

발간등록번호

11-1543000-003725-01

# 환경부담 저감 사료 개발·보급을 위한 정책 방안 연구 최종보고서

2021. 11. 19.

수행기관 / 서울대학교

농림축산식품자료실



0005671

농림축산식품부

# 〈환경부담 저감 사료 개발·보급을 위한 정책 방안 연구 용역과제 최종 보고서〉

연구 책임자	서울대학교	백명기 교수
참여 연구원	서울대학교	김유용 교수, 김경훈 교수, 김현진 박사
	건국대학교	김법균 교수
	경북대학교	공창수 교수
	카길애그리퓨리나	오준표 박사, 주원석 박사

제출일 : 2021. 11. 19.

# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “환경부담 저감 사료 개발·보급을 위한 정책 방안 연구”(연구기간 : 2021.05.27. ~ 2021.11.22.) 연구용역의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 11. 19.

연구 책임자	서울대학교	백명기 교수
참여 연구원	서울대학교	김유용 교수, 김경훈 교수, 김현진 박사
	건국대학교	김법균 교수
	경북대학교	공창수 교수
	카길애그리퓨리나	오준표 박사, 주원석 박사

연구책임자 : 백명기



(인)

소속기관장 : 서울대학교 산학협력단장



# 요약문

## 1. 축산 분야 온실가스 감축을 위한 저메탄 사료 개발·보급 방안

### 1) 온실가스 감축을 위한 저메탄 사료 개발·보급의 목적 및 필요성

- 정부의 탄소중립(Net-Zero) 목표설정에 따라 축산분야 온실가스 감축을 통한 환경 친화형 축산업으로의 구조개선 필요
- 축산분야 온실가스 감축을 위해 장내 발효 환경을 개선할 수 있는 저메탄 사료 개발·보급이 필요

### 2) 저메탄 사료 개발 및 보급 관련 선행연구 조사 및 분석

- 국외 연구를 통해서 아래와 같은 반추가축 장내 발효 메탄 저감 물질들이 제안됨
  - 3-NOP, nitrate, 캐슈넛 추출물, 탄닌, 해조류 추출물 등
- 국내에서는 15년 이상 반추가축 메탄 저감 방안 개발 관련 다수의 연구가 수행되었으나 아래와 같은 사유로 가축에 급여하는 생체 실험 (in vivo)에서 메탄 저감 효과에 대한 보고 사례가 거의 없음
  - 메탄 측정 호흡챔버 시스템 미비로 in vitro 위주의 연구가 주를 이룸
  - 연구자 간 통합연구 미비, 메탄 저감제 활용에 대한 로드맵 제시 미비
- 국내 Tier 2 배출계수 산출에 관한 연구가 미미함
- 일본 농림수산성은 2021년도부터 반추동물 메탄 저감 연구를 위해 아래와 같은 “Moonshot” R&D 프로그램을 시작함
  - 메탄 저감제 개발 보급연구: 3-NOP, 캐슈넛 추출물, 홍조류 등
  - 저메탄 발생 개체 소 선발 육종 연구
  - 메탄 발생 모니터링을 위한 스마트 필 (smart pill) 개발 및 인공지능과 연계 시스템 연구

### 3) 메탄 저감 사료 확대 및 축산물 소비장려를 위한 사례

- 국내 축산분야에서는 아직 “저탄소 축산물 인증”, “농업 부문 온실가스 감축사업”, “온실가스감축 외부사업”을 통한 탄소배출권 인증 사례가 없음
- 스위스는 ‘Mootral Ruminant’라는 메탄 저감제를 이용하여 세계 최초로 탄소배출권을 인증받음
- 일본, 미국에서는 아직 “저탄소 축산물 인증”, “탄소배출권” 인증 사례가 없음

### 4) 축산분야 온실가스 감축 분야에 대한 농가 및 사료업계 설문 조사 결과

- 저메탄 사료 보급 및 축산분야 온실가스 감축을 위한 정책 방안 수립에 대한 의견
  - 저메탄 사료의 생산성, 기호성, 안전성이 담보되어야 함
  - 저메탄 사료 사용에 의한 비용 증가에 따른 인센티브 제도 필요
  - 메탄 저감 사료에 관한 기술 확립이 중요하고, 기술 개발을 위한 정부 지원이 필요
  - 저메탄 축산물에 대한 소비자의 공감을 얻기 위해서는 국내산 온실가스 저감제의 개발이 필요



○ 소 메탄 발생 감축에 의한 탄소배출권 도입에 대한 의견

- 메탄 배출량과 감축량을 정확히 판별할 수 있는 측정 기술이 공인되어야 하며 국가 차원에서 일원화된 연구를 통해 객관적인 자료를 바탕으로 평가되어야 함
- 메탄 저감 효과가 확실히 있는 검증된 사료 및 첨가제를 이용해야 함
- 공정하고 신뢰성 있는 탄소배출권 거래가 이루어져야 함
- 탄소배출권 인증 농가 확대를 위한 인센티브 제도 필요

5) 메탄 저감 방안 개발 및 보급 확산을 위한 연구 및 정책 제안

○ 메탄 저감 효과 검증을 위한 메탄 측정 시스템 구축 지원

- 메탄 측정 호흡챔버 시설 구축 지원
- 신속 간편 메탄 측정 시스템 확립 지원
- 메탄 측정 장치 보유 기관의 산학연 컨소시엄 구성 및 실험의 표준화 지원

○ 반추가축 탄소거래 인증 확보 방안 연구

- 탄소배출권 인증을 위한 메탄 저감제 후보 물질에 대한 국내 실증 연구
- 국내 및 국제기구 탄소거래 인증 확보 지원
- IPCC Tier 2 방법에 의한 한우 국가 고유 메탄 배출계수 개발
  - Tier 2 배출계수를 이용시 메탄 저감제 급여 없이도 15% 메탄 감축이 가능함
- 저메탄 발생 한우의 특성 규명 및 저메탄 발생 소 선발 연구

○ '저탄소 농장 인증' 제도 도입 지원

- 축산분야는 최종적으로 생산되는 “저탄소 축산물”이 아니라 온실가스 배출을 줄이는 생산단계를 평가하여 “농장을 인증하는 기준”을 마련해야 함

## 2. 적정 단백질 및 적정 중금속 가축 사료 개발·보급 방안

1) 적정 단백질 및 중금속 가축 사료 개발·보급의 목적 및 필요성

- 축산악취 저감을 위한 사료 내 단백질함량 조절 및 급여 프로그램 개선(사육기간 단축 등 포함)을 통한 적정 단백질 공급이 필요
- 가축으로부터 배출되는 질소는 암모니아, 질산염, 아산화질소로 전변되어 환경에 악영향을 미침
- 따라서 가축에게 적절한 사료 단백질을 공급하는 것과 질소 이용률을 높이는 기술은 사료비 절감과 환경오염을 줄인다는 측면에서 필요함
- 광물질 급여 감량을 통한 중금속 배출감소로 토양 및 수질 등의 환경오염 방지가 필요

2) 반추가축 사료 내 적정 단백질 수준 관련 선행연구 조사 및 분석

○ 소 사료 조 단백질 수준

- 우리나라 배합사료의 평균 조단백질 함량은 사육구간에 따라 육우는 평균 12.3~18.4%이며, 젖소는 14.9~18.7%임

- 우리나라의 고기소 생산방식은 품종의 차이, 마블링 중시로 인해 축산선진국의 방식과 매우 달라 외국과 조단백질의 비교가 어려운 점을 고려할 필요가 있음

○ **적정단백질 사료 공급 및 단백질 이용성 증진 연구**

- 소에서 저단백 사료에 반추위 보호 아미노산을 보충하면 질소 이용률이 향상되고, 질소 배설량이 감소함
- 반추위 미분해 단백질 (rumen-undegradable protein: RUP) 공급으로 질소 이용률이 높아지고 질소 배설량이 감소함

○ **조단백질 감축에 따른 질소 배출량 감소 효과**

- 외국 육우 연구에서 사료 단백질 1% 저감시 총질소 배출량이 평균 6.4% 감소
- 외국 착유우 연구에서 사료 단백질 1% 저감시 질소 배출량은 8.3%, 액상 분뇨에서의 아산화질소 배출량은 16.7% 감소
- 외국의 축우 연구 메타 분석 결과, 사료 내 조단백질 함량 1% 감소에 따라 암모니아 배출은 평균 17.3% 감소

○ **농림축산식품부는 적정 단백질 사료 보급·확대를 위해 2021년에 고기소와 젖소의 배합사료 및 섬유질배합사료의 조단백질 상한치를 설정함**

**3) 양돈 사료 내 적정단백질 및 중금속 수준 관련 선행연구 조사 및 분석**

- 조단백질 함량을 줄이고 부족한 아미노산을 보충한 저단백 사료를 급여하였을 때 일당 증체량 및 사료효율은 사료 내 단백질 수준의 영향을 크게 받지 않았지만, 분뇨를 통한 질소 배출 및 암모니아 발생량은 많이 감소함
- 농림축산식품부는 양돈 사료에서 기존에 설정된 조단백질 상한치를 최대 3%까지 하향 조정하는 개정안을 2021년에 고시함
- 이유자돈 사료 내 고농도의 아연을 첨가할 경우, 분뇨로 배출되는 아연의 양이 증가하여 환경에 부정적인 영향을 끼칠 수 있으므로 이를 방지하기 위한 아연 적정수준 확립 및 아연 대체물질의 사용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 구리는 돼지에서 40% 내지 93%가 분뇨로 배출되고, 체내 축적률은 5~40% 정도로 낮으므로, 구리의 배출에 의한 환경오염을 방지하기 위해 구리의 생체이용률을 높이는 연구가 진행되고 있음
- 돼지의 분을 통한 인의 배설은 부영양화와 같은 환경오염의 원인이 될 수 있으므로, 양돈 사료 내 인 분해 효소제의 첨가를 통한 인의 소화율 향상이 양돈산업에서 널리 사용되고 있음

**4) 가금 사료 내 적정단백질 및 중금속 수준 관련 선행연구 조사 및 분석**

- 가금 사료 내 조단백질 함량을 줄이고 부족한 아미노산을 보충한 사료를 급여하였을 때 증체량 및 사료효율은 일정한 수준까지는 사료 내 단백질 수준의 영향을 크게 받지 않았지만, 분뇨를 통한 질소 배출 및 깔짚 내 질소 함량은 감소함
- 농림축산식품부는 가금 사료의 적정단백질 보급 확대를 위하여 유통사료 수준을 고려하여 생산성에 영향을 미치지 않는 범위에서 조단백질 상한선을 2021년에 설정함.
- 가금은 소화기관의 특성상 분뇨의 인 함량이 타 축종보다 높은 편이어서 상대적으로 부영양화와 같

은 환경오염에 더 영향을 줄 수 있으므로, 가금 사료 내 인분해효소제의 첨가를 통한 인의 이용률을 높이는 방법이 가금 산업에서 주로 사용되고 있음

#### 5) 적정 단백질 사료/적정광물질 사료 분야에 대한 농가 및 사료업계 설문 조사

- 생산성 하락, 번식 장애, 질병 발병률 증가 등에 문제가 없는 수준에서 사료 단백질 및 중금속 감축 정책이 추진되어야 함
- 성장단계별 적정단백질 수준 및 중금속 수준 결정, 이용효율 증진, 유전적 개량 등의 다양한 방안에 관한 연구 지원이 필요

#### 6) 적정 단백질 사료 개발 및 보급 확산을 위한 연구 및 정책 제안

##### (1) 반추 가축

###### ○ 한우 사육기간 단축을 통한 질소 배출 및 온실가스감축 기술 개발 연구

- 거세 한우 사육기간을 10% 이상 단축하는 방안 연구
- 반추위 미분해 단백질 급여를 통한 사료 단백질 이용성 향상 및 사육기간 단축 연구
- 메탄 저감 효과와 사육 기간 단축 효과가 있는 첨가제 개발 연구: 지방 첨가 효과 연구 등

###### ○ 질소 배설 및 아산화질소 감축을 위한 사료 단백질 이용성 향상 기술 개발

- 반추 가축에서 반추위 미분해 단백질 급여를 통한 사료 단백질 이용성 향상 연구
- 가축 사료 내 합성아미노산 첨가를 통한 단백질 이용성 향상 연구

##### (2) 양돈

- IPCC (1996)의 양돈 가축 분뇨처리 배출량 산정 공식 정확도 검증 및 개발

##### (3) 가금

- 육계 및 산란계의 성장 및 생산단계별 사료 내 적정단백질 수준 및 아미노산 수준 설정 연구
- 육계 및 산란계 성장단계별 주요 원료사료의 단백질 및 아미노산 이용성 측정에 관한 연구
- 가금 사료 내 칼슘/인 이용성의 정확한 측정 방법 연구
- 가금 사료 내 이용성을 바탕으로 하는 칼슘/인 요구량 설정 연구

# 〈 목 차 〉

## 요약문

<b>I. 저메탄 사료 개발 및 보급 관련 선행연구 조사 및 분석</b> .....	<b>1</b>
1. 저메탄 사료에 대한 개념 및 사례 .....	1
2. IPCC 2006 Guideline (2006 GL) Tier 2 배출계수 개발의 중요성 .....	2
3. 국내·외 저메탄사료 개발 및 보급 관련 선행연구 조사 및 분석 .....	4
4. 저메탄 사료 급여효과 측정 방법에 관한 선행연구 조사 및 분석 .....	18
5. 국내·외 온실가스 감축 목표 및 연구 개발과 정책 사례 조사 .....	20
<b>II. 가축 사료 내 적정 단백질 수준 관련 선행연구 조사 및 분석</b> .....	<b>26</b>
1. 반추동물 .....	26
2. 양돈 .....	37
3. 가금 .....	44
4. 사료 내 단백질량 제한에 관한 제도(규제) 조사 및 비교분석 .....	49
<b>III. 가축 사료 내 적정 중금속 수준 관련 선행연구 조사 및 분석</b> .....	<b>58</b>
1. 양돈에서의 아연 저감 사료 .....	58
2. 양돈에서의 구리 저감 사료 .....	64
3. 양돈에서의 인 저감 사료 .....	69
4. 가금에서의 인 저감 사료 .....	77
5. 사료 내 중금속 제한에 관한 제도(규제) 조사 및 비교분석 .....	81
<b>IV. 선진국의 환경부담 저감 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례</b> ...	<b>84</b>
1. 온실가스감축과 저메탄 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례 .....	84
2. 적정 단백질 및 적정 중금속 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례 .....	85
<b>V. 환경부담 저감 사료 보급·확대에 대한 설문 조사</b> .....	<b>86</b>
1. 설문 조사 목적 .....	86
2. 설문 조사 설계 .....	86
3. 설문 조사 결과 .....	86
4. 설문 조사 결과 요약 .....	101
<b>VI. 정책과제 결과 홍보</b> .....	<b>103</b>
<b>VII. 환경부담 저감 사료 개발·보급을 위한 정책 제안</b> .....	<b>104</b>
1. 메탄 저감 사료 개발 및 보급 확산을 위한 연구 개발 및 정책 제안 .....	104
2. 가축 사료 내 적정단백질 수준 결정 및 질소 배설 저감 관련 정책 제안 .....	109
3. 가축 사료 내 적정 중금속 수준 결정 및 중금속 배설 저감 관련 정책 제안 .....	111
4. 환경부담 저감 사료의 보급 활성화 계획 요약 .....	112
<b>VIII. 참고문헌</b> .....	<b>114</b>

# I. 저메탄 사료 개발 및 보급 관련 선행연구 조사 및 분석

## 1. 저메탄 사료에 대한 개념 및 사례

### □ 저메탄 사료에 대한 개념

- **저메탄 사료**와 같은 의미의 단어를 사용한 해외 사례로는 “Low-emission animal feed”가 있고, 메탄 저감 관점에서의 사료 급여체계를 포함하는 광의의 의미로 사용
  - ※ Low-emission animal feed 개발 프로젝트 : EU 3개 국가(네덜란드, 덴마크, 스페인), 9개 회사, 3개 연구소 참여하여 4년간 수행됨(2011~2015)
- “저메탄 사료”는 메탄을 줄일 수 있는 메탄 저감제가 들어간 사료와 사료 급여체계까지도 포함하는 광의의 정의로서, 축산현장의 온실가스 감축 사업에 적용할 수 있는 감축 기술, 그리고 그 감축 기술이 투입된 사료가 되어야 함
  - ※ 제 3차 대한민국 국가보고서: 반추가축 장내 발효에 의한 메탄을 감축하기 위해서 ① 양질조사료 급여 확대(사료 급여체계) ② 반추위 발효조정제(메탄 저감제) 첨가 사료 급여를 추진한다고 기술
- 현재까지 국내에서는 장내 발효 메탄 저감이 가능한 사료(메탄 저감제 첨가 사료 포함) 또는 급여 시스템에 대한 호흡챔버 이용 현장 실증 비교 연구가 거의 없어서 “농업농촌 자발적 온실가스감축 사업” 등록 사례도 없음

### □ 2006 IPCC Guideline (2006 GL)에서 제시된 저메탄 사료

- 고 소화율 사료(농후사료 비율이 높은 사료 포함)가 포함됨
  - 낮은 Ym 값(메탄전변율: 총섭취에너지 대비 메탄으로 배출된 에너지 비율(%))을 적용
    - 농후사료 90% 이상의 사료로 섭취하는 소 ( $3.0 \pm 1.0\%$ )
    - 착유우, 부산물사료 또는 방목 위주의 소 ( $6.5 \pm 1.0\%$ )
- 사료의 Ym 값은 Tier 2 방법으로 결정되는 메탄배출계수(Emission factor: EF)를 상대적으로 적게 함
  - 해당 국가의 최종 장내 발효 메탄 배출량 산정값이 낮아짐

### □ 탄소거래 인증 저메탄 사료 외국 사례

- Mootral 사(스위스)에서 개발된 메탄 감축 방법이 세계 최초
  - 메탄저감제(Mootral Ruminant ; 마늘분말과 감귤추출액) 급여에 의한 장내 발효 메탄감축량 탄소 Credit (Mootral's Cow Credits)
  - ‘무트랄’사의 탄소배출권(Carbon credits)은 국제항공 탄소상쇄·감축제도(CORSIA) 등 세계적인 탄소 삭감제도 일부로 사용할 수 있도록 인증을 받음 (2021.6.16. 한우신문). 이에 따라 전 세계 기업이 소 탄소배출권(Cow Credits)을 구매해 배출량을 상쇄시킬 수 있을 것으로 보임.
  - 무트랄 루미난트(Mootral Ruminant)는 영국 소 농장에서 사용 중이며, 탄소배출권 매도로 사료 첨가제 비용 일부를 상쇄, 향후 탄소배출권 가격이 상승하면 무료로 사료 첨가제 이용이 가능함.
    - ※ 영국 런던 ICE 선물거래소 탄소배출권 톤당 가격은 작년 말 30유로 초반에서 지난 2021년 5월 4일 48.61유로(약 6만6000원)로 5할 정도 상승함.
- Mootral Ruminant의 탄소 Credit 인증 기관
  - 미국의 대표적 민간 탄소배출권 인증 및 발행 기관 VERRA (Verified Carbon Standard)
  - VERRA가 천연물 첨가제 사용 장내 발효 메탄 감축 방법론 개발(VCS methodology, VM0041)

- Mootral Ruminant의 탄소 Credit 구매
  - UN 산하의 국제민간항공기구(ICAO)에서 추진하고 2021년 시행하게 된 국제항공 탄소상쇄·감축제도 (CORSIA; Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)에서 구매

□ **저메탄 사료의 효과 및 지속성**

- 지금까지 전 세계적으로 가장 많은 in vivo 효과 실험이 이루어진 3-NOP (3-nitrooxypropanol)의 경우, 축종에 따라서 차이가 있지만 대조구 대비 평균 20~30%의 메탄 저감 효과를 보임. 가장 긴 실험 기간이 6개월이기 때문에 그 이상의 지속성은 실험적으로 증명된 사례가 없음
- Mootral Ruminant 제품이 세계 최초로 탄소거래 인증된 저메탄 사료이지만, Mootral사는 축종과 품종에 따라서 차이가 큰 저감률(홀스타인 24% 저감, 저지종 38%, 그 외 품종 25%) 때문에, 보다 명확한 감축 효과를 증명하기 위해서 더 많은 실험을 계획

□ **국내 독자적인 저메탄 사료 개발 가능성**

- 저메탄 사료의 감축 효과를 측정하기 위한 연구 인프라가 매우 열악하여, 메탄 저감제 또는 사료 급여체계를 포함하는 저메탄 사료의 국내 연구 개발 및 저감효과 검증은 많은 시간이 소요 예상
- 더욱이, 농림부 정책사업인 “자발적 온실가스감축사업”에 활용되고 국제 탄소거래 인증 기술 사례가 나오기까지는 지속적인 연구 필요
- 따라서 장내 발효 메탄 저감 분야에서 더 빨리 감축 성과를 달성하기 위해서는 외국에서 in vivo 감축 효과가 반복 증명된 저감제를 도입하여 이용하는 방안을 마련할 필요가 있음
- 장기적으로는 국내 독자적인 메탄 저감제 개발이 필요

## 2. IPCC 2006 Guideline (2006 GL) Tier 2 배출계수 개발의 중요성

- IPCC 2006 Guideline (2006 GL)에서는 국가 단위 장내 발효 메탄 발생량 산정을 위한 국제적 기준으로 2가지 방법(Tier 1과 Tier 2)을 제시하고 있음
  - 우리나라도 국가 인벤토리 구축과 배출계수 개발 그리고 온실가스 배출량 산정을 2006 GL에 기초해서 보고하고 있음
- Tier 1 방법 : 현재 우리나라에서 장내 발효 메탄 배출량 산정에 사용(GIR, 2012)
  - 각 축종별(젖소, 비육우, 염소 등) 총 두수 × 해당 배출계수(emission factor, EF; 메탄 kg/두/년)
  - 우리나라는 해당 축종별 국가 고유 배출계수 개발이 안 되어서 2006 GL 제공값(default value)를 사용 (젖소 118, 한우 47, 돼지 1.5, 면양 8, 흑염소 8)
  - ⇒ 따라서 고 소화율의 국내 가축 사료의 메탄 저감 효과가 현재 Tier 1 방법을 이용한 국가보고서에는 반영되지 못하고 있음
- Tier 2 방법 : 2017년까지 Annex 1 국가를 포함한 총 62개 국가가 사용하여 국가보고서 작성 (표 1-1)

표 1-1. 축종별, 온실가스 배출원별 Tier 2 방법 적용 사례(국가 수)(Wilkes 등, 2018)

	장내 발효	분뇨 관리 (CH4)	분뇨 관리 (N2O)	목초지 저장 (N2O)
소	62	57	22	11
돼지	32	18	17	9
양	18	33	18	-

- 우리나라는 관계기관 합동의 국가 온실가스 배출계수 개발 계획(온실가스종합정보센터, 2014)에서 Tier 2 방법 사용을 목표로 하고 있고, 곧 실행될 것으로 기대
- Tier 2 방법은 우리나라와 같이 “고 소화율 사료”를 이용하는 국가의 장내발효 메탄 배출량 산정량이 상대적으로 낮아지도록 하고 있음
  - ① 가소화에너지(digestible energy, DE) 함량이 높은 사료는 상대적으로 적은 양의 총 에너지(Gross energy; GE)를 섭취
  - ② 고소화율 사료의 GE는 반추위에서 메탄 에너지로 전환되는 비율(메탄 전환율, Ym)이 저 소화율 사료와 비교하여 상대적으로 낮음
  - ③ 결과적으로, Tier 2 방법으로 개발된 각 축종의 세분류별(연령 또는 성별) 국가 고유 메탄 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하면 우리나라의 경우, Tier 1 방법보다 메탄 배출량이 감소할 것으로 기대

○ Tier 2 방법 이용을 위한 국가 고유 장내 발효 배출계수 등록 현황(표 1-2, 표 1-3)

**표 1-2. 한우 장내 발효 국가 고유 배출계수 3건 등록 (2018년)**

현행(Tier 1)	등록 배출계수 (Tier 2)
한·육우 : 47kg/head/yr	- 한우 수컷(거세우) 1세 미만 : 43 kg/head/yr - 한우 수컷(거세우) 1세 이상 : 61 kg/head/yr - 한우 암컷 1세 미만 : 45 kg/head/yr

† 미 개발 배출계수 : 한우 암컷 1세~2세, 한우 암컷 2세 이상

**표 1-3. 젖소 장내 발효 국가 고유 배출계수 3건 등록 (2020년)**

현행(Tier 1)	등록 배출계수 (Tier 2)
젖소 : 118 kg/head/yr	- 젖소 1세 미만 : 33 kg/head/yr - 젖소 1세~2세 : 83 kg/head/yr - 젖소 2세 이상 : 139 kg/head/yr

† 문헌 : Sustainability 2021.

○ Tier 2 방법 (등록된 우리 고유의 젖소 배출계수를 이용)과 Tier 1 방법 (2006 GL)의 우리나라 젖소 장내 발효 메탄 배출량 산정 비교 (표 1-4)

**※ 2006년 기준(52 천 톤)과 비교하면 약 15% 감축 효과 → Tier 2 방법 적용 시기를 앞당겨야 함**

**표 1-4. Tier 1 방법 (2006 GL)의 우리나라 젖소 장내 발효 메탄 배출량 산정 비교**

구분	배출계수 (kg 메탄/마리/년)	2019년 배출량 (천 톤 메탄)
IPCC*지침 (Tier1)	1996**	48
	<b>2006***</b>	<b>52</b>
	2019	56
국내 개발 값 (Tier2)	139(암소, 2세 이상)	<b>44</b>
	83(암소, 1~2세)	
	33(암소, 1세 미만)	

\* IPCC: 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change)

\*\* 현재 온실가스 배출량 산정 기준      \*\*\* 2023년 적용(예정) 온실가스 배출량 산정 기준

### 3. 국내·외 저메탄사료 개발 및 보급 관련 선행연구 조사 및 분석

#### 1) 반추가축 장내 발효 메탄 저감 방안 개요

○ 반추가축 장내 발효에 의해 발생하는 메탄 저감 방안 개요: 그림 1-1

- 수소 발생 감소: 양질의 (조)사료 급여 등
- 이산화탄소 감소: 유기물 감소를 위한 저단백사료, 소화이용율 개선-효소제, 생균제 등
- 수소와 이산화탄소 결합 방해: Acetogen, nitrate 등
- 메탄생성과정 (methanogenesis) 방해: 3-NOP, 해조류 등
- 메탄생성균 (methanogens) 억제: 유익균 우점-생균제
- 사료효율/생산성 증진, 정밀사양, 저메탄 발생 가축 육종, 동물 건강 증진, life time 생산성 증진

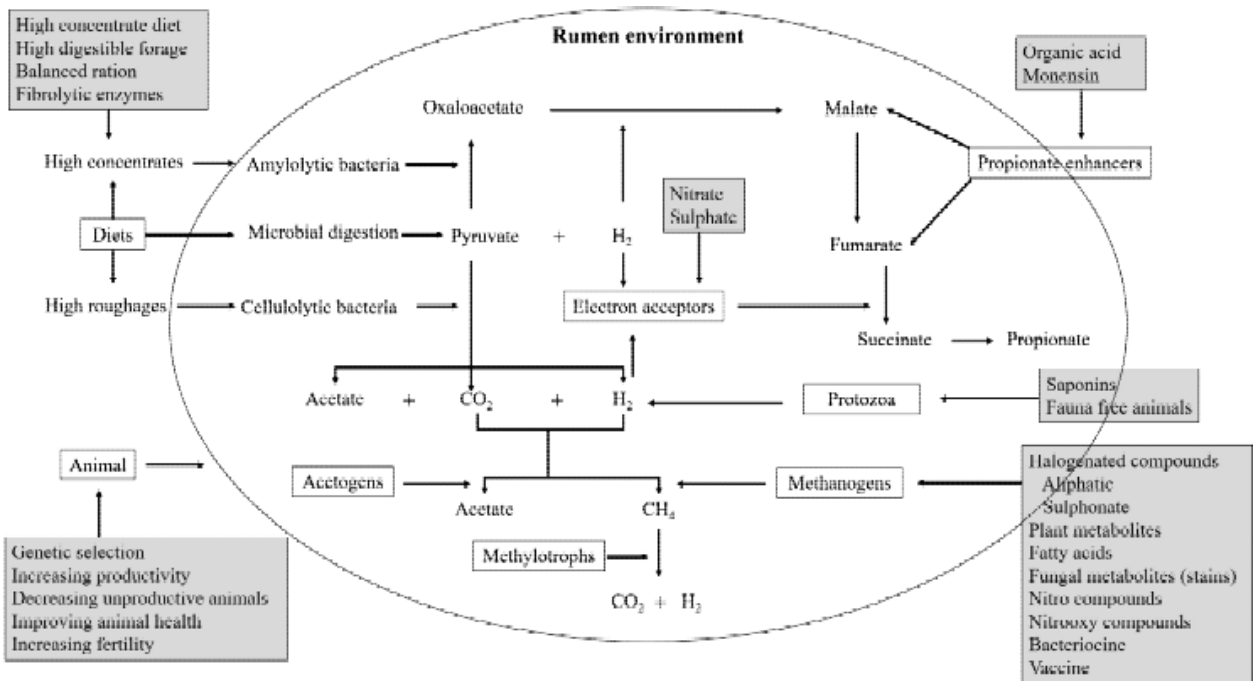


그림 1-1. 반추가축 메탄 저감 방안 개요: Patra, 2016

#### □ 메탄 저감 방안 종류

○ 고 농후사료

- 농후사료는 일반적으로 적은 세포벽과 설탕, 녹말 같은 속효성 발효 탄수화물로 이루어져 있음. 적은 세포벽과 쉽게 발효되는 탄수화물은 반추위 내 pH를 떨어뜨리고 amylolytic bacteria 군집을 키워 프로피온산 생성과 메탄감소를 유발함(van Kessel&Russell, 1996).
- 또한 농후사료는 사료 섭취량을 증가시켜 반추위 내 사료 전환율과 발효속도를 증가시켜 반추위 환경과 미생물 군집을 변화시킴(Martin 등, 2010).
- 속효성 발효 탄수화물은 반추위 내 alternative H2 sink를 생성하여 프로피온산 생성을 증가시키고 (Murphy 등, 1982), 반추위 pH를 낮춰 protozoa의 수를 감소시키고 methanogen의 성장을 방해할뿐더러 protozoa와 methanogen 간 H2 이동을 방해함(Finlay 등, 1994).



- 농후사료를 35%, 60% 급여한 상황에서는 메탄 저감이 이루어지지 않았지만 80%, 90% 급여한 상황에서는 메탄 생성이 감소함(Lovett 등, 2003).

#### ○ 유기산

- 탄수화물 분해 과정의 중간 대사산물인 유기산은 반추위 내 메탄 생성을 감소시킨다고 알려져 있음.
- 유기산은 alternative H<sub>2</sub> sink로 작용하여 프로피온산 생성을 촉진하여 메탄 생성을 감소시킴(Castillo 등, 2004).
- Fumarate와 acrylate (McAllister & Newbold, 2008), malic acid (Foley 등, 2009) 등의 유기산 처리에 의해 메탄 생성이 감소함.

#### ○ 식물 2차 대사산물

- 탄닌
  - 탄닌은 직접적으로 methanogen 성장을 억제하고, 아울러 섬유질 소화를 저해하고 protozoa 개체 수를 감소시켜 수소 발생을 억제해 간접적으로도 메탄 생성을 억제한다고 알려져 있음(Patra & Saxena, 2010).
  - 탄닌을 포함하는 식물들을 급여하였을 때 57% (Puchala 등, 2005), 13% (Carulla 등, 2005), 24% (Tiemann 등, 2008)의 메탄감소 효과를 보였음.
- 사포닌
  - 사포닌은 여러 식물에서 생성되는 surface-active glycoside임(Tamminga 등, 2007; Patra & Saxena, 2009).
  - 사포닌은 protozoa 세포막에 complex sterol을 형성하여 항 protozoa 작용으로 (Goel & Makkar, 2012) protozoa 의존 methanogen의 활성이 감소하여 메탄 발생이 감소함.

#### ○ 할로겐 화합물

- 해조류, 미세조류, 곰팡이 등에 bromoform 같은 할로겐 화합물이 포함되어 있음 (Burreson 등, 1976). 홍조류를 이용한 In vitro 실험에서 메탄이 99% 감소한 결과가 있음 (Machado 등, 2014).

#### ○ 지질

- 사료 내 지질함량을 높일 경우 protozoa 성장 억제, 프로피온산 생산 증가, 불포화 지방산의 수소화 작용으로 인해 메탄 생성을 억제한다고 알려져 있음(Johnson & Johnson, 1995).
- 불포화지방산의 수소화 과정은 수소이온을 끌어들이어 이산화탄소를 제거하는 메탄 생성 과정을 대체함으로써 메탄 생성을 감소시킴(Johnson & Johnson, 1995).
- 또한 지방산은 methanogen의 세포막에 결합하여 막수송을 방해함으로써 직접적으로 methanogen을 억제한다고 알려져 있음(Dohme 등, 2001).
- Myristic acid의 경우 저 농후사료와 고 농후사료 섭취군에서 각각 22%, 58%의 메탄 저감을 보였음 (Machmüller 등, 2003).
- 식물성 지질은 보통 많은 중쇄지방산을 포함하는데 (McGinn 등, 2004; Soliva 등, 2004) 코코넛 오일 (Jordan 등, 2006), 해바라기씨 오일 (McGinn 등, 2004; Beauchemin 등, 2007), 아마씨 오일 (Martin 등, 2008), 팜 오일 (Dohme 등, 2000) 등이 메탄을 줄인 결과가 있음.

#### ○ Nitrate

- 질산염은 직접적으로 methanogen을 방해하고 electron sink로 작용하여 메탄 생성을 억제함 (Patra 등, 2013; Patra 등, 2015).
- 질산염은 메탄 생성을 억제함과 동시에 반추위 미생물에 암모니아를 제공하여 단백질을 보충하는 효과를 가짐. 하지만 질산염은 아질산염 중독을 일으킬 가능성을 가짐.

- Nitrooxy compounds
  - 3-NOP(nitrooxypropanol) 또는 ethyl-3NOP는 지금까지 잘 알려진 메탄 생성 억제 물질임.
  - 3-NOP는 methanogen의 메탄 생성성 마지막 과정에 필요한 methyl-coenzyme M reductase를 방해하여 메탄 생성을 억제하고 methanogen의 성장을 방해함 (Duval 등, 2012; Martínez-Fernández 등, 2014).
  - 3-NOP를 이용한 실험에서 메탄 생성이 7~10% (Reynolds 등, 2014), 60% (Haisan 등, 2014), 30% (Hristov 등, 2015) 감소했다는 연구 결과가 있음.
- 백신
  - 백신은 동물의 면역체계를 활용하여 methanogen에 대한 항체 생성을 자극하여 메탄 생성을 줄이는 방법(Wright 등, 2004). 백신을 활용한 메탄 저감 실험에서 8%의 효과가 있음이 확인됨(Wright 등, 2004). 다른 백신 연구에서는 항혈청에 의해 메탄균이 응집되었음 (Wedlock 등, 2010).

## 2) 국내외 메탄 저감 첨가제 현황

### □ 메탄 저감 첨가제 종류

- 3-NOP (3-nitrooxypropanol), 캐슈넛 부산물, 해조류 추출물, 탄닌 (tannin), 사포닌 (saponin) 등

#### 가. 3-NOP (3-nitrooxypropanol)

- 특성: 메틸 코엔자임 M의 구조적 유사체(structural analog)임
- 메탄 발생 저감 기전: 메탄 생성 관여 효소 methylcoenzyme M reductase(MCR)의 억제 물질.
- 메탄 저감 효과
  - 11개 논문 메타 분석 결과 (Dijkstra 등, 2018) - 젓소 39% 저감, 육우 22% 저감
  - 4000두 이상의 비육우를 이용한 실험 (Melgar 등, 2020): 26% 저감, 증체효과 없음, 섭취량 감소 경향
- 우리나라의 주요 축종인 한우에서 메탄 저감 효과 및 생산성에 미치는 영향에 관한 연구는 없는 실정이라서 연구가 필요함
- 3-NOP의 동물 생산성에 미치는 영향
  - 젓소: 유성분 중 유지방율이 0.32 unit 증가 (한국반추위미생물연구회 제 3회 국제 Webinar, 2021.9; 미국 Hristov 교수 발표 자료, Penn State Univ)
  - 육우: 사료효율 증진 경향, 섭취량 저하에 의한 증체 감소 경향 등의 제한적인 연구 결과가 있음.
- 3-NOP가 동물건강에 미치는 영향
  - 반추위에 들어갔을 때 효과가 즉시 나타나고, 반추위 내 분해 속도가 빠름 (Hristov와 Melgar, 2020)
  - 미국, 영국 등에서 현재까지는 동물 건강에 특별한 부작용이 보고된 바는 없음
- DSM 회사 최소 급여 권장량: 3-NOP, 60 mg/kg DM feed; Bovaer-10, 600 mg/kg DM feed
- 국내 취급회사: DSM 한국지사
  - 제품명: Bovaer-10: 3-NOP 10% 함유
- 글로벌 사용등록 현황
  - **브라질: 등록 완료**
  - 유럽 가등록 완료: 올해 말 등록 예정
  - 미국: FDA 승인이 나지 않아 아직 상용화되어 있지 않음: Drug로 등록 추진 중이라서 시간이 오래 걸릴 것으로 예측
  - 캐나다: 비육우 16,000두 실험 중
  - 일본: 등록 진행 중
- 국내 사용등록 현황 및 승인 절차

- 국내 사료관리법상 사료관리법에 list가 되어 있어야 제품 등록이 쉽고 국내에서 판매 및 사용을 할 수 있는데, 현재 3-NOP는 국내 사료관리법에 list 되어 있지 않음.
- 사료관리법에 신규로 list 하기 위해서는 시간이 많은 시간이 소요될 것으로 예상됨.
- 정부 협조 사항: 농림부와 담당 기관인 축산과학원이 상기 일정을 최대한 줄여 줄 수 있으면 상용화 시기를 앞당길 수 있을 것으로 예상됨

#### 나. 캐슈넛 부산물 (Cashew nut byproduct) : 국내 보급 제품명 '루민업'

##### ○ 나. 캐슈넛 부산물 (Cashew nut byproduct) : 국내 보급 제품명 '루민업'

- 강남콩 모양의 견과류 캐슈 열매 (Cashew nut)의 껍질 추출물 (cashew nut shell liquid: CNSL)로 9종의 알킬페놀류가 주성분임
- 이들 알킬페놀류가 메탄 생성균을 억제하여 메탄 생성을 저감함
  - In vivo 및 in vitro 메탄 저감 효과: 평균 21.6% (8~38%); 주로 젖소 연구, 일부 육우 연구
- 동물 생산성 증진 효과가 있음
  - 젖소 유량 증진, 비육우 증체 효과
- 일본 홋카이도 대학교 고바야시 교수와 Idemitsu Co. Ltd 회사에서 공동개발로 2012년 상업화됨.
  - 제품 형태: 그래놀
  - 국내 시판 중: 제품명 루민업, 퓨오바이더스사 보급
  - 루민업 내 CNSL 함량: 35% 이상

##### ○ 루민업 국내 연구사례

- In vitro 메탄 저감 효과: 0.05% ~ 6.0% 첨가 시 평균 메탄 저감율: 33.4% (서울대-카길 김경훈/백명기 교수 오준표 박사 연구팀 연구 결과)
- 아래에 세부 자료 제시함

#### 다. 해조류 추출물 (algae or seaweeds)

- 해조류 추출물은 bromoform과 다른 종류의 halogenate compounds를 함유하고 있어서 메탄 저감 효과가 있음
- 국내 취급회사: CTC-BIO
  - 알지문 (Algimun): 해조류 (asparagopsis armata) 추출물 6.0% 보조사료 추출제로 등록된 제품
  - 성분: MSP(Marine Sulfated Polysaccharide): 해양 황화다당류
  - 젖소에서 메탄 저감 효과 연구자료가 있음
  - 현재까지는 제한적인 연구 결과로 확실한 메탄 저감 효과가 있는지는 추가적인 연구가 필요함
- 글로벌 연구현황
  - 미국: 상업화되지는 않았고, 연구 수준
  - 일본: 일본산 해조류의 메탄 저감 효과는 없었음

#### 라. 탄닌 또는 탄닌 함유 조사료

- 탄닌 (tannin)의 메탄 발생 저감 기전: 메탄 생성 박테리아 성장 억제
- 탄닌의 메탄 발생 저감 효과
  - Crabgrass (0.5% tannins) 급여 시 염소에서 16% 저감 효과 (Min과 Puchala, 2005)
- 탄닌이 생산성에 미치는 영향
  - 반추위 단백질 분해를 억제하여 단백질 이용성 증진 효과를 보임 (Min 등, 2003)
  - 농축 탄닌(Quebracho 추출물; Min 등, 2015) 및 chestnut tannin (Min 등, 2021) 급여 시 증체 효과
- 탄닌이 동물의 건강에 미치는 영향
  - 탄닌 첨가는 염소와 육우의 간과 신장 등의 necrosis에 영향이 없었음 (미국 민병렬 교수 발표 자료,

Tuskegee Univ., 한국반추위미생물연구회 제 3회 국제 Webinar, 2021.9.17)

- 따라서 탄닌 첨가는 동물 생산성 및 건강에 영향 없이 반추가축의 장내 메탄 발생 감축 효과를 보임

### 3) 국내 메탄 저감제 및 저메탄 사료 연구현황

#### □ 국내 저메탄 첨가제 신속 보급을 위한 ‘루민업’ in vitro 실험 결과

- 연구팀: 서울대학교-카길 본 연구용역팀
  - 서울대 김경훈, 백명기 교수; 카길 오준표 박사
- 실험 목적:
  - CNSL을 포함하고 있는 국내 시판 중인 제품인 루민업의 메탄 저감 효과를 확인하기 위하여 in vitro 반추위 실험을 수행함.
  - 메탄 저감효과가 확인될 경우, 스위스의 Mootral Ruminant와 같은 탄소거래 승인 제도를 국내에 도입하는 첫 번째 사례로 추진 가능
- 실험 개요
  - 실험 기간: 2021. 8월~9월
  - 실험 디자인:
    - 대조구: 무처리구
    - 모넨신구: 메탄 저감 효과가 있는 positive control
    - 7가지 수준의 루민업첨가구: 국내외 루민업 및 CNSL 메탄 저감 연구 결과를 토대로 수준 결정
  - 발효 시간: 24h
  - 측정항목: 메탄 발생량, 메탄 저감 수준, pH, 가스 발생량, 건물 소화율, VFA (추후 분석 예정).
- 실험 결과 (표 1-5)
  - 루민업 첨가 수준이 증가함에 따라 메탄 발생량 저감율이 증가함: 0.05%~6.0% 첨가 시 평균 메탄 저감율: 33.4% (3.1 - 82%)

