

미이용 해조류를 활용한 축우용 사료화에 따른 경제성과 환경성 분석

김남리 · 황일기¹ · 김삼철² · 주영호² · 김신권*

국립수산과학원 양식연구과, ¹국립수산과학원 수산식물품종관리센터, ²경상국립대학교 응용생명과학부(농업생명과학연구원)

Economic Feasibility and Environmental Implications for the Use of Seaweed By-products as Feed for Ruminants

Nam Lee Kim, Il Ki Hwang¹, Sam Churl Kim², Young Ho Joo² and Shin Kwon Kim*

Aquaculture Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

¹Aquatic Plant Variety Center, National Institute of Fisheries Science, Mokpo 58746, Republic of Korea

²Division of Applied Life Science (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

In this study, the economic and environmental feasibility of seaweed by-products as livestock feed ingredients was evaluated. In the last three years (2021–2023), the estimated average annual production of domestic seaweed by-products, including processing residuals from sea mustard and kelp, was 210,000 tons. The economic feasibility analysis of using seaweed by-products as livestock feed indicated a net benefit of 482,237 KRW per ton. Additionally, substituting seaweed by-products at 0.25%, 0.5%, 1%, and 2% in livestock compound feed generated net benefits of 6.5, 12.9, 25.9, and 51.7 billion KRW, respectively. The potential market value was analyzed from an environmental perspective by examining the greenhouse gas reduction potential of seaweed additives. By adding 2% laver, 2% sea mustard, and 0.25% sea mustard sporophyll to the feed, greenhouse gas emissions could be reduced by economic values estimated at 10.8, 11.4, and 15.6 billion KRW, respectively. The findings of this study suggest that the use of seaweed by-products livestock as feed ingredients can generate economic and environmental benefits.

Keywords: Seaweed residue, Resource recovery, Cattle feed, Greenhouse gas reduction, Economic feasibility

서론

국내에서 해조류는 식용, 사료, 가공식품, 의약품 및 해조공업의 원료로 활용범위가 확대되면서 생산량이 지속적으로 증가하고 있다(Ahn et al., 2005; Hong et al., 2010). 해조류는 대부분 양식으로 생산되고 있으며, 2023년 기준 해조류 양식생산량이 1,741,772톤으로 해면양식 생산량의 약 77%를 차지하고 있다(KOSIS, 2023a). 그러나 해조류는 양식, 채취 및 가공 과정에서 발생하는 부산물의 대부분이 재활용 또는 자원화 되지 못하고 폐기물로 처리되고 있으며(Kim and Lee, 2015) 수거 및 소각을 위한 사회·경제적 비용이 발생되고 있다. 또한 폐기물의 부적절한 처리(불법 매립, 해양투기 등)로 인한 환경오염은 경제적 관점에서 자연과 생태계에 미치는 외부효과를 확대시켜 사회적 비용을 증가시키고 편익 감소를 유발한다(Kim and Lee, 2015; Suh et al., 2016). 『폐기물관리법』 제3조의2 (폐기물 관리의 기

본원칙) 6항에 따르면 “폐기물은 소각, 매립 등의 처분을 하기 보다는 우선적으로 재활용함으로써 자원생산성 향상에 이바지하도록 하여야 한다”고 명시되어 있다. 이에 국립수산과학원에서는 2023년부터 해조류부산물 재활용 방안으로 축우용 사료 원료로 활용하기 위한 연구를 수행하고 있으며, 해조류가 사료 대체제로서의 이용가능성은 많은 연구에서 확인되고 있다. 축우용 사료에 미역부산물을 첨가하였을 경우 젖소의 반추위 내 pH를 안정시키고 산유량과 우유 내 Ca 함량을 증가시키는 것으로 나타났으며(Baek et al., 2004; Hong et al., 2010), 대두박을 대체하여 녹조류를 첨가하였을 경우 소화율에 차이가 발견되지 않는 것으로 나타났다(Tayyab et al., 2016; Lamminen et al., 2018). 이처럼 해조류는 높은 단백질 함량으로 대두박과 같은 기존 단백질 사료에 대한 의존도를 줄이는 데 사용할 수 있다. 게다가 해조류 추출물은 장내 메탄 생산량을 줄이고 생산 효율성을 향상시키는 효과도 입증되면서 영양적, 환경적 이

