이용한 3차원 미니장기로 용모와 Crypt 구조, 흡수/점액/내분비/파네스 세포 등 장 상피세포 구성을 완벽히 재현	질병 기전 연구 및 사료 첨가제의 장 발달 촉진 효과 평가 등
장칩 (Gut-on-a-chip)	진공 챔버를 이용해 장의 연동 운동 및 전단 응력 재현	장 장벽 기능, 경쟁적 배제 시각화, 장-간축 등 전신 면역 영향 모니터링
인공 위장관 발효 시스템	컴퓨터 제어로 동물의 소화기관 환경을 정밀 모사 (ex. SHIME, RUSTITEC)	장내 미생물 군집 변화 및 대사산물 생성 분석, 후보 물질의 초기 스크리닝
고도화된 세포 모델	Caco-2, IPEC-J2 등 단일 세포종의 한계를 극복하기 위한 공배양 기술 발전	고속 스크리닝(HTS)

3.4.2. 비포유류 대체 생물 모델

- 비포유류 모델(Non-mammalian models)은 척추동물 실험에 대한 윤리적 부담을 줄이면서도, 대량 샘플 처리가 가능하여 초기 효능 스크리닝 단계에서 유용

모델명	주요 특징 및 장점	핵심 활용 분야	참고 문헌
예쁜꼬마선충 (<i>C. elegans</i>)	짧은 수명 (3일 세대 주기), 몸이 투명하며 기본적인 조직(소화기/신경계) 구성	항노화/수명 연장, 비만 개선, 항균/면역 증강 효과 스크리닝	Aballay, A., et al. 2000
제브라피쉬 (Zebrafish)	인간과 70% 유전자 상동성의 소형 척추 동물	실시간 염증 반응 이미징	Howe et al., 2013; Rawls, J. F., et al. 2004; Brugman, 2016; Murdoch & Rawls, 2019
꿀벌부채명나방 유충	37°C 생존 가능, 포유류 유사 선천 면역 체계 (혈구 세포, 항균 펩타이드 등)	인체 및 가축 병원균의 병독성 평가, <i>In vivo</i> 항균 활성 및 LD50 측정	Cutuli et al., 2019; Jorjão et al., 2018
초파리	유전학 연구의 표준 모델, 단순한 장내 미생물 군집	대사 증후군 개선	Trinder et al., 2017; Westfall et al., 2019
누에	큰 몸집, 체액 채취 용이, 경구/주사 투여 용이	혈당 강하 효과, 장내 생존율 및 전신 면역 활성 비교 분석	Kaito et al., 2002
닭 배아 장요막 (CAM)	척추동물이나 규제에서 비교적 자유로우며, 포유류와 유사한 혈관 시스템	혈관 신생 억제/촉진, 항염증 효능 평가	Aleksandrowicz & Lis, 2020; Ribatti, 2016



4 향후 멀티오믹스 기반 프리/포스트바이오틱스 개발 전망

4.1. 축산분야 프리/포스트바이오틱스 연구개발 전망

- 축산 분야에서 멀티오믹스 기반 바이오틱스는 단순히 생산성을 높이는 것을 넘어, 지속 가능한 농업과 공중 보건을 통합하는 One-Health 솔루션으로 진화하고 있다.

4.1.1. 항생제 대체 전략의 고도화와 포스트바이오틱스의 역할 강화

- 항생제 내성균(AMR) 문제는 공중 보건의 심각한 위협으로, 축산 분야의 항생제 감축 및 금지 정책은 고기능성 대체재 개발을 촉진하는 핵심 요인이다.

1) 포스트바이오틱스의 정밀 기능성 규명

- 멀티오믹스(특히 대사체학과 단백질체학)는 단순히 미생물의 생존 여부가 아닌, 해당 미생물 또는 그 사균체 생성하는 핵심 유효 성분(Bioactive Metabolites)을 정량적, 질적으로 규명한다 (Liang et al., 2023).

