

주요 시사점 및 향후 방향에 관한 요약 보고서

배양육의 상업적 생산에 대한 예상 전과정평가 및 기술경제성 평가

2021년 3월 9일

엘리엇 스위츠 박사(Ph.D.)

Senior Scientist

굿 푸드 인스티튜트(GFI)

CE Delft에 의해 수행된 전과정평가는 2023년 1월에 업데이트 및 게시되었다. 본래의 개괄적인 결론은 그대로이나, 세부적인 수치가 업데이트 및 재검토되었다. 배양육의 환경영향에 관한 최신 결과를 담은 [업데이트 버전의 연구는 여기](#)에서 확인할 수 있다.

핵심 요약

미래의 대규모 배양육(Cultivated Meat) 생산 시설을 모델링하여 전과정평가(Life Cycle Assessment, 이하 LCA) 및 기술경제성 평가(Techno-Economic Assessment, 이하 TEA)¹를 수행한 결과, 배양육은 2030년까지 전반적인 환경영향 및 탄소 발자국을 감소시키는 동시에 일부 형태의 기존 육류 대비 가격 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 나타났다. 해당 LCA 및 TEA 보고서는 실제 활동 중인 업계 파트너로부터 데이터를 수집하여 수행된 최초의 연구이다. 파트너로는 배양육 공급망 내 15개사가 참여했으며, 그중 5개의 배양육 제조업체에서 데이터 및 전문 지식을 제공했다. LCA 및 TEA 보고서의 연구 설계, 데이터 분석, 작성은 CE Delft에서 독자적으로 수행했다.

이 보고서에서는 상당한 환경편익과 경쟁력 있는 가격을 실현하는 데 필수적인 몇 가지 특징을 지적하고 있다. 이 특징에 포함되는 것으로는 미래 배양육 시설에서 사용하는 재생 에너지의 조달 정도와 공급망 전반에서의 탈탄소화 확대, 고밀도 세포 배양(high-density cell culture), 세포 배양액(cell culture media)의 효율적인 공급 및 사용, 시설 자본 비용에 대한 회수 기간 연장이 있다.

배양육 생산 과정에 불확실성이 존재하므로 에너지 사용을 보수적으로 모델링하여 에너지 수요를 상향 추정하였다. 그리고 기존 육류 생산의 경우, 우수 사례를 기준으로 하고, 사료 및 농장 운영 부문에서 재생 에너지를 사용한다고 가정하며, 2030년까지 추가적인 환경영향 감소를 이룰 수 있다는 희망적인 예측을 바탕으로 기준치를 설정했다. 이와 같이 보수적인 관점에서 비교를 실시한 결과, LCA를 통해 관찰된 배양육의 환경편익이 매우 강력할 것으로 예상된다는 분석이 나왔다.

이 보고서의 목표는 2030년에는 배양육이 어떤 방식으로 생산될 것인지, 데이터 격차가 어떻게 지속되는지, 현재는 초기 단계인 배양육 산업이 향후 10년 동안 점차 성숙하면서 설정된 가정이 어떻게 바뀔 수 있는지 숙고해 보는 것이다. 보고서의 분석 결과는 배양육의 비용 및 환경영향에 대한 영구불변의 진실로도, 절대적인 하한으로도 해석되어서는 안 된다. 대신 보고서에서 도출한 통찰을 배양육 산업이 직면하고 있는 기술·경제적 장애물을 높은 신뢰도 수준으로 규명하거나 예측하는 데 활용해야 할 것이다.

본 요약 보고서에서는 LCA와 TEA 보고서 내용 중 핵심 통찰을 요약하여, 앞으로 비용이나 환경영향이 더욱 감소될 가능성이 있는 부분과 아직 지식적인 측면에서 격차가 존재하는 부분에 주목한다. 이와 더불어 미래에 비용 및 환경영향을 감소시키는 데 가장 유리할 것이라 예상되는 기술 개발 분야를 중점적으로 살펴본다. LCA와 TEA 보고서는 공통적으로 인구 증가 추세 속에서 선택할 수 있는 지속 가능하고 저렴한 단백질로써 대규모 배양육 생산의 막대한 잠재력을 강조하고 있다.

¹ CE Delft의 LCA와 TEA 보고서 참고 (www.cedelft.eu). LCA (<https://www.cedelft.eu/en/publications/2610/lca-of-cultivated-meat-future-projections-for-different-scenarios>) 그리고 TEA (<https://www.cedelft.eu/en/publications/2609/tea-of-cultivated-meat-future-projections-of-different-scenarios>).

목차

핵심 요약	2
목차	4
모델	4
전과정평가(LCA)	4
기술경제성 분석	5
시나리오 분석	6
시나리오 분석 — 전과정평가(LCA)	6
시나리오 분석 — 기술경제성평가(TEA)	6
주요 시사점	7
전과정평가(LCA)	7
기술경제성 분석(TEA)	10
향후 방향	12
권고사항	12
지식 격차 및 기술 집중 개발 분야	16
결론	23
참고문헌	24
저자 소개	26
감사의 글	26

연구 설계²

모델 구축, 연구 설계, 데이터 분석은 모두 CE Delft에서 독자적으로 수행하였다.

모델

전과정평가(LCA)와 기술경제성 분석(TEA)에서 사용한 모델은 2030년에 운영될 것으로 예상되는 가상의 상업 규모 배양육 생산 시설을 시뮬레이션한다. 해당 시설은 연간 10킬로톤의 분쇄 배양육 상품을 생산할 수 있는 능력이 있다.³ 모델을 구축하기 위해 배양육 공급망 내에서 활동 중인 15개 기업(배양육 제조업체 5곳 포함)으로부터 목록 데이터(전과정분석 데이터베이스에 속하는 데이터로 다양한 제품의 생산과 관련된 환경 데이터를 목록으로 만든 것-옴긴이)를 수집하였다. 데이터 및 바이오 프로세스(bioprocess) 설계 정보는 여러 업계 전문가가 재차 검토하여 정확성을 평가하였다.

베이스라인 시나리오는 목록 데이터의 평균(또는 데이터 분포에 따라 중앙값, 기하 평균, 최빈값)을 기반으로 하며, 시설의 명시된 생산량을 달성하기 위해 제시되었다. 베이스라인의 증식 단계에서는 고밀도 세포 배양(50×10^6 cells/mL) 시 교반탱크 바이오리액터(stirred-tank bioreactor) 내에서 37°C의 온도로 부유상태로 성장한다고 가정했다. 이때 10,000L까지 수용할 수 있는 가장 큰 바이오리액터를 사용한다. 세포는 반연속 방식을 통해 증식 단계에서 분화 단계로 이동한다.⁴ 분화는 용량이 2,000L인 관류형 바이오리액터에서 10일간 진행되면서 배양육을 형성한다. 이러한 생산 방식을 통해 42일마다 배양육 3,080kg를 수확하고, 생산 라인을 청소 및 살균한다. 바이오 프로세스의 각 단계는 연간 생산량 10킬로톤이라는 목표를 달성하기 위해 병렬식으로 진행한다. 모든 생산 단계에서 무항생 및 무혈청의 기본 세포 배양액을 사용한다고 가정했으며, 해당 배양액에는 발효된 재조합 단백질 세 가지, 재조합 성장인자 두 가지, 대두 가수분해물, 염선된 발효 및 합성 아미노산이 더해진다고 가정했다.

전과정평가(LCA)⁵

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)에서는 배양육 생산의 첫 단계부터 제품 생산 마지막 단계(cradle to facility gate)를 평가 범위로 삼았으며, 상품이 생산 시설을 떠나기까지 상류(upstream) 과정에서의 투입물과 산출물을 모두 다루었다. 비교는 배양육, 기존 육류(소고기, 젓소고기, 돼지고기, 닭고기), 식물성 식품(두부 및 밀 기반의 육류 대체품) 각 1kg을 기준으로 실시했다.⁶ 배양육 생산에는 두 가지 에너지 믹스를 활용했는데, 하나는 2030년까지

² 이 보고서는 독자가 이미 배양육 기술을 잘 알고 있다는 가정 하에 작성했다. 자세한 정보는 웹사이트에서 확인할 수 있다. (<https://gfi.org/science/the-science-of-cultivated-meat/>).

³ 용어 '배양육'에는 해산물과 내장육(푸아그라 등)도 포함된다. LCA 결과에서는 배양 해산물(Cultivated seafood)을 생산할 때 세포가 더 낮은 온도에서 배양될 수 있으므로 필요한 에너지도 더 적다고 시사한다. 이 점을 확실히 확인하기 위해서는 추가 분석이 필요하다.

⁴ 전과정평가 그림 5 참고. 반연속 공정은 청소 및 살균 과정 이전에 세 번의 개별적인 수확을 한다고 가정한다. 1, 2차 수확에서는 세포의 50%를, 마지막 수확에서는 세포의 100%를 수확한다.

⁵ (<https://www.cedelft.eu/en/publications/2610/lca-of-cultivated-meat-future-projections-for-different-scenarios>).

⁶ 환경영향 계산에서 식물 기반의 지지체(Scaffold)가 0.1kg 차지했으나, 기능 단위의 질량으로 포함하지 않았다. 이에 따라 최종 결과를 왜곡하는 적은 영향을 미치는 식물성 재료 때문에 배양육의 환경영향이 과소평가되는 것을 피할 수 있다.

달성을 목표로 발표된 정책에 기반한 종래의 에너지 믹스이고, 다른 하나는 50%의 태양광, 50%의 육상 풍력, 지열을 기반으로 한 열에너지로 만든 지속 가능한 에너지 믹스이다.

환경영향은 ReCiPe Endpoint 및 Midpoint 방식으로 평가되었으며, (18개 영향 범주로부터 요약된) 환경 단일 점수가 도출되었다. 이와 더불어 탄소 발자국(CO₂ 당량), 토지 이용, 수자원 이용, 미세먼지 형성에 대한 영향도 수치로 나타났다.

기존 육류 생산을 분석할 때는 탄소 발자국이 세계 평균보다 현저히 낮은 집약형 서유럽 시스템을 가정하였다.⁷

그리고 2030년까지 달성해야 하는 기존 육류 생산에 대한 높은 환경영향 개선 목표를 반영하기 위해 다양한 가정을 했다. 먼저 농장과 사료 생산 시설에서 지속 가능한 에너지를 사용한다고 가정했다. 그리고 가축의 야외 방목이 증가하여 암모니아 배출이 줄고, 사료 첨가제로 인해 메탄가스 발생이 줄고, 사료에 쓰이는 대두와 관련한 토지 이용에 변화가 없다고 가정했다. **이와 같은 가정은 총 환경영향(ReCiPe 단일 점수)을 줄이고 탄소 발자국 측면에서는 소고기는 6~15%, 돼지고기는 11~26%, 닭고기는 25~53%까지 감소시킨다.** 따라서, 이 LCA에서는 기존 육류와 배양육의 환경영향을 비교할 때 세계 평균보다 현저히 낮은⁸ 환경영향 기준점을 설정한 것이라 볼 수 있다.