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2420 Fax: +82. 51. 720. 2189

E-mail address: ksk4116@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0336>

Korean J Fish Aquat Sci 57(4), 336-341, August 2024

Received 27 May 2024; Revised 2 July 2024; Accepted 8 July 2024

저자 직위: 김남리(연구원), 황일기(연구원), 김삼철(교수), 주영호(연구교수), 김신권(연구원)

점을 충족시키는 대체원료로 인정받고 있다(Maia et al., 2016; Kinley et al., 2020; Roque et al., 2021).

국내 축산용 배합사료 원료는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정으로 2022년 기준 전체 사료원료 사용량의 약 79%가 수입산으로 나타났다(MAFRA, 2023). 이는 국제곡물시장의 수급 및 가격 변동과 같은 외부 충격에 국내 배합사료시장과 축산업이 취약해질 수밖에 없는 문제점이 있다. 따라서 해조류부산물을 사료원으로 이용할 경우 경제적 측면에서는 사료자원을 확보할 뿐만 아니라 수입대체효과와 폐기물 처리에 따른 비용절감이 가능할 것이다. 또한 환경적 측면에서는 해양환경 오염 저감 및 소에서 배출되는 메탄가스 저감 등 다양한 측면에서 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다.

부산물 자원화에 대한 필요성은 지속적으로 제기되고 있으며(Kang and Kim, 2015; Kim and Lee, 2015; Kang and Lee, 2019), 부산물을 활용하기 위해서는 자원으로써 타당하기에 대한 경제적 분석이 뒷받침되어야 한다. 이에 본 연구에서는 해조류부산물의 축우용 사료화에 따른 수입원료 대체효과 및 폐기물처리 비용 절감 등의 경제적 편익을 분석하고자 하였다. 또한 환경적 측면에서 장내 발효에 의한 온실가스 배출량 저감효과를 시장가치로 환산하여 제시함으로써 최종적으로 해조류부산물을 활용하여 사료화 하기 위한 경제적·환경적 타당성을 평가하였다.

재료 및 방법

해조류부산물 발생량 추정

국내 수산물로부터 발생하는 부산물 발생량은 품종별 생산량에 ‘식품수급표’의 품종별 비가식비율을 곱하여 산출하고 있다. 해조류의 경우 ‘식품수급표’에 따르면 김, 다시마 및 미역의 각각 89%, 90% 및 87%로 나타났지만(KREI, 2021) 이는 비가식비율이 수분량에 기초하여 추정되었기 때문에 부산물 발생량이 과대해질 우려가 있다(KMI, 2013). 이러한 점을 고려하여 Kang and Lee (2019)에서 제시한 환산율, 폐기율 및 계산식을 적용하여 최근 3년간(2021–2023년) 부산물 발생량을 추정하였다(식 1). 생산단계에서 미역은 전체의 25%, 다시마는 10%를 부산물(뿌리, 줄기 등)로 환산하였으며, 전복 먹이용은 먹이 공급 후 버려지는 부산물을 5%로 환산하였다(Kang and Lee, 2019). 가공단계에서는 미역과 다시마의 최종 폐기율을 각각

9.6%와 10%로 산정하였다(Kang and Lee, 2019). 김은 생산단계에서 김발에 붙어있는 잔존량 일부가 바다에 유실되거나 그 부분을 부산물로 볼 수 없으며, 가공단계에서 품질이 저하되거나 탈락되는 김은 가루용 등 대부분 식품에 사용되는 것으로 조사되어 김에 대한 부산물은 없는 것으로 판단하였다. 따라서 미역과 다시마에 대한 부산물을 바탕으로 해조류부산물을 추정하였다. 미역과 다시마의 전복 먹이용 생산량은 양식 생산량의 각각 60%와 50%를 적용하여 추정하였다(NIFS, 2010; KMI, 2024). 해조류부산물을 사료원료로 사용하기 위해서는 가공 및 건조 과정을 거쳐야 하기 때문에 해조류부산물의 건조 비율을 원물(습중량)의 10%로 가정하여 건조 중량을 산정하였다(Ahn et al., 2005).

