

# 반추동물에서 발생하는 온실가스 저감: 한국적 관점

김경진<sup>1</sup> · 김은중<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>경북대학교 축산BT학과, <sup>2</sup>경북대학교 미래동물자원연구원

## Reducing greenhouse gases from ruminants: a Korean perspective

Gyeongjin Kim<sup>1</sup>, Eun Joong Kim<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea<sup>2</sup>Research Institute for Innovative Animal Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, KoreaReceived: Aug 25, 2024  
Revised: Dec 6, 2024  
Accepted: Dec 19, 2024**\*Corresponding author**Eun Joong Kim  
Department of Animal Science and  
Biotechnology, Kyungpook National  
University, Sangju 37224, Korea  
Tel: +82-54-530-1228  
E-mail: ejkim2011@knu.ac.krCopyright © 2024 Korean Society of  
Animal Science and Technology.  
This is an Open Access article  
distributed under the terms of the  
Creative Commons Attribution  
Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)  
which permits unrestricted  
non-commercial use, distribution,  
and reproduction in any medium,  
provided the original work is properly  
cited.**ORCID**Gyeongjin Kim  
<https://orcid.org/0000-0003-2202-126X>  
Eun Joong Kim  
<https://orcid.org/0000-0002-5962-6994>**Competing interests**No potential conflict of interest  
relevant to this article was reported.**Abstract**

Methane, a gas produced during the digestion process of ruminants, is a greenhouse gas that contributes to global warming and also represents energy loss. Therefore, all countries worldwide, including the United States and Europe, are trying to reduce the amount of methane gas generated. There are many research papers and excellent review papers in this regard. However, this review specifically aims to provide some insights on methane measurement methods and consider ways to reduce greenhouse gases under current domestic conditions. Enteric methane from ruminants is mainly measured using a respiration chamber and the GreenFeed system and can also be measured using an laser methane detector and sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer technique. Research priority needs to be focused on measuring the current level of methane produced more accurately from Korea's perspective, and financial support and research are imperative for this purpose. In terms of mitigation strategies, it is important to adopt and apply various processes proposed by developed countries, still equally, we also actively make efforts to research and support processes that can be implemented in domestic conditions, such as the use of agricultural by-products, food by-products, and home-grown forages in total mixed ration. Additionally, in addition to developing novel additives or substances at a strategic level, if there are any overlooked traditional methods in the livestock industry, such as improving nutrient use efficiency and increasing productivity, then efforts must be placed to complement what is lacking and as a result, those methods may be adopted in the ruminant agriculture relatively fast and easy.

**Keywords:** Greenhouse gases, Methane, Ruminant, By-products, Total mixed ration (TMR)

## 서론

온실가스는 대기에서 적외선 복사열을 흡수하거나 재방출하는 수증기, 이산화탄소, 메탄, 아

Funding sources

This paper was supported by the Rural Development Administration Research Project (Research and Development Project Number: RS-2022-RD010229).

Acknowledgements

Not applicable.

Availability of data and material

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authors' contributions

Conceptualization: Kim G, Kim EJ. Data curation: Kim G, Kim EJ. Formal analysis: Kim G, Kim EJ. Methodology: Kim G, Kim EJ. Software: Kim G, Kim EJ. Validation: Kim EJ. Investigation: Kim G, Kim EJ. Writing - original draft: Kim G, Kim EJ. Writing - review & editing: Kim G, Kim EJ.

Ethics approval and consent to participate

This article does not require IRB/ IACUC approval because there are no human and animal participants.

산화질소와 같은 대기 중의 가스를 의미하며 온실가스는 온실효과(대기 중의 가스에 의해 지구 표면 가까이에 열이 갇히는 현상)를 증가시켜 지구온난화를 야기한다[1]. 축산업에서 문제가 되는 온실가스는 메탄(CH<sub>4</sub>, 장내발효)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O, 분뇨)이며, 반추동물에서는 특히 장내 발효를 통해 배출되는 메탄이 문제가 되고 있다. 반추동물의 반추위에는 다양한 미생물들이 서식하며 이들이 분비하는 소화효소에 의해 섭취한 사료가 발효의 과정을 거쳐 분해된다[2]. 사료 내 유기물이 분해되면서 반추동물의 에너지원으로 이용되는 휘발성 지방산을 생성하게 되고, 이 과정에서 수소가 방출된다[3]. 반추위 내 생성된 수소는 반추위 미생물 중 메탄생성고세균(methanogenic archaea)이 사용하여 이산화탄소를 메탄으로 전환하며, 주로 반추동물의 트림으로 배출된다[4].

메탄의 향후 100년간 지구온난화 지수는 이산화탄소의 28-30배로 추정된다[1]. 전 세계 분야별 메탄가스 배출 비율은 농업 분야에서 41%를 차지하며, 농업 분야 중 가축의 장내발효에 의해 배출되는 메탄은 48.8%로 나타났다[5]. 국내 보고에 의하면 2020년 기준 가축의 장내발효 메탄 발생량은 농업 분야 온실가스 배출량의 22.2%, 축산 분야 온실가스 배출량의 48.5%이며 반추동물의 장내발효가 90% 이상이라고 보고하였다[6]. 전 세계적으로 온실가스로 인한 지구온난화가 가속화되면서 2030년까지 기후위기 대응을 위한 대책을 수립하였으며, 우리나라 정부에서도 2030 국가 온실가스 감축 계획을 수립함에 따라 2023년 3월부터 사료 등의 기준 및 규격에 저메탄 사료의 정의 및 기준을 고지하였다. 본 총설에서는 반추동물의 장내 발효 과정에서 발생하는 메탄가스의 측정 방법과 국내에서 진행되었던 연구 등을 고찰하고 앞으로 노력과 지원이 필요한 연구 분야를 국내의 관점에서 제시하고자 한다. 온실가스 저감의 궁극적인 목적은 탄소 발생을 줄여 “Net-Zero”의 상태를 유지하는 것으로 이해할 수 있으며 이때 분뇨에서 발생하는 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 축산 분야에서 발생하는 강력한 온실가스이지만 본 총설에서는 장내 발효과정에서 발생하는 메탄가스로 한정하고 메탄은 온실가스, 탄소의 표현과 문맥에 따라 상호 교환하여 사용하기로 한다. 아울러, 반추동물의 장내 발효과정에서 발생하는 메탄가스와 관련하여 수많은, 뛰어난 총설이 다수 존재하므로[7-9] 반복적인 내용을 지양하고 국내 환경에 비추어 논의하고자 한다.

