Good Food Institute

주요 시사점 및 기회

식물성 고기와 기존 육류에 대한 비교 전과정평가(LCA)

주요저자

니키타 만수카니 코가르 박사(Ph.D.)
Senior Lead Plant-based Scientist*

프리에라 파네스쿠 스콧 박사(Ph.D.)
Lead Plant-based Scientist

어맨다 베스 박사(Ph.D.)
Science and Technology Analysis Manager

*교신 저자: nikhitak@gfi.org

그래픽 디자인: 에밀리 헨니건, 조지프 가지

보충 자료: 본 백서는 ISO 인증을 받은 "식물성 고기와 기존 육류에 대한 비교 전과정평가(LCA)(이하 'LCA 보고서')" (보날레스 외, 2024)의 주요 결과와 기회를 요약한 문서이다. 해당 LCA 보고서에서는 자세한 평가 과정 및 전과정 목록(life cycle inventory)을 확인할 수 있으며 데이터 다운로드가 가능한 상호작용형 데이터 대시보드가 제시되어 있다.

관련 자료는 gfi.org.에서 확인할 수 있다.

DOI: doi.org/10.62468/yieg1161
표지 사진 제공: 비욘드 미트

굿 푸드 인스티튜트(GFI) 소개

굿 푸드 인스티튜트(Good Food Institute, GFI)는 지구, 사람, 동물을 위한 더 나은 국제 식량 체계를 만들고자 노력하는 비영리 싱크 탱크입니다. GFI는 과학자, 기업가, 정책결정자들과 협력하여 많은 사람이 식물성 고기와 배양육을 더욱 맛있고 합리적인 가격으로 이용할 수 있도록 만드는 데 중점을 두고 있습니다. GFI는 기부금으로 운영되는 국제 네트워크 조직으로, 대체 단백질을 전 세계 기후변화 대응·국제보건·식량안보·생물 다양성 목표를 달성하는 데 필요한 핵심 해결책으로 제시하여, 대체 단백질 분야의 발전에 기여합니다. GFI에서 발표한 모든 인사이트와 데이터는 누구나 접근할 수 있으며, 관련 자료 수집 및 연구는 전 세계 기부자 커뮤니티의 기부와 후원금으로 수행되었습니다. GFI 후원에 관한 자세한 내용을 알아보시려면 여기를 클릭하시거나, philanthropy@gfi.org로 연락해 주시기 바랍니다.

목차

핵심 요약 **4**

서론 **7**

LCA 접근 방식 및 범위 **9**

주요 결과 **16**

기존 육류와 식물성 고기의 환경영향 비교 16

각기 다른 투입물 및 생산 방식을 이용한 식물성 고기 생산의 환경영향 비교 18

결론 **41**

감사의 글 **42**

참고 문헌 **43**

핵심 요약

본 보고서는 굿 푸드 인스티튜트(GFI)와 어스시프트 글로벌(Earthshift Global)이 수행한 ISO 인증을 받은 「식물성 고기와 기존 육류에 대한 비교 전과정평가(LCA)」 (보날레스 외, 2024) 연구에서 주요 시사점과 기회를 발췌하여 제시한다. 해당 연구는 지금까지 식물성 고기의 환경영향을 연구한 보고서 중 가장 포괄적인 오픈액세스 분석이다.

식품 생산, 특히 육류 생산 시 발생하는 환경영향을 줄이는 것은 세계 식량 안보를 확보하고 기후변화, 환경오염, 자원고갈 등의 문제를 해결하는 데 있어 중요하다. 식물로 만든 고기 또는 동물 세포를 배양하거나 발효 방식으로 생산된 고기 등 대체 단백질을 섭취하면, 실제 고기를 먹는 것과 같은 경험을 하면서도 보다 지속가능한 방식으로 단백질원을 획득할 수 있다. 식물성 고기 시장이 꾸준히 성장하고 시장 접근성이 높아짐에 따라 식물성 고기는 새롭게 거듭난 단백질 공급 산업의 핵심으로 자리잡게 되었다.

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 국제 인증을 받은 평가 방식으로, 제품의 생애 주기 동안 관련된 모든 투입물과 산출물이 환경에 미치는 영향을 정량화하기 위해 수행된다. 정책결정자, 투자자, 기업, 소비자는 지속가능한 농업 관행과 안정적인 식량 공급에 관한 사안을 결정할 때, LCA 데이터를 참고한다.

GFI는 현재 식량 체계의 환경영향을 줄이는 데 있어 식물성 고기의 잠재력을 평가하기 위해 아래의 두 가지를 주요 목표로 삼고 ISO 인증을 받은 LCA를 수행하였다.

- 식물성 고기 생산과 기존 고기 생산의 환경영향 비교
- 각기 다른 원재료 및 생산 방식으로 만든 식물성 고기를 대상으로 환경영향 평가 실시

LCA 범위

본 보고서에서는 ISO 인증을 받은 LCA 보고서의 주요 시사점을 요약하였다. LCA 보고서에서는 세 가지 종류의 식물성 고기와 기존 육류(닭고기, 돼지고기, 소고기)를 분쇄한 제품 1kg을 기준으로 삼고, 각 제품의 원재료를 취득하는 단계부터 제조 단계에 이르는 생산 과정 동안 유발되는 환경영향을 18가지 범주로 나누어 평가 및 비교하였다.

여기서 활용한 데이터는 식물성 고기 제조업체, 재료 및 장비 제공업체, 과학 논문을 비롯하여 상업적으로 이용 가능한 데이터 세트인 Ecoinvent 3.9.1과 World Food LCA 데이터베이스에서 수집했다. 이와 더불어 식물성 고기 시스템에 대한 민감도 분석을 실시하여 할당 방법론(질량 할당 vs 경제적 할당)과 압출 작물을 재배하는 지역, 에너지 종류 및 효율성이 환경발자국에 어떤 영향을 미치는지 이해하고자 하였다.

주요 시사점

1. 식물성 고기를 먹으면 기존 고기와 같은 양의 고기를 섭취하면서도 환경부담은 줄일 수 있다.

연구에 따르면, 평균적으로 식물성 고기는 기존 고기에 비해 영향 범주 전반에서 환경에 미치는 영향이 89% 적었다(아래 표 참고). 세 가지 제조법으로 생산된 식물성 고기가 평균적으로 환경에 미치는 영향은은 소고기보다는 91% 적었고, 돼지고기보다는 88%, 닭고기보다는 71% 적었다. 이러한 경향은 경제적 할당과 질량 할당 방식, 입력 데이터의 불확실성, 식물성 작물의 재배 지역을 고려하였을 때 모두 일관되게 나타났다.

기존 육류(소·돼지·닭고기) 대비 세 가지 식물성 고기의 평균 영향 감소율

식물성 고기의 환경영향 감소율	*비교 대상* 소고기	*비교 대상* 돼지고기	*비교 대상* 닭고기
지구 온난화 *kg CO_2 eq*	94%	88%	67%
미세먼지 형성 *kg PM2.5 eq*	91%	91%	83%
해양 부영양화 *kg N eq*	96%	90%	84%
토지 이용 *m^2a crop eq*	91%	60%	10%
화석 자원 고갈 *kg oil eq*	81%	86%	69%
물 소비량 *m^3*	93%	96%	94%
18개 영향 범주 평균	91%	88%	71%

2. 다양한 투입물과 생산 방식을 이용해 식물성 고기를 생산하면 상당한 환경편익을 얻을 수 있다.

본 보고서에서는 가장 많이 사용되는 투입물과 공정 방식을 비교해 보았으며, 실제 산업 현장에서 얻은 데이터를 바탕으로 식물성 고기의 환경영향을 특히 세부적으로 조명하고 있다.

평가 대상으로 삼은 식물성 고기 제조법은 총 세 가지이며, 세 제조법은 모두 재료로 코코넛 오일, 카놀라 오일, 감자 전분, 향신료, 밀 글루텐, 물을 사용한다. 단, 아래와 같이 단백질 압출물의 종류에 따라 제조법을 구분한다.

DL 완두:
건식 분리획득(dry factionated), 저수분 압출(low-moisture extruded) 방식으로 만든 완두 단백질

WH 완두:
습식 분리획득(wet fractionated), 고수분 압출(high-moisture extruded) 방식으로 만든 완두 단백질

WH 대두:
습식 분리획득(wet fractionated), 고수분 압출(high-moisture extruded) 방식으로 만든 대두 단백질

LCA 결과, 전반적으로 각 투입물과 공정 방식이 환경에 일정 부분 영향을 미치기는 하였으나, 다른 육류에 비해서는 식물성 고기의 생산 시스템이 환경에 미치는 영향이 적고, 천연자원 역시 최소로 사용한다는 사실이 밝혀졌다. 이와 더불어 작물 재배 지역, 재료 선택, 분리획득 전략, 압출 공정을 최적화할 경우, 식물성 고기의 환경편익을 극대화할 수 있다고 나타났다.

향후 방향

식물성 고기로 단백질 공급을 다양하게 확대하면 기존 육류 생산 시스템이 미치는 환경영향을 평균 79~99.8% 줄일 수 있다. 그러나 식물성 고기가 발휘할 수 있는 환경편익을 최대로 실현하기 위해서는, 현재 식물성 고기의 생산 규모보다 더 많은 식물성 고기를 세계 단백질 공급 시스템에 배포해야 한다.

기존 육류에 비해 식물성 고기의 생산 방식이 환경측면에서 이점이 매우 크다는 사실이 입증되었으므로, 이제 식물성 고기 산업은 지속가능성 편익을 유지하면서도 동시에 생산 규모를 확대하고, 고기를 더 맛있게 만들고, 비용을 개선하는 데 주력해야 한다. 본 보고서에서 요약한 ISO 인증 LCA에서는 공정한 기준치를 제시한다. 이는 정부·비정부조직·학계·민간 부문의 이해관계자들이 증가하는 세계 육류 수요를 충족하기 위해 가장 먼저 수립해야 하는 단백질 생산 전략을 결정하는 데 도움이 될 것이다.

서론

식품 생산은 환경에 지대한 영향을 미치는 산업 분야이다. 전 세계 식량 체계는 인간에 의해 발생하는 온실가스 배출량의 26%~34%를 차지하고 있다. 이뿐만 아니라 거주 목적으로 이용할 수 있는 토지의 45%를 이용하며, 전체 담수의 70%를 취수하고 있다.

그중 축산업에서만 세계 총 온실가스 배출량의 12~20%를 배출하고 총 농지의 80%를 이용하고 있으나, 정작 축산업이 차지하는 세계 칼로리 공급은 9%, 단백질 공급은 20% 밖에 되지 않는다. 게다가 축산업은 국제보건, 식량안보, 생물 다양성 등 세계가 직면한 가장 시급한 문제를 악화시키는 주범이기도 하다. 현재 전 세계적으로 육류 수요가 증가하는 추세이며 2050년에는 그 수요가 대폭 증가할 것이라는 예측에 따라, 보다 지속 가능한 육류 생산 방식을 모색하는 것이 필수 과제가 되었다.

대체 단백질(식물로 만든 고기, 동물 세포로 배양된 고기, 발효 방식으로 생산된 고기)을 섭취하면, 기존 고기를 먹는 경험을 하면서도 보다 지속가능한 단백질원을 얻을 수 있다. 그중 식물성 고기는 대체 단백질 분야의 선두에 있으며, 관련 시장 점유율이 증가하고 접근성 또한 높아지고 있다. 따라서 식물성 고기는 새롭게 거듭난 단백질 공급 시장에서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

그동안 수행된 많은 전과정평가(LCA)에서 식물성 고기 상품이 기존 육류에 비해 온실가스 배출, 토지 이용, 대기 오염을 46-99% 감소시킨다고 밝히면서 식물성 고기의 환경편익이 입증된 바 있다. 하지만 식물성 고기를 연구한 LCA 다수가 주요 공정 및 재료 측면에서 실제 상업 규모의 데이터를 공개하지 않거나, 해당 데이터를 충분히 확보하지 못해서 유사물 또는 가정에 의한 방식을 채택하고 있다. 게다가 그중 다수가 주요 영향 범주의 수를 작게 설정하여 영향 평가를 실시했다. 이에 따라 식물성 고기의 실제 생산과 시장에 출시된 상품을 기반으로 하는 포괄적인 오픈액세스 LCA가 필요하게 되었다.

이러한 이유로 GFI는 국제 표준화 기구(ISO)가 인증한 LCA 방식을 적용하여 식물성 고기와 기존 육류를 비교하는 연구를 수행하게 되었다. 해당 LCA 연구는 어스시프트 글로벌(EarthShift Global following)과 함께 수행했으며, ISO 14040/104044 표준에 따라 상대적인 주장과 대중 정보 공개 지침을 준수했다. 이와 더불어 세 명의 독립적인 LCA 전문가 패널이 보고서에 대한 정밀 검토를 수행했다.

식물성 고기에 관한 LCA의 연구 목표:

- 식물성 고기와 기존 육류 생산의 환경영향 비교
- 각기 다른 원재료 및 생산 방식을 이용하여 제조한 식물성 고기의 환경영향 비교

본 백서에는 해당 LCA 연구의 주요 결과, 교훈, 권고사항 등을 요약하여 담았다. ISO 인증 원본 LCA 보고서에는 상세 평가 과정, 전과정 목록(life cycle inventory), 다운로드 가능한 상호작용형 데이터 대시보드가 포함되어 있으며, 여기에서 확인할 수 있다.

전과정평가는 식품의 환경영향을 파악하는 데 필수적이다.

전과정평가(LCA)는 국제적으로 인증 받은 방법론으로 제품의 전 생애 주기 동안 관련된 투입물과 산출물 등 모든 요소가 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다. LCA는 정확하게 수행될 경우, 소비자와 기업에게 공정한 분석 자료가 되어 그들이 선택하는 재화나 서비스가 환경 발자국에 어떤 영향을 미치는지 이해할 수 있게 돕는다. 소비자와 투자자는 LCA 연구 결과를 이용해 제품을 객관적으로 비교해 볼 수 있으며, 자신의 구매력을 지속 가능한 선택을 하는 데 발휘할 수 있다. 기업의 경우, LCA 연구 결과를 참고하여 다음과 같은 부문을 개선하기 위한 환경적·재정적·운영적 의사 결정을 할 수 있다.

- 혁신 및 최적화
- 마케팅 및 커뮤니케이션
- 공급업체 관리
- 규제 준수
- 위험 관리
- 경영 성과

예를 들어, LCA는 공정에서 환경 핫스폿(environmental hotspot)을 파악하고 자원 최적화가 필요한 지점을 알아내는 데 중요한 역할을 한다. 게다가 기업은 LCA를 브랜드 신뢰성 구축, 환경 주장(environmental claim) 수립, 기업의 사회적 책임과 투명성에 대한 헌신을 입증하는 데 활용함으로써 소비자와 연결될 수 있다. LCA의 이점에 관한 상세 내용은 GFI가 발행한 지침서 '대체 단백질 제조업체를 위한 LCA 가이드'에 서술되어 있다. 더 나아가, 대체 단백질 관련 기업은 GFI와 푸드스텝스(Foodsteps)의 LCA 툴을 통해 생산한 제품의 환경영향을 추정해 볼 수 있다.

한편, LCA에 적용되는 국제 표준이 존재하기는 하지만, 각 LCA는 독립적으로 수행되므로 기능 단위, 시스템 경계, 할당 방식, 영향 범주 등 기타 매개변수에서 차이를 보이는 경우가 종종 있다. LCA 가정을 검증하고 방법론 편향을 줄이기 위해서는 민감도 분석과 불확실성 분석을 반드시 수행해야 한다. 그러나 여전히 LCA를 수행·비교·해석하는 과정은 어렵다. 따라서 LCA 결과를 대중에 공개하기 전에 충분한 이해와 명확한 소통이 이루어져야 한다.

LCA 접근법 및 범위

시스템 설명

본 연구에서는 각각 세 종류의 식물성 고기 시스템과 기존 육류 시스템을 대상으로 평가했다(표 1). 대상 시스템들은 시장에 출시되는 제품의 크기, 소비 방식, 다량영양소 성분이 비슷하므로, 시스템을 비교할 때 1kg(2.2 lbs, 35.3 oz)의 분쇄육 생산을 기능 단위로 설정했다. 표2는 개별 재료의 누적된 영양을 바탕으로 각 제조법의 영양 성분 추정치를 보여주고 있다.

칼로리와 단백질 함량의 경우, 식물성 고기와 기존 고기 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 식이섬유와 콜레스테롤에서 유의미한 차이가 있었다. 식물성 고기는 식이섬유 함량이 높고 콜레스테롤이 없는 데 반해, 기존 고기는 콜레스테롤 함량이 높고 식이섬유는 없는 것으로 나타났다.