표 1-5. 루민업 첨가가 in vitro 반추위 발효 및 소화율에 미치는 영향 (n = 3)

Item	Control		Rumin up treatment (% substrate DM)							
	Monensin		0.05	0.1	0.3	0.6	1.0	3.0	6.0	
pH	6.54	6.57	6.58	6.59	6.59	6.54	6.58	6.58	6.58	
DM digestibility, %	42.0	44.0	41.8	40.7	43.8	43.3	40.3	40.8	41.5	
Total gas, mL/g DM substrate	157	130	140	131	138	138	120	112	89.2	
CH <sub>4</sub> , % Total gas	12.9	10.9	14.0	14.0	13.6	12.3	8.89	5.78	4.04	
CH <sub>4</sub> , mL/g DM substrate	20.2	14.1	19.6	18.3	18.7	16.9	10.7	6.49	3.62	
<b>CH<sub>4</sub> reduction, %, DM substrate</b>		<b>30.1</b>	<b>3.11</b>	<b>9.60</b>	<b>7.46</b>	<b>16.4</b>	<b>47.2</b>	<b>67.9</b>	<b>82.1</b>	

## <거세 한우에 루민업 첨가 급여 실험 사례 소개>

○ 실험 기관: 경북대-퓨오바이더스

### ○ 실험 배경

- 루민업은 소 완충제와 고창증 치료제로 국내 시판 중인 일본 제품임
- 캐슈넛 부산물 추출물인 CNSL이 35% 이상 포함되어 있어서 메탄 저감 효과가 예상되나 루민업에 대한 메탄 저감 효과에 대한 실험은 없음

### ○ 실험 목적

- 루민업 첨가 급여가 거세 한우의 성장과 도체 특성 및 경제성에 미치는 영향

### ○ 실험 설계

- 거세 한우 30두 공시: 처리당 10두 공시
- 3개 처리구: 대조구, 루민업2g/두/일, 루민업4g/두/일
- 실험 시기: 2018년 9월21일 ~ 2020년 5월20일
- 시험 기간: 12.4 - 32.5 개월령; 약 20개월 급여시험

### ○ 주요 결과

- 체중 700kg 도달 일령: 대조구: 27.5, 루민업2g구: 26.5, 루민업4g구: 25개월 (2.5개월 단축)
- 육질 및 육량 증가
- 루민업 1g 급여시 두당 추가 순수익 금액: 20만원
  - 루민업 1g 급여시 두당 추가 수입금액: 224천원
  - 루민업 1g당 40원: 20개월 급여비용 = 24천원: 40원/일 x 30일/월 x 20월

### ○ 결과의 의의 및 활용

- 루민업 첨가 급여는 성장 촉진, 육질 및 육량 증진, 사육기간 단축 효과가 있음을 확인함
- 루민업 첨가 급여가 농가에 순수익 증대에 기여함을 확인함
- 루민업이 메탄 저감 효과가 있음이 in vivo 실험에서 확인될 경우, 메탄 저감 방안으로 농가에 쉽게 보급이 가능할 것으로 판단됨

### ※ 퓨오바이더스 루민업 권장량

- 젖소 1일 권장량: 6-12g/착유우 또는 건유우 1두
- 한우: 1-2g 권장: 경제성 때문에
- 일본 육우; 5g 사용

## □ 메탄 저감 첨가제 개발을 위한 in vitro 실험

○ 국립 축산과학원 수행 (RDA 최종보고서, 2008,2013,2014,2017) 과제에서 검토되었던 소재 목록

- AIT(allyl isothiocyanate) 함유 식물 추출물 : 배추 및 양배추
- 항균성 물질 : 겨자 종자, 겨자 분말, 겨자유, sinigrin, berberine, monensin
- 사포닌 함유 식물추출물 : Yucca, ginseng, tea plant, ogapi
- 유기황 화합물 함유 식물추출물 : 부추, 파, 풋마늘 및 갓
- 중쇄지방산 : Lauric acid
- Essential oil
- Iodo-propane, caprylic acid와 CD 복합물
- 반추위 발효조절제 : Acid buffer, Bacillus subtilus
- 49종의 식물추출물

히비스커스, 연잎, 녹차, 솔잎, 쑥, 엑기스, Cactus, 단삼, 들깨, Isoflavo, 자실체, 옥타코사놀, 차조

기업, L-아르기닌, 유젠 플라본, 토사자, 모과엑기스, 알로에겔, 마늘, 은행, 아스파라거스, 가시오가피엑기스, 운지버섯자실체, 천마, 마테, 길경, 계피, 생강, 당귀, 운지버섯균사체, 브로콜리 엑기스, 사상자, ARBLITIN, 미나리엑기스, 마테차초미세분말, 동충하초엑기스, 토마토 과즙, 레몬엑기스, 석류, 콩나물엑기스, 알로에아보레센스, 회향, 차조기엑기스, 오미자엑기스, 어성초엑기스, 복분자엑기스, 인진쑥엑기스, 로즈힙, 포도씨, 고추

- 서울대학교 김경훈 교수 연구팀 (Animals, 2021)에서 검토된 물질
  - 28종 한방원료: 가자, 감초, 강황, 곽향, 노관초, 당귀, 도인, 대산, 대청엽, 대황, 박하, 백작약, 소회향, 승마, 어성초, 연교, 오배자, 육두구, 애엽, 정향, 지각, 지실, 지유, 차씨박, 청피, 통초, 포공영, 황백
  - 자생식물 추출물 153종(한국생명공학연구원 추출물은행): 나팔꽃 열매, 구상나무 잎, 채신목 줄기, 드릅나무 줄기, 동백나무 잎, 참빗살나무 줄기, 왕호장 열매, 쯤목형 줄기, 주목 줄기, 왕버들 줄기, 오리나무 잎, 나팔꽃 씨 등
- 상기 소재들의 In vitro 메탄저감 효과
  - 무첨가 대조구 대비 5 ~ 70%의 메탄 저감 효과 확인
  - 나팔꽃씨 추출물 (서울대 김경훈 교수 연구팀): In vitro 실험(김경훈과 이창현, 2016; 특허 출원번호 10-2016-0105661 : 건조사료 중량을 기준으로 0.001 내지 5%의 중량비로 사료에 첨가되는 것이 특징)
- 상기 소재들의 In vivo 저감 효과(RDA, 2013; Bharanidharan 등, 2017)
  - In vivo 메탄 저감 효과를 측정된 재료는 3종 뿐(lauric acid, caprylic acid CD complex, 나팔꽃씨)
  - In vivo 실험에서 메탄 저감 효과가 확인된 것은 나팔꽃씨 분말(33%)이 유일(미발표)

**□ 사료 원료의 메탄 발생지수 평가와 메탄 저감형 사료 배합비 개발 연구(Kim, 2012; Lee, 2003)**

- 밀(wheat flour)의 in vitro 메탄 발생량을 지수 100으로 할 때, 사료 원료(곡류, 강피류, 박류, 조사료)의 in vitro 메탄 발생량의 상대 지수를 평가 (표 1-6)
- 사료의 영양소 및 에너지 함량과 함께 메탄 발생지수도 고려하는 저메탄 사료를 생산하고자 하였으나, in vivo 실험에서 그 효과를 검증하지 못함.
  - 다양한 부산물 원료를 이용, 메탄균 중심의 발효에 의한 메탄가스 생산에서는 원료의 메탄 발생지수가 메탄 발생량과 높은 상관관계가 있지만, 반추위 내의 미생물 생태계는 품종, 사료, 환경, 유전 등에 따라서도 차이가 크기 때문에 실용화되지 못함

**□ 양질조사료 보급**

- 제3차 대한민국 국가보고서에는 반추가축 장내 발효에 의한 메탄을 감축하기 위해서 한국 정부는
  - ① 양질조사료 급여 확대(사료 급여체계)
  - ② 반추위 발효조정제(메탄 저감제) 첨가 사료 급여를 추진한다고 기술
- 국내 연구
  - 국내에서 조사료 품질과 in vivo 메탄 발생량과의 관계를 조사한 연구는 거의 없음
  - 유일하게 “벗짚과 티모시 건초” 비교, “벗짚과 이탈리아라이그라스 사일리지” 비교한 보고서(농림축산식품부, 2017)가 있지만, 양질조사료의 메탄 저감 효과를 뒷받침하지 못함
- 국외 연구

- 국외 연구는 “조사료의 숙기”, “건초와 사일리지”, “초종간 차이” 등이 메탄 발생량에 미치는 영향을 조사한 논문은 다수 있음.
  - 양질의 조사료는 가소화영양소량 당 메탄 발생량을 기준으로 하면 감축 효과를 보여주는 연구가 비교적 많지만, 1일 절대 배출량 기준으로 보면 섭취량 증가로 인하여 메탄 발생량이 많아짐
- 검토 사항
- “절대량 감축” 관점에서 볼 때, 양질조사료 보급이 메탄 감축 방법인지 연구자 간의 검토가 필요
  - 양질의 조사료의 메탄 감축 효과는 생산성 증가분만큼의 가축의 두수 감소로 이어질 때 가능

표 1-6. 국내연구에 의한 사료 원료의 메탄 발생 지수(Lee 등, 2003)

Group	Ingredients	CH4[ [%]1 ml]	Group	Ingredients	CH4[ [%]1 ml]
Grains group	Wheat	11.4 100	Forages	Alfafa Hay	6.0 53
	Corn	10.3 91		Orchard Hay	4.7 41
	Oat	6.9 60		Rice straw	2.4 21
	Tapioca	10.2 90			
Brans and Hults	Soybean hull	11.1 98	Oil seed meals	Soybean meal	7.1 63
	Lupin seed			Palm kernel meal	3.9 35
	Beet pulp	9.8 79		Soysauce cake	
	Lupin hull	8.7 76		Rapeseed meal	5.7 50
	Wheat bran	8.3 73		Coconut oil seed meal	6.6 58
	Defatted rice bran	7.0 61		Corn germ meal	6.1 53
	Corn gluten feed	6.6 58		Perilla meal	
	Rice bran	4.9 43		Sunflower meal	5.3 47
	Cotton seed hull	0.9 8		Corn gluten meal	3.3 29
	Gluten			Cotton seed meal	4.5 39
		Canola meal	7.5 65		

1) wheat 메탄 발생량(100%)에 대한 상대 비율(%)

#### 4) 주요 메탄 저감 후보물질 목록 및 메탄 저감제 사용 때 고려사항

(1) In vitro 후보물질 목록(24 hr 배양, 20% 이상 감소한 국내 실험 결과): 표 1-7

표 1-7. 국내 연구에 의한 주요 메탄 저감 후보 물질 목록

학명	추출 부위	첨가량	메탄저감율(기질량 기준), %	참고문헌
나팔꽃 <i>Pharbitis nil</i>	종자	10mg (30mL 배양액 + 200mg 기질)	33	Bharanidharan et al., 2021
채진목 <i>Amelanchier asiatica</i>	줄기		20	
황호장근 <i>Reynoutria sachalinensis</i>	과실		20	
오리나무 <i>Alnus japonica</i>	잎		23	
남가새 <i>Tribulus terrestris</i>	잎, 종자		23	
만주고로쇠 <i>Acer truncatum</i>	줄기		23	

개어서 나무 <i>Carpinus tschonoskii</i>	줄기		23	
대황 <i>Rhubarb</i>	뿌리	40mg	55	Kim et al., 2016
caprylic acid and $\beta$ -cyclodextrin complexes		20mg	23	Bharanidharan et al., 2017
파 <i>Allium fistulosum</i>	줄기	15mg	22	Eom et al., 2020
박하 <i>Mentha canadensis</i>	잎	(30ml배양액 + 300mg 기질)	25	Lee et al., 2020
인동 <i>Lonicera japonica</i>	줄기		28	Lee et al., 2019

(2) In vivo 실험 결과가 있는 후보물질 세부 정보: 메탄 감축률, 첨가 수준, 첨가 기간, 감축 기간 등

○ 3-NOP (표1-8)

표 1-8. 3-NOP에 대한 축종별 메탄 저감율 연구 논문 요약

동물 종류	급여량 (mg/kg DM)	급여량 (% DM)	실험기간	메탄저감율, %	참고문헌
면양	115	0.012	2 weeks	25.7	Martínez-Fernández et al., 2014
	111	0.011	29 days	23.7	
젖소	130	0.013	23 days	58.0	Haisan et al., 2014
젖소	27	0.003	36 days	6.6	Reynolds et al., 2014
	135	0.014		9.8	
비육우	53	0.005	28days	4.4	Romero-Perez et al., 2014
	161	0.016		9.3	
	345	0.035		33.0	
젖소	40	0.004	90 days	25.0	Hristov et al., 2015
	60	0.006		31.0	
	80	0.008		32.0	
비육우	280	0.028	112days	59.2	Romero-Perez et al., 2015
젖소	60	0.006	2 weeks	34.0	Lopes et al., 2016
비육우(비육중기)	100	0.010	105 days	6.8	Vyas et al., 2016
	200	0.020		29.1	
비육우(비육말기)	100	0.010		8.6	
	200	0.020	80.7		
젖소	68	0.007	23 days	23.0	Haisan et al., 2017
	132	0.013	24 days	36.7	
비육우(비육중기)	75	0.008		3.3	
조사료 위주 식단	100	0.010		16.1	Vyas et al., 2018
	150	0.015		21.1	
	200	0.020		22.9	
	100	0.010		25.8	
비육우(비육후기) 곡물사료 위주 식단	150	0.015		32.6	
	200	0.020		45.2	
	338	0.034	3 weels	38.0	
비육우	100	0.010	2 weeks	18.0	Kim et al., 2019
젖소	72	0.007	70 days	23.0	Van Wesemael et al., 2019
	75	0.008		21.0	
	40	0.004		21.0	
젖소	60	0.006	2 weeks	17.6	Melgar et al., 2020
	80	0.008		15.9	
	100	0.010		33.5	
	150	0.015		35.9	



	200	0.020		31.8	
비육우	200	0.020	17 days	28.2	Zhang et al., 2021
	73	0.007		12.1	
반추위 시뮬레이션	160	0.016	2 days	62.0	Schilde et al., 2021
기법(RUSITEC)	1200	0.120		96.6	
	73	0.007		9.1	
	160	0.016		34.5	
	1200	0.120		90.1	
<b>평균</b>	<b>178</b>	<b>0.018</b>		<b>30.0</b>	

- 3-NOP 권장 급여량: 60~100mg/kg feed DM (Melgar 등, 2020)

○ 루민업: CNSL 함유 첨가제 (표 1-9)

**표 1-9.** CNSL 첨가 수준에 따른 메탄 저감율 연구 논문 요약

실험모델	체중당 급여량	건물 사료당 급여량	급여량 % 건물사료	실험기간	메탄저감율, %	참고문헌
In vivo (n = 3)	4g/100 kg BW	40g/7 kg	0.57	3 weeks	37.6	Shinkai et al., 2012
Non lactating Holstein cows	4g/100 kg BW	20g/7 kg	0.29	3 weeks	19.3	
In vivo (n = 3)	4g/100 kg BW	40g/7 kg	0.57	3 weeks	37.6	Mitsumori et al., 2014
Non lactating Holstein cows	4g/100 kg BW	20g/7 kg	0.29	2 weeks	19.3	
In vitro (6 bottles)	3g/100 kg BW	15g/7 kg	0.21	2 weeks	8.4	
		5mg/1g	0.50	48h	7.4	Danielson et al., 2014
Silage based substrate		10mg/1g	1.00	48h	18	
In vivo (n = 8)	30g/d	30g/ 25 kg	0.12	21 days	7.9	Branco et al., 2015
Lactating Holstein cows						
In vivo (n = 8)						Konda et al., 2019
Thai native (n = 4)	4g/100 kg BW	17.5g/7.4 kg	0.24	2 & 4 weeks		
Swamp buffalo (n = 4)	4g/100 kg BW	17.5g/7.4 kg	0.24	2 & 4 weeks		
In vitro (6 bottles/ animal)						
Thai native (n = 4)		2 mg/ 200mg	1.00	24h	2 wk: 41.1; 4 wk: 52	
Swamp buffalo (n = 4)		2 mg/ 200mg	1.00	24h	2주: 59.3; 4주: 75	
In vivo (n = 8)	4g/100 kg BW	20g/4.2kg	0.48	27d	24.2	Maeda et al., 2020
Lai sind cattle	6g/100 kg BW	48g/6.4kg	0.75	27d	18.4	

(3) 효과적인 메탄 저감 방안 제안

- 복합처리 고려: 3-NOP (또는 루민업) + lipid, nitrate 등의 물질을 복합 첨가

(4) 저메탄 첨가제 구비 조건

- 부작용이 없을 것: 섭취량, 생산성 (증체, 유량, 유성분 등), 건강 등에 영향이 없을 것

- 신뢰할 수 있는 메탄측정법을 사용하여 메탄저감율 측정할 것
- 메탄 측정 시 신뢰할 수 있는 실험 디자인을 이용할 것: 충분한 실험동물 두수 이용, crossover design 등, 장기간의 실험, 첨가제만을 위한 독립적인 실험 등
- In vivo 실험을 통한 검증이 필수: In vitro 실험은 충분하지 않음
- 메탄 저감 재현성
- 고능력우를 대상으로 실험이 필요함

(5) 메탄 저감제 등록 방안에 대한 제안

- 사료첨가제에 '메탄 저감제'라는 새로운 카테고리를 추가하는 방안 검토 필요: 일본에서는 추진 중임.

5) 국외 저메탄 사료 메탄 저감 인증 방법론 사례

방법론 명

- (VM 0041) METHODOLOGY FOR THE REDUCTION OF ENTERIC METHANE EMISSIONS FROM RUMINANTS THROUGH THE USE OF 100% NATURAL FEED SUPPLEMENT (Version 1.0, 2010. 11. 22)

개발자 : Mootral(스위스)

방법론 개요

- 천연 사료 자원의 보충 급여로 메탄생성균 활동이 억제되는 조건에서 장내 발효 메탄 발생량을 추정하는 방법을 제공
- 베이스라인(기술투입 전)을 위한 3가지 접근방법
- 프로젝트(기술투입 후)를 위한 2가지 접근방법

감축량 산정

$$\begin{aligned}
 &\text{기술 투입 후 배출량} \\
 &= \text{① 기술투입 전(베이스라인) 배출량} \times (1 - \text{기술의 감축보정 \%}) \\
 &\quad + \text{② 첨가제 제조 및 수송 관련 배출량}
 \end{aligned}$$

6) 메탄 저감제 및 저메탄사료 표준화 방안 정립을 위한 사례 조사 및 분석

저메탄 사료(감축 기술)의 감축 보정계수 검증·등록

- 온실가스종합정보센터(2012)는 “국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침”에 준하여 개발된 국가 고유 배출계수와 함께 감축 기술투입에 의한 감축 보정계수를 검증·등록함 (표 1-10)
- 온실가스 종합정보센터는 개발방법론, 계수 대표성, 측정·분석 정확성, 자료관리, QA/QC, 불확도 제출자료를 검증하여 등록 채택 여부를 결정

- 감축 기술의 감축 보정계수 검증을 위한 제출자료에는 몇 % 감축 가능한지 등록을 위한 최소 감축량은 없음
- 따라서 저메탄 사료의 감축 보정계수를 개발하기 위한 실험 설계 단계에서부터 검증 항목 자료 제출이 가능하도록 준비하고 추진하는 것이 중요함

**표 1-10. 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발 검증 항목 확인 목록**

구분	항 목	제공여부	자료No.	확인위치
개발 방법론	배출·흡수량 산정 지침에의 적용 가능성			
	개발 방법론			
	고려된 특성(핵심·일반 고려사항)			
계수 대표성	배출·흡수원에 대한 조사 방법 선정			
	표본집단 선정 방법			
	표본 및 모집단의 규모			
	표본 개수 결정 방법론			
	표본의 시·공간적 영향 고려			
측정·분석 정확성	직접측정의 가능 여부			
	사용 변수값의 출처 및 적절성			
	측정·분석 유형 선정			
	측정·분석 및 샘플링 방법론			
	측정·분석 수행 기관			
	측정·분석기기의 측정·분석 범위			
	측정·분석기기의 신뢰수준 근거자료 (Zero·Span 드리프트, 직선성의 오차, 표준운 영절차 등)			
자료관리	유효숫자 관리 여부 및 근거자료			
	자료 선별·보완 여부 및 근거자료			
	사용자료 간 시간의 일치성			
QA/QC	QA/QC 수행 관련 자료			
불확도	불확도 산정 관련 자료			

농업 부문 온실가스 감축 사업의 표준 업무 절차 (그림 1-2)

- 우리나라에서 저메탄 사료의 감축 실적을 추적하기 위해서는 자발적 온실가스 감축 사업을 통해 가능
- 따라서 농업실용화재단(FACT)이 관리하는 자발적 온실가스 감축 사업의 단계별 표준 업무 절차가 저메탄 사료의 감축 실적 인증을 위한 표준화에 해당
- 해당 감축 사업의 등록부터 감축 실적 인증까지의 절차가 진행되기 위해서는 저메탄 사료 급여 전 (베이스라인)과 급여 후(프로젝트)의 온실가스 배출량을 산정 방법론 개발이 되어 있어야 함
  - 방법론에는 온실가스 종합정보센터에 등록된 국가 고유 계수인 베이스라인 배출계수와 프로젝트 배출계수(보정계수)가 이용됨
- 개발된 방법론은 국내 등록 체계인 ‘온실가스 배출 감축 사업 등록 및 관리에 관한 규정’에 준하여 농업기술실용화재단의 심의를 거쳐 등록

□ 저메탄 사료의 농업 부문 온실가스 감축사업 방법론 개발 사례

- 감축 사업 방법론으로 등록된 장내발효 메탄 감축에 필요한 저메탄 사료의 사례 없음
- 지난 2012년부터 추진되어온 “농업 부문 온실가스 감축사업”은 15가지 방법론(농업기술실용화재단, 2020)에 따라서 사업이 수행되어 왔고, 2020년 감축량은 9700톤을 달성, 농가에 지급된 인센티브 금액은 약 9700만 원임 (표 1-11)

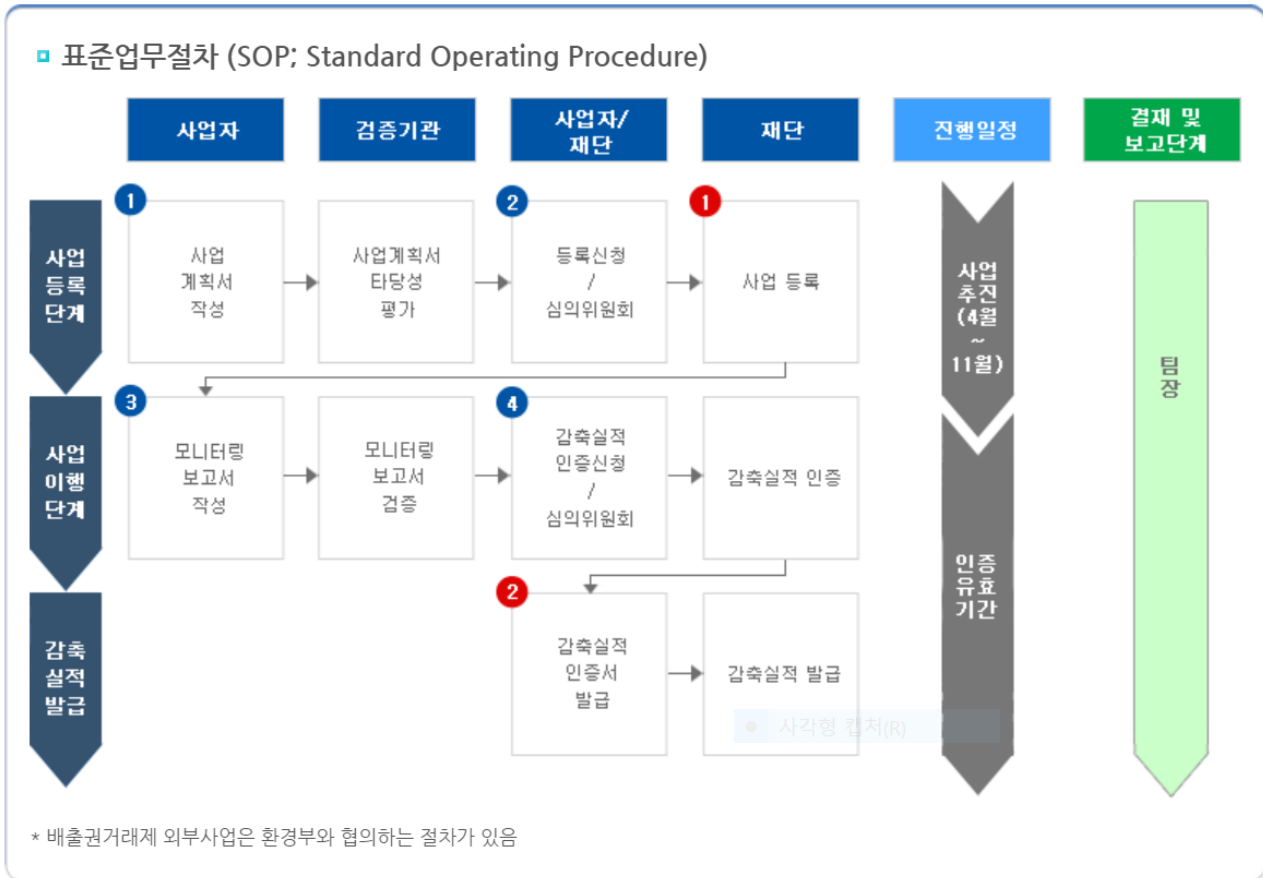


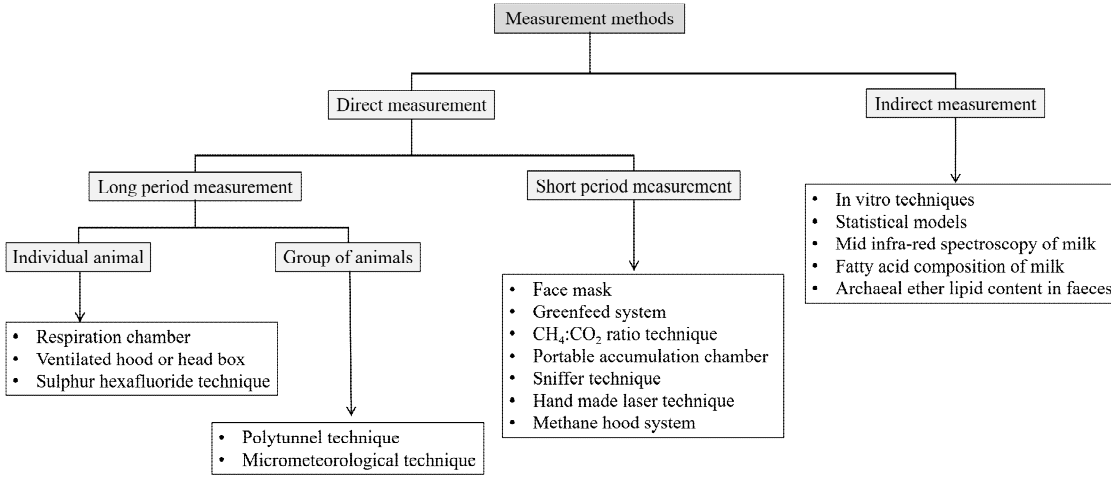
그림 1-2. 온실가스 배출 감축 사업 등록 및 관리 절차

표 1-11. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론

번호	방법론명	2020년 개정여부
1	미활용 에너지를 이용한 농업시설의 온실가스 감축 방법론	개정
2	순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	개정
3	LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 전기 사용량 절감 방법론	-
4	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	개정
5	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	개정
6	재생에너지(태양광, 태양열, 수력, 풍력) 방법론	-
7	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용저감 방법론	-
8	완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	-
9	목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	개정
10	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	개정
11	왕겨를 이용한 RPC 곡물건조 열원대체 방법론	-
12	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	-
13	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	-
14	부산물 비료를 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	-
15	토지의 이용방법 전환을 통한 온실가스 감축 방법론	개정

## 4. 저메탄 사료 급여효과 측정 방법에 대한 선행연구 조사 및 분석

○ 현재 세계적으로 다양한 반추가축 장내 발효 메탄측정 방법이 제안되어 있음: **그림 1-3**



**그림 1-3. 반추가축 메탄측정 방법 개요: Patra, 2016**

- 현재 개발된 메탄측정 방법은 호흡챔버법 (respiration chamber), SF6 tracer gas technique (sulphur hexafluoride technique), GreenFeed technique, Hand laser CH4 detector (hand made laser technique), CO2 method (CH4:CO2 ratio technique) 등이 있음 (표 1-12)
- Respiration chamber 법
  - 동물을 chamber 안에 넣고 일정 시간 간격으로 외부 공기를 안으로 넣어주고 그만큼의 내부 공기는 배출시키며 메탄가스를 측정하는 방법
  - 메탄측정법 중 가장 높은 정확도와 재현성으로 “Gold standard”로 여겨지는 메탄측정법
  - 동물의 반추위와 후장에서 발생하는 모든 메탄을 정확히 측정할 수 있고, 메탄 이외에 동물에서 생성되는 CO2, NH3와 같은 다른 기체도 측정할 수 있음
  - 고가의 장비
  - 훈련된 전문가만 취급할 수 있고, 이동이 불가능한 단점이 있음
  - 좁은 chamber 공간은 실험 동물에게 스트레스를 유발하여 사료 섭취량을 감소시키고, 실험동물의 행동을 물리적으로 제한하여 실제 사양환경에서의 메탄생성량을 반영하지 못함
- SF6 tracer gas technique
  - 일정한 속도로 SF6 가스가 방출되도록 설계된 금속용기를 동물의 반추위 내 삽입하여 동물의 날숨에서 섞여 나오는 SF6 가스와 메탄의 양을 측정하여 메탄생성량을 산출하는 방법
  - 방목지 메탄측정에 적합하고 다수의 동물에 대해 메탄측정이 가능함
  - 동물이 SF6 가스가 방출되는 장비와 날숨을 흡입하는 장비를 모두 등에 매달고 있어 동물의 섭취 행동을 제한함.
  - 모든 동물에 장비 장착하는 것은 엄청난 노동집약적 과정
  - SF6 가스는 이산화탄소보다 23,900배 더 강력한 온실가스임
- GreenFeed technique
  - 동물 날숨의 메탄, 이산화탄소량과 공기 유입 속도 등 여러 가지 조건들을 고려하여 메탄 성량을 산출하는 상업화된 메탄측정 방법

- 고가의 장비임
  - 메탄측정의 시간과 기회를 동물의 자육에 의지하여 실험자가 통제하기 어려움
  - 동물을 유인하는 데 필수적으로 쓰이는 보상 사료는 정밀한 메탄측정 실험 시 메탄 발생량에 영향을 줄 수 있음
- Hand laser CH4 detector
- 레이저 흡수 분광법을 이용해 동물의 날숨이 나오는 코, 입 주변으로 레이저를 쏘 원거리에서 메탄가스 농도를 측정하는 방법
  - 단점: 실험 개체의 움직임에 따라 레이저 포인트를 맞추는 과정은 노동집약적이며 풍속, 풍향, 기온, 습도, 대기압 같은 기상요소들이 측정 과정의 정확도와 정밀성에 영향을 미침
- CO2 method
- CO2 법은 반추동물의 날숨을 직접 포집하여 메탄생성량 측정에 이용하는 방법으로 하루 2회, 회당 20분 내외, 즉 한 개체당 하루 40분을 측정하여 메탄 발생량을 측정할 수 있는 간단하고 신속한 방법
  - 개체가 사료를 섭취할 때 또는 소를 스탠치온에 걸어서 언제든지 날숨을 포집할 수 있어서 실험 개체의 섭취량을 제한하지 않고, 행동을 제한하지 않는 동물복지를 고려한 방법
  - Respiration chamber 방법과는 다르게 가스포집법과 메탄생성량 측정법이 간편하므로 간단한 교육만으로 연구자 또는 농민 또는 관련 업계에서 쉽게 이용할 수 있음
  - 메탄생성량을 산출할 때 절대적인 측정값을 바탕으로 일일 메탄생성량을 산출하는 게 아니라, 날숨의 이산화탄소와 메탄의 비율을 바탕으로 수식을 이용하여 메탄 발생량을 산출하기 때문에 respiration chamber보다는 부정확하다는 단점이 있음
  - CO2 법과 호흡 챔버법(RC)과 상관도 비교 시 GreenFeed 수준의 높은 상관도를 보임 (표 1-13)
  - 일본도 농가 단위에서 많은 두수의 소에 대한 메탄 발생 측정을 위해 CO2 법을 시도하고 있음 (일본 히로시마 대학 Obitsu 교수, 2차 한국반추위 미생물연구회 국제 Webinar, 21.08.27)

표 1-12 메탄 측정법 장단점 비교

메탄 측정법	장점	단점
Respiration chamber	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가축 메탄측정법의 gold standard로 여겨짐</li> <li>- 가장 정확한 방법</li> <li>- 반추동물의 전장, 후장에서 생성되는 메탄을 전부 측정 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초기 구축 비용이 큼</li> <li>- 장비의 이동이 불가능함</li> <li>- 대규모의 실험 불가능</li> <li>- Chamber 안에서는 섭취량이 감소하여 실질적인 사양환경에서의 메탄생성량을 파악하기 힘들</li> <li>- 고도로 숙련된 전문가 필요</li> </ul>
SF6 tracer gas technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 사양환경에서의 메탄측정이 가능함</li> <li>- 실험 가축의 행동을 상대적으로 덜 제한함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tracer gas로 이용하는 SF6 가스는 강력한 온실기체 중 하나임</li> <li>- 고도로 숙련된 기술자 필요</li> <li>- 전 과정이 노동, 시간 집약적이고 특히 매우 복잡한 준비과정이 필요함</li> </ul>
GreenFeed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 사양환경에서의 메탄측정이 가능함</li> <li>- 실험가축의 행동을 제한하지 않음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 장비의 이동이 제한적</li> <li>- 가축을 유인하기 위해 쓰이는 유인 사료로 인해 정확히 통제된 메탄 저감 실증 실험이 비교적 어려움</li> <li>- 고가의 장비</li> </ul>
Hand laser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 사양환경에서의 메탄측정이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가축의 움직임에 따라 레이저 포인</li> </ul>

methane detector	가능함	트를 계속 조정해야 함 - 풍속, 습도, 기온 등의 기상요소에 의해 메탄 측정값의 변동이 있음
CO2 method	- 실험 개체당 메탄측정에 필요한 시간이 짧음 - 실험가축의 행동을 제한하지 않음 - 대규모의 메탄측정실험이 가능 - 메탄 측정법이 매우 간단하고 편리해서 실험자의 피로도가 낮음 - 이용법이 간단하여 짧은 교육만으로 활용이 가능 - 호흡챔버법과 상관도가 높음	- 날숨의 이산화탄소와 메탄 비율을 바탕으로 수식을 이용하여 메탄생성량을 산출하므로 respiration chamber 보다 상대적으로 부정확한 방법 - 방식의 특성상 반추위에서 생성되는 메탄만을 산출

표 1-13. 메탄 측정법 정확도 비교

메탄 측정법 정확도 비교	상관도 range	Reference
RC vs CO2 method	0.75	서울대, unpublished
RC vs Greenfeed	0.37, 0.81	Garnsworthy, 2019; Doreau, 2018
RC vs Laser detector	0.53, 0.8	Ricci, 2014; Chagunda, 2011
RC vs SF6	0.14~0.78	Pinares-Patiño, 2011; McCourt, 2008; Doreau, 2018; Muñoz, 2012

## 5. 국내·외 온실가스 감축 목표 및 연구 개발과 정책 사례 조사

### 1) 국내

#### □ 우리나라 온실가스 감축 목표

- 2050 탄소중립 시나리오와 2030 국가 온실가스 감축목표 국무회의 심의 확정(2021. 10. 27)
  - 2050 탄소중립 시나리오는 2050년 탄소중립을 달성하게 되는 우리 사회의 미래상을 전망하고, 이를 통해 전환·산업·건물·수송 등 주요 부문별 정책 방향을 제시
  - 주요 부문의 배출량 감축과 함께, 탄소 포집·이용·저장기술(CCUS)의 활용, 흡수원 확대 등으로 2050년 온실가스 순 배출량은 '제로 (0)'로 만듦
  - 농축수산분야: 2018년 온실가스 배출량 24.7백만 톤 CO2 eq를 2030년에는 18.0백만 톤, 2050년까지 15.4백만 톤 CO2 eq로 각각 27.1% 그리고 37.7% 감축을 목표
    - 농축수산 부문은 저탄소 영농법 확대와 바이오가스의 에너지 활용 등으로 온실가스를 최대한 감축할 계획
- 2030년: 2050년 탄소중립의 중간목표로 2018년 대비 2030년까지 40% 감축하는 것으로 결정
  - 농축산부문은 2018년 대비 배출량을 27.1% 감축
    - ‡ 온실가스 감축 수단: 탄소 영농법 확대(논물 관리방식 개선, 질소질 비료 저감), 가축분뇨 자원순환 확대 및 저탄소 가축 관리시스템 구축
- 메탄 선언
  - COP 26 (영국 글라스고)에서 2030년까지 세계 메탄 배출량을 2020년 대비 최소 30% 줄이는데 우리나라도 동참하겠다고 선언
  - 우리나라 농축수산 부문의 배출량 목표: 970만 톤(2018년 기준 메탄 배출량 1220만 톤의 20.5% 감축률)



□ 우리나라 온실가스 감축 목표 달성을 위한 연구 개발 등 정책

- 국내에서 2000년대부터 메탄 저감 방안 개발 관련 연구가 다수 이루어져 왔음 (표 1-14)
- 하지만 아직 in vivo 메탄 저감 효능 연구 사례는 매우 적음
- 그동안 연구의 문제점
  - 가장 큰 이유는 메탄 저감을 검증할 수 있는 호흡챔버 등의 시설 미비
- 아직 탄소거래 인증 확보에 필요한 연구 결과가 매우 부족함

표 1-14. 국내 메탄 저감 방안 관련 연구과제 목록 (2005 - 2021)

연도	부처명	세부사업명	과제명
2021	농림축산식품부	2025 축산현안대응 산업화기술개발사업	가축 온실가스 발생 저감 기술 개발
2020	농촌진흥청	국제농업기술협력(R&D)	장내발효 메탄생성균 특성 구명을 위한 분석기술 비교확립 연구
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	돼지 장내발효 메탄 배출량 측정 및 배출계수 개발
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	젖소 장내발효 메탄 배출량 측정 및 배출계수 개발
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	염소 장내발효 메탄 배출량 측정 및 배출계수 개발
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	한·육우 장내발효 메탄 배출량 측정 및 배출계수 개발
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	한우 사료 내 다양한 메탄 저감제 첨가 급여 시 메탄 저감 수준 구명
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	흑염소 사료 내 다양한 메탄 저감제 첨가 급여 시 메탄 저감 수준 구명
2019, 2020	농촌진흥청	축산시험연구(R&D, 책임운영)	염소 장내발효 메탄배출량에 영향을 미치는 메탄생성균 다양성 조사
2020	농촌진흥청	신농업기후변화대응체계구축(R&D)	사료 영양수준에 따른 한우의 메탄 발생균 군집 분석
2018~2020	농촌진흥청	축산시험연구(R&D, 책임운영)	한우 장내발효 메탄배출량에 영향을 미치는 메탄생성균 다양성 조사
2018, 2019	농촌진흥청	국제농업기술협력(R&D)	반추가축 장내발효 메탄저감 기술 도입
2017~2019	농촌진흥청	농업기후변화대응체계구축(R&D)	한우의 메탄 생성량 저감을 위한 사료 급여 체계 설정 연구
2017~2019	농촌진흥청	농업기후변화대응체계구축(R&D)	한우의 메탄 생성량 저감을 위한 대사체 라이브러리 구축
2016	농촌진흥청	농업기후변화대응체계구축	한우 반추위 메탄균 다양성 분석을 통한 사료 급여 체계 모델 개발 연구
2015, 2016	농촌진흥청	농업기후변화대응체계구축	반추위 혼합균주 연속배양기술을 이용한 메탄저감 및 시너지 효과 검증 연구
2015	농림축산식품부	농생명산업기술개발	반추동물 유래 메탄가스의 측정기술 개발 및 탄소저감 사료 첨가제의 착유우 검증
2015	농림축산식품부	농생명산업기술개발	한우에서 후보 사료첨가제의 메탄저감효과 검증 및 사양체계 수립

2015	농림축산식품부	농생명산업기술개발	식물체를 이용한 메탄저감용 사료첨가제 개발
2015	농림축산식품부	농생명산업기술개발	모델링 기법을 이용한 반추위 내 메탄저감용 합성 및 천연화합물 제제 개발 및 산업화
2014, 2015	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	한우 반추위 메탄균 다양성 분석을 통한 사료 급여 체계 모델 개발 연구
2014~2016	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	한우 반추위 메탄균 배양기술을 이용한 메탄환원 조절물질 발굴 연구
2014	농림축산식품부	농생명산업기술개발	반추동물 유래 메탄가스의 측정기술 개발 및 탄소저감 사료 첨가제의 착유우 검증
2013~2015	농림축산식품부	농생명산업기술개발	메탄저감을 위한 미생물첨가제 개발 및 반추위 프로토조아 조절방안 개발
2013, 2014	농림축산식품부	농생명산업기술개발	모델링 기법을 이용한 반추위 내 메탄저감용 합성 및 천연화합물 제제 개발 및 산업화
2014	농림축산식품부	농생명산업기술개발	한우에서 후보 사료첨가제의 메탄저감효과 검증 및 사양체계 수립
2014, 2015	농림축산식품부	생명산업기술개발	반추동물의 탄소배출 저감형 사료첨가제 개발
2014	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	반추위 혼합균주 연속배양기술을 이용한 메탄저감 및 시너지 효과 검증 연구
2014	농촌진흥청	차세대바이오그린21	대사공학을 이용한 메탄(CH4) 가스 발생량 조절기술 개발
2013, 2014	농림축산식품부	농생명산업기술개발	식물체를 이용한 메탄저감용 사료첨가제 개발
2013	농림축산식품부	생명산업기술개발	한우에서 후보 사료첨가제의 메탄저감효과 검증 및 사양체계 수립
2013	농림축산식품부	생명산업기술개발	반추동물 유래 메탄가스의 측정기술 개발 및 탄소저감 사료 첨가제의 착유우 검증
2013	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	국내 자생 식물자원을 이용한 반추위내 메탄가스 저감 복합사료의 개발
2013	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	중소 반추동물 장내발효의 메탄 배출계수 산출
2013	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	장내발효 메탄저감을 위한 메탄지표 및 사료첨가제 개발
2013	농촌진흥청	축산시험연구(R&D, 책임운영)	대 반추동물 장내발효의 메탄 배출계수 산출
2013	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	천연생리활성물질을 이용한 반추가축 장내발효 메탄저감제 개발
2013	농림축산식품부	생명산업기술개발	반추동물의 탄소배출 저감형 사료첨가제 개발
2013	농촌진흥청	농업기후변화적응체계 구축	가축의 장내발효 메탄 저감사료 개발
2013	농촌진흥청	차세대바이오그린21	대사공학을 이용한 메탄(CH4) 가스 발생량 조절기술 개발
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	한우에서 후보 사료첨가제의 메탄저감효과 검증 및 사양체계 수립
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	메탄저감을 위한 미생첨가제 개발 및 반추위 프로토조아