## 반추동물의 장내 발효 메탄 발생량 측정

### 호흡 챔버(respiration chamber)

호흡 챔버는 동물의 에너지 대사를 평가하기 위해 처음 사용되었으며, 환경을 제어(온도, 습도, 동물의 움직임 제한 등)하는 상태에서 기기의 신뢰성 및 안정성이 높아 가장 보편적으로 메탄을 측정하는 방법이다[10]. 동물들을 챔버 내에서 일정 기간 사육할 수 있으며, 장내발효 외에 후장발효 시 발생하는 메탄도 측정이 가능한 whole chamber와 동물의 머리와 목 부분을 둘러싸여 트림을 통해 배출하는 즉, 장내발효 메탄 발생량만 측정이 가능한 hood chamber로 구분되며, 현재까지 메탄 측정을 위해 사용된 챔버는 대부분 whole chamber로 사용되었다[7]. 호흡 챔버는 입구 및 출구 파이프, 유량계 및 가스 분석기로 구성되며, 호흡 챔버를 통한 메탄 발생량은 챔버 내부와 외부로 흐르는 공기의 메탄 농도의 차이를 측정된 후 풍속을 곱하고 온도, 습도 등을 보정하여 계산한다[8].

호흡 챔버는 동물의 활동을 제한하여 섭취량에 영향을 미치며, 섭취량 감소를 최소화하기 위해 챔버의 적응이 필요하기 때문에 방목하는 동물에서 발생하는 메탄은 측정할 수 없다[11]. 또한 챔버의 제작 및 유지 비용이 타 방법에 비해 상대적으로 비싸고, 챔버의 수에 따라서 동시

에 측정 가능한 동물의 수가 제한될 수 있다[2]. 그러나 사료의 종류, 수준, 사료급여 방법에 따른 메탄 발생량 변화 및 사료 첨가제 효과 등 다양한 영양 환경적 측면에서 메탄발생량을 측정할 수 있으며 24시간 이상 연속측정이 가능하기 때문에 메탄의 일변화를 설명할 수 있다[11]. 또한, 호흡 챔버로 측정된 축종별 일일 메탄 발생량의 변이 계수는 매우 정확하여 비육우, 양, 착유우에서 각각 7.2%, 4.75%, 4.3%로 나타났다[12-14].

### GreenFeed system

GreenFeed system은 사료를 제공하여 동물이 축사내에 설치하거나 또는 방목지에 설치한 GreenFeed에 접근하도록 유도하고 RFID(radio-frequency identification)를 이용하여 동물을 식별한 후 풍속 및 호흡 시 배출되는 공기를 수집하여 측정한다. 메탄측정은 하루에 여러 번 사료를 섭취하는 3-5분간 동물의 개별  $\text{CH}_4$ 와  $\text{CO}_2$  배출량을 정량적으로 측정한다[15]. 호흡 챔버와 비교했을 때 같은 기간에 더 많은 수의 동물을 모니터링할 수 있으나 동물이 GreenFeed에 사료를 섭취하기 위해 머리를 기기 속으로 넣었을 때만 측정이 가능하다. 따라서 동물이 GreenFeed에 접근하는 정도에 따라 편향된 메탄 발생량이 측정될 수 있으므로 정확한 메탄 발생량 측정을 위해 적절하게 feeding cycle이 분배되어야 하며[9], 동물의 품종, 개체 차이, 섭취량, 식욕, 총 급여량, GreenFeed 접근을 유도하기 위해 사용되는 사료 종류 등이 GreenFeed를 이용한 메탄 배출 측정에 영향을 미친다[8].

### Laser methane detector(LMD)

적외선 흡광법을 이용한 방법으로, 목표물에 레이저빔을 쏘게 되면 메탄이 특정 파장의 레이저 광(적외선)을 흡수하고, 목표물에서 반사된 레이저 빔이 레이저 메탄 검출기에 수신된 후 레이저빔의 흡수율이 측정되어 메탄 킬럼 밀도(ppm-m)로 계산된다[16]. LMD(laser methane detector)는 휴대성이 편리하고, 다른 측정 방법들보다 비용이 저렴하다. 또한, 동물이 음수, 사료 섭취, 반추 활동 등을 할 때도 측정할 수 있으며 다른 메탄 측정 방법들보다 빠르게 측정할 수 있는 장점이 있으나 재현성이 낮은 단점이 있고, 실외에서 측정 시 LMD에 검출되는 메탄 농도는 환경(풍속, 습도, 기압 등)에 따라 기록에 영향을 받기 때문에 LMD로 측정 시 유의해야 한다[16]. Kang et al.[17]의 연구에서는 LMD의 protocol을 정립하고, 한우를 대상으로 서로 다른 섬유소 함량 사료를 급여하여 메탄을 측정했을 때, 섬유소 함량에 따른 메탄 발생량의 차이를 검출할 수 있었으며, Kobayashi et al.[18]의 연구에서는 호흡 챔버와 LMD를 비교했을 때 측정된 메탄 발생량의 상관관계를 증명하였다. 해당 실험들은 LMD를 사용한 메탄 발생량 측정 가능성을 제시하였다.

### Sulfur hexafluoride( $\text{SF}_6$ )

$\text{SF}_6$ 는 황 원자를 중심으로 6개의 플루오린 원자가 정팔면체를 이루고 있어 안정성이 매우 높아 다른 물질(수분, 알칼리, 암모니아, 산 등)들과는 반응하지 않는 비활성 기체이다. 대기 중에서는 ppt의 농도로 존재해 있기 때문에 이런 특성들을 이용하여 tracer로 사용된다[19]. 반추동물 영양학 연구에서는 Zimmerman[20]에 의해 처음 언급되었으며 현재까지도 반추동물 외의 다른 축종에서도 사용되는 방법이다[21].  $\text{SF}_6$  tracer의 원리는 이미 알고 있는  $\text{SF}_6$ 의 방출률을 이용하여, 반추위 내에서 동일한 비율로 방출되는  $\text{SF}_6$ 와 메탄을 포집한 후 메탄과  $\text{SF}_6$ 의 비율을 측정하여 메탄 발생량을 계산한다[22].