2) 사균체(Inactivated Microbes) 기반 제품의 안정성 및 최적화

- 사균체 기반 포스트바이오틱스는 살아있는 균에 비해 열, 압력, 보존 기간 등 사료 가공 환경에 대한 안정성이 매우 높다.
- 멀티오믹스는 사균체 제조 과정(예: 열처리, 동결건조) 중에도 면역 활성화에 중요한 세포벽 성분이나 핵심 대사물질의 구조적 온전성이 유지되는지 검증하고, 이를 최적화하는 공정 개발에 기여한다 (Kumar et al., 2024).
- 이로 인해 고효율성, 고안정성을 갖춘 차세대 사료 첨가제 개발이 가속화될 수 있다.



4.1.2. 축종 및 생육 단계별 정밀 영양 (Precision Nutrition)의 실현

- 축산 정밀 영양은 개별 가축 또는 특정 그룹의 생리적 상태를 반영하여 영양 공급을 최적화하는 것으로, 멀티오믹스가 그 기반 기술이 된다.

1) 마이크로바이옴 데이터의 심층 활용

- 메타유전체학과 메타전사체학을 통한 장내 미생물 군집(Microbiome) 분석은 단순히 어떤 균이 있는지(구성)를 넘어, 그들이 무엇을 하는지(기능성)까지 파악한다 (Gou et al., 2024).
- 특히 가축의 이유기 스트레스나 사육 환경 변화는 장내 불균형(Dysbiosis)을 초래하며 이는 생산성 저하와 질병 감수성을 높인다.
- 멀티오믹스는 이때 급격히 변화하는 미생물의 유전자 발현 패턴과 대사 산물을 포착하여, 불균형을 가장 효율적으로 복구할 수 있는 바이오틱스 조합을 맞춤 설계한다.

2) 가상 시뮬레이션 및 AI 활용

- 인공지능(AI) 및 머신러닝은 축종별로 수집된 방대한 멀티오믹스 데이터를 분석하여, 특정 바이오틱스 제제가 특정 사료 조성 및 환경 조건 하에서 미생물 균형에 미치는 영향을 예측하는 모델을 구축한다.
- AI 예측 모델은 특정 바이오틱스 제품을 투여했을 때 해당 가축 그룹이 긍정적으로 반응할지 또는 무반응을 보일지를 사전에 예측하여, 가장 효율적인 정밀 사료 솔루션을 도출하고 사료의 비용 효율성을 극대화한다.
- 궁극적으로, 멀티오믹스 데이터와 AI 모델을 결합하여 가축의 장 환경을 복제한 가상 모델(Digital Twin)을 구축하여, 최적의 제품 구성 및 투여 전략을 시뮬레이션하여 최적화할 수 있다.