	품부		조절방안 개발
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	식물체를 이용한 메탄저감용 사료첨가제 개발
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	반추동물 유래 메탄가스의 측정기술 개발 및 탄소저감 사료 첨가제의 착유우 검증
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	모델링 기법을 이용한 반추위 내 메탄저감용 합성 및 천연화합물 제제 개발 및 산업화
2012	농촌진흥청	국책기술개발	환원적 초산생성균을 이용한 메탄저감용 사료첨가제 개발연구
2012	농촌진흥청	국책기술개발	천연생리활성물질을 이용한 반추가축 장내발효 메탄저감제 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	중소 반추동물 장내발효의 메탄 배출계수 산출
2012	농촌진흥청	국책기술개발	가축의 장내발효 메탄 저감사료 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	장내발효 메탄저감을 위한 메탄지표 및 사료첨가제 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	국외 천연생리활성 물질 이용한 반추가축 장내발효 메탄저감 메카니즘 규명
2012	농촌진흥청	차세대바이오그린21	대사공학을 이용한 메탄(CH4) 가스 발생량 조절기술 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	유기물종류별 메탄배출계수 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	국내 자생 식물자원을 이용한 반추위내 메탄가스 저감 복합사료의 개발
2012	농촌진흥청	축산시험연구(R&D,책임운영)	대 반추동물 장내발효의 메탄 배출계수 산출
2012	농림축산식품부	생명산업기술개발	반추동물의 탄소배출 저감형 사료첨가제 개발
2012	농촌진흥청	국책기술개발	반추가축 장내발효 메탄 저감제 개발 연구
2020, 2011	농촌진흥청	국책기술개발	환원적 초산 생성유도를 통한 메탄저감 및 사료효율 개선 연구(국책기술개발)
2009	농촌진흥청	축산자원개발시험연구	반추동물의 메탄가스 발생저감을 위한 장내발효 개선 연구(축산자원개발시험연구)
2007, 2008	농촌진흥청	축산자원개발시험연구	Time release capsulation 공법을 이용한 반추위 내 메탄가스 발생 저감 사료첨가제 개발
2005~2007	농촌진흥청	축산자원개발시험연구	반추가축의 메탄가스 발생 저감을 위한 목초·사료작물 연구

\* NTIS(국가과학기술지식정보서비스)에서 '메탄'과 '온실가스'를 키워드로 농촌진흥청과 농림축산식품부 지원 연구과제 검색 결과: 2002년 - 2021 (2021년 11월 8일 검색 결과)

## 2) 일본

### 일본 정부의 온실가스 감축 목표

○ 스가 (Suga) 정권

- 2030년까지 일본 온실가스 발생량을 46% 감축, 2050년 탄소중립 선언

□ 일본 정부의 온실가스 감축 연구 개발 정책

(1) 일본 농림수산업 지원 온실가스 감축 과제 (2018-2022)

- 농가 단위별로 2030년까지 26% 온실가스 감축 목표
- 소 유전적 개량에 의한 온실가스 감축 연구
  - 저메탄 발생 소의 특성 규명 및 저메탄 발생 소 선발 연구
- 질소 배설 및 아산화질소 (N<sub>2</sub>O) 감축을 위한 영양학적인 방안 개발
  - 육우, 젖소, 산란계 적정 단백질 사료 개발 연구
- 가축의 온실가스 감축 방안 측정 방법 정립
  - 가축의 온실가스 감축을 위한 전주기 분석 방법 정립
  - 초지, 분뇨 처리장 (manure digester)에서 등에서 배출계수 측정

(2) 일본 농림수산업 “Moonshot” R&D 프로그램 (2021 - 2024)

- 추진 배경
  - 세계 식량 생산 및 보급의 안정과 부산물 활용을 통한 식량 산업의 발전을 위한 획기적인 기술 개발이 필요
- “Moonshot” 프로그램 목표
  - 증가하는 식량 수요 충족 및 환경 보존을 동시에 고려한 선진 식량 생산 시스템의 구축
  - 2050년까지 부존자원 활용 개발을 통한 지속 가능한 세계 식량 공급을 할 수 있는 산업 창출
- “Moonshot” 프로그램 내용
  - 10가지 R&D 과제 수행
  - 반추동물 메탄 저감 분야 Moonshot project 개요: 아래에 제시함

<일본 반추동물 메탄 저감 분야 Moonshot project 개요>

- 주관연구기관 및 책임자: 일본 홋카이도대 고바야시 교수
- 목표: 2050년까지 반추가축 메탄 저감 80% 저감 및 가축 생산성 10% 증진
- 연구과제 내용
  1. 메탄 저감제 개발 및 보급: 3-NOP, 캐슈넛 추출물 CNSL 제품, 홍조류 등
  2. 저메탄 발생 개체 선발 육종
  3. 스마트 필 (smart pill) 개발: 메탄 발생 모니터링을 위한 반추위 발효 양상 측정 기술 개발
    - 실시간 (real-time) 휘발성 지방산 조성 및 비율 측정: 인공지능과 연계 시스템 개발
- 80% 메탄 저감/10% 생산성 증진을 위한 2050년까지 일본 로드맵 제시
  - 2021: 메탄 저감제 스크리닝 (screening)
  - 2023: 새로운 메탄 저감제의 개발, 저메탄 개체 특성 규명, VFA 모니터링 및 이를 기반으로 한 메탄 발생량 예측 모델
  - 2025: 프로토타입 스마트 필 개발
  - 2030: 새로운 사료첨가제를 이용하여 25% 메탄 저감, 스마트 필 개발 및 보급
  - 2040: 환경부담 저감 관련 제도들의 전 세계적 적용과 기술 보급
  - 2050: 개체별 최적의 feeding system 운용: 개체별 사양 및 인공지능/로봇 사양 적용

### 3) 미국

#### □ 미국 정부의 온실가스 감축 목표

- 2030년까지 미국 온실가스를 2005년 대비 50~52% 감축 선언 (2021.04.22.-23. 기후정상회의)
- 2021년 9월 바이든 정부 메탄가스 감축목표
  - 미국과 유럽연합은 2030년까지 2020년 메탄 발생량의 30% 저감 목표를 설정함  
(Source URL: <https://www.feedstuffs.com/news/biden-makes-30-methane-emissions-reduction-goal>)
  - 미국 축산업계 의견: 정부의 정책을 지지하지만, 메탄 저감제 발굴 및 보급에 대한 적극적인 R&D 지원 및 정책 지원, 인센티브 지급, 분뇨처리시스템 개선, 혐기 발효조 (anaerobic digester) 지원 등의 정책 지원 필요성 강조

#### □ 미국 정부의 온실가스 감축 연구 개발 정책

##### (1) 2021년 1월 바이든 정부 온실가스 감축 정책

- 미국 정부에서 “탄소 은행” 운영: 정부는 농장에서 줄인 탄소 크레딧을 구매하여 유관 회사에 판매하여 탄소 배출을 상쇄하도록 함.

##### (2) 미국 California 주의 메탄 저감 정책 사례

- 미국은 주별로 정책이 다르며, California가 메탄 저감에 대하여 적극적인 정책을 펼침
- California Global Warming Solution Act 제정 (2006)
  - 1990년의 온실가스 발생량을 목표치로 설정하여, 2020년까지 목표치를 달성하도록 온실가스 발생량을 줄이는 법안
- Senate Bill 1383 제정 (2016)
  - 주 전체의 메탄 발생량을 2030년까지 40% 저감하는 법안. 이 법안은 2024년 1월 1일 이후 발효됨.

### 4) 스위스

- 'Mootral Ruminant'라는 메탄 저감제를 이용하여 세계 최초로 탄소 배출권을 인증받음
  - 스위스 Mootral 사가 개발: 마늘 분말 + 감귤 추출물
  - Mootral Ruminant credit = CO2 1톤 감축량에 해당하는 증서.
  - 메탄저감율: 홀스타인 24% 저감, 저지종 38%, 그 외 품종 25%로 품종에 따라서 저감률 차이

## II. 가축 사료 내 적정 단백질 수준 관련 선행 연구 조사 및 분석

### 1. 반추동물

□ 우리나라 및 주요 축산선진국이 제조·공급·이용하는 사료의 영양성분, 배합 비율 현황 등에 대한 실태조사 및 비교분석

○ 국내 제조 축우용 배합사료의 조단백질 현황

- 성장단계별 상위 5개 배합사료 업체 조단백 평균치 (2021년 6월 자료-농식품부 제공): 표 2-1. 2-2

표 2-1. 우리나라 고기소 배합사료 성장단계별 조단백질량

구분	조단백질 평균치, %
고기소임신우 (13개월령~분만이전)	13.2
번식용큰송아지 (6~12개월령)	15.0
비육용어린송아지 (생후3개월령이전)	18.4
비육용중송아지 (생후3개월령~체중250kg이하)	15.9
큰소비육전기 (체중250kg~500kg)	14.4
큰소비육중기 (체중500kg~600kg)	14.7
큰소비육후기 (체중600kg이상)	12.3

표 2-2. 우리나라 젖소 배합사료 성장단계별 조단백질량

구분	조단백질 평균치, %
건유기젖소 (건유기)	14.9
고능력젖소 (산유량40kg이상)	18.3
비유말기젖소 (비유6개월령~건유기이전)	16.9
비유중기젖소 (비유3개월령~6개월령)	17.8
비유초기젖소 (분만이후~비유3개월령)	18.7
젖소어린송아지 (생후3개월령이전)	17.7
젖소임신우 (임신~분만2개월령)	15.1
젖소중송아지 (3개월령~6개월령)	17.1
젖소큰송아지 (6개월령~임신이전)	16.5

○ 축산선진국 축우 사료의 조단백질 현황 조사: 표 2-3

- 고기소의 경우, 우리나라의 생산 방식은 축산선진국들의 방식과 매우 다름.
- 우리나라 한우의 경우, 이유 후부터 출하까지 배합사료와 조사료를 직접 급여하는 방식이지만, 대부분의 서양 방식은 출하 전 4~6개월 동안만 배합사료를 집중해서 급여하는 feedlot 기간을 갖고 그 이전에는 초지에 방목해 키우면서 미네랄/비타민이 포함된 프리믹스만 급여.
- 따라서 우리나라에 비교할 때 마무리 구간인 feedlot 사료만 비교 대상이 될 수 있음.

표 2-3. Feedlot 사료의 조단백 권장 수치 (미국 Cargill 제공)

Primary Grain	Protein Minimum % of DM
Dry processed corn or milo	12.5 - 13.5
Steam flaked corn or milo	13.0 - 14.0
Barley or wheat	13.0 - 14.0
HMC	12.5 - 13.5

- 우리나라는 한우의 고급육 전략으로 증체뿐 아니라 근내지방 강화를 목적으로 급여 프로그램이 설정되어 있음.
- 미국 NRC beef (2016) 기준 조단백 요구량
  - 미국의 경우 평균 1200~1300 lbs (545~590kg)에서 생후 약 20개월에 도축함.
  - Feedlot 시스템에서 300kg의 고기소에 대해 일당증체 1.7kg/d를 목표로 할 때 사료 내 조단백질 요구량은 15.8% DM이며 건물섭취량은 7.7kg임. 조단백질 섭취량은 하루 1.22kg임.
  - Feedlot 시스템에서 409kg의 고기소에 대해 일당증체 1.4kg/d를 목표로 할 때 사료 내 조단백질 요구량은 10.8% DM이며 건물섭취량은 9.8kg임.
- 한국한우사양표준 (2017)
  - 우리나라 한우사양표준에서는 거세우 육성 비육에 필요한 영양소 요구량을 제시할 때 조단백질의 수준을 12%로 고정한 후 건물섭취량과 에너지 요구량을 계산하였음.
  - 300kg의 거세우에 대해 일당증체 1.0kg/d를 목표로 할 때 사료 내 조단백질 요구량은 12% DM이며 건물섭취량은 7.6kg임. 즉 조단백 섭취량은 하루 0.91kg임. 위의 미국 feedlot 시스템에서의 300kg 고기소와 비교하면 약 0.3kg 적음.
- 미국 NRC dairy
  - 비유 중기 유량 35kg, 유지방 4.0%, 유단백 3.0% 일 경우, 건물 섭취 24.5kg이며 조단백 14.7% 제시.
- 한국젖소사양표준 (2017)
  - 대사단백질 기준으로 단백질 요구량을 제시하여 미국 NRC나 국내 제조 젖소 사료와 직접적인 비교가 어려움.
  - 비유 중기 유량 35kg, 유지방 4.0%, 유단백 3.0% 일 경우, 건물 섭취 23.4kg이며 대사단백질 2,406g/d 제시.
  - 단, 한국젖소사양표준(2017)의 표 3-4를 보면 한 예시로서, 산유량 30kg/d일 때 조단백질의 요구량은 14.3%, 산유량 40kg/d일 때는 조단백질 요구량 15.5%로 제시하고 있고 이는 미국 NRC dairy와 비슷한 조단백 함량이다.

□ 반추동물 질소 대사 및 사료 내 질소가 환경에 미치는 영향

- 질소는 반추동물의 성장과 생산성에 필수적인 영양소임

- 반추동물로부터 질소는 질산염, 아산화질소, 암모니아 형태로 배출되어 환경에 영향을 미침
- 반추동물은 상대적으로 다른 경제동물들에 비해 사료의 질소를 비효율적으로 이용함
  - 북미와 북유럽 젖소의 우유로의 질소 이용효율은 각각 평균 25%와 28%로 나타남 (Huhtanen and Hristov (2009).
  - 비육우의 경우는 더 낮아서, 사료의 질소가 체중 증가로 가는 효율이 14%라는 보고도 있음 (Hristov et al., 2011).
- 동물의 체조직이나 우유로 전이되지 않은 질소는 분과 뇨로 빠져나가서 토양, 하천, 공기를 오염시킴 (Külling et al., 2001; Hristov et al., 2011).
- 따라서 반추동물에게 과도하지 않고 적절한 사료 단백질을 공급하는 것과 반추동물의 질소 이용률을 높이는 기술은 사료비 절감뿐 아니라 환경 오염을 줄인다는 측면에서 필요함
- 반추가축의 사료 단백질은 반추위 분해 단백질 (rumen degradable protein: RDP), 반추위 미분해 단백질 (rumen undegradable protein: RUP), 비단백태질소원(non protein nitrogen: NPN)으로 구분 가능함 (그림 2-1).
  - 사료 단백질 수준이 높을수록 뇨로 배설되는 질소 농도가 급격히 증가함
  - 사료 단백질 CP 수준과 아울러 RDP, RUP 적정 함량을 고려할 필요가 있음
  - 보호 아미노산 (protected amino acid) 공급에 의한 사료 단백질 수준 저감 방안이 필요함

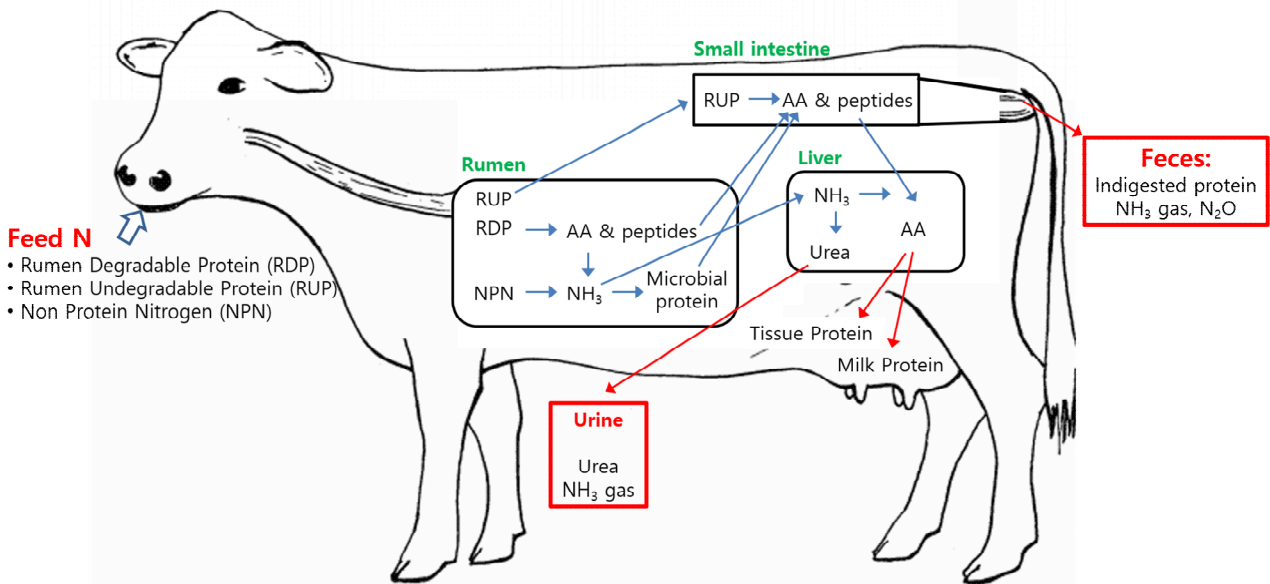


그림 2-1. 반추가축 질소 대사 및 배설 경로

- 축산으로부터 배출되는 암모니아(NH3)는 공기와 수질 오염의 주요 원인임. 암모니아는 부영양화, 토양 산성화, 미세먼지 증가 등에 영향을 미침 (USEPA, 2004).
- 반추동물의 경우, 사료로 공급되는 단백질은 상당 부분이 반추위 내에서 미생물에 의해 분해되고 암모니아가 생성됨.
  - 미생물에 의해 이용되고 남은 암모니아는 반추위 벽으로 흡수되어 간으로 이동되고 간에서 요소로 전변됨 (Reynolds and Kristensen, 2008).
  - 사료 내 단백질의 함량이 많을수록 반추위 암모니아 생성을 증가함 (Reynolds and Kristensen, 2008).
  - 생성된 요소는 미생물의 성장을 위해 반추위로 재분비되거나 분뇨로 배출됨
- 분뇨로 배출되는 질소의 60~90%는 요소의 형태임 (Bristow et al., 1992)



- 뇨로 배출된 요소는 그 자체로 휘발성이 있지는 않으나 분뇨에 있는 요소 분해 효소와 만나면 상당히 빠르게 암모니아로 가수분해가 됨 (Bussink and Oenema, 1998).
- Lee et al. (2009)의 연구에 따르면 분뇨에 있는 요소의 80%가 24시간 이내에 암모니아로 분해되고 이는 휘발성을 띠므로 공기 중에 배출됨 (Lee et al., 2009)
- 공기 중으로 배출된 암모니아는 황과 질소 산화물과 화학반응을 일으키고 황산암모늄 (ammonium sulfate), 중황산암모늄 (ammonium bisulfate), 또는 질산암모늄을 생성함 (그림 2-2).
- 이들 물질은 PM2.5 (particular matter 2.5)로 지정된 초미세먼지임.
- 암모니아는 토양 미생물에 의해 산화되어 아산화질소(N<sub>2</sub>O)로 전변됨 (Wu et al., 2020).
- 아산화질소는 강력한 온난화 가스 중 하나로 지구 온난화에 미치는 영향이 같은 양의 이산화탄소보다 298배 높은 것으로 알려져 배출된 질소는 환경 오염의 원인이 되고 있음 (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)

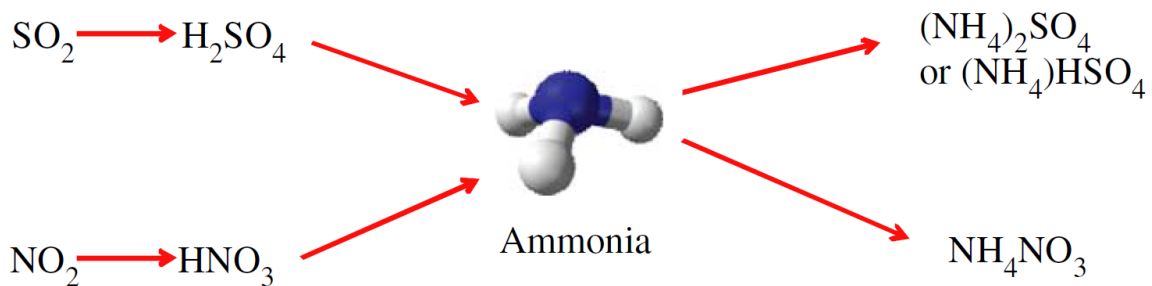


그림 2-2. 암모니아가 미세먼지화 되는 과정 (Hristov et al., 2011)

□ 반추동물에서 적정단백질 사료 및 단백질 이용성 증진 연구

- 젖소에서 우유 단백질을 생산하는 데 있어 가장 효율적이고 질소 배출을 최소화하는 방법은 사료 단백질의 양을 NRC (2001) 권장량 미만으로 급여하는 것임 (Huhtanen and Hristov, 2009)
- 사료 내 단백질의 양이 늘어날수록 분뇨로 배출되는 질소의 양이 늘어나고 우유로 이행되는 질소의 비율이 낮아짐 (Olmos Colmenero and Broderick, 2006) (표 2-4)
- 사료 내 단백질의 양을 동물의 실제 영양소 요구량보다 적게 급여하면 건물섭취량, 유생산량 및 유 단백질이 저하됨.
- 이를 개선하기 위해 단백질의 양을 줄이되, 반추위 보호 아미노산의 첨가가 요구됨.
- 적정 단백 사료는 필수 단백질이 무엇이고 어느 수준까지 단백질을 줄여도 괜찮은지 목표치를 정하는 것이 중요함.

표 2-4. 사료 내 조단백질 함량에 따른 질소 배출량과 질소 이용률 변화 (Olmos Colmenero and Broderick, 2006)

항목	사료 내 조단백질 함량				
	13.5	15	16.5	17.9	19.4
질소 섭취량, g/d	483	531	605	641	711
우유 내 질소, g/d	173	180	185	177	180
총 분뇨 질소, g/d	309	316	376	410	467
분 질소, g/d	196	176	186	197	210
뇨 질소, g/d	113	140	180	213	257
우유로의 질소 이용률, %	36.5	34	30.8	27.5	25.4

○ 축우와 양돈에서 조단백 함량 감소가 암모니아 배출에 미치는 영향 비교 (그림 2-3)

- 사료 내 조단백 함량의 감소에 따른 암모니아 배출감소의 정도가 양돈보다 축우에서 더 큰 것으로 나타남

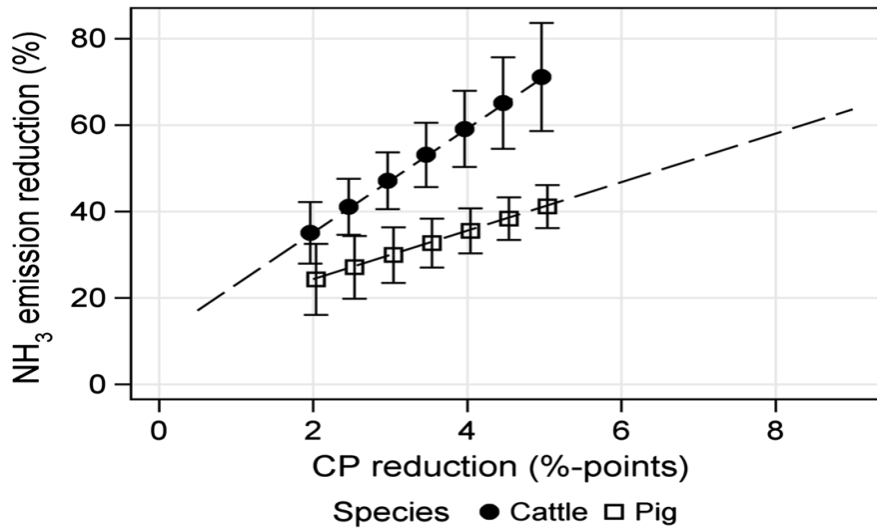


그림 2-3. 축우와 양돈 사료 내 조단백 함량 감소가 암모니아 배출감소에 미치는 영향 비교 (Sajeev 등, 2018)

○ 사료 에너지 수준에 따른 질소 이용효율

- 사료 전분 함량이 증가하면서 우유 내 진정 단백질 함량이 증가하였고, 질소 사용 효율 (nitrogen usage efficiency, NUE, 우유 내 질소 kg/질소 섭취량 kg)도 0.25에서 0.30으로 증가함 (그림 2-4).
- 사료 에너지와 질소 함량 비율의 중요성: 비유 진정에너지 (net energy for lactation) 증가는 유단백 함량을 증진시키는 반면, 노를 통한 질소 배설 감소를 유도함 (네덜란드 와게닝겐 대학 J. Dijkstra 교수 발표 자료, 2차 한국반추위 미생물연구회 국제 Webinar, 21.08.27)

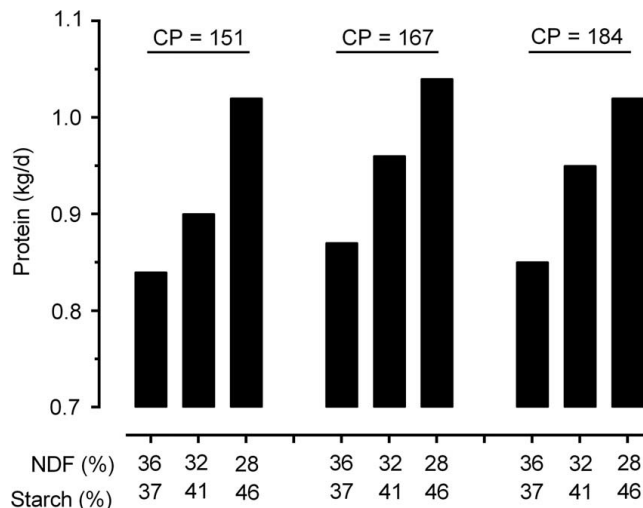


그림 2-4. 사료 내 조단백 함량과 전분, 비소화성 섬유질 함량이 우유 진정 단백질에 미치는 영향 (Broderick, 2003).

- 저단백 사료를 급여하면 부족한 아미노산을 보호 아미노산 형태로 첨가, 급여할 필요가 있음 (Hristov)

and Giallongo, 2014).

- 대사단백질이 13% 부족한 젖소에게 반추위 보호 히스티딘을 급여하였을 때, 건물섭취량과 유량이 증가하였음 (Lee 등, 2012).
  - 대사단백질이 5% 부족한 젖소에게 반추위 보호 히스티딘과 메치오닌을 급여하였을 때 건물섭취량과 유단백질의 증가하였음 (Giallongo 등, 2015).
  - 대사단백질이 3% 부족한 사료를 공급하였을 때 젖소에서 섭취량, 사료효율, 유량, 유단백질량이 감소하였고, 이 사료에 반추위 보호 라이신, 메치오닌, 히스티딘을 함께 급여하였을 때 유량이 회복되었음 (Giallongo 등, 2016).
- 7~18개월령 홀스타인 거세우를 대상으로 농후사료의 조단백질 수준을 대조구는 초기 17.2%, 후기 14.5%, 실험구는 초기 14.4%, 후기 11.4%로 급여하였고, 실험구에는 반추위 보호 메치오닌, 라이신을 추가 급여하였음. 그 결과, 비육 능력에 영향 없이 질소 배출량이 159(g/day)에서 132(g/day)로 17% 감소하였음 (Kamiya et al. 2021) (표 2-5).

**표 2-5. 비육우에서 조단백질 함량에 따른 평가 요소와 질소 배출량**

	Control	Low CP
평균 DMI, kg/day	9.4	9.5
최종 체중, kg	708	697
일일섭취량, kg/day	1.37	1.33
사료효율, kg gain/kg DMI	0.147	0.140
13개월령 질소 섭취, g/day	213	172
13개월령 질소 배출량, g/day	159	132
도체중, kg	387	381

- 한우 비육우에서는 저단백질 사료 연구가 아직 거의 없으며, 주로 조단백질 함량을 높이는 연구가 진행되고 있음.
- 한우 거세우에서 농후사료의 조단백질 수준을 대조구는 육성기; 14%, 비육 전기; 13% 및 비육 후기; 11%, 처리구는 육성기; 16%, 비육 전기; 15% 및 비육 후기; 14%로 했을 때 조단백질 수준을 증가시킴에 따라 도체의 근내지방도, 육질등급, CIE 값의 명도, 올레인산, 단일불포화지방산의 개선 효과가 나타남 (Kim 등, 2013).
- 한우 거세우에서 CP 12%를 급여한 실험구보다 CP 14%를 급여한 실험구가 일당증체량과 사료요구율, 등지방두께, 배최장근단면적, 근내지방도, 지방산 함량 등에서 유의적으로 높았음 (Jeong 등, 2010).
- 2019년도 건국대학교 이윤희 박사학위논문에 따르면 한우 거세우에서 과거의 권장 수준인 CP 12%와 최근 KFSKC(2017)와 NRC(2000)가 권장하고 있는 CP 15% 함량의 사료를 급여했을 때의 차이를 비교해보면 높은 CP 수준에서 증체량 증가, 분뇨 암모니아 가스 배출량 증가, 총질소 배출 함량 증가가 유의적으로 나타났고, 혈청 콜레스테롤 증가, 육량등급 감소, 육질등급 증가, Longissimus muscle area(LMA) 증가, 사료비용 증가, 순이익 증가에서 경향성을 나타냄. Lee 등(2020) 논문에서 그 일부를 확인할 수 있음.
- 질산염을 사용하면 반추위 미생물 성장에 암모니아를 제공하여 사료 내 단백질 요구량을 감소시킴 (Patra, 2016).
- 일본 육우사양표준(JFSBC, 2000)에서는 반추위 내 발효를 최대화하기 위한 CP 함량을 건물기준 11%

로 하고 있고, 사료 섭취량과 사료 에너지의 이용효율을 최대로 하고 육질을 포함한 고기 생산성을 위해서는 CP 함량 12%가 합리적이라고 권장하고 있음.

- 일본은 MAFF 지원을 통해 2017년 이래로 축산 분야에서 기후변화 완화 기술 개발을 목적으로 연구 과제를 시작했으며, 아산화질소와 질소 배출량을 줄이기 위한 영양학적 관리 연구가 진행되고 있음.
- 미국은 축산 분야로부터 유래되는 온실 가스양은 적으나 질소량은 상당하여, 단백질 비중 조절, 분뇨 관리 조절 정책을 바탕으로 질소 이용률 향상을 위한 연구와 최적의 아미노산 첨가를 위한 연구 등을 진행하고 있음. 낙농 분야에서는 환경에 미치는 질소의 영향력을 낮추기 위해 질소 배출량 감축과 분뇨로부터의 암모니아 유출 감축이 요구되고 있음.
- 젖소에서 저단백 사료에 반추위 보호 아미노산을 보충하였을 때 질소 이용률을 향상시키는 동시에 유량과 유단백질량이 상승하였음 (Lee et al., 2012).
- 사료 중 대두박(SBM)을 옥수수 주정박(DG)으로 대체하는 연구에서 DCAD(Dietary cation and anion difference)가 192(mg/kg)에서 65(mg/kg)로 감소하였음 (Morris et. al., 2018; Lee et al., 2020). (표 2-6).

**표 2-6.** 사료 원료에 따른 분뇨의 특성 및 DCAD 함량

	SBM	DG
Fresh manure		
Feces : urine	1.6	1.9
Manure, kg/d	82	79
Manure N, g/d	478	419
Fecal N contribution, %	40	45
Urinary N contribution, %	60	55
Urine pH	8.5	7.5
<b>DCAD (mg/kg)</b>	<b>192</b>	<b>65</b>

- DCAD(Dietary cation and anion difference)의 감소는 소변 pH의 감소와 암모니아 배출 저감을 야기하고 유실되는 질소량을 감소시킴. 6일 동안 누적된 암모니아 배출량은 대조구와 비교 시 15% 감소하였음 (Zynda et al., 2021; unpublished). 이에 관한 추가 연구가 필요함
- 네덜란드는 1,500만 톤의 우유를 생산하고 100만 마리 이상의 젖소를 사육하는 국가로, 유럽에서 우유 생산량이 세 번째로 많은 국가임(2019년). 1990년대 중반까지 낙농 분야에서 연간 35만 톤 이상의 질소를 배출하였으나, Minerals Accounting System(MINAS) 규제와 우유 쿼터제 등을 실시하면서 현재 질소 배출량이 30만 톤 이하로 감소함.
  - MINAS는 1998년 네덜란드 정부가 농장에서 생성된 잉여 영양소를 기준으로 모든 농부에게 세금을 부과한 제도로, 유럽 공동체(EC) Nitrate Directive를 준수하기 위해 도입됨. (Ondersteijn et al., 2002)
- 동물 배설물을 원료로 한 비료에서 발생하는 질소 배출량은 2000년대부터 지속해서 감소하다가, 2010년 이후로 증가하였으며, 우유 내 요소 함량은 감소하고 있음.
- 질소 배출에 있어서 단백질 공급이 핵심 요인이거나 에너지와 질소의 비율이 중요하므로 질소의 함량 뿐만 아니라 에너지 공급률도 고려해야 함. 에너지 함량의 증가는 유단백질 생산량을 증가시키고 요 내 질소 배설을 감소시킬 수 있음(Daniel et al., 2016)
  - 대사 가능한 단백질 함량에 대한 반응은 에너지 함량에 따라 달라짐. 균형 잡힌 반추위 질소 및 에너지 공급 상황에서 건물섭취량이 많은 젖소는 반추위 분해성 단백질에 대한 낮은 발효 에너지 비율을 권장함

- 반추위 미분해 단백질 (rumen-undegradable protein: RUP) 공급을 통한 질소 배설량 감축 효과
  - 반추위 보호단백질 (rumen-protected protein) 또는 반추위 바이패스 단백질 (rumen-bypass protein) 또는 반추위 미분해 단백질 (rumen-undegradable protein: RUP) 공급을 통한 질소 배설량 저감
    - 반추위분해단백질 과잉 공급은 질소 배설량을 높음(Twigge와 van Gils, 1984).
  - Reynal and Broderick (2005)의 실험에 의하면, 반추위 미분해 단백질(RUP)을 30에서 38%까지 높였을 때 젖소의 뇨에서 요소의 배출이 두 당 하루 240g에서 163g까지 약 32% 감소함 (표 2-7)
    - 같은 실험에서 사료 내 RUP가 높아질수록 반추위에서 암모니아 생성이 점차 낮아짐 (그림 2-5)
  - 사료 내 RUP 함량이 30%에서 60%로 증가하면 질소 이용률이 13.5% 증가함 (표 2-8).
- ⇒ 바이패스 발효 대두박 등의 RUP 급여로 질소 이용률을 높여서 질소 배설량을 줄일 수 있을 것임

표2-7. 젖소에서 반추위미분해단백질 증가 시 요소 배출량 변화

	A	B	C	D
조단백질, %	18.8	18.3	17.7	17.2
반추위분해단백질 (RDP), %CP	70	67	66	62
반추위미분해단백질 (RUP), %CP	30	33	34	38
뇨 요소태 질소, g/d	240	216	195	163

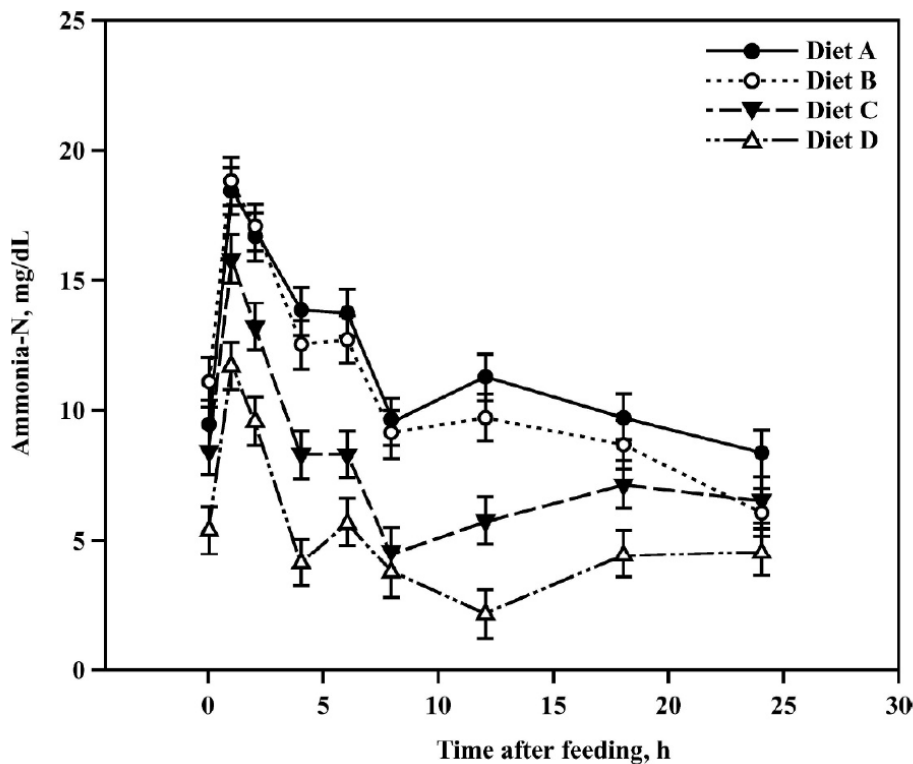


그림 2-5. 사료 내 RUP 증가에 따른 반추위 암모니아 생성 변화

**표 2-8.** 사료 내 반추위 미분해 단백질(RUP) 함량이 Fresian×Jersey의 질소 배설량과 질소 이용률에 미치는 영향 (Rehman 등, 2020)

항목	사료 내 RUP 함량(%)			
	30	40	50	60
질소 섭취량, g/d	326.10	326.45	327.80	303.36
분 질소배출량, g/d	96.00	86.90	78.02	66.35
질소 흡수량, g/d	230.10	239.55	249.78	237.02
노 질소배출량, g/d	141.11	135.85	138.72	131.51
Net 질소량, g/d	88.98	103.70	111.06	105.51
총 질소량 (사료 대비 %)	27.28	31.75	33.86	34.78
우유 내 질소량, g/d	63.31	73.48	79.80	99.93
<b>질소 효율, %</b>	<b>19.42</b>	<b>22.57</b>	<b>24.34</b>	<b>32.92</b>
N retained, g/d	25.67	30.23	31.26	5.58

□ 조단백질 감축에 따른 질소 배설량, 암모니아 배설량 및 아산화질소 배설량 감축 효과

(1) 한•육우 질소 배설량 연구사례

○ 한우 질소 배설량 연구사례

- 자료가 없음

○ 육우에서 사료 단백질 저감 시 질소 배설량 저감 정도

- 홀스타인 거세우에서 사료 단백질 2% 저감 시 총 질소배출량이 9개월령에서는 6.9%, 13개월에서는 12% 감소함 (표 2-9)

- 육용 잡종(British X Continental) 거세우의 사료 내 단백질 1.5% 저감 시 총 질소배출량이 21% (13% → 11.5%) 및 17% (11.5% → 10%) 감소함 (표 2-10)

⇒ 육우 연구 종합: 사료 단백질 1% 저감 시 총질소 배설량이 평균 6.4% (3.4 - 10%) 감소함

**표 2-9.** 홀스타인 거세우의 사료 내 단백질 2% 저감 시 질소 배설량 및 흡수량 변화

항목	9개월령		13개월령	
	Low CP (18%)	High CP (20%)	Low CP (12.5%)	High CP (14.5%)
총 질소배출량, g/d	176	189	155	176
분 질소배출량, g/d	77.5	82.6	70.4	65.6
노 질소배출량, g/d	99.3	106	85.1	111
질소 배출: 질소 배출률, %	75.3	78.5	82.3	78.3
질소 흡수: 질소 흡수율, %	24.7	21.5	17.7	21.7
질소배출량 변화, g/d	-13 (-6.9%)		-21 (-12%)	

(Kamiya et al., 2020)

**표 2-10.** 육용 잡종(British X Continental) 거세우의 사료 내 단백질 1.5% 저감 시 질소 배출량 및 흡수량 변화

항목	평균체중 525kg		
	CP 10%	CP 11.5%	CP 13%
총 질소배출량, g/d	102	123	160
분 질소배출량, g/d	42.4	38.5	65.3
뇨 질소배출량, g/d	60.3	84.4	94.2
질소 배출: 질소 배출률, %	86	88.1	91.5
질소 흡수: 질소 흡수율, %	14	11.9	8.5
질소배출량 변화, g/d		-21 (-17%)	-37 (-23%)

(Cole et al., 2006)

**(2) 젖소 착유우 질소 배출량 연구**

- 사료의 조단백질 함량을 16%에서 13%로 줄였을 때, 유성분과 유량에 영향 없이 질소 배출량이 25% 감소했으며, 슬러리에서 아산화질소 배출량이 50% 감소했음 (Higuchi et al, 2019) (**표 2-11**).
- ⇒ 착유우에서 사료 단백질 1% 저감 시 질소 배출량은 8.3%, 슬러리에서의 아산화질소 배출량은 각각 16.7% 감소함

**표 2-11.** 젖소에서 조단백질 함량에 따른 평가 요소와 질소 배출량

	CP 16%	CP 13%
건물섭취량, kg/day	18.7	19.4
유량, kg/day	23.9	24.6
건물 소화율, %	72.8	67.9
질소균형, g N/kg0.75/day		
섭취	3.74	3.23
분	1.31	1.25
뇨	1.04	0.05
분뇨+암모니아 손실	2.47	1.84

**(3) 조단백질 함량 감소에 따라 분뇨의 암모니아 감축량**

- 축우 사료 내 조단백질 함량 감소에 따라 분뇨의 암모니아와 총 암모니아성 질소 배출이 감소함 (**표 2-12**)
- 메타분석 결과, 사료 내 조단백질 함량 1% 감소에 따라 암모니아 배출은 평균 17.3% 감소함 (n: 18, 최대: 25.8%, 최소: 12.9%)
- 조단백 함량 감소와 축우의 암모니아 배출과 간에 매우 밀접한 상관이 있음 ( $R^2 = 0.80, p < 0.05$ )

**표 2-12.** 여러 종류의 분뇨처리 방법에서 사료 내 조단백 감소에 따른 축우 분뇨의 암모니아와 총 암모니아성 질소 배출감소 효과에 대한 메타분석 (Sajeev 등, 2018).

참고문헌	사료 조단백 감소량 (%) <sup>1</sup>	측정장소	암모니아 감소량 (%)	총 암모니아성 질소 감소량 (%)	암모니아 감소량 (환산, %) <sup>2</sup>	총 암모니아성 질소 감소량 (환산, %) <sup>2</sup>
Agle 등, 2010	2.0	Storage	27	29	13.5	14.5
	2.5	Storage	38	39	15.2	15.6
Arriaga 등, 2010	1.8	Housing	32	22	17.8	12.2
	2.8	Housing	34	22	12.1	7.9
Frank 등, 2002	4.6	Housing	66	-	14.3	-
	4.8	Housing	62	-	12.9	-
James 등, 1999	1.4	Storage	28	19	20.0	13.6
Koenig 등, 2013	2.0	Housing	45	-	22.5	-
	1.4	Housing	22	-	15.7	-
Ku'lling 등, 2001	2.5	Storage	47	46	18.8	18.4
	2.5	Storage	48	42	19.2	16.8
	2.5	Storage	41	52	16.4	20.8
	2.5	Storage	48	49	19.2	19.6
	5.0	Storage	69	74	13.8	14.8
	5.0	Storage	73	70	14.6	14.0
Lee 등, 2012	1.9	Application	49	24	25.8	12.6
	1.9	Storage	47	38	24.7	20.0
Misselbrook 등, 2005	5.0	Application	70	67	14.0	13.4

<sup>1</sup>사료 조단백 감소량은 각 논문에서 사용한 사료 간의 비교치임.