호흡 챔버는 제한되어 있는 공간에서 동물의 메탄을 측정하기 때문에 실제 사육 환경을 온전

히 반영하지 못하는 단점이 있으며, 측정 전 동물을 적응시키는 데 걸리는 시간, 한번에 측정 가능한 동물의 수, 챔버를 제작, 유지하는 데 드는 비용이 높기 때문에 SF<sub>6</sub>는 이러한 호흡 챔버의 단점을 보완해줄 수 있는 방법 중 하나이다[22]. 또한, 활동 공간이 제한되어 있는 호흡 챔버에서 평가하기 어려운 사료섭취량과 행동에 따른 메탄 발생량을 측정하거나 특히 방목을 하는 동물들에게도 적용하여 메탄 발생량 측정이 가능하다[7]. 그러나 SF<sub>6</sub> 기체는 온실가스의 한 종류로서 지구온난화 지수가 이산화탄소보다 22,800배 높고 안정된 기체이기 때문에 반감기가 3,200년으로 알려져 있다[23]. 따라서 SF<sub>6</sub>를 사용할 때에는 손실량을 최소화하도록 해야 한다.

### 국내 메탄 저감 연구

Table 1은 최근 수년 동안 국내 연구진들에 의해 수행되었던 메탄 저감 연구들 중 일부를 발췌하여 요약한 표이다. 메탄 저감 방법은 크게 사료 및 사료첨가제로 나누어 정리하였다. 사료를 조절하는 방법에서는 조사료:농후사료의 비율(조:농비율), 지방첨가, 사료종류, 사료급여방법 등에 따라 메탄 저감효과를 평가하는 연구들이 수행되었다. 상대적으로 사료첨가제를 이용한 연구들이 많았는데 해조류, 생균제, 식물추출물 등을 이용한 메탄 저감 방법이 많이 연구되었으나 종류 및 농도에 따라 반응이 다양하게 나타났으며, 많은 실험이 *in vitro*로 수행되었기에 저감효과를 정확히 평가하기 위해 동물실험이 수행되어야 할 필요가 있다. 특히 사료적 접근 방법 중 동물실험을 수행한 다른 방법과 달리 조사료 가공방법에 대한 연구는 *in vitro*에서만 수행이

Table 1. Summary of selected methane mitigation studies conducted in Korea

Ingredient	Mitigation strategy	Measuring technique	Methane production	References
Feed approach	Feeding level	<i>In vivo</i> (respiration chamber)	Increase	[42]
	Forage:concentrate ratio	<i>In vivo</i> (LMD, respiration chamber)	Mixed response	[17,39]
	Feed ingredients	<i>In vitro</i> , <i>In vivo</i> (respiration chamber)	Feed ingredients specific	[41,43]
	Forage processing	<i>In vitro</i>	Decrease	[44]
	Feeding system	<i>In vivo</i> (respiration chamber)	Mixed response	[26,29]
	Fat or fatty acids	<i>In vivo</i> (LMD, GreenFeed system)	Decrease	[36,45]
	Crude protein	<i>In vivo</i> (LMD)	Decrease	[46]
Feed additives approach	Halogenated compounds	<i>In vitro</i>	Decrease	[47-49]
	Nitrate	<i>In vitro</i>	Decrease	[50,51]
	Seaweed	<i>In vitro</i>	Mixed response	[37,38,52]
	Direct-fed microbial	<i>In vitro</i>	Mixed response	[53-55]
	Plant extracts	<i>In vitro</i> , <i>In vivo</i> (LMD)	Mixed response	[2,56-60]
	Organic acids	<i>In vitro</i> , <i>In vivo</i> (respiration chamber)	Mixed response	[2,61]
	Minerals (clay, trace)	<i>In vitro</i> , <i>In vivo</i> (GreenFeed system)	Mixed response	[62,63]
	Glycerol	<i>In vitro</i>	Decrease	[64]
	<i>Cordyceps militaris</i>	<i>In vitro</i>	Decrease	[65]
	Spent coffee ground	<i>In vitro</i>	No response	[66]
	Enzyme	<i>In vitro</i>	Mixed response	[67]
	Detoxified sulfur	<i>In vitro</i>	Mixed response	[68]

LMD, laser methane detector.

되었기 때문에 동물 실험에서의 평가가 필요할 것으로 사료된다.

## 온실가스 저감방안: 한국적 접근

2020년 기준 국내 온실가스 발생현황에 의하면 농업이 차지하는 비율이 3.2%이며, 농업 분야 중 장내발효가 차지하는 비율은 22%이다[6]. 우리나라 정부에서도 2030 국가 온실가스 감축 계획을 수립하면서 한국 축산업 상황을 고려한 온실가스 저감방안을 마련해야 하는 것은 당연한 과제이다.

한국농촌경제연구원에서 발표한 연구보고서에 의하면[24] ‘가축 생애 전주기 평가(life cycle assessment)’의 모델을 적용하였을 때 한우의 비육기간을 단축(예, 30개월령이 아니라 28개월령에 출하)하는 경우, 한우 두당 8.1 kg의 온실가스를 감축하여 환경부담을 완화할 수 있지만 두당 약 107,000원의 손실이 발생하는 것으로 보고하였다. 사육기간 단축으로 사료비가 절감되지만 도체 등급이 하락하여 판매가격이 낮아지는 이유 때문으로 또한 보고하였다. 아무리 온실가스 저감이 지구환경의 미래에 매우 중요한 문제라고 하더라도, 농가 수익이 감소하고, 그 영향이 크다면 이를 지속해서 추진하기엔 현실적으로 큰 어려움이 있다. 반면에 우리나라에서 특히 축산업 분야에서 접근하는 탄소저감 방안에는 산학연이 함께 고민하여야 할 사항들이 있어 아래와 같이 몇몇 부분을 고찰하고자 한다. 앞서 서론에서도 언급한바, 반추동물에서 발생하는 메탄가스는 온실가스(이산화탄소) 발생량으로 전환하여 표기하므로 문맥에 따라 혼용하기로 한다.