5 출처

- Aballay, A., & Ausubel, F. M. (2002). *Caenorhabditis elegans* as a host for the study of host–pathogen interactions. *Current opinion in microbiology*, 5(1), 97–101.
- Aballay, A., & Ausubel, F. M. (2002). **Caenorhabditis elegans as a host for the study of host–pathogen interactions**. *Current opinion in microbiology*, 5(1), 97–101.
- Aguilar-Toalá, J. E. et al. (2018). **Postbiotics: An evolving term within the functional foods field**. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105–114.
- Bein, A., Shin, W., Jalili-Firoozinezhad, S., Park, M. H., Sontheimer-Phelps, A., Tovaglieri, A., ... & Ingber, D. E. (2018). **Microfluidic organ-on-a-chip models of human intestine**. *Cellular and molecular gastroenterology and hepatology*, 5(4), 659–668.
- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C. C., Charles, T., ... & Schloter, M. (2020). **Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges**. *Microbiome*, 8(1), 103.
- Bindels LB, et al. (2015). **Towards a more comprehensive concept for prebiotics**. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 12(5):303–310.
- Bindels LB, Neyrinck AM, Claus SP, Le Roy CI, Grangette C, Pot B, Martinez I, Walter J, Cani PD, Delzenne NM. (2016). **Synbiotic approach restores intestinal homeostasis and prolongs survival in leukaemic mice with cachexia**. *ISME J*. 10(6):1456–70.
- Borrelli, L. et al. (2016). **Probiotic modulation of the microbiota–gut–brain axis and behaviour in zebrafish**. *Scientific Reports*, 6, 30046.
- Brenner, S. (1974). **The genetics of *Caenorhabditis elegans***. *Genetics*, 77(1), 71–94.
- Brugman, S. (2016). **The zebrafish as a model to study intestinal inflammation**. *Developmental & Comparative Immunology*, 64, 82–92.
- Caggianiello G, Kleerebezem M, Limsowtin GY, Arnaoudova E, Hugenholtz J. (2016). **Exopolysaccharides from *Lactobacillus plantarum* improve muscle mass and energy metabolism in sarcopenic mice**. *Front Microbiol*. 7:1311.
- Cani PD, et al. (2009). **Gut microbiota fermentation of prebiotics increases satietogenic and incretin gut peptide production with consequences for appetite sensation and glucose response after a meal**. *Am J Clin Nutr*. 90(5):1236–1243.
- Chen Y, Xie Y, Yu X. (2025). **Progress of research on the gut microbiome and its metabolite short-chain fatty acids in postmenopausal osteoporosis: a literature review**. *Front Med*. 19:474–492.
- Chen, L., et al. (2023). **Multi-omic approach to decipher the impact of skincare products with pre/postbiotics on skin microbiome and metabolome**. *Frontiers in Medicine*, 10, 1165980.
- Chen, Z., et al. (2023). **Multi-omics analyses of the gut microbiome, fecal metabolome, and multimodal**



brain MRI reveal the role of Alistipes and its related metabolites in major depressive disorder. *Psychological Medicine*, 53(12), 1–12.

- Cunningham, M., et al. (2021). **Shaping the future of probiotics and prebiotics**. *Trends in Microbiology*, 29(8), 667–685.
- Cutuli, M. A., Petronio Petronio, G., Vergalito, F., Magnifico, I., Pietrangelo, L., Venditti, N., & Di Marco, R. (2019). **Galleria mellonella as a consolidated in vivo model hosts for the study of the oral microbiome**. *Virulence*, 10(1), 527–541.
- Czerkawski, J. W., & Breckenridge, G. (1977). **Design and development of a long-term rumen simulation technique (Rusitec)**. *British journal of nutrition*, 38(3), 371–384.
- Deryugina, E. I., & Quigley, J. P. (2008). **Chapter 2. Chick embryo chorioallantoic membrane models to quantify angiogenesis induced by inflammatory and tumor cells or purified effector molecules**. *Methods in enzymology*, 444, 21–41.
- Dimitris Charalampopoulos and Robert A Rastall. (2012). **Prebiotics in foods**. *Current Opinion in Biotechnology*, 23, 187~191.
- Dutta, P. L., Nath, I., Purad, B. S., Mallikarjun, M., Ganesh, O., & Venkatareddy, L. R. (2025). **Silkworm (Bombyx mori) as a promising invertebrate model for drug discovery, pharmacokinetic evaluation, and preclinical screening: Current insights and future prospects**. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(9), 577–594.
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2015). **Scientific Opinion on the substantiation of a health claim related to "native chicory inulin" and maintenance of normal defecation by increasing stool frequency pursuant to Article 13(5) of Regulation (EC) No 1924/2006**. *EFSA J.* 13(1):4002.
- Elison E, et al. (2016). **Oral supplementation of healthy adults with 2'-O-fucosyllactose and lacto-N-neotetraose is well tolerated and shifts the intestinal microbiota**. *Br J Nutr.* 116(8):1356–1368.
- Fair, K. L., Colquhoun, J., & Hannan, N. R. (2018). **Intestinal organoids for modelling intestinal development and disease**. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1750), 20170217.
- Gadde, U., Kim, W. H., Oh, S. T., & Lillehoj, H. S. (2017). **Alternatives to antibiotics for maximizing growth performance and feed efficiency in poultry: a review**. *Animal health research reviews*, 18(1), 26–45.
- Gibson, G. R. et al. (2017). **Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics**. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 14(8), 491–502.
- Global Market Insights. (2023). **Postbiotic Supplements Market Size & Share Analysis Report, 2024–2032**. Global Market Insights Inc.
- Gou, W., et al. (2024). **Multi-Omics Analysis Reveals the Regulatory Mechanism of Different Probiotics on Growth Performance and Intestinal Health of Salmo trutta**. *Microorganisms*, 12(7), 1410.
- Grześkowiak, Ł., Endo, A., Beasley, S., & Salminen, S. (2015). **Microbiota and probiotics in canine and feline**