기술경제성 분석⁹

기술경제성 분석(Techno-economic analysis, TEA)에서는 모델 시설에서 배양육 1kg 생산을 기준으로, 매출원가(COGS)에 기여하는 자본 지출(장비 및 설비 비용)과 운영 비용(전기, 난방, 수도, 노무, 배양액 등 기타 투입)을 고려했다. 시설 내 모든 장비는 의약품 등급이 아닌 식품 등급이라고 가정했으며, 공정 비용은 식품 산업을 기준으로 산정되었다. 예상 비용은 시설 엔지니어링 및 설계의 프론트 엔드 로딩 1(FEL-1) 또는 컨셉 단계에서 추정되는데, 이는 불확실성 범위가 -20%~+40%임을 의미한다(관류형 바이오리액터에 대한 불확실성 범위가 더욱 큼). 에너지 믹스의 경우, 미래 예상 비용(예: 2030 년 전 세계 평균 전력 믹스)을 추측하기 위해 공개 데이터를 바탕으로 기존의 에너지 믹스를 적용했다.

⁷ Poore and Nemecek, 2018. 더 자세한 내용은 LCA 보고서의 28쪽 참고.

⁸ LCA 보고서 그림 1, 3 참고.

⁹ (<https://www.cedelft.eu/en/publications/2609/tea-of-cultivated-meat-future-projections-of-different-scenarios>).

시나리오 분석

시나리오 분석 – 전과정평가(LCA)

제조업체들은 최종적으로 이 LCA에 제시된 베이스라인 시나리오와는 다른 바이오 프로세스를 각자 구축할 것이다. 시나리오 분석은 이러한 차이로 인해 환경영향 결과가 크게 바뀔 수 있는 매개변수가 무엇인지 파악하기 위해 수행된다. 이와 같은 과정을 통해 제조업체들은 해당 매개변수를 최적화하여 환경 발자국을 제한하는 데 집중할 수 있다.

네 가지 핵심 매개변수에서 상한선과 하한선이 설정되었다. 이와 같은 경계는 실제 대다수의 제조업체에게 가능할 것으로 예상되는 현실적인 범위를 포함한다.¹⁰

1. 생산 시간(베이스라인 = 42일, 범위 = 배치당 총시간 32일~52일)
2. 세포 밀도 (베이스라인 = 50×10^6 cells/mL, 범위 = $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8$ cells/mL)
3. 세포 용적(베이스라인 = $3500 \mu\text{m}^3$, 범위 = $500 \sim 5000 \mu\text{m}^3$)
4. 배양육 kg당 사용되는 배양액의 구성 및 수량을 바탕으로 도출한 배양액의 효율성(베이스라인 = kg당 13L, 범위 = kg당 8~42L)

시나리오 분석 – 기술경제성평가(TEA)

시나리오 분석 또한 비슷하게, 가장 민감한 비용 요인을 파악하기 위한 목적으로 실시되었다. 이 분석을 통해 제조업체들은 비용에 많이 기여하는 요인이 무엇인지 통찰을 얻을 수 있다. 이와 더불어 “매출 원가(COGS) 측면에서 어떤 요인들이 기존 육류에 대한 경쟁력을 갖추게 만들 수 있을까?”라는 질문이 제기되었다. 따라서 TEA에서는 회수 기간 기준을 완화하고, 주요 원가 동인(성장 인자, 재조합 단백질, 총 배양액 투입물)을 통해 실질적으로 미래에 비용을 크게 감소시킬 수 있는 시나리오를 설정했다. TEA에서는 COGS 시나리오를 모델링하기 위해 아래와 같은 설정을 하였다.

1. 배양액 비용 (베이스라인 = 수집 데이터와 재료 현물 가격의 기하 평균, 범위 = 본 보고서에는 재료의 낮은 현물 가격에서 높은 현물 가격까지 제시됨)
2. 배양육 kg당 사용되는 배양액의 구성 및 수량을 바탕으로 도출한 배양액의 효율성 (베이스라인 = kg당 13L, 범위 = kg당 8~42L)
3. 성장 인자의 낮은 현물 가격에 따라 1,000배 감소된 비용
4. 재조합 단백질의 현물 가격에 따라 5배 감소된 재조합 단백질 사용량과 100배 감소된 비용
5. 회수 기간 기준 (‘상업적’ 투자 기준 4년, 중간 투자 기준 8~16년, ‘사회적’ 투자 기준 30년)

¹⁰ 시나리오 분석 결과의 전체적인 상세 내용은 LCA 보고서의 표7 참고.

상기 시나리오와 더불어 최상의 COGS 시나리오 사례를 도출하기 위해 모델에 세포 용적(5000 μm^3) 및 생산 시간(32일)이라는 LCA 최우수 사례도 포함하였다.

주요 시사점

전과정평가(LCA)

점점 더 많은 과학 논문에서 육류 생산이 유발하는 전반적인 환경영향을 배양육을 통해 감소시킬 수 있다는 결과를 발표함으로써 배양육의 상당한 잠재력을 인정하고 있으며,¹¹ 이번 LCA는 이러한 기초를 바탕으로 수행되었다. 이 LCA에서는 배양육으로 인한 환경영향이 주로 시설을 운영하는 데 필요한 전력의 양과 그 조달로 인해 발생한다는 점을 밝히고, 세포 배양액의 투입물이 어떻게 수급 및 생산되는지, 배양액이 얼마나 효율적으로 사용되는지에 대해 시사하고 있다. 이 LCA의 요점은 아래 표1에 요약되어 있으며, 관련 해석은 ‘향후 방향’에서 확인할 수 있다.

1. 심지어 기존 축산업의 환경영향이 감소되었다고 매우 낙관적으로 예상하고 배양육 산업의 에너지 수요를 보수적으로 높게 설정하여 비교했을 때에도, 배양육 생산 시 지속 가능한 에너지를 사용하면 환경영향 결과값 측면에서 그 어떤 형태의 기존 육류보다도 뛰어난 결과를 보이는 것으로 나타났다(표 1). 만약 배양육 제조업체가 에너지의 30%를 재생 에너지로 조달할 경우, 배양육 생산 시 발생하는 탄소 발자국은 소고기보다 훨씬 더 나은 결과를 보이고, 기존 닭고기 및 돼지고기 생산의 세계 평균과 비교해서도 경쟁력을 갖출 것이다. 만약 배양육 제조업체가 100% 재생 에너지로 전환할 경우, 배양육은 모든 형태의 기존 육류 생산과 비교하여 전반적으로 환경에 미치는 영향을 줄일 수 있다. 중요한 점은, 이 LCA에서 지속 가능한 에너지 사용은 오직 배양육 생산과 세포 배양액 측면에서만 고려되었다는 것이다. 전 세계적으로 지속 가능한 에너지로의 전환이 이루어질 경우, 공급망 상류의 다른 곳(예: 스틸 바이오리액터 제조)에서 탈탄소화가 이루어지고, 이에 따라 배양육의 환경영향은 더욱 감소될 것이다.

¹¹ 과거에 발표된 보고서에 관한 더 자세한 내용은 LCA 보고서의 표8과 LCA 갭 분석 참고(Sharf, 2019). (<https://www.gfi.org/images/uploads/2020/01/Cultivated-Meat-LCA-Report-2019-0709.pdf>).

섭취 가능한 새로운 형태의 육류	기존 육류 ¹²	환경영향 범주별 대략적인 감소 수준			
		미세먼지 형성 ¹³	지구 온난화 ¹⁴	인체 독성 ¹⁵	토지 이용
배양육 (지속가능 에너지)	소고기 (일반소)	93%	92%	92%	95%
	소고기 (젖소)	85%	85%	89%	81%
	돼지고기	49%	52%	47%	72%
	닭고기	29%	17%	-2%	63%
배양육 (기존 에너지)	소고기 (일반소)	90%	55%	92%	94%
	소고기 (젖소)	79%	22%	89%	79%
	돼지고기	29%	-258%	50%	70%
	닭고기	1%	-445%	4%	60%

표 1. LCA 보고서 표 5 를 재구성한 표. 각 수치는 배양육의 지속 가능한 에너지 시나리오의 변화율을 나타낸다. 환경영향을 측정하는 ReCiPe 단일 점수는 미세먼지 형성(점수의 47%), 지구 온난화(점수의 33%), 인체 독성(점수의 10%), 토지 이용(점수의 6%) 외 기타 범주(점수의 4%)로 구성된다. 수자원 사용에 관한 내용은 아래의 주석 참고.¹⁶

사료 요구율을 보면 알 수 있듯이 배양육은 자원 활용 면에서 기존의 모든 육류 생산보다 뛰어나다. 기초 열역학에서는 배양육 생산 방식이 전통적인 가축 사육 방식보다 자원을 더 효율적으로 사용할 것이라고 본다. 그 이유는 배양육을 생산할 때는 배양육을 구성하는 세포를 증식할 때만 자원을 사용하고, 실제 가축을 사육할 때처럼 가축의 몸을 유지하기 위한 일상적인 활동을 하지 않아도 되기 때문이다. 이러한 예측(표 2)을 뒷받침하는 근거로는 LCA 보고서의 데이터 중 사료요구율 측면에서 배양육이 기존 닭고기보다 3.5배 더 효율적이라는 결과를 들 수 있다. 자원의 효율성이 증가한다는 말은 즉 사료 작물 수요가 감소한다는 것을 의미하며, 그 결과 토지 및 수자원 이용의 감소와 살충제 및 비료와 같은 투입물 감소에도 기여한다.

¹² 이 LCA에 제시된 기존 육류 생산 모델의 환경영향은 세계 평균치보다 작다. 더 자세한 내용은 5쪽 연구 설계 참고.

¹³ 미세먼지 형성은 대기에서 고체입자와 액적이 혼합되어 발생하는 현상을 일컫는다. 미세먼지 수치는 kg PM_{2.5}-eq 단위로 정량화했으며, 더 단순하게는 대기 오염으로 간주하기도 한다. 축산업 내 미세먼지 형성의 주원인은 가축의 분뇨 및 비료 사용에 따라 배출되는 암모니아이다. 배양육의 경우 공급망 상류 내 전기 발전, 원재료 채취, 공급 원료 관련 공정에서 이산화황 및 다른 미세 미립자가 발생함에 따라 미세먼지가 형성된다. 더 자세한 내용은 LCA 보고서의 그림 13 참고.

