

중소반추동물의 장내발효 유래 온실가스 저감 방안에 관한 조사

김경진*, 김은중*

*경북대학교 축산BT학과, 경북대학교 미래동물자원연구원
e-mail:ejkim2011@knu.ac.kr

Study of Mitigation Strategies for Greenhouse Gas Emission in Small Ruminants

Gyeongjin Kim*, Eun Joong Kim*

*Dept. of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University

*Research Institute for Innovative Animal Science, Kyungpook National University

요약

전 세계 분야별 메탄가스 배출 비율은 농업분야에서 41%를 차지하고 있으며, 농업분야 중 장내발효에 의해 배출되는 메탄은 48.8%를 차지하고 있다. 본 연구는 반추동물 중에서도 특히 양이나 염소와 같은 중소반추동물의 온실가스 저감 방안에 대해 조사하였으며, 사료의 저감방안(조사료, 농후사료 비율 감소, 지방 첨가)과 사료첨가제의 저감방안(3-Nitrooxypropanol, 해조류, electron sink, 탄닌)을 기술하였다.

1. 서론

전 세계 분야별 메탄가스 배출 비율은 농업 분야에서 41%를 차지하고 있으며, 농업 분야 중 장내발효 때문에 배출되는 메탄은 48.8%를 차지하기 때문에[1] 이를 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 본 연구는 반추동물 중에서도 특히 양이나 염소와 같은 중소 반추동물의 메탄 저감 방안을 조사하기 위해 수행하였다.

2. 온실가스 저감 방안

2.1. 조사료, 농후사료 비율 감소

농후사료 내 전분 발효 시, 조사료 내 섬유소 발효보다 propionate 생성량이 더 높아 메탄 발생량이 적다[2]. 전분은 섬유소보다 발효속도가 더 빠르므로 대사 과정 중 수소가 방출되면서 반추위 내 수소 농도가 높아지며[3], lactate 축적으로 인해 반추위 pH가 감소하면서 methanogen을 억제하는 것으로 알려져 있다. 그러나 농후사료 위주의 사료 급여는 낮은 pH로 인한 섬유소 소화율 감소 및 산중독증 위험이 있으므로 조사료, 농후사료의 적절한 비율이 요구되며[2]. 농후사료 수입에서부터 축산물 생산까지와 관련한 온실가스 전주기 평가가 고려되어야 한다. 또한, 곡류 기반의 농후사료는 인간의 식량과 경합하지 않는 섬유소 사료를 섭취하여 고품질의 단백

질 식품으로 전환할 수 있는 반추동물의 중요성을 간과할 수 있으나 이런 문제점은 농산부산물 기반을 통해 식량과의 경합을 어느 정도 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2. 지방(lipid)

사료 내 지방 첨가는 반추위 내에서 발효될 수 있는 사료 비율 감소로 인해 methanogen과 protozoa의 수와 활성이 감소하고[4], 비중이 작지만 불포화 지방산의 반추위 내 biohydrogenation을 통해 methanogen과 H₂을 경합하는 과정에서 methanogenesis가 억제된다[4]. 그러나 지방 첨가는 섬유소 박테리아의 활성을 억제하고 사료 입자에 막을 형성하여 섬유소 소화율을 감소시킨다[5]. 이러한 변화는 반추위 발효 성상을 변형시키고, 결국 우유나 고기와 같은 축산물에 영향을 미칠 수 있어[6] 적절한 지방의 첨가가 필요하다. 중소 반추동물 사료에 지방 첨가 시 CH₄ production(g/d)은 11.8%에서 최대 57.3%까지, CH₄ yield(g/kg DMI)는 15.1%에서 최대 44.2%까지 장내발효 메탄 저감 효과가 보고되었다[4, 7]. 지방 첨가 시 장내발효 메탄 발생량뿐만 아니라 배설된 분 내 메탄발생량, 지방의 원료, 지방의 지방산 조성 등도 고려해야 한다.[7].

2.3. 3-Nitrooxypropanol (3-NOP)