<sup>2</sup>사료 조단백 감소량을 1%로 환산했을 때의 감소량.

원본 자료에서 편차가 큰 2건은 삭제



## 2. 양돈

### □ 양돈 단백질 대사

- 2020년 1월 1일 축산법이 개정되었음.
- 가축전염병에 대한 안전성 확보를 위한 사료의 허가·등록 요건의 강화 및 축산 환경 개선에 대한 관리 강화가 주요 내용이었음. 특히 사육환경 분야에서 돈사내 암모니아 가스 농도의 법적 기준 적용 여부가 크게 논란이 되었음
- 냄새 민원 최소화를 위해 사육환경의 개선을 요구하는 제도적인 변화는 지속 가능한 축산업의 발전을 위한 명분으로 앞으로도 지속해서 대두될 것
- 사료 내 단백질 성분은 체내에 흡수되어 동물 세포를 구성하고, 다양한 효소와 호르몬의 주요 구성 성분이 되며 혈액 성분과 면역 형성 등에 직접 관여함
- 단백질은 가축의 성장단계별로, 유지, 성장, 번식 및 면역 등 조건별로 필요로 하는 개별 아미노산의 요구량이 다른 특징을 갖고 있어서, 과부족 없이 정확한 요구량을 설정하기가 까다로움
- 미국의 양돈 사양표준(NRC)은 약 10년을 주기로 각 분야에서 선발된 전문가가 세계의 최신 연구 결과를 검토하여 돼지의 영양소 요구량을 결정함. NRC (2012)에서는 돼지의 성장단계별로 제시되었던 영양소 요구량에서 조단백질 (CP, crude protein) 성분이 삭제되었음
- 이는 국내 양돈 연구자들에 의해 한돈 산업 및 축산정책에 반영되어, 사료관리법상 돼지 사료의 성분등록은 조단백질 함량이 최소치에서 최대치 (최대허용수준)으로 개정되었음. 법의 개정 취지는 양돈 사료 내 조단백질 함량을 성장단계별로 제한하여 축산에서 환경오염의 원인으로 지목된 질소 배출량을 줄이는 것임.

### □ 양돈에서의 저단백질 사료

- 돼지에서 사료 단백질 수준이 증가하면 뇨로 질소 배설량이 증가함 (그림 2-6)

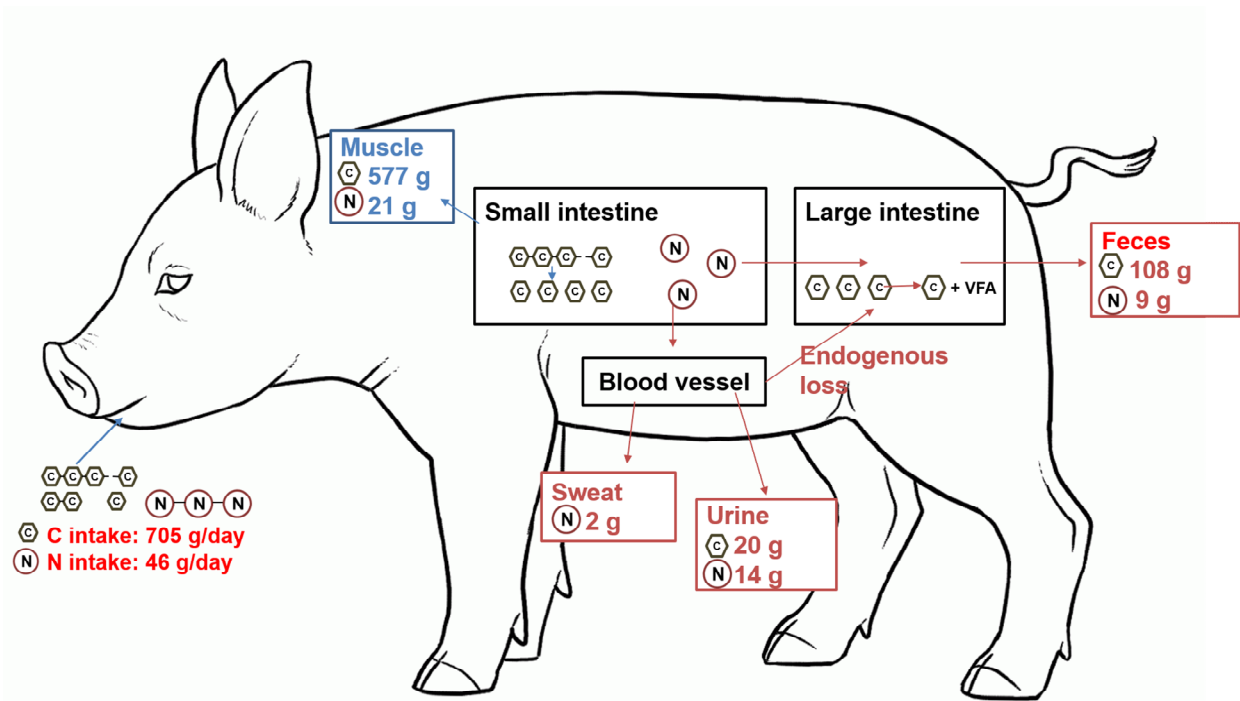


그림 2-6. 돼지 단백질 대사 및 질소 배설 경로: Jørgensen et al. (2013)

- 단백질은 탄수화물이나 지방보다 대사 과정에서 발생하는 열발생량이 높아서 사료 내 높은 수준의 단백질 함량은 대사에너지에서 정미에너지로의 전환 효율을 감소시킴. 이와 반대로, 지방은 소화 및 대사 과정에서 발생하는 열이 낮아서 사료 내 지방함량 증가를 통해 대사에너지에서 정미에너지로의 전환 효율을 향상시킬 수 있음 (표 2-13).

표 2-13. 대사에너지에서 정미에너지로의 전환 효율

항목, %	정미에너지:대사에너지	
	육성돈(45 kg)	비육돈(103 kg)
탄수화물	80	83
설탕	76	81
단백질	66	76
지방	88	94
섬유소	60	62

(Noblet et al., 1994)

- 돼지 사료 내 단백질 함량을 감소시키면 요구량을 충족시킬 수 있도록 필수 아미노산이 추가로 충분히 공급되어야 함.
- 사료 내 단백질 함량이 낮아져도 증체 및 사료효율에 영향 없이 질소 배출을 감소시킬 수 있음. 아울러, 오줌을 통한 과잉의 질소 배출에 필요한 에너지와 열로 손실되는 에너지를 절약할 수 있음.
- 과거 (그림 2-7) 저단백질의 제한은 돼지의 성장 또는 도체의 체조성에 부정적 영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 보고되었으며 (2000년 이전 문헌조사), 저단백질 사료에 대한 부정적 인식이 아직 양돈 농가에 남아 있음. 하지만 영양학 발전으로 인해 사육단계별 영양소 요구량, 원료평가, 그리고 적절한 설계 시 경제성·생산성 등에 영향을 주지 않으며, 장기적으로 환경부담 저감 사료의 사용이 중요하다는 것을 설득해야 할 것으로 사료됨

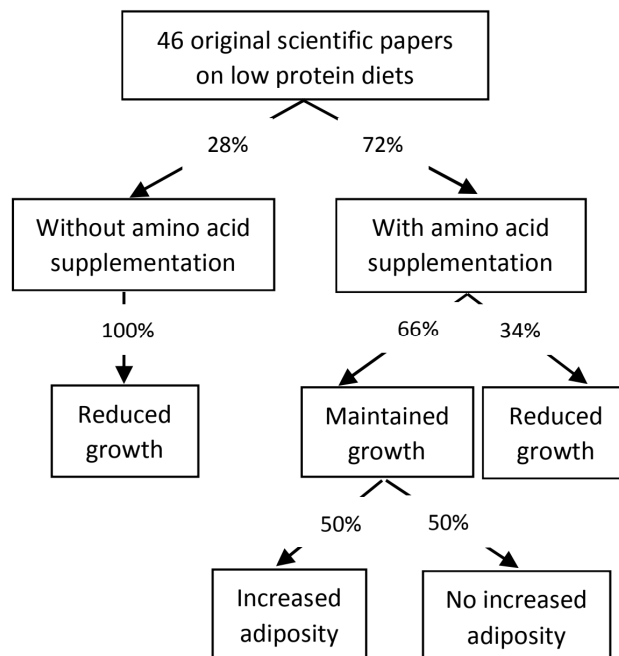


그림 2-7. 저단백 사료가 돼지의 성장성적, 도체 품질에 미치는 영향 (Le Bellego et al., 2001)

- 환경온도가 호흡을 통해 체온을 조절할 수 있는 임계 상한 온도를 초과하면 체내 대사열을 줄이기 위해 사료 섭취량이 감소함. 이때, 사료 내 단백질 수준의 감소는 열 발생을 감소시킬 수 있어서 에너지 손실을 막을 수 있음.
- 따라서, 사료 내 조단백질의 함량을 낮추면 조직에 축적할 수 있는 에너지와 증체를 위해 이용되는 에너지양을 높이고, 추가로 지방원료를 첨가하면 혹서기에 감소된 사료 섭취량을 보완하여 증체를 위해 필요한 에너지를 공급하는 방법이 될 수 있음.
- 실제로 사료 내 조단백질 수준을 4%로 낮추고, 에너지를 0.7 MJ/kg 높은 사료를 육성기와 비육기에 급여한 연구에서, 육성기 일당증체량은 20g 증가하였으며, 사료요구율이 0.2 정도 개선되었음. 비육기에는 그 효과가 더욱 확실하게 나타나, 저단백 고에너지 사료 급여를 급여하였을 때, 일당증체량이 40g 증가하였음 (Le Bellego and Noblet, 2002).
- 2013년 농촌진흥청 국립축산과학원의 연구에서 혹서기에 사료 내에 대두유를 첨가 (톤당 대두유 38 kg)하는 방식으로 에너지 수준을 3,400kcal/kg에서 3,600kcal/kg으로 높여 육성돈에게 급여한 결과, 사료 섭취량이 6.1%, 일당 증체량이 23% (820g → 1,008g) 증가하는 연구성과를 도출하였음.
- 돼지에게 기존의 고단백 사료 및 아미노산이 보충된 저단백 사료를 급여하였을 때 일당증체량 및 사료효율은 사료 내 단백질 수준의 영향을 받지 않음 (그림 2-8 및 2-9).

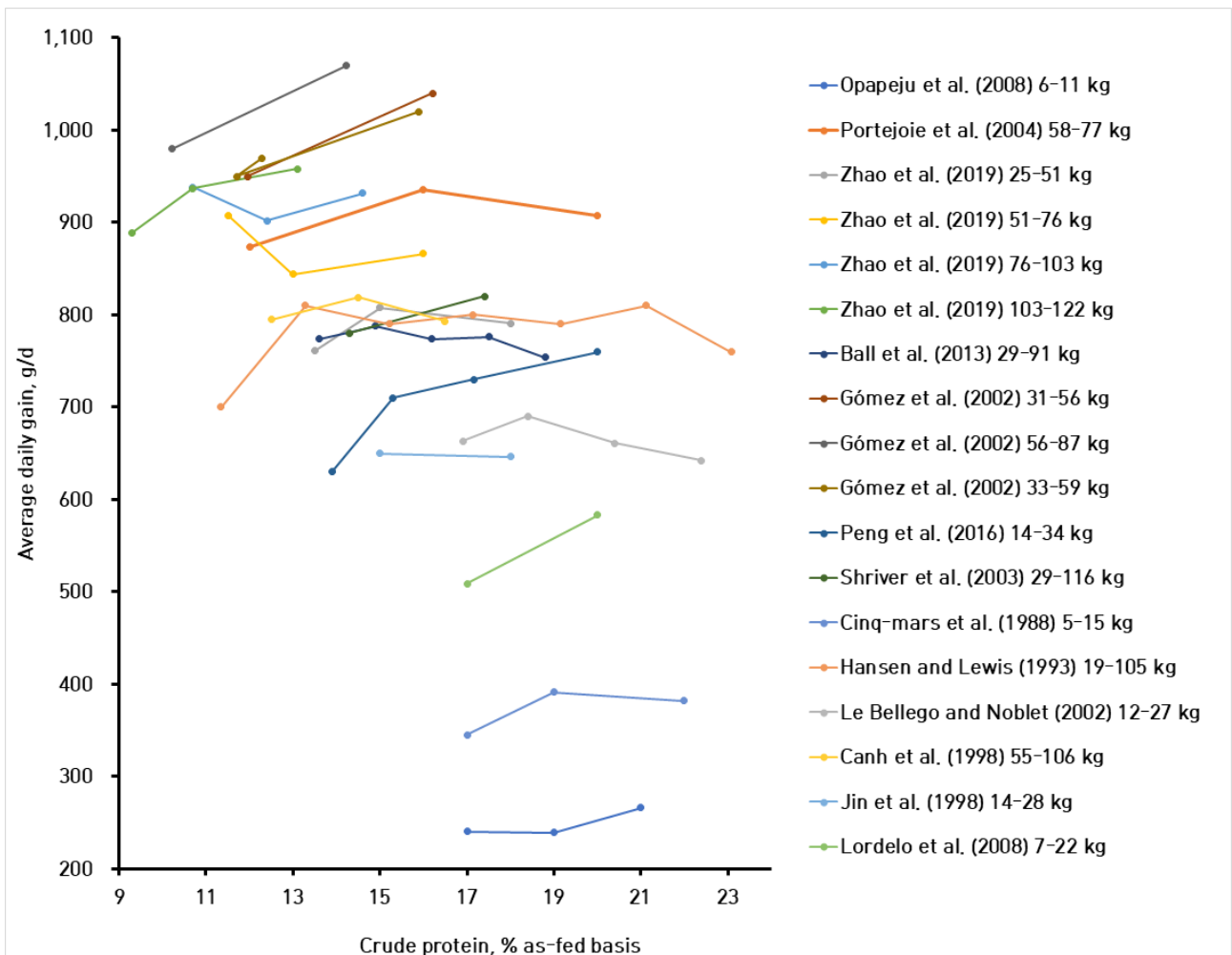


그림 2-8. 저단백 사료를 급이하였을 때 돼지의 일당증체량

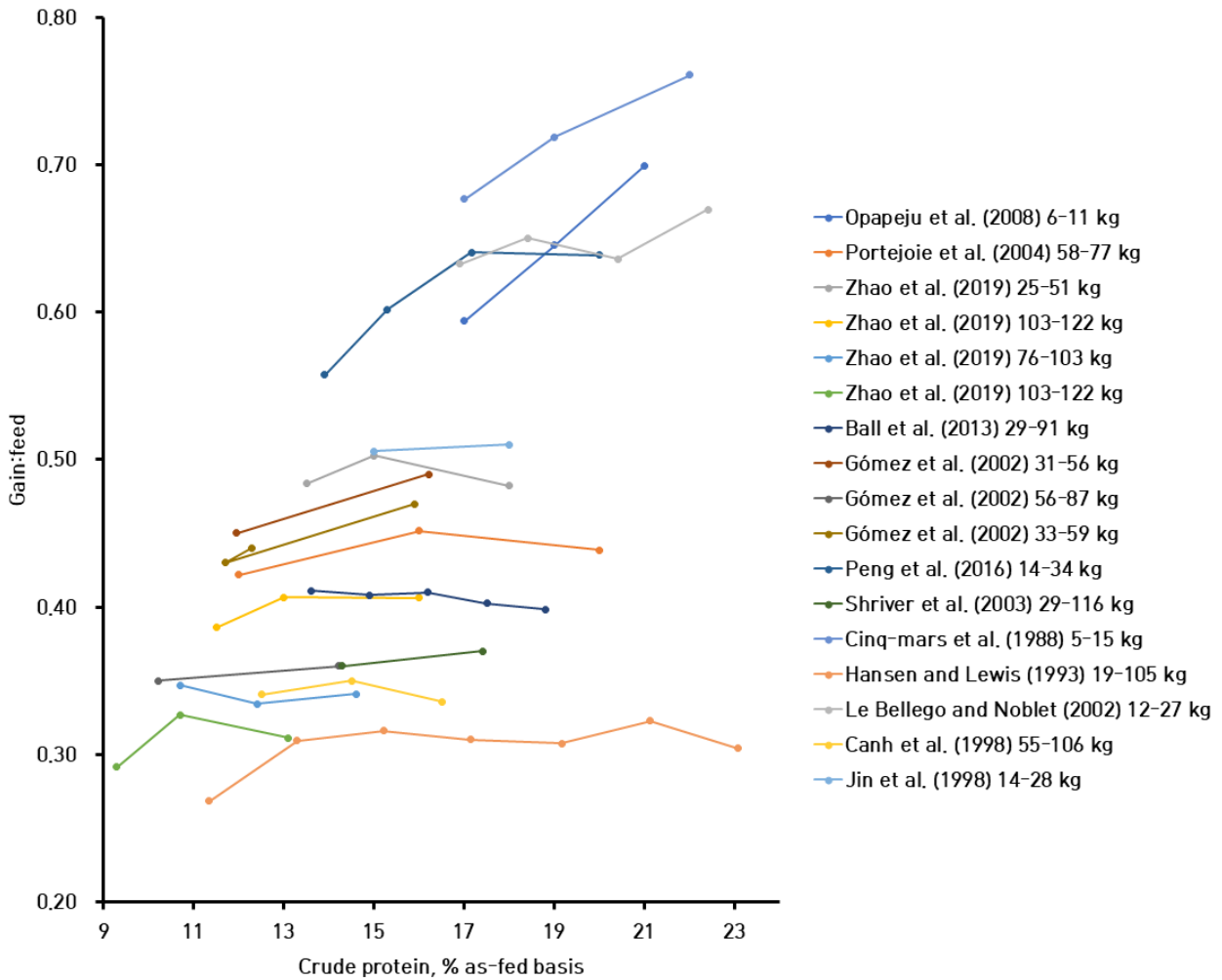


그림 2-9. 저단백 사료를 급이하였을 때 돼지의 사료효율

□ 일본의 아미노산 첨가 저단백질 사료, 양돈의 환경부하 경감

- 일본 농업연구기구의 보고에 따르면 아미노산을 첨가한 저단백질 사료의 급여는 돼지의 질소 배설량을 감소시키고 사료 생산에서 가축 배설물 처리까지의 이용 과정 전체에서의 온실가스를 20% 줄일 수 있음.
- 배설물 처리 배수에 포함된 질소량도 줄일 수 있으며, 오수처리 비용도 저하된다는 것을 제시하였음. 온실가스의 배출 삭감량을 매매하는 J-크레딧 (Japan Credit) 제도로 수입을 얻을 수 있어서 축산 농가에서의 메리트는 크다고 전망하고 있음.
- 저단백사료는 사료용 아미노산을 첨가하여 사료 중의 필수아미노산의 균형을 최적화함.
- 저단백질 사료의 경우 급여하는 단백질의 총량이 낮아져도 체내에서 충분한 단백질의 합성을 위한 아미노산은 요구량에 맞게 공급되어 증체를 저하시키지 않고 돼지가 배설하는 질소의 양을 줄일 수 있음.
- 배설물 처리에서 발생하는 온실가스 가운데, 주로 아산화질소가 감소함.
- 사료용 아미노산을 첨가한 저단백사료는 이미 판매되고 있음. 돼지의 질소 배설량을 저감해 그에 따른 온실가스가 줄어든다는 것을 확인하였음. 그러나 배설물 처리나 사료용 아미노산의 제조 등을 포함한 저단백사료의 이용 과정 전체로서의 온실가스 및 배수의 환경영향 평가는 실시되지 않았음.

- 라이프 사이클 평가 (LCA)라고 불리는 방법으로 기존의 배합사료와 저단백사료를 급여한 돼지를 대상으로 비교한 결과 온실가스를 20% 줄일 수 있었음
- 배설물 처리 배수 중 질소나 축사에서 생기는 암모니아 등에서 유래하는 물의 부영양화는 30% 감소한다고 평가했음
- 저단백사료는 사료용 아미노산의 비용을 포함해도 기존의 배합사료와 비교해 사료비는 같거나 저렴해짐

□ 사료 내 조단백질 감축에 따른 질소 배출량 감축 효과

- 양돈사료 내 단백질 1% 감축은 분 및 뇨 내 질소 함량 감소를 통한 분 및 뇨의 일일 질소 배출을 각각 3.8 및 9.4% 감축시킴 (표 2-14). 양돈사료 내 단백질 1% 감축 시 슬러리 내 질소 및 암모니아의 함량 각각 4.8 및 8.2%만큼 감소함.

표 2-14. 기존 고단백 사료 대비 조단백질 1% 감축에 따른 질소 배출량, 분뇨 내 질소 함량 및 슬러리 내 질소 및 암모니아 감축 효과

항목, %	개수	최소값	최대값	평균	표준편차
질소섭취량	23	1.9	10.4	5.6	2.0
분 내 질소함량	4	0.3	4.4	2.7	1.5
분 일일 질소배출량	23	-0.6	11.3	3.8	3.0
뇨 내 질소함량	6	0.9	10.8	5.8	3.0
뇨 일일 질소배출량	23	2.5	16.8	9.4	4.0
총 일일 질소배출량	23	2.7	12.9	7.7	3.0
슬러리 내 질소함량	6	1.9	8.5	4.8	2.3
슬러리 내 암모니아 함량	4	6.1	11.5	8.2	2.1

- 또한 양돈사료 내 단백질 1% 감소는 일일 총질소 배출을 7.7% 줄임 (그림 2-10).

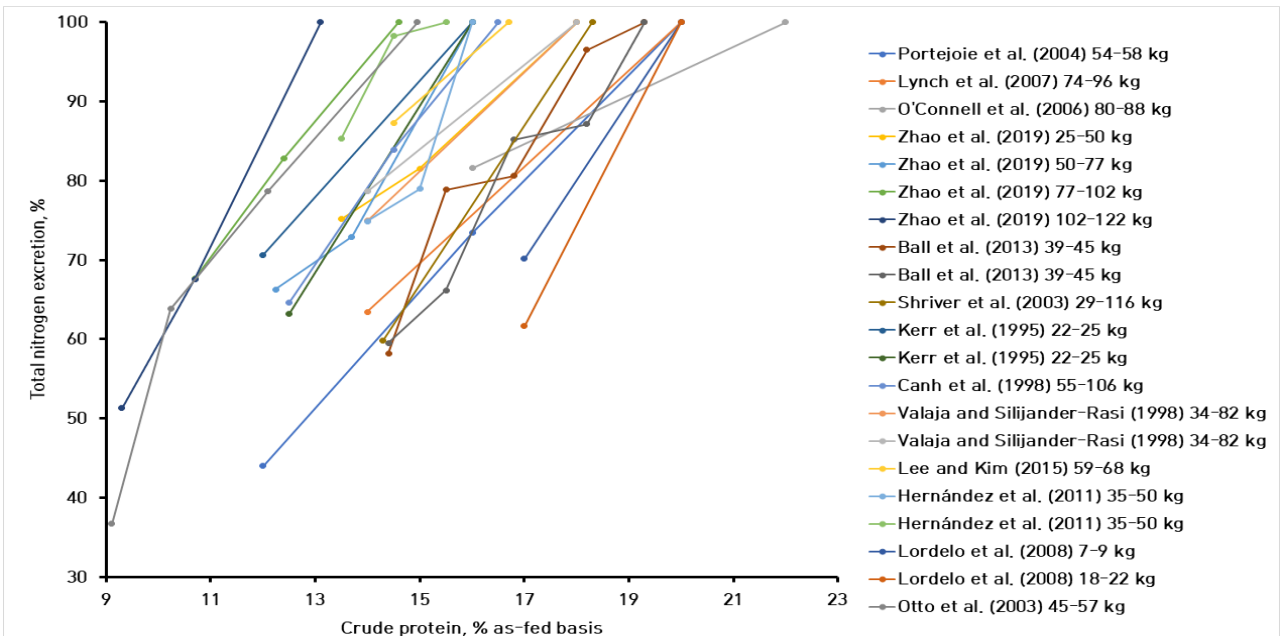


그림 2-10. 저단백 사료와 질소 배설량

- 양돈사료 내 단백질 1% 감소시 분내 질소 배출은 0.03 내지 0.34 g/d 줄어들고, 뇨 질소 배출은 0.35 내지 2.09 g/d 줄어듬 (표 2-15). 또한 단백질 감소는 질소 섭취량 및 흡수량 대비 질소 축적량을 각각 0.3% 내지 1.56% 및 0.68% 내지 2.10%씩 증가시킴.
- 사료의 단백질 함량을 감소시키면 환경부담이 감소하는 것으로 알려져 있음. 사료 내 단백질 1% 저감 시 분, 뇨 및 슬러리의 배설량과 질소 함량이 감소하여 암모니아의 발생량은 10~12%가 감소함 (표 2-16).

표 2-15. 체중별 사료 내 조단백질 1% 감축에 따른 질소배출량 감축 효과

항목	6 ~ 15 kg	15 ~ 30 kg	50 ~ 69 kg	74 ~ 97 kg
총 질소배출량, g/d	-0.38	-0.92	-2.21	-2.12
분 질소배출량, g/d	-0.03	-0.14	-0.34	-0.03
뇨 질소배출량, g/d	-0.35	-0.78	-1.88	-2.09
질소 축적량:질소 섭취량, %	1.05	0.63	1.56	0.30
질소 축적량:질소 흡수량, %	1.55	1.28	2.10	0.68

(Portejoie et al., 2004; Toledo et al., 2014ab; and Kim et al., 2021)

표 2-16. 사료 내 조단백질 1% 감축에 따른 분, 뇨 및 슬러리로의 질소 및 암모니아 배출량 감축 효과

항목	사료 내 단백질 1% 저감 시
분 배설량	-1.8
분 내 질소 함량	-2.4
뇨 배설량	-5.2
뇨 내 질소 함량	-5.1
슬러리 총량	-3.3
슬러리 내 질소 함량	-5.5
슬러리 내 암모니아 함량	-6.9

(Portejoie et al., 2004)

- 사료 내 단백질 함량 감소를 통해 총 질소배출량 및 슬러리 내 이산화탄소 및 아산화질소의 배출량을 줄여 연간 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>-eq) 배출량을 저감할 수 있음 (Portejoie et al., 2004). 하지만, 사료 내 조단백질 함량 감축을 통한 질소배출량 감소 효과와 온실가스 저감 효과 간의 상관관계 및 국내에서의 효용성에 관한 지적이 있어 향후 추가적인 실증이 필요함
- 사료 내 단백질을 낮춘 저단백 사료를 배합하기 위해서는 라이신, 메치오닌, 트레오닌 및 트립토판과 같은 필수 아미노산의 요구량을 충족시킬 수 있는 합성 및 결정 아미노산이 배합사료에 최소 0.10% 부터 많게는 0.83%까지 첨가되며, 합성 아미노산의 생산에 수반되는 이산화탄소 발생량은 5,493~20,008g/kg으로 높다고 알려져 있음 (표 2-17).

표 2-17. 양돈용 배합사료 내 단백질 수준 저감 시 아미노산 첨가에 따른 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>-eq) 발생량

Item	CP in diet, % as-is	Crystalline and synthetic AA supplementation in diet, g/kg				CO <sub>2</sub> -eq emission by including AA, 1,000 ton/year <sup>1</sup>
		L-Lysine (78.8%)	DL-Methionine (99.0%)	L-Threonine (99.0%)	L-Tryptophan (99.0%)	
CO <sub>2</sub> -eq, g/kg of AA <sup>2</sup> BW, kg	-	8,038	5,493	16,978	20,008	-

7~11kg	22.0	0.10	0.13	-	-	2.0
	21.0	0.19	0.16	0.02	-	3.6
11~25kg	20.0	0.29	0.19	0.07	0.02	6.5
	20.0	0.26	0.13	0.05	0.01	19.1
	19.0	0.36	0.16	0.10	0.03	30.1
25~65kg	18.0	0.45	0.19	0.15	0.04	39.8
	19.0	0.13	-	-	-	16.7
	18.0	0.22	-	-	-	28.2
65~115kg	17.0	0.32	0.02	0.05	-	56.4
	16.0	0.42	0.05	0.10	0.02	91.8
	16.0	0.07	-	-	-	15.1
	15.0	0.17	-	-	-	36.8
	14.0	0.27	-	0.05	0.01	86.7

AA = amino acids; BW = body weight; CP = crude protein.

<sup>1</sup>These values were calculated using the following equation: Total feed intake of each body weight range in Korea (1,000 ton per year; NRC, 2012; KPSMS, 2020) × CO<sub>2</sub>-eq, g/kg of diet × 1,000.

<sup>2</sup>Marinussen and Kool (2010); ILCD (2010).

- 국내 양돈용 배합사료 생산 시 7~11, 11~25 및 65~115kg에서 사료 내 단백질을 2% 그리고 25~65kg에서 사료 내 단백질을 3% 절감 시 사료 내 첨가되는 아미노산 생산 과정에서 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>-eq)가 연간 172,000톤 발생할 것으로 추정됨.
- 양돈선진국인 EU와 비교하였을 때, 국내 양돈 사료 내 단백질 함량은 과도하게 높다는 것을 알 수 있음 (표 2-18)

표 2-18. 한국과 EU의 양돈 사료 내 단백질 함량 비교

한국의 사료관리법 현황			덴마크의 현황*	핀란드의 현황*	한국과 비교
구분	체중	사료 내 단백질	사료 내 단백질	사료 내 단백질	단백질 함량
포유자돈	이유전	최대 23%		14.41%	-8.6%
이유자돈전기	체중 7~11kg	최대 21%	15.8%	13.06%	-5~8%
이유자돈후기	체중 11~25kg	최대 20%	16.23%		-3.7%
육성돈전기	체중 25~45kg	최대 19%	15.34%	15.5%	-3.5%
육성돈후기	체중 45~65kg	최대 18%	-		
비육돈전기	체중 65~85kg	최대 17%	14.61%	12.33%	-2.4~4.7%
비육돈후기	체중 85~출하	최대 16%	-		
번식용 웅돈	체중 25kg 이상	최대 14%	-		
번식용 모돈	체중 25kg 이상	최대 16%	13.01%		-3%
임신모돈	임신기간 모돈	최대 16%	-	11.20%	-4.8%
포유모돈	포유기간 모돈	최대 20%	-	13.48%	-6.5%

\* EU의 양돈사료 sample을 실제로 분석한 data (김유용, 2021)

### 3. 가금

#### □ 가금에서의 저단백질 사료

- 가금에서 사료 단백질 수준이 증가하면 분뇨로 질소 배설량이 증가함 (그림 2-11)

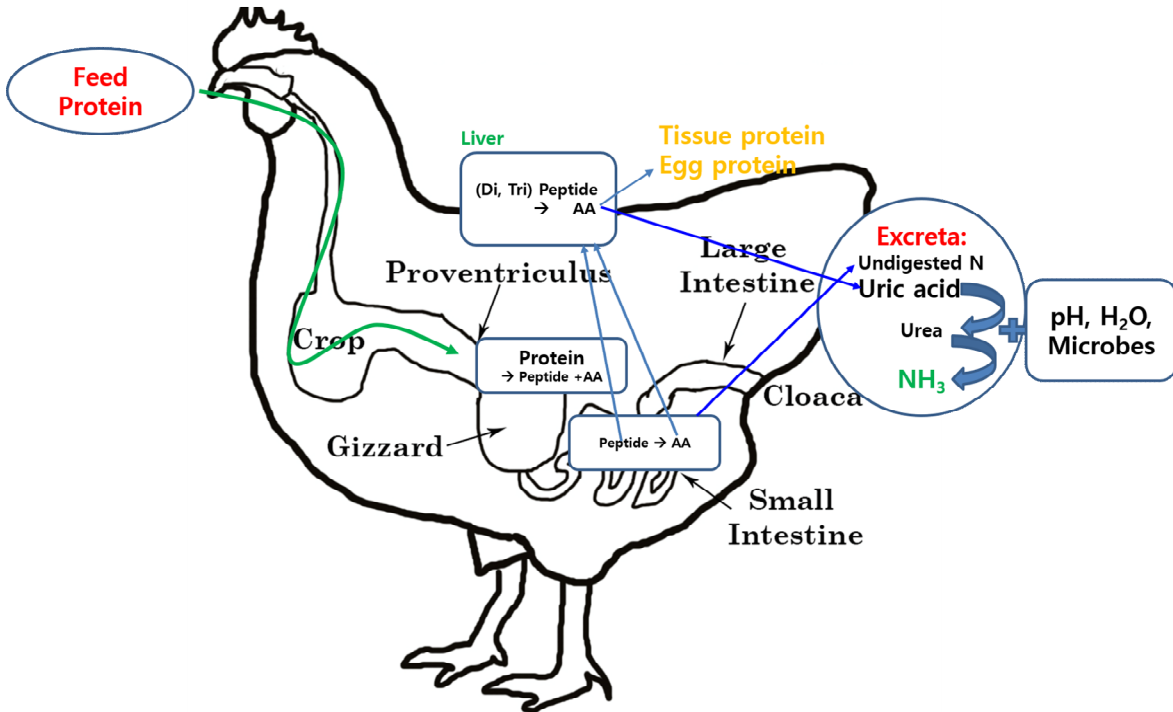


그림 2-11. 닭 단백질 대사 및 질소 배설 경로

- 배설계를 통해 배출된 가금의 분변은 요산으로 이루어져 있으며, 이는 암모니아 발생의 주원인임. 요산은 여러 단계의 미생물체 효소에 의한 축매반응을 통해 암모니아로 전환될 수 있음 (그림 2-12).

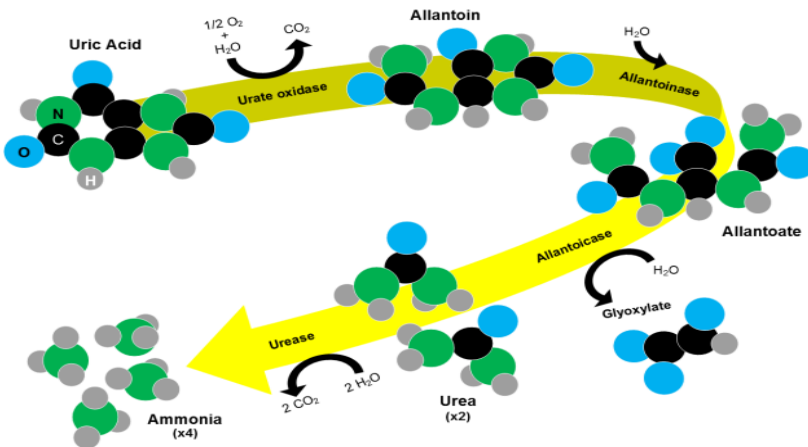


그림 2-12. 요산의 가수분해를 통한 암모니아 합성과정. 요산 1분자는 암모니아 4분자와 이산화탄소 3분자를 생성할 수 있음 (Lehninger et al., 1998).



- 육계 사료 내 아미노산 요구량을 충족시킬 수 있도록 필수 혹은 비필수 아미노산이 충분히 공급되면 사료 내 단백질 함량을 낮출 수 있음.
- 사료 내 단백질 함량을 증체량의 감소나 체내 질소평형에 영향을 미치지 않는 수준까지 낮추면 질소 배출을 감소시킬 수 있음 (그림 2-13 및 2-14)

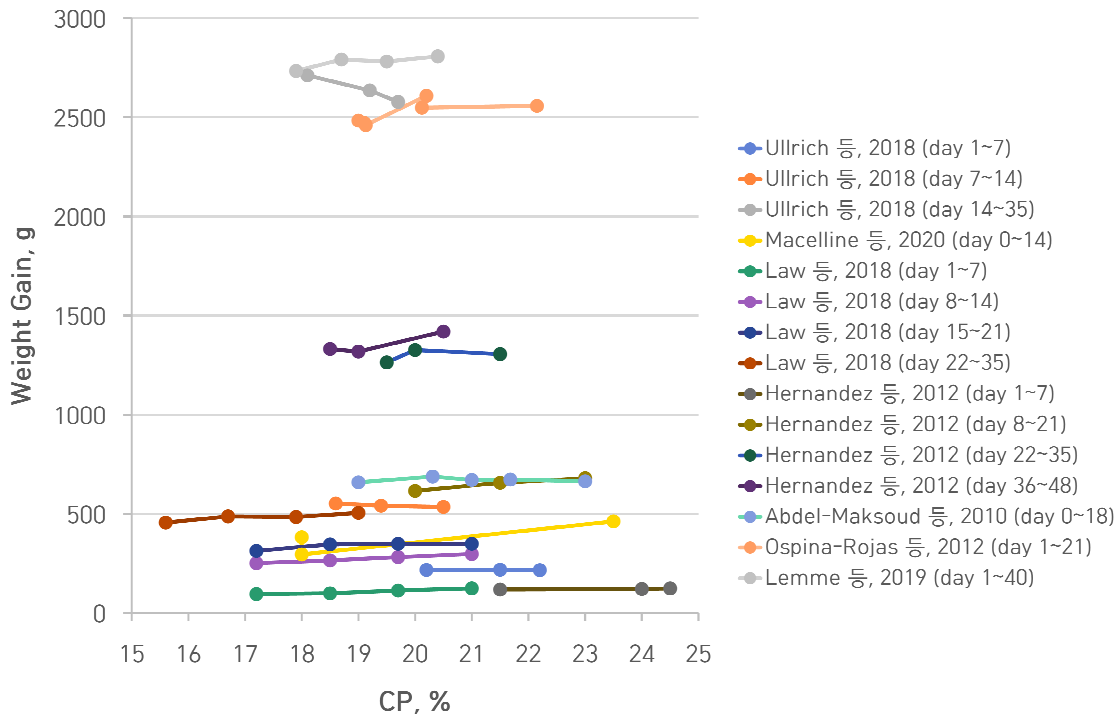


그림 2-13. 조단백질 감축 사료에 따른 육계의 증체량 변화

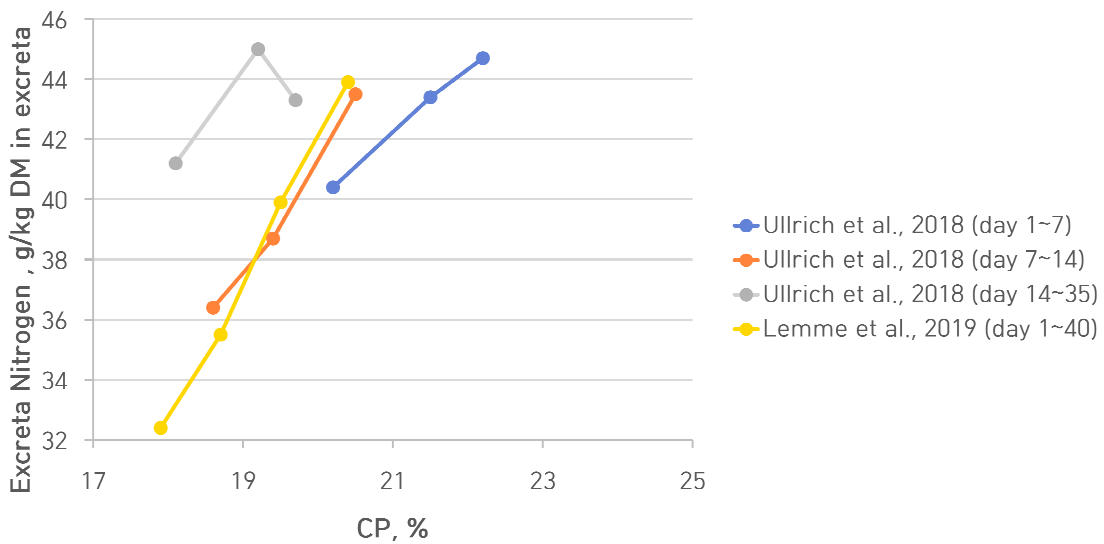


그림 2-14. 조단백질 감축 사료에 따른 육계의 질소 배출량 변화

- 육계 초기 사료 내 조단백질 함량을 0.5~2.0%까지 낮추었을 때, 증체량은 줄어들지 않았으며 사료요구율은 1.060에서 1.024로 개선되었고 질소의 배출량은 44.7 g/kg DM에서 43.5 g/kg DM으로 감소하였음 (Hernandez et al., 2012; Ullrich et al., 2018). 육계에서 사료 내 조단백질 함량을 23.5%에서 18.0%로 낮추고, 저단백질 사료에 합성아미노산으로 필수 아미노산의 요구량을 충족시킨 결과, 증체량이 462g에서 382 g로 약 17% 감소하였으며 질소 배출량은 7.3 g에서 3.6 g으로 많이 감소하였음 (Macelline et al., 2020).
- 육계 전기 (7일령~21일령)에 조단백질 함량을 3~5%까지 낮추었을 때, 일부 증체가 감소하였으나 사료요구율이 1.459에서 1.408로 사료효율이 0.667에서 0.750으로, 0.668에서 0.701로 개선되었음. 그리고 질소 배출량이 38 g/kg DM에서 30.2 g/kg DM으로 감소하였음 (Abdel-Maksoud et al., 2010; Hernandez et al., 2012; Ospina-Rojas et al., 2014; Law et al., 2018; Hofmann et al., 2019). 더불어, 조단백질 함량을 3% 이내로 낮추었을 때는 증체의 감소가 보이지 않았고 사료효율은 0.56에서 0.59로 소폭 상승하였음 (Ospina-Rojas et al., 2012).
- 육계 후기, 조단백질 함량을 1.5% 이상 감소시켰을 때, 증체의 감소세를 보였으나, 질소 배출량은 45g/kg DM에서 29.7 g/kg DM, 439g에서 324g으로 각각 감소하였음 (Ullrich et al., 2018; Lemme et al., 2019).
- 저단백질 사료에서 합성아미노산의 보충을 통한 필수아미노산의 요구량 충족에 아울러 비필수 아미노산도 필요량만큼 보충해 주었을 때, 더 나은 사양 성적을 기대할 수 있음
- 육계 전기, 저단백질 사료에 비필수 아미노산인 발린과 글라이신을 첨가하면 증체가 781.3 g에서 869.3 g로 증가하여 사료의 낮은 단백질 함량에 의한 부정적인 영향을 완화할 수 있었음. 후기에서는 발린, 아이소류신, 아르지닌 및 글라이신 첨가로 저단백질로 인한 체중의 감소를 완화해 최종체중이 1,578g에서 1,805g으로 향상되었음 (Ospina-Rojas et al., 2014).
- 육계 21일령까지는, 사료 내 조단백질 함량을 3% 감소시켜도 첨가되는 글라이신+세린:라이신의 비율이 1.37:1을 초과하면 단백질 함량이 증체 및 사료효율에 영향을 미치지 않았음 (Ospina-Rojas et al., 2012).
- 양계에서 분변의 암모니아와 질소 배출을 감소시키기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 효과적으로 질소의 배출을 감소시키는 방법은 아미노산을 첨가한 저단백질 사료를 이용하는 것이다. 더불어 분변의 오염을 효과적으로 감소시킬 수 있음.
- 저단백질 사료는 아미노산의 첨가 여부와 관계없이, 14일령 육계의 깔짚 내에서 암모니아와 질소가 각각 41%, 34%만큼 감소하였음 (그림 2-15).