¹⁴ kg CO₂-eq 단위로 측정되었다. 기존 소고기 생산과의 비교를 위해 배양육이 주는 지구 온난화 편익은 단기로 보는 것이 가장 적합하다고 보았다. 이는 소고기가 미치는 영향의 주원인이 메탄이기 때문이다.

¹⁵ 인체 독성은 환경에 배출되는 화학물질 단위의 잠재적 유해성을 나타내는 지표다. 인체 독성 수치는 kg 1,4DCB-eq 단위로 정량화되었다(DCB는 다이클로로벤젠을 의미함). 축산업의 경우, 인체 독성은 주로 비료와 살충제를 제조 및 살포함에 따라 발생한다. 배양육의 경우, 인체 독성은 전력 생산과 인프라를 위한 채굴 및 원재료 가공 과정에서 발생한다. 이뿐만 아니라 세포 배양액에 쓰이는 원재료(예: 대두, 옥수수)를 재배할 때 비료와 살충제를 사용함에 따라 발생한다. 인체 독성에 관한 더 상세한 내용은 (<https://core.ac.uk/download/pdf/52101237.pdf>) 참고.

¹⁶ (지표 또는 지하수 급수장에서 발견되는) 블루 워터 사용량이 정량화되었다. 지속 가능한 에너지를 사용할 때, 배양육은 기존 소고기를 생산할 때보다 블루 워터를 51~78% 덜 사용한다. 하지만 닭고기보다는 블루 워터를 22% 더 많이 사용하고 돼지고기보다는 40% 더 많이 사용한다. 지속 가능한 에너지를 사용할 때 배양육 생산 시 들어가는 블루 워터의 양은 전통 에너지를 사용한 시나리오보다 33% 높았다. 이는 공급망 상류에서의 태양전지 생산 때문이다. 더 자세한 내용은 LCA 보고서 그림 15 참고.

고기 유형	사료 요구율 (산출 kg당 투입 kg)
배양육	0.8*
Beef (비육우)	5.7**
Beef (유용우)	12.7**
돼지고기	4.6
닭고기	2.8

표 2. LCA 보고서의 표6을 재구성한 표. *1보다 작은 사료 요구율은 투입물과 산출물 사이의 물 함량 차이로 인한 것이다. **인간이 먹지 못하는 풀은 계산에 포함되지 않았다.

2. **능동 냉각(active cooling) 방식을 줄이거나 아예 사용하지 않음으로써 배양육이 환경에 미치는 영향을 대폭 감소시킬 수 있다.** LCA에서 예상한 에너지 사용량은 일부 과거 연구에서 보다 높게 나타났는데,¹⁷ 이는 능동 냉각 방식 때문이다. 이 능동 냉각 방식은 큰 용량의 바이오리액터에서 밀집 세포 배양을 유지할 때 초래되는 대사열 증가 및 열의 불균일성 현상을 완화할 수 있다. LCA 보고서에서는 배양육 생산 시 발생하는 탄소 발자국의 약 75%가 대규모 증식 단계에서 이루어지는 바이오리액터의 능동 냉각 때문이라고 밝혔다. 냉각에 대한 수요를 예측하기란 어렵다. 그 이유는 바이오리액터의 크기, 기하학적 구조, 세포 밀도, 산소 소모율 등과 같은 변수의 영향을 받기 때문이다. 이러한 변수로 인한 불확실성을 고려하여 능동 냉각 방식을 적용하게 되고, 이에 따라 냉각 수요를 보수적으로 매우 높게 추정하게 되며, 이는 결국 에너지 활용으로 이어지게 되는 것이다.¹⁸ 능동 냉각을 대체할 방식에 관해서는 ‘향후 방향’에서 논의하고 있다.
3. **공급망 상류의 발효 과정에서 세포 배양액으로 인한 환경영향이 발생한다.** 지속가능 에너지 시나리오에서 배양액은 총 환경영향 중 약 40% 정도에 기여한다. 이때 대부분의 환경영향은 발효를 통해 재조합 단백질, 성장 인자, 일부 아미노산이 만들어질 때 발생한다. 시나리오 분석에서는 환경에 영향을 미치는 지배적인 동인이 배양액 사용의 효율성이라고 밝혀냈다. 배양액을 비효율적으로 사용하게 되면 발효 재료를 더 많이 필요로 하기 때문에, 환경에 약 40% 더 많은 영향을 미치는 결과로 이어진다. 반면, 배양액을 매우 효율적으로 사용하면 베이스라인에서 약 12~21% 정도까지 환경영향을 감소시킬 수 있다.

¹⁷ Mattick, 2015.

¹⁸ 타 분석에서는 이 연구에서 제시된 규모 수준에서는 냉각이 필요하지 않을 것이라 시사한다(Humbird, 2020).

4. 낮은 밀도의 세포와 작은 세포 용적은 환경에 영향을 미치는 부차적인 동인이다. 생산 타임라인의 차이가 환경에 미치는 영향은 미미하다. 분석된 시나리오에서 낮은 세포 밀도와 작은 세포 면적(고정된 밀도에서)은 베이스라인보다 약 30% 환경에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이때 환경영향이 증가하는 원인은 같은 양의 배양육을 생산하기 위해 바이오리액터가 더 많이 필요하게 되는데, 이는 결과적으로 더 많은 에너지 투입과 세척을 위한 물 사용으로 이어지기 때문이다. 생산 타임라인은 환경영향에 작은 변화(약 5% 또는 그 이하)를 유발하는데, 그 이유는 필요한 바이오리액터 수에 별 차이가 없고 거의 같은 양의 배양액이 사용되기 때문이다. 교반탱크 바이오리액터 내 달성 가능한 세포 밀도, 세포 용적, 세포 점성, 산소 활용 사이의 복잡한 관계는 본 시나리오 분석에서는 상세히 분석되지 않았다.¹⁹

기술경제성 분석(TEA)

이 TEA에서는 선행 연구들과 맥락을 같이하여,²⁰ 세포 배양액의 재조합 단백질 및 성장 인자를 지배적인 원가 동인으로 여긴다. 이와 더불어, 배양육 제조업체는 기존 육류의 매출원가(COGS)와 경쟁하기 위해서 현재 동물 세포 배양에서 달성 가능하다고 알려진 수준을 넘어서야 한다. 이 TEA의 요점은 아래와 같으며, 관련 설명은 ‘향후 방향’에서 서술하고 있다.

1. 해당 연구에서 분석한 최우수 사례에서 배양육은 kg당 매출원가 6.43달러(파운드당 2.92달러)를 달성하며 비용 면에서 일부 기존 육류와 필적할 만한 결과를 보였다. kg당 7달러 이하의 비용을 달성하려면 고밀도 세포 배양, 식품 등급 배양액의 효율적인 사용, 시설 내 식품 등급 장비 사용, 재조합 단백질 및 성장 인자 생산 시 달성 가능한 만큼 큰 폭의 비용 감소, 자본 지출에 대한 회수 기간 기준 완화가 모두 필요하다. 분석되지 않은 다른 시나리오나 모델 설계로 인해 비용이 더욱 증가하거나 감소할 수 있으며, 이에 따라 여기서 제시된 모델은 배양육 매출원가(COGS)에 대한 하한(lower bound)으로 해석되어서는 안 된다.
2. 성장 인자와 재조합 단백질(특히 알부민)의 비용 감소는 비용을 줄일 수 있는 가장 큰 기회이다. TEA 결과, 세포 배양액에 드는 비용이 베이스라인 생산 비용의 약 99%를 차지했으며, 배양액 비용 내에서는 재조합 단백질과 성장 인자가 비용에 약 99%까지 압도적인 기여를 하는 것으로 나타났다. 알부민은 동물 혈청에서 가장 풍부한 단백질로, TEA에 따르면 배양액 내에서 타 단백질 대비 농도가 높아 전체 재조합 단백질 비용에 80~95% 기여하는 것으로 나타났다. 재조합 단백질과 성장 인자의 비용이 감소된 시나리오에서는 배양액은 더 이상 비용을 높이는 주원인이 아니게 된다.

¹⁹ Humbird, 2020. 참고

²⁰ Risner, 2020; Humbird, 2020; Specht, 2019.

중요한 것은, 여기서 성장 인자 비용을 1,000배 줄이고 재조합 단백질 비용을 100배 줄인 설정이 과해 보일 수 있지만 실제로는 보수적인 설정이라는 것이다. 이러한 비용 감소는 성장 인자의 경우 kg당 대략 300만 달러, 재조합 단백질의 경우 kg당 1,000달러의 비용 절약으로 이어질 수 있다. 산업용 단백질을 대규모로 생산할 경우 일반적으로 가격이 kg당 몇십 달러로 책정된다는 근거는 그동안 많이 제시된 바 있다.²¹ 따라서 **재조합 단백질과 성장 인자에 대한 기준 소매 가격의 범위는 이 TEA에서 제시된 조정 가격과 100~100,000배까지 차이가 날 수 있으며, 이는 배양육 제조업체에 관한 예측에서는 합리적인 것으로 볼 수 있다.** 비용 감소에 관한 더 자세한 내용은 ‘향후 방향’에서 확인할 수 있다.

3. **경쟁력 있는 매출원가(COGS)를 얻기 위해서는 회수 기간 기준을 완화하는 것이 중요하다.** 회수 일정을 짧은 회수 기간(약 4년)이 아닌, 시설이 운영되는 전 기간(약 30년)으로 채택하면, COGS가 kg당 약 17.75달러에서 kg당 약 8.00달러까지 줄어든다. 일반적인 것은 아니지만, 정부가 투자 부담을 일부 짊어지고, 투자자의 인지 위험을 줄이는 생산 학습 곡선(production learning curve)이 나타나고, 잔여 투자 기간(investment time horizon)의 연장을 점점 더 많이 용인하는 사회적 영향으로 미루어 볼 때, 회수 일정이 완화될 것이라는 가정은 타당하다. 게다가 회수 기간이 8년일 때와 16년일 때 COGS가 각각 약 12.15 달러와 약 9.25달러이므로 회수 기간 기준은 비선형이다. 이는 투자자와 제조업체에 큰 유연성을 제공해 줄 수 있다. 정부와 기타 이해관계자를 위한 본격적인 권고사항은 정책을 집중적으로 요약한 부분인 ‘향후 방향’에서 서술하고 있다.²²
4. **배양육의 상업적 생산을 위해서는 대규모 자본 투자를 통한 새로운 인프라 구축이 필요하다.** TEA에서 제시된 배양육 시설의 예상 자본 비용은 약 4억 5천만 달러(-20% ~ +40%)였다. 자본 비용 중 약 57%는 생산에 필요한 수백 개의 대용량 관류형 바이오리액터에 사용된다(표 3). 연구에서 설정된 모델 시설은 현재 바이오제약 산업에서 이용하고 있는 동물 세포 배양 시설보다 부피가 더 크다. 그러나 전 세계 육류 생산량의 0.3%를 충족하기 위해서는 비슷한 규모의 시설이 100개 더 필요하다. 이는 보다 저렴하고 목적에 부합하는 식품 등급의 배양육 바이오리액터를 제조하고 관련 기술을 개발하는 것이 매우 큰 시장 기회가 될 수 있다는 것을 의미한다.