welfare. *Anaerobe*, 34, 14–23.

- H. Chen, P. Wu, Z. Li, Y. Liu, S. Yeh, B. Duan, K. Cheng, C. Hsu, Y. Chiu, W. Lee, S. Fan, & P. Wang (2025). **Gut microbiome and host TOR pathway interact to regulate predator-induced aversive memory in *Drosophila melanogaster***. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 122 (25) e2422928122.
- Hall, J. A., Jackson, M. I., Jewell, D. E., & Ephraim, E. (2020). **Chronic kidney disease in cats alters response of the plasma metabolome and fecal microbiome to dietary fiber**. *PLoS One*, 15(7), e0235480.
- Harthoorn LF, et al. (2025). **Galacto-oligosaccharides exert bifidogenic effects at capsule-compatible ultra-low doses**. *Metabolites*. 15(8):530.
- Healey G, et al. (2018). **Habitual dietary fibre intake influences gut microbiota response to an inulin-type fructan prebiotic: A randomised, double-blind, placebo-controlled, cross-over, human intervention study**. *Br J Nutr.* 119(2):176–189.
- Hernández-González JC, et al. (2021). **Bacteriocins from lactic acid bacteria: A powerful alternative as antimicrobials, probiotics, and immunomodulators in veterinary medicine**. *Animals*. 11(4):979.
- Hilgendorf, C., Spahn-Langguth, H., Regårdh, C. G., Lipka, E., Amidon, G. L., & Langguth, P. (2000). **Caco-2 versus caco-2/HT29-MTX co-cultured cell lines: permeabilities via diffusion, inside and outside-directed carrier-mediated transport**. *Journal of pharmaceutical sciences*, 89(1), 63–75.
- Hong, Sung Wook. (2020). **Postbiotics: Next-generation of lactic acid bacteria**. *축산식품과학과 산업*, 9(1): 11–19.
- Howe, K., Clark, M. D., Torroja, C. F., Torrance, J., Berthelot, C., Muffato, M., ... & Teucke, M. (2013). **The zebrafish reference genome sequence and its relationship to the human genome**. *Nature*, 496(7446), 498–503.
- Hwang HW, Lee DW. (2019). **Prebiotics: An overview of current researches and industrial applications**. *Food Science and Industry*. 52(3):241–260.
- Inchingolo F, et al. (2019). **Probiotics and EpiCor® in human health**. *J Biol Regul Homeost Agents*. 33(6):1973–1979.
- Integrative HMP (iHMP) Research Network Consortium. (2019). **The Integrative Human Microbiome Project**. *Nature*, 569(7758), 641–648.
- Jaumaux, F., P. Gómez de Cadiñanos, L., & Gabant, P. (2020). **In the age of synthetic biology, will antimicrobial peptides be the next generation of antibiotics?** *Antibiotics*, 9(8), 484.
- Jeong K, et al. (2020). **A randomized trial of *Lactobacillus rhamnosus* IDCC 3201 tyndallizate (RHT3201) for treating atopic dermatitis**. *Pediatr Allergy Immunol*. 31(7):783–792.
- Jorjão, A. L., Oliveira, L. D., Scorzoni, L., Figueiredo-Godoi, L. M. A., Prata, M. C. A., Jorge, A. O. C., & Junqueira, J. C. (2018). **From moths to caterpillars: Ideal conditions for *Galleria mellonella* rearing for in vivo microbiological studies**. *Virulence*, 9(1), 383–389.
- Kaito, C., Akimitsu, N., Watanabe, H., & Sekimizu, K. (2002). **Silkworm larvae as an animal model to evaluate the pathogenic potential of bacteria**. *Microbial Pathogenesis*, 32(4), 183–190.