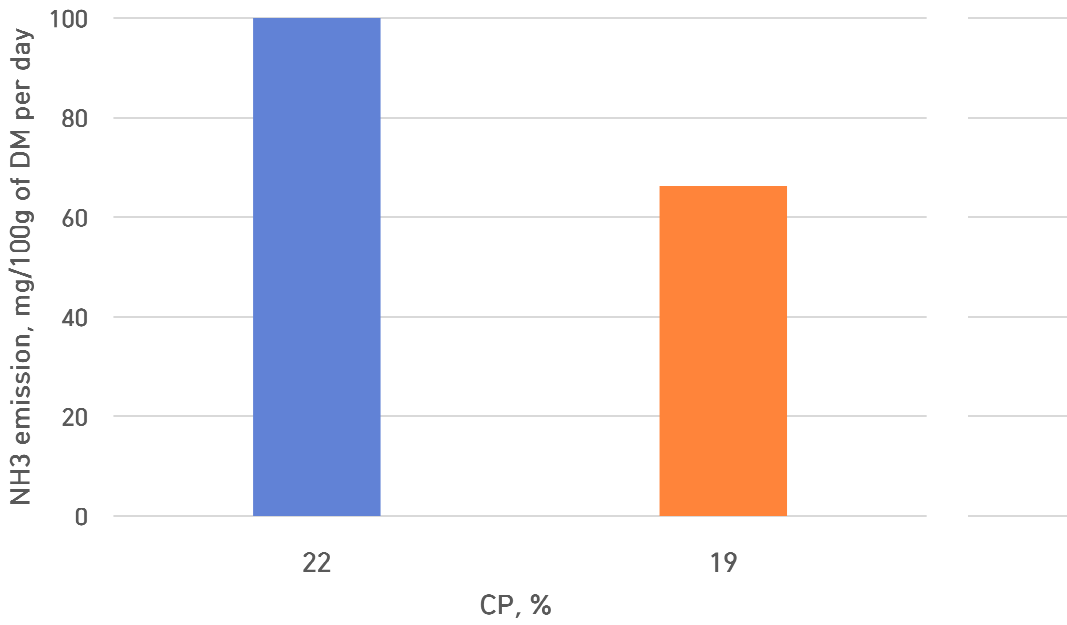


그림 2-15. 조단백질 감축에 따른 14일령 육계의 암모니아 배출량 감축 효과 (Ospina-Rojas et al., 2014)

- 6주간의 사양 기간 동안 저단백질 사료는 전체 질소 배출량을 10~27% 감소시키는 효과를 보였음 (Blair et al., 1999) (그림 2-16, 2-17).

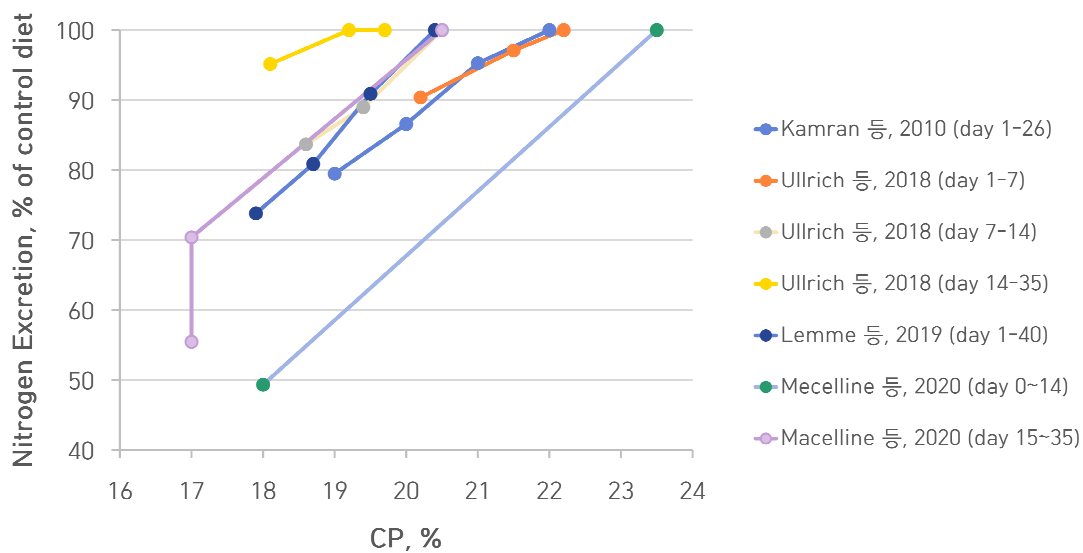


그림 2-16. 육계 사료 내 조단백질 감축에 따른 질소 배출량 감축 효과

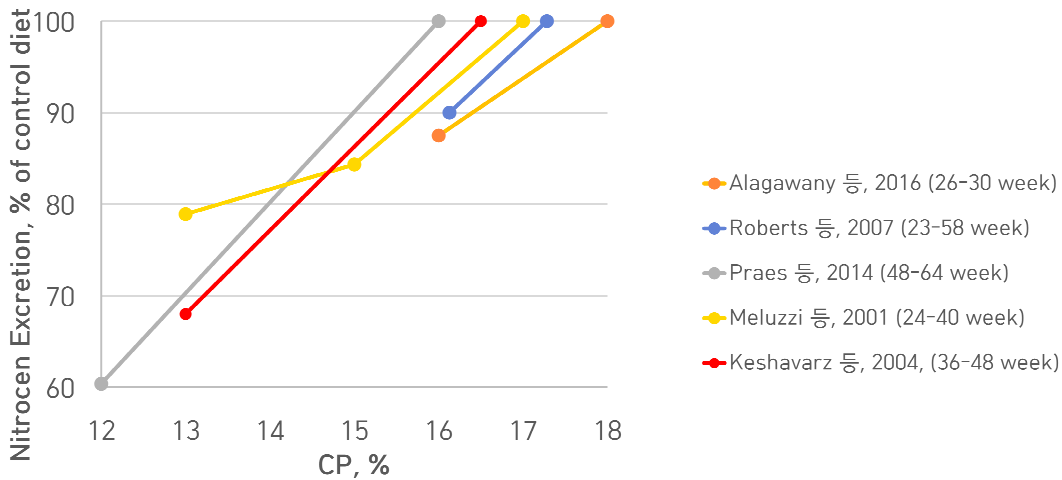


그림 2-17. 산란계 사료 내 조단백질 감축에 따른 질소 배출량 감축 효과

- 35일령 육계 사료 내 조단백질 함량이 감소함에 따라 깔짚에서 질소 함량이 51.2에서 46.2, 36.2 g/kg DM 감소함을 보였음 (Ullrich et al., 2018) (그림 2-18).

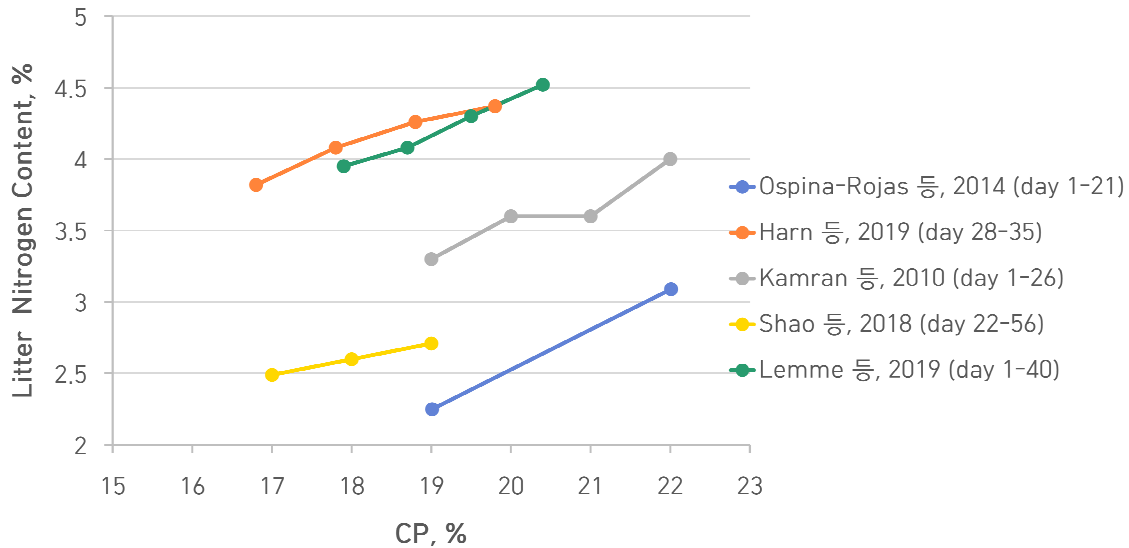


그림 2-18. 조단백질 감축에 따른 육계의 Litter 내 질소 함량 감축 효과

- 육계사료 내 단백질 1% 감소는 분뇨로 배설되는 질소 배출량을 약 9.4% 감소시킴 (표 2-19). 또한 단백질 저감 시 질소 섭취량 대비 질소 축적량을 1.1% 증가시킴.

표 2-19. 육계사료 내 조단백질 1% 감축에 따른 질소배출량 감축 효과

항목	사료 내 단백질 1% 저감 시
총 질소배출량 (Relative)	-9.4
질소 축적량:질소 섭취량	1.1

- 사료의 단백질 함량을 감소시키면 환경부담이 감소하는 것으로 알려져 있음. 사료 내 단백질 1% 저감 시 분뇨와 Litter 내 질소 함량이 각각 약 0.4%, 0.3% 감소함 (표 2-20).

표 2-20. 육계사료 내 조단백질 1% 감축에 따른 분뇨와 깔짚 내 질소 감축 효과

항목	사료 내 단백질 1% 저감 시
분뇨 내 질소 함량	-0.4
Litter 내 질소 함량	-0.3

(Kamran et al., 2010; Malomo et al., 2013; Hernandez et al., 2012; Ospina-rojas et al., 2014; Shao et al., 2018; Ullrich et al., 2018; Harn et al., 2019; Lemme et al., 2019)

#### 4. 사료 내 단백질량 제한에 관한 제도(규제) 조사 및 비교분석(도입 배경 포함)

##### 1) 국내

###### <반추가축>

- 적정 단백질사료 보급·확대를 위해 비육우와 젖소의 배합사료 및 섬유질배합사료의 조단백질 상한치를 설정함 (표 2-21, 2-22, 2-23)

표 2-21. 비육우 사료의 조단백질 조정안 (농림축산식품부, 2021)

현행		개정(안)			
명칭	사용범위 및 용도	명칭	사용범위 및 용도	등록성분	비고
번식용어송	생후 3개월령 이전	어린송아지	생후 3개월령 이전	조단백질 24%이하	통합
비육용어송	생후 3개월령 이전				
번식용중송	3~6개월령	육성우	3~6개월령 또는 ~250kg	18%이하	통합, 명칭변경
비육용중송	3개월령~250kg				
번식용큰송	6~12개월령	번식우	6~12개월령	16%이하	명칭변경
종모우	13개월령 이후 수소	종모우	13개월령 이후 수소	17%이하	
고기소임신우	13개월령~분만	임신우	13개월령~분만	15%이하	명칭간소화
고기소포유우	분만~분만 후 3개월	포유우	분만~분만 후 3개월	18%이하	
큰소비육전기	체중 250~500kg	큰소전기	체중 250~500kg	17%이하	통합, 명칭간소화
큰소비육중기	체중 500~600kg	큰소후기	체중 500kg 이상	15%이하	
큰소비육후기	체중 600kg 이상				

표 2-22. 착유우 사료의 조단백질 조정안 (농림축산식품부, 2021)

현 행		개 정(안)			
명 칭	사용범위 및 용도	명 칭	사용범위 및 용도	등록성분	비 고
젖소어린송아지	생후 3개월령 이전	젖소어린송아지	생후 3개월령 이전	조단백질 24%이하	
젖소중송아지	3~6개월령	젖소중송아지	3~6개월령	19%이하	
젖소큰송아지	6개월령~임신이전	젖소큰송아지	6개월령~임신이전	18%이하	
젖소임신우	임신~분만 2개월령	젖소임신우	임신~분만 2개월령	17%이하	
젖소종모우	17개월령 이후의 종모우	젖소종모우	17개월령 이후의 종모우	17%이하	
비유초기젖소	분만이후비유3개월령 (산유량 31~40kg)	비유초기	분만이후~비유3개월령	24%이하	젖소에만 사용하는 용어로 젖소 삭제
비유중기젖소	비유3~6개월령 (산유량 21~30kg)	비유중기	비유3~6개월령	19%이하	
비유말기젖소	비유6개월령~건유기 (산유량 11~20kg)	비유말기	비유6개월령~건유기	18%이하	
건유기젖소	건유기 (산유량 10kg이하)	건유기	건유기	17%이하	
고능력젖소	산유량 40kg이상	고능력우	산유량 40kg이상	22%이하	

표 2-23. 소 섬유질 배합사료 (TMR)의 조단백질 조정안 (농림축산식품부, 2021)

현 행		개 정(안)			
명 칭	사용범위 및 용도	명 칭	사용범위 및 용도	등록성분	비 고
고기소	양축용 배합사료의 명칭에 준하여 성장 단계별로 제조자가 정함	섬유질어린송아지	생후 3개월령 이전	조단백질 22%이하	신설
		섬유질육성우	3~6개월령 또는 250kg	20%이하	
		섬유질큰소전기	체중250~500kg	19%이하	
		섬유질비육후기	체중 500kg 이상	17%이하	
		섬유질번식우	6개월령~임신이전	15%이하	
젖소	양축용 배합사료의 명칭에 준하여 성장 단계별로 제조자가 정함	섬유질어린송아지	생후 3개월령 이전	22%이하	
		섬유질젖소큰송아지	3개월~임신이전	17%이하	
		섬유질비유기	분만이후~건유기	20%이하	
		섬유질건유기	건유기	16%이하	

<양돈>

- 미국의 양돈 사양표준(NRC)은 약 10년을 주기로 각 분야에서 선발된 전문가가 세계의 최신 연구 결과를 검토하여 돼지의 영양소 요구량을 결정함. NRC (2012)에서는 돼지의 성장단계별로 제시되었던 영양소 요구량에서 조단백질 (CP, crude protein) 성분이 삭제되었음
- 이는 국내 양돈 연구자들에 의해 한돈 산업 및 축산정책에 반영되어, 사료관리법상 돼지 사료의 성분등록은 조단백질 함량이 최소치에서 최대치 (최대허용수준)으로 개정되었음. 법의 개정 취지는 양돈 사료 내 조단백질 함량을 성장단계별로 제한하여 축산에서 환경오염의 원인이 될 수 있는 질소 배출량을 줄이는 것임.
- 추가로, 단백질은 가축의 성장단계별로, 유지, 성장, 번식 및 면역 등 필요로 하는 개별 아미노산의 요구량이 다르고, 사료 내 가소화 아미노산 함량의 변이가 크기 때문에, 그간 사료업계에서는 요구량

을 충분히 넘기기 위해 관행적으로 조단백질 함량을 높여 양돈에게 급여하였음

- 하지만 이로 인해 질소 배출이 증가하였고 사료비 또한 증가하였음 (2021년 6월 기준)
- 따라서 양돈 사료업계의 조단백질 함량에 대한 과열 경쟁을 지양하고, 적정 단백질사료 공급을 유도함으로써 가축분뇨 내 잉여 질소의 배출량을 줄이기 위해 농림축산식품부에서는 기존에 설정된 조단백질 상한치를 최대 3%까지 하향 조정하는 개정안을 고시하였음 (표 2-24).

표 2-24. 양돈 사료의 조단백질 조정안 (농림축산식품부, 2021)

현행			개정(안)		
명칭	사용범위	조단백질 함량	명칭	사용범위	조단백질 함량
포유자돈	이유 이전	23% 이하	포유자돈	~이유 초기	20% 이하
이유돈전기	7~11kg	21% 이하	이유돈	이유초기~25kg	18% 이하
이유돈후기	11~25kg	20% 이하	육성돈	25~65kg	16% 이하
육성돈전기	25~45kg	19% 이하	비육돈	65kg~출하	14% 이하
육성돈후기	45~65kg	18% 이하	삭제(사용없음)		
비육돈전기	65~85kg	17% 이하	번식용모돈	25kg이상	15% 이하
비육돈후기	85kg~출하	16% 이하	임신돈	임신중	13% 이하
번식용웅돈	25kg이상	14% 이하	포유돈	포유중	19% 이하
번식용모돈	25kg이상	16% 이하			
임신모돈	임신중	16% 이하			
포유모돈	포유중	20% 이하			

### <가금>

- 농림축산식품부는('21.07.23일 보도자료 참조) 사료 내 잉여 질소 감축으로 분뇨 악취 저감, 온실가스 감축, 사료비 절감을 위하여 사료 기준 및 규격 일부 사항 개정 고시를 추진함.
- 가금사료의 적정단백질 보급 확대를 위하여 유통사료 수준을 감안하여 생산성에 영향을 미치지 않는 범위에서 조단백질 상한선을 설정함.
- 산란계 사료는 사용범위를 명확히 하면서 명칭에 통일성을 부여함 (표 2-25)
- 육계사료는 사용범위를 명확하게 하면서 명칭에 통일성 부여, 초이사료 급여 현실을 반영하여 육계 초기 신설하고 육계후기 사료를 육계 출하 구간과 통합함 (표 2-26)
- 오리사료는 조단백질 상한선을 설정함 (표 2-27)

표 2-25. 산란계 사료의 조단백질 상한 개정안 (농림축산식품부, 2021)

현행		개정(안)			
명칭	사용범위 및 용도	명칭	사용범위 및 용도	등록성분	비고
산란용어린병아리	6주령 또는 10주령 이전	산란어린병아리	6주령 이전	조단백질 21%이하	
산란용중병아리	6~12주령 또는 산란개시 2주전	산란중병아리	6~12주령	18%이하	산란용→산란
산란용큰병아리	12주령~산란개시 2주전	산란큰병아리	12주령~산란개시 2주전	16%이하	
산란전	산란개시 2주전~산란개시	산란전	산란개시 2주전~산란개시	17%이하	
산란계 산란초기	산란개시~40주령	산란초기	산란개시~40주령	19%이하	
산란계 산란중기	40~65주령	산란중기	40~65주령	18%이하	
산란계 산란말기	65주령 이후	산란말기	65주령 이후	17%이하	산란계 삭제 (산란과 중복)
산란계 산란중계	산란중계 또는 육용중계	산란중계	산란중계	19%이하	

표 2-26. 육계 사료의 조단백질 상한 개정안 (농림축산식품부, 2021)

현 행		개 정(안)			
명 칭	사용범위 및 용도	명 칭	사용범위 및 용도	등록성분	비 고
육용중계어린병아리	3주령 또는 6주령 이전	육용어린병아리	3주령 이전	조단백질 20%이하	육용중계→육용
육용중계중병아리	3주령 또는 6주령 ~산란개시 이전	육용중병아리	3주령~산란개시 이전	17%이하	
육용중계		육용중계	육용중계	16%이하	
육계전기	3주령 이전	육계초기	1주령 이전	23%이하	신설
육계후기	3주령~출하전 7일부터 10일	육계전기	1~3주령	22%이하	
육계출하	출하전 7일부터 10일~출하	육계후기	3주령~출하	20%이하	통합

표 2-27. 오리 사료의 조단백질 상한 개정안 (농림축산식품부, 2021)

현 행		개 정(안)			
명 칭	사용범위 및 용도	명 칭	사용범위 및 용도	등록성분	비 고
육용오리전기	3주령 이전	육용오리전기	3주령 이전	조단백질 21%이하	
육용오리후기	3주령~출하	육용오리후기	3주령~출하	19%이하	
종오리어린오리	3주령 이전	종오리어린오리	3주령 이전	22%이하	
종오리육성오리	3주령~산란개시	종오리육성오리	3주령~산란개시	18%이하	
종오리산란오리	산란개시~	종오리산란오리	산란개시~	20%이하	

## 2) 유럽

### <반추가축>

- 네덜란드와 덴마크에서는 축산활동으로부터 발생하는 암모니아 방출을 줄여야 축산업이 지속될 수 있다고 환경법상에 명시하고 있는데, 아미노산을 첨가한 저단백질 사료의 급여를 통해 질소 배설량을 최소화하는 기술 개발을 위해 다양한 연구가 진행되었으며 그 효과가 입증됨.
- 네덜란드는 비료관리법, 가축분뇨법, 토양보전법 등으로 수질 오염 방지, 가축분뇨 생산쿼터제, 양분 회계시스템, 가축분뇨 이동계약제 등의 양분감축 정책을 시행하고 있음.
- 현재 27개 유럽연합국 전체가 300개 이상의 프로그램을 통해 질소 배출 감축목표 달성을 도모하고 있으며, 가축분뇨의 경우 질소배출량을 ha 당 170kg으로 제한하고 있음.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)의 Task Force on Reactive Nitrogen은 2019년, 축산농가의 통합적이고 지속 가능한 질소 관리를 강조하면서 질소 투입 (nitrogen input) 대비 질소 생산 (nitrogen output)을 뜻하는 질소 사용 효율 (Nitrogen Use Efficiency, NUE) 이 50~90%를 유지하는 것을 권장함 (UNECE, 2019).
- Nitrogen input이 output보다 80kg/ha/yr 보다 적을 것을 권장함.
- 위 조건들을 달성하기 위한 4가지 전략 (그림 2-19의 A, B, C, D)을 제시하였는데, 농가가 처한 상황과 nitrogen input, output을 고려하여 적절한 전략을 사용할 것을 권장함.
- UN의 Economic and Social Council (2014)은 유럽에서 질소 사용 효율을 높이고 질소 과잉 (nitrogen



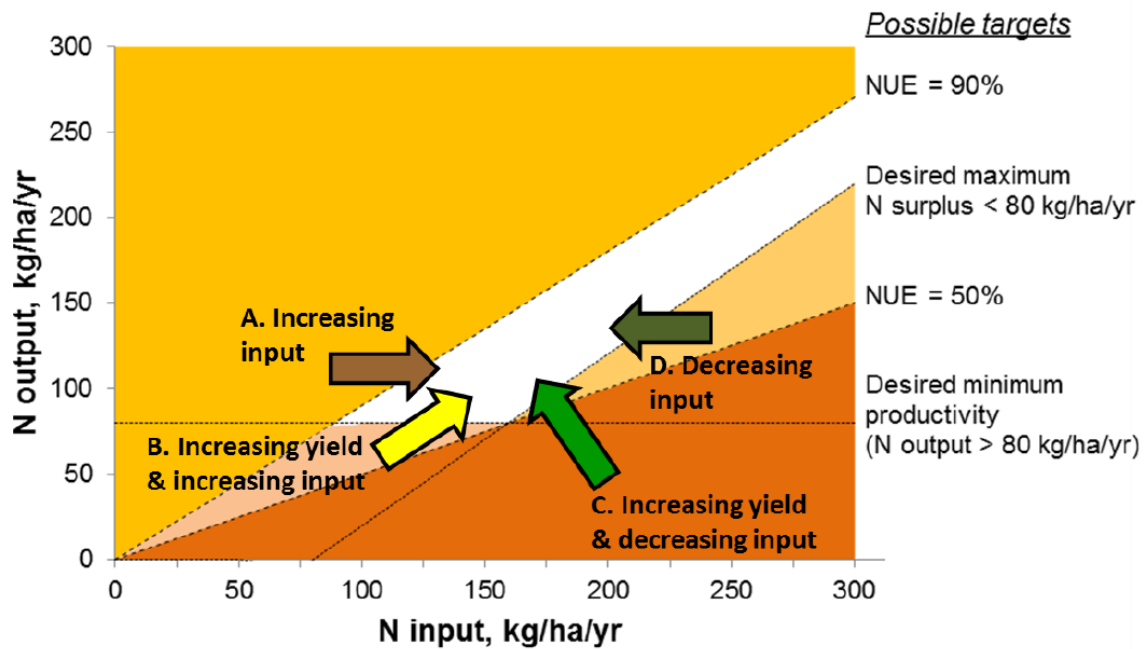


그림 2-19. 축산농가의 적정 질소 사용 효율과 달성 전략 (UNECE, 2019).

surplus, nitrogen output 대비 input이 높은 상황)은 줄일 것을 강조하며, 사양 시스템에 따른 각각의 구체적인 수치를 기준으로 제시함 (표 2-28).

- 축우의 종에 따라 적정 질소 사용 효율과 사료 내 조단백질 함량 (표 2-29)을 제시하였으며, 축종별 low, medium, high ambition으로 나눠 각각의 적정 조단백 가를 제시함 (표 2-30).

표 2-28. 유럽의 적정 질소 사용 효율과 질소 과잉 상한 (ECE, 2014).

		질소 사용 효율 (kg/kg)	질소 과잉 (kg/ha/yr)
방목	젖소	0.3-0.5	100-150
	육우	0.2-0.4	50-150
	양, 염소	0.2-0.3	50-150
사육장	젖소	0.8-0.9	-
	육우	0.8-0.9	-

표 2-29. 유럽의 적정 사료 내 조단백 함량과 생산품의 질소사용 효율 (ECE, 2014).

축종	조단백 함량 (% DM)	생산품의 질소 사용 효율 (kg/kg)
착유 + 유지, 비유초기	15-16	0.30
착유 + 유지, 비유말기	12-14	0.25
건유기	13-15	0.10
송아지 고기	17-19	0.45

육우 3개월령 미만	15-16	0.30
육우 3-18개월령	13-15	0.15
육우 18개월령 초과	12	0.05

**표 2-30.** 유럽의 사육장 내 축종 별 적정 조단백 급여량 (ECE, 2014).

축종	조단백 함량 (% DM)		
	Low ambition	Medium ambition	High ambition
착유 + 유지, 비유초기 (> 30kg/day)	17-18	16-17	15-16
착유 + 유지, 비유초기 (< 30kg/day)	16-17	15-16	14-15
착유 + 유지, 비유말기	15-16	14-15	12-14
교체육우	14-16	13-14	12-13
송아지 고기	20-22	19-20	17-19
육우 3개월령 미만	17-18	16-17	15-16
육우 6개월령 초과	14-15	13-14	12-13

- Irish Farmers Journal (2019)에서는 축산농가에서 배출되는 질소량에 따라 (170-180, 181-210, 211-250, 250 < kg/ha) 페널티가 부과된다는 것을 알림.
- 덴마크는 축산 강국으로써 질소 및 질산염 등의 배출에 대해 일찍이 관련 정책들을 수립, 시행해왔음 (Eory, 2017). (**표 2-31**)

**표 2-31.** 덴마크의 질산 및 인 배출에 대한 정책과 내용 (Eory, 2017).

정책명	정책 목표	정책 내용
NPO Action Plan (NPO) (1985)	질소와 인으로 인한 환경 오염 감소	ha 당 최대 가축 사육 두수 지정 가을 분뇨 살포 금지 분뇨 저장고 측정
The First Action Plan for the Aquatic Environment (AP-I) (1987)	질소 손실과 인 손실을 각각 50%, 80%까지 감소	최소 9개월 분뇨 저장 가능 용량 확보 발효기 및 작물회전시스템 의무화
Action Plan for a Sustainable Agriculture (AP-Sust) (1991)	농업 분야의 질소 손실을 100kt까지 감소	질소 쿼터제 도입 분뇨 살포 금지 시기 확장 분뇨 질소 사용 가능 작물 명시
The Second Action Plan for the Aquatic Environment (AP-II) (1998-2003)	질산염 손실 66% 감소	질소 쿼터 10% 감소 ha당 최대 가축 사육두수 감소 사이시기 작물 최소 경작
Ammonia Action Plan (Ammonia AP) (2001)	암모니아 배출 33% 감소	사육장 및 분뇨 저장고 지원금 분뇨 살포 관련 방송 금지 사이시기 작물 최소 경작 증가
The Third Action Plan for the Aquatic Environment (AP-III)15	2015년까지 질소 침출을 13% 감소, 초과인 감소를 50% 달성	사이시기 작물 최소 경작 증가 분뇨 질소 사용 가능 작물 관련법

(2005-2015)		강화
Green Growth Action Plan (GG AP)16 (2010-2020)	질산염 손실을 1/3로 줄이고, 암모니아 배출감소	가축 사료 내 인에 대한 세금 질소 쿼터 15% 감소 적정 사료 급여에 대한 장려
Agriculture and Environment Package (AEP) ( 2016)	2021년까지 질산염 침출을 42kt/yr 까지 감소	질산염 침출 방지 파이프라인 설치에 대한 보조금 지원

### <가금>

- 유럽에서 가금의 분뇨처리와 온실가스 배출에 관련된 연구가 수행되고 있음(Meda 등, 2011)(표 2-32).

표 2-32. 유럽의 가금 시설과 분뇨처리에 의한 메탄과 아산화질소 배출량(g/d/bird)

가금 시설	나라	분뇨 타입	CH <sub>4</sub> (g/d/bird)	N <sub>2</sub> O(g/d/bird)
산란계	영국	-	-	0.034
산란계	-	Dropping	0.08	0.0022-0.0026
산란계	네덜란드	Dropping	0.16	-
산란계	이탈리아	Dropping	0.08	-
산란계	이탈리아	Dropping	0.22	-
산란계	-	Litter	0.08	0.0022-0.0026
육계	-	Litter	0.05	0.004
육계	네덜란드	Litter	0.06	-
육계	영국	Litter	-	0.1
칠면조	-	Litter	0.25	0.009
오리	-	-	0.05-0.08	0.03

### 3) 미국

#### <반추가축>

- 사료 내 단백질 또는 질소의 적정량에 관한 연구가 이루어지고 있으며, National Research Council (NRC) 에서 작성하고 배포하는 축종별 영양소 요구량 (Nutrients requirements)에 따라 알맞은 양을 급여할 것을 권장하고 있음.
- 동물의 장내발효 메탄생성량을 보고해야 하는 규정은 없지만, 분뇨 관리의 측면에서 연간 25,000 metric 톤(CO<sub>2</sub> eq) 이상의 온실가스를 발생하는 분뇨처리시설은 온실가스 발생량을 보고 해야 함
- 주별로 공기 질을 위한 규정이 있지만 대부분이 암모니아와 관련된 규정임
- USDA의 NRSC (Natural Resources Conservation Service) Nutrient Management Technical Note에 축우에 대해 질소와 인의 배출량 저감을 위한 방법들이 명시되어 있음 (표 2-33).

**표 2-33.** 사양관리 측면에서 질소, 인 배출량 저감을 위한 방법 (USDA, 2021).

구 분	방안	질소 저감률 (%)
육우	과다 영양소 섭취 최소화	0-25
	단백질 조절	0-25
	성장촉진제	5
	성장단계별 사육	5-10
젖소	과다 영양소 섭취 최소화	10-15
	단백질 조절	15-25
	번식우 집단 수 증가	5-10

### <가금>

- USDA-NRCS에서는 다양한 성장단계별 가금사료의 질소배출량을 감소시키기 위하여 NRC(National Research Council, 1994)의 기준에 부합하도록 질소균형을 갖춰 정밀 배합하도록 권장하고 있음 (표 2-34, 2-35)

**표 2-34.** 가금류의 권장 조단백질 요구량 (NRC, 1994)

축종	일당사료섭취량 또는 주령	조단백질 권장 요구량, %
산란계	80g/daily intake	18.8
	100g/daily intake	15.0
	120g/daily intake	12.5
육계	0-3주	23.0
	3-6주	20.0
	6-8주	18.0
칠면조	0-4주	28.0
	4-8주	26.0
	8-12주	22.0
	12-16주	19.0
	16-20주	16.5
오리	0-2주	22.0
	2-7주	16.0
	육계 종계	19.5 g/d
칠면조 종계(수)	12.0	
칠면조 종계(암)	14.0	
오리 종계	15.0	

**표 2-35.** 가금의 단백질 배출량 저감을 위한 방법 (USDA, 2021)

방안	단백질 저감률(%)
요구량에 근사한 사료배합비 작성	10-15
낮은 조단백질:첨가 아미노산 비율	10-25
소화율이 높은 사료의 사용	5
Phytase의 첨가/사료 내인 함량을 낮춤	해당 없음
효소제 사용	5
성별을 나누어 사육	해당 없음
성장단계별 사육	5-10

#### 4) 일본

- (양돈) 일본의 농업연구기구 축산초지연구소는 아미노산을 첨가한 저단백질 사료를 돼지에게 급여하는 것으로 돼지의 질소 배설량을 감소시키고 배설물 처리까지의 과정 중 발생하는 온실가스 20%를 저감할 수 있다는 연구 결과를 보고하였으며, 저단백질 사료 제품들이 이미 판매되고 있음.

#### 5) 중국

##### <가금>

- 중국의 대두박이 가금사료 내 차지하는 비율이 매우 높음. China feed industry association은 가금 사료 내 단백질 적정 수준을 1% 줄인 새로운 기준을 승인하였음. 저단백사료를 이용하여 미국산 대두박의 의존도를 완화할 목적으로 예상됨 (표 2-36).

**표 2-36.** 새로운 기준의 조단백질 상한선 (Sun, 2018)

	이전 기준		새로운 기준	
	기간	단백질 함량	기간	단백질 함량
White-feathered broiler	10-21 days	≥20%	10-21 days	20-22%
	21-35 days	≥18%	21-35 days	18-21%
	35 + days	≥16%	35 + days	16-19%

#### 6) 아일랜드

##### <가금>

- IGFA(Irish grain and feed association)에서는 가축 사료 내 단백질의 함량을 감소시키기 위하여 2015년부터 Crude protein survey가 진행되어 오고 있음. 2019년 가금사료 내 조단백질 함량은 평균 18.1%로 알려졌다.

### III. 가축 사료 내 적정 중금속 수준 관련 선행연구 조사 및 분석

#### 1. 양돈에서의 아연 저감 사료

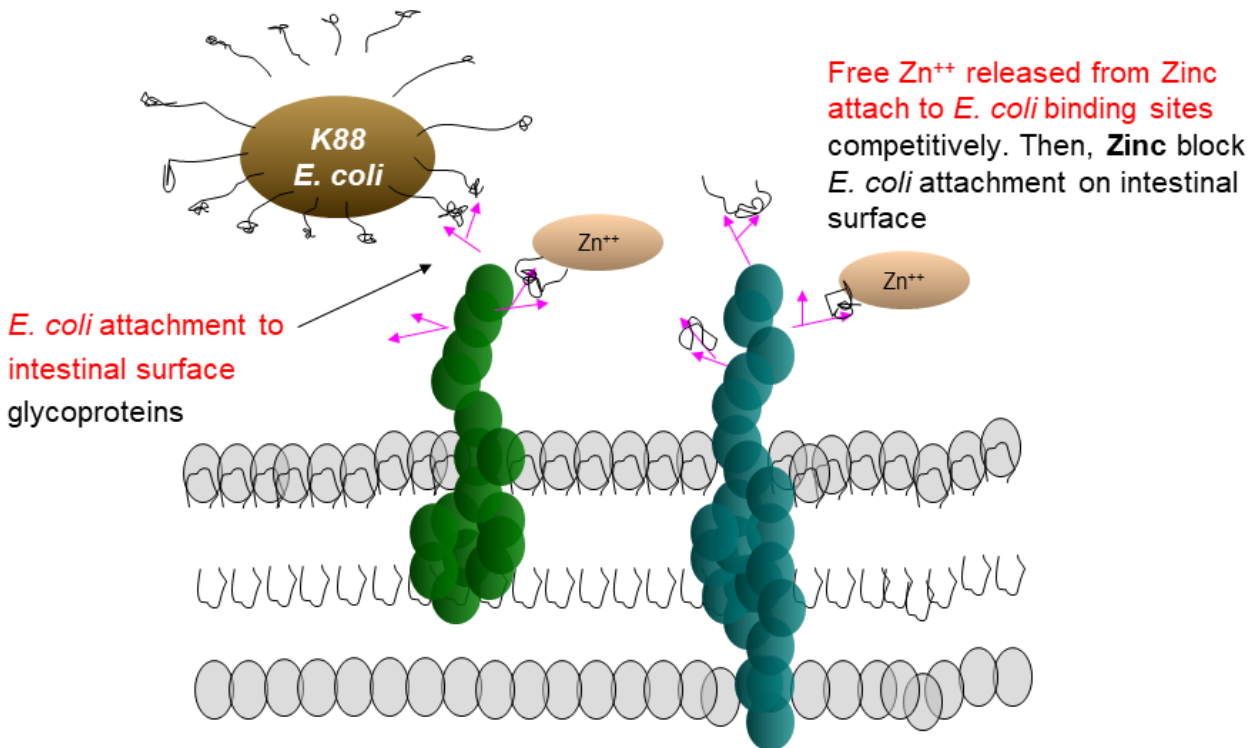


그림 3-1. 이유자돈에서 아연의 설사 방지 메커니즘 (Liu et al., 2021)

- 아연은 DNA 혹은 RNA의 합성효소와 전사효소 및 많은 소화효소들의 구성성분이며, 단백질, 탄수화물 및 지방의 대사 과정과 면역 및 번식에서 중요한 역할을 수행하는 필수 광물질임 (그림 3-1).
- 아연의 요구량은 이유자돈에서 100ppm으로 가장 높고 이후 비육 말기에서 50ppm까지 낮아짐.
- 양돈에서 자주 사용되는 원료사료인 옥수수, 대두박, 옥수수주정박, 어분 및 캐놀라밀 내 아연 함량은 각각 17, 50, 65, 72 및 89ppm임 (NRC, 2012).
- 또한 추가적인 미량광물질의 요구량 충족을 위해 미네랄 프리믹스가 사료에 첨가되는데 아연은 50~100ppm 이상 첨가되는 것이 일반적임.
- 따라서 일반적인 양돈용 배합사료 내 아연의 함량은 원료사료 및 미네랄 프리믹스로 인해 75ppm보다 높고, 이는 NRC (2012)에 제시된 육성돈, 비육돈, 및 모돈의 아연 요구량을 충족할 수 있음.
- 하지만, 아연 함량이 높은 어분 또는 캐놀라밀이 사료에 높은 비율로 포함되거나 미네랄 프리믹스로 공급되는 아연의 양이 많아지면, 배합사료 내 아연의 함량이 사료관리법에 명시된 이유자돈 (120ppm), 육성돈 전기 (100ppm) 및 육성돈 후기 (75ppm)의 배합사료 내 아연 허용기준을 초과할 수 있음.
- 유럽연합에서 공시한 배합사료 내 아연 함량 규제는 자돈에서 150ppm 이하로 제한하고 있으며, 그 외에는 120ppm 이하로 제한하고 있음.
- 아연은 이유자돈에서 항생제 대체물질로도 널리 사용되며 (Streyll et al., 2015), 첨가량에 따라 적게는

0 - 2000 ppm 이하, 많게는 약리적 수준으로서 2000 - 4,000ppm까지 사용됨 (Burch, 2014).

- 이유자돈 사료 내 아연의 첨가는 특히 이유자돈 성장성적의 향상과 설사 방지를 위해서 첨가되며 (Hahn and Baker, 1993; Hill et al., 2001), 이유자돈 사료 내 아연의 첨가는 이유자돈의 장내 용모 발달을 돕고, 영양소 흡수에 유리한 장 점막 건강에 도움을 줌 (Li et al., 2006).
- 이유자돈 사료 내 아연의 첨가는 이유 후 설사 방지 (Johansen et al., 2007)뿐만 아니라 폐사율 (Poulsen, 1995)도 감소시키고 성장성적을 개선하는 것으로 알려짐 (Poulsen, 1998).
- 사료 내 아연을 약리적 수준까지 첨가하였을 때 자돈의 위에서 그렐린 분비를 자극함. 그렐린 활성은 간과 위장관에서 insulin-like growth factor (IGF-1)과 cholecystokinin (CCK)의 분비를 증가시킴 (Yin et al., 2009).
- 아연은 형태에 따른 생체 이용률이 다름. 유기태와 무기태 형태를 주로 사용하며, 무기태에는 산화아연, 황산아연 등이 있고 유기태는 아미노산 또는 펩타이드와 결합한 형태임 (Ammerman et al., 1995). 무기태 형태의 경우, 흡수과정에서 대부분 위산에 의해 이온화가 되어 이용률이 감소하여 약 50~80%가 소장에서 흡수되지 않고 분으로 배출됨 (Ma et al., 2014; 표 3-1).