²¹ Puetz and Wurm, 2019.

²² (<https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/03/cultured-meat-LCA-TEA-policy.pdf>) 참고.

장비 종류	개수
2.5 kL 관류형 리액터 (작업 용량 2 kL)	430
12.5 kL 교반탱크 리액터 (작업 용량 10 kL)	130
60 L 교반탱크 리액터 (작업 용량 50 L)	107
60 kL 배양액 저장소 및 혼합 탱크(Mixing tank)	15
2.5 kL 관류형 리액터 (작업 용량 2 kL)	430

표 3. TEA 보고서의 표 2를 재구성한 표.

향후 방향

권고사항

앞서 요약 서술된 시사점은 여러 가정을 전제로 한 단일 모델로부터 도출된 것이다. 우리는 배양육 관련 기업, 학계, 기타 전문가들이 새로운 모델을 개발하고 기존 모델을 반복해서 분석하여 배양육의 발전에 따른 최상의 정보를 업계에 제공할 수 있도록 적극적으로 권장하고 있다. 업데이트된 모델은 본 LCA와 TEA의 핵심 시사점과 통찰을 바탕으로 도출한 아래의 권장사항을 통해 개선될 수 있다.

1. 이번 연구에서는 분석되지 않았지만, 하이브리드 상품의 개발이 1세대 배양육 상품의 대부분을 차지할 것으로 예상된다. 하이브리드 상품은 완전히 배양 세포로 구성된 상품에 비해 COGS를 현저히 낮추고 환경영향을 더 감소시킬 수 있을 것이라 예상된다. 하지만 하이브리드 상품의 비용과 환경영향을 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. LCA와 TEA에서는 기존 육류와 비교를 수행할 때 최선의 결과를 도출할 수 있도록 100% 분쇄 배양육 1kg을 기능 단위로 설정했다. 그러나 다수의 배양육 제조업체가 배양육 방식으로 생산한 동물 세포는 일정 비율만 사용하고, 여기에 식물성 단백질이나 식물성 지방 또는 기타 재료(발효 단백질, 발효 바이오매스, 기존 육류)를 섞은 하이브리드 또는 혼합 상품을 개발하고 있다. 그러므로 향후 5년간 출시될 초기 배양육 상품은 하이브리드로 기울 것으로 예상된다. 싱가포르에서 최초로 승인된 배양육 상품은 배양육 생산 방식을 통해 만들어진 동물 세포 70%로 구성되어 있다고 하나,²³ 배양육 비율의 범위는 1~100%일 것으로 예상된다.

여기서 살펴본 LCA와 타 연구에서는 모두 고단백 식물성 식품(예: 두부 등)과 식물성 고기가 기존 육류와 비교하여 환경영향을 전반적으로 크게 줄일 수 있다는 증거를 많이 제시한 바 있다.²⁴ 이에 따라, 유사하게

²³ Dolgin, 2020. (<https://www.nature.com/articles/d41586-020-03448-1>).

²⁴ (<https://gfi.org/blog/sustainable-meat-fact-sheet/>)참고.

생산된 식물성 단백질 또는 지방을 포함한 하이브리드 배양육 상품 역시 상품의 환경영향을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 식물성 고기를 대상으로 하는 이용 가능한 공개 기술경제성 평가는 아직 없지만, 배양육 대비 식물성 고기는 식물 생육에 필요한 자원 수요가 전반적으로 낮고 집약형 공정을 최소한으로 거치므로 전체적인 비용 또한 유사하게 감소될 것으로 예상된다.²⁵ 하이브리드 배양육 상품의 환경영향 및 비용을 평가하는 독립적인 연구 또는 시나리오 분석이 필요한 실정이다. 이와 더불어 하이브리드 상품에 들어가는 재료인 배양 지방(cultivated fat)을 구체적으로 다루는 LCA와 TEA 연구 역시 수행되어야 한다.

2. 시설 위치 및 설계:

a. 배양육 제조업체 및 협력 제조업체는 향후 시설의 위치를 전략적으로 지정함으로써 환경영향과 비용을 줄일 수 있다.

- i. 전 세계적인 재생 에너지 이행은 향후 몇 년 또는 수십 년 동안 가속화될 것으로 보인다. 이로 인해 배양육 제조업체는 재생 에너지가 풍부한 지역이나 재생 에너지를 안정적으로 공급받을 수 있는 곳에 시설을 구축하게 됨으로써 유망한 기회의 장이 열릴 것으로 예상된다. 이를 통해 제조업체는 탄소 발자국을 대폭 감소시킬 수 있을 것이다.
- ii. 특히 태양 에너지와 풍력과 같은 재생 에너지는 점점 더 합리적인 가격으로 제공될 것이고, 일부 지역에서는 재생 에너지 가격이 화석 연료보다 더 저렴해지기 시작했다.²⁶ 최우수 사례 시나리오가 분석된 TEA에 따르면 전력이 COGS의 약 35%를 차지하여 원가를 높이는 지배적인 원인이 되고 있다. 태양·풍력·수력·지열 에너지를 낮은 가격으로 구입할 수 있는 지역에 시설을 구축한다면 환경영향을 감소시키면서도 비용까지 줄일 수 있다. 배양육 제조업체는 태양 전지판을 설치하는 등 자체적으로 전력을 생성하는 전략을 선택할 수도 있다.
- iii. LCA에 따르면 에너지 사용 추정치를 보수적으로 높게 설정할 때, 배양육 탄소 발자국의 약 75%가 냉동 냉각으로 인해 발생한다고 나타났다. 냉동 냉각 수요를 상쇄할 수 있는 한 가지 방법은 (필요하다면) 수동 냉각으로 전환하는 것이다. 수동 냉각 방식에서는 배양액과 세포 대사의 온도가 올라가면서 생긴 열이 바깥 공기에 노출된 열교환기 또는 냉각탑과 같은 매커니즘을 통해 방출된다. 차가운 공기는 열을 더욱 효율적으로 방출하므로 한랭 기후 지역이나 일 년 중 기온이 낮은 계절이 있는 지역에 시설을 구축하는 것이 수동 냉각에 도움이 될 수 있다. 수동 냉각 방식으로는 기후 냉각(climate-cooled) 자연수 및 침층수 냉각원 방식이 있으며, 영하 온도에 노출된 수동 냉각 시스템에서 열을 더 방출하기 위해 폐쇄 루프 시스템(closed loop system) 내 냉각수에 글리콜을 투입하는 방법을 이용할 수도 있다. 따라서 만약 배양육 제조업체가 한랭 기후 지역에 수동 냉각 시스템을 갖춘

²⁵ Specht, 2019. (<https://www.gfi.org/plant-based-meat-will-be-less-expensive>).

²⁶ Roser, 2020. (<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>).

시설을 구축하면 잠재적으로 탄소 발자국을 상당히 감축할 수 있다.²⁷

냉각 과정에 에너지를 공급하기 위해 열을 이용하는 흡수식 냉각 기술(absorption cooling technology)을 통해 냉각을 할 수도 있다. 이 경우에는 지속 가능한 열을 사용하는데, 그 예로 잔열(산업 현장 부근에 함께 위치하는 시설이나 시설 내부에 잔존하는 열), 태양열, 지열을 들 수 있다.

b. 지역에 특화된 분석을 수행하면 시설 위치 선정에 관한 더 자세한 정보를 알아낼 수 있다.

- i. 시설 위치는 탄소 발자국 및 COGS에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 노동력에 대한 접근성, 인건비, 자원 고갈, 자재 투입과 유통 채널에 대한 접근성에도 영향을 미친다. 예를 들어, 인도 방갈로르에서 바이오 제조 시설을 운영하면 미국이나 유럽의 비슷한 현장에 비해 비용을 75%까지 줄일 수 있다.²⁸ 마찬가지로, 만약 아미노산을 만들기 위해 가수분해물을 대량 투입물로서 사용할 경우(더 상세한 내용은 “지식 격차 및 기술 개발 분야”에서 논의됨), 원재료 가공 공장 바로 옆에 배양육 시설을 같이 위치시키는 게 유용할 수 있다. 전 세계 많은 사람들이 배양육에 접근할 수 있도록 하기 위해 건설되어야 하는 수천 개의 새로운 시설의 위치를 신중히 결정하면 배양육 상용화에 따른 비용, 환경영향, 사회·정치적 영향에 막대한 영향을 미칠 수 있다. **지역에 특화된 LCA 및 TEA 연구는 시설 위치 선정과 관련한 다양한 변수를 고려하는 데 있어서 배양육 제조업체와 그 협력 제조업체, 투입물 공급업체, 정부에 추가적인 정보를 제공할 수 있다.**²⁹

c. 시설 청사진 및 개조 가능성 평가

- i. 배양육 시설에 대한 설계 및 건설 관련 규제의 상당 부분은 현재 미결정 상태이다. 관련 규제를 확실히 하면, 오픈액세스 청사진을 개발함으로써 시설 설계의 시간적 및 비용적 부담을 완화할 기회가 열릴 것이다.³⁰ 청사진은 배양육 산업 전반에서 시설 개선 사항을 파악하는 데 도움을 줄 수 있으며, 장비 제조업체와 엔지니어링 회사가 배양육 시설에 관한 모든 특수 요건에 익숙해질 수 있도록 한다. 시설 설계를 이해하면 기존 식품 가공을 비롯한 생물의약품 및 화학약품 제조 시설의 개조 가능성을 철저히 평가할 수 있다. 이러한 시설 개조는 인프라를 새롭게 구축할 때 속도 측면에서 한계가 존재하므로 매력적인 선택지일 수 있다.

²⁷ 수동 냉각 시스템의 잠재적 단점은 시설에서의 수자원 사용이 많다는 점이다. 제조업체가 어떻게 냉각 수요의 균형을 유지할 수 있는지 완벽히 이해하기 위해서는, 배양육 생산 시 발생하는 세포의 대사와 산소 소모율에 대한 더 깊은 이해가 필요하다(관련 내용은 “지식 격차 및 기술 개발 분야”에서 논의됨).

²⁸ Boyd, 2020. (<https://www.genengnews.com/topics/bioprocessing/biomanufacturing-costs-in-cities-around-the-globe/>).

²⁹ 정책 중심의 요약 보고서 (<https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/03/cultured-meat-LCA-TEA-policy.pdf>) 참고.