식물성 고기를 만들 때는 시장 대표성과 기술 준비도를 고려하여 제조법을 가상으로 구성하였다(표 3). 미국에서 생산되는 최상위 75개 식물성 고기 제품을 살펴본 결과, 가장 흔히 사용하는 재료 8개 중 6개가 농축대두단백, 완두단백, 밀 글루텐, 코코넛 오일, 카놀라 오일이었다 (GFI 식물성 고기: 2030 생산 수요 예측 보고서). 세 가지 식물 기반 시스템의 주재료는 조직화된 압출 고기 대체물 또는 완두나 대두단백으로 만든 “압출물”이며, 이는 각 시스템에서 100g당 단백질 15g을 구성한다. 나머지 부재료에 포함되는 것으로는 글루텐, 오일, 향신료, 결합제(binder), 물이 있으며, 실제로 최종 생산물에 첨가되어 소량의 단백질을 더한다.

표 1. LCA 보고서에서 평가된 각 시스템의 개요 (고기 종류, 주요 투입물, 주요 공정 방식)

시스템		주요 투입물	주요 공정 방식
식물성 고기	DL 완두	완두	건식 분리획득 저수분 압출
	WH 완두	완두	습식 분리획득 고수분 압출
	WH 대두	대두	습식 분리획득 고수분 압출
기존 육류	소고기	비육우	도축 분쇄
	돼지고기	비육돈	도축 분쇄
	닭고기	육계	도축 분쇄

이와 같은 제조법은 현재 시장에서 가장 많이 판매되는 식물성 고기의 제조 방식이지만, 이외에도 매우 다양한 종류의 고기가 존재하며 이를 만들기 위해 여러 가지 식물성 재료가 사용되고 있다. 예를 들어, 현재 상업적으로 판매하고 있는 식물성 대체 닭고기는 본 보고서에서 분석한 제조법과 달리 코코넛 오일을 주로 사용하지 않고, 그 대신 카놀라 오일이나 옥수수 오일 또는 대두 오일(soybean oil)을 사용하고 있다. 해당 오일을 사용하면 제품 100g당 포화 지방을 1.6g 이하로 줄일 수 있다.

코코넛 오일의 경우 식물성 소고기를 생산할 때 적색육의 지방 조직을 구현하기 위한 목적으로 흔히 사용된다. 이 LCA 연구에서 식물성 고기 제조법에 코코넛 오일과 카놀라 오일을 모두 포함시킨 이유는 보수적으로 연구를 수행하기 위함이며(잠재적으로 환경에 영향을 미칠 수 있는 재료를 폭넓게 다루기 위해), 다양한 식물성 고기 제품의 잠재적 영향을 아우르기 위함이다.

표 2. LCA 보고서에서 평가한 육류 제조법의 영양 성분 (기존 육류 및 식물성 고기의 부재료에 관한 참고자료:https://fdc.nal.usda.gov/index.html)

영양소	완두/대두 고기	소고기	돼지고기	닭고기
단백질 *g/100g*	19	17	17	17
지방 *g/100g*	9	20	21	8
포화 지방 *g/100g*	4	8	8	2
콜레스테롤 *mg/100g*	0	71	72	86
철분 *mg/100g*	3	2	1	1
식이섬유 *g/100g*	2	0	0	0
칼로리 *kcal/100g*	179	254	263	143

표 3. LCA에서 평가한 식물성 분쇄 고기 제조법(상업적으로 생산 중인 식물성 고기를 대표하는 제조법으로 선택)

재료	wt%
압출된 고기 대체물 *완두 또는 대두 베이스*	28–71%*
코코넛 오일	4%
카놀라 오일	4%
감자 전분	3%
향신료**	3%
밀 글루텐	5%
물	10–53%***

**총 단백질은 15%이며 물 함량은 상이하다. **향신료 혼합: 글루탐산, 소금, 효모, 말린 표고버섯, 구연산 ***최종제품의 총 물 함량은 66%이다.*

시스템 경계 및 진행 과정

본 연구에서 설정한 시스템 경계는 원재료 생산부터 제조 단계(cradle-to-manufacturing gates)까지며, 여기에는 작물을 재배하고 제조 시설로 수송 및 공정하는 것까지 포함된다. 포장, 저온 보관, 소매 수송, 소비자 손실 등 최종 유통과 관련한 하류(downstream) 과정은 제외되었는데, 그 이유는 모든 제품 시스템이 사용·요리·소비되는 방식이 비슷하게 설계됨에 따라 그에 따른 영향도 비슷할 것으로 추정되기 때문이다.

식물성 고기 생산은 ISO 인증 LCA 보고서에서도 제시된 것과 같이(그림 1) 대두 및 완두의 재배와 수확이 이루어지는 농장에서부터 시작한다. 그런 다음에는 재료 생산을 위해 수송 과정을 거친다. 재료 생산을 위해서는 먼저 작물을 세척, 건조, 탈부한 다음 그라인딩(grinding) 또는 밀링(milling)하여 가루로 만든다. 이후 가루를 건식 또는 습식으로 분리획득하는 과정을 통해 단백질을 분리한다.

공기 분리법을 통한 건식 분리획득법은 첫 번째 제조법(DL 완두)에서 수행된다. 여기서 곱게 분쇄된 가루는 단백질이 풍부한 미세 알갱이와 전분이 풍부한 거친 알갱이로 분리된다. 두 번째와 세 번째 제조법에서는 습식 분리획득법을 적용하여 완두(WH 완두) 또는 대두(WH 대두) 단백질의 함량을 높인 다음, 분무 건조를 통해 수분을 제거한다. 분리획득이 끝나고 나면, 분리 단백 부분과 농축 단백 부분은 고수분 또는 저수분 압출 공정을 거쳐 조직화된다 (본 연구에 사용된 분리획득 및 압출 기법에 대한 더 자세한 내용은 “식물성 고기 생산 기술”란 참고). 마지막으로 부재료와 배합하면 요리용 식물성 고기 상품이 완성된다.

그림 1에서 제시된 바와 같이, 생산 공정을 구성하기 위해 식물성 고기 및 관련 재료 생산업체에서 1차 데이터를 수집하고 상업적으로 이용 가능한 데이터 세트에서 2차 데이터를 수집하여 사용하였다. 식물성 고기 생산 공정은 대부분 1차 자료를 바탕으로 구성했다(표 4).

식물성 고기 생산 기술

고기의 영양소는 단백질, 지방, 비타민, 미네랄, 물로 이루어져 있다. 이러한 영양소의 조합은 동물 근육 이외에서는 찾기 힘들지만, 각각의 개별 영양소는 식물에서 얻을 수 있다. 따라서 식물성 재료를 올바르게 배합하면 실제 고기와 동일한 구성으로 식물성 고기를 만들 수 있다. 영양소를 얻을 수 있는 식물 공급원이 다양하다는 사실로 미루어 볼 때, 식물성 고기 재료를 만들 수 있는 방식 역시 많다고 볼 수 있다. 본 문서에서 다루고 있는 LCA 연구에서는 아래의 분리획득 방법을 적용하여 주요 단백질 재료를 분리하는 데 주력하였다.

습식 분리획득(wet fractionation): 단백질 추출을 위해 먼저 분쇄 가루를 물이나 에탄올에 담근다. 가루가 용해 또는 pH에 의해 분리되면 가루를 말린다. 습식 분리획득 방식은 보통 단백질 함량이 80% 이상인 분리 단백질을 만들어 낸다.

건식 분리획득(dry fractionation): 전분이 풍부한 거친 알갱이로부터 단백질이 풍부한 미세한 알갱이를 분리할 때는 공기 분리법을 적용한다. 공기 분리법은 입자의 밀도와 크기, 가루의 분산성(powder dispersibility) 차이를 이용하여 분리한다. 건식 분리획득 방식은 보통 단백질 함량이 37~60%인 농축 단백질을 만들어 낸다.

동물 근육 단백질은 움직임을 통해 섬유 조직을 형성한다(Bomkamp 외 2022, Sha & Xiong 2020). 한편, 식물 단백질에는 섬유 조직이 부족하지만, 열과 전단력을 통해 조직을 만들어낼 수 있다.

ISO 인증 LCA보고서에서는 식물성 고기의 식물성 단백질을 조직화하기 위해 압출 공정(extrusion)을 사용한다. 압출 공정은 하나 이상의 스크루가 있는 가로형 배럴에 분리 단백질 또는 농축 단백질을 공급하는 과정을 거친 후, 모양이 잡힌 틀을 통해 원하는 제품을 형성하는 과정으로 진행된다. 다음은 압출 공정의 두 가지 방식이다.

저수분 압출(low-moisture extrusion): 이 공정은 건조한 제품을 만들어 내기에 제품을 사용하기 전에 수분을 한 번 더 공급해야 한다. 저수분 압출식으로 만들어진 최종 제품은 다공질 구조를 가지고, 수분 함량은 40% 이하이다.

고수분 압출(high-moisture extrusion): 이 공정은 촉촉한 제품을 만들어 내기에 저온 보관이 필요하다. 고수분 압출식으로 만들어진 최종 제품은 섬유 구조와 더 유사하며, 수분 함량은 50% 이상이다.

그림 1. 식물성 고기 생산의 LCA 진행 과정(작물 재배부터 분리획득, 압출, 배합까지의 전 과정 포함)

본 문서에서 확인할 수 있듯이 기존 육류 상품의 공정에는 작물 재배부터 최종 분쇄 및 배합까지 모두 포함되어 있다(그림2). 축산업은 사료 생산을 위한 작물 재배로 시작해 비육장 운영에서 끝난다. 소고기, 돼지고기, 닭고기 생산에는 각기 다른 사료 종류가 제공되며, 옥수수와 대두는 모든 사료에 재료로 들어간다.

소고기의 경우, 젖을 뗀 송아지(weaned calf) 사육은 집약형 비육장 운영에 해당하는 별도의 투입물로 분리되었는데, 이는 송아지 사육이 타 비육장 운영과는 다른 독립된 유형이기 때문이다. 이 LCA에서 젖을 뗀 송아지 투입물은 미국 시장이 집약형 시스템 77%와 목초지에서의 혼합 및 방목형 시스템 23%로 구성된다는 사실을 반영하고 있다. 미국 통계에 따르면, 돼지고기와 닭고기 시스템은 100% 집약형 시스템으로 운영된다. 이와 같은 비육장에서 가축이 특정 무게에 이르게 되면 도축되고, 도축된 고기를 가지고 생고기와 여러 부산물을 생산하게 된다. 이후 생고기를 분쇄 및 혼합하는 과정을 거치고 나면 비로소 시장에서 판매될 준비를 끝마치게 된다.

ISO 인증 LCA에서 도식화된 기존 육류의 생산 과정은 고도로 최적화된 집약형 목축 시스템이며, 이는 미국에서 대다수의 가축이 길러지는 전형적인 방식이다. 방목형 목축 시스템(예: 일정 기간 동안 또는 평생 동안 풀을 먹고 자란 소, 방목하여 키운 닭)은 집약형 목축 시스템(예: 평생 비육장 사육, 집중식 가축 사육 시설(Concentrated Animal Feeding Operation, CAFO)의 대안으로 꼽히기도 한다. 그러나 최근 연구에 따르면 방목형 시스템이 집약형 시스템보다 온실가스를 더 많이 배출하고 토지 이용도가 더 높은 것으로 나타났다(Nijdam, Rood, Westhoek 2012). 게다가 온실가스 배출을 상쇄하기 위해 단순히 목초지의 탄소 격리에만 의지할 수도 없다는 사실 역시 밝혀진 바 있다(Wang 외, 2023).

역사상 가장 대규모로 수행된 Poore와 Nemecek (2018)의 식품 환경영향 메타 분석에서 제시된 데이터와 비교해 볼 때, 본 LCA 연구에서 분석된 시스템의 환경영향은 세계 여러 시스템에 비하면 훨씬 적은 수준이다("본 LCA 보고서와 기존의 타 환경평가는 어떻게 다를까?"란 참고).

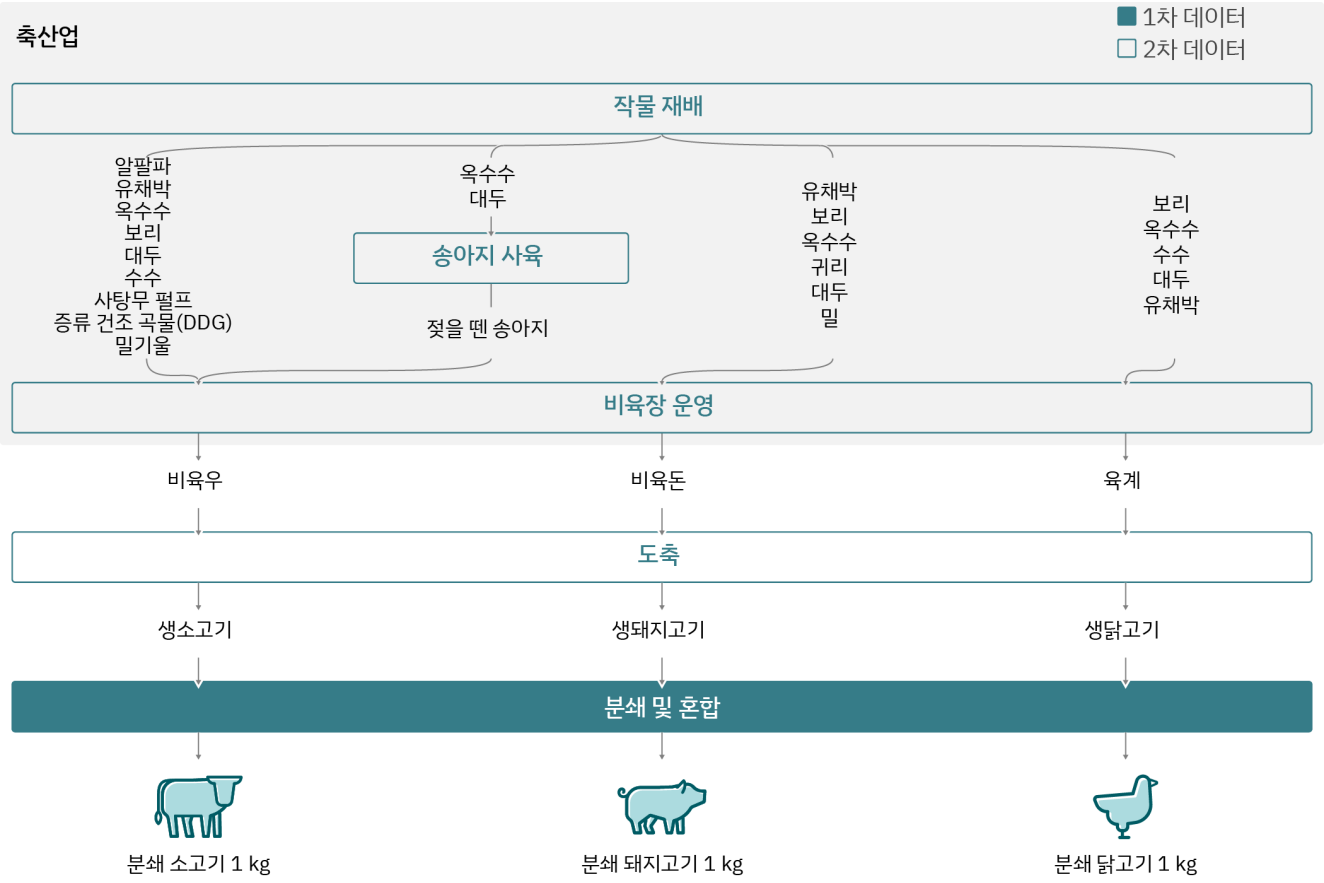


그림 2. 미국의 집약형 목축 관행을 기준으로 한 기존 육류 생산 LCA 진행 과정(작물 재배부터 최종 분쇄 및 혼합까지)

데이터 출처

식물성 고기 생산 과정을 도식화하기 위해 식물성 고기 제조업체, 재료 및 장비 제조업체, 과학 논문, ecoinvent 3.9.1에서 데이터를 수집하였다. 기존 육류 생산 과정을 도식화하기 위해서는 과학 논문을 비롯하여 ecoinvent 3.9.1 및 World Food LCA 데이터베이스를 포함한 상업적으로 이용 가능한 데이터 세트를 참고했다. 관련 산업 협력사로부터 수집한 1차 데이터에 대해서는 일관성, 총계, 익명성을 확인하였다. 2차 데이터는 과학 논문과 상업적으로 이용 가능한 데이터 세트에서 수집하였는데, 가능하면 북미 지역을 대표하는 자료로 선정하였다.

할당 기준 및 영향범주 선정

기존 육류의 경우 생산 공정으로 하나 이상의 제품이 생산되므로, 질량 할당(mass allocation)을 기준으로 적용하여 모든 생산 제품에 하중을 분담하였다. 이와 더불어 경제적 할당 기준에 대한 결과의 민감성도 평가하였다. 18개의 환경영향 결과 세트는 ReCiPe 2016 Midpoint (H) 평가 방식을 바탕으로 설정했다. 자세한 사항은 LCA 보고서 원본의 부록 A에서 확인할 수 있다.

표 4. LCA 보고서의 각 식물성 고기 시스템 평가에 사용된 산업 및 과학 논문 데이터 출처의 수. (나머지 데이터는 모두 ecoinvent 3.9.1.에서 수집).