### 메탄 측정 방법 다변화 및 배출계수 고도화

2030년에 감축하고자 하는 목표를 설정하려면, 온실가스 발생량의 관점에서 현재 국내 축산업이 어떠한 상황에 있는지 정확하게 인지하여야 할 필요가 있다. 물론 국내의 연구기관에서 축산업 및 반추동물에서 발생하는 온실가스 발생량을 보고하였다. 한우와 젖소의 온실가스 발생량은 국가온실가스 인벤토리에 등록되어 한국을 대표하는 수치로 여겨진다[6]. 그럼에도 불구하고, 위에서 조사한 바와 같이 온실가스 저감(또는 탄소 저감), 더 나아가 탄소 중립의 관점에서 지속적인 연구가 필요하다.

예를 들어, 한우/육우의 경우, 한국농촌경제연구원에서 ‘가축 생애 전주기 평가’ 수행 시, 2019년 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제안한 수치 즉, 연간 두당 64 kg의 메탄 배출 계수를 적용하여 온실가스 발생량을 보고하였다[24]. 이 배출계수는 IPCC 기본값으로 미국과 캐나다 위주의 측정 결과 혹은 유럽의 축산 선진국들의 측정치를 기본으로 제안된 계수로 여겨진다. 일견하여 이 계수의 적용은 매우 타당한 것으로 여겨지지만, 그러나, 한우/육우 사양 시, 일부 사육 구간, 특히 비육후기에서는 농후사료를 80%~90% 이상 급여하는 사양 방법을 적용하고 있으며, 이때 반추위 소화과정에서 발생하는 메탄가스 발생량은 방목 위주의 사양 또는 섬유소 함량이 상대적으로 높은 사료를 급여하는 사양 방법과 비교하여 메탄가스 발생량에 차이가 있을 것으로 예상된다. 실제 Seol et al.[25]의 연구에서는 평균 약 600 kg의 24개월령 비육후기 한우를 대상으로 조사료와 농후사료(조:농)의 비율이 10:90으로 급여하였을 때 배출계수는 43.6 또는 50.9 kg/CH<sub>4</sub>/head/year로 나타났으며, Lee et al.[26]의 연구에서는 평균 약 500 kg의 28개월령 비육후기 한우를 대상으로 조:농비율이 15:85로 급여하였을 때 배출계수는 57.6 또는 61.2 kg/CH<sub>4</sub>/head/year로 나타났다. 이러한 연구 결과는 IPCC에서 제시한 메탄배출계수보다 실제 한국에서 발생하는 한우의 메탄배출량이 낮을 가능성을 보여준다. 그리고 이 시기에, 이러한 사양방법을 유지했을 때 측정된 메탄가스 발생량에 관한 연구 보고는 상대적으로

로 많지 않으므로 비육후기 사양 방법의 차이에 따른 메탄 배출 계수의 측정과 이를 적용한 예측 모델이 필요할 것으로 생각된다.

한편, 비육후기 한우/육우의 체중은 700 kg 이상으로 이러한 체중의 가축을 호흡 챔버에 일정 시간 사육하며 온실가스 배출량을 측정하는 것 또한 물리적으로 쉽지 않다. 따라서 현재 보고된 방법[13,15]에 대한 기술적 보완과 현장에서 보다 쉽게 측정할 수 있는 방법들이 개발된다면[17] 조금 더 정확하게 온실가스/탄소/메탄가스 발생량을 측정할 수 있을 것이며 이러한 결과를 바탕으로 저감 방안에 대한 계획을 보다 현실적으로 수립할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 정부에서 고시하는 ‘메탄저감제’를 인증하는 기관이 국내에서 공식적으로 태동하고, 메탄저감제에 대한 효과를 검증하는 현 시점에서 보다 빠르고 정확하게 메탄저감제를 검증하고 인증하려면 이러한 기술적인 부분에 대한 연구와 지원이 더욱 필요하다.

### 부산물과 국내생산 조사료를 이용한 섬유질배합사료 이용 최대화

사료 원료 및 첨가제 그리고 조사료의 상당량까지 수입하는 국내 현실에 비추어 농산부산물 및 식품부산물의 사료화에 속도를 높여야 한다. 현장에서 이미 다량의 농산부산물과 식품부산물이 섬유질배합사료에 이용되고 있으나 여전히 그 사용량은 이산화탄소 감축 잠재량에 비하여 매우 부족한 상황이다. 가공비, 물류비 등 산재한 문제들이 제기되지만 온실가스 감축 등의 관점에서 보면 쉽게 해결될 문제라고 생각된다. 2015년 기준 농산부산물의 총 발생량은 9,342천 톤으로, 주요 농산물은 벚짳, 사과전정, 포도전정, 배전정 등으로 나타났으며 부산물로 사용되고 있는 감전정과 감귤전정도 각각 103.8천 톤, 59.1천 톤이다[27]. 특히 벚짳이 5,886천 톤으로 전체 생산량의 63%를 차지하고 있다[27]. 해당 농산부산물의 CO<sub>2</sub> 감축 잠재량을 보면 벚짳이 전체의 55.7%를 차지하고 있으며 이는 부산물을 이용함으로써 이산화탄소 감축 가능성을 시사하고 있다[27].

