

1
2
3
4

TITLE PAGE
- Food and Life-
Upload this completed form to website with submission

ARTICLE INFORMATION	Fill in information in each box below
Article Type	Article
Article Title (English)	Effects of Low-Methane Functional Feed on Parity-Specific Milk Productivity and Quality traits in Dairy Cows
Article Title (Korean) English papers can be omitted	저메탄 사료가 젖소의 산차별 우유생산성 및 품질에 미치는 영향
Running Title (English, within 10 words)	Low-Methane Feed and Milk Traits by Parity
Author (English)	Hyesook Yang ¹ , Kyoungbo Ko ¹ , GwangHeun Kim ¹ , YounChul Ryu ¹
Affiliation (English)	1 Division of Biotechnology, SARI, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Author (Korean) English papers can be omitted	양혜숙, 고경보, 김광훈, 류연철
Affiliation (Korean) English papers can be omitted	1 제주대학교 생명자원과학대학 동물생명공학전공
Special remarks – if authors have additional information to inform the editorial office	Hyesook yang, KyoungBo Ko. These authors contributed equally to this study.
ORCID and Position(All authors must have ORCID) (English) https://orcid.org	Hyesook Yang ¹ (Former graduate student, jeju National University , https://orcid.org/0009-0006-8986-2935) KyoungBo Ko (Research Professor, https://orcid.org/0000-0002-5837-0974) GwangHeun Kim (Ph.D. candidate, https://orcid.org/0000-0003-3282-1607) YounChul Ryu (Professor, https://orcid.org/0000-0001-8940-624X)
Conflicts of interest (English) List any present or potential conflict s of interest for all authors. (This field may be published.)	The authors declare no potential conflict of interest.
Acknowledgements (English) State funding sources (grants, funding sources, equipment, and supplies). Include name and number of grant if available. (This field may be published.)	이 논문은 2025년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음
Author contributions (This field may be published.)	Conceptualization: Yang HS, Ko KB, Ryu YC. Data curation: Yang HS, Ko KB. Formal analysis: Ko KB, Ryu YC. Methodology: Yang HS, Ko KB. Software: Ko KB, Ryu YC. Validation: Yang HS, Kim GH. Investigation: Kim GH. Writing - original draft: Yang HS, Ko KB

	Writing - review & editing: Yang HS, Ko KB, Kim GH, Ryu YC
Ethics approval (IRB/IACUC) (English) (This field may be published.)	This manuscript does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

5

6

CORRESPONDING AUTHOR CONTACT INFORMATION

For the <u>corresponding</u> author (responsible for correspondence, proofreading, and reprints)	Fill in information in each box below
First name, middle initial, last name	YounChul Ryu
Email address – this is where your proofs will be sent	ycryu@jejunu.ac.kr
Secondary Email address	after97@naver.com
Postal address	102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do 63243, Division of Biotechnology, Jeju National University, Korea
Cell phone number	+82-10-8498-3332
Office phone number	+82-64-754-3332
Fax number	+82-64-725-2403

7

8

Effects of Low-Methane Functional Feed on Parity-Specific Milk Productivity and Quality traits in Dairy Cows

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of low-methane (LM) feed supplementation on milk productivity and quality indicators across different parities in dairy cows. Milk testing records from 2021 to 2023 were analyzed, with 2023 designated as the LM feed group. The analysis showed that milk productivity (305-day milk yield, mature equivalent milk yield) generally increased with parity up to the 5th parity, followed by a decline from the 6th parity, consistent with known physiological trends. Importantly, this pattern remained stable even in the LM feed group, indicating that LM feed supplementation did not disrupt the natural parity-based performance trends. No significant decline in milk yield, milk protein, or solids-not-fat was observed in the LM group compared to the conventional feed group. On the contrary, some indicators, such as Milk Urea Nitrogen (MUN), showed improvements, suggesting enhanced nitrogen utilization efficiency. These findings support the feasibility of LM feed as a practical mitigation strategy that does not compromise dairy cow performance and highlight its potential for sustainable dairy farming under varying physiological stages.

Keywords: Low-methane feed, Milk productivity, Parity, Methane reduction

33 Introduction (서론)

34 축산업은 주요 온실가스 배출 산업 중 하나로 지적되고 있으며, 특히 반추
35 동물에서 발생하는 메탄이 가장 큰 비중을 차지한다. 메탄은 주로 반추동물
36 의 장내 발효 과정에서 발생하며, 이는 축산업 온실가스 배출의 주요 원인
37 중 하나로 알려져 있다. 국내에서도 반추동물 사육 두수의 증가와 함께 장내
38 발효에 의한 메탄 배출량이 지속적으로 증가하고 있으며, 가축분뇨 처리 과
39 정에서도 상당량의 온실가스가 배출되고 있다(환경부, 2020). 이에 따라 한국
40 은 Intergovernmental Panel on Climate Change의 가이드라인을 기반으로 축종별
41 사육 두수에 따른 국가 온실가스 배출계수를 설정하여 관리를 강화하고 있
42 다.

43 장내 발효에 의한 메탄은 반추동물의 첫 번째 위인 반추위에서 생성된다. 반
44 추위에는 셀룰로스 분해 능력을 지닌 미생물들이 존재하며, 이들은 섭취한
45 섬유질을 발효시켜 에너지를 생산하는 동시에, 부산물로 수소(H_2)와 이산화
46 탄소(CO_2)를 생성한다. 이후 메탄 생성균(methanogen)이 이 기질들을 활용하
47 여 메탄(CH_4)을 생성하게 되며, 생성된 메탄은 주로 트림(호기)을 통해 대기
48 중으로 방출된다(Knapp et al., 2014; Hill et al., 2016). 이러한 과정은 축산업에서

배출되는 메탄의 주된 경로로, 이를 효과적으로 줄이기 위한 다양한 측정 방법(예: respiration chamber, SF₆ tracer, in vitro fermentation system 등)과 저감 전략들이 연구되고 있다.

최근에는 사료를 기반으로 한 메탄 저감 기술이 주목받고 있다. *Asparagopsis taxiformis*와 같은 해조류 기반 첨가제는 메탄 배출량을 80% 이상 감소시킨다는 연구 결과가 보고된 바 있으며 (Roque *et al.*, 2019), 일부 *in vitro* 실험에서는 98%까지 감소한 사례도 있다(Kinley *et al.*, 2020). 이 외에도 3-nitrooxypropanol(3-NOP), 캐슈넛 껍질 추출물(Cashew Nut Shell Liquid, CNSL) 등 식물성 유래 첨가제 역시 다양한 실험에서 메탄 저감 가능성을 확인한 바 있다(Kebreab *et al.*, 2022). 특히 이들 첨가제는 휘발성 지방산(Volatile Fatty Acids, VFA) 생성이나 사료 섭취량에는 영향을 주지 않으면서도 메탄만 선택적으로 저감할 수 있는 가능성을 보여주고 있어, 지속가능한 축산업 실현을 위한 유망한 기술로 평가되고 있다.

한편, 한국에서도 이러한 흐름에 맞추어 저메탄 사료의 도입이 본격적으로 추진되고 있다. 농림축산식품부는 2024년부터 한우 및 젖소를 대상으로 저메탄 사료 급여에 따른 온실가스 감축 효과를 검증하기 위한 시범사업을 시행하고 있으며, 일정 기준을 충족한 농가에는 개체당 보조금이 지급되는 인센

66 티브 제도가 운영되고 있다. 이와 같은 정책은 축산업 부문의 온실가스 감축
67 을 유도하기 위한 제도적 접근으로 의의가 크지만, 새로운 사료의 도입은 젖
68 소의 반추위 미생물 생태계와 대사 작용에 영향을 줄 수 있어, 생산성 및 우
69 유 품질 변화에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

70 실제로 젖소의 장내 발효와 메탄 생성은 단순한 환경적 문제를 넘어, 우유
71 품질과도 밀접한 연관을 지닌다. 젖소의 사양 관리, 위생 상태, 착유 방법, 계
72 절 요인 등 다양한 요소들이 유방 건강, 체세포 수, 우유내 지방, 단백질 등
73 주요 성분에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 그 중에서도 사료의 구성과
74 급여 방식은 가장 핵심적인 요인 중 하나이다. 사료의 에너지 밀도, 섬유소
75 함량, 단백질 원료의 변화는 반추위 미생물 군집의 구성을 변화시켜, 장내
76 발효산물의 유형과 메탄 생성량은 물론 휘발성 지방산 조성, 소화 효율, 우
77 유 성분에도 영향을 미칠 수 있다. 또한 일부 연구에서는 사료를 갑작스럽게
78 변경할 경우, 반추위 환경이 급격히 변하면서 소화 불균형, 반추위 산도(pH)
79 저하, 스트레스 반응을 유발하여, 이에 따라 체세포 수가 증가하거나 유방염
80 의 위험이 높아질 수 있다고 보고하였다(Seo et al., 2018; Humer et al., 2021). 이
81 는 결과적으로 유성분의 불안정, 유량 감소, 위생학적 품질 저하로 이어질
82 수 있으므로, 저메탄 사료 도입 시에는 젖소의 생리적 적응 과정을 충분히

83 고려해야 한다. 따라서 저메탄 사료는 온실가스 저감 효과뿐만 아니라, 젖소
84 의 생산성과 유질에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 과학적 검증이 병
85 행되어야 한다.