CO₂에서 CH₄로 환원되는 과정인 methanogenesis의 마지막

단계에서 methyl-coenzyme M reductase (MCR)가 coenzyme M과 B의 methylated form을 기질로 사용하여 메탄을 형성한다. 3-NOP는 MCR과 유사한 분자 형태를 가지는 작은 분자로, reductase의 활성 부위에 결합한 후 보조인자 F430의 활성부위 Ni (I)를 산화시켜 MCR을 비활성화하여 메탄을 저감하는 것으로 알려져 있다[8]. 3-NOP는 Ogawa et al. [9]의 연구에서 제시된 후로 현재까지 비육우 또는 착유우를 대상으로 활발히 메탄저감제로써 연구되고 있으며 특히 착유우는 섬유소 함량[10] 및 조사료의 원료[11]에 따른 반응, 3-NOP의 적정 수준, 장기간의 반응, 우유 및 동물 조직 내 잔류 정도 등 많은 연구들이 진행된 반면 중소 반추동물에 대한 적용 실험은 일부 in vitro gas production이 진행되었을 뿐 아직 없는 것으로 나타났다. 현재까지 3-NOP에 대한 사용 승인이 허가된 나라는 유럽(착유우), 브라질, 칠레, 캐나다 등이 있으며 최근 한국에서도 3-NOP 사용이 승인되었다. 비육우 및 착유우 연구 결과를 토대로 중소 반추동물에게도 메탄 저감제로써의 적용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

2.4. 해조류(algae)

해조류는 색소에 따라 홍조류, 녹조류, 갈조류로 분류되며, 해조류의 종류에 따라 축적된 할로겐화 화합물 조성에 차이를 보인다[12]. 해조류 내 할로겐화 화합물(bromochloromethane, dibromochloromethane, bromoform, chloroform 등)이 메탄을 억제하며, 현재까지 알려진 메탄 저감 원리는 1) methyltransferase 과정에 필요한 cobalamin과 할로겐화 화합물이 결합하여 methyl-H₄MPT에서 methyl-S-CoM으로의 전환을 억제하거나[13], 2) methanogenesis 마지막 단계에서 MCR의 활성을 억제하는 것이다[14].

특히 해조류 중에서도 Asparagopsis는 염소를 대상으로 한 실험에서도 메탄 저감효과가 두드러진다[15]. 그러나 할로겐화 화합물은 오존을 고갈할 위험성이 있으며[16] 해조류 급여 시 비육우 및 착유우의 동물조직 및 축산물에서 bromoform, iodine, 그리고 bromine [17]의 함량이 해조류를 급여하지 않은 경우보다 유의적으로 높게 검출되어 메탄 저감제로 사용 시 안전성 문제를 고려해야 할 것으로 사료된다.

2.5. Electron sink (hydrogen sink)

Electron sink (hydrogen sink)는 수소를 이용해 메탄을 생성하는 대신 반추위 내에서 유기산이나 발효 생성물의 형성 시 수소를 포함하는 대체 경로를 의미한다[18]. Electron sink는 대표적으로 nitrate가 있으며, nitrate는 반추위에서 nitrite, ammonia로 환원되는 동안 methanogen과 [H]를 경쟁하는 H 수용체이며 비단백질 질소화합물로 질소공급원으로 사용이

가능하다[18]. 선행연구에서는 염소와 양에서 메탄 저감효과가 보고되었다[19, 20]. 그러나 nitrate는 nitrite에서 ammonia로 전환될 때, nitrite에서 메트헤모글로빈이 형성되어 독성을 일으킬 수 있어 용량이 제한되고 사양 실험 시 점진적으로 적용을 시켜야 하며[21], 분뇨에서 질소 배출(N₂O)을 증가시켜 메탄 저감효과를 일부 상쇄시킬 수 있다[22]. 선행연구에서는 우유 및 고기에서 nitrate가 증가하지 않거나[23], 증가하더라도 nitrate의 함량은 인간이 섭취할 수 있는 범위 내로 검출되었다[18]. 그러나 장기간 nitrate를 급여하여 축산물 내 nitrate 잔량을 평가한 연구는 부족하여 nitrate 또한 안전성 문제를 고려해야 할 것으로 사료된다.

2.6. 탄닌(Tannin)

탄닌(Tannin)은 식물의 secondary metabolite인 polyphenol 화합물로 구조 및 반응성에 따라 condensed tannin (CT)와 hydrolyzable tannin (HT)으로 분류된다[24]. Tannin은 단백질 및 탄수화물과 결합하려고 하는 성질이 있어 반추위 분해 단백질 함량이 높은 사료 급여 시 반추위 내 단백질 분해 정도를 줄일 수 있으며 단백질 친화력은 CT가 HT보다 높다[24]. 분자량이 작고 단백질 친화력이 상대적으로 낮은 HT는 반추위에 더 쉽게 흡수되어 독성을 일으킬 수 있으므로[24] HT보다는 CT를 사용한 연구들이 주로 진행되었으나 적정 용량의 사용 및 적용을 통해 방지할 수 있어 HT에 대한 메탄 저감 연구도 증가하고 있다. 중소반추동물을 대상으로 tannin의 메탄 저감효과는 CT와 HT 모두에서 보고되었으며[25, 26], 메탄 저감 원리는 아직 명확하지는 밝혀지지 않았으나, methanogen 및 protozoa 수를 감소시키거나, 단백질 결합 및 미생물 활성 감소로 인한 영양소 소화율을 감소로 알려져 있다[27]. 그러나 tannin의 분자구조, 첨가량, 원료 등에 따라 효과가 다르게 나타나기 때문에[28] 추가적인 연구가 필요하다. 또한, tannin은 메탄뿐만 아니라 단백질과 결합하여 반추동물의 질소 이용률을 향상시켜 뇨를 통해 배출되는 질소를 줄일 수 있다[29].