- Kim M, et al. (2023). **A randomized, double-blind, placebo-controlled trial to evaluate the cholesterol-lowering effect of BBR 4401 in adults with moderate hypercholesterolemia.** *Fermentation*, 9(8):766.
- Kim MG, Lee DG, Kim TY. (2020). **Development of heat-killed Bifidobacterium breve IDCC 4401 with the potential to improve hypercholesterolemia in rats.** *Microbiol Soc Korea*, 56(3):307-314.
- Kim, H. J., & Ingber, D. E. (2013). **Gut-on-a-Chip microenvironment induces human intestinal cells to undergo villus differentiation.** *Integrative Biology*, 5(9), 1130-1140.
- Kim, J. W., Jung, B. H., Lee, J. H., Yoo, K. Y., Lee, H., Kang, M. S., & Lee, J. K. (2020). **Effect of Weissella cibaria on the reduction of periodontal tissue destruction in mice.** *Journal of periodontology*, 91(10), 1367-1374.
- Kim, K. J., et al. (2025). **맞춤형 건강기능식품의 국내외 현황 (Current Status of Personalized Dietary Supplement).** 한국식품영양과학회지.
- ☉ Kim, M., et al. (2025). **Postbiotic Intervention in Sarcopenia: The Role of Lactiplantibacillus plantarum HY7715 and Its Extracellular Vesicles.**
- Kobozev, I., Webb, C. R., Furr, K. L., & Grisham, M. B. (2014). **Role of the enteric microbiota in intestinal homeostasis and inflammation.** *Free Radical Biology and Medicine*, 68, 122-133.
- Koh, A., et al. (2016). **From Dietary Fiber to Host Physiology: Short-Chain Fatty Acids as Key Bacterial Metabolites.** *Cell*, 165(6), 1332-1345.
- Kumar, A., Green, K. M., & Rawat, M. (2024). **A Comprehensive Overview of Postbiotics with a Special Focus on Discovery Techniques and Clinical Applications.** *Foods*, 13(18), 2937.
- Kwoji, I.D., et al. (2023). **"Multi-omics" data integration: applications in probiotics studies.** *Beneficial Microbes*, 13(4), 289-305.
- Lee HW, et al. (2024). **Efficacy of ETB-F01, heat-killed Akkermansia muciniphila strain EB-AMDK19, in patients with respiratory symptoms: A multicenter clinical trial.** *Nutrients*, 16(23):4113.
- Li, L., Fu, F., Guo, S., Wang, H., He, X., Xue, M., ... & Liu, P. (2019). **Porcine intestinal enteroids: a new model for studying enteric coronavirus porcine epidemic diarrhea virus infection and the host innate response.** *Journal of virology*, 93(5), 10-1128.
- Li, Y., et al. (2025). **The microbiota-gut-brain axis in depression: unraveling the relationships and therapeutic opportunities.** *Frontiers in Immunology*, 16, 1644160.
- Liang, B., & Xing, D. (2023). **The Current and Future Perspectives of Postbiotics.** *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(3), 543-559.
- Lucas, S., Omata, Y., Hofmann, J. et al. (2018). **Short-chain fatty acids regulate systemic bone mass and protect from pathological bone loss.** *Nat Commun* 9, 55.
- Manor, O., et al. (2020). **Health and disease markers correlate with gut microbiome composition across thousands of people.** *Nature Communications*, 11, 5206.
- Markowiak, P., & Śliżewska, K. (2017). **Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health.** *Nutrients*, 9(9), 1021.