86 지금까지의 선행연구들은 주로 단일 산차 개체에 대한 단기 사양실험 또는
87 실험실 수준의 메탄 저감 효과 분석에 초점을 맞춰 왔다 (Roque et al., 2019;
88 Kinley et al., 2020). 그러나 이러한 연구들은 젖소의 산차에 따라 생산성과 유
89 질이 어떻게 달라지는지를 충분히 반영하지 못했으며, 실제 농가에서 장기간
90 사양 데이터를 바탕으로 저메탄 사료의 효과를 분석한 사례는 매우 드물다.
91 또한 기존 연구의 대부분은 메탄 배출량 감소라는 환경적 효과에 집중되어
92 있어, 사료 전환에 따른 젖소의 생리적 반응, 유방 건강, 우유 성분 변화 등
93 실질적 생산성과 품질 지표에 대한 검증이 부족하였다. 이러한 점은 농가 입
94 장에서 저메탄 사료 도입을 망설이게 하는 중요한 원인 중 하나이다. 본 연
95 구는 이러한 공백을 보완하기 위해, 2021~2023년까지 동일한 농장에서 수집
96 한 우유 생산성 및 품질 데이터를 활용하여, 저메탄 사료가 산차별로 젖소의
97 생산성과 유질에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 특히, 각 산차의 생
98 리적 특성을 반영하여, 저메탄 사료가 기존의 자연적인 생산성 흐름을 유지
99 하는지, 또는 변화시키는지를 확인하였다.

따라서 본 연구는 기존의 메탄 저감 효과 중심 연구에서 나아가, 현장 적용성과 젓소의 생산성 안정성에 초점을 맞춘 최초의 산차 기반 분석 연구라는 점에서 학문적·실무적 의의가 크다. 특히, 저메탄 사료의 급여가 생산성과 품질에 부정적인 영향을 미치지 않음을 실증적으로 제시함으로써, 농가의 수익성 저하에 대한 우려를 완화하고 사료 전환을 유도할 수 있는 근거 자료로 활용될 수 있다. 이는 정부의 저메탄 사료 보조 정책이나 탄소중립 이행 전략에 있어 실효성 있는 정책 설계와 예산 투입의 타당성을 뒷받침할 수 있으며, 지속가능한 낙농을 위한 과학적·경제적 기반 마련에 기여할 수 있는 실질적 자료로 활용될 수 있다.

Materials and Methods (재료 및 방법)

1. 농가 선정

본 연구는 제주특별자치도 제주시에 위치한 한 젓소 사육 농가에서 수행되었다. 해당 농가는 총 100두의 젓소를 사육하고 있으며, 이 중 착유우는 약 50~55두이다. 일일 평균 원유 생산량은 약 1,500kg이며, 연간 생산량은 약 54톤 수준이다. 농장은 개방형 우사 구조를 갖추고 있으며, 전혼합사료(TMR, Total Mixed Ration)를 급여하고, 착유는 헤링본(Herringbone) 방식의 착유 시스템

117 템을 통해 이루어진다.

118 **2. 시험 사료 및 실험 설계**

119 시험 사료는 시판 중인 A사의 메탄 저감형 착유용 배합사료를 사용하였으며,
120 1두당 9.8kg을 TMR에 혼합하여 아침과 저녁 하루 2회 급여하였다. 사료는
121 펠렛 및 크럼블 형태로 구성되어 있으며, 메탄 저감 첨가제를 포함하고 있으
122 나, 제조사의 보안 요청에 따라 상세 성분은 공개하지 않았다. 본 연구는
123 2021~ 2023년에 걸쳐 동일한 농장에서 수집된 월별 우유 검정 데이터를 기
124 반으로 하였으며, 실험군은 연도(2021~2022년: 일반 사료 급여군/2023년: 저
125 메탄 사료 급여군), 산차(1~6산차 이상), 월별(1~12월)을 처리 요인으로 설정
126 하였다. 해당 농장에서 분석에 포함된 젖소의 총 검정 개체 수는 1,442두였
127 으며, 연도별로는 2021년 446두, 2022년 454두, 2023년 542두였다. 각 개체
128 는 매월 반복적으로 검정되었으며, 이는 시간적 반복 구조를 형성한다. 실험
129 은 실제 농가 운영환경에서 수행되었기 때문에, 무작위 배정(Randomization)
130 은 적용되지 않았으나, 연도·산차별 조건을 고정 요인으로 통제함으로써 분
131 석의 타당성을 확보하였다.

132 시험 사료의 일반 성분은 Table 1에, 사용된 TMR의 배합비는 Table 2에 제시
133 하였다.

3. 생산성 관련 자료 수집

젖소의 생산성 관련 자료는 농협 젖소개량사업소에서 월 1회 실시하는 우유
검정기록을 기반으로 수집하였다. 분석 대상 기간은 2021년 1월부터 2023년
12월까지이며, 해당 기간 동안의 모든 검정 데이터를 활용하였다. 주요 검정
항목은 유량(Milk yield), 유지율(Milk fat), 유단백질 함량(Milk protein), 무지고
형분(Solids-not-fat, SNF), 우유 내 요소질소(Milk urea nitrogen, MUN), 체세포
수(Somatic cell count, SCC), 305일 유량 관련 지표(305-day milk productivity
traits) 등이며, 각 항목의 정의는 Table 3에 정리하였다.

4. 통계 분석

수집된 자료는 SAS(Statistical Analysis System, ver. 9.1; SAS Institute Inc., Cary, NC,
USA)를 이용하여 분석하였다. 일반 선형모형(GLM, General Linear Model)을 적
용하였으며, 고정요인(fixed effects)으로는 연도(2021 ~ 2022년: 일반사료 급여
군, 2023년: 저메탄 사료 급여군) 및 산차를 설정하고, 종속 변수로는 305일
유량, 유단백량, 유지량, 무지고형분량, MUN, SCC 등 생산성 및 품질 자료를
설정하였다. 모든 변수에 대해 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며, 처리 간
평균 차이는 Duncan의 다중검정법(Duncan's Multiple Range Test, 1955)을 통해
 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

152 Results (결과)

153 Table 4는 2021년부터 2023년까지 연도별로 기록된 우유 검정 자료를 바탕으로,
154 검정 월령(age at test), 산차(Parity), 누적 착유일수(Cumulative days in milk)
155 에 대한 분석 결과를 나타내었다. 검정 월령은 2021년 49.5개월, 2022년 50.7
156 개월, 2023년 51.2개월로 나타났으며, 연도 간 유의적인 차이는 관찰되지 않았
157 았다. 누적 착유일수 역시 2021년 185.78일, 2022년 169.3일, 2023년 184.6일
158 로, 통계적으로 유의적 차이는 없었다. 반면, 산차는 연도에 따라 유의적인
159 차이를 보였으며($p < 0.05$), 2023년이 2.4산차로 가장 높았고 2021년이 2.2산차
160 로 가장 낮았다. 그러나 전체 평균은 2.3산차 수준으로, 통계적으로 유의하더
161 라도 실질적인 변동 폭은 제한적인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 종합해
162 볼 때, 본 연구에서는 사용된 연도별 검정 개체의 기본 특성 중 검정 월령과
163 누적 착유일수가 통계적으로 동일하며, 산차 또한 평균 2.3 수준의 비교적
164 동질적인 범위 내에 있는 것으로 간주된다. 따라서 이후의 생산성 및 우유
165 품질 분석에서 이들 요인을 일정한 기준으로 설정하고 분석을 수행하였다.