시스템 및 공정		익명의 산업 데이터 출처	과학논문 참고자료 출처
DL 완두	건식 분리획득	2	5
	저수분 압출	2	1
WH 완두	습식 분리획득	1	6
	고수분 압출	2	0
WH 대두	습식 분리획득	2	1
	고수분 압출	3	1

주요 결과

기존 육류와 식물성 고기의 환경영향 비교

식물성 고기는 기존 육류에 비해 같은 양의 고기를 생산할 때 환경영향을 89%까지 줄일 수 있다.

연구에서 평가한 18개의 영향범주 전반에서 식물성 고기는 기존 육류보다 평균적으로 환경에 미치는 영향이 89% 적었다. 각각 비교해 보면, 식물성 고기 제조법의 환경영향은 평균적으로 소고기보다 91% 적었으며, 돼지고기의 경우 88%, 닭고기의 경우 71% 적은 것으로 나타났다. 소고기 생산은 18개 범주 중 11개에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 남은 7개의 범주에서는 돼지고기가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(그림 3).

소고기를 생산할 때 환경에 영향을 미치는 주요 원인은 직접적인 사육장 내 배출로, 주로 소의 장내 신진대사, 사료 생산, 분뇨 관리, 비료 투입으로 인해 발생한다. 돼지고기의 경우 사육장 운영[1], 분뇨 관리, 사료 생산이 환경영향의 동인인 것으로 나타났다. 닭고기의 경우 주로 육계 생산, 도축, 사료 작물 재배에 따른 직접적인 배출이 환경영향의 동인으로 확인되었다. 닭고기를 생산하는 데 수자원이 소비되고 화석 자원이 고갈되는 주원인은 사료를 만드는 데 필요한 옥수수 사용량이 높아 이를 재배하는 데 많은 양의 관개수와 디젤이 필요하기 때문이다. 기존 육류 시스템의 영향과 공정 기여도에 관한 더 자세한 내용은 LCA 보고서 원본의 Sections 5.4-5.6와 본 문서의 "축산업의 육류 생산 과정은 지구온난화에 막대한 영향을 미친다"란에서 확인할 수 있다.

[1] "사육장 운영" 범주는 인프라, 에너지, 유지보수를 포함한다.

영향범주	DL 완두	WH 완두	WH 대두	소고기	돼지고기	닭고기
미세먼지 형성 *kg PM2.5 eq*	$1.59e^{-03}$	$1.89e^{-03}$	$1.67e^{-03}$	$1.91e^{-02}$	$1.86e^{-02}$	$1.01e^{-02}$
화석 자원 고갈 *kg oil eq*	$1.24e^{-01}$	$1.98e^{-01}$	$1.42e^{-01}$	$8.02e^{-01}$	$1.07e^{+00}$	$5.05e^{-01}$
담수 생태독성 kg 1,4-DCB	$3.47e^{-02}$	$3.75e^{-02}$	$3.36e^{-02}$	$3.52e^{-01}$	$2.82e^{-01}$	$9.95e^{-02}$
담수 부영양화 *kg P eq*	$3.76e^{-04}$	$4.44e^{-04}$	$3.61e^{-04}$	$7.85e^{-03}$	$2.74e^{-03}$	$1.83e^{-03}$
지구 온난화 kg CO_2 eq	$7.47e^{-01}$	$9.82e^{-01}$	$8.57e^{-01}$	$1.45e^{+01}$	$7.01e^{+00}$	$2.59e^{+00}$
인체 발암 독성 kg 1,4-DCB	$2.94e^{-02}$	$3.68e^{-02}$	$3.13e^{-02}$	$4.47e^{-01}$	$1.00e^{+00}$	$1.36e^{-01}$
인체 비발암 독성 *kg 1,4-DCB*	$4.64e^{-01}$	$7.01e^{-01}$	$9.28e^{-01}$	$1.09e^{+03}$	$4.65e^{+00}$	$2.10e^{+00}$
전리 방사선 *kBq Co-60 eq*	$2.28e^{-02}$	$3.05e^{-02}$	$2.51e^{-02}$	$2.09e^{-01}$	$1.98e^{-01}$	$1.40e^{-01}$
토지 이용 *m^2a crop eq*	$2.20e^{+00}$	$1.90e^{+00}$	$2.09e^{+00}$	$2.21e^{+01}$	$5.20e^{+00}$	$2.30e^{+00}$
해양 생태독성 *kg 1,4-DCB*	$3.25e^{-02}$	$3.63e^{-02}$	$3.12e^{-02}$	$4.08e^{-01}$	$3.70e^{-01}$	$1.24e^{-01}$
해양 부영양화 *kg N eq*	$7.59e^{-04}$	$7.69e^{-04}$	$8.10e^{-04}$	$1.95e^{-02}$	$7.45e^{-03}$	$4.98e^{-03}$
광물 자원 고갈 *kg Cu eq*	$2.12e^{-03}$	$2.17e^{-03}$	$1.90e^{-03}$	$1.93e^{-02}$	$5.02e^{-02}$	$5.77e^{-03}$
오존 형성, 인간 건강 *kg NO_x eq*	$1.46e^{-03}$	$1.65e^{-03}$	$1.85e^{-03}$	$9.39e^{-03}$	$1.36e^{-02}$	$5.00e^{-03}$
오존 형성, 육상 생태계 *kg NO_x eq*	$1.51e^{-03}$	$1.72e^{-03}$	$2.00e^{-03}$	$9.66e^{-03}$	$1.42e^{-02}$	$5.16e^{-03}$
성층권 오존 파괴 *kg CFC-11 eq*	$2.47e^{-06}$	$2.49e^{-06}$	$4.11e^{-06}$	$1.21e^{-04}$	$2.43e^{-05}$	$2.38e^{-05}$
육상 산성화 *kg SO_2 eq*	$4.24e^{-03}$	$4.43e^{-03}$	$4.28e^{-03}$	$8.80e^{-02}$	$6.90e^{-02}$	$3.97e^{-02}$
육상 생태독성 *kg 1,4-DCB*	$1.91e^{+00}$	$1.97e^{+00}$	$2.06e^{+00}$	$1.67e^{+01}$	$2.36e^{+01}$	$5.52e^{+00}$
물 소비량 *m^3*	$1.79e^{-02}$	$1.85e^{-02}$	$1.70e^{-02}$	$2.45e^{-01}$	$4.64e^{-01}$	$3.24e^{-01}$

그림 3. 기존 육류(소·돼지·닭고기)와 완두(DL, WH)·대두(WH) 고기를 1kg을 생산할 때 18개 영향 범주에 미치는 환경영향을 나타내는 히트맵 (영향 수준이 낮은 시스템(초록)부터 높은 시스템(빨강)까지 표시하였으며, 각 값은 각 범주 및 시스템에 대한 영향의 절댓값임).

주요 영향 범주를 비교해 보면 기존 육류와 식물성 고기 생산의 차이가 드러난다

LCA 보고서 원본에서는 영향 범주를 18개로 설정하여 평가를 진행했지만, 본 요약 문서에서는 지구 온난화, 물 소비, 토지 이용, 화석 자원 고갈, 미세먼지 형성, 해양 부영양화에만 중점을 두었다.

이처럼 기후, 자원 소비, 오염을 대표하는 각 범주들을 바탕으로(표 5) 왜 식물성 고기가 환경에 미치는 영향이 더 적은지 정밀하게 분석해 볼 수 있다.

게다가 해당 범주들은 식물성 고기에 관한 다른 LCA 연구에서도 흔히 다루고 있는 것이므로, 독자적으로 수행된 타 연구와 비교하기에도 더욱 용이하다("본 LCA 보고서와 기존의 타 환경 평가의 비교"란 참고).

중요한 것은, 제품의 환경영향 또는 공정을 평가할 때 1~2개의 지표에 집중하기보다는 지속가능성의 다양한 측면을 전체적으로 고려해야 한다는 점이다.

표 5. 본 요약 문서에서 분석한 주요 영향 범주. (LCA 보고서 원본에서 분석한 18개의 영향 범주 중 6개)

범주		설명
기후	지구 온난화	온실가스 배출이 세계 기후변화에 미치는 영향
자원 소비	물 소비	직·간접적 담수 자원의 이용
	토지 이용	토지 점유 및 변형
	화석 자원 고갈	유한한 화석 연료 자원의 고갈 (석탄, 석유, 천연가스 등)
오염	미세먼지 형성	대기 중 미세 먼지 형성
	해양 부영양화	해양 생태계의 과도한 영양화

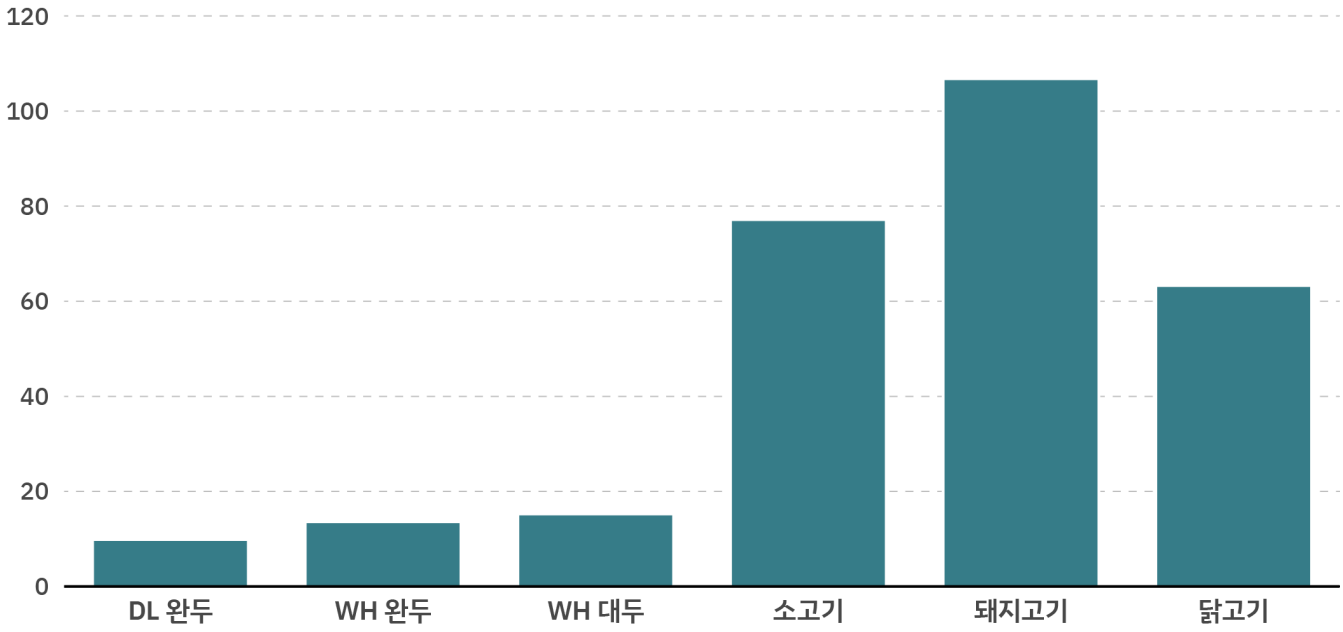


그림 4. 소·돼지·닭고기와 완두(DL, WH) 및 대두(WH) 고기를 1kg 생산하는 데 필요한 누적 에너지 요구량(CED) (MJ/kg).

식물성 고기 시스템은 기존 육류 시스템에 비해 평균적으로 CO_2eq 수준이 89% 낮고, 미세먼지 형성 정도는 89%, 화석 자원 고갈 정도는 81% 낮게 나타났다. 이는 식물성 고기의 누적 에너지 요구량(Cumulative Energy Demand, CED) 수준이 낮기 때문이며(그림 4), 소고기와 돼지고기 생산 시 지구 온난화에 크게 기여하는 가축의 장내 발효가 없고, 분뇨 관리를 할 필요가 없어 이에 따른 배출이 없기 때문이다("축산업의 육류 생산 과정은 지구 온난화에 막대한 영향을 미친다"란 참고).

게다가 식물성 고기를 생산할 때는 필요한 공급 원료가 적어 그에 따른 작물 의존도가 낮아지게 되면서 토지, 물, 비료, 살충제와 같은 자원을 덜 사용하게 된다. 그 결과, 토지 및 수자원 소비가 상당히 줄어들고 해양 부영양화(예: 수생 오염) 역시 덜 유발하게 된다.

식물성 시스템은 동물성 시스템에 비해 평균적으로 토지 이용도가 79% 낮고, 물 소비량은 95% 적으며, 해양 부영양화 수준은 93% 더 낮다. 전체적으로 각 영향 범주 내에서 식물성 고기는 전통적인 고기 생산에 비해 환경에 미치는 영향이 60~96% 더 적었다(단, 닭고기 생산의 토지 이용 범주 제외) (표 6, 그림 5).

표6. 기존 육류(소·돼지·닭고기) 대비 세 가지 식물성 고기의 평균 영향 감소율

식물성 고기의 환경영향 감소율	*비교 대상* 소고기	*비교 대상* 돼지고기	*비교 대상* 닭고기
지구 온난화 *kg CO_2 eq*	94%	88%	67%
미세먼지 형성 *kg PM2.5 eq*	91%	91%	83%
해양 부영양화 *kg N eq*	96%	90%	84%
토지 이용 *m^2a crop eq*	91%	60%	10%
화석 자원 고갈 *kg oil eq*	81%	86%	69%
물 소비량 *m^3*	93%	96%	94%
18개 영향 범주 평균	91%	88%	71%

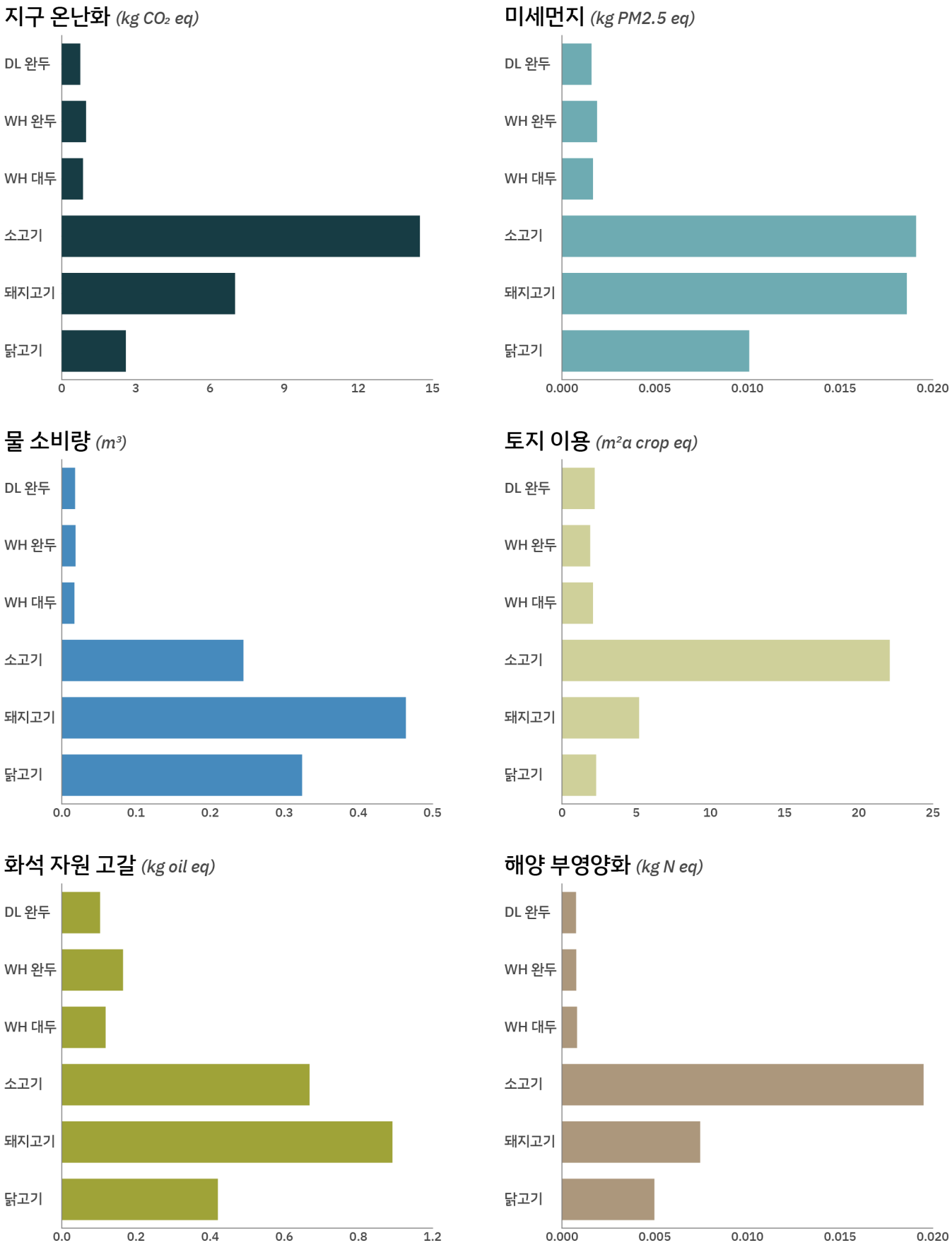


그림 5. 기존 육류(소·돼지·닭고기)와 완두(DL, WH) 및 대두(WH) 고기를 1kg 생산할 때 미치는 환경영향.