- Markowiak, P., & Ślizewska, K. (2018). **The role of probiotics, prebiotics and synbiotics in animal nutrition.** Gut pathogens, 10(1), 21.
- Marsella, R. (2009). **Evaluation of Lactobacillus rhamnosus strain GG for the prevention of atopic dermatitis in dogs.** American journal of veterinary research, 70(6), 735–740.
- Marx, U., Akabane, T., Andersson, T. B., Baker, E., Beilmann, M., Beken, S., ... & Roth, A. (2020). **Biology-inspired microphysiological systems to advance patient benefit and animal welfare in drug development.** Altex, 37(3), 365.
- Menard O, Gagnon M, Lavoie MC, Lavoie D, Chabot D, Behm C, Lapointe J. (2005). **Bifidobacterium breve M-16V cell lysate modulates osteoclast and osteoblast activities, improving bone metabolism in aging mice.** J Immunol. 175(3):1439–1447.
- Molis, C. et al. (1996). **Digestion, excretion, and energy value of fructooligosaccharides in healthy humans.** The American journal of clinical nutrition, 64(3), 324–328.
- Mondo, E., Barone, M., Soverini, M., D'amico, F., Cocchi, M., Petrulli, C., ... & Accorsi, P. A. (2020). **Gut microbiome structure and adrenocortical activity in dogs with aggressive and phobic behavioral disorders.** Heliyon, 6(1).
- Montazeri S, Eftekhari S, Pourghazi M. (2025). **Role of postbiotics in bone health: potential mechanisms and therapeutic perspectives.** Benef Microbes. doi:10.1007/s12602-025-10768-z.
- Morrison DJ, Preston T. (2016). **Formation of short chain fatty acids by the gut microbiota and their impact on human metabolism.** Gut Microbes. 7(3):189–200.
- Murdoch, C. C., & Rawls, J. F. (2019). **Commensal microbiota and the developing zebrafish immune system.** Current Opinion in Immunology, 60, 66–74.
- Niemiec, B., Gawor, J., Nemeček, A., Clarke, D., McLeod, K., Tutt, C., ... & Jouppi, R. (2020). **World small animal veterinary association global dental guidelines.** Journal of Small Animal Practice, 61(7), E36–E161.
- Park, J., et al. (2024). **Multi-omics-based investigation of Bifidobacterium's inhibitory effect on glioma: regulation of tumor and gut microbiota, and MEK/ERK cascade.** Frontiers in Microbiology, 15, 1344284.
- Patricio-Martínez A, Patricio F, Macuil-Chapuli E, Martínez-Juárez EÁ, Flores-Díaz S, Cedillo-Ramírez ML, Limón ID. (2025). **The role of probiotics, prebiotics, and postbiotics: cellular and molecular pathways activated on glial cells in Alzheimer's disease.** Front Neurosci. 19:1598011.
- Pilla, R., & Suchodolski, J. S. (2020). **The role of the canine gut microbiome and metabolome in health and gastrointestinal disease.** Frontiers in veterinary science, 6, 502799.
- Plovier H, et al. (2017). **A purified membrane protein from Akkermansia muciniphila or the pasteurized bacterium improves metabolism in obese and diabetic mice.** Nat Med. 23(1):107–113.
- Poupet, C., Chassagne, P., Coton, E., Desmases, N., Hornez, J. P., & Ribière, C. (2019). **Lactobacillus rhamnosus Lcr35 as an effective treatment for preventing Candida albicans infection in the invertebrate model Galleria mellonella.** Frontiers in Microbiology, 10, 645.
- Pourabedin, M., & Zhao, X. (2015). **Prebiotics and gut microbiota in chickens.** FEMS microbiology letters,



362(15), fnv122.