166 Table 5는 일반 사료 급여군(2021 ~ 2022년) 및 저메탄 사료 급여군(2023년)
167 에서 생산된 원유의 주요 품질 및 생산성 지표를 비교한 결과를 나타낸 것
168 이다. 연도별 평균 유량과 305일 유량은 각각 30.8, 30.0, 30.9 kg/day와
169 9,736.0, 9,840.4, 9,738.3 kg으로 나타났으며, 통계적으로 유의적 차이는 없었
170 다. 이는 저메탄 사료 급여가 유량에 부정적인 영향을 미치지 않았음을 시사

한다. 305일 SNF, 성년형 유량(Mature equivalent milk yield), SCC, 유단백질량 등 대부분의 지표에서도 유의적 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 저메탄 사료 급여가 젖소의 기초 생산성 및 우유의 위생 품질을 저해하지 않음을 뒷받침한다. 유사하게, *Melgar et al.* (2022)의 연구에서도 메탄 저감 첨가제가 유량이나 체세포수에 유의적으로 부작용을 초래하지 않았다고 보고한 바 있다. 한편, 유지율, 유단백질 함량, SNF, 함량 MUN 등 일부 항목에서는 통계적으로 유의한 연도 간 차이가 관찰되었다($p < 0.001$). 2021년부터 2023년까지 유지율을 비교한 결과, 연도 간 통계적으로 유의적 차이가 나타났다($p < 0.001$). 2021년과 2022년의 유지율은 각각 3.8%, 3.5%로 2022년에 일시적인 감소가 관찰되었으나, 2023년 저메탄 사료를 급여한 이후에는 3.7%로 다시 상승하였다. 특히, 2021년(일반 사료 급여군)과 2023년(저메탄 사료급여군)의 유지율 간에는 통계적으로 유의적 차이가 없었으며, 동일한 수준을 유지하였다. 이는 저메탄 사료의 급여가 유지율에 부정적인 영향을 미치지 않았음을 시사한다. 이러한 변화는 개체군 구성, 계절적 요인, 또는 사양 관리의 차이에 기인했을 가능성이 있다. 또한, 305일 유지방량과 성년형 유지방량에서도 2023년 수치가 2022년 보다 높았으나, 통계적으로 유의적 차이가 나타나지 않아 저메탄 사료에 의한 효과로 단정할 수는 없다. 우유 내 MUN 수치는 2023년에 유의하게 감소하였다($p < 0.001$). 이는 단백질 과잉 공급 가능성이 낮아지고, 사료 이용 효율이 향상되었음을 시사하는 긍정적 신호로 해석될 수 있다. MUN은 젖소의 질소 대사 상태를 반영하는 주요 지표로, 적절한 단백질 공급은 MUN 농도를 안정화시키며, 이는 생산성 유지 및 환경적

지속가능성 측면에서 중요하다(Munyaneza et al., 2017). 요약하면, 유지율과 MUN을 제외한 대부분의 생산성 및 위생품질 지표에서 저메탄 사료 급여에 따른 부정적인 변화는 관찰되지 않았으며, 이는 저메탄 사료가 젖소의 기본적인 생산성이나 우유 위생 품질을 저해하지 않음을 뒷받침한다.

Table 6은 본 연구에 사용된 실험 농가의 산차별 우유 품질 특성을 나타낸 것으로, 사료 급여 유형(일반 사료군과 저메탄 사료군)에 따른 산차별 비교 분석을 수행하기에 앞서, 기초 개체군의 산차별 생산성과 품질 지표의 자연적 차이를 확인하고자 작성되었다. 이는 이후 사료 급여 효과와 산차 요인의 상호작용을 보다 정밀하게 해석하기 위한 기초자료로 활용되었다. 분석결과, 유량은 5산차에서 가장 높게 나타났으며(36.3 kg)를 나타냈으며, 1산차(27.2 kg)와 6산차(27.7 kg)에서는 가장 낮은 수치를 기록하였다. 이는 산차 증가에 따라 유량이 일정 수준까지 증가한 후 다시 감소하는 전형적인 패턴을 반영하며, Turner et al.(2023)및 Elgazar et al. (2021)의 연구 결과와 일치한다. 특히, Elgazar et al. (2021)은 열대 환경에서 사육된 홀스타인 젖소를 대상으로 3~5산차에서 유량이 증가하고 이후 감소하는 연구결과를 보고한 바 있다. 유지율은 1산차에서 평균 3.9%로 가장 높았고, 이후 산차가 증가함에 따라 점진적으로 감소하였다. 이는 산차 증가에 따라 유지방 비율이 감소하는 일반적인 생리학적 특성을 반영하며, Turner et al. (2023)의 연구에서도 유사한 결과가 보고되었다. 유단백질 함량 역시 1산차와 2산차에서 평균 3.4%로 가장 높은 수준을 보였으며, 5산차에서 가장 낮은 수치를 보였다. SNF 함량은 전체적으로 큰 변동은 없었으나, 1산차에서 평균 8.9%로 가장 높고, 5산차에서

8.6%로 가장 낮은 수준을 보였다. 이는 산차에 따라 일부 품질 지표의 자연
적 차이가 존재함을 시사한다.

SCC는 4산차와 5산차에서 상대적으로 높은 수준을 나타냈으며, 이는 산차가
증가함에 따라 유방 건강이 저하될 수 있음을 의미한다. *Elgazar et al. (2021)*
은 산차 증가와 체세포수 상승 간의 유의적 상관관계를 보고하였으며, 본 연
구 결과 역시 이를 뒷받침한다. Figure 1은 일반 사료 급여군(2021~2022년)과
저메탄 사료 급여군(2023년)의 우유 품질 지표를 산차별로 비교하여 나타냈
다. 유단백질율과 SNF는 전체적으로 산차에 따라 다소의 변화를 보였으나,
두 사료 처리군 간에는 통계적으로 유의적 차이가 확인되지 않았다. SSC는 4
산차 이후에서 수치가 증가하는 모습이 관찰되었으나, 이 또한 사료 처리 간
통계적으로 유의적 차이는 나타나지 않았다. 반면, MUN 수치는 모든 산차에
서 저메탄 사료를 급여한 2023년 개체군에서 일관되게 유의적으로 낮은 값
을 나타냈으며($p<0.001$), 이는 질소 대사 효율이 향상되었을 가능성을 뒷받
침하는 결과로 해석될 수 있다.

Table 7은 실험 농가의 305일 기준 우유생산성(유량, 유지량, 유단백량, SNF)
에 대한 산차별 분석 결과를 나타내었다. 모든 지표에서 산차에 따라 통계적
으로 유의적 차이가 나타났으며($p<0.001$), 305일 유량은 1산차(8,884kg)에서
가장 낮았고, 5산차(10,857kg)에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 유지량, 유단
백량, SNF 또한 모두 5산차에서 가장 높은 값을 보였으며, 1산차에서 가장 낮
은 값을 보였다. 6산차의 경우 모든 생산성지표에서 5산차 대비 유의적으로
감소하였으며, 이는 산차 증가에 따른 생산성의 상승 후 일정 시점 이후 감

소하는 일반적인 특성을 반영하는 것 판단된다. 다만, Table7은 전체 개체를
기준으로 분석한 결과이며, 사료처리에 따른 영향은 figure 2에서 별도로 비
교하였다.

Figure 2는 일반사료 급여군과 저메탄 사료 급여군의 개체 간의 305일 우유
생산성 지표 차이를 산차별로 비교한 결과를 시각화한 것이다. 305일 유량은
2산차에서 저메탄 사료군이 일반 사료군보다 유적으로 낮은 유량을 나타냈으
며($p<0.01$), 5산차에서는 반대로 저메탄 사료군이 유의적으로 높은 유량을 보
였다($p<0.05$). 이러한 결과는 저메탄 사료에 대한 반응이 산차에 따라 일정하
지 않음을 나타내며, 이는 각 산차별 개체 들이 지닌 생리적 상태나 에너지
요구수준, 사료 이용 능력의 차이에 기인할 수 있다. 305일 유지지방량은 전체
평균(overall)에서 저메탄 사료군이 일반 사료군보다 유의적으로 높은 수치를
보였으며($p<0.001$), 1, 3, 4, 5산차에서도 저메탄 사료군의 수치가 유의적으로
높게 나타났다($p<0.05$ 또는 $p<0.01$). 반면, 6산차에서는 저메탄 사료군의 유
지방량이 낮게 나타났다($p<0.001$). 이는 저메탄 사료의 유지 생산 효과가 산
차에 따라 상이하게 나타날 수 있음을 보여준다. 305일 유단백량에서는 2산
차와 6산차에서 저메탄 사료군이 일반 사료군보다 낮은 값을 보였으며
($p<0.001$), 전체 평균(overall)에서도 저메탄 사료군이 유의적으로 낮았다

($p < 0.05$). 305일 SNF은 2산차에서 저메탄 사료군이 일반 사료군보다 유의적으로 낮았으며($p < 0.01$), 6산차에서는 반대로 저메탄 사료군이 낮은 값을 보였다($p < 0.05$). 전반적으로, 일부 산차에서 저메탄 사료군과 일반 사료군 간의 유의적 차이가 존재하였으나, 그 방향성과 효과는 지표 및 산차에 따라 달랐다. 특히, 5산차에서는 대부분의 지표에서 저메탄 사료군이 생산성 면에서 긍정적인 결과를 보였으며, 반면 2산차와 6산차에서는 일부 항목에서 저메탄 사료군의 수치가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 저메탄 사료의 효과가 산차에 따라 차별적으로 나타날 수 있으며, 사료의 효율성 평가 시 산차 요인을 고려한 분석이 필요함을 시사한다.