$$\begin{aligned} & \text{미역 및 다시마 부산물(생산단계)} = \\ & \text{식용 또는 먹이용 생산량(생중량)} \times \frac{\text{환산율}}{1-\text{환산율}} \\ & \text{미역 및 다시마 부산물(가공단계)} = \\ & \text{식용 생산량(생중량)} \times \text{폐기율} \dots\dots\dots \text{식(1)} \end{aligned}$$

해조류부산물의 사료화에 따른 편익 분석

비용 항목

양식단계에서 발생하는 부산물은 해양 투기되는 것이 대부분이며 가공단계에서 발생한 부산물은 생활쓰레기 또는 음식물류 폐기물과 함께 혼합 배출된다(KMI, 2013; Kang and Lee, 2019). 본 연구에서는 음식물류폐기물을 재활용하여 사료화 할 경우를 기준으로 비용을 산정하였다. 국내 발생 음식물류폐기물의 약 89.7%는 자원화 시설을 통해 처리되며, 이외에는 발생원 직접처리, 축산농가 처리 및 소각 등의 방식으로 처리되고 있다(KFTC, 2022). 이에 따라 비용항목은 i)해조류부산물 수거 및 운반 비용, ii)재활용 위탁비용으로 구분하였다. 음식물류폐기물의 최소 처리단가는 처리시설의 용량, 지역별 상황 및 이동 거리 등에 따라 달라지므로 표준단가를 산정하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 2022년 기준 음식물류폐기물의 최소 처리단가인 130,000 원/톤을 적용하였으며(KFTC, 2022) 재활용을 위한 위탁비용은 100,000원/톤 소요되는 것으로 적용하였다(KMI, 2013).

편익 항목

직접적 경제적 편익은 산출물이 시장에서 거래되어 발생하는

Table 1. Import prices of feed grains (2020–2022)

Year	Quantity (ton)	Purchase price (USD)	Unit price (USD/ton)	Purchase price (KRW)	Unit price (KRW/ton)
2020	11,843,000	2,619,118,000	221	3,145,560,718,000	265,605
2021	12,360,000	3,622,317,000	293	4,216,376,988,000	341,131
2022	12,426,000	4,677,280,000	376	6,150,623,200,000	494,980
Mean	12,209,667	3,639,571,667	297	4,504,186,968,667	367,239

Used the data from MARTA (2022).

경제적 편익만을 지칭한다. 간접적 경제적 편익은 부산물의 성격을 가지고 있는 편익을 의미하는 것으로 시장의 거래에서 발생하는 것이 아닌 산출물의 보유 혹은 적용으로 인한 경제적 편익을 의미한다(KREI, 2016). 이러한 관점에서는 비용절감 효과, 수입대체 효과 및 환경개선 효과 등은 간접적 경제적 편익으로 간주된다. 본 연구에서는 편익 항목을 i)해조류부산물 소각비용 절감, ii)축우용 배합사료 수입원료 대체 편익, iii)사료화에 따른 판매 수입을 고려하였다. 소각비용 절감은 해조류부산물을 사료화 할 경우 소각 시 발생하는 비용이 자원화로 인한 편익으로 간주될 수 있다. 본 연구에서는 폐기물의 종류와 상관없이 소각 비용을 285,000원/톤의 단가를 적용하였다(MOE, 2022). 다음으로 해조류부산물을 활용함으로써 곡물 수입 대체 효과를 편익으로 반영할 수 있다. 최근 3년간 사료용 곡물 수입량은 12,210천톤으로 약 4조 5천억 원 규모로 나타났으며(MATRA, 2022; Table 1), 곡물수입 대체편익은 해조류부산물 대체량(건조 중량)에 수입단가인 367,239원/톤을 곱하여 계산할 수 있다(식 2). 마지막으로 해조류부산물을 활용하여 판매되는 사료의 가치가 편익으로 반영될 수 있다. 현재 해조류부산물 사료 판매가격에 대한 정보가 부재하여 서울지역의 음식물 자원화센터 등 재활용처리시설을 통해 음식물류폐기물을 사료화하여 거래되는 판매가격을 조사하였다. 그 결과, 음식물류폐기물은 재활용 과정을 거쳐 생산된 사료를 농가 및 축산 사료공장에 유상판매하고 있으며, 건식사료 기준 50,000–70,000원/톤에 판매하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 조사결과에 따라 평균 판매단가인 60,000원/톤을 적용하여 편익을 추정하였다. 또한 축우용 배합사료 생산량을 바탕으로(KOSIS, 2022)으로(Table 2) 해조류부산물로 0.25%, 0.5%, 1% 및 2% 대체 시 순편익을 분석하였다.