³⁰ 더 자세한 사항은 GFI 솔루션 데이터베이스 (<https://gfi.org/solutions/developing-open-access-model-production-facility-blueprints/>) 참고.

3. 모든 규모 수준에서 배양육의 상용화를 위한 자금 조달 전략이 필요하다. 발효와 같은 연관 산업에서는 파일럿부터 데모 수준에 이르기까지 수익이 거의 발생하지 않는다. 일반적으로 수익은 규모의 경제가 실현될 수 있는 첫 상용 규모의 시설이 성공적으로 운영되기 전까지는 발생하지 않는다. 파일럿부터 데모 및 실제 상용화까지의 운영을 확장하는 스케일업(scale-up) 사다리의 새로운 단계로 넘어갈 때 자본 비용을 10배까지 높여야 할 수 있으며, 리스크는 체적 용량의 조정 계수(scaling factor)에 의해 결정된다. 일례로 부채 금융업체의 경우 10:1에 가까운 조정 계수를 가진 낮은 리스크의 프로파일을 원할 것이다. 한편, 지분은 조정 계수가 50:1이 넘는 높은 리스크의 프로파일에 사용될 수 있다. 리스크는 중간 규모 시설을 추가하는 스케일아웃(scale-out)을 통해 완화될 수 있다. 배양육과 관련하여 유사한 경로도 예상될 수 있는데, 산업이 성숙하면서 신뢰가 높아짐에 따라 부채 금융이 가능해지고 단기간에 지분 금융이 풍부해질 수 있다.³¹ 배양육의 경제적 성공 가능성이 증명되고 산업 리스크가 점점 경감되면 부채 금융이 확장과 성장의 주요 수단으로 역할을 하게 될 가능성이 있다.

대체 단백질 산업에서 특히 성장하고 있는 분야가 있다. 바로 식물성 고기 산업으로, 현재 해당 산업 대한 관심이 급격히 증가하면서 정부가 신규 인프라에 대한 연방 채권 금융을 제공하기 시작했다. 이러한 조치는 지역 경제를 복돋우고 지속가능발전목표를 달성하도록 지원하며, 재료나 상품에 대한 추적 가능성(이에 대한 소비자 수요가 높아지고 있다)을 높일 수 있다. 일례로, 캐나다의 기후는 식물성 고기 제품에 많이 사용되는 완두콩 등의 콩과 식물을 기르기에 이상적이다. 이에 정부는 신규 시설³²에 자금을 지원하고, 콩과 식물 및 기타 작물의 재배 및 공정과 관련한 연구개발과 상업적 활동에 자금을 조달하기 시작했다.³³ 이처럼 배양육 산업도 점점 성숙함에 따라 정부가 비슷한 지원을 하도록 장려해야 한다.

머지않아 배양육과 같은 리스크가 크고 아직 증명되지 않은 지속 가능한 기술을 위해 시설 자금을 확보할 때 민간 부분과 정부 발행 녹색채권(sovareign green bond)이 장애물을 넘어서기 위한 한 가지 해결책을 제시할 수도 있다. 녹색채권을 발행하면 지속가능성에 중점을 둔 벤처기업이 산업의 선두 주자가 되며, TEA에서 보았듯이 COGS에 막대한 영향을 미치는 시설에 대한 예상 회수 기간을 대폭 연장할 수 있다. 소규모 배양육 스타트업 기업은 배양육의 제조와 유통을 위해 “자본 집중도가 낮은(capital-light)” 스케일업 접근법을 취하고 거대 다국적 기업과 협업하는 선택을 할 수도 있다. 이와 같은 접근을 통해 스타트업 기업은 꾸준하고 다양한 수입과 입증된 바이오 프로세스 또는 식품 생산 인프라 및 전문 지식을 갖춘 거대 기업체에 스케일업 리스크를 효과적으로 아웃소싱할 수 있다. 이미 배양육 기업들은 이러한

³¹ BlueNalu라고 하는 미국에 기반을 둔 배양 해산물 회사는 최근 컨버터블 노트 금융 라운드에서 6천만 달러를 조달했으며, 이는 100% 대출인 부채 및 지분 사이 신뢰의 “타협 지점”을 시사할 수 있다. (<https://www.bluenalu.com/bluenalu-secures-60-million-in-convertible-note-financing>).

³² 캐나다 정부는 최근 완두 및 카놀라 단백질 관련 신규 가공 시설에 1억 달러의 자금을 조달했다. (<https://www.newswire.ca/news-releases/boosting-canada-s-reputation-as-a-global-leader-in-plant-proteins-865970517.html>).

³³ 캐나다의 단백질 산업 슈퍼클러스터. (<https://www.ic.gc.ca/eic/site/093.nsf/eng/00012.html>)

전략을 수립하기 시작했으며,³⁴ 이는 대체 단백질 산업 중 발효 부분에서 점점 일반적인 현상으로 자리 잡고 있다.

지식 격차 및 중점 기술 개발 분야³⁵

LCA와 TEA에서는 배양육 생산을 둘러싼 현존하는 지식 격차 및 주요 데이터를 강조하고 있다. 이러한 격차 중 다수는 생산에 사용되는 특정 세포의 속성에서 비롯되는데, 이 세포는 다른 맥락에서는 충분히 연구되지 않은 경우가 많고 해당 세포의 특성이 생산성 향상을 위해 어떻게 활용될 수 있는지에 대한 연구도 최소한으로만 이루어졌다. 세포주 저장소와 세포 특성에 관한 오픈액세스 데이터를 지속해서 구축하는 과정은 배양육 생산을 최적화하기 위해 반드시 필요하다.³⁶ 게다가 배양육 생산 시 맞춤 제작해야 하는 바이오투입물 장비와 관련하여 지식 격차와 많은 기회가 존재한다. 아래에서 논의된 주제의 시행 또는 이에 대한 개선점은 향후 LCA와 TEA 모델에서 다룰 귀중한 시사점이 될 것이다.

1. 재조합 단백질과 성장인자로 인한 환경 발자국 및 생산 비용을 줄일 수 있는 기회는 많다.³⁷ LCA에서는

재조합 단백질, 성장 인자, 첨가 아미노산이 주로 미생물 발효를 통해 만들어진다고 가정했으며, 이러한 투입물들은 세포 배양액이 유발하는 환경영향의 주원인이 된다. 게다가 현재 이러한 재료들을 생산할 때 드는 비용은 총비용의 99%를 차지한다. 따라서 해당 재료로 인해 발생하는 비용과 환경영향을 줄일 수 있는 또 다른 방법을 연구해야 한다.

- a. 재조합 단백질이나 성장 인자는 무세포 단백질 합성 시스템 같은 플랫폼이나 식물처럼 덜 자원 집약적인 숙주에서 생산될 수 있다. 이러한 재조합 단백질을 생산하기 위한 숙주와 플랫폼에 대한 비교 LCA를 수행하면 배양육 산업에 도움이 되는 결과를 도출할 수 있을 것이다.
- b. 필요한 양의 재조합 단백질과 성장 인자는 수많은 방식을 통해 줄일 수 있다. 예를 들어 더 강력한 변이 또는 내열성 변이를 조작한다거나, 캡슐화 또는 서방형(slow-release) 시스템을 개발하거나, 다른 동물 세포주의 조정 배지(conditioned medium)를 사용하거나, 자립형(self-sustaining)이 되도록 고밀도 세포 배양에 의존한다거나, 식물이나 다른 유기체에서 같은 생물학적 기능을 하는 물질을 발견한다거나 하는 방법이 있다. 이 외에도 더 많은 방법이 있을 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 모두 재조합 성장 인자의 사용을 감소시키므로, 결국 제조업체는 비용과 환경영향을 줄일 수 있다.

³⁴ 알레프팜스(Aleph Farms)는 이스라엘의 배양육 회사로, 배양육 상품을 일본 시장에 출시하기 위해 미쓰비시(Mitsubishi)와 파트너십 양해각서를 맺은 바 있다. (<https://www.prnewswire.com/news-releases/aleph-farms-and-mitsubishi-bring-cultivated-meat-to-japan-301200863.html>)

³⁵ 배양육의 문제점 해결을 위한 GFI 솔루션 데이터베이스 살펴보기. (<https://gfi.org/alternative-protein-solutions/>)

³⁶ 배양육 커뮤니티를 위해 세포주 관련 기여하기. (<https://gfi.org/resource/expanding-access-to-cell-lines/>)

³⁷ 향후 분석에서는 산업 데이터를 활용하여 배양육 생산 시 재조합 단백질과 성장인자에 드는 비용을 감소시킬 방법에 관해 더 깊이 연구해야 한다.

- c. 배양액 성분을 재활용하면 배양육의 환경 부담과 비용을 줄일 수 있다. 하지만 아직까지는 높은 수준의 상용화된 배양액 재활용 시스템이 개발되지 않았다. 투석은 단백질 측면에서 배양액을 어떻게 재활용할 수 있을지 보여주는 하나의 예시가 될 수 있는데,³⁸ TEA에서 배양액 비용 발생의 주원인으로 알려진 알부민이 특히 중요한 역할을 할 수 있다. 향후 모델에 실제 또는 가상의 배양액 재활용 시나리오를 포함하면 배양육 생산의 다목적성뿐만 아니라, 만약 재활용 과정이 에너지를 많이 소비할 경우 잠재적인 환경적·경제적 상충관계에 대해서도 이해를 높일 수 있을 것이다.
- d. 혈청 및 알부민이 없는 배양액 배합은 다능성 줄기세포 배양에서는 아주 일반적이며, 배양육 제조 시 알부민을 완전히 제거해도 된다는 믿음이 증가하고 있다. 이에 알부민 없는 배양액의 기계론적인 기반에 대한 연구가 제안되었다.

2. 배양육에 사용되는 종과 세포 유형에 대한 세포 대사 및 산소 소모율(Oxygen Uptake Rate, OUR)에 데이터 격차가 존재한다.

타 배양육 TEA³⁹에서는 가상의 세포 대사, 바이옱터 형식, 생산량을 설정하여 산소 소모율, 대사 산물(Metabolite) 추적, 최대 세포 밀도 사이의 관계를 분석했다. 해당 연구에서는 모두 동물 세포 대사의 한계와 바이옱터의 운영적 제약으로 인해 생산성을 충분히 높이지 못하여, 결국 배양육 비용이 경쟁력을 얻기 어렵다고 결론을 맺었다. 우리는 본 문서에서 살펴본 TEA가 미래 배양육 제조 상황을 더 정확하게 보여주고 있다고 보고 있다. 본 TEA에서는 배양육에 식물성 단백질 가수분해물을 사용하고, 재조합 단백질 비용을 줄이고, 식품 등급의 생산 장비 및 시설을 이용하고, 다른 배양액 살균 절차를 적용하고, 자본 비용에 대한 회수 기간 기준을 완화함으로써 앞서 언급한 제약으로 인해 부과된 COGS를 충분히 상쇄할 수 있다고 밝히고 있다.

