

저탄소 축산식품 인증제도 도입을 위한 활용기술

Current and Future Technologies for Low-Carbon Livestock Products

정다운¹, 김영순², 황인호^{1,*}

(Dawoon Jeong¹, Young soon Kim², Inho Hwang^{1,*})

¹전북대학교 농업생명과학대학 동물자원학과

²전주대학교 탄소연구소

¹Department of Animal Science, College of Agriculture & Life Science, Jeonbuk National University, South Korea

²Institute of Carbon Technology, University of Jeonju, South Korea

Introduction

축산은 세계 인구의 칼로리 소비의 17%와 단백질 소비량의 30%를 공급하고 필수 아미노산을 제공하는 매우 중요한 영양적 역할을 하며, 약 10억 명의 빈곤층의 생계를 해결하고 10억 명 이상의 일자리를 제공하고 있다(Randolph 2007; Poore 2018). 2050년에는 세계 인구가 95억 명에 이를 것이며(UNPD, 2007), 이러한 급속한 인구 증가는 단백질 공급원(고기 및 우유 등)의 수요를 수반하며, 식량 자원 수요는 2007년 수요의 70%를 증가시킬 것으로 예측되고 있을 뿐만 아니라(FAO, 2009), 전 세계 육류 생산량 또한 2006년 대비 두 배 가량 증가할 것으로 내다보고 있어(Alexandratos, Bruinsma, 2012), 사회-경제적으로 중요한 역할을 하고 있는 산업 분야이다. 하지만, 축산기술이 발달하고 축산업의 규모화, 특화화로 인해 많은 환경문제가 지적되고 있는데, 특히 축산업의 시스템의 변화는 생산효율성을 추구하고 이에 의해 집약적인 환경문제가 지적되고 있다. 2006년 FAO가 발표한 “Livestock’s Long Shadow”에서는 축산업의 환경적 위치에 대해 보고하였으며(FAO, 2006), 전 세계적으로 축산물의 생산은 온실가스 배출의 주요 원인으로 여겨지고 있고(Gerber, 2013), 지구온도 상승에 따른 기상이변현상이 잦아짐에 따라 소비자의 축산물 소비에 대한 우려의 목소리가 커지고 있습니다(Pachauri, 2008; Pais, 2020; Laestadius, 2016).

정부에서 발표한 “2050 탄소중립 추진 전략”의 농림축산식품 부문 이행방안인 ‘2050 농식품 탄소중립 추진전략’에 의하면 2050년 온실가스 감축 목표량의 62% 이상을 2030년까지 조기감축하고자 하는 목표를 제시하고 있으며, 장내발효, 가축분뇨, 식생활 개선을 통해 5.2백만톤 CO₂-eq, 농축산비에너지부문 감축 목표량의 약 65%의 온실가스를 감축하고자 하는 로드맵을 제시하였다(농림축산식품부, 2021. 12.)(표 1).