- Rawls, J. F., Samuel, B. S., & Gordon, J. I. (2004). **Gnotobiotic zebrafish reveal evolutionarily conserved responses to the gut microbiota**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(13), 4596–4601.
- Renwick, S., et al. (2025). **Development of the Breastfed Infant Oral Microbiome Is Associated with Concentrations and Intakes of Human Milk Oligosaccharides**. *ResearchGate*, Article 397805818.
- Ribatti, D. (2016). **The chick embryo chorioallantoic membrane (CAM) assay**. *Annals of Translational Medicine*, 4(20), 463.
- Roberfroid, M. et al. (2010). **Prebiotic effects: Metabolic and health benefits**. *British Journal of Nutrition*, 104(S2), S1–S63.
- Robinson, T. P., Bu, D. P., Carrique-Mas, J., Fèvre, E. M., Gilbert, M., Grace, D., ... & Woolhouse, M. E. (2016). **Antibiotic resistance is the quintessential One Health issue**. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 110(7), 377–380.
- Salles J, Gueugneau M, Patrac V, Malnero-Fernandez C, Guillet C, Le Bacquer O, Giraudet C, Sanchez P, Collin ML, Hermet J, Pouyet C, Boirie Y, Jacobs H, Walrand S. (2023). **Associating Inulin with a Pea Protein Improves Fast-Twitch Skeletal Muscle Mass and Muscle Mitochondrial Activities in Old Rats**. *Nutrients*. 15(17):3766.
- Salminen S, et al. (2021). **The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics**. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 18(9): 649–667.
- Sato, T., Vries, R. G., Snippert, H. J., Van De Wetering, M., Barker, N., Stange, D. E., ... & Clevers, H. (2009). **Single Lgr5 stem cells build crypt-villus structures in vitro without a mesenchymal niche**. *Nature*, 459(7244), 262–265.
- Scholz-Ahrens KE, et al. (2007). **Prebiotics, probiotics, and synbiotics affect mineral absorption, bone mineral content, and bone structure**. *J Nutr*. 137(3):838S–846S.
- Seifert S, Watzl B, Mensink GB, Socha J, Wierzbicka R, Roehrig B, Fouillet H, Huneau JF, Schuld N, ArendtEK. (2019). **Consumption of isomalto-oligosaccharides leads to higher bone mineral density and improved gut microbiota diversity in postmenopausal women: a randomized controlled trial**. *Clin Nutr*. 38(4):1870–1876.
- Shokryazdan P, et al. (2017). **Effects of prebiotics on immune system and cytokine expression**. *Med Microbiol Immunol*. 206(1):1–9.
- Sivan, A., et al. (2015). **Commensal Bifidobacterium promotes antitumor immunity and facilitates anti-PD-L1 efficacy**. *Science*, 350(6264), 1084–1089.
- Tan, F. H. P., Shamsuddin, S., & Zainuddin, A. (2023). **Ageing and the gut-brain axis: lessons from the Drosophila model**. *Beneficial microbes*, 14(6), 591–607.
- Taran, M. A., et al. (2024). **The use of omics technologies in creating LBP and postbiotics based on the Limosilactobacillus fermentum U-21**. *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 31(8), 263.