$$\begin{aligned} & \text{사료용 곡물 수입대체 효과=} \\ & \text{해조류부산물 대체량(건조 중량)} \\ & \times \text{사료용 곡물 수입단가(2020–2022년)} \dots\dots\dots \text{식(2)} \end{aligned}$$

온실가스 배출량 저감에 따른 시장가치 분석

해조류 첨가 수준에 따른 반추위 내 메탄 발생량에 미치는 영향을 검증한 결과를 바탕으로 저감가능한 온실가스를 잠재적 시장가치로 환산하였다. 실험에 사용된 해조류는 김, 미역, 다

시마 및 미역귀를 이용하였다. 해조류의 가공처리는 온도와 시간에 따라 비저염(김: 15°C, 1분; 미역과 다시마: 15°C, 2분; 미역귀: 15°C, 3분) 및 저염(김: 60°C, 0.5분; 미역과 다시마: 80°C, 2분; 미역귀: 70°C, 3분)으로 처리하였다. 저염처리 후 상온의 흐르는 물을 이용하여 1분간 2회 행굼을 통해 이물질을 제거하였다. 저염처리된 해조류는 송풍식 건조기(OF-22GW; JEIO TECH, Daejeon, Korea)에 55°C에서 72시간 건조 후 cutting mill 분쇄기(Shinmyung Electric Co., Ltd., Gimpo, Korea)를 이용하여 1 mm 입자로 분쇄한 시료를 분석에 이용하였다. *In vitro* 반추위 내 발효를 위해 육성우용 사료를 기질로 이용하였으며, 해조류 첨가 수준은 김, 미역 및 다시마는 각각 0%, 0.5%, 1% 및 2%, 미역귀는 0%, 0.25%, 0.5% 및 1%로 설정하였다. 반추위 내 소화율 분석을 위하여 반추위액은 캐놀라가 장착된 한우암소에게 조사료와 농후사료를 8:2 비율로 7일간 급여한 후 오전 사료급여 직전(08:00)에 채취하였다. 채취된 위액은 2 겹의 cheese cloth로 걸러주고, Tilley and Terry (1963)의 방법에 따라서 반추위액과 버퍼에 시료 0.5 g을 혼합하여 Ankom DaisyII incubator (Ankom Technology, Macedon, NY, USA)에서 48시간 동안 배양하여 *in vitro* 건물소화율(IVDMD)을 분석하였고, 그 이후 추가적으로 neutral detergent fiber (NDF) 함량을 분석하여 *in vitro* NDF소화율(*in vitro* neutral detergent fiber digestibility, IVNDFD)을 분석하였다.

실험결과를 바탕으로 한우의 메탄 배출량을 시장가치로 환산하기 위해 IPCC (1996) 가이드라인의 Tier 1 방법으로 산정하였다. 메탄 배출량은 기본 배출계수에 한우 사육두수를 곱하여 산정하였으며, 국내 한우 사육두수는 통계청의 분기별 사육두수의 연평균 자료를 적용하였다(KOSIS, 2023b) (Table 3). 배출계수는 메탄배출계수 47 (kg CH₄/head/year)을 이용하였으며 산정방법은 식 (3)과 같다(MOE, 2018). 장내발효 부문에서

Table 2. Production volume of beef cattle compound feed (2020–2022)

Year	Quantity (ton)
2020	5,050,393
2021	5,384,825
2022	5,659,639
Mean	5,364,952

Used the data from KOSIS (2022).