국내 섬유질배합사료(total mixed ration, TMR) 공장 수는 2022년 기준 182개소이며, 연간 TMR 수급현황은 2021년 기준 2,232천톤이다[28]. Bharanidharan et al.[29]는 한우에게 농후사료와 조사료를 분리 급여했을 때보다 TMR로 급여했을 때 메탄 발생량이 17% 정도 높게 나타났다고 보고하였다. 그러나 우리나라는 대부분의 사료원료들을 수입에 의존하고 있으며 농산물 수입 시 탄소배출량이 높아[30] 국내에서 생산된 농산물/식품부산물과 수입된 농산물의 부산물을 사료 원료의 일부로 TMR을 제조하게 된다면, 상당한 양의 탄소를 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 거세 한우의 사육기간 동안 농후사료와 조사료만을 급여하였을 때(관행사료)와 성장 단계별 TMR을 일부 대체하여 급여하였을 때 경제성을 분석한 결과, 육성기에 TMR을 급여한 후 관행적으로 농후사료와 조사료를 급여하는 것이 경제성이 가장 높은 것으로 나타났으며[31] 해당 결과는 기존사료에 TMR을 일부 교체 시 경제성을 향상시킬 수 있음을 시사하였다. 또한 Lee et al.[32]의 연구에서는 한우 경산우를 대상으로 향산화제를 처리한 과일 및 야채 부산물을 TMR로 제조한 후 0%, 10%, 20%(Fed basis) 수준으로 사료의 일부 대체하여 110일간 급여하였을 때 체중 및 body condition score에 유의적인 차이가 없는 점에서 기존 사료에 농산부산물을 활용한 TMR의 일부 대체가 가능하다고 보고하였다. 조사된 문헌에 의하면 국내에서 수행한 연구 중 농산부산물을 TMR 원료로 혼합하여 급여 후 증체량 등의 성적만 확인하였을 뿐, 메탄 발생량, 온실가스 저감 또는 경제성을 연구한 논문은 매우 드물어, 이 부분에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 부산물뿐만 아니라 TMR의 중요한 원료인 조사료의 생산 저변을 확대하여 국내에서 생산한 조사료를 반추동물 산업에 확대이용 한다면 축산업뿐만 아니라 농업 분야의 온실가스 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다[33].

### 온실가스 저감 전략의 다변화

국내 축산업 여건을 고려하여 온실가스를 줄이고자 하는 전략에 다변화를 가할 필요가 있다. Table 1에 나타난 바와 같이, 지금까지는 특정 첨가제, 물질을 사료에 첨가하여 메탄가스의 발생량을 줄이고자 하는 연구들이 다수 시도되었다. 해조류, 3-nitroxypropanol(3-NOP), nitrate 등이 가축의 장내 발효과정에서 발생하는 메탄가스를 효과적으로 줄이고, 3-NOP는 가축의 생산성에도 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 알려져 미국과 유럽을 포함한 다수의 국가에서 최근에, 사용 허가를 받은 것으로 알려졌다. 국내에서도 이러한 연구들이 지속되어야 함은 당연하며, 그 외에도, 기존의 방법 중 이미 알려진 방법들을 응용하거나 보완하여 온실가스를 줄이는 전략도 생각해 볼 수 있다.

예를 들어, 사료 내 일정량 지방을 첨가할 때 반추위에서 발생하는 메탄가스가 줄어든다는 연구 보고[34,35]는 학계에서 오랫동안 인정되어 왔으므로 한우/육우 사료(착유우 사료에는 보호지방 등 지방의 사용이 한우에 비해 상대적으로 빈번하므로 주의가 필요하지만)에 이를 응용하는 방법을 생각할 수 있으며, 최근 연구에서는 육성기 한우에게 지방을 100 g/kg DM까지 급여했을 때 생산성에 영향 없이 메탄을 저감하는 것으로 보고되었다[36]. 해조류는 한우의 위액을 사용한 *in vitro* 반추위 발효실험에서 저감효과를 보였다[37,38]. 현재까지 우리나라에서 한우를 대상으로 해조류의 효과를 평가한 논문은 없는 것으로 보고되었지만, 국내 *in vitro* 실험 및 국외 *in vivo* 선행연구의 저감 결과에 비추어볼 때 한우에서도 저감효과가 있을 것으로 기대된다. 위에서 언급한 것처럼 조사료와 농후사료의 급여 비율에 따른 메탄가스 발생량의 차이의 경우 한우에서는 농후사료 비율이 높을수록 메탄 발생량이 감소하였으나[17], 염소에서는 저감 효과가 나타나지 않는 등[39] 다양하게 보고된 바 있어서 이를 정확하게 측정한다면 쉽게 현장에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 조사료를 포함한 사료의 가공 방법 역시 반추동물의 소화과정 중 발생하는 온실가스를 줄인다는 보고[40]와 염소에서 조사료 원료(alfalfa, tall fescue, rice straw, corn silage)에 따라 메탄 발생량에 차이가 나타난 보고[41]가 있으므로 현장에서 적용할 수 있도록, 특히 국내에서 생산한 조사료를 활용하는 등 연구를 통하여 보완하는 방법도 있을 것이다. 아직 국내에서 연구된 바 없으나, 육종 분야 전문가와의 공동연구를 통하여 온실가스를 상대적으로 적게 배출하는 한우 품종으로의 개량이 필요할 것으로 사료된다. 지금까지 국내 한우 및 중소반추동물(염소, 양)을 대상으로 한 메탄 저감 연구는 제한적이며 특히 중소반추동물 중 염소를 대상으로 한 연구는 조:농비율[39], 사료급여수준[42], 조사료 원료[41], 첨가제 급여[2]에 따른 메탄 발생량만이 평가되어 있다. 이처럼 온실가스 감축을 위해서는 반추동물을 대상으로 한 지속적인 메탄 저감 연구가 필요할 것이다.