연구에 따르면, 토지 이용 범주에서 식물성 시스템과 닭고기 생산이 미치는 영향이 비슷하게 나타났다. 이는 식물성 닭고기와 기존의 일반 닭고기를 비교한 타 LCA와는 대조되는 결과인데, 해당 타 연구에서는 식물성 시스템의 토지 이용도가 각각 82%와 84% 낮다고 보고하였기 때문이다(Saerens 외, 2021; Dettling 외, 2016). 토지 이용 범주에서 닭고기와 식물성 고기 시스템이 미치는 영향을 더욱 자세히 살펴보면, 이러한 결과에 다양한 변수가 작용한다는 것을 확인할 수 있다.

본 LCA 보고서에서의 닭고기 생산 시스템은 세계에서 가장 효율적인 가축 생산 시스템을 대변하며, 다른 세계 닭고기 생산 시스템은 본 보고서에서 보고된 것보다 훨씬 더 많은 토지를 이용한다("본 LCA 보고서와 기존의 타 환경 평가는 어떻게 다를까?"란 참고). 본 LCA 보고서에서 닭고기 생산 시스템이 토지 이용에 미치는 영향의 주 원인은 바로 사료 생산이다. 닭고기 사료를 생산할 때에는 주로 토지를 효율적으로 이용하는 작물인 옥수수(9.31 ton/ha)와 대두(2.76 ton/ha)를 재료로 쓴다.

토지 이용 범주에서 식물성 고기가 미치는 영향의 주 원인은 여러 재료들, 주로 압출물, 코코넛 오일, 카놀라 오일이다(그림 6). 여기서 압출물을 만들 때는 대두(2.76 ton/ha)와 완두(3.87 ton/ha) 같은 토지를 효율적으로 이용하는 작물을 사용하는 반면, 코코넛 오일과 카놀라 오일을 만들 때는 토지를 덜 효율적으로 이용하는 코코넛(1 ton/ha)과 카놀라(1.9 tons/ha)를 사용한다. 앞에서 언급했던 것처럼, 많은 식물성 닭고기 제조법은 코코넛 오일을 재료로 사용하지 않으므로, 본 연구의 결과에서는 식물성 닭고기의 토지 이용 환경영향이 과대평가되었을 수 있다. 이러한 분석으로 말미암아 식물성 고기의 생산 규모가 커지면, 제조에 들어가는 재료 중 특히 지방과 오일을 토지 이용에 효율적인 것으로 선택함으로써 토지 이용의 효율성을 높일 수 있다.

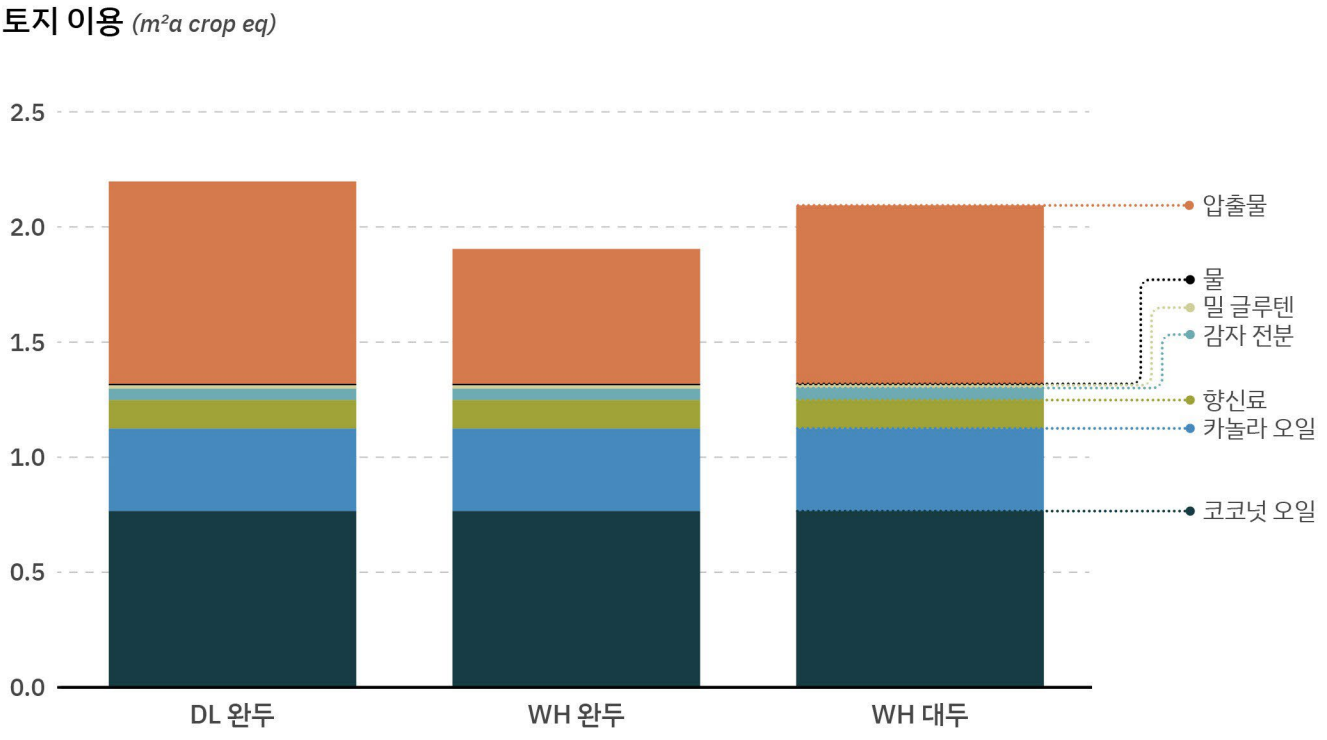


그림 6. 식물성 고기 시스템이 토지 이용에 미치는 재료별 환경영향 기여도

질량 할당과 경제적 할당 방식에서 모두 식물성 고기의 환경영향이 더 적은 것으로 밝혀졌다

할당(allocation)은 LCA를 수행할 때, 제품이나 공정에 부여된 환경 영향의 몫을 계산하기 위해 수행한다. 다수의 시스템에서는 유용한 제품을 여러 개 생산하게 된다. 예를 들어 대두는 식품, 가축 사료, 오일을 만드는 데 사용될 수 있다. 일반적으로는 질량 할당 방식과 경제적 할당 방식을 적용하여 하나의 시스템에서 생산된 각 제품에 비례 영향을 할당한다. 경제적 할당 방식을 적용하면 금전적 가치가 더 높은 제품에 시스템 환경영향을 더 많이 할당한다. 이는 소비자 수요를 생산 시스템의 주 동인으로 여기지만, 시간이 지나면서 변동이 생길 수 있다. 한편, 질량 할당 방식은 환경영향을 각 부산물의 질량에 비례해서 할당한다. 어떤 할당 방식을 선택하는지에 따라 환경영향 결과가 달라질 수 있으므로 할당 방식을 신중하게 고려해야 한다.

본 연구에서는 베이스라인(baseline) 결과를 질량 할당 기준에 기반하여 분석했다. 그리고 ISO 지침에 따라, 경제적 할당도 적용해 모든 시스템을 비교해 보았으며, 이때 표 7에서 제시된 바와 같이 할당 인자(allocation factor)를 사용했다.

경제적 할당을 적용한 경우 모든 시스템의 환경영향이 증가했지만, 기존 육류와 식물성 고기를 비교해 보았을 때는 식물성 고기의 환경영향이 일관되게 적게 나타났다(그림 7).

경제적 할당 방식을 적용했을 때, 18개 범주 전반에서 식물성 고기는 기존 육류보다 평균적으로 환경영향이 91% 적은 것으로 나타났다. 이는 질량 할당 기준을 적용했을 때와는 차이가 있는데, 질량 할당을 적용한 경우 식물성 고기의 환경영향이 89% 적게 나타났다.

기존 육류 시스템, 특히 소고기와 돼지고기의 경우에는 식물성 고기에 비해 할당 방식에 대한 민감도가 더 높았다. 주된 이유는 생고기가 다른 축산 부산물보다 경제적 가치가 높기 때문이다. 소고기의 경우 18개의 범주 중 11개 범주에서 가장 영향을 많이 미치는 시스템으로 밝혀졌으며, 나머지 7개 범주에서는 돼지고기가 가장 많은 영향을 미쳤다.

표 7. LCA 보고서에서 기존 육류 및 식물성 고기를 평가하기 위해 사용된 질량 및 경제적 할당 인자

시스템	제품	질량 할당 인자 (%)	경제적 할당 인자 (%)
소고기	생고기	49.00	92.90
돼지고기	생고기	67.00	98.67
닭고기	생고기	65.70	86.60
DL 완두	농축 완두 단백	23.38	52.90
WH 완두	분리 완두 단백	21.73	54.97
WH 대두	농축 대두 단백	62.54	97.41

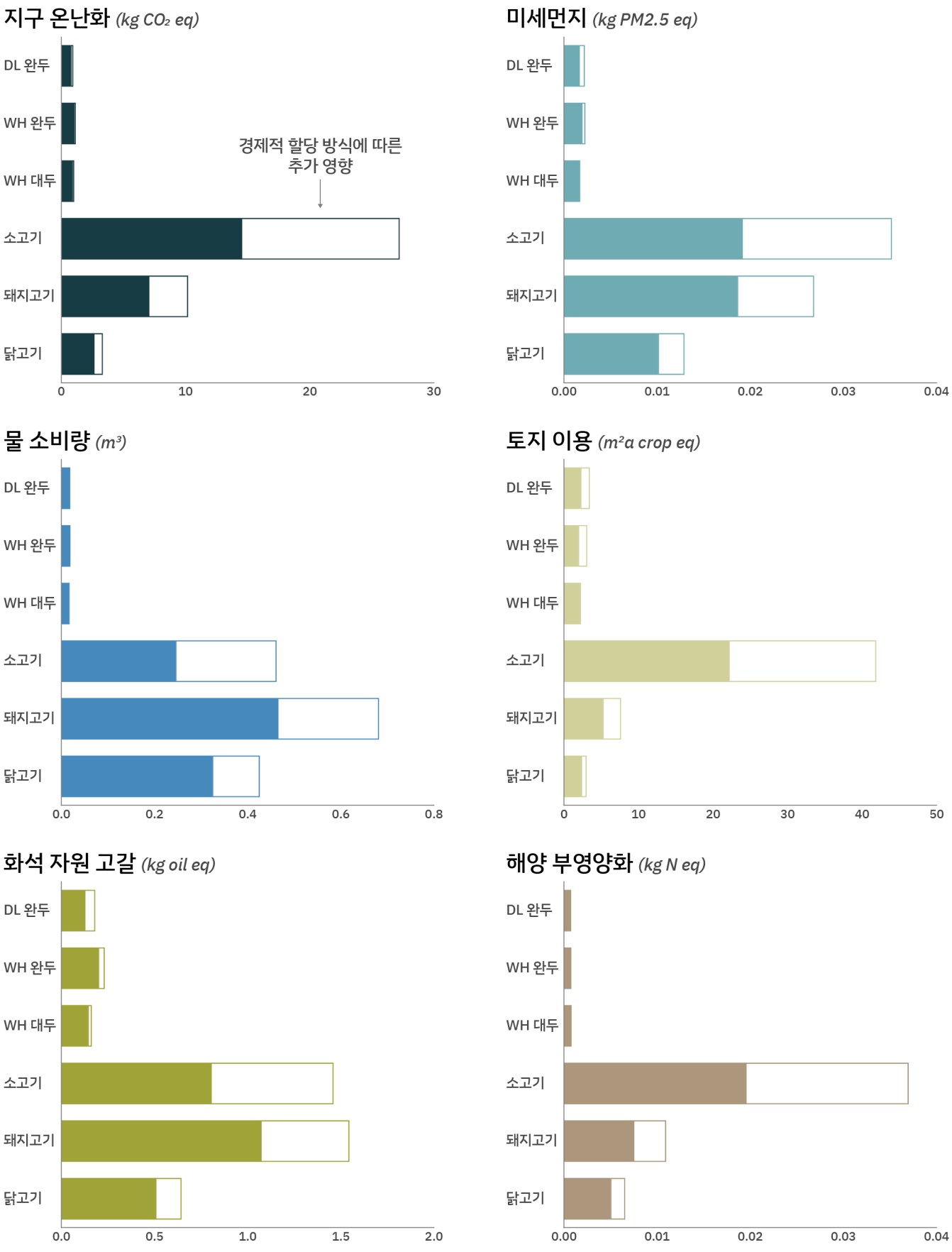
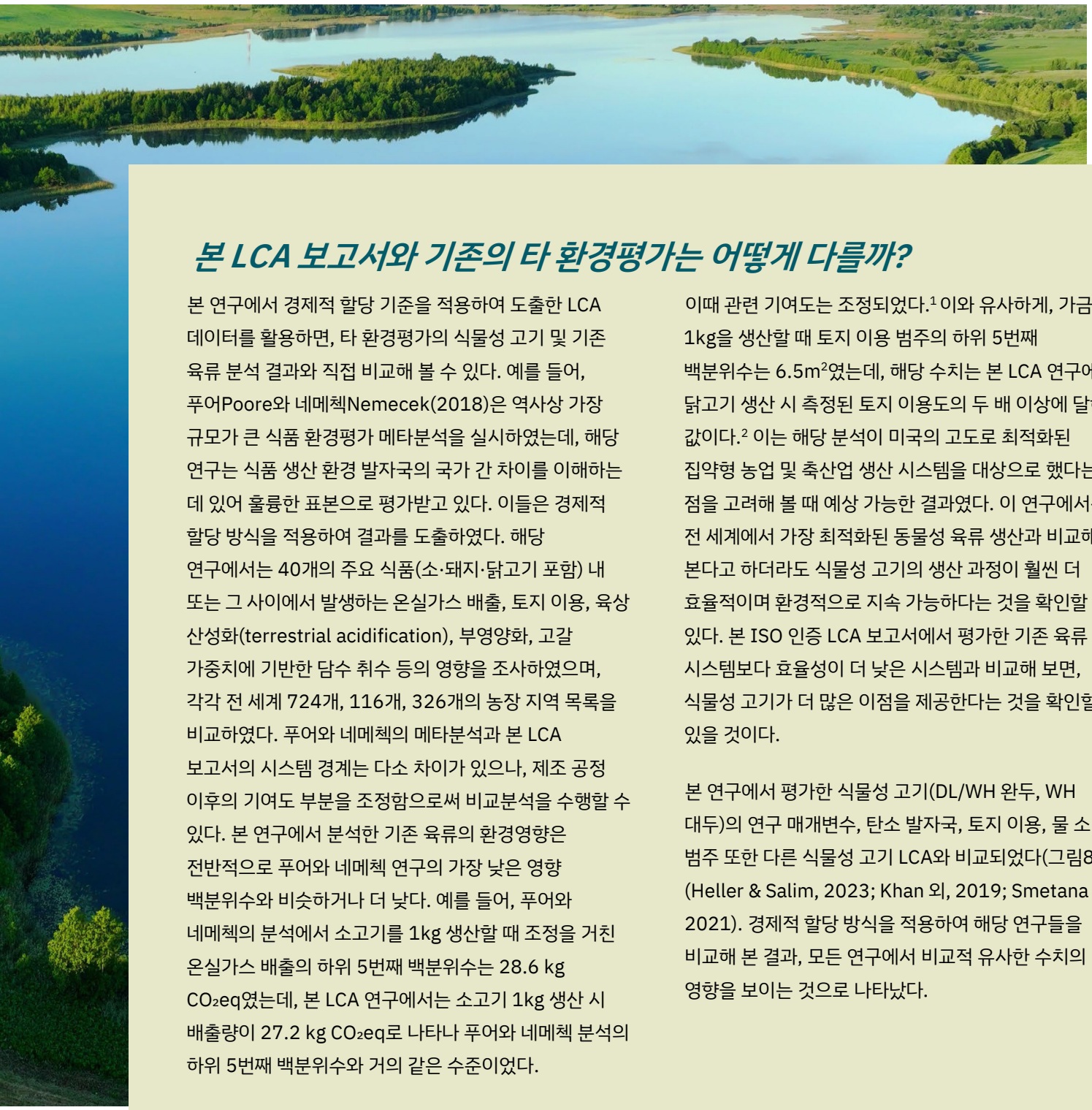


그림 7. 소 돼지·닭고기와 완두(DL, WH) 및 대두(WH) 생산의 환경영향을 파악하기 위해 적용된 질량 할당과 경제적 할당 방식



본 LCA 보고서와 기존의 타 환경평가는 어떻게 다를까?