표 3-1. 양돈에서 아연의 외관상 전장 소화율 (apparent total tract digestibility, ATTD)

Sources of Zn	BW, kg	Zn, mg/kg	Zn in feces, mg/kg (DM basis)	ATTD of Zn, %	Reference
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	10.8	142.0	576.1	31.4	Barszcz et al. (2019)
Organic (Glycine)	10.8	142.0	607.1	27.7	Barszcz et al. (2019)
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	10.8	141.0	591.8	35.8	Barszcz et al. (2019)
Organic (Glycine)	10.8	142.0	655.8	32.0	Barszcz et al. (2019)
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	18.2	54.1	271.5 <sup>1</sup>	38.0	Villagomez-Estrada et al. (2020)
Inorganic (Hydroxychloride)	18.2	116.6	651.4 <sup>1</sup>	31.0	Villagomez-Estrada et al. (2020)
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	18.2	50.7	279.1 <sup>1</sup>	32.0	Villagomez-Estrada et al. (2020)
Inorganic (Hydroxychloride)	18.2	109.6	541.3 <sup>1</sup>	39.0	Villagomez-Estrada et al. (2020)
Inorganic (ZnO)	24.0	52.0	348.6 <sup>1</sup>	17.2	Nitrayova et al. (2012)
Inorganic (ZnO)	24.0	175.0	875.7 <sup>1</sup>	38.2	Nitrayova et al. (2012)
Organic (Methionine)	24.0	82.0	321.3 <sup>1</sup>	51.6	Nitrayova et al. (2012)
Organic (Glycine)	24.0	53.0	312.4 <sup>1</sup>	27.2	Nitrayova et al. (2012)
Organic (Proteinat)	24.0	68.0	334.2 <sup>1</sup>	39.3	Nitrayova et al. (2012)
Organic (Yeast)	24.0	84.0	367.9 <sup>1</sup>	45.9	Nitrayova et al. (2012)
Basal diet	31.1	10.2	151.8	43.6	Liu et al. (2014)
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	31.1	44.3	499.9	54.6	Liu et al. (2014)
Organic (HMTBa) <sup>2</sup>	31.1	51.2	492.3	59.0	Liu et al. (2014)
Basal diet	31.1	19.8	137.7	33.9	Liu et al. (2014)
Inorganic (ZnSO <sub>4</sub> )	31.1	56.6	340.3	45.1	Liu et al. (2014)
Organic (HMTBa) <sup>2</sup>	31.1	60.2	330.4	53.8	Liu et al. (2014)

DM = dry matter.

<sup>1</sup>These values were calculated using the following assumptions: ATTD of DM was 87.0% and DM in feces was 95%. <sup>2</sup>2-hydroxy-4-methylthio butanoic acid.

- 이유자돈 사료 내 고농도의 아연을 첨가할 경우, 분으로 배출되는 아연의 양이 증가하여 환경에 부정적인 영향을 미친다고 보고함 (Heo et al., 2013; **그림 3-2**). 또한, 덴마크에서 진행한 연구에서 현재 양돈사료에서 사용하는 수준의 아연을 사용할 때 환경 오염을 유발하고 수생동물에 심각한 위험을 초래할 수 있다고 함 (Jensen et al., 2016).
- 아연과 구리가 많이 함유된 분뇨의 경우 호기성 및 혐기성 발효가 원활하게 일어나지 못하여 악취가 오랫동안 배출되어 민원의 소지가 있음.
- 아연의 요구량을 고려하지 않고 분뇨처리나 환경오염 차원의 관리를 위해 사용 수준을 급격하게 밑으로 조정하면 양돈농가의 생산성 저하로 인한 경제적 손실을 초래함.
- 이유자돈 사료 내 고농도 아연을 첨가하였을 때 소화관 장점막 세포 내 변화를 분자생물학적인 방법으로 측정함으로써 아연 적정수준을 확립할 수 있음.
- 아연 대체물질을 개발하여 자돈의 영양소 이용성을 증가시킴으로써 체외로 배출되는 영양소를 줄일 수 있으며, 분뇨처리 비용 절감 효과가 있음. 또한, 이유자돈의 폐사 및 성장 지연을 예방하여 농장의 생산성을 향상시키므로 경제적인 손실을 막을 수 있음.
- 아연 대체물질로 친환경 기능성 물질에 대한 관심이 증가하여 probiotic, prebiotic, organic acid 등과 같은 물질들에 대한 연구가 진행 중임 (**표 3-2**).
- 해외 양돈 선진국을 중심으로 아연 대체물질로 생균제 및 유기산제 등과 같은 친환경 기능성 물질에 따른 생산성에 대한 연구는 진행되고 있으나 국내 실정에 맞는 적정 수준에 따른 장내 미생물 균총 유지와 자돈의 면역 능력에 관한 연구는 부족한 실정임.

**표 3-2.** 이유자돈 사료에서 설사 방지를 위해 약리적 수준으로 첨가하는 아연 대체제

항목	작용기전	참고문헌
Probiotic	장내 유익균 우점을 통한 장 건강 개선	Cho et al. (2011)
Prebiotic	유익균 우점을 도와 장 건강 개선	Li et al. (2006)
유기산제	장관 내 pH 감소를 통한 유해균 억제 및 소화율 개선	Missotten et al. (2009)
식물추출물	항염증, 항균 및 항산화 작용을 통한 건강 개선	McAlpine et al. (2012)
박테리오파지	특정 유해균을 파괴하는 파지로 장 건강 개선	Lee et al. (2016)
규조토	장관 내 독성 성분과 결합하여 체내 흡수 방지	Lee et al. (2020)
효모	효모 대사산물 및 효모 자체의 장 건강 개선 효과	Burdick et al. (2019)
탄닌	항염증, 항균 및 항산화 작용을 통한 건강 개선	Girard and Bee (2020)



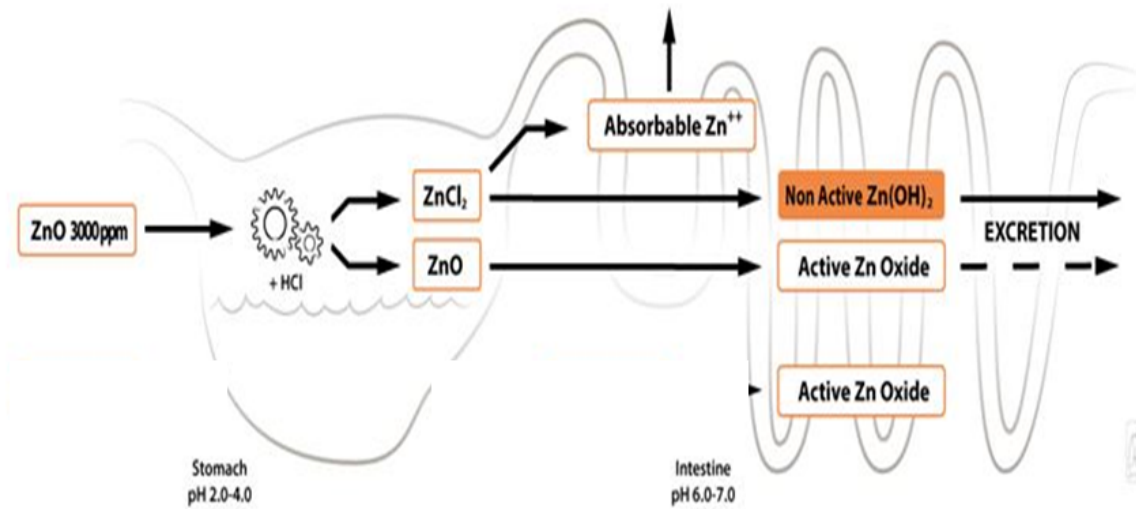


그림 3-2. 돼지 체내에서의 아연 대사 (Vetagro, 2019)

- 산화아연이 작용하는 방식은 아직 완전히 밝혀지지 않았지만 비수용성의 화합물로 낮은 pH에서 분해됨. 자돈의 장내 환경은 아직 미성숙한 장관 시스템과 사료의 높은 buffer capacity (완충용량)로 산화아연이 체내에서 완전히 분해되기에 충분하게 산성화되지 못함. 하지만 일단 분해가 되면 이온화된 아연이 위 장관 내로 방출되고 박테리아 아미노산과의 상호결합으로 이들의 능동수송을 방해하여 항균력을 가짐.
- 또한 산화아연은 활성산소를 발생시켜 지속적으로 세포들에 심각한 손상을 주고 활성산소는 산화 스트레스를 유발하며 유해 세균의 지질막 산화를 야기함. 이는 세포막 구성의 변성을 가져오며 병원성 세균이 숙주세포에 부착하는 작용을 감소시킴. 즉, 세균의 장상피 부착 저해로 설사의 원인이 되는 장독소 분비를 막음.
- 이유자돈 사료 내 아연을 약리적 수준까지 첨가하였을 때 일당증체량, 일당사료섭취량 및 사료효율을 증가시킴 (그림 3-3, 3-4 및 3-5). 이유자돈 사료 내 유기태 아연 첨가에 따른 성장성적은 실험 기간과 첨가수준에 따라 차이가 나타남.

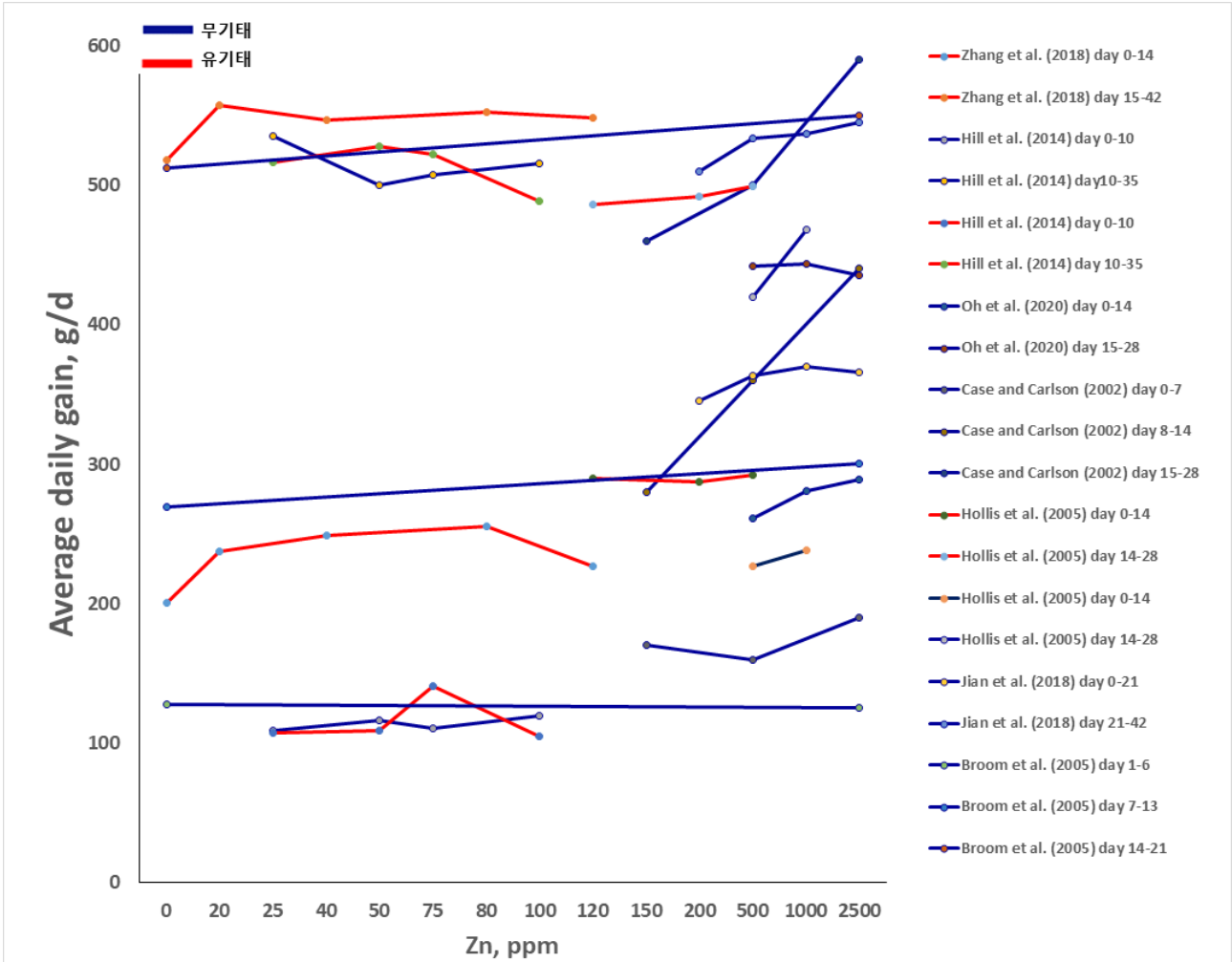


그림 3-3. 사료 내 유기태 및 무기태 아연 첨가에 따른 자돈의 일당증체량 변화

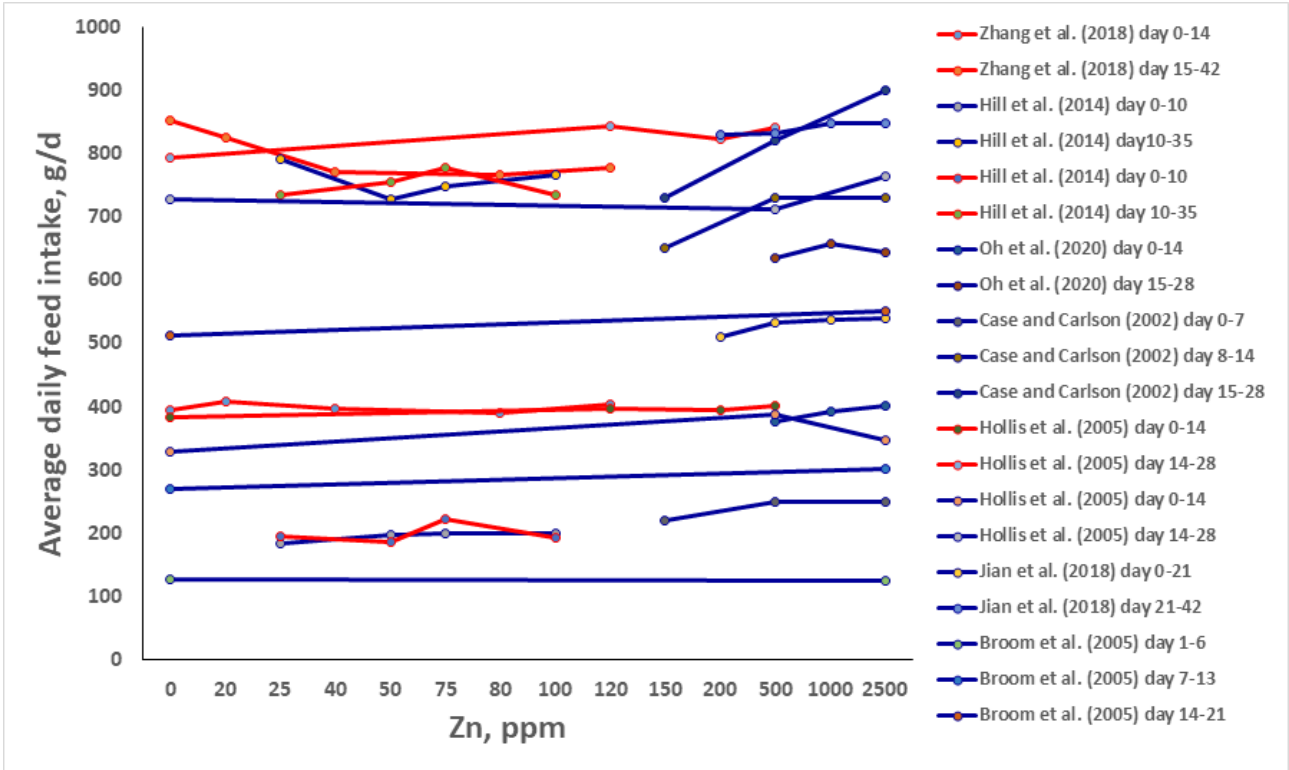


그림 3-4. 사료 내 유기태 및 무기태 아연 첨가에 따른 자돈의 일당사료섭취량 변화

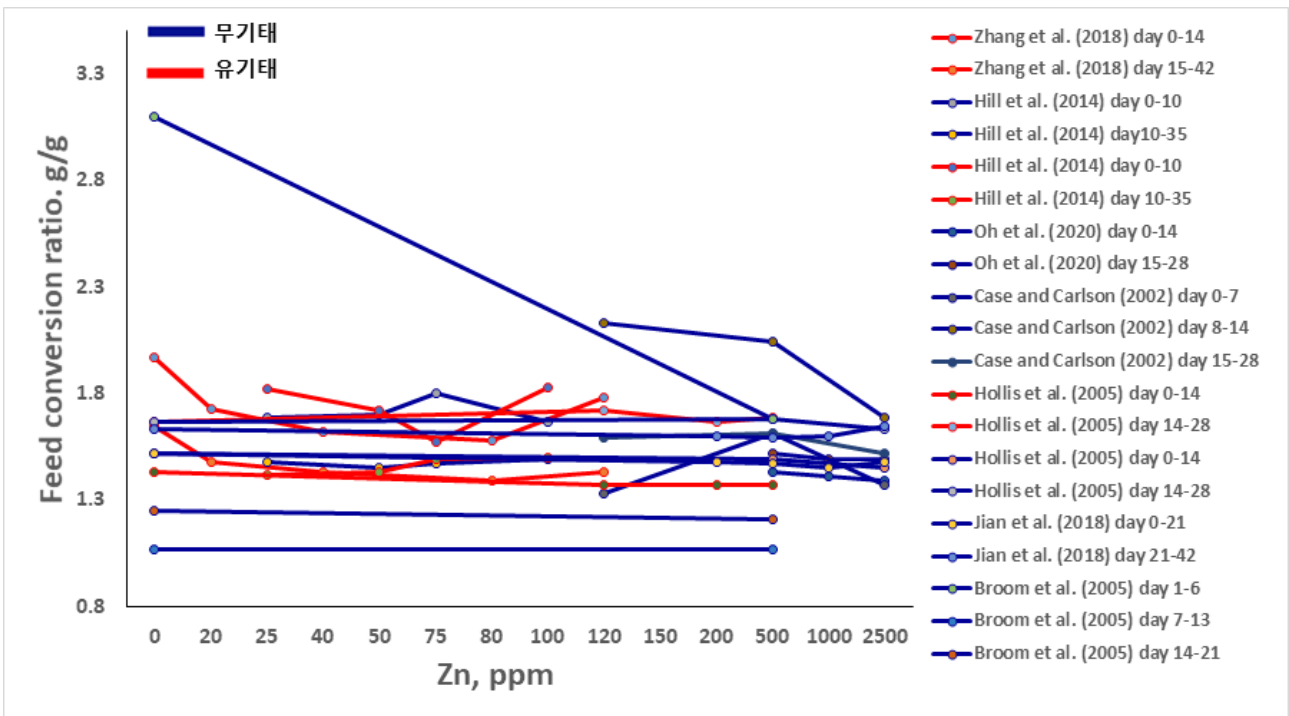


그림 3-5. 사료 내 유기태 및 무기태 아연 첨가에 따른 자돈의 사료요구율 변화

## 2. 양돈에서의 구리 저감 사료

- 구리를 사료에 첨가하였을 때 체내에서 다양한 기능을 함. 구리는 뼈 형성을 촉진시켜주며 조혈작용을 도와 혈액 속의 혈구를 생성하는 데에 도움을 줌. 그리고 외부 병원체에 대한 저항성을 개선시켜주며 면역 및 항산화 능력을 향상시켜주는 등 다양한 곳에서 이로운 효과를 나타냄 (Madsen and Gitlin, 2007; Scheiber et al., 2013).
- 구리는 세균발육억제 기능과 살균 능력이 있는데, 자돈의 사료에 구리를 250 ppm 첨가할 경우 항생제를 첨가한 사료를 급여했을 때와 같은 효과가 나타남 (Hawbaker, 1961; Stahly et al., 1980).
- NRC (2012)에 의해 제시된 구리의 요구량은 12-15 kg의 경우 6 ppm, 15-25 kg 6 ppm, 25-50 kg은 5 ppm임. 약리학적으로 효과를 보기 위해서는 250 ppm을 사용해야 한다는 연구 결과가 있지만 약리학적으로 효과를 보기 위해서는 짧은 기간 사용해야함 (Hill et al., 2001; Shelton et al., 2011).
- 포유자돈의 구리 요구량은 5-10 mg/kg이지만 연령이 높아짐에 따라 구리 요구량이 감소함 (Underwood et al., 1977; Hill et al., 1983). 육성돈의 요구량은 5-6 mg/kg으로 포유자돈에 비해 낮지만 (ARC, 1981; NRC, 2012) 초산이나 다산한 임신돈의 경우 임신기간 동안 10 mg/kg의 구리 요구량을 필요로 함 (Lorenzen et al., 1947).
- 양돈에서 자주 사용되는 원료사료인 옥수수, 대두박 및 옥수수주정박 내 구리 함량은 각각 4.4, 22.7 및 38.4 ppm임 (Espinosa and Stein, 2021).
- 또한 추가적인 미량광물질의 요구량 충족을 위해 비타민-미네랄 프리믹스 또는 미네랄 프리믹스가 사료에 첨가되는데 구리는 8 ppm 이상 첨가되는 것이 일반적임.
- 따라서 일반적인 양돈용 배합사료 내 구리의 함량은 원료사료 및 미네랄 프리믹스로 인해 20 ppm보다 높고, 이는 NRC (2012)에 제시된 이유자돈, 육성돈, 비육돈, 임신모돈 및 포유모돈의 구리 요구량을 충족할 수 있음.
- 하지만, 구리 함량이 높은 옥수수주정박이 사료에 높은 비율로 포함되거나 미네랄 프리믹스로 공급되는 구리의 양이 많아지면, 배합사료 내 구리의 함량이 국내 사료관리법에 명시된 포유자돈 (135 ppm), 육성돈 전기 (130 ppm), 육성돈 후기 (60 ppm) 및 비육돈 (25 ppm)의 배합사료 내 구리 허용기준을 초과할 수 있음.
- EU에서 공시한 배합사료 내 구리 함량 제한은 포유자돈 및 이유초기에 150 ppm 이하로 지정하였음.
- 가장 많이 사용되는 구리의 형태는 황산구리지만 (Cromwell et al., 1998), tribasic copper chloride (TBCC) 또한 황산구리만큼 사양성적에 긍정적인 영향을 줌 (Cromwell et al., 1998; Coble et al., 2017). 또한 Cu-amino acid chelate같이 생체이용률이 높은 유기태 구리도 돼지의 성장성적에 긍정적인 영향을 줄 수 있음 (Pérez et al., 2011; Carpenter et al., 2018). 하지만 황산구리와 비교하였을 때 비교적 높은 단가에 아직 상용화 되지 못함.
- 구리가 돼지의 성장에 긍정적인 영향을 끼친다는 다양한 연구가 있지만 그 효과는 돼지의 성장단계에 따라 다르게 나타남. 구리 첨가로 인한 성장 촉진 효과는 성장과 질병에 대한 저항성이 돼지의 생존과 직결되는 돼지 성장의 초기단계에서 아주 중요함 (Stansbury et al., 1990; Sales, 2014).
- 적절한 양의 구리 섭취는 성장에 큰 영향을 주는데, 뇌하수체를 자극하여 성장호르몬 분비를 촉진시키고 간에서의 IGF-1+분비를 유도하여 돼지의 성장을 촉진시킴. 하지만 과도한 양의 첨가량은 구리의 독성을 시사하부, 뇌하수체 그리고 간과 같은 성장에 있어서 중요한 역할을 하는 장기에 산화 스트레스 손상을 유발함. 이에 결국 해당 장기들에 염증반응이 일어나며 뇌하수체의 조절 기능을 더욱 손상시키며 돼지의 성장에 부정적인 영향을 줌 (Gao et al., 2020; 그림 3-6).

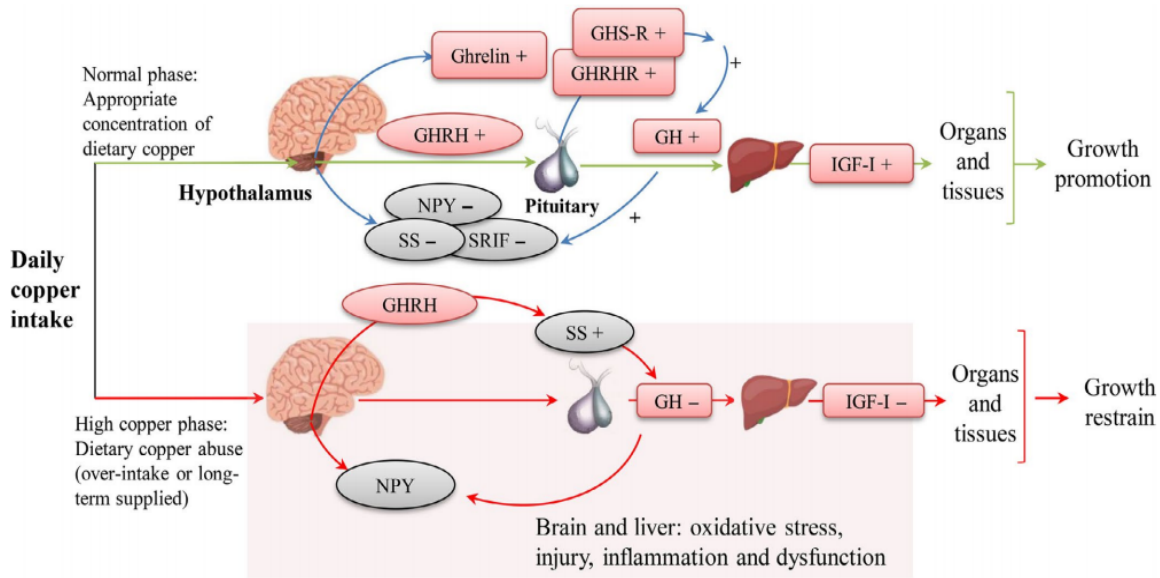


그림 3-6. 구리 섭취가 성장에 미치는 영향 (Gao et al., 2020)

- 구리를 오랜시간 동안 양을 늘리며 섭취할 경우 돼지의 체내에서 구리의 항상성이 파괴되고 Chymus 에 함유된 구리 함량이 증가되어 염증인자의 발현을 증가시키는 등 다양한 부작용이 발생하여 심할 경우 죽음에 이르거나 그 효과가 절감될 수 있음 (Zhang et al., 2017; 그림 3-7).
- 높은 함량의 구리를 장기간 섭취할 경우 체내 구리 농도가 증가하여 장기 독성을 유발함. 간과 신장은 활성대사기관으로 구리에 의한 산화 스트레스 손상에 취약하며 염증에 의해 간 및 신장 기능 장애가 발생하는데, 간과 신장의 손상은 대사 시스템의 기능에 장애를 일으키며 돼지의 성장에 부정적인 영향을 줌 (Kumar et al., 2016).

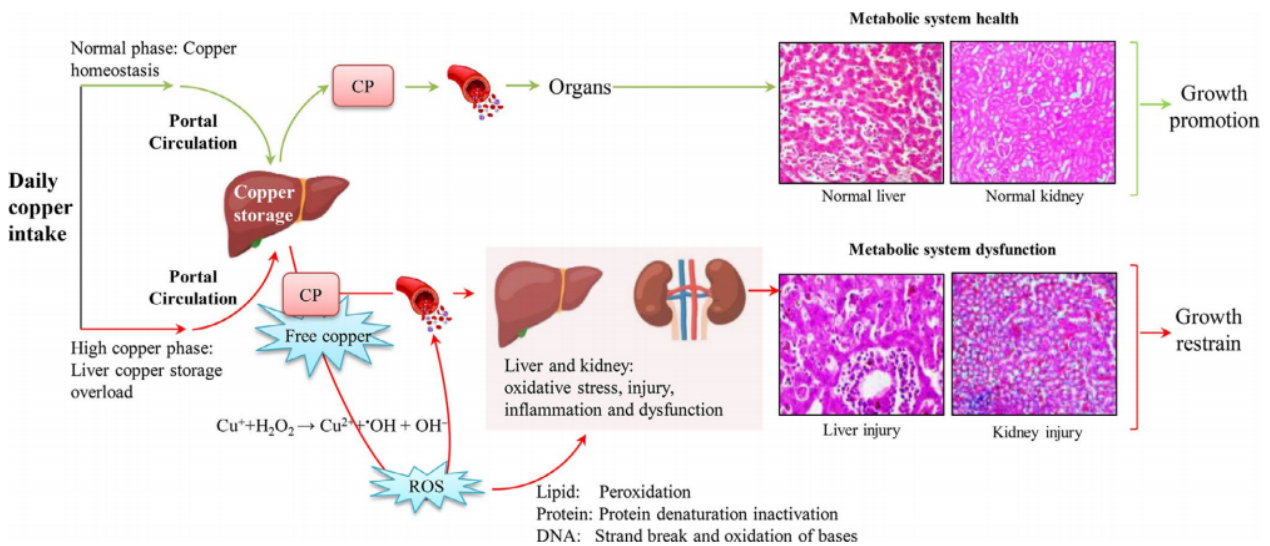


그림 3-7. 높은 함량의 구리를 장기간 섭취 시 발생하는 부작용 (Gao et al., 2020)

- 구리의 체내 축적율은 5~40% 정도이며 높은 수준의 구리를 사료에 첨가할시 긍정적인 효과를 볼 수 있지만, 최소 40%에서 최대 93%까지 분으로 배출될 수 있음 (표 3-3).

**표 3-3.** 양돈에서 구리의 외관상 전장 소화율 (apparent total tract digestibility, ATTD)

Sources of Cu	BW, kg	Cu, mg/kg	Copper in feces, mg/kg (DM basis)	ATTD of Cu, %	Reference
Basal diet	6.3	30.0	183.2 <sup>1</sup>	24.6	Veum et al. (2004)
Organic (proteinate)	6.3	80.0	502.0 <sup>1</sup>	22.5	Veum et al. (2004)
Organic (proteinate)	6.3	130.0	818.9 <sup>1</sup>	22.2	Veum et al. (2004)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	6.3	280.0	2117.5 <sup>1</sup>	6.6	Veum et al. (2004)
Basal diet	9.9	8.0	41.8 <sup>1</sup>	35.4	Veum et al. (2009)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	9.9	10.0	58.2 <sup>1</sup>	28.0	Veum et al. (2009)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	9.9	12.0	74.0 <sup>1</sup>	23.8	Veum et al. (2009)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	9.9	14.0	88.4 <sup>1</sup>	22.0	Veum et al. (2009)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	9.9	16.0	103.9 <sup>1</sup>	19.8	Veum et al. (2009)
Basal diet	20.0	5.0	37.4 <sup>1</sup>	7.6	Adeola (1995)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	20.0	57.6	372.0 <sup>1</sup>	20.2	Adeola (1995)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	20.0	105.6	765.7 <sup>1</sup>	10.4	Adeola (1995)
Organic (proteinate)	30.6	25.0	83.8 <sup>1</sup>	58.6	Lebel et al. (2014)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	30.8	25.0	115.3 <sup>1</sup>	43.0	Lebel et al. (2014)
Basal diet	31.1	3.9	53.5	55.4	Liu et al. (2014)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	31.1	59.9	890.9	42.9	Liu et al. (2014)
Organic (proteinate)	31.1	60.1	816.4	44.6	Liu et al. (2014)
Basal diet	31.0	4.2	32.0	31.8	Liu et al. (2014)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	31.0	62.9	471.5	37.1	Liu et al. (2014)
Organic (proteinate)	31.0	64.3	400.5	50.5	Liu et al. (2014)
Basal diet	82.0	36.0	260.0	11.9	Apgar and Kornegay (1996)
Inorganic (CuSO <sub>4</sub> )	82.0	250.0	1809.0	12.0	Apgar and Kornegay (1996)
Inorganic (CuLys)	82.0	245.0	1924.0	8.8	Apgar and Kornegay (1996)

DM = dry matter.

<sup>1</sup>These values were calculated using the following assumptions: ATTD of DM was 87.0% and DM in feces was 95%.

- 분을 통한 구리 배출에 의한 환경오염을 고려하여 최근 유럽, 미국 등과 같은 축산 선진국은 사료내 구리의 함량을 감소시키고 있음. 유럽의 사료법에 의하면 2019년 이전까지는 5-8주의 이유자돈의 사료내 구리 함량이 170 mg/kg이었으나 2019년 이후부터는 100 mg/kg으로 전보다 구리의 양을 제한하는 법이 제정됨.
- 낮은 이용성 때문에 배출되는 구리에 의한 환경오염을 방지하기 위해 자연에 존재하는 많은 광물질과 같이 펩타이드와 결합하여 본래 소장의 광물질 이온 섭취 경로와 다른 섭취경로를 이용하도록 하여 생체이용률을 향상시키는 제품도 생산되고 있음. 바이오플렉스 구리의 함량에 의하면 바이오플렉스 구리의 형태로 50-100 mg의 구리를 공급한 그룹에게서 황산구리의 형태로 175-250 mg 공급한 그룹과 같은 효과가 나타남 (Carson and Vignali, 1999).
- 성장능력과 광물질 배출에 대한 실험을 진행하였는데, 황산구리와 바이오플렉스를 사용하여 비교해 봤을 때 황산구리보다 바이오플렉스 구리의 사용으로 성장률이 5% 증가함. 또한 황산구리 150 ppm을 사용한 것보다 바이오플렉스 50 ppm을 사용한 그룹에서 구리의 배출이 감소한 것을 발견함 (Henman, 1999).
- 사료 내 구리의 함량을 향상시켰을 때 일당증체량, 일당사료섭취량 및 사료효율이 향상됨(그림 3-8, 3-9 및 3-10).

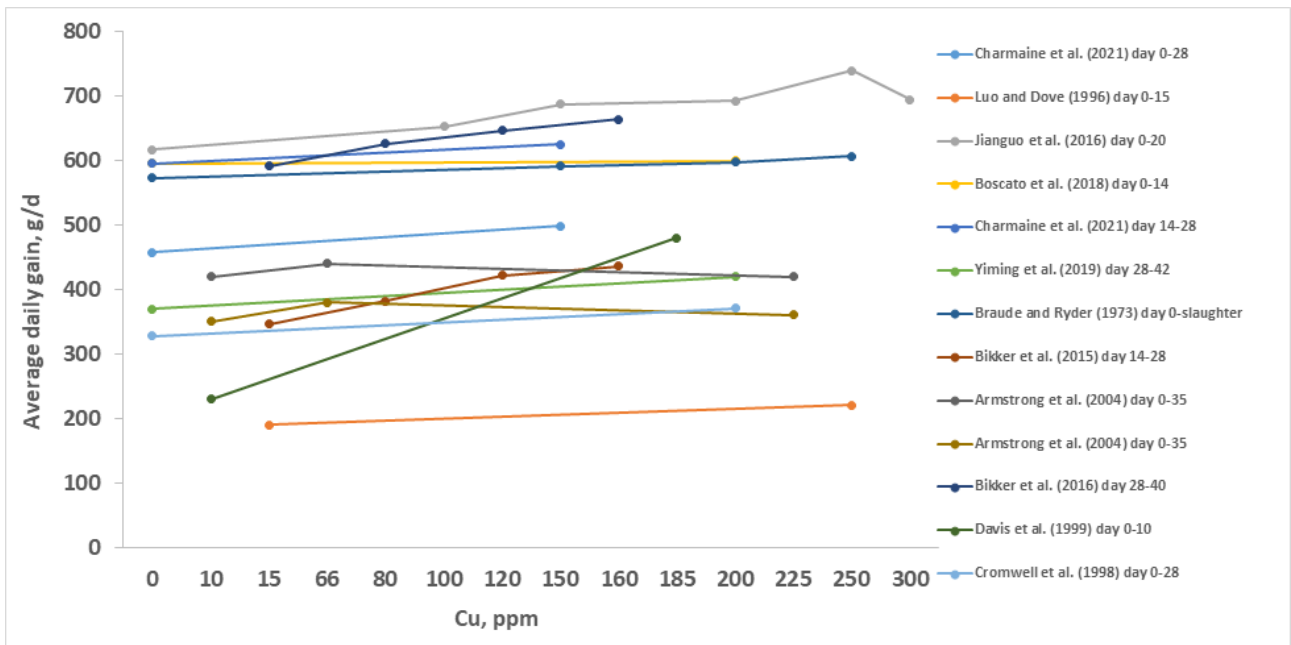


그림 3-8. 사료내 구리 함량 수준에 따른 돼지의 일당증체량 변화

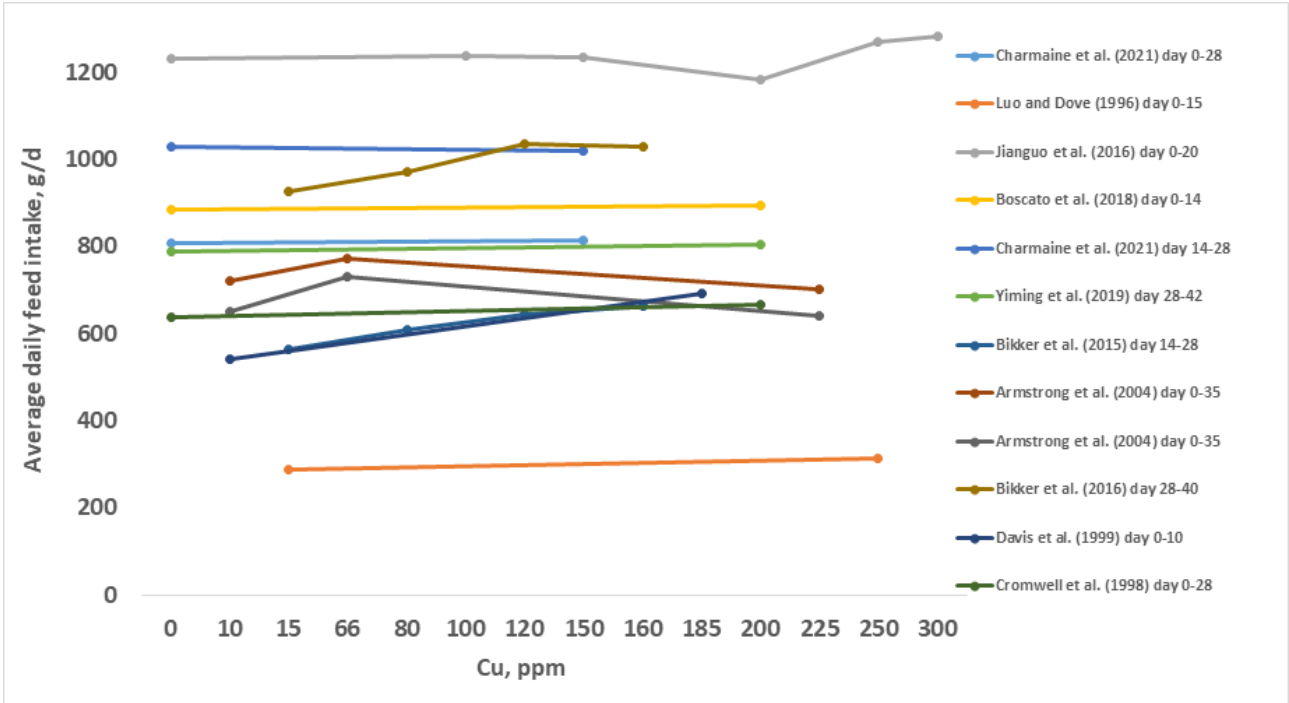


그림 3-9. 사료내 구리 함량 수준에 따른 돼지의 일당사료섭취량 변화

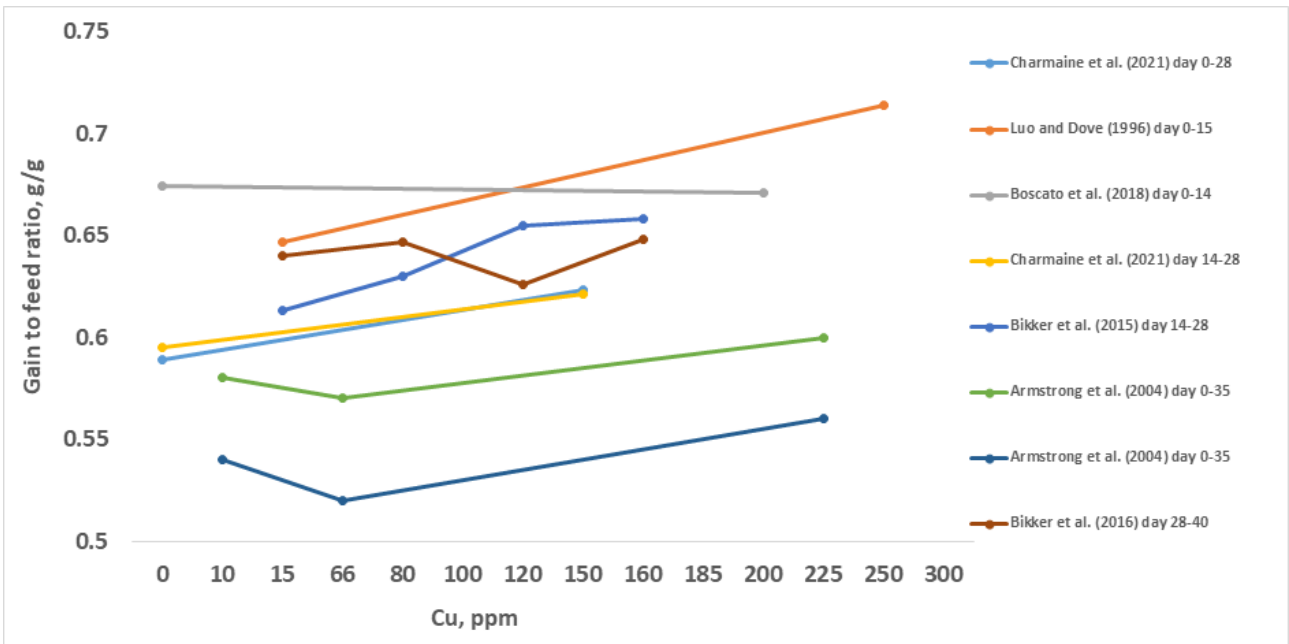


그림 3-10. 사료내 구리 함량 수준에 따른 돼지의 사료효율 변화



### 3. 양돈에서의 인 저감 사료

- 인은 골격조직의 발달과 유지에 있어서 중요한 역할을 하며, 혈액 응고, 근육 수축 이외에도 다양한 생리적 기능을 가지므로 필수 광물질에 해당함.
- 따라서 돼지의 성장 단계에 따른 인 요구량을 충분히 공급할 수 있는 배합사료가 제조 및 공급되어야 함 (한국가축사양표준, 2017: 표 3-4).

표 3-4. 양돈에서의 체중별 인 요구량

체중, kg	인 요구량 <sup>1</sup>	
	Total P, %	Total P, g/d
7~11	0.64	3.04
11~25	0.58	5.25
25~45	0.51	7.35
45~65	0.46	8.98
65~85	0.43	9.79
85~120	0.40	10.69

<sup>1</sup>한국가축사양표준 (2017).