이러한 차이에도 불구하고, 본 문서에서 살펴본 LCA와 TEA에서도 유사하게 세포 대사의 알려지지 않은 부분이 제조 과정과 환경 발자국에 눈에 띄는 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인해 대사열 생산에 대한 보수적인 가정을 하고, 결국 시설의 가열 및 냉각 수요에 영향을 준다는 사실을 발견했다. 각 모델에는 각각의 다른 가정들을 포함하고 있지만, 결론은 모두 세포 대사와 배양육 생산에서 어떤 역할을 하는지에 대한 깊은 이해가 필요하다는 점을 지적하고 있다.

남아있는 문제의 해결을 돕기 위해서 학계 및 산업에 소속된 연구원들은 다음과 같은 데이터를 수집하고 관련 기술을 개발할 수 있을 것이다.

³⁸ Nath, 2017.

³⁹ Humbird, 2020.

- a. **배양육 생산에 사용되는 세포의 산소 소모율 측정:** 특정 세포주의 산소 소모율(OUR)은 종 내와 종 간에 차이가 있는 것으로 알려져 있으며,⁴⁰ 다양한 변수에 따라 다르게 나타난다. 연구원들은 기존의 방식을 이어가거나 새로운 도구와 방식을 개발하여, 성장 조건 및 바이옱터 환경에 따라 크게 달라질 수 있는 세포 종류 및 종의 유동적인 OUR를 측정할 수 있다. 이러한 데이터는 전체적인 바이오 프로세스 설계에 도움이 될 수 있으며 향후 LCA와 TEA 모델에 이용될 수 있다.
- b. **산소 전달 개선:** 동물 세포를 배양할 때 충분한 산소 전달이 제한 인자가 되는 경우가 종종 있다. 그러므로 산소 전달을 개선하려면 추가적인 연구개발이 이루어져야 한다. 예를 들면 혼합을 개선하는 새로운 임펠러 디자인이나⁴¹ 재조합 헴 단백질 같은 산소 운반체에 대해서다.⁴²
- c. **배양육 생산에 이용되는 세포 대사 및 분화 단계 동안의 대사 변화:** 배양육 생산 시 사용되는 다양한 세포 및 종의 대사에 관한 지도를 구축해 놓으면 배양액 개발에 도움이 될 수 있으며, 미래 LCA 및 TEA 모델을 개선하는 데 활용할 수도 있다. 게놈 수준의 대사 모델을 구축하고, 대사 흐름 분석 및 게놈 엔지니어링 등과 같은 정보/기술을 응용하면 배양육 산업에서 직면하게 될 대사 물질의 범위를 이해하는 데 도움이 될 수 있다. 이와 더불어 향후 LCA와 TEA 모델에서는 증식 단계부터 분화 단계까지 발생하는 대사 변화를 연구 대상에 포함하여, 아직까지 상세하게 분석된 적 없는 생산의 분화 단계를 분해하여 면밀하게 살펴볼 수 있다.
- d. **가수분해물 구성에서 대사에 필요한 조건까지의 정보를 담은 지도 제작:** 이번 LCA 및 TEA에서는 배양액에 대두 가수분해물을 포함했다. 대두 가수분해물은 일반적인 기본 세포 배양액 DMEM/F12과 비교하여 상대적으로 유사한 아미노산 프로파일을 지니고 있다.⁴³ 실제로 세포들은 저마다 정도와 비율이 제각각인 다른 종류의 아미노산을 사용한다. 예를 들어, 일반적으로 글루타민은 포유류 세포 배양에서 가장 많이 소비되는 아미노산 종류지만, 다능성 줄기세포에는 불필요한 존재다.⁴⁴ 이러한 이유로 가장 비용 효율적인 배양을 위해서는 세포 배양액 내 아미노산 농도가 각각의 특정 종이나 세포 종류의 소모율과 일치해야 한다. 식물, 균류, 해조류, 기타 미생물 등 제각각의 다양한 원천으로 만든 가수분해물은 비용, 지속 가능성, 개별 배양육 생산 시 세포주에 대한 대사 적합성을 기준으로 비교될 수 있다. 적합한 가수분해물을 조합하면 단일 원천에서 만들어진 아미노산 구성(또는 비타민이나 미량원소 수준)에 존재하는 결핍을 상쇄해 주어 균형을 맞출 수 있다. 가수분해물 조합의 원재료 원천을 산업 수요에 가장 적합한 수준으로 확장하고, 식품과 사료 등급 중 필요로 하는 등급이 어느 것인지 결정하면 비용을 더욱 줄일 수 있다. 게다가 동일한 원재료는 식물성 고기, 발효 공급 원료, 배양육을 위한 지지체 등 대체 단백질 산업 전반에 투입물로 쓰일 수 있다.

⁴⁰ (<https://www.cytivalifesciences.com/en/us/solutions/bioprocessing/knowledge-center/7-factors-that-affect-oxygen-transfer-to-cells-in-bioreactors>).

⁴¹ (<https://www.cellmotions.com/pages/technology>).

⁴² Le Pape, 2015.

⁴³ Humbird, 2020. 참고 .

⁴⁴ Vardhana, 2019.

- e. **배양액 재활용 및 측류(sidestream) 가치 향상:**⁴⁵ 앞에서 언급한 것과 같이 재조합 단백질의 배양액을 재활용하면 배양육 생산 시 발생하는 비용과 환경영향을 줄이는 데 도움이 될 수 있다. 이뿐만 아니라 암모니아와 젖산과 같은 독성 대사 부산물의 축적을 완화할 수도 있다. 상업적으로 중요한 생체 분자로서 암모니아와 젖산은 비료나 바이오플라스틱 또는 공급 원료 재료와 같은 다양한 하류 제품(downstream product)으로 다시 거둢나거나 이러한 제품을 위한 재료로 쓰일 수 있다. 이론적으로 볼 때 암모니아와 젖산은 액체형 배양액에서 분리되어 정제될 수 있지만, 정확한 결과는 실제 실험을 통해 뒷받침되어야 할 것이다. 이러한 실험을 통해 암모니아와 젖산을 분리 및 정제하는 비용 효율적인 모델을 앞서 (a)~(c)에서 제시된 입력 데이터를 이용하는 배양육 생산에 적용하여 암모니아와 젖산의 잠재적 유용성을 확인해야 한다.⁴⁶ 만약 암모니아와 젖산이 회복되어 상류 공급 원료 등으로 사용될 수 있다면, 해당 물질을 처음부터 다시 생산하지 않아도 될 것이며 배양육 생산 시 암모니아와 젖산이 미치는 환경영향 역시 줄일 수 있을 것이다.

연구 거리가 풍부한 또 다른 측류로는 성장 단계의 세포에서 “내뿜는” CO₂가 있다. 미국에서는 에탄올 산업이 국내 CO₂의 대략 45%를 공급하는데, 이 CO₂는 식품, 음료, 드라이아이스에 사용된다. 게다가 탄소 포획과 격리 기술이 진보하면서 대규모 발효 바이오 정제 분야에서 이러한 기술이 점점 더 많이 적용되고 있으며,⁴⁷ 이에 따라 충분히 큰 규모의 배양육 생산에서도 탄소 포획과 격리 기술이 유사하게 활용될 잠재력이 있다. 따라서 CO₂ 부산물을 이용하여 배양육 생산 시 발생하는 비용과 탄소 발자국을 상쇄하는 추가적인 연구가 필요하다.

마지막으로 배양육을 생산하는 동안에는 성장 인자, 단백질, 세포외 소포(vesicle) 등과 같은 측분비 인자(paracrine factor)가 대량으로 만들어진다. 이렇게 과도하게 분비된 인자들을 수확하면 배양육의 상업적 생산이나 학계 연구, 인간 및 수의 재생의학(human and veterinary regenerative medicine) 응용 분야에서 배양액 보충 재료로 쓸 수 있다.

3. 바이오리액터의 설계 및 운영 개선

- a. **관류형 바이오리액터:** 관류형 바이오리액터에서 배양액이 관을 고정된 속도로 통과하는 동안 세포는 기질(substrate) 또는 채집(collection) 방식으로 유지된다. 관류형 바이오리액터는 배양육 생산 시 세포 분화 단계에서 종종 고정된 기질(fixed substrate)을 필요로 하기 때문에, 분화 단계에 중요한 역할을 하는 것으로 가정되며 특히 구조화된 생산물에서 더욱 그렇다.⁴⁸

⁴⁵ 참고로 전통적인 농업에서도 많은 부산물을 생산한다. (예: 가죽, 젤라틴, 반려동물 사료, 화장품) 부산물 간의 비교는 본 보고서의 범위에서 벗어난 주제다. 사실상 모든 동물에서 파생된 부산물 범주는 현재 배양육 생산과 유사한 발효 및 방식을 통해 다뤄지고 있다. 이용할 수 있는 데이터가 생기면 향후 LCA 및 TEA 모델에서는 부산물 범주 간 비교를 수행할 수 있을 것이다.

⁴⁶ 대사 물질의 축적을 완화하기 위한 다른 선택 사항으로는 관류(Perfusion), 적응, 유전 공학 등도 존재한다.

⁴⁷ Sanchez, 2018.

⁴⁸ 분화의 일정 부분은 회전타원체(Spheroid)에서 또는 마이크로캐리어(Microcarrier)로 가능하나, 이는 통근육으로 된 덩이 상품을 만들기 위해

이번 LCA와 TEA에서는 생산물 수확 이전에 세포 분화를 위해 2.5 kL의 관류형 바이오리액터가 사용되었으며, TEA에서 해당 바이오리액터는 시설 비용의 약 57%를 차지했다. 그러나 여기서 제시된 정보에 대해 독자들이 유념해야 할 점은 해당 LCA와 TEA에서 사용하고 있는 대용량의 관류형 바이오리액터 시스템은 아직 현실에서는 존재하지 않는다는 것이다.

오늘날에는 소규모의 다양한 종류의 관류형 바이오리액터가 존재하나, 많은 경우에 이를 세포 질량을 엄격하게 축적하는 것 외의 목적(예: 고정 세포가 성장하는 동안 분비된 생산물을 수확)으로도 사용하고 있다. 향후 연구는 기존 시스템을 최적화하거나 새로운 시스템을 개발하는 것에 집중하여, 골격근과 지방 조직을 효율적으로 확장 또는 분화하는 방식을 개발하거나 다양한 세포 유형을 공배양할 수 있게 해야 한다. 이를 위해 개념적으로는 지지체 구조를 바이오리액터 내에 포함하거나, 투과성 생체 재료를 사용하여 구형이나 판형 또는 관형 구조로 캡슐화된 세포를 수용하는 것이 필요하다. 배양육 생산 시 목적에 부합하는 관류형 바이오리액터를 개발하는 분야는 신생 기업에 큰 기회를 제공할 것이다.