Table 8은 실험 농가에서 산차에 따른 성년형 유량 및 성분 함량(유지방, 유단백량, 무지고형분량)의 변화를 나타낸 것이다. 성년형 유량은 5산차에서 평균 10,984kg으로 가장 높았으며, 1산차(9,679kg)와 6산차(9,779.5kg)에서는 상대적으로 낮은 수치를 보였다($p < 0.001$). 유지방, 유단백량, SNF 역시 모두 5산차에서 가장 높은 값을 보였으며($p < 0.001$), 6산차에서는 감소하는 하였다($p < 0.001$). 이와 같은 결과는 선행연구에서 보고된 바와 같이, 일정 산차까지 생산성이 증가하다. 이후 감소하는 양상(Ferreira et al., 2021; Walter et al., 2022)과 일치한다. 특히 중산차(4~5산차)에서 유량과 주요 성분 함량이 최대에 도

268 달하는 것이 일반적인 것으로 보고되어 있다. Table 8의 산차별 성년형 생산
269 성 자료를 기반으로, figure 3를 통해 일반 사료 급여군과 저메탄 사료 급여군
270 간의 산차별 차이를 비교하였다.

271 Figure 3은 일반사료 급여군과 저메탄 사료 급여군의 성년형 우유 생산성과
272 주요 성분 함량(유량, 유지방량, 유단백량, 무지고형분량)의 산차별 변화를 시
273 각화한 결과이다. 성년형 유량은 산차에 따라 두 군 간 차이를 보였으며, 특
274 히 5산차에서 저메탄 사료 급여군이 가장 높은 생산량을 기록하였다. 반면, 2
275 산차와 6산차에서는 저메탄 사료군이 일반 사료군 대비 유의하게 낮은 유량
276 을 나타내었다($p<0.01$, $p<0.05$). 성년형 유지방량은 전체 평균 및 대부분의
277 산차(1,3,4,5,6산차)에서 저메탄 사료 급여군이 유의적으로 높은 값을 보였으
278 며($p<0.05$, $p<0.001$), 이는 저메탄 사료가 유지방 생성에 긍정적인 영향을 미
279 칠 수 있음을 시사한다. 반면, 성년형 유단백량은 2산차와 6산차에서 저메탄
280 사료군이 유의적으로 낮은 값을 보였고($p<0.001$), 전체 평균에서도 유의한
281 감소가 관찰되었다($p<0.01$). 성년형SNF은 대부분의 산차에서 유의한 차이를
282 보이지 않았으나, 2산차와 6산차에서 저메탄 사료 급여군이 유의하게 낮은
283 수치를 나타내었다($p<0.01$). 종합적으로, 일부 산차에서 두 사료군 간 유의한
284 차이가 관찰되었으나, 그 방향성과 효과는 지표 및 산차에 따라 일관되지 않

게 나타났다. 특히 유지방량의 경우 전반적으로 저메탄 사료군에서 높은 값을 보여, 특정 성분에 있어 저메탄 사료의 긍정적 가능성을 시사하였다. 반면 유단백과 SNF는 일부 산차에서 저메탄 사료군의 감소 경향이 나타났으며, 이는 개체의 생리적 상태, 에너지 및 단백질 요구 수준, 사료 이용 능력 등의 차이에 기인할 수 있다. 이러한 결과는 저메탄 사료의 효과가 산차 및 성분 항목에 따라 상이하게 나타날 수 있음을 보여주며, 향후 효율성 평가 시 산차 요인을 통제한 정밀 분석이 필요함을 시사한다.

Discussion (토론)

본 연구는 2021년부터 2023년까지 동일한 낙농 농장에서 수집된 젖소의 생산성 및 우유 품질 데이터를 바탕으로, 저메탄 사료 급여가 산차에 따라 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 특히, 사료 변화에 따른 연도별 비교가 가능한 구조로 분석을 설계하였으며, 산차에 따른 자연적인 품질 변화 경향을 사전 분석함으로써, 저메탄 사료 급여 후 이러한 패턴에 유의미한 변화가 있었는지 여부를 중심으로 논의하였다.

우선, 산차별 품지 지표의 자연스러운 변화 양상은 기존 연구들과 유사한 경향을 보였다. 유량, 유지율, 유단백, SNF, SCC 등 주요 지표는 대부분 중산차

(4~5산차)에서 최대치를 기록한 후 고산차(6산 이상)에서 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 기존 연구에서도 공통적으로 보고된 바 있으며, 젖소의 생리적 생산능력의 한계를 나타낸다(Turner et al., 2023; Gröhn et al., 1995).

저메탄 사료의 효과를 분석하기 위해, 저메탄 사료 급여군과 일반 사료 급여군의 산차별 데이터를 비교한 결과, 저메탄 사료는 생산성 및 품질 지표 전반에 걸쳐 기존의 산차별 경향을 변화시키지 않았다. 즉, 기존 농장의 자연적인 산차별 패턴이 유지되었으며, 이는 저메탄 사료가 젖소의 생리적 생산능력 흐름에 부정적 영향을 주지 않음을 시사한다.

특히, 연도별 통계적 유의성은 거의 없었으며, 305일 유량, 유지량, 유단백량, 무지고형분량 등 주요 생산성 지표 모두에서 저메탄 사료에 의한 변화는 제한적이었다. 다만 일부 산차(예: 5산차)에서 저메탄 사료 급여군이 다소 높은 생산성을 보인 점은 향후 추가 검토의 여지가 있다. 한편, 가장 일관된 변화는 우유 내 MUN수치에서 확인되었으며, 모든 산차에서 저메탄 사료 급여군(2023년)이 유의적으로 낮은 MUN 수치를 나타냈다($p < 0.001$). 이는 단백질 공급 과잉이 줄어들고, 질소 이용 효율이 개선되었음을 나타내는 생리학적 지표로 해석될 수 있다(Aragones et al., 2020). 저메탄 사료에 포함된 기능성 첨가제는 반추위 내 질소 고정능력이 높은 미생물의 활성을 증가시키고, 암

모니아의 생성 및 흡수를 억제함으로써, 미생물 단백질 합성을 촉진하고 질소 대사의 효율을 향상시킬 수 있다(Munyaneza et al., 2017; Zhang et al., 2025). 이러한 메커니즘은 결과적으로 혈중 MUN를 감소시키는 방향으로 작용할 수 있다.

또한, 체세포수는 고산차에서 자연적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 기존 연구에서 산차 증가와 유방염 발생률 상승 간 상관관계를 밝힌 결과 (Elgazar et al., 2021)와도 일치한다. 그러나 저메탄 사료가 체세포수 증가에 영향을 주었다는 명확한 증거는 본 연구에서는 관찰되지 않았다.

요약하면, 본 연구에서 사용된 저메탄 사료는 생산성과 품질에 있어 기존 산차별 패턴을 유지하면서도, MUN 개선과 같은 긍정적 생리 반응을 유도하였다. 이러한 결과는 저메탄 사료의 현장 적용 가능성과 지속가능한 낙농 기술로서 실용성을 뒷받침하며, 향후 더 광범위한 농가와 개체를 대상으로 한 장기적인 실증 연구를 통해 검증되어야 할 것이다.