- 하지만, NRC (2012)에 제시된 표준전장가소화 인 요구량 및 한국가축사양표준 (2017)의 유효 인 요구량이 동물실험 수행을 통해 제시된 인 요구량에 비해 낮다는 연구결과가 보고되었음 (그림 3-11; 그림 3-12; Kim et al., 2021).

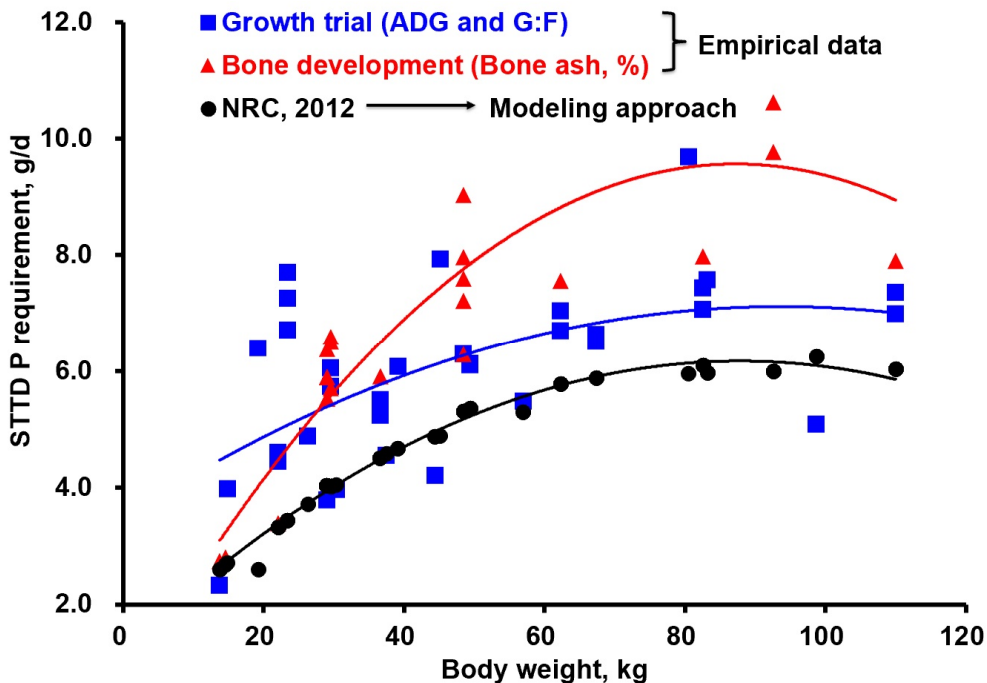


그림 3-11. 일당증체량 (ADG), 사료 효율 (G:F) 및 골회분을 조사항목으로 설정하여 동물실험 수행을 통해 문헌에서 제시된 일일 표준전장가소화 인 (STTD P) 요구량과 NRC (2012)에서 제시된 표준전장가소화 인 요구량 (Kim et al., 2021).

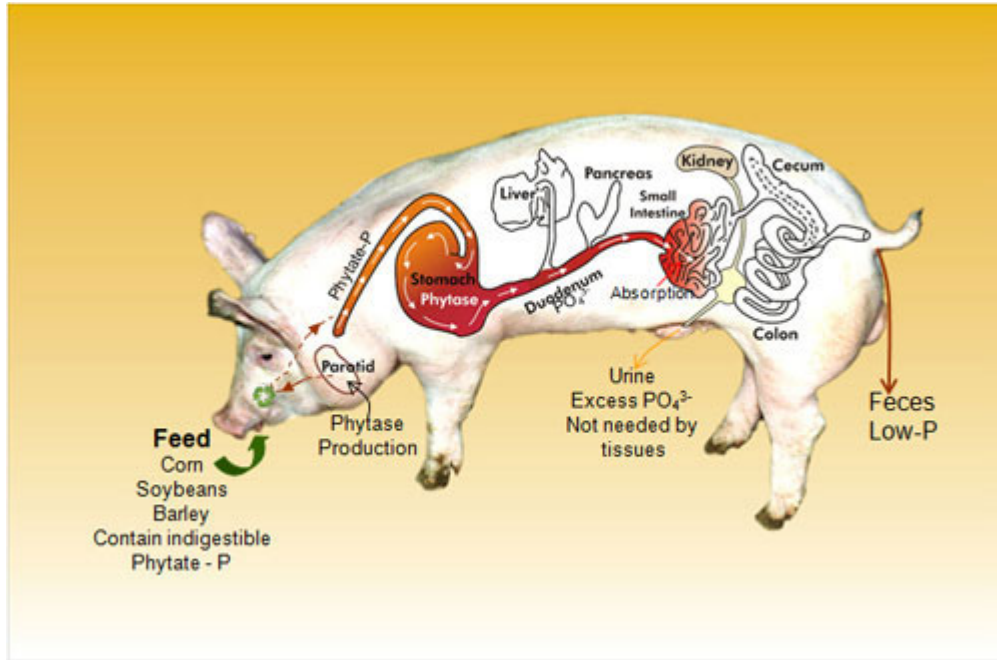


그림 3-12. 돼지에서 인의 대사. 인은 두 가지 메커니즘에 의해 십이지장과 공장 상부에서 무기 형태로 흡수됨. 함유 농도가 낮으면 능동 수송 메커니즘은 Na와 칼시트리올을 사용하지만, 대부분은 확산 과정을 통해 흡수됨.

- 또한, 일당증체량 또는 사료효율과 같은 사양성적을 극대화하기 위한 인 요구량보다 골회분과 같은 뼈 성장을 극대화하기 위한 인 요구량이 더 높은 것으로 알려짐 (Kim et al., 2021).
- 피틴 (phytin)이란 곡실류 혹은 그 부산물인 강피류 등에 많은 유기태의 인화합물로, 칼슘 또는 마그네슘염으로 되어 있음. 피틴태 인은 무기태 인에 비해 이용되기 어렵고 특히, 병아리에는 그 이용이 떨어짐. 소, 돼지에는 상당히 이용되지만 이 경우 비타민D를 보급하면 이용성이 향상됨.
- 피틴산 (phytic acid)은 주로 곡류의 외피에 존재하며, 분자 중에 인산을 함유하고 있음. 일부는 칼슘과 phytin으로 존재함. 사료 중의 철, 칼슘과 결합할 수 있지만, 모두 소화가 불가능하여 체내에서 활용되지 못함.
- 사료의 대부분은 식물 원료로 되어 있으며, 이런 식물성 사료에는 phytate (피트산염)와 phytate-P (피틴태인)이 함유되어 소화를 방해함. 단위가축에서는 이러한 피트산염이나 피틴태인이 소량만 부분적으로 이용되며 나머지는 분뇨로 배설됨. 피트산염이나 피틴태인의 이용성을 높이기 위해 파이테이즈를 첨가함.
- Phytate는 양돈영양에 있어 가장 중요한 항영양인자이며, 아연 및 구리와 높은 친화력을 가지고 있음 (Maddaih et al., 1964).
- Phytate는 정상적인 성장 및 생리활성에 필수적인 칼슘, 아연, 마그네슘, 철, 구리, 망간 등의 2가 혹은 3가 이온들과 phytic acid가 쉽게 결합하여 무기물의 체내 흡수를 저해시켜 광물질의 이용성을 낮춤 (Hartman, 1979).
- 단위가축에 phytase를 공급할 경우 원료사료에 존재하는 phytic acid 분해에 따른 인의 이용성 증대로 인 배설량을 감소시키고, 무기태 인의 첨가량을 낮출 수 있음.
- 사료 내 피틴태 인의 이용률 증가는 phytic acids에 결합된 Ca, Mg, Zn, Fe, Cu 및 아미노산과 단백질의 이용률도 증가시킴 (Pallauf and Rimbach, 1997).

- 사료의 인 함량을 0.75%에서 0.45%로 감소시키고 칼슘 함량을 0.9%에서 0.6%로 감소시킬 때, phytase를 1,500 FTU/kg의 첨가하면 인 배설량을 평균 61%까지 감소시킴.
- Phytase에 의해 증가된 인의 분리는 위장에서 칼슘과 인 불균형을 유발함. 또한 피트산염과 phytase는 소화기관에서 나트륨의 분비에 영향을 주기 때문에 높은 phytase 함유는 효과적인 사료 내 전해질 균형 (DEB)을 변화시킴
- 비타민 D (칼시트리올)는 인의 흡수를 증가시키지만 Mg, Al, Ca는 흡수를 감소시킴. 사료 내 과도한 Mg는  $Mg_3(PO_4)_2$ 의 복합체를 형성하여 인 흡수를 저해함. 반대로, 위장관에서 Mg 농도가 낮으면 인 흡수가 증가함.
- 돼지와 같은 단위동물은 이하선에서 분비되는 phytase로 피틴태 인을 소화시키는데, 분비량이 부족하여 식물성 사료 내 피틴태 인의 이용성이 떨어져 많은 양의 인이 외부로 배출됨.
- Phytase는 곡물과 종자에서 발견되는 난소화성 피틴산의 가수분해를 촉진시켜 유기인산과 미오이노시톨을 방출시키는 효소로, 이를 통해 방출된 유기인산은 동물 소화기관 (GIT)에서 흡수됨.
- 돼지의 배합사료는 주로 식물성 원료로 되어 사료 내 phytase의 함량이 높으며, phytate와 결합하여 소화되지 않는 사료원료는 대부분이 분뇨로 배설됨 (Selle and Ravindran, 2008).
- Phytase는 단백질과 phytate의 결합을 끊어 단백질의 소화를 돕고 (Shelton et al., 2003), 체내에 흡수되는 단백질 양의 증가로 배설되는 양이 감소하여 분뇨의 질소 배설량을 감소시킴.

□ Phytase를 첨가한 양돈용 사료의 성장단계별 인 소화율 (그림 3-13)

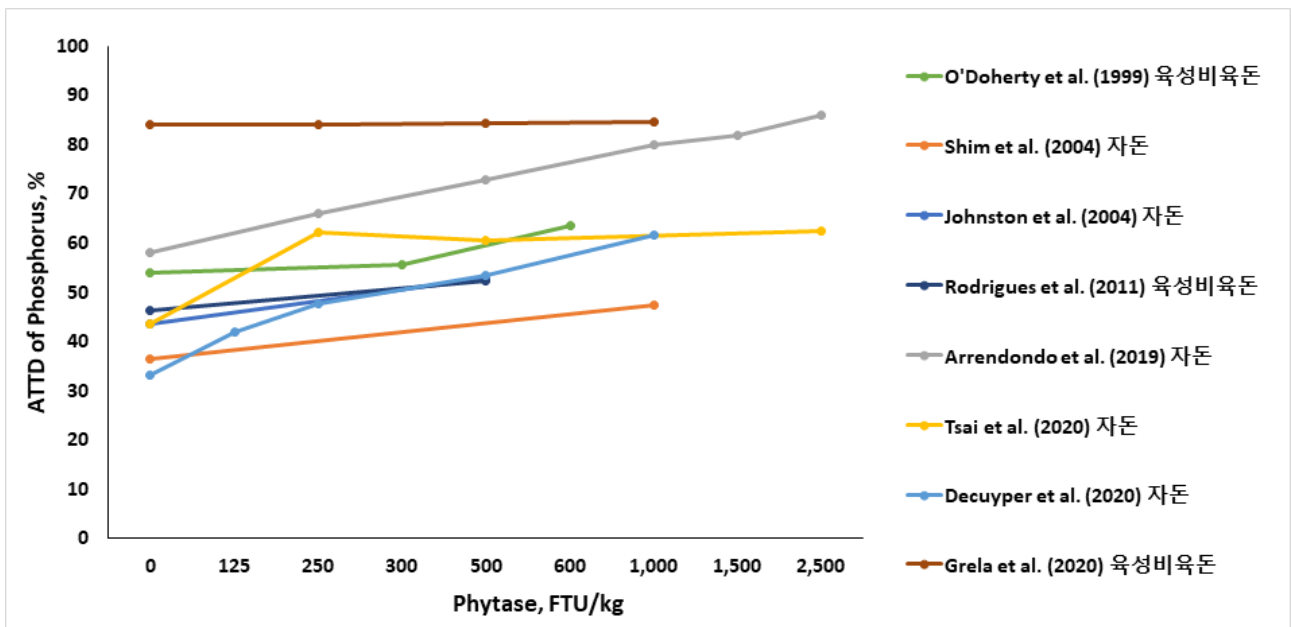


그림 3-13. 자돈 및 육성비육 사료 내 phytase의 첨가량에 따른 인의 소화율

- 자돈 및 육성비육 사료 내 phytase의 첨가는 인의 소화율을 증가시켰음.

- 임신돈, 포유돈 사료 내 phytase의 첨가는 인의 소화율을 증가시켰음 (그림 3-14).

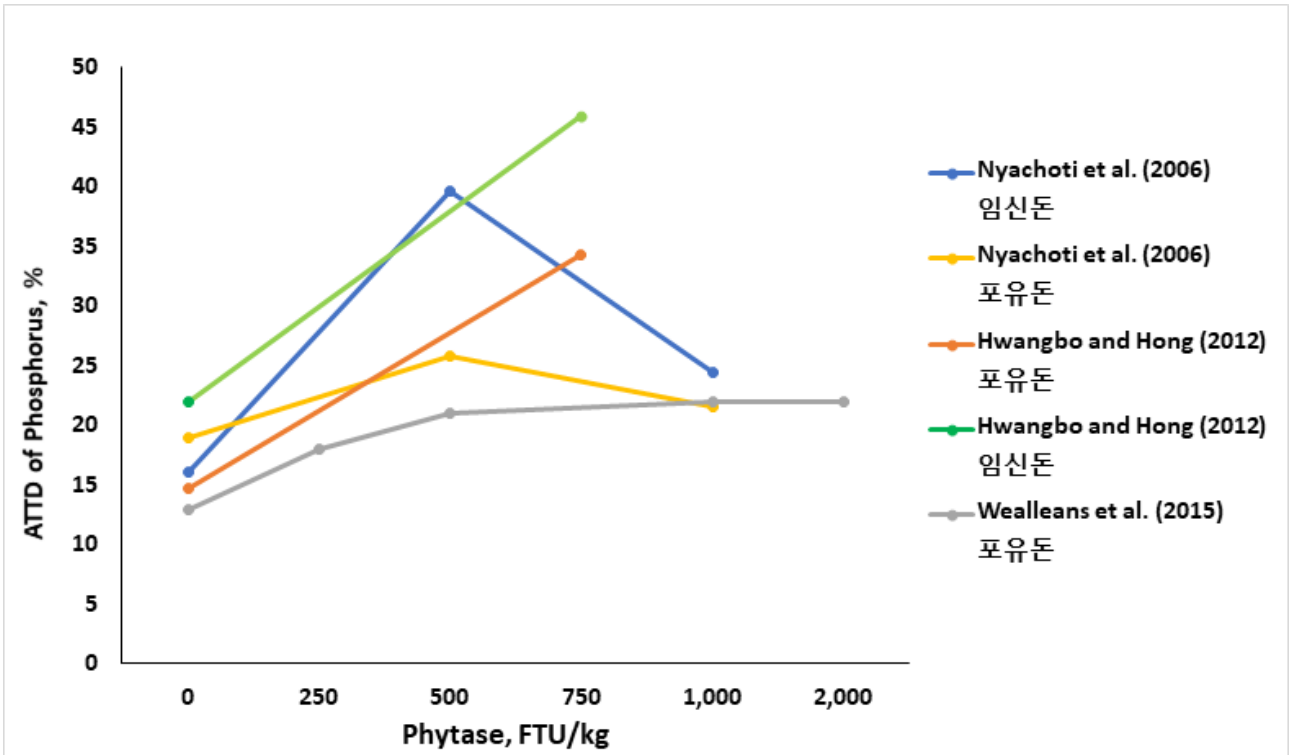


그림 3-14. 임신돈, 포유돈 사료 내 phytase의 첨가량에 따른 인의 소화율

- 성장단계별 양돈사료의 인 첨가수준 (그림 3-15, 3-16, 3-17, 3-18, 3-19, 3-20, 3-21, 3-22)

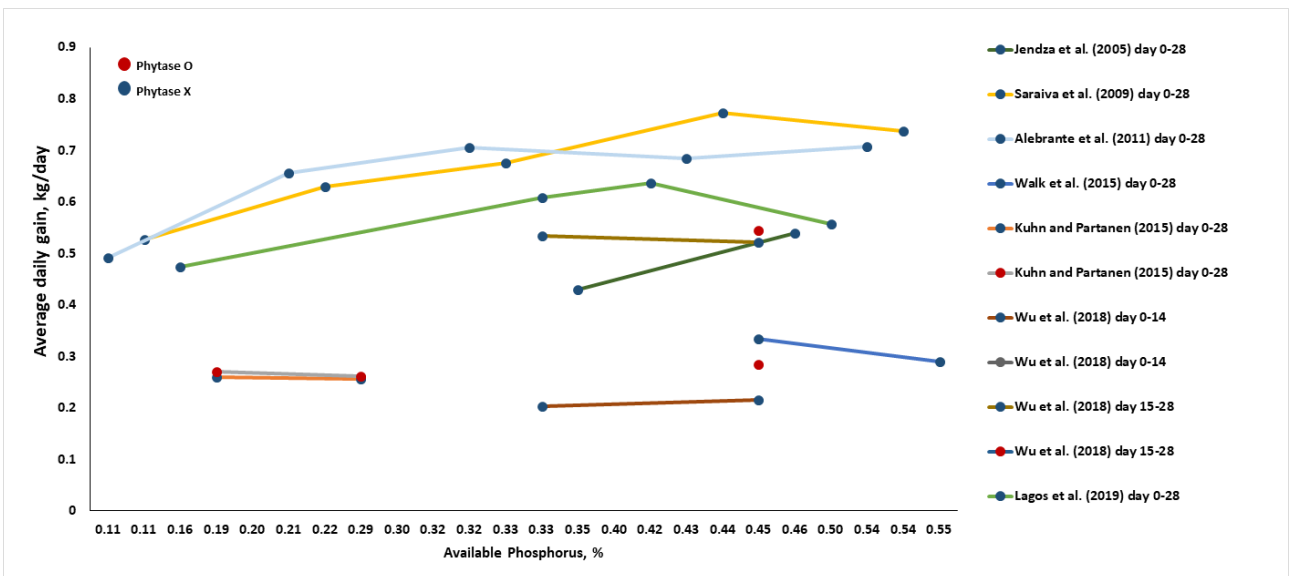


그림 3-15. 자돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 일당증체량

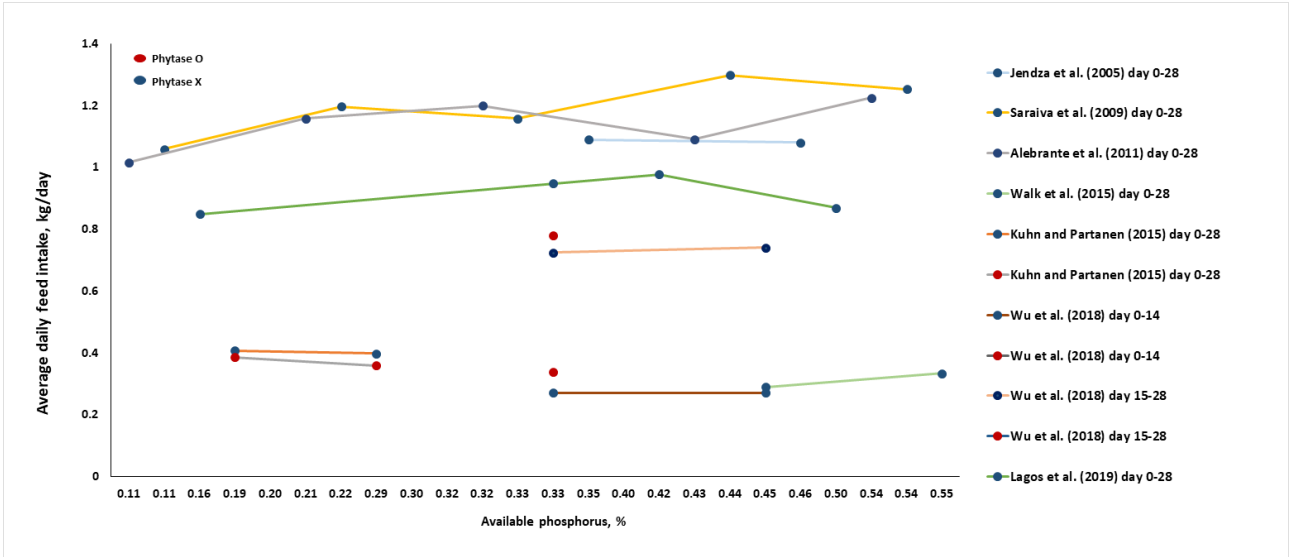


그림 3-16. 자돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 일당사료섭취량

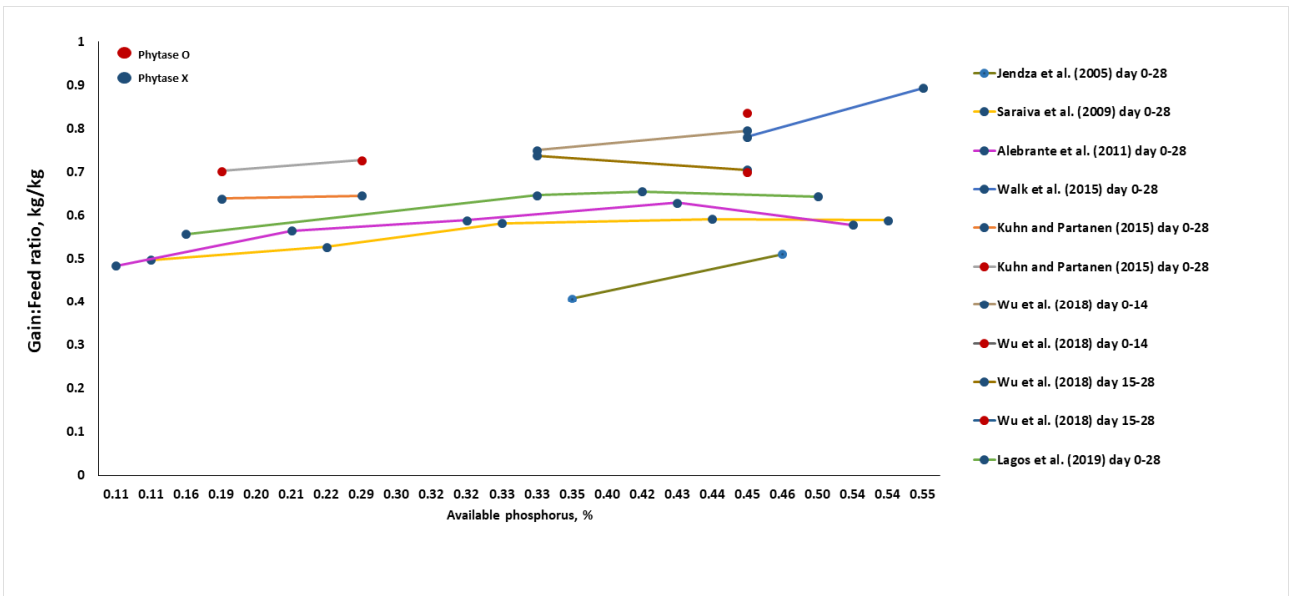


그림 3-17. 자돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 사료효율

- 자돈사료 내 available phosphorus 함량 증가는 일당증체량, 일당사료섭취량 및 사료효율에 영향을 미치지 않거나 긍정적인 영향을 미침.
- 자돈사료 내 phytase의 첨가는 일당증체량, 일당사료섭취량 및 사료효율에 긍정적인 영향을 미침.

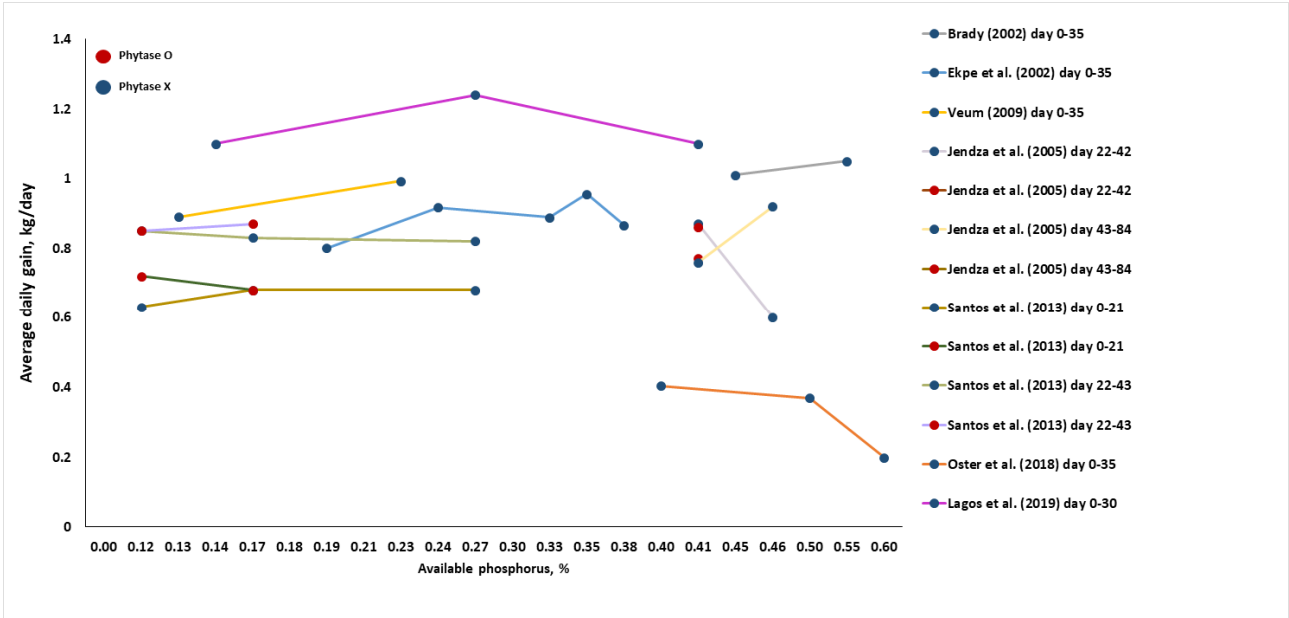


그림 3-18. 육성비육돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 일당증체량

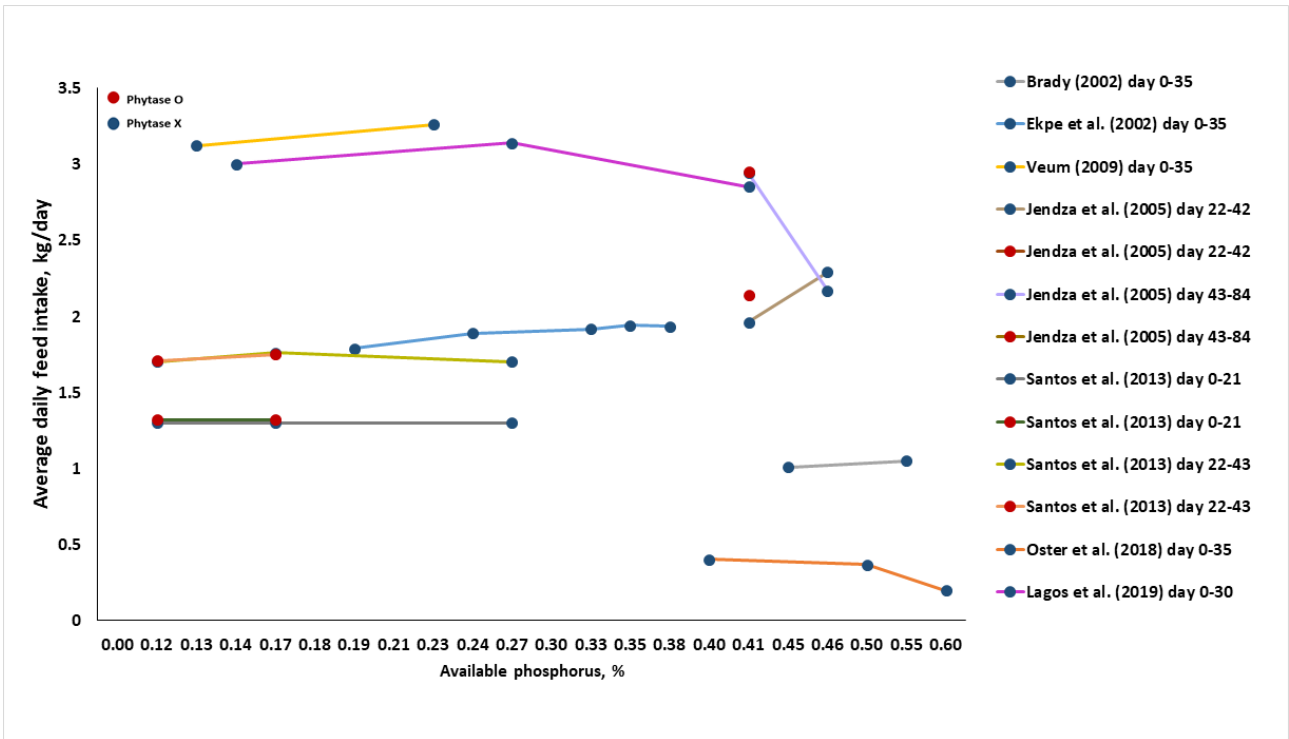


그림 3-19. 육성비육돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 일당사료섭취량

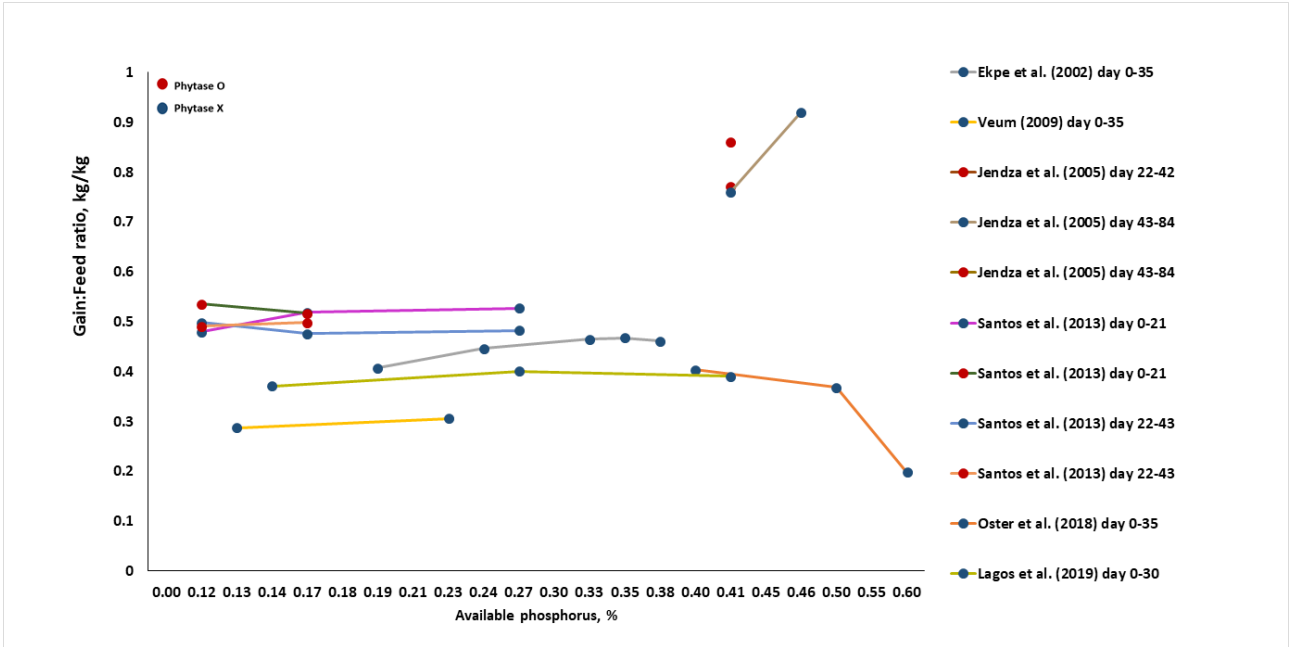


그림 3-20. 육성비육돈사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 사료효율

- 육성비육돈 내 phytase의 첨가는 일당증체량, 일당사료섭취량 및 사료효율에 긍정적인 영향을 미침.

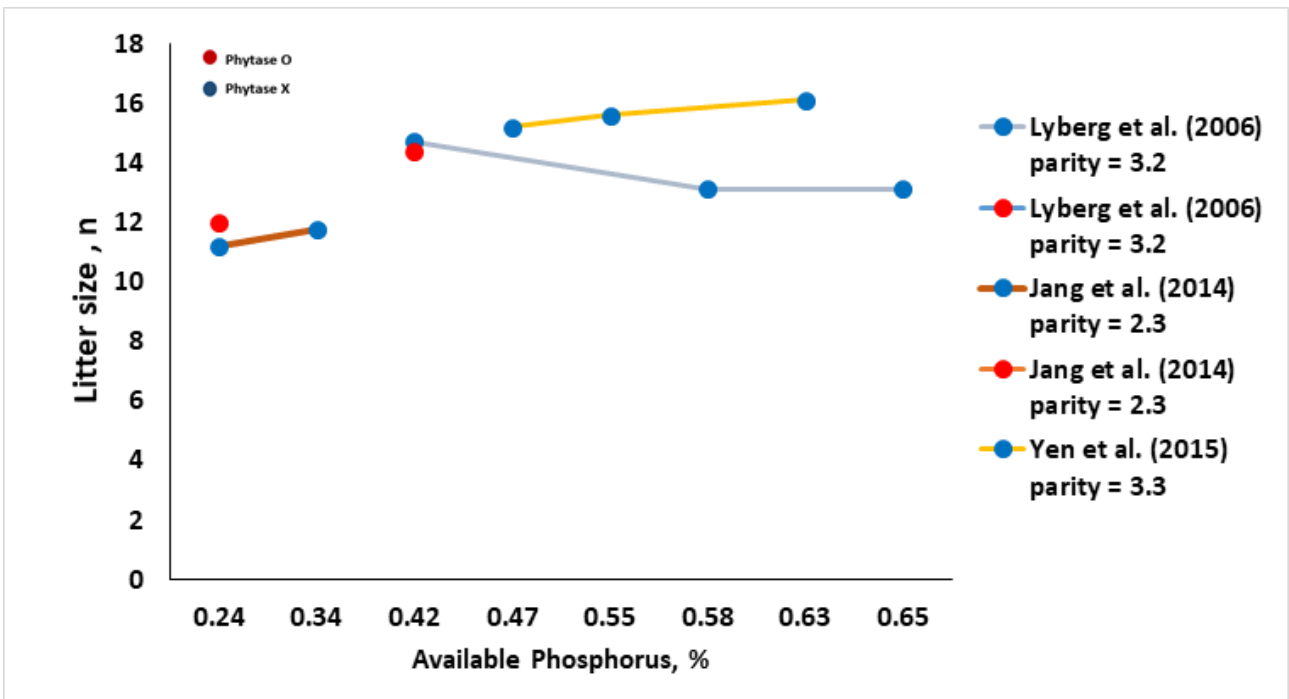


그림 3-21. 임신돈 사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 총 산자수

- 임신돈 사료 내 인 첨가수준 및 phytase의 첨가 여부는 총산자수에 영향을 미치지 않았음.

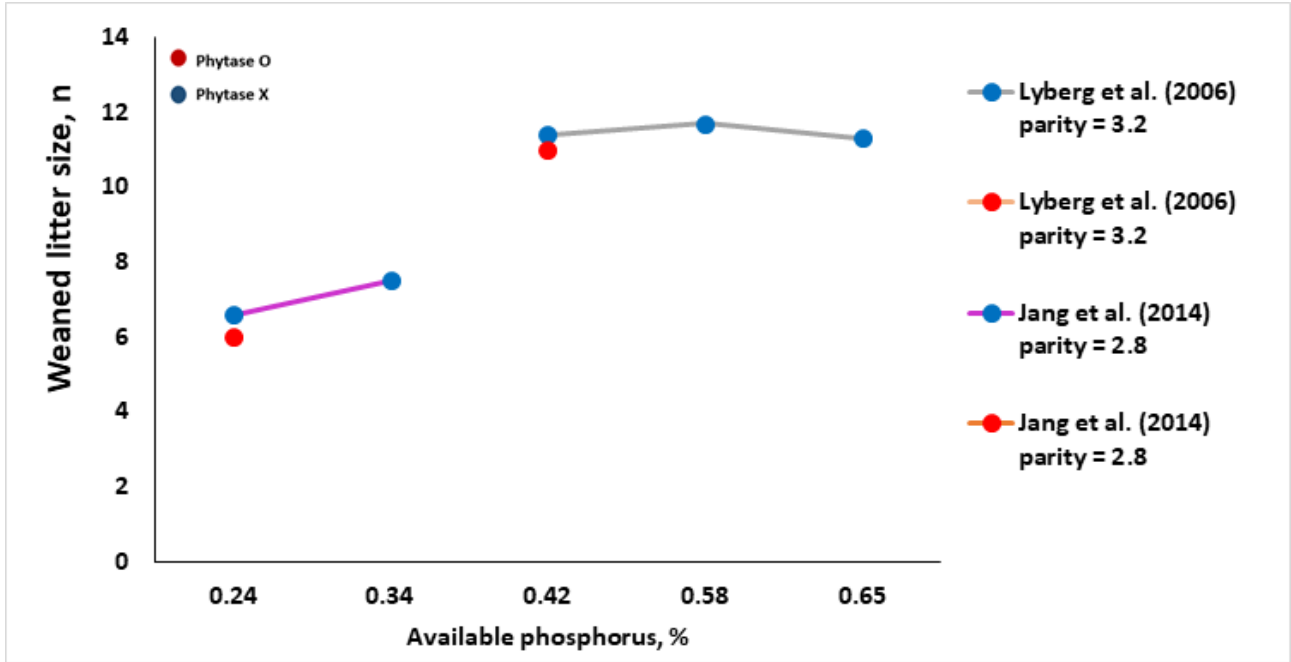


그림 3-22. 포유돈 사료 내 인 첨가수준, phytase 첨가 여부에 따른 이유두수

- 포유돈 사료 내 인 첨가수준 및 phytase의 첨가 여부는 이유두수에 영향을 미치지 않았음.



□ 축종별 영양소의 섭취 및 배설에서의 단계별 이용성 향상 관련 제도 조사 검토

- 사료내 인 최소화 방안, 사료의 인 이용성 향상을 위한 효소제 및 대체공급원
  - Phytase의 첨가는 마그네슘, 구리, 철 및 아연의 소화율에 영향을 미침 (Reddy et al., 1982).
  - 사료의 인 함량을 0.75%에서 0.45%로 감소시키고 칼슘 함량을 0.9%에서 0.6%로 감소시킬 때, phytase를 1,500 FTU/kg의 첨가하면 인 배설량을 평균 61%까지 감소시킴.
  - 단위가축에 phytase를 공급할 경우 원료사료에 존재하는 phytic acid 분해에 따른 인의 이용성 증대로 인 배설량을 감소시키고, 무기태 인의 첨가량을 낮출 수 있음.
  - 사료 내 피틴태 인의 이용률 증가는 phytic acids에 결합된 Ca, Mg, Zn, Fe, Cu 및 아미노산과 단백질의 이용률도 증가시킴 (Nasi, 1990; Young et al., 1993).
- 분, 뇨로 배설되는 질소의 휘발 최소화 방안
  - 가축 분뇨에서 발생하는 오염은 대부분 지하수와 지표수의 질소와 인 오염.
  - 분뇨 중 과다한 인의 함량은 강과 호수의 부영양화의 원인이 되어 수질을 오염시키며 (Correll, 1999), 질소의 일부분은 암모니아로 발생되어 대기를 오염시킴 (Kristensen and Watches, 2000).
  - 가축 분뇨에 함유된 질소와 인을 struvite ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ )형태로 회수하여 자원화하는 방안이 있음.
  - Struvite는  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 가 몰비로 1:1:1로 결합한 결정체로 guanite 또는 Magnesium Ammonium Phosphate (MAP)라고도 불림.
  - Struvite는 적정 조건에서  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 가 1:1:1 몰비로 반응하여 struvite 결정을 형성함 (Buchanan et al., 1994).
  - Struvite는 비중이 물보다 무겁기 때문에 용액 중에서 고액분리가 빠르게 일어나고 침전물을 건조시켰을 때는 흰색 또는 연미색을 띰. 또한 알칼리에서는 용해성이 낮고 산성에서는 비교적 용해도가 높은 특징을 가지고 있음.
  - 여러 선행 연구결과에서 비료로서 struvite의 효용성이 탁월하다고 입증되었음에도 (Gaterell et al., 2000; Ryu and Lee, 2017), 우리나라에서는 아직까지 법적 요인 및 인식 등의 부족으로 struvite가 자원화 방안으로 활용되지 못하고 있음.

#### 4. 가금에서의 인 저감 사료

- 식물원료내 총 인의 60~80%가 피틴태 인 형태로 이루어져 있으며(Abel-Megeed와 Tahir, 2015), 피틴태 인의 이용성은 육계의 일령과 대사작용에 따라 0~50%정도의 변이를 나타냄(Manangi와 Coon, 2008) (그림 3-23)
- 돼지 및 양계와 같은 단위동물과 반추위가 발달하지 않은 송아지는 장내에서 분비되는 phytase가 부족하기 때문에 식물성 사료 내 피틴태 인을 이용성이 떨어지게 되어 많은 양의 인이 외부로 배출됨.
- Phytase는 피틴산(myo-inositol hexaphosphoric acid)의 가수분해에 의해 킬레이트 효과를 감소시킴으로써 캐놀라밀, 면실박, 대두박, 밀, 및 콩류와 같은 원료사료의 이용성을 높여 영양적 가치를 향상하는데 도움을 줌(Abel-Megeed와 Tahir, 2015)
- 따라서, 사료내 phytase 첨가는 육계의 식물성 사료에서 이용되지 못하고 외부로 배출되는 인의 양을 줄일 수 있음.