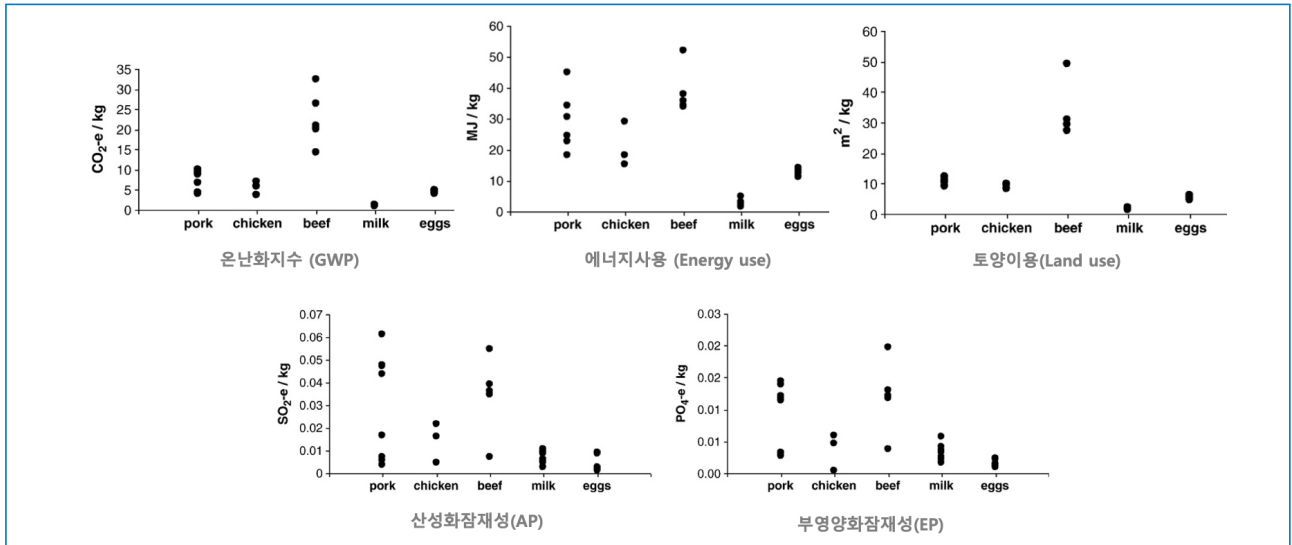
*Corresponding author: Inho Hwang
Department of Animal Science, College of Agriculture & Life Sciences Jeonbuk National University,
Jeonju 54896, South Korea
Tel: +82-63-270-2605
Email: inho.hwang@jbnu.ac.kr

표 1. 2015 농식품 탄소중립 추진전략 비에너지부문 로드맵

구분 (천톤CO ₂ -eq)		2030년		2040년		2050년	
		목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
장내발효	소계		751		915		1,075
	저메탄사료(2세 이상 %)	30	121	65	261	100	402
	분뇨 내 질소 저감(%)	13.2	630	13.2	654	13.2	673
가축분뇨	소계		2,058		2,212		2,355
	비농업계 이동(에너지화 정화처리비율%)	33	2,058	34	2,212	35	2,355
생산성향상	소계		452		649		1,773
	식단변화 가축감소율(%)					10.2	995
	축산생산성 향상(스마트축사 보급율%)	30	389	40	507	50	579
	대체식품(%)	4.4	63	9.7	142	15	200
감축량 총계			3,261		3,776		5,203

출처: 농림축산식품부, 2021.12 자료 재구성.

그림 1. 주요 축산물의 환경영향 항목별 비교



출처: De Vries, 2019.

축산부문의 탄소발자국

2000년대 전후부터 전 세계적으로 가축을 사육하는 농장의 인벤토리를 포함한 축산물 생산에 대한 전과정평가 연구 결과가 발표되기 시작하였는데, 2000년부터 2016년까지 발표된 연구결과들은 주로 유럽, 북미, 호주, 브라질, 중국에 집중되어 있고, 쇠고기의 경우 온실가스 배출

량은 4배 정도의 차이를 보인다고 하였다(Poor, 2018). 각 축산물별로도 환경에 영향을 미치는 정도 또한 많은 차이를 보이고 있는데, 화석에너지 이용은 계란과 우유보다 쇠고기, 돼지고기, 닭고기 등의 육류를 생산하는데 더 많이 요구되며, 특히 쇠고기의 경우 다른 축산물에 비해 온난화지수가 월등히 높아 환경에 대한 부담이 크다고 알려져 있다(De Vries, 2010)(그림 1). 호주의 경우, 살아