References

- Elgazar, E. A., Atya, A., & El-Kenawy, A. (2021). Effects of parity and days in milk on milk composition in correlation with β -hydroxybutyrate in tropical dairy cows. *Veterinary World*, 14(4), 936–942.
- Environmental Ministry of Korea. (2020). 국가 온실가스 인벤토리 보고서 2020 (National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea 2020). 세종특별자치시: 온실가스종합정보센터.
- Ferreira, M. F. de L., Rennó, L. N., Rodrigues, I. I., Valadares Filho, S. C. F., Costa e Silva, L. F., Fonseca e Silva, F. F., Detmann, E., & Paulino, M. F. (2021). Evaluation of non-linear models to predict potential milk yield of beef cows according to parity order under grazing. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 721792.
- Gröhn, Y. T., Eicker, S. W., & Hertl, J. A. (1995). The association between previous 305-day milk yield and disease in New York State dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 78(8), 1693–1698.
- Hill, J., McSweeney, C., Wright, A.-D. G., Bishop-Hurley, G., & Kalantar-Zadeh, K. (2016). Measuring methane production from ruminants. *Trends in Biotechnology*, 34(1), 26–35.
- Humer, E., Petri, R. M., Aschenbach, J. R., Bradford, B. J., Penner, G. B., Tafaj, M., & Zebeli, Q. (2021). Practical feeding considerations for dairy cows to mitigate ruminal acidosis. *Journal of Dairy Science*, 104(6), 6343–6360.
- Kebreab, E., Alemu, A. W., Assoumaya, C., Dijkstra, J., & France, J. (2022). Recent advances in mitigating enteric methane emissions in ruminants. *Journal of Animal Science*, 100(Suppl. 1), 1–17.
- Kinley, R. D., Martinez-Fernandez, G., Matthews, M. K., de Nys, R., Magnusson, M., &

Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120836.

Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261.

Melgar, A., Fokkema, R., van Lingen, H. J., & Dijkstra, J. (2022). Effect of methane-reducing feed additives on milk production and composition in dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 4781–4797.

Munyaneza, N., Niyukuri, J., & El Hachimi, Y. (2017). Milk urea nitrogen as an indicator of nitrogen metabolism efficiency in dairy cows: A review. *Theriogenology Insight*, 7(3), 145–159.

Roque, B. M., Brooke, C. G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L. J., Najafi, N., ... Kebreab, E. (2019). Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and the rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome*, 1, Article 3.

Seo, J. K., Kim, M. H., Yang, C. J., & Ha, J. K. (2018). Effects of dietary transition on rumen fermentation characteristics, microbial populations and immune responses in Holstein dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(10), 1603–1612.

Turner, C., Smith, R., & Walker, J. (2023). Effect of lactation number on milk yield and composition in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 106(4), 2154–2164.

Walter, L. L., Gärtner, T., Gernand, E., Wehrend, A., & Donat, K. (2022). Effects of parity and stage of lactation on trend and variability of metabolic markers in dairy cows. *Animals*, 12(8), Article 1008.

Zhang, Y., Zhang, R., Liu, L., Zhang, J., & Liu, J. (2024). Allicin enhances urea-N conversion to microbial-N by inhibiting urease activity and modulating the rumen microbiome in cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 15, Article 44.

ACCEPTED

Table 1. Nutritional composition of experimental and conventional feeds

Item	Low-methane Feed	Conventional feed
Feed type	Pelleted, crumbled	Pelleted, crumbled
Feed classification	Compound feed / Dairy cattle	Compound feed / Dairy cattle
Feed name	High-performance dairy feed	High-performance dairy feed
Intended milk yield	Over 40 kg/day	Over 40 kg/day
Crude protein (%)	20.00	18.24
Crude fat (%)	≥ 3.50	4.53
Crude ash (%)	≤ 10.00	6.01
Crude fiber (%)	≤ 15.00	6.24
Calcium (%)	≥ 1.00	-
Phosphorus (%)	≤ 1.20	-
ADF (%)	-	11.23
NDF (%)	-	23.54
TDN (%)	75.00	-
Moisture (%)	-	11.22
Methane-reducing additives	Additive 1, Additive 2, Additive 3*	Not included

*Note: The specific methane-reducing additives are not disclosed due to company confidentiality.

Table 2. TMR composition and feeding rate

Ingredient	Amount (kg/head/day)
Methane-reducing feed	9.80
Alpha corn	2.00
Milkgen Top	0.30
Cottonseed	2.50
Beet pulp	2.30
Ryegrass (35% moisture)	6.67
Alfalfa	2.50
Oat hay	3.17
Water	1.50
Probiotics (yeast)	0.10
Limestone	0.05
Salt	0.04
Sodium bicarbonate	0.20
Total	31.12

406 Table 3. Definitions of key milk productivity traits in dairy cows

Variable Name	Definition
Milk yield (kg/day)	The amount of milk produced per cow per day (in kilograms).
Milk fat (%)	The percentage of fat content in milk.
Milk protein (%)	The percentage of protein content in milk.
Solids-not-fat (SNF) (%)	The proportion of non-fat solids in milk, excluding milk fat.
Somatic cell count ($\times 10^3/\text{mL}$)	The number of somatic cells per milliliter of milk, used as an indicator of udder health.
Milk urea nitrogen (MUN, mg/dL)	The concentration of urea nitrogen in milk, reflecting the balance of dietary protein.
305-day milk yield (kg)	The total amount of milk produced over a standardized 305-day lactation period.
305-day milk fat yield (kg)	The total amount of milk fat produced over 305 days.
305-day milk protein yield (kg)	The total amount of milk protein produced over 305 days.
305-day solids-not-fat yield (kg)	The total amount of SNF (non-fat solids) produced over 305 days.
Mature equivalent milk yield (kg)	Estimated milk yield adjusted to a standard age (72 months) and lactation length.
Mature equivalent milk fat yield (kg)	Estimated milk fat yield adjusted to a standard cow maturity.
Mature equivalent milk protein yield (kg)	Estimated milk protein yield adjusted to a standard cow maturity.
Mature equivalent SNF yield (kg)	Estimated SNF yield adjusted to a standard cow maturity.

407

408

Table 4. Analysis of age at Test, Parity, and Cumulative days in Milk by year

	Conventional feed		Low-methane Feed		sig ¹⁾
	2021	2022	2023		
Age at test (mouths)	49.5±16.8 ^a	50.7±19.4 ^a	51.2±18.9 ^a		ns
Parity	2.2±1.1 ^b	2.3±1.3 ^{ab}	2.4±1.3 ^a		*
Cumulative Days in Milk (days)	185.7±119.8 ^a	169.3±109.7 ^b	184.6±121.9 ^a		ns

Mean±SD

¹⁾Level of significance: NS, not significant; *P < 0.05

^{a-b}values with different superscripts in the same row differ significantly

Table 5. Changes in Milk Productivity and Quality by Year Following Low-Methane Feed
Supplementation

	Conventional feed		Low-methane Feed	sig ¹⁾
	2021	2022	2023	
Milk yield(kg/day)	30.8±9.6 ^a	30.0±8.6 ^a	30.9±8.7 ^a	ns
Milk fat(%)	3.8±0.9 ^a	3.5±0.7 ^b	3.7±0.7 ^a	***
Milk protein(%)	3.4±0.4 ^a	3.3±0.3 ^b	3.3±0.4 ^b	***
Non-fat milk solid(%)	8.9±0.5 ^a	8.8±0.4 ^b	8.7±0.4 ^c	***
Somatic cell count (×10 ³ /mL)	134.6±382.5 ^a	110.6±179.7 ^a	113.1±238.6 ^a	ns
MUN(mg/dL)	17.6±5.1 ^a	17.5±3.4 ^a	14.6±2.2 ^b	***
305-day milk yield(kg)	9736.0±1691.3 ^a	9840.4±1836.4 ^a	9738.3±1590.5 ^a	ns
305-day milk fat (kg)	345.9±58.6 ^a	330.2±59.4 ^b	343.7±60.0 ^a	***
305-day protein yield (kg)	315.0±45.9 ^a	316.8±55.5 ^a	307.4±45.7 ^b	*
305-day SNF (kg)	849.1±136.1 ^a	851.5±154.2 ^a	838.6±132.6 ^a	ns
Mature Equivalent Milk Yield(kg)	10084.0±1662.2 ^a	10214.6±1849.0 ^a	10094.1±1485.4 ^a	ns
Mature Equivalent Milk milk fat(kg)	363.7±62.5 ^a	347.2±64.6 ^b	360.7±59.4 ^a	***
Mature Equivalent Milk milk protein(kg)	332.7±46.1 ^a	333.9±56.2 ^a	324.1±42.0 ^b	**
Mature Equivalent SNF(kg)	902.4±139.7 ^a	902.6±156.9 ^a	888.3±122.3 ^a	ns

Mean±SD

¹⁾Level of significance: NS, not significant; *P < 0.05; **P < 0.01; ***P < 0.001.