본 연구에서 경제적 할당 기준을 적용하여 도출한 LCA 데이터를 활용하면, 타 환경평가의 식물성 고기 및 기존 육류 분석 결과와 직접 비교해 볼 수 있다. 예를 들어, 푸어Poore와 네메첵Nemecek(2018)은 역사상 가장 규모가 큰 식품 환경평가 메타분석을 실시하였는데, 해당 연구는 식품 생산 환경 발자국의 국가 간 차이를 이해하는 데 있어 훌륭한 표본으로 평가받고 있다. 이들은 경제적 할당 방식을 적용하여 결과를 도출하였다. 해당 연구에서는 40개의 주요 식품(소·돼지·닭고기 포함) 내 또는 그 사이에서 발생하는 온실가스 배출, 토지 이용, 육상 산성화(terrestrial acidification), 부영양화, 고갈 가중치에 기반한 담수 취수 등의 영향을 조사하였으며, 각각 전 세계 724개, 116개, 326개의 농장 지역 목록을 비교하였다. 푸어와 네메첵의 메타분석과 본 LCA 보고서의 시스템 경계는 다소 차이가 있으나, 제조 공정 이후의 기여도 부분을 조정함으로써 비교분석을 수행할 수 있다. 본 연구에서 분석한 기존 육류의 환경영향은 전반적으로 푸어와 네메첵 연구의 가장 낮은 영향 백분위수와 비슷하거나 더 낮다. 예를 들어, 푸어와 네메첵의 분석에서 소고기를 1kg 생산할 때 조정을 거친 온실가스 배출의 하위 5번째 백분위수는 28.6 kg CO_2eq였는데, 본 LCA 연구에서는 소고기 1kg 생산 시 배출량이 27.2 kg CO_2eq로 나타나 푸어와 네메첵 분석의 하위 5번째 백분위수와 거의 같은 수준이었다. 이때 관련 기여도는 조정되었다.[1] 이와 유사하게, 가금육 1kg을 생산할 때 토지 이용 범주의 하위 5번째 백분위수는 6.5m^2였는데, 해당 수치는 본 LCA 연구에서 닭고기 생산 시 측정된 토지 이용도의 두 배 이상에 달하는 값이다.[2] 이는 해당 분석이 미국의 고도로 최적화된 집약형 농업 및 축산업 생산 시스템을 대상으로 했다는 점을 고려해 볼 때 예상 가능한 결과였다. 이 연구에서는 전 세계에서 가장 최적화된 동물성 육류 생산과 비교해 본다고 하더라도 식물성 고기의 생산 과정이 훨씬 더 효율적이며 환경적으로 지속 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 본 ISO 인증 LCA 보고서에서 평가한 기존 육류 시스템보다 효율성이 더 낮은 시스템과 비교해 보면, 식물성 고기가 더 많은 이점을 제공한다는 것을 확인할 수 있을 것이다.

본 연구에서 평가한 식물성 고기(DL/WH 완두, WH 대두)의 연구 매개변수, 탄소 발자국, 토지 이용, 물 소비 범주 또한 다른 식물성 고기 LCA와 비교되었다(그림8) (Heller & Salim, 2023; Khan 외, 2019; Smetana 외, 2021). 경제적 할당 방식을 적용하여 해당 연구들을 비교해 본 결과, 모든 연구에서 비교적 유사한 수치의 영향을 보이는 것으로 나타났다.

[1] 푸어와 네메첵이 추정한 바에 따르면, 소고기 제품의 경우 유통과 소매 손실 부문이 배출량에 최대 15%까지(Poore & Nemecek, 2018, 그림. S13 참고) 기여한 반면, 패키징·수송·소매로 인한 배출은 최대 9%였다. 즉 배출의 총 24%까지가 제조 단계 이후에 발생했다. 푸어와 네메첵이 수행한 연구에서는 소고기 1kg 생산 시 온실가스 배출의 하위 5번째 백분위수가 37.6 kg CO_2eq였다. 여기서 제조 단계 이후에 발생한 배출량 24%를 빼면 28.6 kg CO_2eq가 된다.

[2] 수송, 유통, 손실은 푸어와 네메첵의 분석에서는 토지 이용에 주요 기여를 하는 요인이 아니었다.

식물성 고기	기능 단위	경계	지역	영향 평가 방법	재료
비욘드 버거 3.0	1/4 lb (약 113.4g)의 버거 패티	원재료 취득부터 유통까지	북미	ReCiPe 2016 midpoint (H)	완두 단백, 쌀 단백, 카놀라 오일, 천연 향료, 말린 효모 등
임파서블 버거	1 kg의 버거 패티	원재료 취득부터 제조 단계까지	미국	IMPACT 2002+ vQ2.28	대두 단백, 감자 단백, 레그헤모글로빈 단백, 코코넛 오일, 해바라기 오일, 혼합 향료 등
Smetana 외, 2021	113 g의 버거 패티	원재료 취득부터 제조 단계까지	유럽	IMPACT 2002+	대두 단백, 밀 글루텐, 유채씨 오일 등
DL 완두, WH 완두, WH 대두 *(본 연구)*	1 kg의 분쇄육	원재료 취득부터 제조 단계까지	북미	ReCiPe 2016 midpoint (H) V1.03	표 3 참고

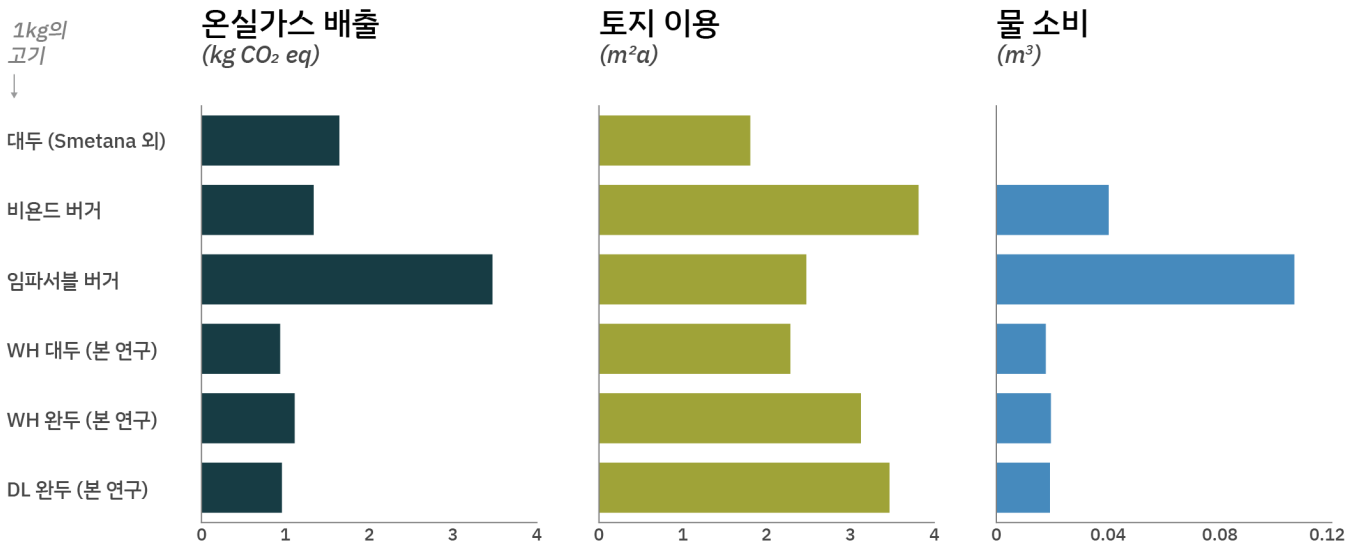


그림 8. 식물성 고기 생산의 연구 매개변수 및 환경영향에 관한 본 ISO 인증 LCA 보고서와 타 식물성 고기 LCA 연구의 비교. Smetana 외 (2021)가 수행한 LCA에서는 물 소비 범주를 포함하지 않았음.

임파서블 버거(Impossible Burger)에서 탄소 발자국과 물 소비가 조금 높게 나타난 이유는 제조 과정에 레그헤모글로빈(발효 방식)과 감자 단백질이 들어가기 때문이다. 이 두 가지 재료는 식물성 고기 제조에 들어가는 다른 재료에 비해 탄소 발자국이 조금 더 크고 물 소비가 조금 더 많다. 그럼에도 여전히 임파서블 버거는 기존 소고기 버거에 비해 고기 1kg 당 지구온난화 지수(GWP, global warming potential)가 89% 낮고 물 소비량이 87% 적다(Khan 외, 2019).

탄소 발자국, 토지 이용, 물 소비와 같은 영향 범주는 타 연구와 비교하기 위해 선택되었다. 그 이유는 해당 매개변수에 대한 영향 평가 방법론이 가장 용이하고 비슷했기 때문이다. 본 LCA 보고서에서 비교 대상으로 경제적 할당 방식이 적용되었는데, 그 이유는 비교된 타 연구들 모두가 LCA 방법론에 경제적 할당 방식을 적용했기 때문이다.

**각 연구는 다른 경계를 설정하고 있기 때문에, 비욘드 버거(Beyond Burger) 3.0과 임파서블 버거의 경우 원재료 취득 단계부터 제조 단계(cradle-to-manufacturing gate)에 이르기까지의 기여도가 계산되었다. 이에 따라 각 생산 단계의 기여도를 포함하되 패키징 단계와 저온 보관 수송 단계는 제외되었다.*

전 세계적으로 지역적 차이가 있으나, 일관적으로 식물성 고기가 기존 육류보다 환경영향이 더 적게 나타났다

본 LCA 보고서에서는 ISO 표준을 준수하여 불확실성 분석을 실시하였다. 이를 통해 기존 육류 시스템과 식물성 고기 시스템의 환경영향 감소율을 측정할 때 투입 데이터가 불확실하고 가변적임에 따라 발생하는 불확실성의 정도를 정량화했다. 앞서 언급한 바와 같이, 불확실성 분석은 LCA 가정을 검증하고 방법론 편향을 줄이는 데 중요한 역할을 한다("전과정평가(LCA)는 식품 환경영향을 파악하는 데 필수적이다"란 참고).

전과정 목록 데이터에 불확실성이 발생하는 이유는 변수가 많기 때문이다. 데이터 수집 출처 및 방법, 지리적 차이, 기타 조건(에너지 및 재료 소비, 농업 관행, 재료 구성) 등이 모두 변수에 해당한다. LCA 불확실성 분석은 다양한 잠재적 결과를 생성하기 위해 각 투입 변수의 불확실성 분포에 기반하여 투입물을 다양하게 설정하고, 이를 통해 전과정 목록 데이터의 불확실성을 결합한 영향을 평가한다.

LCA 수행 시 불확실성 분석을 하지 않을 경우, 대표성이 없거나 데이터 품질이 낮은 전과정 목록 투입이 채택되게 되면 편향된 결과를 낳을 위험이 있다. 본 LCA 연구에서는 SimaPro의 몬테카를로 시뮬레이션을 적용했다. 여기서 기존 육류 시스템과 식물성 고기 시스템을 각 하나씩 짝지어 비교하여 총 1,000쌍의 시뮬레이션을 진행했다. 그리고 각 반복 시에는 투입물을 무작위로 선택했으며, 두 시스템이 미치는 영향의 차이를 비교했다. 이러한 과정을 거쳐, 각 영향 범주마다 식물성 고기 시스템과 기존 육류 시스템 간 차이의 분포가 정의된 신뢰 구간 내에 도출되었다.

표 8에 제시된 것과 같이, 식물성 고기는 기존 육류에 비해 18개 범주 중 12개 범주에서 95% 이상 신뢰수준으로 환경영향이 더 적은 것으로 나타났다. 토지 이용, 담수 생태독성, 해양 생태독성의 세 범주에서는 식물성 고기의 확실성 임계치(certainty threshold)가 돼지고기나 닭고기와 비교했을 때만 명확하게 나타났다. 남은 세 범주는 인체 발암/비발암 독성과 물 소비인데, 해당 범주의 데이터 분포는 광범위해서 불확실성이 높다. 본 연구의 데이터 불확실성 분석을 위해 주로 사용한 데이터 세트는 ecoinvent와 World Food LCA 데이터베이스에서 직접 수집한 농업 경작 및 축산업 데이터 세트이다.

일부 영향 범주에서 높은 신뢰 구간으로 비교를 진행하기 위해서는 품질이 더 좋은 데이터가 필요하기는 하지만, 전반적으로는 전 세계 투입 데이터의 가변성과 관계없이 식물성 고기가 기존 육류보다 환경영향 수준이 낮았다. 이러한 결과의 주 원인은 가축을 사육할 때 필요한 사료, 사육 과정에서 발생하는 온실가스 배출, 사육장을 운영할 때 발생하는 환경영향 때문이다("축산업의 육류 생산 과정은 지구온난화에 막대한 영향을 미친다"란 참고). 가축 사육 시 발생하는 환경영향은 줄일 수 있지만, 기술 혁신, 가축 생리(animal physiology), 사료 요구율(Feed Conversion Ratio, FCR)로 인해 제약이 따른다(Shepon 외, 2016).

대체 단백질(예: 식물성 고기 시스템)로 전환하는 방안은 육류 생산이 환경에 미치는 영향을 대폭 줄일 수 있는 쉽고도 강력한 방법이다. 게다가 식물성 고기 산업이 성장할수록 (생산되는 kg당) 환경에 미치는 영향은 더 줄이고 자원 효율성은 더 높일 수 있는 기회가 증가할 것이다.

표 8. 각 육류 시스템 및 영향 범주에 대한 신뢰 구간을 보여주는 LCA 불확실성 분석 데이터

식물성 고기의 환경영향 수준이 낮은 범주	*비교 대상* 소고기	*비교 대상* 돼지고기	*비교 대상* 닭고기
지구 온난화	✓	✓	✓
성층권 오존 파괴	✓	✓	✓
전리 방사선	✓	✓	✓
오존 형성, 인간 건강	✓	✓	✓
미세먼지 형성	✓	✓	✓
오존 형성, 육상 생태계	✓	✓	✓
육상 산성화	✓	✓	✓
담수 부영양화	✓	✓	✓
해양 부영양화	✓	✓	✓
육상 생태독성	✓	✓	✓
광물 자원 고갈	✓	✓	✓
화석 자원 고갈	✓	✓	✓
토지 이용	✓	✓	●
담수 생태독성	●	✓	✓
해양 생태독성	●	✓	✓
인체 발암 독성	●	●	●
인체 비발암 독성	●	●	●
물 소비	●	●	●

신뢰 구간: ✓ >95% ✓ >95% DL 완두, WH 완두; 0% WH 대두 ✓ 50–95% ● <50%

축산업의 육류 생산 과정은 지구온난화에 막대한 영향을 미친다

본 연구에서 분석한 기존 육류 시스템의 환경영향은 주로 축산업, 특히 관련 사료 생산, 온실가스 배출, 분뇨 관리, 사육장 운영 때문인 것으로 나타났다. 축산업, 도축, 분쇄, 수송을 포함한 기존 육류 생산의 각 공정이 지구 온난화에 미치는 영향은 그림 9에 제시되어 있으며, 여기서 축산업에 관한 더 세부적인 내용도 함께 확인할 수 있다.

축산업만 보았을 때, 소고기의 지구 온난화 영향은 92%였으며, 돼지고기의 경우 90%, 닭고기의 경우 66%였다. 비육우 생산에 따른 환경영향은 젖을 뗀 송아지 사육을 기준으로 하였으며, 이는 미국 통계에 따라 집약형 시스템 77%와 목초지에서의 혼합 및 방목형 시스템 23%로 구성된 혼합형 시장을 기반으로 분석되었다.

두 가지 시나리오 모두에서 송아지는 주로 지속적으로 비료를 투입해야 하는 목초지에서 방목된다. 그러므로 젖을 뗀 송아지를 사육하는 과정에서 지구 온난화에 영향을 미치는 원인은 주로 목초지 비료 투입, 소의 장내 발효, 분뇨 관리에 따른 직접적인 사육장 내 배출 때문이라고 볼 수 있다. 돼지고기를 생산할 때 지구 온난화에 영향을 미치는 주원인은 사육장 및 분뇨 저장 시설을 운영하고 이후 분뇨 관리, 사료 생산, 사육을 하는 과정에서 암모니아와 미립물질(particulate) 및 메탄이 직접적으로 배출되기 때문이다. 마지막으로 닭고기를 생산할 때 지구 온난화에 영향을 미치는 원인으로는 특히 옥수수 재배와 같은 사료 생산 과정에서 발생하는 배출과, 암모니아 및 일산화이질소와 같은 대기에 직접적으로 배출되는 배기가스 때문이다. 옥수수 재배는 세 가지 기존 육류 시스템에서 수자원을 소비하는 주요 원인이 되기도 한다.