- b. **식품 생산용 동물 세포 바이오리액터:** 지금까지 바이오 제약 및 바이오 의학 분야에서 동물 세포의 바이오 제조와 관련된 공정 및 장비가 꾸준히 발전되어 왔다. 이에 따라, 해당 분야에 사용되는 장비 및 시설은 엄격한 규정 요건을 따르고, 인증을 획득해야만 한다. 한편, 식품 제조 시설에서 동물 세포의 바이오 제조를 수행할 경우 규제 측면에서 독특한 어려움이 발생한다. 오염 완화 및 살균 처리에 대한 변화는 불가피하지만, 최근 국제적인 규제기관에 의해 결정해야 하는 사항이 등장함에 따라 추가적인 변화가 이루어질 수 있다.

TEA에서는 이러한 예상 변화를 수용하기 위해 식품 부문 바이오 프로세스를 기준으로 시설 비용 및 장비를 평가했다. 바이오제약 분야를 기준으로 비교해 보았을 때는 비용이 감소되는 결과를 보였다. 배양육 생산에 이용되는 수많은 바이오리액터를 취급하는 설계자 혹은 공급자들은 공정 시 식품 등급의 특성을 수용하기 위해서 제조에 필요한 조건의 잠재적 변화를 인지해야만 한다. 그러므로 바이오리액터를 제조할 때는 전체적으로 식품 등급에서의 공정과 안전한 식품 접촉 물질을 고려해야 한다.⁴⁹

필요한 조건을 충족하기에는 부족하다.

⁴⁹ 본 문서의 LCA와 TEA에서는 다루지 않았지만, 바이오제약 분야에서 일회용 바이오리액터 백(Bioreactor bag)의 사용이 점점 늘어나고 있다. 일회용 바이오리액터 백은 에너지 조달 방식에 따라 스틸 교반탱크 리액터에 비해 운영 비용이 적게 들 수 있고 지속가능성 평가 지표 측면에서 더욱 우수할 수 있다는 특징이 있다. 관련 내용은 <https://www.cytivalifesciences.com/en/kr/knowledge-center/single-use-and-sustainability/>에서 확인할 수 있다. 배양육 제조업체도 역시 유사하게 일회용 기술의 사용을 선호할 수 있다. 이에 따라, 고분자 백(Polymer bag)이 식품 등급 재료를 바탕으로 개발되어야 한다. 향후 일회용 기술을 평가하는 LCA와 TEA 모델이 제시된다면 소중한 연구 자료가 될 것이다.

- c. **연속 공정:** 공정을 연속으로 진행하면 방해받지 않고 생산을 지속할 수 있다. 연속 공정을 시행하면 세척 및 살균 빈도가 줄어들어 생산 가동 시간, 노동 효율성, 자원 절약 측면에서 도움이 된다. 연속으로 동물 세포 공정을 지속하면 무균 운영을 유지하는 데 있어 큰 어려움이 발생하는데, 그 이유는 가동 시간 증가로 인해 오염 가능성이 높아지기 때문이다. 이에 따라 연속 공정을 설계할 시 철저한 통제가 요구될 수 있다. 배양육 생산의 연속 공정 역시도 큰 기회가 있는 분야이다.
- d. **자동화:** 배양육 제조업체는 시설 및 바이오 프로세스 설계 측면에서 자동화를 초기부터 가능한 한 많이 고려해야 한다. 연속 공정과 마찬가지로 자동화 역시 생산 가동 시간과 노동 및 자원 효율성을 높이기 때문이다. 자동화를 통해 가장 크게 개선될 수 있는 주요 공정 매개변수를 파악하기 위해 산업 전반에서 협력이 이루어지면 소프트웨어, 감지 시스템 및 기타 하드웨어 부품을 표준화하여 자동화를 구현할 수 있다.
- e. **계산 모델링:** 계산 모델(computational model)을 통해 실험을 시뮬레이션하면 연구 개발에 드는 시간 및 비용을 상당히 줄일 수 있다. 계산 모델링은 배양액 조제 방식 개발, 바이오리액터 및 바이오 프로세스 설계, 스케일업, 지지체 개발 등을 지원하는 데 사용될 수 있다. 모델링은 시뮬레이션을 검증하고 입력 데이터를 제공하고 도출된 개선점을 적용하는 실험주의자와의 협력을 통해 수행할 수 있다. 배양육 모델링 컨소시엄(Cultivated Meat Modeling Consortium)은 컴퓨터 모델러, 학계의 배양육 연구 과학자, 생명 과학 기업, 비영리 단체로 구성되어 있다. 해당 컨소시엄은 배양육 공정의 스케일업을 가속화하기 위해 모델링 방식을 적용한 여러 프로젝트를 착수한 바 있다.⁵⁰

4. **배양육 상용화의 부가 효과:** LCA와 TEA에서는 원재료 취득에서 시설 단계까지를 범위로 설정하여 환경영향을 다루었다. 이 말은 즉 패키징, 유통, 최종 제품 소비는 분석에서 제외되었다는 뜻이 된다. 배양육은 이번 LCA와 TEA 보고서에서 논의한 것 이외에도 기후 변화, 인간 건강, 식량 안보와 관련해서 추가적인 외부 편익을 제공할 수 있다고 보여진다. 이에, 향후 분석에서는 배양육이나 다른 대체 단백질에 의해 지속 가능한 시장의 점유율이 기존 육류를 넘어서게 된 미래 상황을 가정하여 미래에 발생할 수 있는 부가 효과를 연구할 수 있다. 아래와 같이 추가적인 가치 분석(예를 들면, 특정 지역 분석 등)이 향후 분석 대상이 될 수 있다.

- a. **토지 이용 감소의 효과 및 육류 생산에 대한 탄소 기회비용 평가:** 만약 기존 육류 대신 배양육으로 식습관이 대체될 경우 배양육 생산에 필요한 토지가 기존 육류에 비해 감소하므로 편익이 발생한다. 따라서 기존의 사료 작물 및 축산에 사용되던 토지를 어떻게 전환하면 인간이 먹는 식품을 만드는 데 이용할 수 있을지, 어떻게 하면 토지를 재생 에너지 목적으로 이용할 수 있을지, 탄소 격리를 확대하기 위해 자연 서식지를 어떻게 재조성할 수 있을지 파악하는 것이 중요하다.⁵¹

⁵⁰ (www.thecmmc.org).

⁵¹ 자세한 내용은 (<https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/03/cultured-meat-LCA-TEA-policy.pdf>) 참고.

그리고 부영양화 가능성 및 살충제 사용 감소, 산림파괴 속도 제한, 생물다양성, 기타 서식지 감소 등 식습관 대체에 따른 부가 효과를 연구하는 것 또한 중요할 것이다.

- b. **최종 제품의 미생물 군수 감소 효과:** 제조 공정의 특성에 따라 배양육의 최종 제품에서 나타나는 박테리아 수는 매우 적은 수준이다.⁵² 따라서 이러한 특징으로 인한 부가적인 환경영향을 정량화하는 분석이 수행될 수 있다. 이러한 부가 영향의 예시로는 박테리아가 유발하는 부패로 인한 육류 및 해산물의 낭비를 줄인다거나 저온 유통 부담을 줄이는 효과가 있다.

게다가 도축과 관련된 식중독의 가장 흔한 원인(예: *대장균*, *캠필로박터*, *살모넬라*) 중 다수가 배양육에서는 나타나지 않을 것으로 예상된다. 그러므로 배양육은 기존 육류 및 해산물로 인한 식중독 발병률을 대폭 감소시킨다.

- c. **항생제 없는 고기와 해산물의 영향:** 배양육 생산에는 항생제가 사용되지 않을 것으로 예상된다.⁵³ 이에 따라 배양육이 널리 보급될 경우 2030년까지 축산업으로 인해 사용될 것으로 예상되는 연간 항생제 중 200,000톤 이상을 절약할 수 있을 것이다.⁵⁴ 항생제 내성이 점점 만연해지고 있다는 점과 바이오제약 분야에서 새로운 항생제 발견을 장려하는 정책이 부족하다는 점, 유해한 항생제 균사 잔여물(antibiotic mycelial residue)의 처분 관행이 열악하다는 점을 고려해 볼 때, 배양육이 인간 건강, 육상 및 해상 생태독성, 환경적 편익 측면에서 가져올 수 있는 잠재력은 엄청나다.⁵⁵
- d. **인수 공통 감염병 및 글로벌 팬데믹 위험 완화:** 코로나19는 인류가 여전히 파괴적인 팬데믹에 취약하다는 점을 증명했다. 새롭게 등장한 전염병의 약 75%는 동물을 매개로 한 인수 공통 감염병이며,⁵⁶ 그중 절대다수가 가축 또는 인간이 기르는 집약형 농장의 동물로부터 발생한다.⁵⁷ 따라서 집약적으로 사육된 동물에서 발생한 인수 공통 감염병을 완화하는 수단으로써 배양육 생산이 중요한 역할을 할 수 있다는 점을 진정성 있게 검토해야 한다.

이와 같은 제안 사항은 배양육으로 전환함에 따라 발생하는 부가 효과 중 일부에 불과하다. 따라서 정부, 학계, 산업계, 비영리단체 간 다학제적 연구팀들이 향후 배양육이 성장 산업으로 자리 잡아 시장 점유율이 빠르게 증가하는 미래의 관점에서 그 영향을 분석해 주기를 장려하는 바이다.

⁵² 현재 이와 같은 주장을 뒷받침하는 데이터는 제한적이다. 배양육 제품에 대한 추가적인 규제가 승인되고 진행 중인 학계 연구가 발표되면 추가적인 데이터를 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

⁵³ 싱가포르에서 처음 승인된 배양육 제품은 항생제 없이 생산되었다 (<https://goodmeat.co/>).

⁵⁴ Van Boeckel, 2017.

⁵⁵ Chen, 2017.

⁵⁶ (https://www.who.int/neglected_diseases/diseases/zoonoses/en/).

⁵⁷ 코로나19는 그 근원이 인수감염에 의한 것이지만 집약형 사육에 직접적으로 기인한 것은 아니다.