### 결론

축산업 분야에서 발생하는, 특히 반추동물의 장내 발효과정에 발생하는 온실가스를 줄이고자 하는 노력은 지속가능한 축산업 발전의 관점에서 매우 중요한 문제이며, 우리나라뿐만 아니라 전 세계 모든 국가들이 함께 수행하여야 한다. 따라서 온실가스 발생량을 신속하게, 정확하게 측정할 수 있도록 연구와 지속적인 지원 및 노력이 필요하며, 이러한 결과를 바탕으로 국내 현실에 맞는 저감 전략이 필요할 것으로 판단된다. 새로운 물질의 개발에 적지 않은 시간과 노력이 필요하므로 이에 대한 논의는 차치하더라도 가능성이 있는 물질들을 발굴하고 현장에서 검증하는 시도들이 더 활발하게 이루어져야 하며, 그 외에도 현재보다 더 부존자원을 활용할 수 있도록 지속적인 연구와 이를 위한 지원이 필요한 것으로 생각된다. 추가로, 첨가제에만 의존할 것이

아니라 사료적 접근을 통해 감축 목표에 한 걸음이라도 접근하는 노력과 아직 연구가 부족한 저메탄 반추동물의 육종 역시 연구가 필요한 분야여서 공동의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

1. Pachauri RK, Allen MR, Barros VR, Broome J, Cramer W, Christ R, et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2014.
2. Ha JJ, Kim G, Oh DY, Park JY, Lee Y, Kim EJ. Effect of Liriope platyphylla and organic acids on enteric methane mitigation of goats using respiration chamber system. *Ann Anim Resour Sci.* 2023;34:108-19. <https://doi.org/10.12718/AARS.2023.34.4.108>
3. Aguerre MJ, Wattiaux MA, Powell JM, Broderick GA, Arndt C. Effect of forage-to-concentrate ratio in dairy cow diets on emission of methane, carbon dioxide, and ammonia, lactation performance, and manure excretion. *J Dairy Sci.* 2011;94:3081-93. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4011>
4. Olijhoek DW, Hellwing ALF, Brask M, Weisbjerg MR, Højberg O, Larsen MK, et al. Effect of dietary nitrate level on enteric methane production, hydrogen emission, rumen fermentation, and nutrient digestibility in dairy cows. *J Dairy Sci.* 2016;99:6191-205. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10691>
5. Climate Watch. Agricultural [Internet]. 2020 [cited 2024 Jun 5]. <https://www.climatewatchdata.org/sectors/agriculture?contextBy=indicator#drivers-of-emissions>
6. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. National greenhouse gas inventory report of Korea. Sejong: Ministry of Environment; 2022. Report No.: 115018.
7. Della Rosa MM, Jonker A, Waghorn GC. A review of technical variations and protocols used to measure methane emissions from ruminants using respiration chambers, SF6 tracer technique and GreenFeed, to facilitate global integration of published data. *Anim Feed Sci Technol.* 2021;279:115018. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115018>
8. Hammond KJ, Crompton LA, Bannink A, Dijkstra J, Yáñez-Ruiz DR, O'Kiely P, et al. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Anim Feed Sci Technol.* 2016;219:13-30. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018>
9. Hristov AN, Kebreab E, Niu M, Oh J, Bannink A, Bayat AR, et al. Symposium review: uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *J Dairy Sci.* 2018;101:6655-74. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13536>
10. Johnson DE, Ferrell CL, Jenkins TG. The history of energetic efficiency research: where have we been and where are we going? *J Anim Sci.* 2003;81:E27-38. [https://doi.org/10.2527/2003.8113\\_suppl\\_1E27x](https://doi.org/10.2527/2003.8113_suppl_1E27x)
11. Storm IMLD, Hellwing ALF, Nielsen NI, Madsen J. Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. *Animals.* 2012;2:160-83. <https://doi.org/10.3390/ani2020160>
12. Blaxter KL, Clapperton JL. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *Br J Nutr.* 1965;19:511-22. <https://doi.org/10.1079/BJN19650046>
13. Grainger C, Clarke T, McGinn SM, Auldish MJ, Beauchemin KA, Hannah MC, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF6) tracer and chamber techniques. *J Dairy Sci.* 2007;90:2755-66. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-697>
14. Pinares-Patiño CS, Lassey KR, Martin RJ, Molano G, Fernandez M, MacLean S, et al. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep. *Anim Feed Sci Technol.* 2011;166-167:

- 201-9. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.067>
15. Manafiazar G, Zimmerman S, Basarab JA. Repeatability and variability of short-term spot measurement of methane and carbon dioxide emissions from beef cattle using GreenFeed emissions monitoring system. *Can J Anim Sci.* 2016;97:118-26. <https://doi.org/10.1139/cjas-2015-0190>
  16. Sorg D. Measuring livestock CH<sub>4</sub> emissions with the laser methane detector: a review. *Methane.* 2022;1:38-57. <https://doi.org/10.3390/methane1010004>
  17. Kang K, Cho H, Jeong S, Jeon S, Lee M, Lee S, et al. Application of a hand-held laser methane detector for measuring enteric methane emissions from cattle in intensive farming. *J Anim Sci.* 2022;100:skac211. <https://doi.org/10.1093/jas/skac211>
  18. Kobayashi N, Hou F, Tsunekawa A, Yan T, Tegegne F, Tasew A, et al. Laser methane detector-based quantification of methane emissions from indoor-fed Fogera dairy cows. *Anim Biosci.* 2021;34:1415-24. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0739>
  19. Busenberg E, Plummer LN. A rapid method for the measurement of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>), trifluoromethyl sulfur pentafluoride (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>), and Halon 1211 (CF<sub>2</sub>ClBr) in hydrologic tracer studies. *Geochem Geophys Geosyst.* 2010;11:1-10. <https://doi.org/10.1029/2010GC003312>
  20. Zimmerman PR. System for measuring metabolic gas emissions from animals. USA Patent No. 5,265,618; 1993.
  21. van Gastelen S, Dijkstra J, Bannink A. Are dietary strategies to mitigate enteric methane emission equally effective across dairy cattle, beef cattle, and sheep? *J Dairy Sci.* 2019;102:6109-30. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15785>
  22. Johnson K, Huyler M, Westberg H, Lamb B, Zimmerman P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. *Environ Sci Technol.* 1994;28:359-62. <https://doi.org/10.1021/es00051a025>
  23. Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey DW, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Cambridge: Cambridge University Press; 2007.
  24. Jeong MK, Lee YG, Choe JY. Environmental impact of livestock industry: analysis and policy tasks. Naju: Korea Rural Economic Institute; 2022. Report No.: R929.
  25. Seol YJ, Kim KH, Baek YC, Lee SC, Ok JW, Lee KY, et al. Effect of grain sources on the ruminal methane production in Hanwoo steers. *J Anim Sci Technol.* 2012;54:15-22. <https://doi.org/10.5187/JAST.2012.54.1.15>
  26. Lee S, Kim J, Baek Y, Seong P, Song J, Kim M, et al. Effects of different feeding systems on ruminal fermentation, digestibility, methane emissions, and microbiota of Hanwoo steers. *J Anim Sci Technol.* 2023;65:1270-89. <https://doi.org/10.5187/jast.2023.e82>
  27. Seo DS, Kang CY, Park YK, Choe JY. A study on efficient recycling of agricultural and livestock wastes as resources. Naju: Korea Rural Economic Institute; 2016. Report No.: TRKO201800042647.
  28. Korea Feed Association. Feed catalog. Sejong: Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs; 2022. p. 63.
  29. Bharanidharan R, Arokiyaraj S, Kim EB, Lee CH, Woo YW, Na Y, et al. Ruminal methane emissions, metabolic, and microbial profile of Holstein steers fed forage and concentrate, separately or as a total mixed ration. *PLOS ONE.* 2018;13:e0202446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202446>
  30. Kim C, Kim S, Jung C, Suh K. Analysis of environmental impacts and alternative scenarios of transportation stages on food miles for major imported crops. *J Korean Soc Agric Eng.*