참고문헌

- [1] Agricultural Sub-sector [Internet]. World Resources Institute. 2020 [cited 2024 June 5]. Available from: <https://www.climatewatchdata.org/sectors/agriculture?contextBy=indicator#drivers-of-emissions>.
- [2] Serment A, Schmidely P, Giger-Reverdin S, Chapoutot P, Sauviant D, "Effects of the percentage of concentrate on rumen fermentation, nutrient digestibility,

plasma metabolites, and milk composition in mid-lactation goats", *Journal of Dairy Science*, 94(8), pp. 3960-3972, August, 2011.

[3] Janssen PH, "Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics", *Animal Feed Science and Technology*, 160(1), pp. 1-22, August, 2010.

[4] Zhang XM, Medrano RF, Wang M, Beauchemin KA, Ma ZY, Wang R, Wen JN, Lukuyu BA, Tan ZL, He JH, "Corn oil supplementation enhances hydrogen use for biohydrogenation, inhibits methanogenesis, and alters fermentation pathways and the microbial community in the rumen of goats", *Journal of Animal Science*, 97(12), pp. 4999-5008, December, 2019.

[5] Chuntrakort P, Otsuka M, Hayashi K, Takenaka A, Udchachon S, Sommart K, "The effect of dietary coconut kernels, whole cottonseeds and sunflower seeds on the intake, digestibility and enteric methane emissions of Zebu beef cattle fed rice straw based diets", *Livestock Science*, 161), pp. 80-89, March, 2014.

[6] Benchaar C, Hassanat F, Martineau R, Gervais R, "Linseed oil supplementation to dairy cows fed diets based on red clover silage or corn silage: Effects on methane production, rumen fermentation, nutrient digestibility, N balance, and milk production", *Journal of Dairy Science*, 98(11), pp. 7993-8008, November, 2015.

[7] Fiorentini G, Carvalho IPC, Messana JD, Castagnino PS, Berndt A, Canesin RC, Frighetto RTS, Berchielli TT, "Effect of lipid sources with different fatty acid profiles on the intake, performance, and methane emissions of feedlot Nellore steers¹", *Journal of Animal Science*, 92(4), pp. 1613-1620, April, 2014.

[8] Duin EC, Wagner T, Shima S, Prakash D, Cronin B, Yanez-Ruiz DR, Duval S, Rumbeli R, Stemmler RT, Thauer RK, Kindermann M, "Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(22), pp. 6172-6177, May, 2016.

[9] Ogawa T, Nakazato A, Sato M, Hatayama K, "Synthesis of 2- and 3-nitrooxypropanol by chemoselective reduction of methyl 2- and 3-nitrooxypropionate", *Synthesis*, 1990(06), pp. 459-460, June, 1990.

[10] Dijkstra J, Bannink A, France J, Kebreab E, van Gastelen S, "Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type", *Journal of Dairy Science*, 101(10), pp. 9041-9047, October, 2018.

[11] van Gastelen S, Dijkstra J, Heck JML, Kindermann M, Klop A, de Mol R, Rijnders D, Walker N, Bannink A, "Methane mitigation potential of 3-nitrooxypropanol in lactating cows is influenced by basal diet composition", *Journal of Dairy Science*, 105(5), pp. 4064-4082, May, 2022.

[12] El Zokm GM, Ismail MM, El-Said GF, "Halogen content relative to the chemical and biochemical composition of fifteen marine macro and micro algae: Nutritional value, energy supply, antioxidant potency, and health risk assessment", *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), pp. 14893-14908, March, 2021.

[13] Wood JM, Kennedy FS, Wolfe RS, "Reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B12", *Biochemistry*, 7(5), pp. 1707-1713, May, 1968.

[14] Holliger C, Schraa G, Stupperich E, Stams AJ, Zehnder AJ, "Evidence for the involvement of corrinoids and factor F430 in the reductive dechlorination of 1,2-dichloroethane by *Methanosarcina barkeri*", *Journal of Bacteriology*, 174(13), pp. 4427-4434, July, 1992.