있는 소 1kg을 생산하는데 10.6~12.4kg CO₂-eq의 온실가스가(Wiedemann, 2015), 돼지 1kg을 생산하는데 2.1~4.5kg CO₂-eq의 온실가스가(Wiedemann, 2016) 발생하였다고 보고하였다. 미국의 쇠고기 생산-소비 전 과정(Cradle to grave)에서 소비자가 섭취할 수 있는 뼈 없는 쇠고기 1kg당 48.4kg CO₂-eq의 온실가스가 발생하며 이중 약 87% 가량(42.32kg CO₂-eq)의 온실가스가 농장(Cradle to farm gate) 안에서 발생하였고, 농장 이후 단계 중 소매-소비 과정에서 10%(4.93kg CO₂-eq) 온실가스가 발생하였다(Asem-Hiablie, 2019). 쇠고기의 경우, 젖소-송아지 방목농장보다 비육농장에서 곡물사육한 농장에서 생산된 쇠고기의 온난화지수(GWP)와 부영양화 잠재성(EP)이 각 15%, 48% 높고(Berton, 2017), 비육우농장에서 생산된 쇠고기보다 낙농쇠고기의 온난화지수가 낮아 쇠고기 생산량을 유지하는 동시에 유제품과 쇠고기 생산의 부정적인 환경영향이 줄어들 수 있다고 하였다(Hessle, 2017).

우리나라 주요 쇠고기 수입국인 미국은 2010년부터 각 축종별 생산시스템에 대한 환경영향평가 방법론을 개발하고 인벤토리를 구축하고 있으며(USDA, 'Ag Data Commons'), 호주 역시 축산물의 전과정평가 방법론을 개발하는 등 자국 축산물 생산시스템에 대한 평가방법론을 구축하고 있으나(MLA, 2013), 우리나라의 경우 아직까지 축산물 전과정평가의 방법론이 완전히 정립되어 있지 않은 실정이며, 쇠고기 및 돼지고기의 전과정평가 방법론 설정과 인벤토리 구축에 대한 연구가 진행 중이다(농촌진흥청, 2020).

축산부문의 온실가스 발생 저감 노력

많은 연구자들에 의해 축산물 생산이 환경에 미치는 부정적인 요소를 감소시킬 수 있는 다양한 방법들이 제시되었는데, 쇠고기 생산에서 유전적 개량 또는 사료, 사육 기술의 개선 등을 통해 소의 생산성을 향상시킴으로써 목표체중에 도달하는 일수를 줄이고, 부수적으로 동물의 관리에 투입되는 에너지 또한 감소시킬 수 있어 쇠고기 생

산에 수반되는 환경부담을 줄일 수 있고(Capper, 2011), 농후사료/건초 급여량 조절 또는 방목지 목초의 품질 및 종자개량 등을 통해 반추동물의 최종 CH₄발생량을 감소시킬 수 있으며(Beauchemin, 2008; Bannink, 2010; Sithyphone, 2011), 다양한 첨가제 및 식이조절을 통해 장내 메탄 발생 저감(Haque, 2018; Almeida, 2021)과 가축 분뇨 처리 방법 개선 및 에너지화 등(EPA, 2019)의 방법들이 제시되고 있다. 최근에는 축산물의 농장단계 이후 도축, 가공 단계에서 발생하는 폐수와 부산물의 활용(Mofijur, 2021; Otero, 2021)을 통해 단위 축산물의 최종 온실가스 발생 총량을 줄이는 방법도 연구되고 있다.

축산물 전과정평가 연구를 일찍이 시작한 미국, 호주, 영국 등의 국가에서 온실가스 배출 저감 효과가 정량적으로 입증된 기술에 대하여 저탄소 축산물 생산을 위한 다양한 감축사업에 도입하고 있으며, 각 나라별 축산 환경에 적용이 가능한 기술들을 활용하여 펀드를 지원하고 있다. 2022년 10월 현재 미국은 USDA(U. S. Department of Agriculture)의 Partnership for Climate-Smart Commodities를 통해 생산자 참여 중심의 기후스마트 상품 생산 및 마케팅 관련 파일럿 프로젝트에 자금 지원 사업을 시작했고(USDA, 2022), 영국은 Defra(Department for Environment, Food and Rural Affairs)는 'Sustainable Farming Incentive' 시범운영을 시작하였다(Defra, 2022). 호주의 경우는 연방정부 DCCEEW(Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water)는 온실가스감축펀드(ERF; Emission Reduce Fund)를 운영하고 있으며, 호주 정부에서 규정하는 축산분야 기술을 적용하도록 하고 있고(DCCEEW, 2022.10 현재), 가축의 메탄배출 감소 프로그램(MERiL; Methane Emission Reduction in Livestock program)을 통해 메탄저감 사료보충제 제공 기술 지원을 하고 있다(DCCEEW, 2022.02).