Table 3. Number of Hanwoo cattle (2023)

Quarter	Number
1/4	3,367,423
2/4	3,523,376
3/4	3,535,813
4/4	3,475,537
Mean	3,535,813

Used the data from KOSIS (2023b).

Table 4. Emission trading prices (2021–2023)

Year	Item name	Price (KRW/ton)
2021	KAU21	23,402
2022	KAU22	23,889
2023	KAU23	11,757
Mean	-	19,683

Used the data from KRX ETS (2023).

산정된 메탄 배출량은 지구온난화지수(CH₄=21)를 곱하여 이산화탄소 환산량(CO₂eq.)으로 변환하였다. 이를 바탕으로 해조류부산물 첨가를 통해 저감가능한 이산화탄소를 잠재적 시장가치로 환산하였다. 시장가치로 환산하기 위한 배출권 거래가격은 2021년부터 2023년 거래 시가의 평균 가격인 19,683원/톤을 적용하였다(KRX ETS, 2023) (Table 4).

$$E_i = EF_i \times population_i \left(\frac{10^6 \text{ kg}}{Gg} \right) \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

E_i, 가축종 i의 CH₄ 배출량(천톤 CH₄/year)
 EF_i, 가축종 i의 배출계수(kg CH₄/head/year)
 Population_i, 가축종 i의 사육두수(head)

결 과

해조류부산물 발생량

최근 3년간(2021–2023년) 미역의 평균 양식 생산량은 575,067톤이며 환산율을 적용한 결과, 부산물은 130,885톤으로 22.8%가 부산물 발생량인 것으로 추정되었다. 다시마 양식 생산량은 614,004톤이며 부산물은 76,750톤으로 12.5%가 부산물 발생량으로 추정되었다. 따라서 해조류 생산량의 67%를 차지하는 미역과 다시마에서 207,635톤의 부산물이 발생하는 것으로 나타났다. 건조 중량은 부산물에 건조 비율 10%를 적용하였으며, 미역과 다시마가 각각 13,088톤과 7,675톤으로 총 20,763톤으로 나타났다(Table 5).

해조류부산물의 사료화에 따른 순 편익 분석

해조류부산물을 이용한 축우용 사료화를 위한 총 비용은 수거 및 운반비용과 재활용 위탁비용을 합하여 230,000원/톤으로 나타났다. 총 편익은 소각비용 절감편익, 사료용 곡물수입 대체편익 및 해조류부산물을 이용한 사료의 판매수입을 합하여 712,239원/톤으로 분석되었다. 이에 따라 순 편익은 총 편익

에서 총 비용을 차감한 482,239원/톤으로 분석되었다(Table 6).

또한 축우용 배합사료 원료를 해조류부산물로 0.25%, 0.5%, 1% 및 2%로 대체 시 순 편익을 분석하였다. 그 결과 3년 평균 축우 비육용 배합사료 생산량은 5,364,952톤으로 해조류부산물이 축우용 배합사료 원료의 0.25% 대체 시 필요한 부산물은 건조 중량 기준 13,412톤, 순 편익은 약 65억원으로 분석되었다. 0.5% 대체 시 필요한 부산물은 26,825톤, 순 편익은 약 129억원으로 분석되었다. 1% 대체 시 필요한 부산물은 53,650톤, 순 편익은 약 259억원이며, 2% 대체 시 필요한 부산물은 107,299톤, 순 편익은 약 517억원으로 분석되었다(Table 7).

온실가스 배출량 저감에 따른 시장가치 분석

해조류별 반추위 내 메탄발생량에 미치는 효과 검증 결과, 김은 NDF 소화율 당 메탄 발생량이 대조구(0% 첨가)에 비해 저염처리 2% 첨가구에서 15.7% 감소하였다. 미역은 NDF 소화율 당 메탄 발생량이 대조구에 비해 저염처리 2% 첨가구에서 16.6% 감소하였다. 다시마는 건물 및 NDF 소화율 당 메탄 발생량이 저염처리 시 처리구간의 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 미역귀는 NDF 소화율 당 메탄 발생량이 대조구에 비해 저염처리 0.25% 첨가구에서 22.7% 감소한 것으로 나타났다. 실험 결과를 바탕으로 해조류 첨가에 따른 온실가스 배출량 저감에 대한 시장가치를 분석하였다.