^{a-b}values with different superscripts in the same row differ significantly

Table 6. Changes in Milk Quality by Parity in the Analyzed Dairy Farm

	Milk yield (kg/day)	Milk Fat (%)	Milk Protein(%)	SNF(%)	Somatic Cell count ($\times 10^3/\text{mL}$)	MUN (mg/dL)
1st	27.2 $\pm$ 5.9 ^c	3.9 $\pm$ 0.7 ^a	3.4 $\pm$ 0.4 ^a	8.9 $\pm$ 0.4 ^a	86.6 $\pm$ 177.6 ^b	17.5 $\pm$ 3.7 ^a
2nd	30.9 $\pm$ 9.6 ^b	3.7 $\pm$ 0.8 ^{ab}	3.4 $\pm$ 0.4 ^a	8.8 $\pm$ 0.4 ^a	102.6 $\pm$ 157.0 ^b	16.9 $\pm$ 4.0 ^a
3rd	32.0 $\pm$ 9.9 ^b	3.6 $\pm$ 0.9 ^b	3.3 $\pm$ 0.4 ^{ab}	8.7 $\pm$ 0.5 ^b	117.0 $\pm$ 193.5 ^b	15.6 $\pm$ 3.7 ^b
4th	32.4 $\pm$ 9.3 ^b	3.5 $\pm$ 0.8 ^b	3.3 $\pm$ 0.3 ^{bc}	8.7 $\pm$ 0.3 ^b	235.5 $\pm$ 559.6 ^a	15.2 $\pm$ 3.1 ^b
5th	36.3 $\pm$ 10.1 ^a	3.5 $\pm$ 0.9 ^b	3.1 $\pm$ 0.5 ^c	8.6 $\pm$ 0.4 ^c	200.8 $\pm$ 565.9 ^a	15.8 $\pm$ 5.2 ^b
6th	27.7 $\pm$ 10.2 ^c	3.5 $\pm$ 0.7 ^b	3.4 $\pm$ 0.3 ^a	8.7 $\pm$ 0.5 ^b	249.2 $\pm$ 308.7 ^a	14.2 $\pm$ 4.0 ^c
sig ¹⁾	***	***	***	***	***	***

Mean $\pm$ SD

^{a-d}: Values within the same column with different superscripts differ significantly ($p < 0.001$)

¹Level of significance: *** $p < 0.001$

Table 7. Changes in 305-Day Milk Productivity by Parity in the Analyzed Dairy Farm

	305-Day Milk Yield (kg)	305-Day Milk Fat Yield (kg)	305-Day Protein Yield (kg)	305-Day SNF Yield
1st	8884.0±1471.8 ^d	318.5±57.0 ^c	280.7±41.1 ^c	758.6±118.3 ^d
2nd	9969.6±1717.6 ^b	346.9±54.6 ^b	325.0±40.6 ^b	876.4±125.2 ^b
3rd	10231.4±1702.1 ^b	352.9±67.8 ^{ab}	326.4±50.4 ^b	883.6±143.8 ^b
4th	10343.3±1258.6 ^b	339.0±48.9 ^b	329.2±41.0 ^{ab}	900.6±113.6 ^{ab}
5th	10857.7±1609.7 ^a	365.9±45.9 ^a	340.6±53.4 ^a	933.2±142.6 ^a
6th	9485.2±1717.6 ^c	318.1±53.7 ^c	318.8±41.4 ^b	833.6±132.2 ^c
sig ¹⁾	***	***	***	***

Mean ± SD

^{a-d}: Values within the same column with different superscripts differ significantly (p < 0.001)

¹Level of significance: ***p < 0.001

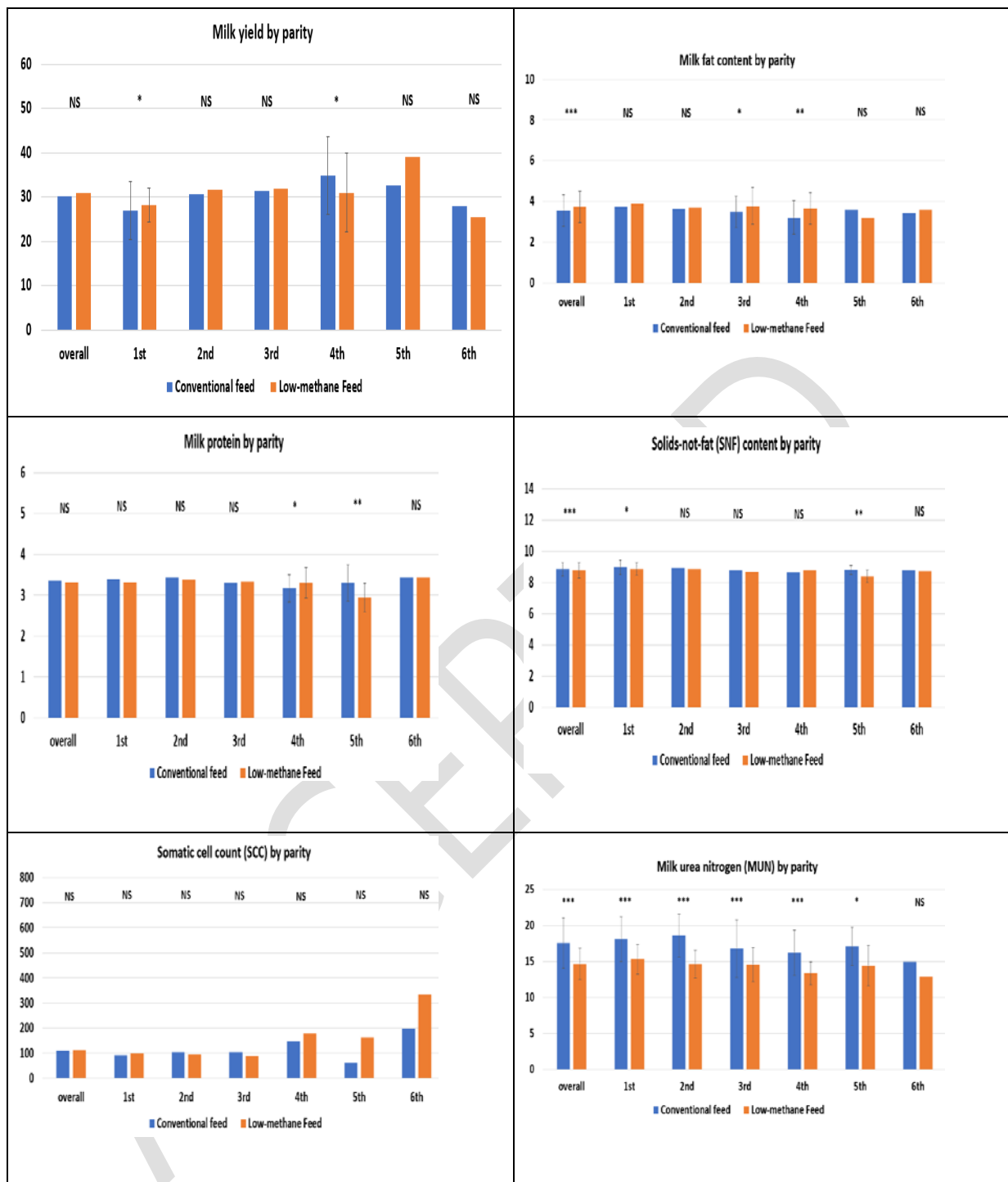
Table 8. Changes in Mature Equivalent Milk Productivity by Parity in the Analyzed Dairy Farm

	Mature Equivalent Milk Yield (kg)	Mature Milk Fat Yield (kg)	Mature Milk Protein Yield (kg)	Mature SNF Yield(kg)
1st	9679.0±1596.4 ^c	354.7±63.4 ^{ab}	313.0±46.1 ^c	852.3±133.0 ^b
2nd	10269.2±1751.5 ^b	362.3±58.5 ^a	342.8±43.0 ^a	930.9±133.6 ^a
3rd	10281.7±1628.1 ^b	357.4±69.0 ^{ab}	332.8±50.3 ^{ab}	905.6±143.4 ^a
4th	10356.8±1454.7 ^b	340.5±55.3 ^{bc}	331.0±45.1 ^{ab}	908.3±129.04 ^a
5th	10984.0±1736.1 ^a	369.1±46.5 ^a	342.7±58.2 ^a	939.9±156.4 ^a
6th	9779.5±1558.8 ^c	326.0±60.3 ^c	323.9±40.2 ^{bc}	844.9±115.0 ^b
sig ¹⁾	***	***	***	***