쇠고기 생산 단계별 탄소저감 기술 적용

2021년 12월 농림축산식품부에서 발표한 '2050 농식

품 탄소중립 추진전략'의 로드맵에 의하면, 저메탄사료와 저단백 사료 보급을 통한 가축사양관리와 가축분뇨를 에너지화 하고 바이오차로 활용하는 등의 분뇨처리 방법 개선, 스마트축사 보급으로 생산성을 향상시키고 소비자 식생활 소비개선과 저탄소 식자재 공급기반을 구축하는 등의 방법을 온실가스 감축 수단으로 제시하고 있다.

실제 식육의 지속가능성은 식육을 생산하는 과정에서의 온실가스 발생량이라 할 수 있는데, 일차적으로 농장에서 발생하는 온실가스와 2차적으로 도축, 가공, 유통에서 발생하는 온실가스가 주를 이루며, 3차적으로 포장, 보관 등의 부가적인 자원 투입에 의한 간접적인 온실가스 발생량을 포함시킬 수 있다. 표 2는 현재까지 출판된 논문 및 국가보고서를 중심으로 수집한 온실가스배출 저감 기술들 중 쇠고기를 생산하는 농장에서 소비까지의 전 과정에 적용할 수 있는 탄소절감 기술을 도축 전/후로 구분

하여 농장단계, 가공단계, 유통단계로 정리하였다. 농장 단계 적용 기술 중 재생에너지 사용 및 바이오차, 바이오 가스플랜트, 장내 메탄억제 사료보충제 및 저탄소 가축관리 기술 등은 해외에서 이미 적용 중인 기술들로 국내 적용을 위한 연구가 진행 중에 있고, 가축분뇨의 바이오가스 플랜트의 로컬 에너지화는 시범사업이 결정되어 추진 중이다. 장내 메탄억제 효과가 획기적인 첨가물 3-NOP의 경우 칠레와 브라질에서는 육우와 낙농우에 사용이 승인되었으며, 미국, 호주 등 다수의 국가에서 사용승인신청이 진행 중이다. 호주의 경우, 메탄저감효과가 있는 홍조류(아스파라고프시스)의 적용 시험 중이다(DCCEEW).

표 2에서 보는 것과 같이 동물성 단백질 섭취가 환경에 미치는 영향을 완화하기 위한 다양한 방법들은 대부분이 도축 전 농장단계에 적용되는 기술이었으며, 도축 후 적용 기술들은 호주에서 활용중인 도축장 폐수를 활용하는

표 2. 쇠고기 생산 단계별 온실가스 저감 기술

탄소저감기술	탄소저감기술 설명	기술활용정도		참고문헌 번호
		국내	국외	
도축 전 (Pre-Harvest)				
농장단계				
재생에너지 사용	- 태양열 또는 열회수 시스템 이용 - 호주: 낙농분야에 적용 제안 - 일본: 재생에너지 활용기술 개발 계획	Proposed	Proposed Adopted	[31-33]
스마트팜-정밀사양기술	- ICT 기술 적용 정밀사양 - 스마트축사 기술 구축 및 보급중 - 일본: 노동력 절감+정밀사료관리 기술 전략	Under study	Under study	[34-36]
프로바이오틱스	질병 저항성 향상 및 영양소 이용효율 증가	Under study	Under study	[37]
생산성 향상	- 거대한우 선발, 육종 - 한우 육질형, 성장형 계통 조성 - 일본: 가축개량을 통한 환경부담 경감 전략	Under study	Under study	[35, 38]
바이오차	- 바이오차 이용 탄소 토양격리 및 토양 개량 호주: 기술적용시 국가 펀드 지원(ERF) 영국: NFU 적용 제안 미국, 캐나다, 일본, 뉴질랜드, 중국 등에서 적용 - 축산분뇨 이용한 바이오차 활용 가능성 평가 필요	Proposed Under study	Adopted	[39-42]
바이오가스 플랜트	- 로컬 바이오가스 시스템 도입 - 바이오메탄가스로 차량전환 - 지역 에너지 생산-지역소비	Adopted Under study	Adopted Under study	[25, 31, 35, 43]