2023년 국내 한우 사육두수 기준 장내발효 온실가스 발생량은 IPCC (1996)의 Tier 1 값에 의하면 3,489,847톤 CO₂eq.로 나타났다. 실험 결과에 따라 김 2% 함량으로 약 547,906톤 CO₂eq.의 온실가스 저감이 가능하며, 이는 배출권 거래가격을 적용하여 시장가치로 환산하면 약 108억원의 시장가치를 창출할 수 있는 것으로 분석되었다. 미역의 경우 2% 함량으로 약 579,315톤 CO₂eq.의 온실가스 저감이 가능하며 114억원에 해당하는 시장가치를 창출할 수 있다. 마지막으로 미역귀는 0.25% 함량으로 약 792,195톤 CO₂eq.의 온실가스 저감이 가능한 것으로 나타났으며 시장가치로는 156억원에 해당하는 가치를 창출할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 김이 온실가스 배

Table 5. Seaweed production and by-product generation

Category	Varieties	Production quantity (ton)	Conversion rate (%)	By-products (ton)	Dry weight (ton)	
Brown algae	Sea mustard	Consumption	345,040	25	86,260	8,626
		Feed	230,027	5	11,501	1,150
		Processing	345,040	9.6	33,124	3,312
		Total	575,067	-	130,885	13,088
	Kelp	Consumption	307,002	10	30,700	3,070
		Feed	307,002	5	15,350	1,535
Processing		307,002	10	30,700	3,070	
Total		614,004	-	76,750	7,675	
Red algae	Laver	Consumption	543,628	-	0	0
Total		1,732,699	-	207,635	20,763	

출 저감량이 가장 낮게 나타났으며, 미역귀는 첨가율은 낮으나 (0.25%) 온실가스 배출 저감 효과가 가장 높게 나타나 이에 따른 잠재적 시장가치도 가장 높은 것으로 분석되었다(Table 8).

고 찰

본 연구에서는 해조류부산물을 이용하여 축우용 사료 원료로 활용하기 위한 경제적, 환경적 타당성을 평가하였다. 이를 위해 선행연구를 통한 국내 해조류부산물 발생량을 추정한 결과, 해조류부산물은 최근 3년 평균 약 21만톤으로 추정되며 미역은 약 13만톤, 다시마는 약 7.7만톤이 부산물 발생량으로 추정되었다. 사료원료로 활용하기 위한 건조 중량으로 환산 시 약 2.1만톤의 부산물을 활용할 수 있는 것으로 추정되었으며, 이는 축우용 배합사료 생산량(5,364,952톤)의 0.39%에 해당하는 것으로 나타났다.

Table 6. Costs and benefits of using seaweed by-products as feed

Category	Item	Amount (KRW/ton)
Costs	Collection and transportation cost (A)	130,000
	Recycling consignment cost (B)	100,000
	Total cost	230,000
Benefits	Incineration cost reduction	285,000
	Import substitution benefit	367,239
	Feed sales revenue (Dry weight)	60,000
	Total benefit	712,239
Net benefit (Total benefit-Total cost)		482,239

Table 7. Net benefits based on the seaweed by-product substitution rates

Substitution rates (%)	Required amount of by-products (Dry weight, ton)	Net benefit (KRW)
0.25	13,412	6,467,972,719
0.5	26,825	12,935,945,438
1	53,650	25,871,890,875
2	107,299	51,743,781,751

Table 8. Greenhouse gas (GHG) emission reduction effects of seaweed additives

Category	Addition rate (%)	GHG emission reduction (ton CO ₂ eq.)	Market value generation (KRW)
Laver	2.0	547,906	10,784,252,081
Sea mustard	2.0	579,315	11,402,457,615
Sea mustard sporophyll	0.25	792,195	15,592,517,340

No greenhouse gas reduction effect observed with kelp addition.