- 2018;60:51-61. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.3.051>
31. Lee S, Lee SM, Lee J, Kim EJ. Feeding strategies with total mixed ration and concentrate may improve feed intake and carcass quality of Hanwoo steers. *J Anim Sci Technol*. 2021;63:1086-97. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e88>
  32. Lee WH, Ahmadi F, Kim YI, Park JM, Kwak WS. Effects of feeding sodium metabisulfite-treated fruit and vegetable discards to Hanwoo heifers and cows. *Anim Biosci*. 2022;35:410-21. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0244>
  33. Kim SH, Kim TK. Economic valuation of multi-functionality on an eco-pastoral system in Alpine grassland. *J Korean Soc Grassl Forage Sci*. 2018;38:298-309. <https://doi.org/10.5333/KGFS.2018.38.4.298>
  34. Beauchemin KA, McGinn SM, Benchaar C, Holtshausen L. Crushed sunflower, flax, or canola seeds in lactating dairy cow diets: effects on methane production, rumen fermentation, and milk production. *J Dairy Sci*. 2009;92:2118-27. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1903>
  35. Beck MR, Thompson LR, Williams GD, Place SE, Gunter SA, Reuter RR. Fat supplements differing in physical form improve performance but divergently influence methane emissions of grazing beef cattle. *Anim Feed Sci Technol*. 2019;254:114210. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114210>
  36. Cho H, Jeong S, Kang K, Lee M, Jeon S, Kang H, et al. Effects of dietary fat level of concentrate mix on growth performance, rumen characteristics, digestibility, blood metabolites, and methane emission in growing Hanwoo steers. *Animals*. 2024;14:139. <https://doi.org/10.3390/ani14010139>
  37. Choi Y, Lee SJ, Kim HS, Eom JS, Jo SU, Guan LL, et al. Red seaweed extracts reduce methane production by altering rumen fermentation and microbial composition in vitro. *Front Vet Sci*. 2022;9:985824. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.985824>
  38. Choi YY, Shin NH, Lee SJ, Lee YJ, Kim HS, Eom JS, et al. In vitro five brown algae extracts for efficiency of ruminal fermentation and methane yield. *J Appl Phycol*. 2021;33:1253-62. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02361-4>
  39. Na Y, Li DH, Lee SR. Effects of dietary forage-to-concentrate ratio on nutrient digestibility and enteric methane production in growing goats (*Capra hircus hircus*) and Sika deer (*Cervus nippon hortulorum*). *Asian-Australas J Anim Sci*. 2017;30:967-72. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0954>
  40. Navarro-Villa A, O'Brien M, López S, Boland TM, O'Kiely P. In vitro rumen methane output of grasses and grass silages differing in fermentation characteristics using the gas-production technique (GPT). *Grass Forage Sci*. 2013;68:228-44. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00894.x>
  41. Na Y, Hwang S, Choi Y, Park G, Lee S. Nutrient digestibility and greenhouse gas emission in castrated goats (*Capra hircus*) fed various roughage sources. *J Korean Soc Grassl Forage Sci*. 2018;38:39-43. <https://doi.org/10.5333/KGFS.2018.38.1.39>
  42. Na Y, Li DH, Choi Y, Kim KH, Lee SR. Effects of feeding level on nutrient digestibility and enteric methane production in growing goats (*Capra hircus hircus*) and Sika deer (*Cervus nippon hortulorum*). *Asian-Australas J Anim Sci*. 2018;31:1238-43. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0708>
  43. Lee HJ, Lee SC, Kim JD, Oh YG, Kim BK, Kim CW, et al. Methane production potential of feed ingredients as measured by in vitro gas test. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2003;16:1143-50. <https://doi.org/10.5713/ajas.2003.1143>
  44. Kim JY, Jeong SM, Joo YH, Baeg CH, Choi BG, Wardani ARD, et al. Effects of the processing methods of forage rye (*Secale cereale*) on rumen fermentation characteristics and