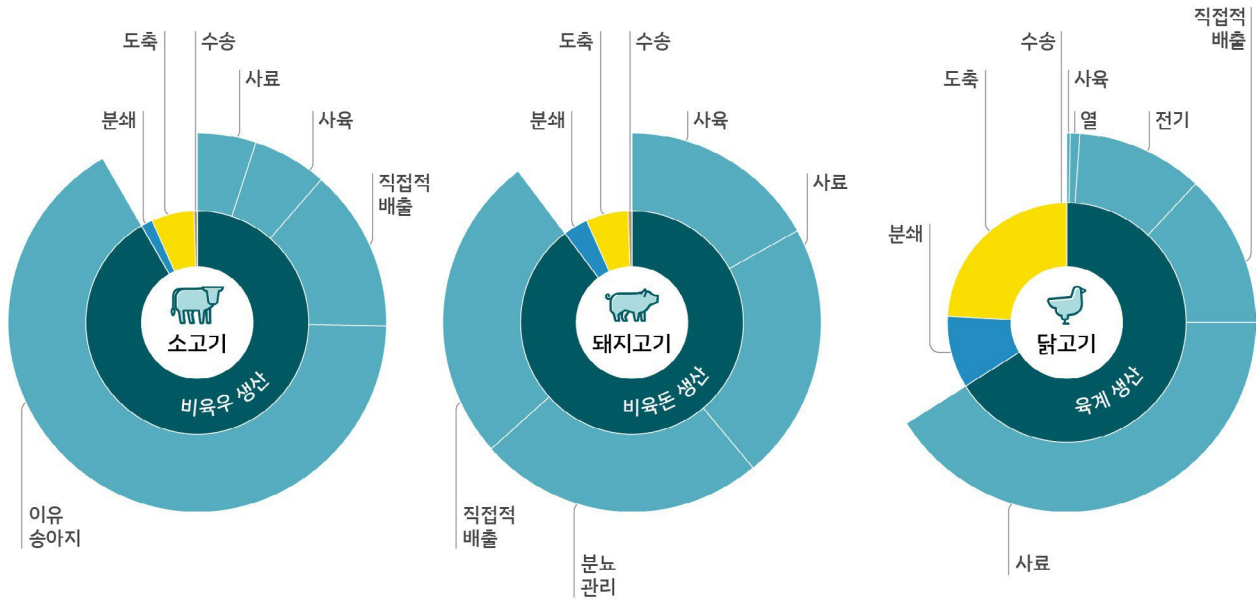


그림 9. 기존 육류(소·돼지·닭고기)가 지구 온난화에 미치는 영향에 대한 공정 기여도 세부 분석

본 연구에서 제시한 것과 같은 집약형 목축 시스템으로 운영되는 축산업은 자원 활용이 고도로 최적화되어 있는 상태이다. 따라서 앞으로 꾸준히 시스템을 개선해 나간다고 해도 기후 변화 완화 목표를 달성하기에는 충분하지 않다. 환경보호기금(Environmental Defense Fund)의 "미국 농림업을 위한 야심 찬 기후 완화의 길: 비전 2030"에 따르면, 미국은 이미 축산업이 고도로 최적화되어 있기 때문에 농업 분야의 최적화를 추가적으로 이룩한다고 해도 농업 분야의 2030 목표인 온실가스 배출 감축을 달성할 수는 없을 것이라고 밝혔다.

구체적으로, 해당 보고서에서는 다양한 작물 및 목축 농업 전략(예: 분뇨 관리 개선, 가축의 장내 메탄 배출 감소, 질소 관리 개선)으로 달성할 수 있는 온실가스 감축 가능성을 측정하였고, 그 결과 이 야심 찬 전략만으로는 미국의 농림 분야 온실가스 목표치인 33%, 즉 2억 4,700만 톤(247 MMT) CO_2e을 감축하지 못할 것이라고 판단했다.

각기 다른 투입물과 생산 방식을 이용한 식물성 고기 생산의 환경영향 비교

ISO 인증 LCA 보고서는 가장 많이 사용하는 투입물과 공정 방식을 서로 비교해 보고, 실제 상업 수준의 데이터를 사용하여 식물성 고기의 환경영향을 특히 세부적인 관점에서 분석했다. 그 결과, 식물성 고기의 재료와 생산 방식이 달라지더라도 기존 육류에 비해 식물성 고기가 일관적으로 더 큰 환경편익을 제공하는 것으로 나타났다.

식물성 고기의 투입물과 생산 방식이 달라지더라도 환경편익은 크다.

재료 선택이 환경에 미치는 영향

본 분석에서 다룬 식물성 고기 시스템을 제조할 때 들어가는 재료에는 다양한 수준으로 조직화되고 압출된 식물성 단백질과 물, 같은 양(질량)의 코코넛 오일, 카놀라 오일, 밀 글루텐, 향신료, 감자 전분이 있다(표 3 참고).

압출물은 본 연구에서 다룬 식물성 고기 제조법의 주재료이자 18개 영향 범주 중 9개 범주에서 식물성 고기의 환경영향에 가장 큰 기여를 하는 재료이다. 그러나 다른 재료 또한 환경영향에 큰 기여를 하기도 하는데, 가끔 특정 범주에서 심지어는 투입되는 양이 많지 않아도 압출물보다 환경에 미치는 기여도가 더 큰 재료가 있다.

코코넛 오일과 카놀라 오일은 제조 시 각각 4%만 들어가는 재료라는 것을 생각해 보면 식물성 고기의 환경영향에 지나치게 기여한다고 볼 수 있다. 코코넛 오일의 경우 지구 온난화와 토지 이용 범주에서 압출물만큼 기여하고, 다른 많은 범주에도 상당한 기여를 하고 있다(그림 10). 카놀라 오일은 재배 과정에서 발생하는 배출로 인해 해양 부영양화, 미세먼지 형성 등의 범주에서 과도하게 큰 영향을 미친다. 감자 전분과 밀 글루텐 또한 특정 범주(특히 물 소비량)에서 과도하게 큰 기여를 하고 있다.

사진 제공 줄리 호, 도나 자말

이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 작물 생산을 효율적으로 개선하고, 비료와 살충제 사용 및 관개 이용을 줄이며, 대체 오일 재료를 사용하면 코코넛 오일과 카놀라 오일이 미치는 과도한 환경영향을 줄여 주므로 식물성 고기의 전반적인 환경영향을 더 감소시킬 수 있다. 식물성 고기 시스템 사이의 총 환경영향 차이는 압출 단백질에 따라 결정되는데, 그 이유는 세 가지 제조법에서 압출 단백질을 제외한 다른 재료들은 같은 비율로 투입되기 때문이다.

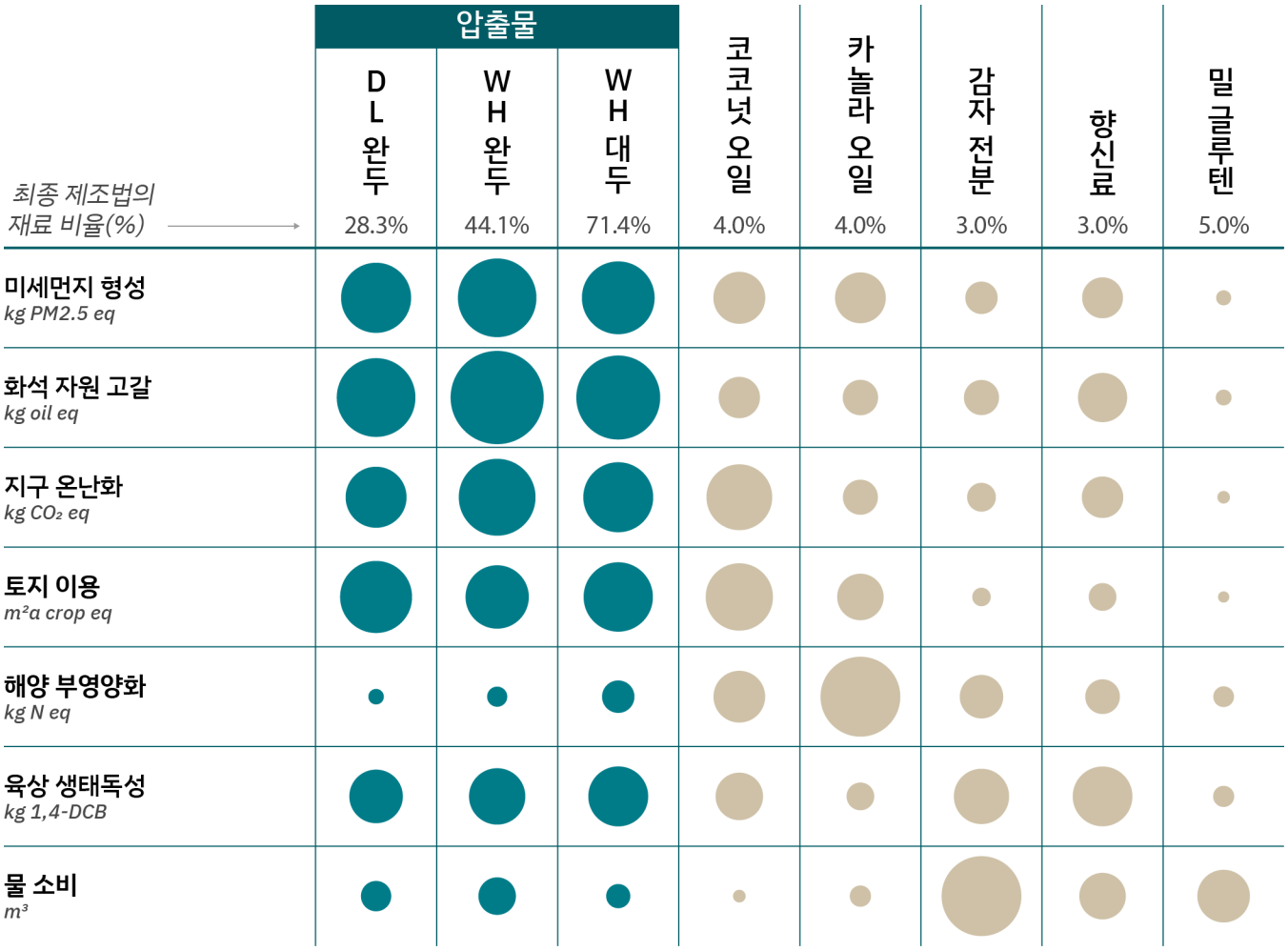


그림 10. 각 식물성 고기 재료의 상대적 영향. 압출물(DL 완두, WH 완두, WH 대두) 중 하나와 부재료(코코넛 오일, 카놀라 오일, 감자 전분, 향신료, 밀 글루텐)가 결합되어 제시된 범주에서 식물성 고기의 총 영향을 구성함. 각 최종 제조법에서 남는 재료의 %는 물이다.

최적화를 위한 핵심 기회는 압출과 분리획득 방식에 있다

본 연구에서는 세 가지 식물성 단백질 압출 방식의 환경영향을 검토하고, 세 가지 생산 단계의 기여도를 비교해 보았다.

1 단계: 주요 단백질 작물(완두/대두)의 재배

2 단계: 분리획득

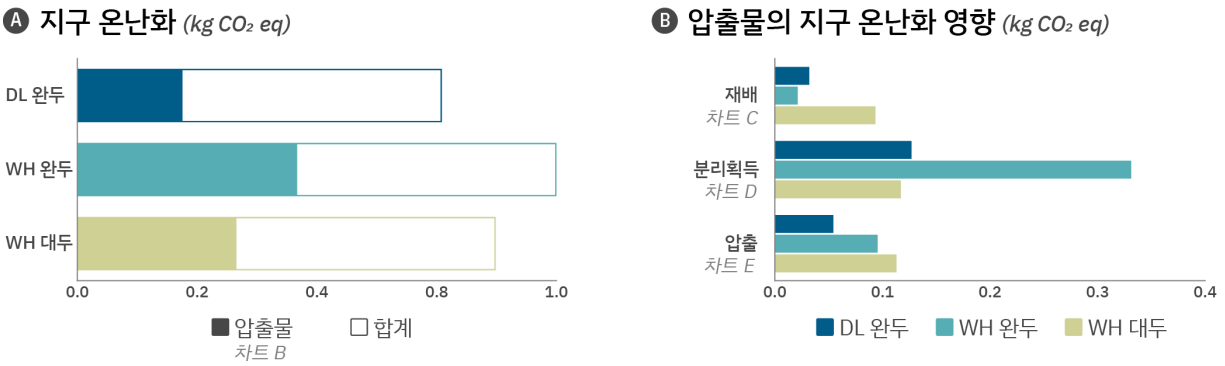
3 단계: 압출

각 단계는 또다시 세분화되어 각기 다른 공정을 거치고, 다른 유틸리티 및 화학물질을 이용한다. 각 식물성 고기 시스템이 압출물을 생산하기 위해 여러 단계를 거칠 때 지구 온난화에 미치는 영향은 그림 11에서 확인할 수 있다. 18개 범주에서 식물성 고기 제조법을 상세히 비교한 결과는 LCA 보고서 원본의 Section 5.7.2에서 확인할 수 있다.

분석 결과, 전체적으로 가장 큰 영향을 미친 압출물은 WH 완두였으며, 다음으로는 WH 대두, DL 완두 순이었다 (그림 11A). 그림 11B에서 보이는 것과 같이 재배, 분리획득, 압출 공정이 압출물의 영향에 기여하는 정도는 제조법에 따라 달랐다. 그 이유는 최종 제품에 15g의 단백질을 포함하기 위해 필요한 공급원료 작물, 분리/농축 단백질, 압출물의 양이 제조법마다 다르기 때문이다(표 9). 게다가 공정 방식, 관행, 생산량, 공급 원료 소비, 단백질 함량 등이 각각 다르기 때문에 재배, 분리획득, 압출 공정 전반에서 상충관계(tradeoff)가 존재한다.

표 9. LCA에서 분석한 식물성 고기의 원재료 공급원료, 단백질 재료, 최종 압출물 무게, 100g당 단백질 함량

시스템	공급원료	단백질 재료	압출물 무게	단백질 함량 *압출물 100g 당*
DL 완두	1.75 kg (완두)	0.29 kg PPC	0.28 kg	15 g
WH 완두	1.42 kg (완두)	0.19 kg PPI	0.44 kg	15 g
WH 대두	0.42 kg (대두)	0.22 kg SPC	0.71 kg	15 g



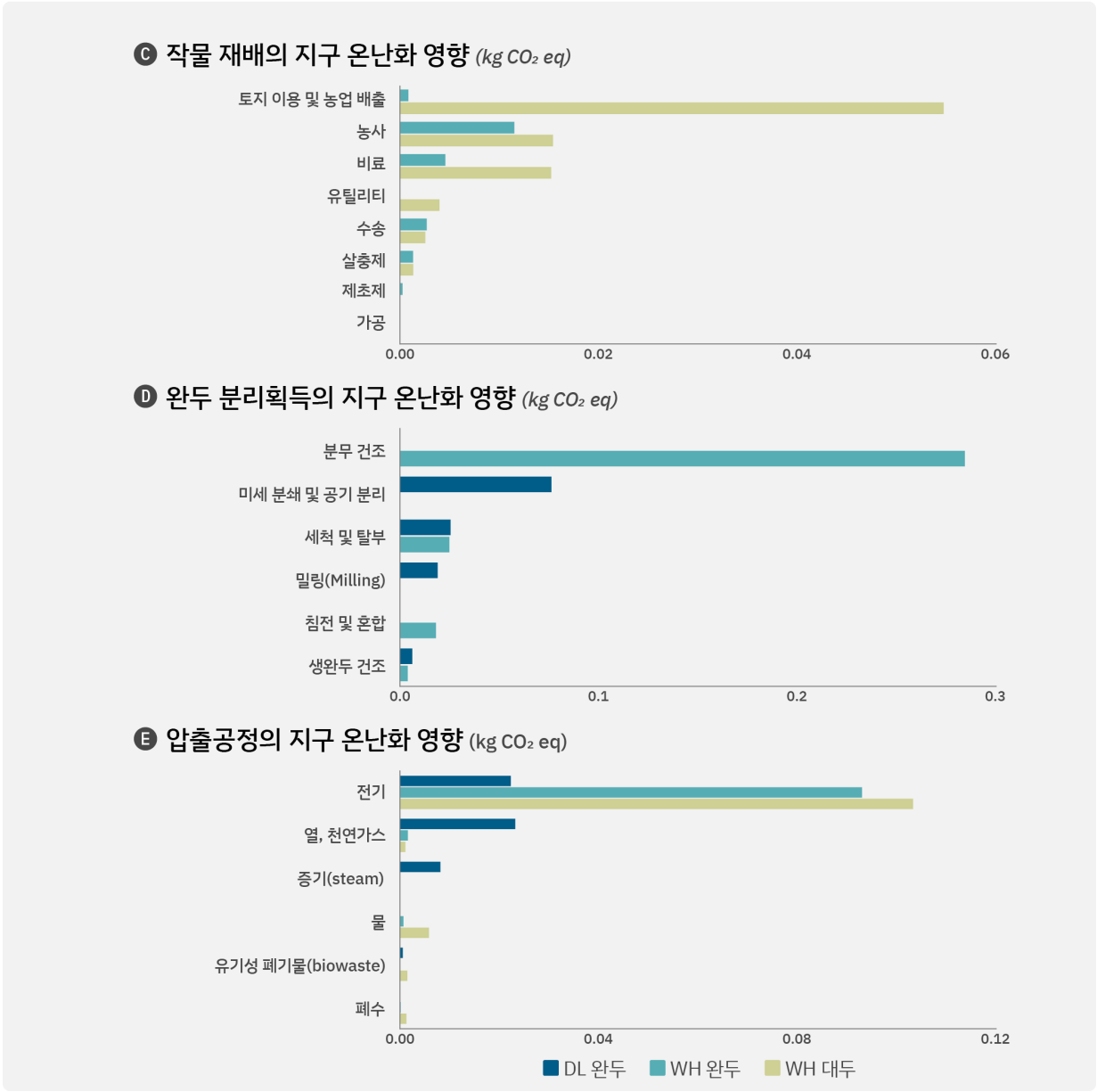


그림 11. 지구 온난화 영향: (A) 식물성 고기 시스템, (B) DL/WH 완두 및 WH 대두의 재배·분리획득·압출, (C) WH 완두 및 WH 대두의 작물 재배, (D) DL/WH 완두의 분리획득 공정 단계, (E) DL/WH 완두 및 WH 대두의 압출공정 유틸리티 사용

대두를 재배할 때는 완두를 재배할 때보다 공급원료를 덜 사용하기는 하지만, 지구 온난화에 미치는 영향은 더 크다. 그 이유는 대두를 재배할 때는 직접적인 토지 이용도 및 농업 배출량이 더 높고 자원 집약적인 방식으로 수확하기 때문이다(그림 11C). 분리획득 단계에서는 WH 완두가 지구 온난화에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 주원인은 WH 완두가 에너지 집약적 분무 건조 공정을 거치기 때문이다. DL 완두의 경우 분무 건조 방식으로 건조하지 않기 때문에 관련 환경영향 기여도가 더 낮게 나타난다. 흥미롭게도 WH 대두의 지구 온난화 영향은 DL 완두와 비슷하게 나타났지만, 이는 대두의 작물 투입 질량이 더 낮은 수치로 설정되었기 때문이다(대두 0.42 kg vs. 완두 1.7 kg). 그리고 대두와 완두에서 고수분 압출 공정이 저수분 압출 공정보다 지구 온난화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 고수분 압출 공정에 더 많은 전기와 열이 필요하기 때문이다. 하지만 중요한 것은 식물성 고기 사이에 이러한 개별적인 영향의 차이가 존재함에도 불구하고, 기존 육류 생산 공정과 비교해 보면 환경에 영향을 미치는 정도가 현저히 적다는 것이다.