미역과 다시마 부산물을 대상으로 축우용 사료화 방안에 대한 순 편익을 분석한 결과, 482,239원/톤의 순 편익이 창출되는 것으로 분석되었다. 또한 축우용 배합사료 대체비율(0.25%, 0.5%, 1% 및 2%)에 따른 순 편익을 분석한 결과, 해조류부산물로 0.25% 대체 시 약 65억원의 순 편익을 창출하는 경제적 효과가 있는 것으로 분석되었다. 환경적 측면에서 해조류부산물 첨가에 따른 메탄 발생량 저감효과 검증을 통해 잠재적 시장가치를 분석하였다. 그 결과, 미역귀는 다른 해조류에 비해 메탄 발생량 저감효과가 가장 높게 나타났으며 0.25% 첨가로 약 156억원의 가치에 해당하는 온실가스를 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 해조류부산물의 사료화 방안은 경제적, 환경적 편익 창출이 모두 가능한 것으로 평가되었다.

본 연구 결과를 토대로 해조류부산물을 이용하여 새로운 부가 가치를 창출하기 위해서는 무엇보다 사료 원료인 부산물을 대량 및 안정적으로 확보할 수 있어야 한다. 하지만 김의 경우 사료 원료로 활용할 수 있는 만큼의 부산물이 발생하지 않기 때문에 사료 원료로써 활용성이 낮을 것으로 판단된다. 일반적으로 해조류는 겨울철에 양성 및 수확이 이루어지므로 어류와 같은 수산부산물과 달리 연중 원료 공급에 대한 문제점이 발생할 수 있으며 해조류 생산량 감소 시 지속적인 원료 공급에 어려움을 겪을 수 있다. 따라서 해조류부산물을 사료화하기 위해서는 원료로써 지속적이고 안정적인 공급이 가능하도록 공급체계 구축이 뒷받침되어야 할 것이다.