표 2. 계속

탄소저감기술	탄소저감기술 설명	기술활용정도		참고문헌 번호
		국내	국외	
도축 전 (Pre-Harvest)				
농장단계				
농장 분뇨보관 및 처리시설 개선	- 농장 분뇨저장, 보관시설 가스불투과성 덮개 설치 - 영국의 기후변화 완화조치로 제안됨 - 암모니아와 메탄의 공기중 배출 차단, N ₂ O와 NH ₃ 배출량을 각각 100%와 80%, 메탄변환계수 47% 감소 가능 제시	Proposed	Proposed	[36]
장내 메탄억제 사료보충제	- Oils, essential oils - Microalgae: 호주에서 해조류 이용 메탄저감사료보충제 시판 예정, - 호주: 지정된 첨가제 급여시 국가 펀드(ERF) 지원 - Nitrate: 질산염블록 급여로 장내 메탄 발생 감소 호주에서 방목중 비육우에 질산염 블록 급여시 펀드(ERE) 지원 - 3-Nitrooxypropanol: 네덜란드 DMS사의 3-NOP 첨가제(Bovear) 브라질, 칠레에서 육우, 낙농우사용 승인. 육우 80%, 낙농우 30% 메탄 감소 효과 - 국내외 다수의 메탄저감사료보충제의 메탄 저감 효과 연구중	Under study	Adopted	[23, 39, 44, 45]
저탄소 가축관리	- 메탄배출억제사료: 레몬그라스, 유채, GM-라이그라스 등 - 질소배출저감사료: 질경이, 사탕무, 항질소 또는 요소분해 억제물질 등 제안 - 국내외 다수의 메탄 저감 사료 연구 진행됨	Under study	Adopted	[37, 38]
웨어러블 메탄포집 마스크	- Cargill(미국)과 Zelp(영국) 협업으로 웨어러블 마스크 개발, 호흡기 통해 배출되는 메탄가스의 90-95% 포집, 이산화탄소로 전환	-	Adopted	[46]
저메탄소 육종	ICT 기반 저메탄 배출 소 육종	Under study	Under study	[38, 47, 48]
도축 후(Post-Harvest)				
가공단계				
에너지효율 향상 및 화석연료 사용 절감	- 가공장 태양광 에너지 또는 기타 재생 에너지 - 축산형 태양광 발전기술로의 활용 기대 - EU F2F 전략에서 도입 기술로 제시함(태양광) - 호주: 태양광 에너지 활용 제안	Proposed	Proposed	[31]
도축장 폐수 및 폐기물 활용	- 호주: 양돈 바이오가스 발효조에 도축장폐수 활용 도축장폐수의 혐기발효 활용 연구 진행중 - 국내외: 도축폐기물(내장, 지방 등폐기물)을 활용 혐기발효를 통한 메탄가스 생산 기술 개발중	Under study	Adopted	[25, 26, 43, 49]
탄소완화 쇠고기 소비 장려	- 탄소완화 쇠고기 소비 장려 : 근내지방이 적고 연도가 보장되는 저탄소 쇠고기에 대한 소비자 소비 장려 - 건강한 쇠고기 소비 확대 : 낮은 근내지방을 저급육과 동일시하는 소비자 인식 개선	Proposed		[38]
유통단계				
화석연료의 재생, 신생에너지 전환	- 유통차량 신재생에너지 사용 등으로 화석연료 사용 감소	-	Proposed	
탄소절감포장재 사용	- 탄소배출량이 적은 포장재 사용 - 탄소배출량 적은 식품 패키지 구성(예: longer shelf life) - 에너지소비 적은 방법으로 유통 가능한 포장 및 보관시 에너지 소비 최소화	Proposed	Proposed	[35]
축산물 유래 음식물쓰레기 저감	- 식품손실감소방안 마련 - 유통기한이 긴 포장법을 쓰는게 친환경 포장재보다 온실가스 저감에 효과적임 - 일본: 냉동, 해동, 조리기술, 데이터 기반 스마트 콜드체인 시스템 개발 계획	-	Proposed	[35, 50]