- Taverniti, V., & Guglielmetti, S. (2011). **The immunomodulatory properties of probiotic microorganisms beyond their viability (ghost probiotics: proposal of paraprobiotic concept)**. *Genes & nutrition*, 6(3), 261–274.
- Tominaga, K., et al. (2021). **Increase in muscle mass associated with the prebiotic effects of 1–kestose in super-aged mice**. *Microorganisms*, 9(2), 356.
- Tsuji R, et al. (2018). **Long-term administration of pDC stimulative lactic acid bacteria, *Lactococcus lactis* strain Plasma, prevents immune-senescence and decelerates individual senescence**. *Exp Gerontol*. 111:10–16.
- Turnbaugh, P. J., & Gordon, J. I. (2009). **The core gut microbiome, energy balance and obesity**. *Nature*, 457(7228), 480–484.
- Van de Wiele, T., Van den Abbeele, P., Ossieur, W., Possemiers, S., & Marzorati, M. (2015). **The simulator of the human intestinal microbial ecosystem (SHIME®)**. *The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models*, 305–317.
- Van Norman, G. A. (2019). **Limitations of animal studies for predicting toxicity in clinical trials: is it time to rethink our current approach?**. *JACC: Basic to Translational Science*, 4(7), 845–854.
- Verhoeckx, K., Cotter, P., López-Expósito, I., Kleiveland, C., Lea, T., Mackie, A., ... & Wichers, H. (2015). **The impact of food bioactives on health: in vitro and ex vivo models**.
- Vogt LM, Meyer D, Pullens G, Faas M, Smidt H, Venema K, Roberfroid M. (2015). **Galacto-oligosaccharides and xylo-oligosaccharides increase calcium absorption in healthy men and women**. *Nutrients*. 7(8): 5232–5243.
- Wadman, M. (2023). **FDA no longer needs to require animal tests before human drug trials**. *Science*, 379(6628), 127–128.
- Wang Z, Li X, Xu Y, Wang Z, Liu R, Zhu Y, Wang X. (2021). **Bacteriocin from *Lactobacillus fermentum* promotes osteogenic differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells and bone regeneration in rats**. *Biochem Biophys Res Commun*. 561:62–68.
- Wang, T., et al. (2025). **Postbiotic *Parabacteroides distasonis* Supplementation Enhances Intestinal and Skeletal Muscle Function in Aged Mice**. *Aging and Disease*, 16(5), 1225–1235.
- Weaver CM, Martin BR, Story JA, Hutchinson I, Sanders L, Wastney ME. (2015). **Galactooligosaccharides improve calcium absorption and bone retention in postmenopausal women**. *Nutrients*. 7(8):5232–5243.
- Wegh CAM, et al. (2019). **Postbiotics and their potential applications in early life nutrition and beyond**. *Int J Mol Sci*. 20(19):4673.
- Yu, T., Bai, R., Wang, Z. et al. (2024). **Colon-targeted engineered postbiotics nanoparticles alleviate osteoporosis through the gut–bone axis**. *Nat Commun* 15, 10893.
- Yu, W., et al. (2025). **Multi-omics revealed that the postbiotic of hawthorn–probiotic alleviated constipation caused by loperamide in elderly mice**. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1498004.
- Zaiss MM, Jones RM, Schett G, Pacifici R. (2019). **The gut–bone axis: how bacterial metabolites bridge**



the distance. J Clin Invest. 129(8):3018–3028.

- Zhang, G., et al. (2024). **Multi-omics insights into anti-colitis benefits of the synbiotic and postbiotic derived from wheat bran arabinoxylan and Limosilactobacillus reuteri.** International Journal of Biological Macromolecules, 268, 131758.
- Zhang, Y., et al. (2025). **Integrative Multi-Omics Analysis of Gut Microbiome-Host Metabolome Crosstalk in Glucoraphanin-Supplemented Obesity Models.** ResearchGate Preprints.
- Żółkiewicz, J. et al. (2020). **Postbiotics—A Step Beyond Pre- and Probiotics.** Nutrients, 12(8), 2189.
- 바이오인. (2025). **멀티오믹스 기반 LMO 환경 위해성평가 연구 동향 및 시사점.** 한국식품영양과학회지.

발행일 2025년 12월
발행처 농림식품기술기획평가원
집필진 건국대학교 서건호 교수
한양대학교 김현숙 교수
매일헬스뉴트리션(주) 김혜진 부문장
편집인 농림식품기술기획평가원
문의처 건국대학교 수의공중보건학 실험실
(02-450-4121)

이 보고서에 실린 내용은 필자 개인의 견해이며, 농림식품기술기획평가원의 공식 견해와 일치하는 것은 아닙니다.

본 발간물에 대한 소유권은 집필진과 발간기관에 있으며, 무단으로 전재·복제하거나 상업적인 목적으로 사용하는 것을 금합니다.

2025년 식품R&D동향보고서(포스트바이오틱스 분야)

포스트바이오틱스 시장 동향과 멀티오믹스 기반 기능성 평가 기술 개발 전략