또한 수거, 운송, 보관 등의 부산물 관리를 위한 지원이 필요하다. 현재 대부분 해조류 가공업체에서는 부산물을 일박스레기 및 음식물류폐기물과 혼합 배출하고 있으나 사료 원료로 활용하기 위해서는 해조류부산물을 전문적으로 수거하고 위생적으로 관리하여 사료공장 및 농가에 공급할 수 있는 시설 및 인프라 구축이 필요할 것이다. 이러한 당면 과제들이 지속적인 기술개발을 통해 개선된다면 해조류부산물을 사료 원료로 활용함으로써 폐기 자원을 최소화하는 동시에 새로운 부가 가치 창출이 가능할 것으로 기대된다. 더불어 해조류부산물은 국내에서 이용 가능한 메탄 발생량 저감 원료로써 국내 온실가스 배출량 저감에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 음식물류폐기물을 수거하고 사료화하는 절차를 기준으로 전반적인 비용을 적용한 한계점이 존재한다. 향후에는 해조류의 특성을 감안하여 사료화를 위한 전문적인 수거, 보관, 건조 및 가공 등에 소요되는 비용을 고려하여 보다 현실적인 경제적 평가가 이루어질 필요가 있다. 또한 농가의 관점에서 해조류부산물을 활용한 축우용 사료 공급 시 생산성 향상 및 사료비 절감 효과 등에 따른 농가의 경제성과 효율성에 대한 공동연구도 함께 추진될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 2024년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2024037)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn HG, Cho JS, Kang JG, Kim HL, Cha GS and Sohn BK. 2005. Study on preparation of fluid fertilizer using residual seaweeds. *J Korean Soc Environ Technol* 6, 210-218.
- Baek IK, Maeng WJ, Lee SH, Lee HG, Lee SR, Ha JK, Lee SS and Hwang JH. 2004. Effects of the brown seaweed residues supplementation on *in vitro* fermentation and milk production and composition of lactating dairy cows. *J Anim Sci Technol* 46, 373-386. <https://doi.org/10.5187/JAST.2004.46.3.373>.
- Hong ZS, Lee ZH, Xu CX, Yin JL, Jin YC, Lee HJ, Lee SB, Choi YJ and Lee HG. 2010. Effect of fermented brown seaweed waste (FBSW) on milk production, composition and physiological responses in holstein dairy cows. *J Anim Sci Technol* 52, 287-296. <https://doi.org/10.5187/JAST.2010.52.4.287>.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Retrieved from www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html on Apr 4, 2024.
- Kang JH and Lee WS. 2019. Study on industrialization strategy for efficient reuse of seaweed by-products. *J Fish Bus Adm* 50, 1-9. <http://dx.doi.org/10.12939/FBA.2019.50.4.001>.
- Kang SY and Kim JY. 2015. Reuse of red seaweed waste by a novel bacterium, *Bacillus* sp. SYR4 isolated from a sandbar. *World J Microbiol Biotechnol* 31, 209-217. <http://dx.doi.org/10.1007/s11274-014-1778-x>.
- KFTC (Korea Fair Trade Commission). 2022. Sanctions for Prohibiting Business Group Activity by the Korea Food Resources Association. Retrieved from www.ftc.go.kr action on Apr 4, 2024.
- Kim DY and Lee JS. 2015. Directions for eco-friendly utilization and industrialization of fishery by-products. *J Kor Fish Mar Edu* 27, 566-575. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.2.566>.
- Kinley RD, Martinez-Fernandez G, Matthews MK, de Nys R, Magnusson M and Tomkins NW. 2020. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *J Clean Prod* 259, 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>.
- KMI (Korea Marine Institute). 2013. Strategies for Eco-friendly Utilization and Industrialization of Fishery By-products. Report of KMI, Busan, Korea.
- KMI (Korea Marine Institute). 2024. Item Information (Seaweed). Retrieved from www.kmi.re.kr on Apr 1, 2024.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2022. Statistic Database for Livestock Trend Survey. Retrieved from <https://kostat.go.kr/portal/korea/index> on Apr 15, 2024.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2023a. Statistic Database for Aquaculture Production. Retrieved from <https://kostat.go.kr/> on Mar 13, 2024.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2023b. Statistic Database for Livestock Trend Survey. Retrieved from <https://kostat.go.kr/> on Apr 1, 2024.
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2021. 2021 Food Balance Sheet. Report of KREI, Naju, Korea.
- KRX ETS (Korea Exchange Emissions Trading Schemes). 2023. Emissions Market Inquiry. Retrieved from <https://ets.krx.co.kr> on Apr 1, 2024.
- Lamminen M, Halmemies-Beauchet-Filleau A, Kokkonen T, Jaakkola S and Vanhatalo A. 2018. Different microalgae species as a substitutive protein feed for soya bean meal in grass silage based dairy cow diets. *Anim Feed Sci Technol* 247, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.11.005>.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2022 The Grain Data. 11-1543000-000002-10, Report of MAFRA, Sejong, Korea.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2023. Main Statistics on Agriculture, Forestry, Livestock and Food 2023. 11-1543000-000128-10, Report of MAFRA, Sejong, Korea.
- Maia MRG, Fonseca AJM, Oliveira HM, Mendonça C and Cabrita ARJ. 2016. The potential role of seaweeds in the natural manipulation of rumen fermentation and methane production. *Sci Rep* 6, 32321. <https://doi.org/10.1038/srep32321>.
- MOE (Ministry of Environment). 2018. 2018 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. Report of MOE 11-1480906-000002-10, MOE, Cheongju, Korea.
- MOE (Ministry of Environment). 2022. Eliminating Recycling Blind Spots and Promoting Recycling Rates Using Cutting-edge Technology. Retrieved from www.me.go.kr on Apr 8, 2024.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2010. Study on the *Saccharina* Culture Technique for Abalone Feed. TR-2011-AQ-010, Report of NIFS, Busan, Korea.
- Roque BM, Venegas M, Kinley RD, de Nys R, Duarte TL, Yang X and Kebreab E. 2021. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS One* 16, e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>.
- Suh DS, Kang CY, Park YG and Choe JY. 2016. A Study on Efficient Recycling of Agricultural and Livestock Wastes as Resource (Year 1 of 2). Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea.
- Tayyab U, Novoa-Garrido M, Roleda MY, Lind V and Weisbjerg MR. 2016. Ruminant and intestinal protein degradability of various seaweed species measured in situ in dairy cows. *Anim Feed Sci Technol* 213, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.01.003>.
- Tilley JMA and Terry RA. 1963. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Grass Forage Sci* 18, 104-111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>.