^{a-d} values with different superscripts in the same column differ significantly (p<0.001)

Mean±SD

¹⁾Level of significance

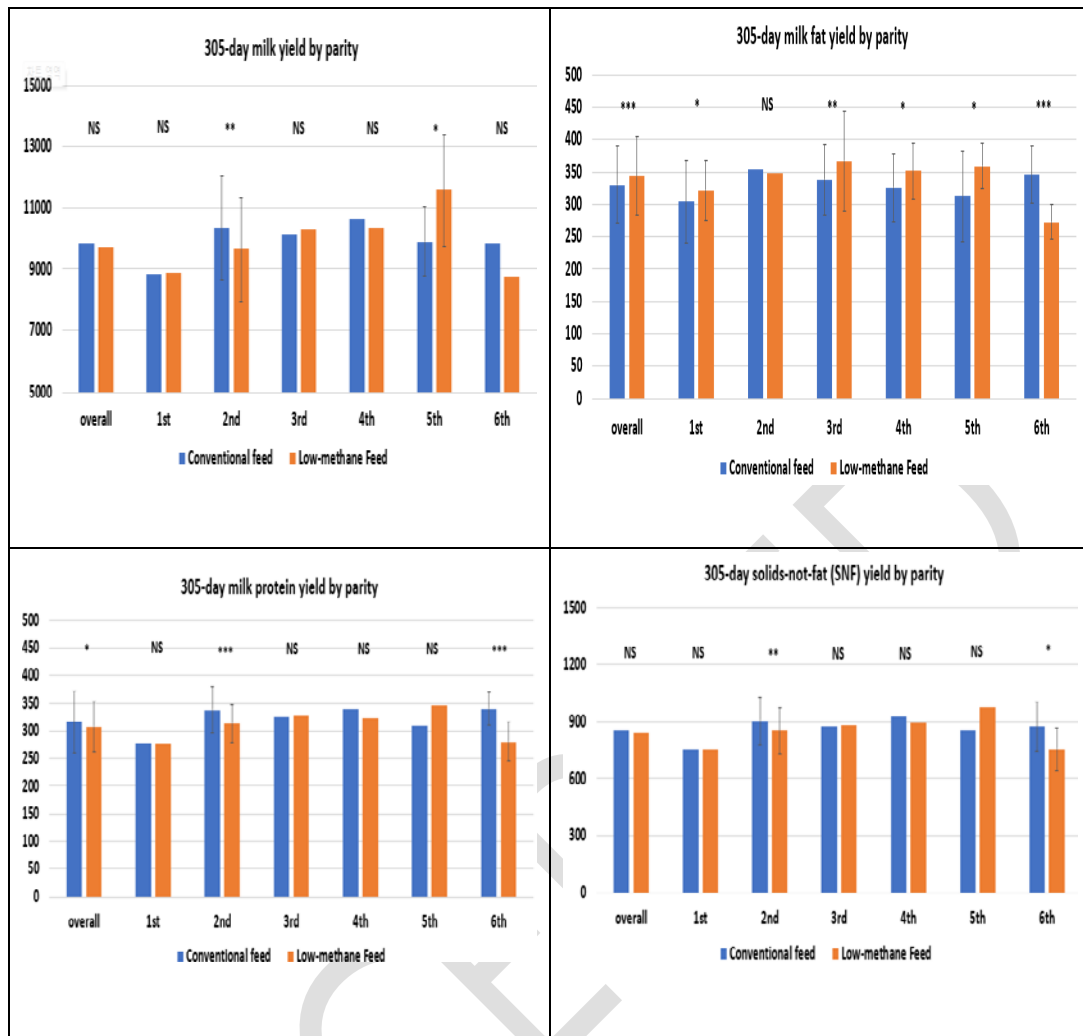


Levels of significance: NS = not significant; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

Figure 1. Changes in Milk Quality Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (Milk Yield, Milk Fat, Milk Protein, SNF, Somatic Cell Count, MUN)

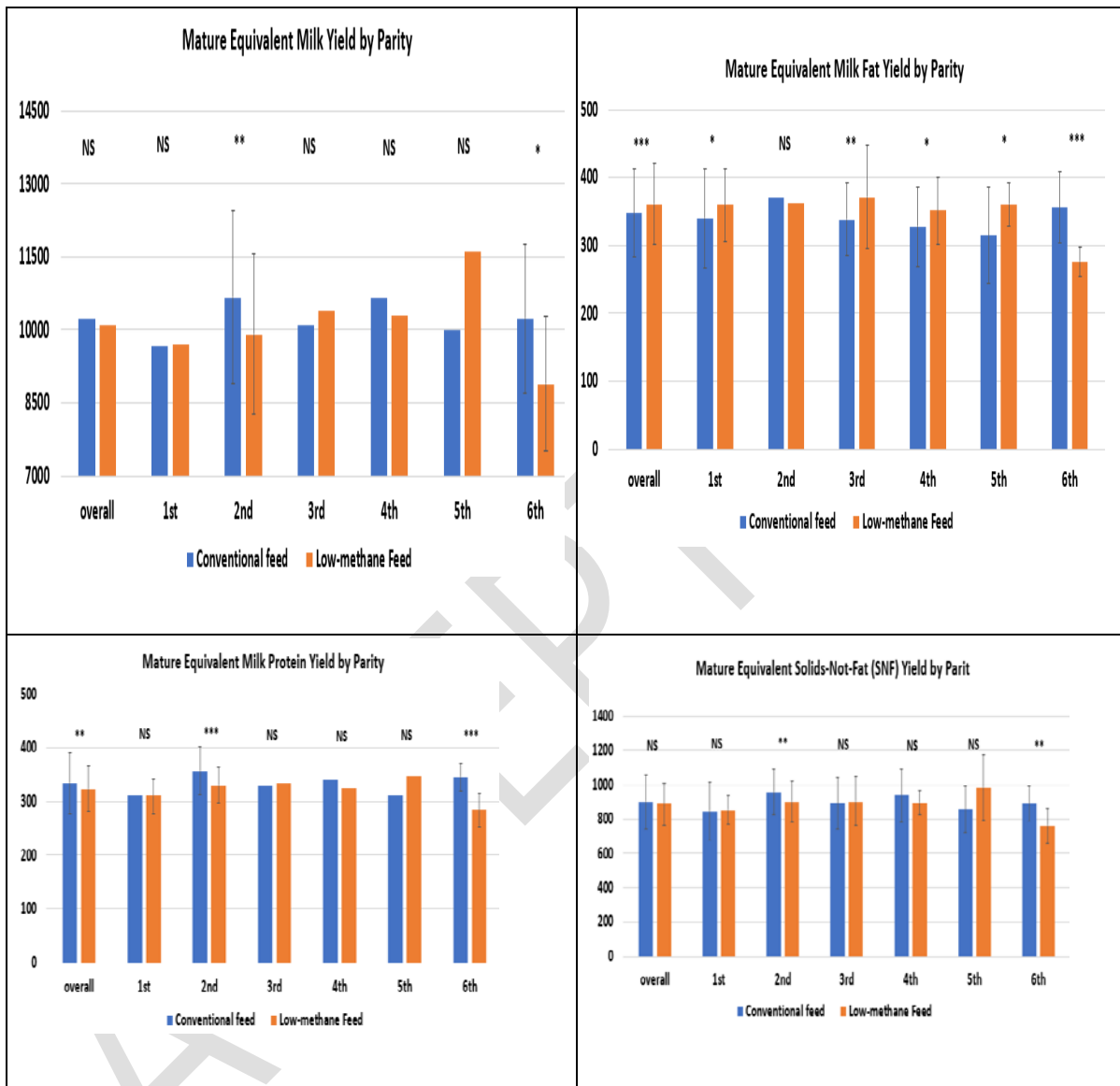
438

439 아래 원본 그래프를 삽입함



Levels of significance: NS = not significant; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