결론

본 보고서에 기술된 미래의 대규모 배양육 생산 시설은 산업 데이터를 바탕으로 한 단일 모델을 대상으로 기술경제성 평가 및 전과정평가를 결합하여 분석된 첫 번째 사례이다. 이번 LCA와 TEA에서는 중대한 기술적 장애물을 부각하고, 배양육 제조업체가 원하는 경제 및 환경영향 결과를 달성하기 위해 생산 공정 내에서 수행해야 하는 중점 분야를 강조하고 있으며, 이 모두는 향후 모델 개선을 위한 토대 역할을 할 것이다. 이 연구에서는 배양육 기술의 지속가능성 이점을 실현하기 위해 배양육 생산에 사용되는 종과 세포 종류에 대한 오픈액세스 연구, 새로운 기술 개발 및 기존 핵심 기술의 개선, 에너지 부문에서의 세계적인 전환이 필요하다고 강조한다. 산업 및 학계에 소속된 학제 간 연구 과학자, 배양육 제조업체, 투자자, 비영리기관, 정부, 정책결정자 등 다양한 이해관계자의 협력이 이루어지면 미래 배양육 및 기타 대체 단백질 공급을 성공적으로 이끄는 결정적인 기여를 할 수 있을 것이다.⁵⁸ 이번 LCA와 TEA 보고서에서 도출한 시사점은 배양육 기술의 신뢰성을 더욱 높이고 일종의 지침 역할을 하여, 실행 가능한 해결 방안을 제시하는 데 있어서 이해관계자들을 결속시킬 수 있을 것이다.

⁵⁸ 이해관계자를 위한 권장 조치 요약 보고서 참고: (<https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/03/cultured-meat-LCA-TEA-policy.pdf>).

참고문헌

1. Boyd, J. H. 2020. “전 세계 도시별 바이오 제조 비용 (Biomanufacturing Costs in Cities around the Globe).” 2020. 6. 5. <https://www.genengnews.com/topics/bioprocessing/biomanufacturing-costs-in-cities-around-the-globe/>
2. Chen, Wei, Yong Geng, Jinglan Hong, Harn Wei Kua, Changqing Xu, Nan Yu. 2017. “중국 항생제 군사 잔여물 관리에 대한 전과정평가 (Life Cycle Assessment of Antibiotic Mycelial Residues Management in China).” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (11월): 830–38.
3. Dolgin, Elie. 2020. “세포 기반의 배양육이 저녁 식사가 될 수 있을까? (Will Cell-Based Meat Ever Be a Dinner Staple?)” *Nature* 588 (7837): S64–67.
4. Humbird, David. 2020. “배양육의 스케일업 경제학: 기술경제성 분석과 실사 (Scale-Up Economics for Cultured Meat: Techno-Economic Analysis and Due Diligence).” <https://doi.org/10.31224/osf.io/795su>
5. Le Pape, Fiona, Morgane Bossard, Delphine Dutheil, Morgane Rousselot, Valérie Polard, Claude Férec, Elisabeth Leize, Pascal Delépine, and Franck Zal. 2015. “해양 산소 운반체를 활용한 재조합 단백질 생산의 개선과 이에 따른 CHO-S 세포주 내 산소 전달 향상(Advancement in Recombinant Protein Production Using a Marine Oxygen Carrier to Enhance Oxygen Transfer in a CHO-S Cell Line).” *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology* 43 (3): 186–95.
6. Mattick, Carolyn S., Amy E. Landis, Braden R. Allenby, and Nicholas J. Genovese. 2015. “미국 배양육 생산 시 시험관 환경 바이오매스 배양에 대한 예상 전과정평가 (Anticipatory Life Cycle Analysis of In Vitro Biomass Cultivation for Cultured Meat Production in the United States).” *Environmental Science & Technology* 49 (19): 11941–49.
7. Nath, Suman Chandra, Eiji Nagamori, Masanobu Horie, and Masahiro Kino-Oka. 2017. “부유 배양 내 인간 유도 다능성 줄기세포의 확장을 목적으로 한 투석 방식의 배양액 정제 (Culture Medium Refinement by Dialysis for the Expansion of Human Induced Pluripotent Stem Cells in Suspension Culture).” *Bioprocess and Biosystems Engineering* 40 (1): 123–31.
8. “성장하는 세계를 위한 식물성 고기 (Plant-Based Meat for a Growing World).” 2019. The Good Food Institute. https://www.gfi.org/images/uploads/2019/08/GFI-Plant-Based-Meat-Fact-Sheet_Environmental-Comparison.pdf?utm_source=blog&utm_medium=website&utm_campaign=pb-meat-sustainability.pdf&gh_src=245a4c8a2.
9. Puetz, John, and Florian M. Wurm. 2019. “산업용 및 제약용으로 사용되는 재조합 단백질: 공정 및 가격 비교 검토 (Recombinant Proteins for Industrial versus Pharmaceutical Purposes: A Review of Process and Pricing).” *Processes* 7 (8): 476.

-
10. Risner, Derrick, Fangzhou Li, Jason S. Fell, Sara Pace, Justin B. Siegel, Ilias Tagkopoulos, and Edward Spang. 2020. “동물 세포 기반의 배양육에 대한 기술경제성 평가 (Techno-Economic Assessment of Animal Cell-Based Meat).” <https://doi.org/10.1101/2020.09.10.292144>.
 11. Roser, M. 2020. “재생 에너지는 어떻게 단시간에 저렴해질 수 있었을까? 녹색 성장이라는 세계적인 기회를 활용하기 위해 무엇을 할 수 있을까? (Why Did Renewables Become so Cheap so Fast? And What Can We Do to Use This Global Opportunity for Green Growth?)” 2020. <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>
 12. Sanchez, Daniel L., Nils Johnson, Sean T. McCoy, Peter A. Turner, and Katharine J. Mach. 2018. “바이오 리파이너리를 통한 탄소 포집 및 격리 방식의 미국 내 단기간 도입(Near-Term Deployment of Carbon Capture and Sequestration from Biorefineries in the United States).” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (19): 4875–80.
 13. Scharf, Andreas, Elke Breitmayer, and Michael Carus. 2019. “배양육 LCA 연구의 검토 및 갭 분석 (Review and Gap-Analysis of LCA-Studies of Cultured Meat).” <https://www.gfi.org/images/uploads/2020/01/Cultivated-Meat-LCA-Report-2019-0709.pdf>
 14. “일회성 기술과 지속가능성: 바이오로직스 제조업이 미치는 환경영향 정량화 (Single-Use Technology and Sustainability: Quantifying the Environmental Impact in Biologic Manufacturing).” 2020. Cytiva. <https://cdn.cytivalifesciences.com/dmm3bwsv3/AssetStream.aspx?mediaformatid=10061&destinationid=10016&assetid=16801>.
 15. Specht, Liz. 2018. “세포 기반의 배양육 생산 시 발생하는 배양액 비용 및 생산량 분석 (An Analysis of Culture Medium Costs and Production Volumes for Cell-Based Meat).” The Good Food Institute. <https://www.gfi.org/files/sci-tech/clean-meat-production-volume-and-medium-cost.pdf>.
 16. ——. 2019. “식물성 고기가 기존 육류에 비해 최종 비용이 적게 드는 이유는 무엇일까 - 굿 푸드 인스티튜트 (Why Plant-Based Meat Will Ultimately Be Less Expensive Than Conventional Meat - The Good Food Institute).” 2019. 6. 18. <https://www.gfi.org/plant-based-meat-will-be-less-expensive>.
 17. Van Boeckel, Thomas P., Emma E. Glennon, Dora Chen, Marius Gilbert, Timothy P. Robinson, Bryan T. Grenfell, Simon A. Levin, Sebastian Bonhoeffer, Ramanan Laxminarayan. 2017. “식용 동물의 항균제 사용 절감 (Reducing Antimicrobial Use in Food Animals).” *Science* 357 (6358): 1350–52.
 18. Vardhana, Santosha A., Paige K. Arnold, Bess P. Rosen, Yanyang Chen, Bryce W. Carey, Danwei Huangfu, Carlos Carmona-Fontaine, Craig B. Thompson, Lydia W. S. Finley. 2019. “글루타민 독립성은 다능성 줄기세포의 선택형 특성이다 (Glutamine Independence Is a Selectable Feature of Pluripotent Stem Cells).” *Nature Metabolism*, 7월. <https://doi.org/10.1038/s42255-019-0082-3>.

저자 소개

엘리엇 박사가 굿 푸드 인스티튜트(GFI)에서 수행하는 연구는 배양육에 관한 다양한 과학 분야의 교차점을 분석하여 배양육 산업의 성장 속도를 높이는 데 중점을 두고 있다. 그의 연구는 GFI가 지원하는 주요 배양육 연구 프로젝트를 선도할 뿐만 아니라 과학자, 대중, 업계 이해관계자들에게 유용한 학습자료가 되고 있다. 엘리엇은 캘리포니아대학교(UCLA)에서 신경과학 박사학위를 취득했으며, 유도 다능성 줄기세포를 바탕으로 인간의 신경근질환을 모델링하는 연구를 수행했다.

엘리엇 스위츠 박사

Senior Scientist, 굿 푸드 인스티튜트(GFI)

elliots@gfi.org [Elliot Swartz](https://www.linkedin.com/in/Elliot Swartz) [@elliotswartz](https://twitter.com/elliotswartz)

감사의 글

굿 푸드 인스티튜트는 [CE Delft](#) 연구팀에 감사의 말씀을 전합니다. 특히 본 문서에서 다룬 LCA와 TEA 보고서를 정리하고 조직화하는 데 도움을 준 잉리트 오데하르트(Ingrid Odegard), 펠러 싱커(Pelle Sinke), 로버트 페르헤이르(Robert Vergeer) 님께 감사를 표합니다. 더불어 LCA 보고서에 공동 참여해 주신 [GAIA](#)에도 감사의 말씀을 전합니다. 아울러 본 문서를 발행하기 위해 데이터를 제공해 주신 분들과 지식을 공유해 주신 모든 연구자분들께 감사를 표합니다.

굿 푸드 인스티튜트는 미국 501(c)(3) 비영리 조직입니다. 저희는 후원자 여러분의 후원에 기반하여 대체 단백질이 더 이상 대체품이 아닌 세상을 만들기 위해 노력하고 있습니다.

굿 푸드 인스티튜트 소개

굿 푸드 인스티튜트(GFI)는 미국의 501(c)(3) 비영리 조직으로, 식물성 고기 및 배양육과 같은 대체 단백질 제품을 보다 맛있고 저렴한 가격으로 손쉽게 구입할 수 있도록 국제적인 활동을 합니다. GFI는 오픈 액세스 연구를 확대하고, 자원 및 역량 있는 연구진을 동원하고, 푸드 시스템 전반의 파트너들의 역량을 강화함으로써 안전하고 공정한 지속 가능한 단백질 공급 환경을 조성하기 위해 노력하고 있습니다.