건식/습식 분리획득 방식과 고/저수분 압출 방식은 모두 식물성 고기를 만들 때 필수적인 질감과 단백질 함량을 갖추는 데 중요한 역할을 한다. 제시된 데이터는 공정들 사이의 우위를 가리기 위함이 아니라, 그보다는 압출 및 분리획득 공정에서 에너지 효율성을 높이기 위한 기회가 될 수 있다는 점에 초점을 두고 있다. 관련 상세 내용은 뒷장에서 확인할 수 있다.

압출물 생산 시 발생하는 환경영향은 에너지원과 작물 재배 지역에 따라 달라진다

전기 소비량은 분리획득 및 압출 단계에서 영향을 미친다. 민감도 분석을 실시한 결과, 재생에너지로 전환하면 기존 에너지 효율을 점진적으로 개선하는 것보다 더 높은 효과를 낼 수 있다고 밝혀졌다. 중서부신뢰도기구(Midwest Reliability Organization, MRO)의 파워 그리드에서 전력을 10% 줄인다고 하면, 환경 영향 감소에 기여하는 효과는 평균적으로 2% 이하인 반면, 태양 에너지로 전환하면 9개 영향 범주에서 식물성 시스템의 영향이 10~58% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이때 MRO 그리드는 52%의 화석 연료를 석탄 및 천연가스에서 가져오므로, 화석 연료 소비와 관련 있는 범주에서 환경영향이 줄어든다. 예를 들어, 전리 방사선(ionizing radiation)은 화석 연료 소비와 관련이 있는 범주이기 때문에 식물성 고기 시스템을 재생 에너지로 전환하면 감소 효과가 가장 크게 나타날 가능성이 있다(그림 12).

식물성 고기의 전리 방사선 영향 베이스라인은 평균적으로 기존 육류보다 86% 낮게 나타났지만, 태양 에너지로 생산된 식물성 고기의 경우에는 기존 육류 대비 영향을 94%까지 줄일 수 있다.

따라서, 식물성 고기는 기존 육류보다 이미 지속가능성이 상당히 높으며 자원 효율성도 매우 높으나, 태양 재생 에너지로 전환할 경우 특히 화석 연료 소비와 관련된 범주에서 기존 육류 대비 환경편익을 더 많이 얻을 수 있다.

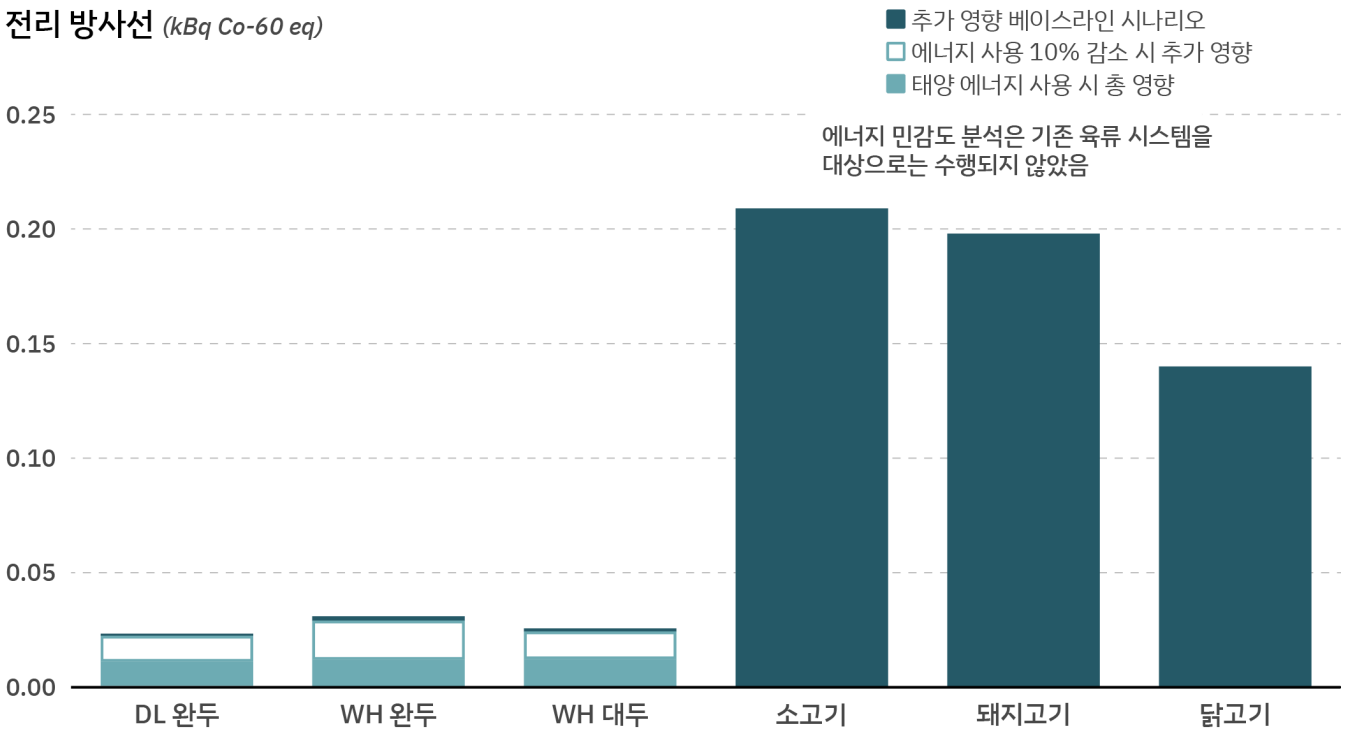


그림 12. LCA 연구에서 평가한 육류 생산 시 전리 방사선 베이스라인 대비 태양 에너지를 사용하거나 에너지를 10% 줄인 경우의 전리 방사선(kBq Co-60 eq) 영향 비교.

작물 재배는 식물성 고기의 압출물 생산과 관련한 환경영향에 중대한 기여를 할 수 있다. 환경에 영향을 미치는 주원인은 작물 유형 및 관련 재배 활동에 따라 달라질 수 있지만, 직접적인 토지 이용을 최적화하고 콤바인 수확(combine harvesting)을 하면 어느 지역이든 작물 재배 시 발생하는 환경 발자국을 감축할 수 있다. 작물 재배와 관련한 또 다른 환경 최적화 전략으로는 경작 시 디젤 소비량을 줄이고, 비료/살충제의 생산 및 배포 방식을 개선하는 방법이 있다. 한편, 작물을 재배하는 지역마다 재배 관행, 농업 생산량, 토질 조건 등의 영향 차이를 파악하기 위해 민감도 분석이 수행되었다.

캐나다에서 재배한 완두의 베이스라인 시나리오는 프랑스 및 독일에서 재배한 완두와 비교되었으며, 미국에서 재배한 대두는 캐나다 및 브라질에서 재배한 대두와 비교되었다 (그림 13). 해양 부영양화 및 물 소비 범주에서 완두와 대두 모두 대체 작물의 재배 지역에 따라 가장 큰 차이를 보였다. 이러한 결과가 나타난 원인은 해당 지역에서 살포하기 전 물에 희석해서 사용해야 하는 비료와 살충제 소비량이 높았기 때문이다. 하지만 환경영향을 많이 미치는 작물 재배 지역이라고 하더라도, 식물성 고기가 기존 육류보다 평균적으로 해양 부영양화를 84% 덜 유발하고, 물은 82% 덜 소비한다. 베이스라인 시나리오에서는 그 영향이 각각 93%, 95% 더 적었다.

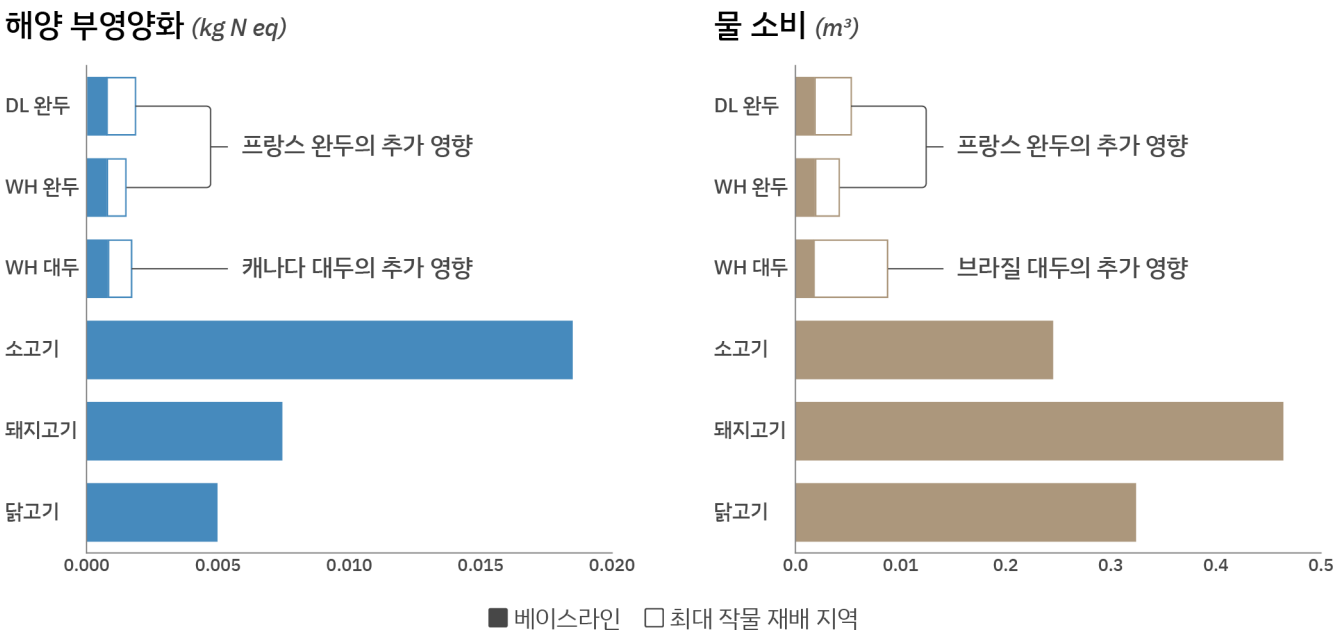


그림 13. 식물성 고기 제조에 쓰이는 작물의 재배 지역별 환경영향(캐나다 완두(베이스라인, DL/WH 완두), 프랑스 완두, 미국 대두(베이스라인, WH 대두), 캐나다 대두)

식물성 고기의 환경편익을 최대화하기 위해서는 기술 최적화와 확장이 필요하다

식물성 고기 생산의 가치 사슬 전반에서 환경편익을 극대화하고자 하는 연구자 및 제조업체들에게 작물 재배 최적화, 대체 지방 개발, 부산물의 업사이클링은 식물성 고기의 지속가능성을 높이기 위한 좋은 기회가 된다.

대두와 완두 재배 방식을 개선할 수 있는 방법으로는 특정 재배 지역에서 토지 이용 변화와 관련된 배출을 피하고, 살충제와 물 소비를 줄이는 것이 있다. 이는 현재 완두의 수요가 대두보다 더 많기 때문에 완두 단백질 함량과 분리 효율성을 더욱 최적화할 수 있는 기회가 되기도 한다. 완두 및 대두 시스템 생산에 이용되는 토지는 그 규모가 비슷하다(완두: 3.87 ton/ha, 대두: 2.76 ton/ha). 토지 이용도는 재배 수확량을 늘리면 더욱 감소시킬 수 있다. 그러나 대체로 사람의 식용을 위해 완두와 대두를 재배하는 것이 가축을 위해 작물을 생산하는 것보다 더 효율적이다.

식물성 고기 생산을 확대하기 위해서는 재료 선택 또한 중요하다. 그림 10에 제시되어 있듯이, 코코넛 오일과 같은 특정 재료는 필요한 양이 적지만 상대적으로 큰 영향을 미친다. 코코넛 오일은 포화 지방 함량이 높고 상온에서 반고체형 농도(semi-solid consistency)를 유지하기 때문에 동물성 지방의 기능적 특징을 유사하게 구현해 낼 수 있어 식물성 고기를 제조할 때 널리 사용된다.

그러나 GFI의 식물성 고기 생산량 모델링 분석에서도 확인할 수 있듯이, 식물성 고기 산업에서 고기를 2,500만 톤(25 MMT) 생산하기 위해서는 전 세계 코코넛 오일 공급량의 16%가 필요하다. 만약 코코넛 오일이 식물성 고기 생산 시장에서 현재의 지배적인 수요량을 유지한다면, 공급망 병목 현상이 발생하여 산업 확장을 방해할 수 있다. 따라서 경작자, 생산자, 제조업체는 젤(gel), 에멀전(emulsion), 발효 방식 및 배양 방식으로 생산된 지방처럼 코코넛 오일의 기능보다 더 좋으면서도, 환경에 미치는 영향은 더 적은 대체 지방을 신속히 찾아 다양화해야 한다.

표 10. 식물성 고기 시스템 부산물의 질량/경제적 할당 인자

시스템 및 공정		주요 제품 및 부산물	질량 할당 인자 (%)	경제적 할당 인자 (%)
DL 완두	탈부	탈부된 완두	82.80	89.06
		완두 껍질	17.20	10.94
	공기 분리	농축 단백질	23.38	52.90
		전분	76.62	47.10
WH 완두	탈부	탈부된 완두	73.14	89.06
		껍질	26.86	10.94
	침전	분리 완두 단백	21.73	54.97
		전분	34.33	37.07
		수분함유 글로불린 슬러리	43.94	7.96
WH 대두	대두 오일 추출	대두박	19.49	35.87
		대두 오일	80.51	64.13
	습식 분리획득	농축 대두 단백	62.54	97.41
		미세 대두	7.24	1.76
		대두 당밀	30.22	0.82

마지막으로, 식물성 고기 생산에서 부산물 또는 측류(sidestream) 공정을 통해 가치를 창출함으로써 더 많은 고부가 가치 상품에 환경영향을 할당하고 육류 생산에 할당되는 영향을 더욱 감소시킬 수 있다. 기존 육류 및 식물성 고기 부산물의 질량 및 경제적 할당 인자는 표 10에 제시되어 있다. 높은 질량 할당과 낮은 경제적 할당을 통해 식물성 단백질 부산물에 가치를 부여할 수 있는 방법은 존재한다.

완두의 수분이 함유된 글로불린 슬러리와 대두 당밀이 그 예다. 이와 더불어 대두 및 완두 생산의 측류에서 발생하는 부산물을 가지고 다른 대체 단백질 기술에도 활용할 수 있다. 그 예로, 발효 방식으로 만든 고기와 배양육에 사용되는 공급원료 또는 성장 배지 재료(growth media ingredient)가 있다. 관련 상세 내용은 GFI가 최근에 분석하여 발표한 상품 작물의 측류에서 파생되는 부산물을 활용한 대체 단백질 개발에서 확인할 수 있다.

식물성 고기 생산을 확장하면 환경편익을 극대화할 수 있다

LCA 보고서에서는 식물성 고기 산업이 확장하게 되면 세계 식량 체계에 변화를 가져오고, 그 결과로 상당한 환경편익을 얻을 가능성이 있다고 입증했다.