[15] Romero P, Ungerfeld EM, Popova M, Morgavi DP, Yanez-Ruiz DR, Belanche A, "Exploring the combination of *Asparagopsis taxiformis* and phloroglucinol to decrease rumen methanogenesis and redirect hydrogen production in goats", *Animal Feed Science and Technology*, 316), pp. 116060, October, 2024.

[16] Burkholder JB, Cox RA, Ravishankara AR, "Atmospheric degradation of ozone depleting substances, their substitutes, and related species", *Chemical Reviews*, 115(10), pp. 3704-3759, May, 2015.

[17] Alvarez-Hess PS, Jacobs JL, Kinley RD, Roque BM, Neachtain ASO, Chandra S, Russo VM, Williams SRO, "Effects of a range of effective inclusion levels of *Asparagopsis armata* steeped in oil on enteric methane emissions of dairy cows", *Animal Feed Science and Technology*, 310), pp. 115932, April, 2024.

[18] Olijhoek DW, Hellwing ALF, Brask M, Weisbjerg MR, Højberg O, Larsen MK, Dijkstra J, Erlandsen EJ, Lund

P, "Effect of dietary nitrate level on enteric methane production, hydrogen emission, rumen fermentation, and nutrient digestibility in dairy cows", *Journal of Dairy Science*, 99(8), pp. 6191-6205, August, 2016.

[19] Nolan JV, Hegarty RS, Hegarty J, Godwin IR, Woodgate R, "Effects of dietary nitrate on fermentation, methane production and digesta kinetics in sheep", *Animal Production Science*, 50(8), pp. 801-806, August, 2010.

[20] Arif M, Sarwar MA, Mehr-un-Nisa, Hayat Z, Younas MT, "Effect of supplementary sodium nitrate and sulphur on methane production and growth rates in sheep and goats fed forage based diet low in true protein", *Journal of Animal Plant Sciences*, 26), pp. 69-78, February, 2016.

[21] Sar C, Mwenya B, Pen B, Takaura K, Morikawa R, Tsujimoto A, Kuwaki K, Isogai N, Shinzato I, Asakura Y, Toride Y, Takahashi J, "Effect of ruminal administration of *Escherichia coli* wild type or a genetically modified strain with enhanced high nitrite reductase activity on methane emission and nitrate toxicity in nitrate-infused sheep", *British Journal of Nutrition*, 94(5), pp. 691-697, November, 2005.

[22] Petersen SO, Hellwing ALF, Brask M, Højberg O, Poulsen M, Zhu Z, Baral KR, Lund P, "Dietary nitrate for methane mitigation leads to nitrous oxide emissions from dairy cows", *Journal of Environmental Quality*, 44(4), pp. 1063-1070, July, 2015.

[23] Hegarty RS, Miller J, Oelbrandt N, Li L, Luijben JPM, Robinson DL, Nolan JV, Perdok HB, "Feed intake, growth, and body and carcass attributes of feedlot steers supplemented with two levels of calcium nitrate or urea", *Journal of Animal Science*, 94(12), pp. 5372-5381, December, 2016.

[24] Aboagye IA, Oba M, Castillo AR, Koenig KM, Iwaasa AD, Beauchemin KA, "Effects of hydrolyzable tannin with or without condensed tannin on methane emissions, nitrogen use, and performance of beef cattle fed a high-forage diet", *Journal of Animal Science*, 96(12), pp. 5276-5286, December, 2018.

[25] Puchala R, Min BR, Goetsch AL, Sahlu T, "The effect of a condensed tannin-containing forage on methane emission by goats", *Journal of Animal Science*, 83(1), pp. 182-186, January, 2005.

[26] Bhatt RS, Sarkar S, Sharma P, Soni L, Sahoo A, "Comparing the efficacy of forage combinations with

different hydrolysable and condensed tannin levels to improve production and lower methane emission in finisher lambs", *Small Ruminant Research*, 218), pp. 106876, January, 2023.

[27] Malik PK, Kolte AP, Baruah L, Saravanan M, Bakshi B, Bhatta R, "Enteric methane mitigation in sheep through leaves of selected tanniniferous tropical tree species", *Livestock Science*, 200), pp. 29-34, June, 2017.

[28] Animut G, Puchala R, Goetsch AL, Patra AK, Sahlu T, Varel VH, Wells J, "Methane emission by goats consuming different sources of condensed tannins", *Animal Feed Science and Technology*, 144(3), pp. 228-241, July, 2008.

[29] Stewart EK, Beauchemin KA, Dai X, MacAdam JW, Christensen RG, Villalba JJ, "Effect of tannin-containing hays on enteric methane emissions and nitrogen partitioning in beef cattle", *Journal of Animal Science*, 97(8), pp. 3286-3299, July, 2019.