방법 이외에는 모두 제안단계의 기술들이었다. 물론, 쇠고기를 생산하는데 있어 농장단계에서 발생하는 온실가스의 양이 가장 많은 것은 사실이지만, 쇠고기의 지속가능성은 생산의 탄소중립뿐만 아니라 소비자가 소비하는 것 까지 포함하는 지속가능성에 대해 접근이 필요한 시기이다.

제언

지구온난화가 가속화되면서 쇠고기의 지속가능성에 대한 관심이 많아지고 있고, 이에 따른 많은 연구가 진행 중이다. 하지만 쇠고기의 지속가능성은 대부분이 환경지속가능성에 초점이 맞추어져 있고, 쇠고기의 동물성 단백질로서 사회적 역할을 고려한 생산에서 소비까지 전 과정의 지속가능성을 함께 고려하고 있지 않고 있다. 쇠고기뿐만 아니라 지속가능한 축산물의 미래를 위해서 농장에서 소비자의 식탁에 오르기까지 다양한 전략적 접근이 필요하며, 수많은 기술적 노력들이 실제 축산물을 생산하고 소비하는 과정에서 온실가스 배출량을 줄이는 데 중요한 역할을 할 것이다. 현재, 산업 전반에서 기후변화를 완화하기 위한 전략을 추진함에 따라 축산물 또한 기후변화에

대응하기 위해 효율적인 탄소절감 기술들을 적용하고, 최선의 전략으로 지속가능한 축산물의 생산-소비에 접근해야 할 것이다.

FAO(2019)는 축산업을 저탄소 축산으로 유도하기 위해서는, 실제 축산물을 소비하는 소비자가 신뢰할 수 있는 기후-스마트 축산물 인증에 대한 이력 추적과 적절한 라벨링 시스템이 저탄소 축산에 대한 시장수요를 생산할 수 있다고 하였다. 국내 쇠고기 산업의 지속가능성의 범주를 환경뿐만 아니라, 사회 경제적 역할을 포함할 수 있도록 설정하고, 생산 단계별 주요 온실가스 발생 포인트에 탄소절감 기술을 적용할 수 있도록 하여 최종 생산물의 탄소발생량을 확인할 수 있는 시스템을 개발이 필요하다. 이러한 축산물의 탄소이력시스템이 개발된다면 소비자가 축산물의 탄소발생이력을 확인하고 선택할 수 있도록 하여 소비자의 자발적인 저탄소축산물 소비를 유도할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구원고는 농촌진흥청 연구과제(과제번호: PJ017020032022) 수행결과의 일부임을 알려드립니다.

참고문헌

1. Randolph TF, Schelling E, Grace D, Nicholson CF, Leroy JL, Cole DC, et al. 2007. Invited review: Role of livestock in human nutrition and health for poverty reduction in developing countries^{1,2,3}. *Journal of Animal Science* 85(11):2788-800.
2. Poore J, Nemecek T. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360(6392):987-992.
3. Alexandratos N, Bruinsma J. 2012. *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision*.
4. Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar TD, Castel V, Rosales M, Rosales M, et al. 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*: Food & Agriculture Org.
5. Pachauri R. 2008. *Global warning! The impact of meat production and consumption on climate change*. Peter