- greenhouse gas emissions in vitro of Hanwoo. *J Korean Soc Grassl Forage Sci.* 2024;44:99-105. <https://doi.org/10.5333/KGFS.2024.44.2.99>
45. Kim SH, Mamuad LL, Choi YJ, Sung HG, Cho KK, Lee SS. Effects of reductive acetogenic bacteria and lauric acid on in vivo ruminal fermentation, microbial populations, and methane mitigation in Hanwoo steers in South Korea. *J Anim Sci.* 2018;96:4360-7. <https://doi.org/10.1093/jas/sky266>
  46. Oh J, Cho H, Jeong S, Kang K, Lee M, Jeon S, et al. Effects of dietary crude protein level of concentrate mix on growth performance, rumen characteristics, blood metabolites, and methane emissions in fattening Hanwoo steers. *Animals.* 2024;14:469. <https://doi.org/10.3390/ani14030469>
  47. Choi NJ, Lee SY, Sung HG, Lee SC, Ha JK. Effects of halogenated compounds, organic acids and unsaturated fatty acids on in vitro methane production and fermentation characteristics. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2004;17:1255-9. <https://doi.org/10.5713/ajas.2004.1255>
  48. Lee SY, Yang SH, Lee WS, Kim HS, Shin DE, Ha JK. Effect of 2-bromoethanesulfonic acid on in vitro fermentation characteristics and methanogen population. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2009;22:42-8. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80581>
  49. Hwang HS, Ok JU, Lee SJ, Chu GM, Kim KH, Oh YK, et al. Effects of halogenated compounds on in vitro fermentation characteristics in the rumen and methane emissions. *J Life Sci.* 2012;22:1187-93. <https://doi.org/10.5352/JLS.2012.22.9.1187>
  50. Mamvura CI, Cho S, Mbiriri DT, Lee H, Choi NJ. Effect of encapsulating nitrate in sesame gum on in vitro rumen fermentation parameters. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2014;27:1577-83. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14280>
  51. Mbiriri DT, Cho S, Mamvura CI, Choi NJ. Effects of a blend of garlic oil, nitrate and fumarate on in vitro ruminal fermentation and microbial population. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 2017;101:713-22. <https://doi.org/10.1111/jpn.12508>
  52. Choi Y, Lee SJ, Kim HS, Eom JS, Jo SU, Guan LL, et al. Effects of seaweed extracts on in vitro rumen fermentation characteristics, methane production, and microbial abundance. *Sci Rep.* 2021;11:24092. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03356-y>
  53. Soriano AP, Mamuad LL, Kim SH, Choi YJ, Jeong CD, Bae GS, et al. Effect of *Lactobacillus mucosae* on in vitro rumen fermentation characteristics of dried brewers grain, methane production and bacterial diversity. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2014;27:1562-70. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14517>
  54. Kim SH, Mamuad LL, Kim DW, Kim SK, Lee SS. Fumarate reductase-producing *Enterococci* reduce methane production in rumen fermentation in vitro. *J Microbiol Biotechnol.* 2016;26:558-66. <https://doi.org/10.4014/jmb.1512.12008>
  55. Miguel MA, Lee SS, Mamuad LL, Choi YJ, Jeong CD, Son A, et al. Enhancing butyrate production, ruminal fermentation and microbial population through supplementation with *Clostridium saccharobutylicum*. *J Microbiol Biotechnol.* 2019;29:1083-95. <https://doi.org/10.4014/jmb.1905.05016>
  56. Kim ET, Kim CH, Min KS, Lee SS. Effects of plant extracts on microbial population, methane emission and ruminal fermentation characteristics in in vitro. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2012;25:806-11. <https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11447>
  57. Choi Y, Lee SJ, Kim HS, Eom JS, Jo SU, Guan LL, et al. Assessment of the *Pinus koraiensis* cone essential oil on methane production and microbial abundance using in vitro evaluation system. *Anim Feed Sci Technol.* 2023;299:115640. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115640>

58. Yejun L, Su Kyoung L, Shin Ja L, Jong-Su E, Sung Sill L. Effects of *Lonicera japonica* extract supplementation on in vitro ruminal fermentation, methane emission, and microbial population. *Anim Sci J*. 2019;90:1170-6. <https://doi.org/10.1111/asj.13259>
59. Jeong S, Lee M, Jeon S, Kang Y, Kang H, Seo S. Effects of tannin supplementation on growth performance and methane emissions of Hanwoo beef cows. *Korean J Agric Sci*. 2018;45:463-73. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180045>
60. Jo SU, Lee SJ, Kim HS, Eom JS, Choi Y, Oh DS, et al. Effects of oriental medicinal plants on the reduction of methane production mediated by microbial population. *Ital J Anim Sci*. 2022;21:522-31. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2046192>
61. Ok JU, Ha DU, Lee SJ, Kim ET, Lee SS, Oh YK, et al. Effects of organic acids on in vitro ruminal fermentation characteristics and methane emission. *J Life Sci*. 2012;22:1324-9. <https://doi.org/10.5352/JLS.2012.22.10.1324>
62. Biswas AA, Lee SS, Mamuad LL, Kim SH, Choi YJ, Lee C, et al. Effects of illite supplementation on in vitro and in vivo rumen fermentation, microbial population and methane emission of Hanwoo steers fed high concentrate diets. *Anim Sci J*. 2018;89:114-21. <https://doi.org/10.1111/asj.12913>
63. Son AR, Islam M, Kim SH, Lee SS, Lee SS. Influence of dietary organic trace minerals on enteric methane emissions and rumen microbiota of heat-stressed dairy steers. *J Anim Sci Technol*. 2023;65:132-48. <https://doi.org/10.5187/jast.2022.e100>
64. Lee SY, Lee SM, Cho YB, Kam DK, Lee SC, Kim CH, et al. Glycerol as a feed supplement for ruminants: in vitro fermentation characteristics and methane production. *Anim Feed Sci Technol*. 2011;166-167:269-74. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.070>
65. Kim WY, Hanigan MD, Lee SJ, Lee SM, Kim DH, Hyun JH, et al. Effects of *Cordyceps militaris* on the growth of rumen microorganisms and in vitro rumen fermentation with respect to methane emissions. *J Dairy Sci*. 2014;97:7065-75. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8064>
66. Seo J, Jung JK, Seo S. Evaluation of nutritional and economic feed values of spent coffee grounds and *Artemisia princeps* residues as a ruminant feed using in vitro ruminal fermentation. *PeerJ*. 2015;3:e1343. <https://doi.org/10.7717/peerj.1343>
67. Biswas AA, Lee SS, Mamuad LL, Kim SH, Choi YJ, Bae GS, et al. Use of lysozyme as a feed additive on in vitro rumen fermentation and methane emission. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2016;29:1601-7. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0575>
68. Kim SH, Islam M, Biswas AA, Cho KK, Lee SS. Effects of detoxified sulfur as a feed supplement on in vitro rumen fermentation and methane mitigation. *J Life Sci*. 2020;30:743-8. <https://doi.org/10.5352/JLS.2020.30.9.743>