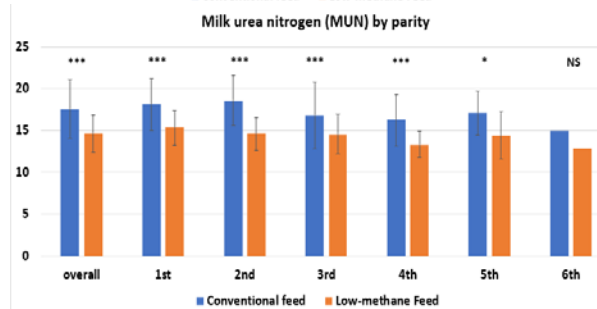
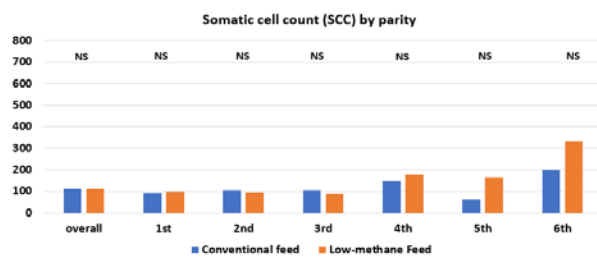
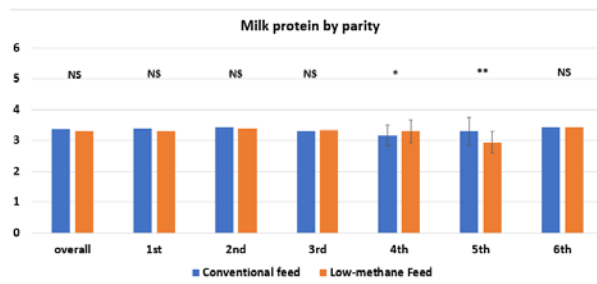
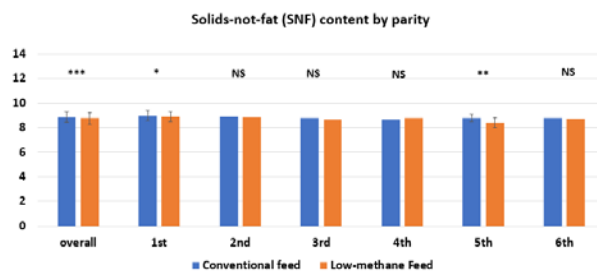
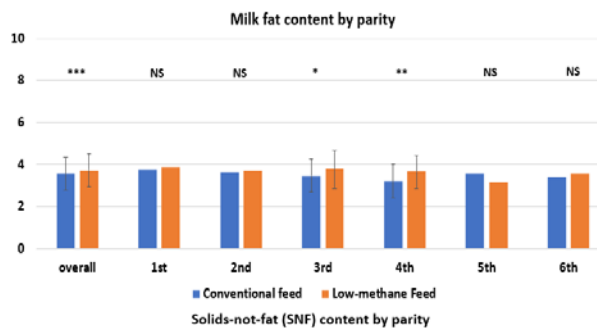
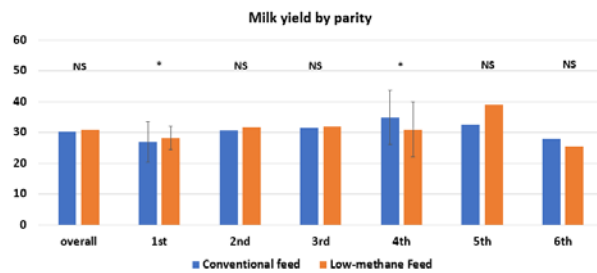
Figure 2. Changes in Milk Productivity Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (305-Day Milk Yield, Milk Fat Yield, Protein Yield, SNF Yield)



Levels of significance: NS = not significant; * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$

Figure 3. Comparison of Mature Equivalent Milk Productivity Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (Milk Yield, Fat Yield, Protein Yield, SNF Yield)

아래 큰 그래프로 삽입함



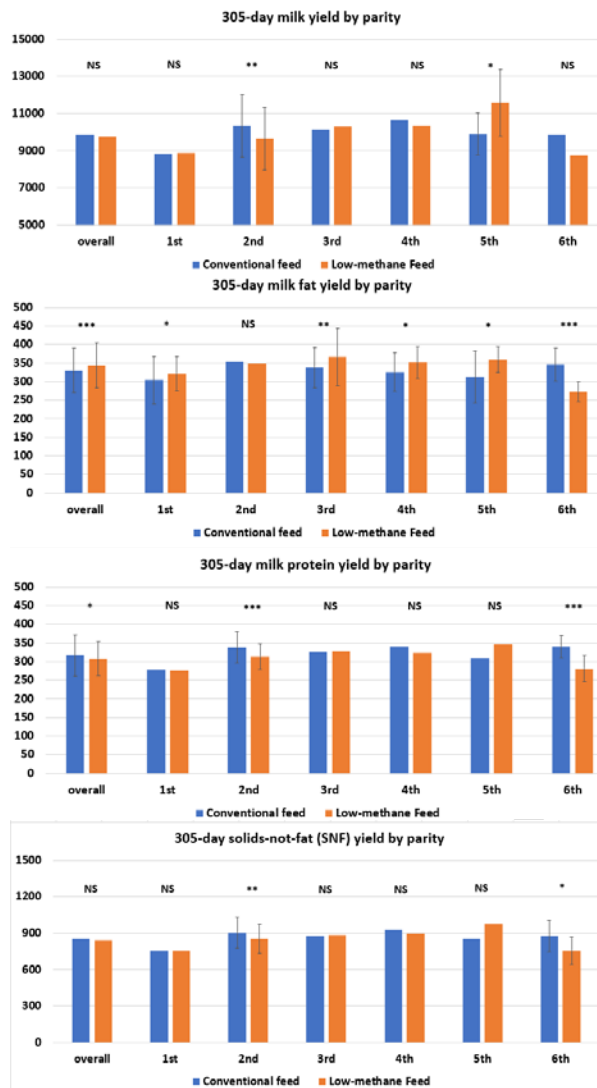
Levels of significance: NS = not significant; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

Figure 1. Changes in Milk Quality Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (Milk Yield, Milk Fat, Milk Protein, SNF, Somatic Cell Count, MUN)

448

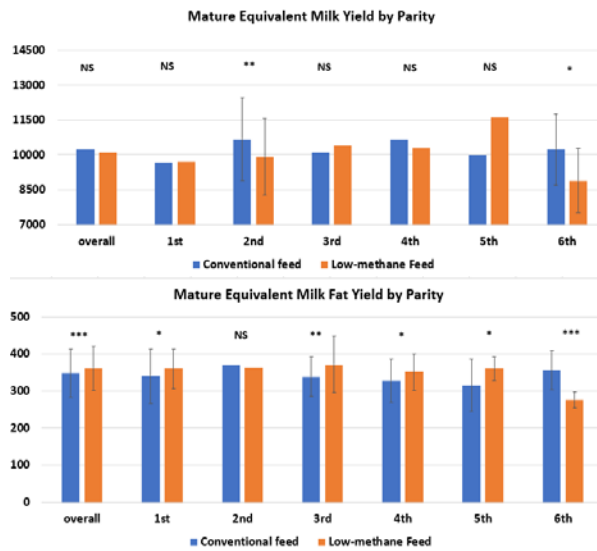
449

ACCEPTED



Levels of significance: NS = not significant; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

Figure 2. Changes in Milk Productivity Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (305-Day Milk Yield, Milk Fat Yield, Protein Yield, SNF Yield)



Levels of significance: NS = not significant; * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$

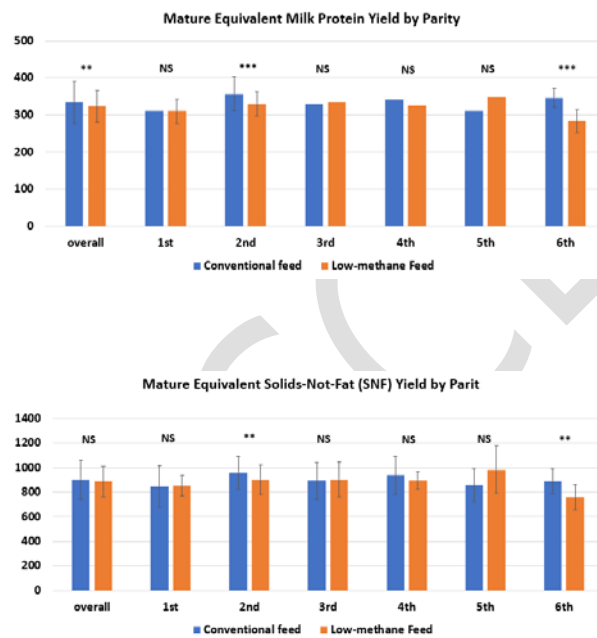


Figure 3. Comparison of Mature Equivalent Milk Productivity Before and After Low-Methane Feed Supplementation by Parity (Milk Yield, Fat Yield, Protein Yield, SNF Yield)