- Roberts Memorial Lecture: 8, London.
6. Pais DF, Marques AC, Fuinhas JA. 2020. Reducing meat consumption to mitigate climate change and promote health: But is it good for the economy? *Environmental Modeling & Assessment* 25(6):793-807.
 7. Laestadius LI, Neff RA, Barry CL, Frattaroli S. 2016. No meat, less meat, or better meat: Understanding NGO messaging choices intended to alter meat consumption in light of climate change. *Environmental Communication* 10(1):84-103.
 8. 농림축산식품부. 2021. 2050 농식품 탄소중립 추진전략.
 9. De Vries M, de Boer IJ. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science* 128(1-3):1-11.
 10. Wiedemann S, McGahan E, Murphy C, Yan M. 2015. Resource use and environmental impacts from beef production in eastern Australia investigated using life cycle assessment. *Animal Production Science* 56(5):882-894.
 11. Wiedemann S, McGahan EJ, Murphy CM. 2016. Environmental impacts and resource use from Australian pork production assessed using life-cycle assessment. 1. Greenhouse gas emissions. *Animal Production Science* 56(9):1418-1431.
 12. Asem-Hiablie S, Battagliese T, Stackhouse-Lawson KR, Alan Rotz C. 2019. A life cycle assessment of the environmental impacts of a beef system in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24(3):441-55.
 13. Berton M, Agabriel J, Gallo L, Lherm M, Ramanzin M, Sturaro E. 2017. Environmental footprint of the integrated France-Italy beef production system assessed through a multi-indicator approach. *Agricultural Systems* 155:33-42.
 14. Hessle A, Bertilsson J, Stenberg B, Kumm K-I, Sonesson U. 2017. Combining environmentally and economically sustainable dairy and beef production in Sweden. *Agricultural Systems* 156:105-14.
 15. USDA. Ag Data commons, Available from: <https://data.nal.usda.gov/>
 16. MLA. Developing a Life Cycle Inventory for Australian Agriculture 2013, Available from: <https://www.mla.com.au/research-and-development/reports/2013/developing-a-life-cycle-inventory-for-australian-agriculture/>
 17. 농촌진흥청. 2020. 저탄소 농축산물 인증제 참여를 위한 반추가축 축산물 LCI DB 기반 구축.
 18. Capper JL, editor *The Carbon Footprint of Beef Production*. 64th Annual Reciprocal Meat Conference; June 19-22, Kansas State University Manhattan.
 19. Sithyphone K, Yabe M, Horita H, Hayashi K, Fumita T, Shiotsuka Y, et al. 2011. Comparison of feeding systems: feed cost, palatability and environmental impact among hay-fattened beef, consistent grass-only-fed beef and conventional marbled beef in Wagyu (Japanese Black cattle). *Animal Science Journal* 82(2):352-359.
 20. Beauchemin K, Kreuzer M, O'mara F, McAllister T. 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(2):21-7.
 21. Bannink A, Smits M, Kebreab E, Mills JA, Ellis J, Klop A, et al. 2010. Simulating the effects of grassland