예를 들어, 보고서에 따르면 식물성 고기의 지구 온난화 영향이 소고기보다 15~20배 정도 적은 것으로 나타났다. 지구 온난화 영향과 생산 규모 사이의 선형 상관관계를 가정한다고 하면,[2] 소고기 대신 식물성 고기 5백만 톤(5MMT)(미국의 현재 연간 소고기 생산의 40%, 연간 미국 전체 육류 생산의 11%, 전 세계 연간 육류 생산의 1.4%[3])을 생산할 시 연간 약 6,800만 톤(68 MMT) CO_2e의 배출량을 상쇄할 수 있다.[4] 이는 캘리포니아의 승용차 약 1,400만 대가 1년에 배출하는 CO_2 배출량보다 많은 수치이다.[5] 증가하는 육류 수요를 충당하기 위해 식물성 고기 생산량이 증가할 것이라는 점을 고려할 때, 이와 같은 편익은 더 증가할 것이며, 동시에 세계 단백질 공급 시장의 지속가능성을 대폭 높일 수 있을 것이다.

식량을 위한 작물 재배를 비롯한 생산 및 유통 방식을 지속 가능한 형태로 빠르게 대규모로 전환하는 것은 그럴 만한 가치가 있으며 실제로도 실현 가능한 일이다. 하지만 이를 이루기 위해서는 다양한 이해관계자들의 지원, 특히 정부의 지원이 필요하다. 세계적으로 식물성 고기의 환경편익을 실현하기 위해서는 환경 발자국을 낮게 유지하면서도 현재 식물성 고기의 수요와 생산 규모를 엄청난 수준으로 확대해야만 한다. 정책이 신속한 대체 단백질 생산의 확대에 어떻게 기여하는지에 관한 더 자세한 내용은 GFI의 2023 대체 단백질에 관한 글로벌 정책 현황과 본 문서와 같이 공개된 정책 요약 보고서에서 확인할 수 있다.

연구에 따르면 식물성 고기의 지구 온난화 영향은 소고기보다 15~20배 적다.

2 규모와 선형적 상관관계가 있다는 LCA 결과는 생산 결정을 내리기 전에 신중히 평가해 보아야 한다. 여기서는 사고 실험을 통해 광범위한 확장 영향을 추론했으므로, 이는 사실에 의거하거나 엄격한 평가로 해석되어서는 안 된다.

3 미국에서는 2022년 기준 약 1,220억 파운드(5,530만 톤) 상당의 고기를 생산했다. 더 자세히 살펴보면 육계 593억 파운드, 칠면조 66억 6천만 파운드, 기타 닭고기 종류 1억 6,800만 파운드, 돼지고기 270억 파운드, 소고기 284억 파운드, 양고기 종류 1억 3,620만 파운드, 송아지 고기 5,870만 파운드를 생산했다(가금류 및 가축에 관한 데이터). 전 세계 연간 육류 생산은 약 3억 5천만 톤(350 MMT)이다.

4 500만 톤의 소고기를 식물성 고기로 대체할 시 추정 CO_2e 상쇄분은 생산된 소고기 1kg당 14.5kg CO_2e, 생산된 식물성 고기 1kg 당 0.75~0.98 kg CO_2e라고 가정하여 계산했다. 계산적 차이를 고려하면 고기 1kg당 13.52~13.75kg CO_2e 절감이므로, 즉 고기 500만 톤(5 MMT)당 대략 6,800만 톤~6,900만 톤 CO_2e(68-69 MMT CO_2e) 절감으로 볼 수 있다.

5 2021년 기준 캘리포니아 승용차가 연간 내뿜는 CO_2 배출량은 6,530만 톤(65.3 MMT) CO_2 상당이며, 이는 해당 지역에 등록된 차량 1,420만 대와 승용차 한 대당 내뿜는 이산화탄소 배출량 4.6메트릭톤 CO_2 을 곱한 값이다.

결론

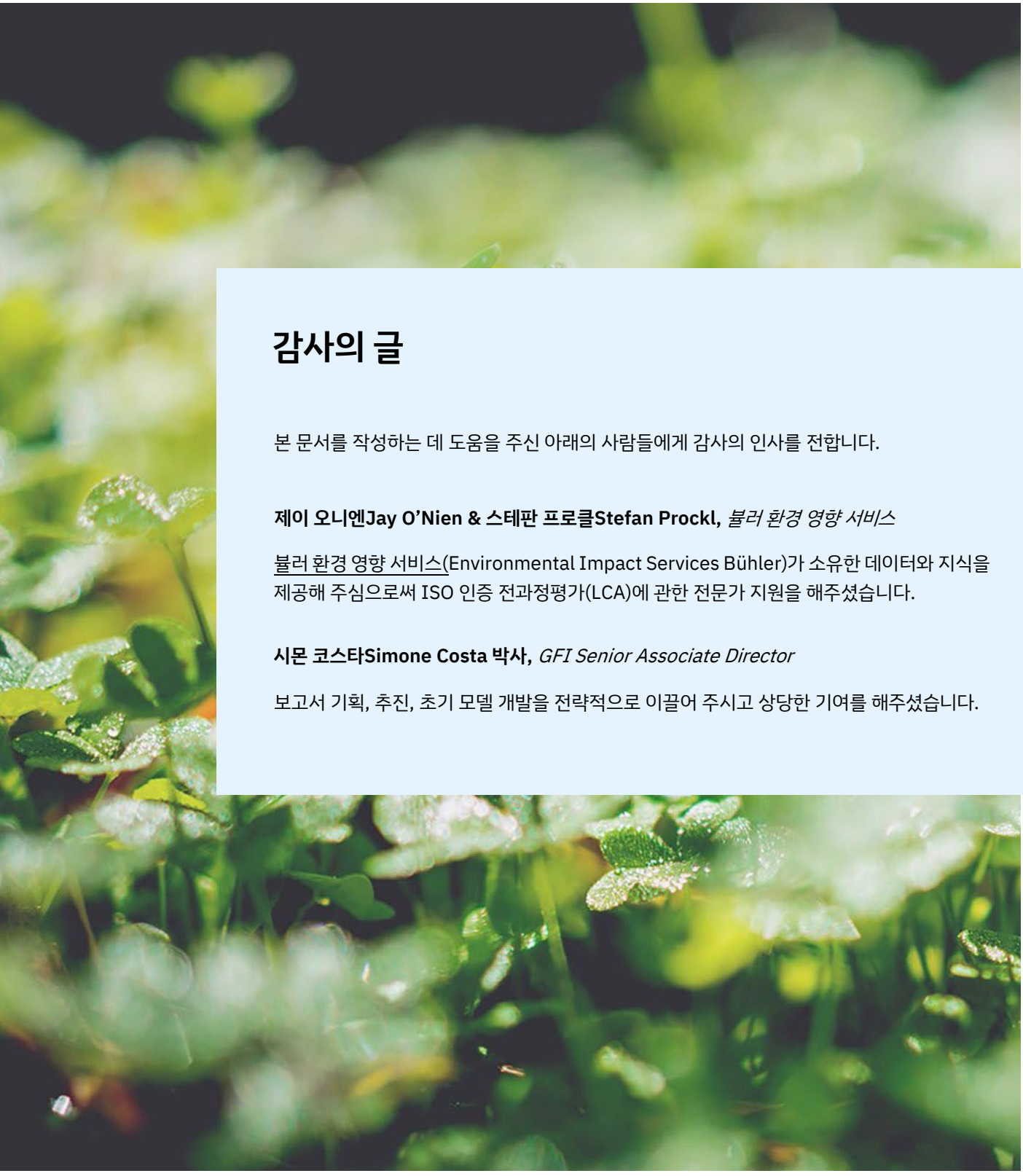
ISO 인증 LCA 보고서는 식물성 고기 생산으로 전환할 시 모든 범주에서 육류 생산이 유발하는 환경영향을 평균적으로 79~99.8%까지 감소시킬 수 있다는 것을 입증하였다. 식물성 고기의 영향은 소고기보다는 81~99.9% 적었으며, 돼지고기보다는 60~97%, 닭고기보다는 10~94% 적었다. 닭고기의 경우 토지 이용 범주를 제외하면 식물성 고기의 평균 영향이 64~94% 더 적었다.

본 LCA 보고서에서 제시된 기존 육류 시스템은 고도로 최적화된 집약형 운영 방식이다. 실제 대다수의 세계 축산 운영은 재배, 배출, 분뇨 관리, 사육장 운영 등으로 인해 환경에 더 많은 영향을 미치고 있는데, 이와 비교하면 본 연구의 기존 육류 시스템은 환경에 미치는 영향 수준이 더 낮다고 볼 수 있다. 기존 육류 시스템을 점진적으로 개선하는 것도 가능하기는 하지만, 이러한 개선만으로는 증가하는 육류 수요를 지속 가능한 방식으로 충족하는 데 필요한 영향 감소를 달성할 수 없다.

식물성 고기는 지속 가능한 농업과 식량 체계를 실현하는 데 있어 실질적인 해결책이지만, 환경편익을 최대로 끌어내기 위해서는 현재 연간 세계 식물성 고기 소비량인 약 100만 톤(1.0 MMT)보다 몇 배나 더 많은 양을 소비해야 한다. 고단백 작물 품종, 대체 지방 재료 생산, 새로운 재료 공정(예: 냉압착 오일과 단백질 정제를 위한 막여과(membrane filtration) 방식) 혁신적인 질감 형성(전단 세포를 이용한 질감 형성 및 회전 기법 단백질(spinning protein) 개발 등의 기술이 발전하여 식물성 고기의 생산 규모, 맛, 비용이 개선되면, 식물성 고기 생산의 긍정적인 환경편익을 유지하는 것이 업계의 중요한 과제로 떠오르게 될 것이다. 따라서 업계는 발전을 거듭할수록 새로운 전과정평가를 실시하여 식물성 고기 생산의 환경편익을 꾸준히 평가해야 한다.

식물성 고기의 환경편익을 최대화하고자 하는 제조업체에는 기술 진보, 새로운 제조법, 부산물에 대한 가치 부여, 규모의 효율성 측면에서 많은 기회가 열려 있다. 이뿐만 아니라 새로운 원재료 개발, 측류(sidestream) 공정의 업사이클링, 에너지 집약적 공정 축소 등과 같은 다른 기회들도 식물 기반의 공급 사슬의 회복성과 지속가능성을 강화할 수 있다.

전체적으로, LCA 보고에서는 식물성 고기와 기존 육류가 환경에 미치는 영향의 원인을 깊이 통찰하여 식물성 고기의 환경 사례를 분석하고 있다. LCA는 공정한 분석 방식으로, 소비자와 기업이 상품과 서비스를 선택할 때 환경 발자국에 어떤 영향을 미치는지 더 잘 이해할 수 있게 돕는다. 본 LCA와 같은 연구는 정책결정자, 투자자, 기업, 소비자가 지속 가능하고 안전한 농업 및 식품 공급망을 구축하고 지원할 수 있는 도구로써 활용되어야 한다. 본 문서에 요약된 내용은 ISO 인증을 받은 포괄적 LCA에 그 기반을 두고 있으며, 원본 LCA는 gfi.org에서 확인할 수 있다. 요약 데이터는 gfi.org의 상호작용형 대시보드에서 확인할 수 있으며 다운로드 가능하다.



감사의 글

본 문서를 작성하는 데 도움을 주신 아래의 사람들에게 감사의 인사를 전합니다.

제이 오니엔Jay O'Nien & 스테판 프로클Stefan Prockl, *뷸러 환경 영향 서비스*

뷸러 환경 영향 서비스(Environmental Impact Services Bühler)가 소유한 데이터와 지식을 제공해 주심으로써 ISO 인증 전과정평가(LCA)에 관한 전문가 지원을 해주셨습니다.

시몬 코스타Simone Costa 박사, *GFI Senior Associate Director*

보고서 기획, 추진, 초기 모델 개발을 전략적으로 이끌어 주시고 상당한 기여를 해주셨습니다.

참고문헌

Bomkamp, C., S. C. Skaalure, G. F. Fernando, T. Ben-Arye, E. W. Swartz, and E. A. Specht.“3D 배양 육의 바이오 소재 지지체: 전망과 도전과제(Scaffolding Biomaterials for 3D Cultivated Meat: Prospects and Challenges)” Advanced Science 9, no. 3 (2022. 1.): 2102908. https://doi.org/10.1002/advs.202102908.

Bonales, J., J. Barrera-Ramirez, A. Sojo, N. Ayer, 어스시프트글로벌(Earthshift Global). 식물성 고기와 기존 육류에 대한 비교 전과정평가(Comparative Life Cycle Assessment of Plant-Based Meats and Conventional Animal Meats). 워싱턴, D.C.: 굿 푸드 인스티튜트(GFI), 2024. https://doi.org/10.62468/casv3213.

Crippa, M., E. Solazzo, D. Guizzardi, F. Monforti-Ferrario, F. N. Tubiello, A. Leip. “인간이 만든 세계 온실가스 배출 1/3은 식량 체계에 책임이 있다(Food Systems Are Responsible for a Third of Global Anthropogenic GHG Emissions).” Nature Food 2, no. 3 (2021. 3.): 198–209. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9.

Dettling, J., Q. Tu, M. Faist, A. DelDuce, S. Mandlebaum. 식물성 식품과 육류 식품에 관한 비교 전과정평가(A Comparative Life Cycle Assessment of Plant- Based Foods and Meat Foods). 매사추세츠 보스턴: Quantis, 2016. https://www.morningstarfarms.com/content/dam/NorthAmerica/morningstarfarms/pdf/MSFPlantBasedLCAReport_2016-04-10_Final.pdf

Gleick, P. H., H. Cooley. 세계의 물(The World’s Water). 워싱턴, D.C.: Island Press, 2011.

Heller, I, M. Salim. 비욘드 버거 3.0 전과정평가 (Beyond Burger 3.0 Life Cycle Assessment). 네덜란드 하우다: Blonk Consultants, 2023. https://investors.beyondmeat.com/static-files/758cf494-d46d-441c-8e96-86ddb57fbed4.

Khan, S., C. Loyola, J. Dettling, J. Hester, R. Moses. 임파서블 버거와 기존 소고기 분쇄육 버거에 대한 비교 환경 LCA(Comparative Environmental LCA of the Impossible Burger with Conventional Ground Beef Burger). 매사추세츠 보스턴: Quantis, 2019. https://assets.ctfassets.net/hhv516v5f7sj/4exF7Ex74UoYku640WSF3t/cc213b148ee80fa2d8062e430012ec56/Impossible_ foods_comparative_LCA.pdf.

Nijdam, D., T. Rood, H. Westhoek. “단백질의 가격: 동물성 식품과 그 대체품에 대한 전과정평가 중 토지 이용 및 탄소 발자국 검토(The Price of Protein: Review of Land Use and Carbon Footprints from Life Cycle Assessments of Animal Food Products and Their Substitutes).” Food Policy 37, no. 6 (2012. 12.): 760–70. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.08.002.

Poore, J., T. Nemecek. “생산자와 소비자를 통한 식품의 환경영향 감소(Reducing Food’s Environmental Impacts through Producers and Consumers.)” Science 360, no. 6392 (2018. 6.): 987–92. https://doi.org/10.1126/science.aaq0216.

Ritchie, H., P. Rosado, M. Roser. “식품 생산이 미치는 환경영향 (Environmental Impacts of Food Production).” Our World in Data, 2022. https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food.

Saerens, W., S. Smetana, L. Van Campenhout, V. Lammers, V. Heinz. “압출가공된 고기로 만든 버거 패티에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment of Burger Patties Produced with Extruded Meat Substitutes).” Journal of Cleaner Production 306 (2021. 7.): 127177. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127177.

Sha, L., Y. L. Xiong. “재구성 고기의 식물성 단백질 기반 대체품: 과학, 기술, 도전과제 (Plant Protein-Based Alternatives of Reconstructed Meat: Science, Technology, and Challenges).” Trends in Food Science & Technology 102 (2020. 8.): 51–61. https:/doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022.

Shepon, A., G. Eshel, E. Noor, R. Milo. “미국 내 에너지 및 단백질의 사료-식품 전환 시 효율성과 식습관 변화에 따른 식량안보 효과(Energy and Protein Feed-to-Food Conversion Efficiencies in the US and Potential Food Security Gains from Dietary Changes).” Environmental Research Letters 11, no. 10 (2016. 10.): 105002. http://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/105002.

Smetana, S., A. Profeta, R. Voigt, C. Kircher, V. Heinz. 2021. “버거용 대체육: 영양 점수, 감각 테스트, 전과정평가(Meat Substitution in Burgers: Nutritional Scoring, Sensorial Testing, and Life Cycle Assessment).” Future Foods 4 (2021. 2.): 100042. https://doi.org/10.1016/j. fufo.2021.100042.

Wang, Y., I. J. M. de Boer, U. M. Persson, R. Ripoll-Bosch, C. Cederberg, P. J. Gerber, P. Smith, C. E. van Middelaar. “전 세계 반추동물의 가스 배출을 상쇄하기 위해 토양 산소 격리를 할 때 발생하는 위험 요소(Risk to Rely on Soil Carbon Sequestration to Offset Global Ruminant Emissions.” Nature Communications 14, no. 1 (2023. 11.): 1–9. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43452-3.