- management and grass ensiling on methane emission from lactating cows. *The Journal of Agricultural Science* 148(1):55-72.
22. Haque MN. 2018. Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Journal of Animal Science and Technology* 60(1):1-10.
23. Almeida AK, Hegarty RS, Cowie A. 2021. Meta-analysis quantifying the potential of dietary additives and rumen modifiers for methane mitigation in ruminant production systems. *Animal Nutrition* 7(4):1219-30.
24. EPA. Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation :2015-2050. In: Agency USEP, ed. Office of Atmospheric Programs (6207A) Washington, DC 200052019.
25. Mofijur M, Fattah IR, Kumar PS, Siddiki SYA, Rahman SA, Ahmed S, et al. 2021. Bioenergy recovery potential through the treatment of the meat processing industry waste in Australia. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4):105657.
26. Otero A, Mendoza M, Carreras R, Fernández B. 2021. Biogas production from slaughterhouse waste: Effect of blood content and fat saponification. *Waste Management* 133:119-26.
27. USDA. 2022. Partnerships for Climate-Smart Commodities, Available from: <https://www.usda.gov/climate-solutions/climate-smart-commodities>
28. Defra. 2022. Sustainable Farming Incentive, Available from: <https://defrafarming.blog.gov.uk/sustainable-farming-incentive-pilot-guidance/>
29. DCCEEW. (2022년 10월 현재). Methods for the Emissions Reduction Fund, Available from: <https://www.dcceew.gov.au/climate-change/emissions-reduction/emissions-reduction-fund/methods>
30. DCCEEW. (2022년 2월). MERiL program awards \$4 million to support low-emissions livestock feed R&D, Available from: <https://www.dcceew.gov.au/about/news/meril-program-awards-4-million-to-support-low-emissions-livestock-feed-rd>
31. Albert MM. 2020. Research for the AGRI committee – The farm to fork strategy implications for agriculture and the CAP. European Parliamentary Research Service, 2020-05-15.
32. Chen G, Maraseni T, Banhazi T, Bundschuh J. 2015. Benchmarking energy use on farm. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC).
33. Japan. 2020. Environment Innovation Strategy. In: Japan Pmsoo, editor.
34. EPIS. 스마트팜코리아 , Available from: <https://www.smartfarmkorea.net>
35. Japan-Cabinet. 2020. Green Growth Strategy through Achieving Carbon Neutrality in 2050.
36. Eory V, Maire J, MacLeod M, Sykes A, Barnes A, Rees R, et al. 2020. Non-CO₂ abatement in the UK agricultural sector by 2050: Summary report submitted to support the 6th carbon budget in the UK.
37. Reisinger A, Clark H, Abercrombie RM, Aspin M, Ettema P, Harris M, et al. 2018. Future options to reduce biological GHG emissions on-farm: critical assumptions and national-scale impact: New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre.
38. 축산과학원-한우연구소. Available from: <https://www.nias.go.kr>
39. Australia Fedral Register of Legislation-ERF(Emission Reduction Fund), Available from: <https://business.gov>.

- au/grants-and-programs/Emissions-Reduction-Fund
40. National Farmers Union N. 2019. Achieving Net Zero: Farming's 2040 Goal.
 41. Sohi S, Loez-Capel E, Krull E, Bol R. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 5(09):1-57.
 42. Biomass Controls, LLC, USA, NativeEnergy, USA.
 43. Skerman A, Tait S. 2018. Bioenergy support program-DAF transition. Final Report Prepared for Pork CRC Project 4C-116.
 44. Roque BM, Brooke CG, Ladau J, Polley T, Marsh LJ, Najafi N, et al. 2019. Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome* 1(1):1-14.
 45. DSM. 2019. Taking action on climate change, together: Summary of scientific research how 3-NOP effectively reduces enteric methane emissions from cows.
 46. Cargill. 2021. Cargill and ZELP embark on strategic partnership to tackle methane emissions in the dairy industry 2021, Available from: <https://www.cargill.com/2021/cargill-and-zelp-embark-on-strategic-partnership>
 47. DPIRD GoWA. 2022. Breeding for lower greenhouse gas emissions 2022, Available from: <https://www.agric.wa.gov.au/climate-land-water/breeding-lower-greenhouse-gas-emissions>
 48. Lassen J, Difford GF. 2020. Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle. *Animal* 14:s473-s83.
 49. Rhee C, Kim DW, Yu SI, Lee ME, Shin J, Kim H-W, et al. 2021. Biogas potential assessment and characterization of Korean slaughterhouse waste for anaerobic digestion. *Environmental Technology & Innovation* 24:101858.
 50. Heller M. 2017. Food production environmental footprint literature summary: Packaging and wasted food. State of Oregon Department of Environmental Quality: Center for Sustainable Systems, University of Michigan.
 51. FAO. 2019. Five practical actions towards low-carbon livestock.