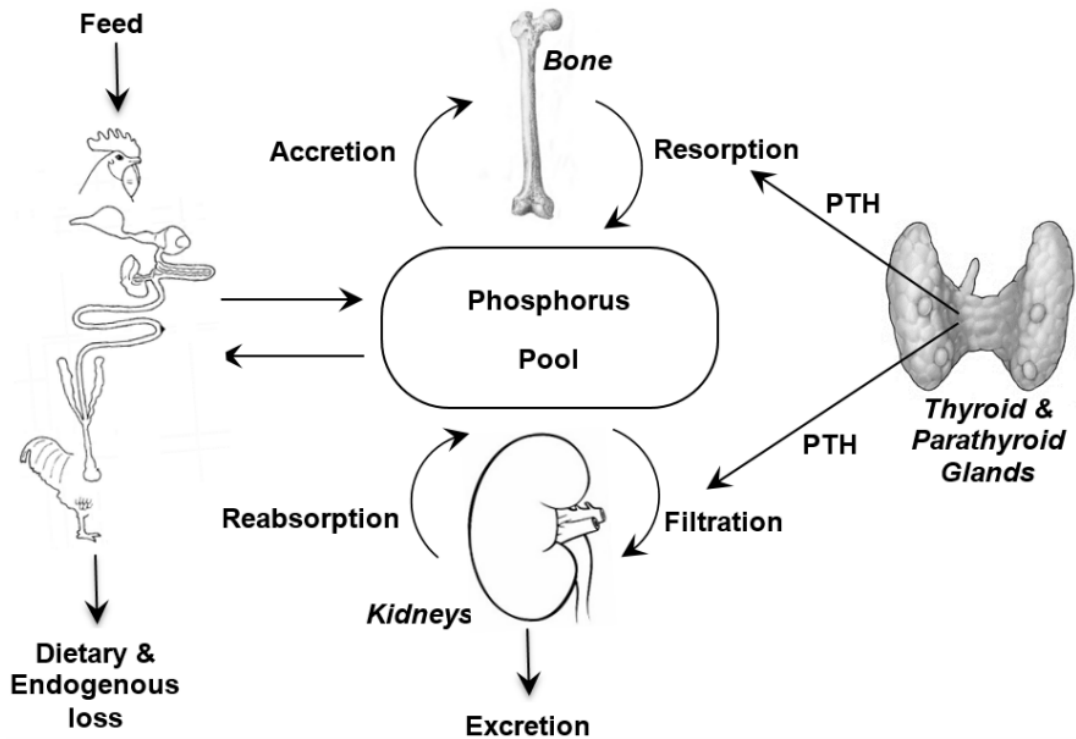


그림 3-23. 닭 인 대사 및 배설 경로 (Li et al., 2016)

- 닭의 분뇨 내 인 함량은(1.4% of fresh weight) 소의 분뇨 내에 있는 인 함량(0.1~0.7% of fresh weight; Mullins, 2009)보다 높아서 육계에서의 분뇨를 통한 인 배출량 감소에 대한 노력이 더 요구됨
- 특히, 전세계 육류 공급량의 70%를 차지하는 돼지와 가금류에서의 인 배출량 저감연구는 제한된 인 공급원의 지속 가능한 관리를 보장하는데 더 크게 기여할 것으로 예상됨.
- 따라서, 인의 이용과 재사용 효율을 향상시키기 위한 영양학적 관점에서의 전략과 단위가축에서의 인 이용성에 대한 생물학적 다양성을 고려한 연구에 대한 중요성이 증가하고 있음.
- 산란계의 경우, 사료 내 phytase 첨가에 대한 반응의 약 69~86%의 활성이 crop에서(Al-Sharafat 등, 2009) 나타나는 것을 확인함(Liebert 등, 1993)
- 사료 내 phytase 첨가에 따른 육계의 인 축적률 변화에 대한 286개의 실험결과를 이용해 메타분석한 결과, 육계에 phytase 무첨가 사료 급이 시 인 축적률은 평균 48.4%였고, 사료 내 약 1,039 FTU/kg의 phytase 첨가 시 인 축적률이 약 8.6% unit 증가함(Bougouin 등, 2014).
- 또한, 사료 내 phytase의 첨가는 인 축적률에 긍정적인 효과를 주지만 연구에 따라 phytase 첨가 효과의 정도는 사료내 칼슘, 실험기간, 육계의 일령, 및 phytase의 첨가수준에 영향을 받았음 (Bougouin 등, 2014)
- 육계에서의 총 인 축적률은 인 배출량에 직접적으로 영향을 주기 때문에 사료 내 phytase 첨가에 따른 인 축적률에 대한 연구는 인 배출량을 간접적으로 측정할 수 있는 방법임.
- 육계 사료 내 적정 인 요구량 측정을 위한 많은 연구가 이루어지고 있지만, 사료내 최소량의 적정 인 요구량에 대해선 아직 확실하게 정립되지 않음.
- 인 요구량을 측정하는데 사용되는 조사항목으로는 증체량, 사료효율, 경골강도, 경골 또는 발톱내 회분함량이 주로 사용됨.

- 육계사료 내 비피틴테인 함량 증가는 일당증체량, 일당사료섭취량, 및 사료효율에 영향을 주지 않았음 (그림 3-24, 3-25, 3-26 및 3-27). 사료 내 phytase 첨가에 따른 성장반응은 실험사료 급이 기간과 육계의 일령에 따라 차이를 보임.

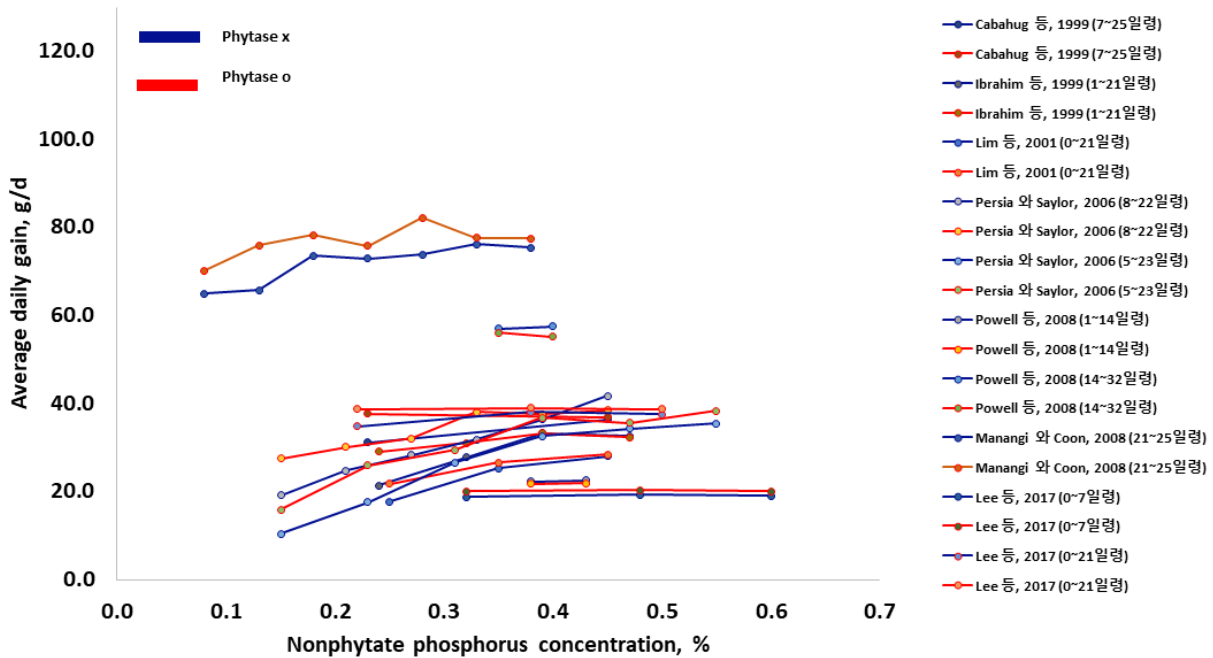


그림 3-24. 사료내 비피틴테인 함량과 phytase 첨가유무에 따른 육계 전기(0~28일령)에서의 일당증체량 변화

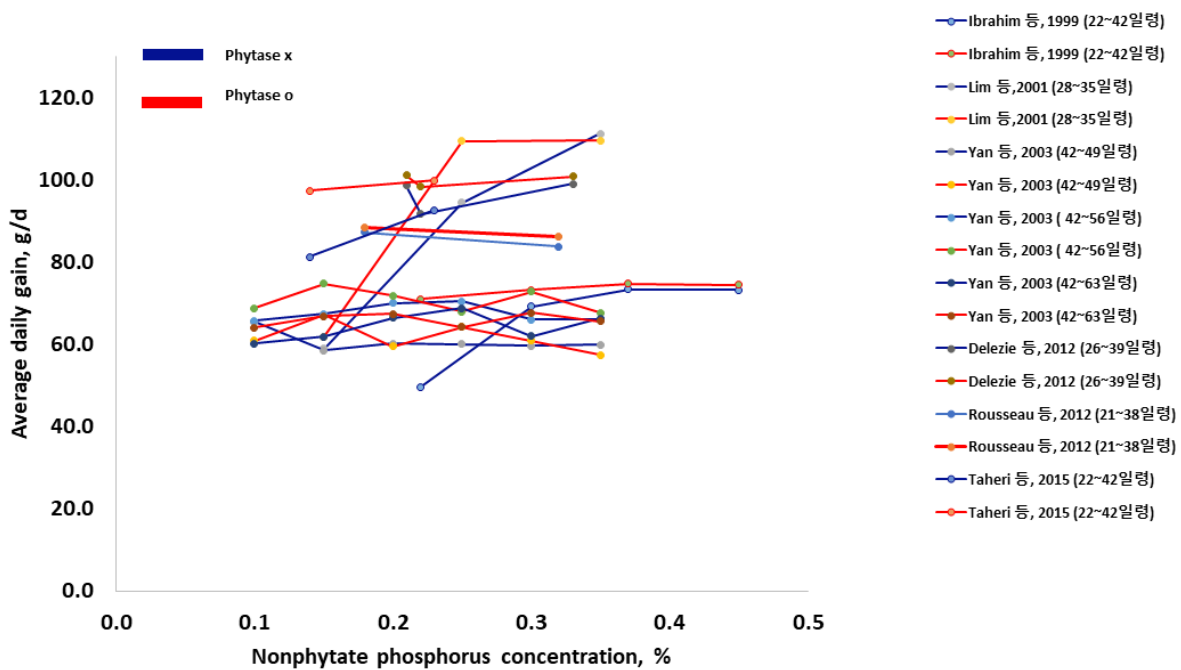


그림 3-25. 사료내 비피틴테인 함량과 phytase 첨가유무에 따른 육계 후기(28일령 이후)에서의 일당증체량 변화

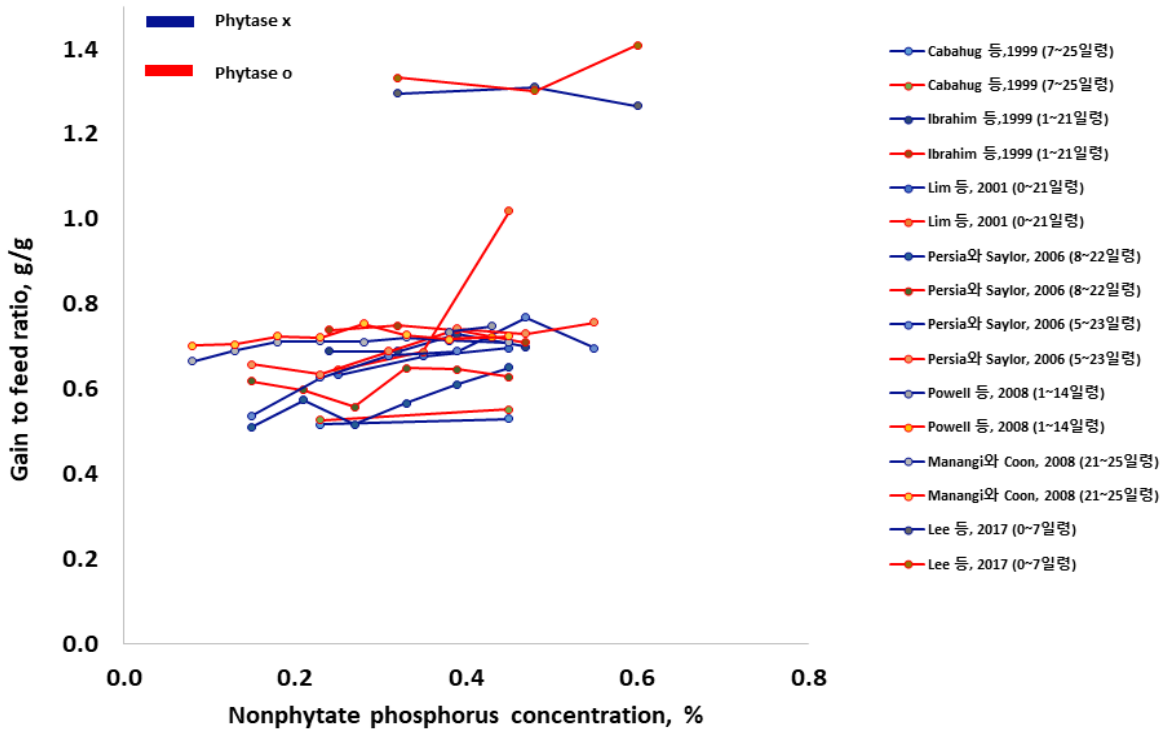


그림 3-26. 사료내 비피틴테인 함량과 phytase 첨가유무에 따른 육계 전기(0~28일령)에서의 사료 효율 변화

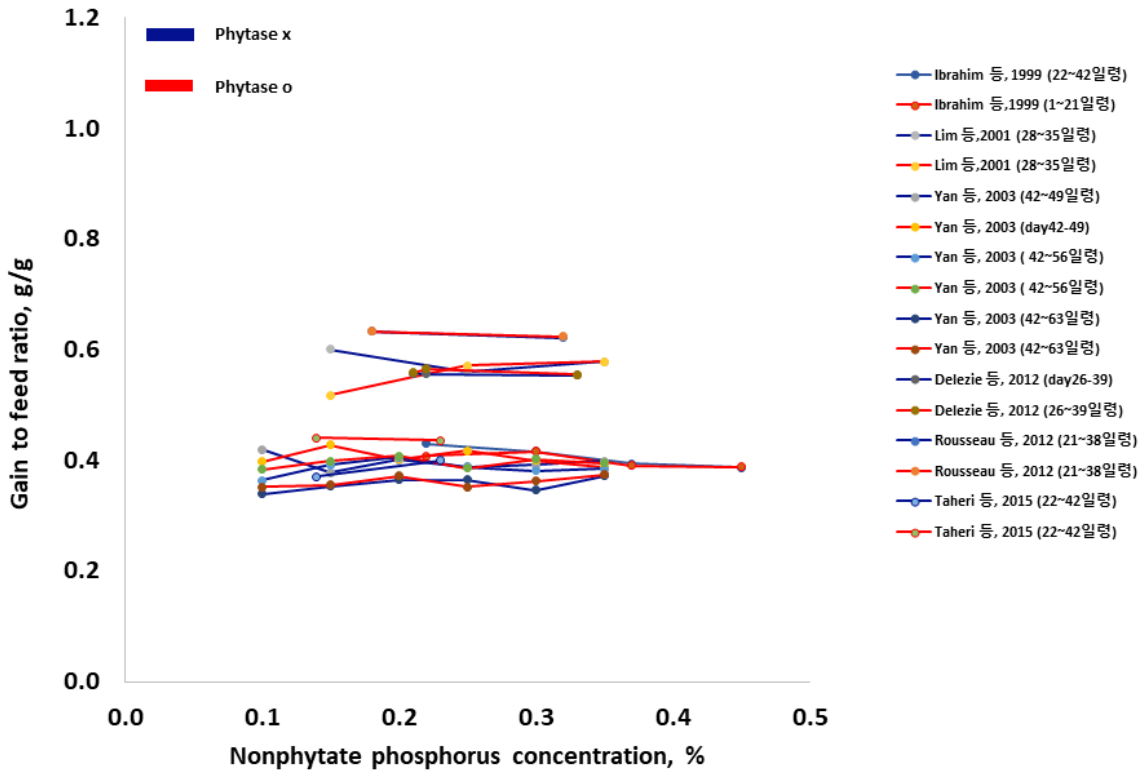


그림 3-27. 사료내 비피틴테인 함량과 phytase 첨가유무에 따른 육계 후기(28일령 이후)에서의 사료 효율 변화

- 가금사료 내 phytase 무첨가 시 총 인 10% 감소는(0.45% 기준) 총 인 배출량, 총 인 축적량, 및 경골 내 회분비율을 각각 11.4%, 9.4% 및 1.5% 감소시킴(표 3-5). 반면에 사료 내 phytase 첨가할 경우엔 사료 내 총 인 10% 감소에 따라 총 인 배출량, 총 인 축적량 및 경골 내 회분이 각각 16.3%, 5.3%, 0.1% 감소함.

표 3-5. 사료 내 총 인 (0.45% 기준) 10% 저감 시 phytase 첨가에 따른 총 인 배출량, 총 인 축적량, 및 경골내 회분함량 변화

항목, %	Phytase 무첨가 시	Phytase 첨가 시
총 인 배출량	-11.4	-16.3
총 인 축적량	-9.4	-5.3
경골 내 회분	-1.5	-0.1

(Yan 등, 2003; Angel 등, 2006; Manangi와 Coon, 2008; Woyengo 등, 2010; Rousseau 등, 2012; Delezie 등, 2012)

## 5. 사료 내 중금속 제한에 관한 제도(규제) 조사 및 비교분석(도입배경 포함)

### 1) 국내

#### <양돈>

- 양돈사료 내 항생제 사용의 금지로 인해 항생제 대체제로써의 아연 및 구리에 대한 연구가 진행되었음.
- 특히 자돈사료 내에 약리적 수준으로 아연 또는 구리를 높은 함량 사용할 경우, 설사방지 효과, 폐사율 감소, 사양성적 개선 등의 효과가 있는 것으로 밝혀짐.
- 하지만, 아연은 약 50-80%가 소장에서 흡수되지 않고 분으로 배출되고, 구리는 최소 40%에서 최대 93%까지 분으로 배출될 수 있으므로, 과도한 아연 및 구리 급여시 분으로 배출되는 양이 증가함.
- 따라서 사료관리법에서는 2017년 개정을 통해 양돈사료 내 구리의 약리적 수준의 첨가를 금지하였고, 아연의 약리적 수준의 첨가는 자돈에서만 ZnO를 첨가하는 경우에만 허용하였는 개정안을 적용하였음 (표 3-6).

표 3-6. 양돈용 배합사료 중 구리 및 아연 함량 제한기준 (2017년 개정)

성장단계	허용기준, ppm 이하	
	구리	아연 <sup>1</sup>
포유자돈 및 이유돈	135	120
육성돈 전기용	130	100
육성돈 후기용	60	75
비육돈용	25	75
번식돈용	25	150

<sup>1</sup>포유자돈 및 이유돈용 배합사료 내 설사방지 목적의 아연 함량 제한기준은 ZnO를 첨가하는 경우 2,500ppm 이하

<가금>

- 국내 사료내 중금속 제한에 관한 제도 확립되지 않음

2) 미국

<양돈>

- 미국 USDA의 NRCS(Natural Resources Conservation Service) Nutrient Management Technical Note에 질소와 인의 배출량 저감을 위한 방법들이 명시되어 있음 (표 3-7).

표 3-7. 인 배출량 저감을 위한 방법

방안	인 저감률(%)
요구량에 근사한 사료배합비 작성	10-15(단위동물)
낮은 조단백질:첨가아미노산 비율	-
소화율이 높은 사료의 사용	5
Phytase의 첨가/사료 내 인 함량을 낮춤	20-30
효소제 사용	5
성별을 나누어 사육	-
성장단계별 사육	5-10

<가금>

- USDA-NRCS에서는 다양한 성장단계별 가금사료의 인 배출량을 감소시키기 위하여 NRC(National Research Council, 1994)의 기준에 부합하도록 영양소균형을 갖춰 정밀배합하도록 권장하고 있음 (표 3-8).
- 미국 USDA의 NRCS(Natural Resources Conservation Service) Nutrient Management Technical Note에서 인의 배출량 저감을 위한 방법들이 명시되어 있음(표 3-9).

표 3-8. 가금류의 권장 인 요구량 (NRC, 1994)

축종	일당사료섭취량 또는 주령	인 권장 요구량, %
산란계	80g/d	0.31
	100g/d	0.25
	120g/d	0.21
육계	0-3주	0.45
	3-6주	0.35
	6-8주	0.30
칠면조	0-4주	0.60
	4-8주	0.50
	8-12주	0.85
	12-16주	0.75
	16-20주	0.65
오리	20-24주	0.55
	0-2주	0.40
	2-7주	0.30
육계 종계		350mg/d
칠면조 종계(수)		0.25
칠면조 종계(암)		0.35
오리 종계		-

**표 3-9. 가금의 인 배출량 저감을 위한 방법 (USDA, 2021)**

방법	인 저감률(%)
요구량에 근사한 사료배합비 작성	10-15
낮은 조단백질:첨가아미노산 비율	해당 없음
소화율이 높은 사료의 사용	5
Phytase의 첨가/사료 내 인 함량을 낮춤	20-30
효소제 사용	5
성별을 나누어 사육	5-8
성장단계별 사육	5-10

**3) 일본**

- 최근 킬레이트 미네랄에 대한 양돈 및 사료업계의 관심이 높아지고 있는데, 일본 및 유럽은 환경문제와 관련하여 미네랄의 사료내 첨가량을 법으로 규제하며 흡수율이 높은 킬레이트 미네랄을 소량 첨가함으로써 환경문제를 해소하고 있음.

**4) 유럽**

- 국제연합식량농업기구(FAO)에 따르면, 분뇨저장시설 및 퇴비 시비는 암모니아, 산화질소 및 메탄 배출에 밀접하게 관련이 있음.
- 유럽연합 의회 2010/75/EU지부 및 관할관청은 돼지 및 가금류의 설비 허가조건 설정 시 산업 배출량 제한 수준을 초과하지 않도록 사육하는데 참조가 될 Best available techniques(BAT) 방법을 고시함.
- 이 규정은 사육규모가 40,000수 이상인 농가에 적용되며, 사육 시 배출되는 질소, 인, 먼지, 소음 및 악취 배출량 제한을 위한 적정 사육방법을 제시함(EUR-Lex, 2017).
- 총 인 배출량 감소를 위해서 사료내 동물의 영양소 요구량을 만족시키는 사료배합비 설계조건을 요약된 조건의 단일 또는 중복 조건을 따르도록 영양조건을 고려한 방식(BAT) 사용을 권장하고 있음 (표 3-10).
- 축종별 연간 가금사에서 배출되는 총 인 함량(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 다음과 같으며, pullet이나 종계에는 적용되지 않고 있음(표 3-11).

**표 3-10. 인 배출량 감소를 위해 권장 사육방법**

방법	적용내용
사육기간별 동물의 요구량을 충족하도록 배합된 사료	일반 적용사항
총 인 배출량 감소에 효과가 검증된 사료첨가제 사용 (예. phytase)	phytase는 organic 방식을 통해 사육 시 사용되지 않을 수 있음 (Regulation (EC) No 1831/2003)
사료내 원료사료의 인 공급을 부분적으로 대체하기 위한 가소화 인 함량이 높은 무기태인산염의 사용	일반적으로 소화율이 높은 무기태인산염의 가용성과 관련된 첨가 제한조건 내에서 적용 가능함

**표 3-11. 축종별 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 형태로 배출되는 인 배출량**

축종	인 배출량(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> excreted/animal place/year)
산란계	0.10~0.45
육계	0.05~0.25
칠면조	0.15~1.0

## IV. 선진국의 환경부담 저감 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례

### 1. 온실가스 감축과 저메탄 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례

#### 1) 국내

##### ○ 저탄소 농축산물 인증제도

- 저탄소 농업기술을 활용하여 생산과정에서 온실가스 배출을 줄인 농축산물에 저탄소 인증을 부여하는 제도로 농업인의 온실가스 감축을 유도하고 소비자에게 윤리적 소비선택권을 제공
  - 저탄소 농업기술: 농업생산 전반에 투입되는 비료, 농약, 농자재 및 에너지 절감을 통해 온실가스 배출을 줄이는 영농방법 및 기술
  - 사업시행 주체: 농업기술 실용화재단
  - 신청기준: GAP 인증을 받은 농산물을 대상으로 하고, 온실가스 배출량 산출이 가능한 품목이어야 함
- ※ 현재, 축산물은 인증기준이 마련되어 있지 않고, 인증 사례도 없음

##### ○ 농업부문 온실가스 감축사업

- 농업인의 자발적 온실가스 감축노력을 지원하기 위한 2012년부터 시작한 사업으로 농업인의 신소득 창출, 농업부문 기후변화 대응 및 농업 경쟁력 강화가 목적
- 2020년 1년간 온실가스 감축실적 9,738톤의 검증을 거쳐 인증서와 함께 9,738만원의 인센티브를 지급 (저메탄 사료의 사료는 등록 사례는 없음)
- 본 사업은 농림부 자체 사업으로, 배출권거래가 가능한 온실가스 감축 외부사업과는 다름

##### ○ 온실가스감축 외부사업(배출권거래제 외부사업)

- 농축산 부분과 같이 배출권거래제 할당대상업체(의무감축 대상업체)가 아닌 외부에서 특정 기술을 이용하여 국제적 기준에 부합하는 방식으로 감축 또는 흡수한 실적을 갖는 사업(외부사업)이 대상
- 본 사업은 환경부의 배출량인증위원회의 심의를 거쳐서 KOC(Korean offset credit)이 발급되며 할당대상업체 등에 판매할 수 있음

#### <배출권거래제 외부사업(상생) 개념도>



- 농업부문 배출권거래제 외부사업 추진 현황

구분 \ 년도	'17년	'18년	'19년	'20년	합계
참여농가(호)	2	51	71		124
감축량 (천톤CO <sub>2</sub> )	3.2	12.2	23.9	35.6	74.9
배출권 예상 소득액 (천만원)	24.5	56.9	92.9	122.0	296.3



## 2) 일본

### □ 일본 국민들의 환경친화적 축산물에 대한 선호도

- 저탄소 고기 (low carbon meat) 등 환경친화적 축산물에 대한 선호도 조사 실시 결과, 대부분의 국민들이 우호적 반응
- 현재 인증된 친환경 축산물은 없음
- 환경친화적 축산물 정책 보급을 위해서는 농민들에게 인센티브 부여가 필요함을 제시함
  - 현재 시행되고 있는 인센티브 제도는 없음

## 3) 미국

- 2021년 1월 바이든 정부 온실가스 감축 정책
  - 미국 정부에서 “탄소 은행” 운영: 정부는 농장에서 저감한 탄소 크레딧을 구매하여 유관 회사에 판매하여 탄소 배출을 상쇄하도록 함.

## 4) 스위스

- 스위스 Mootral사가 개발한 ‘Mootral Ruminant’라는 메탄 저감제를 이용하여 세계 최초로 탄소 배출권 (Cow Credits)을 인증 받음
  - 무트랄 루미넌트는 영국 소 농장에서 사용 중이며, 탄소배출권 매도로 사료첨가제 비용 일부를 상쇄할수 있음

## 2. 적정 단백질 및 적정 중금속 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 사례

### 1) 국내 · 외

- 적정 단백질 및 적정 중금속 사료 확대 및 축산물 소비 장려를 위한 국내 · 외 사례는 없음

## V. 환경부담 저감 사료 보급·확대에 대한 설문 조사

### 1. 설문 조사 목적

- 저메탄 사료와 적정 단백질 및 적정 중금속 사료 급여에 대한 농가 및 사료 업계의 인식 조사
- 환경부담 저감사료 보급시 인센티브 등 제도 도입
- 환경부담 저감 사료 보급·확대를 위한 정책 제언 등에 대한 의견 수렴

### 2. 설문 조사 설계

- 조사기간: 2021년 8월 중순~9월 중순 (1개월)
- 대상기관: 총 36곳
  - 26 농가: 한우6, 낙농5, 양돈5, 산란계6, 육계4
  - 사료회사: 6곳
  - 생산자 단체 4곳: 사료, 한우, 양계, 육계 협회
- 설문조사서 설문 내용:
  - 2가지 주제로 설문지 작성
    - ① 축산분야 온실가스 감축 분야에 대한 설문 내용 (주로 한우, 낙농사료에 해당) : 7개 문항
    - ② 적정단백질 사료/적정광물질 사료 분야에 대한 설문 내용 (모든 축종에 해당): 7개 문항
  - 2개 대상으로 구분하여 설문지 작성
    - ① 농가조사용
    - ② 사료 업계 조사용

### 3. 설문 조사 결과

- 설문 조사 결과는 [축산 분야 온실가스 감축 분야]와 [적정 단백질 사료/적정 광물질 사료 분야]에 대한 설문으로 나누어 정리

#### 3-1. 축산 분야 온실가스 감축 분야에 대한 설문 결과

- 1번 문항 : 농가 수 정보 등으로 통계 생략
- 2번 문항 : 사육 두수 정보 등으로 통계 생략
- 3번 문항: 축산분야 온실가스 감축의 필요성에 대하여 들어본 적 있는가?
  - ① 들어본 적 있다 : 23
  - ② 들어본 적 없다 : 1⇒ 대다수 (96%)가 축산 분야 온실가스 감축의 필요성에 대해 알고 있음
- 4번 문항: 반추가축으로부터 발생하는 메탄가스를 줄이기 위해 저메탄 사료를 보급할

## 경우 희망 사항 (복수 선택 가능)

- ① 정부 보조금 인센티브 지원 (일반사료와 비교하여 저메탄 사료 제조 시 소요된 추가 비용) : 20
- ② 저탄소 인증 축산물 제도 도입 (저메탄 사료) : 9
- ③ 저탄소 사료 인증제도 도입(사료회사 대상 문항) : 4
- ④ 기타 :10
  - 보조금 + 인증제도 : 2
  - 탄소 농도 측정 후 탄소저감 캐쉬백 적용 : 2
  - 저탄소 축산에 대한 소비자의 인식 : 1
  - 단백질 대체 원료 개발 및 보급이 필요 : 1
  - 일정기간 무료 및 50% 보조 필요 : 1
  - 저메탄 사료 급여 시 발생할 수 있는 생산성 저하에 대한 대책 필요 : 2
  - 생산성, 생산비, 탄소저감 효과 등의 입증 필요 : 1

⇒ 저메탄 사료를 보급할 경우 대다수가 정부 보조금 인센티브 지원을 희망함

- 주관식 5번문항 : 저 메탄 사료를 보급할 경우 농가와 사료업계 입장에서 우선시 되어야 하는 사항이 있으면 자유롭게 기술해 주십시오.

### [양돈 농가 답변]

- 저메탄사료 사용 시 정부차원에서 합당한 인센티브를 제공이 필요함.
- 저메탄 사료로 대체할 시, 기존 사료 대비 더 나은 사료효율과 등급이 필요함.
- 저메탄사료로 인한 온실가스 감축도 중요하지만, 그로 인해 농가에서 가축의 성장에 피해가 오지 않는 게 중요함.
- 생산성이 이전 사료와 동일하거나 그 이상이 되어야 하며, 정부 지원 사업에서 우선순위 등의 혜택이 있기를 희망함.
- 일반사료와의 비교검증(저메탄사료 사용 시 성장 및 성장에 유해 검증), 가격경쟁력, 저메탄 사료 급여에 따른 품질(생산품) 검증이 필요함.

### [축우 농가 답변]

- 생산성 및 번식성적 저하가 가장 염려됨. 농가소득 감소 시 차액보전 방안을 고려해야함.
- 저메탄 사료 급여 시 유량저하와 사료가격 인상이 예상되니 유대를 인상해야함.
- 저메탄 사료 급여 시 소가 양질의 우유를 충분히 생산하고 건강 밸런스를 유지할 수 있는지를 충분히 고려해야함. 또한, 경제적인 측면에서 추가 비용이 얼마나 더 드는지, 추가 비용은 어떻게 지원이 되는지 확실한 합의가 필요함.
- 생산비 증가로 인한 농가손실을 보전하는 정부지원과 적용 시 준비기간에 대한 설정을 통해 단계적으로 시행해야함.
- 메탄 사료를 사용함에 따라 저하되는 성적을 상쇄해줄 인센티브가 도입되어야함.
- 저메탄 사료 사용에 의한 생산성(비용, 출하성적) 및 기호성, 안전성에 대한 논쟁이 발생하지 않도록 충분한 연구가 필요하며 저메탄 축산의 환경적 가치가 소비가치로 전환될 수 있는 사회적 분위기 조성이 필요함.
- 체중 증체 문제, 등급에 미치는 영향, 사료 급여 기간 문제, 출하기간 지연 문제, 사육기간이 늘어남에 따라 증가하는 질소 및 인 발생 등의 문제의 해결책 필요.

- 축산인과 소비자의 공동체적 관심이 필요함.
- 사료의 안정성과 생사성 검증, 지속적인 판매처 확보.
- 단백질 부족에 의한 면역력 저하에 따른 질병관리 기술, 비육우 사육기간의 연장에 의한 생산비 가중에 대비하여 새로운 사양관리 기술 학습 및 적용 노력
- 적용 전후의 기록관리로 손익계산
- 기존 사료와 저메탄 사료의 차이점을 정확히 파악하고 농가와 정보교류

### [사료 업계 답변]

- 생산자(농민)가 저메탄 사료를 적극적으로 쓸 수 있는 환경이나 제도가 필요함.
- 메탄저감 사료를 개발하기 위해 필요한 실험장비 구비 등 초기비용이 많이 소요되므로 정부지원이 필수적일 것이라 예상됨.
- ESG 경영을 위한 높은 인센티브 지원이 필요함. (비용 발생이 수익성보다 클 경우 인센티브 적용이 필수적임.)
- 저메탄 사료첨가제를 배합할 경우 일반 사료첨가제보다 비용이 증가할 것으로 예상되어 사료업체에 직접적으로 인센티브를 지원해야함. 아울러 사료 선택에 있어 최종적으로 농가가 결정하는 사안이므로, 축산농가가 저메탄 사료첨가제가 포함된 배합사료를 일정 비율 사용할 수 있도록 유도하는 정책도 병행되어야함.
- 현장에서 소의 메탄 발생량을 측정할 간단한 방법과 수단이 필요함.
- 저메탄 사료 적용 시 메탄발생 억제제(첨가제) 사용 진행 가능성이 높음이라는 기준이 객관적으로 결정되어야함. 첨가제의 효과, 인증 방법, 판매(보급), 가격, 인센티브 기준 등을 사전에 결정하고, 이에 따른 보급 및 규제 등이 필요하다고 생각함.

### [협회 답변]

- 메탄저감 사료에 대한 기술 확립이 중요함. 적어도 생산성에 영향을 미치지 않고 메탄을 저감시킬 수 있는 사료 생산 기술이 개발되어야 할 것임.
- 저 메탄 사료첨가제를 배합할 경우 일반 사료첨가제 보다 비용이 증가할 것이므로 사료업체에 직접적인 인센티브가 지원되어야 할 것임. 아울러 축산농가가 저 메탄 사료첨가제가 포함된 배합사료를 일정비율 사용할 수 있도록 유도하는 정책도 병행되어야 할 것임. 왜냐하면 결국 선택은 축산 농가에서 하는 것이기 때문임.
- 생산비용적인 면이 우선이 되어야하며 사료안정화 기금 등을 마련하여 농가, 업계, 정부의 참여 필요

#### ☞ 5번 문항 '저 메탄 사료를 보급할 경우 우선시 되어야 하는 사항'에 대한 답변 내용 요약

- 농가:
  - 저메탄 사료 사용에 의한 생산성(출하 성적 등), 기호성, 안전성이 담보되어야 하며 필요시 인센티브 제공
  - 저메탄 축산의 환경적 가치가 소비 가치로 전환될 수 있도록 축산인과 소비자의 공동체적 관심이 필요함.
- 사료 업계 및 협회:
  - 메탄저감 사료에 대한 기술 확립이 중요하고, 기술개발을 위한 정부 지원이 필요함
  - 축산농가가 저메탄 사료첨가제가 포함된 배합사료를 일정 비율 사용할 수 있는 정책 마련 필요
  - 저메탄 사료 사용에 의한 비용 증가에 따른 인센티브 제도 필요

○ 주관식 조사문항 6 : 소 트림 탄소배출권을 도입할 경우 농가와 사료업계 입장에서 정부에 대한 건의 사항 등 의견을 자유롭게 기술해 주십시오.

**[양돈 농가 답변]**

- 탄소배출권을 매탄배출권으로 교환하는데, 정부나 기관이 나서서 공정한 거래를 이끌어주기를 희망함.
- 리사이클링과 친환경 개념으로 탄소배출권 도입을 하는 것인데, 축우 농가의 경우 농가 수가 전국적으로 워낙 많고 소규모 농가도 많은데, 소농일수록 저메탄 사료로 바꾸기가 쉽지 않을 것으로 생각됨. 초반에 많은 지원이 있어야 하며, 배출권의 가격을 정밀하게 산정할 필요가 있음. 또한, 단순히 영국과 비교하지 않고, 정책을 세울 때 협회의 의견 뿐 아니라 농가의 규모와 상관없이 현장 사람들의 의견을 최대한 수렴하기를 희망함.
- 좋은 의견이라고 생각하며 적극적으로 장려하고 알려야 함.
- 농가가 충분히 납득할 만한 인센티브를 제공해주기를 바람.
- 소 트림 탄소배출권 도입보다는 수요에 맞춘 소 사육 두수의 올바른 조절이 필요함. 또한, 축산에 집중하기보다 공업에서 발생하는 메탄의 양을 조절하는 방안이 더 효율적이라고 생각함.

**[축우 농가 답변]**

- 탄소배출권 매도 비용으로 저메탄 사료급여 시 생기는 소득 저하를 보충하는 것이 적절함
- 농가별 탄소배출 평가에 대한 객관적 수치 제공과 신뢰도 및 매도뿐만 아니라 매입에 대한 방안 역시 제시되어야 함.
- 탄소배출권을 도입한다면 젖소를 비롯한 산업동물의 사육을 제한하는 결과를 초래하고, 탄소배출권은 또 다른 쿼터를 불러일으킴. 기존 우유 쿼터 제도 적절히 이용한다면 큰 문제가 없을 것이라고 생각함.
- 저메탄 사료의 검증이 선행되어야 하고, 추가 지출 비용을 얼마나 보조할 수 있는지, 경제적인 지원이 뒷받침되어야 함.
- 저메탄 인증사료를 쓸 경우, 인센티브 지급 및 탄소 배출권 거래에 대한 제한 없는 거래가 필요함.
- 저메탄 사료 사양의 생산성 저하 방지, 안전성, 비용 증가 방지에 대한 적극적인 설명이 필요함.
- 저메탄사료 또는 사료첨가제 구매비용의 일부를 상쇄시킬 수 있을 것으로 예상이라는 말에서 '예상'과 상쇄시킨다는 '확신'은 엄연한 차이가 있으므로 이러한 설명을 듣고 농민이 정부를 믿을까 의심됨.
- 사료첨가제 방식이 적절하다고 생각함.
- 사람도 트림 배출권을 만들어야 된다고 생각함.
- 손실의 일부를 보전할 수는 있겠으나, 제도 정착시까지(전환기)의 직간접 손실이 크면 결국 농가의 부담으로 이어진다고 생각함.

**[사료 업계 답변]**

- 소의 트림이 우리나라 전체 탄소 배출에서 차지하는 비율은 0.6% 정도로 추산됨. 그 비중이 크지 않기 때문에 소의 트림에만 국한된 탄소배출권을 도입하는 것은 바람직하지 않다고 생각함.
- 국내 표준 인증기관을 운영할 필요가 있음. 가축의 생산성 향상과 환경저감 효과를 동시에 해결할 수 있을지에 대해 사회적 합의 필요함. 현실적인 목표설정이 필요하고, 실현가능한 방안이 필요. 국가차원에서 연구를 일원화하여 객관적인 평가 자료를 통해 근거 마련이 필요함.
- 저메탄사료를 급여하여 탄소배출권을 취득하는 주체는 축산농가이므로, 축산농가를 대상으로 하는 홍보가 매우 중요할 것으로 예상함. 이에 따라서 사료업계와 정부가 공동으로 농가 컨설팅 및 캠페인을

적극 전개할 필요가 있음.

- 정부에서 추진하기 전에 축우농가와와의 소통이 필요함.
- 탄소배출권의 주체를 어디에 둘 것인지 사전 점검과 검토가 필요함. 실제 실현은 사양가가 될 것이므로, 자발적인 탄소배출권 획득을 유도할 수 있는 제도(인센티브 제도)가 필요함.

### [협회 답변]

- 소 1두당 메탄 배출량과 감축량에 대한 합리적인 측정기술이 공인되어야 배출권거래제에 연계가 가능할 것인데, 이와 관련된 기술이 정립되어 있는지 의문임.
- 저 메탄사료를 급여하여 탄소배출권을 취득하는 주체는 축산농가로서 축산농가를 대상으로하는 홍보가 매우 중요할 것이므로 사료업계와 정부와 공동으로 농가 컨설팅 및 캠페인을 적극 전개할 필요가 있음.
- 탄소 배출권의 도입이 탄소배출권 도입을 적극적으로 하기 어려운 사업장의 규제로 작용할 수 있으므로 신중한 논의 필요

#### ☞ 6번 문항 '소 트림 탄소배출권을 도입할 경우 건의 사항'에 대한 답변 핵심 내용 요약

- 농가:
  - 정확하고 객관적인 탄소배출 평가방식에 의한 공정하고 신뢰성 있는 탄소배출권 거래가 이루어져야 함.
  - 저메탄 사료 및 첨가제 이용에 대한 생산성 저하가 없어야 하며 메탄저감 효과가 확실히 있는 검증된 사료 및 첨가제를 이용해야 함.
- 사료 업계 및 협회:
  - 소 1두당 메탄 배출량과 감축량을 정확히 판별할 수 있는 측정 기술이 공인되어야 하며 국가 차원에서 일원화된 연구를 통해 객관적인 자료를 바탕으로 평가되어야 함.
  - 축산농가를 대상으로 정책홍보가 중요하며, 정부와 사료업계 간 관련 컨설팅 및 캠페인을 적극적으로 전개할 필요가 있음.
  - 자발적인 탄소배출권 획득을 유도하기 위한 인센티브 지급 또는 제도 수립이 필요함.

○ 주관식 7번 문항 : 기타 농가 입장에서 반추가축 메탄 저감 방안 등 축산분야 온실가스 감축을 위한 정책 방안 수립에 대하여 제안하고자 하는 의견을 자유롭게 기술해 주십시오.

### [양돈 농가 답변]

- 축산 중에 소의 비중이 가장 높긴 하나, 국가 총 배출량의 5% 미만의 온실가스 발생량을 저감하려 하는 것은 과함. 차라리 사실을 가지고 95% 부분을 지켜보는 것이 더 낫다고 생각함. 축산종사자들은 의식주를 더 고급화하고 개량하기 위해 연구에 매진하고 있음.
- 마치 이런 정책들이, 일반인들의 눈에는 마치 축산농가가 온실가스의 대부분을 만들어내는 주범이라는 인식을 주어 자칫 축산 혐오 프레임이 쓰일까 우려됨. 이런 인식으로 받아들여지지 않도록, 정부에서 친축산 캠페인을 병행하거나 축산 이미지 향상에 더 많은 고민하는 것을 희망함.
- 메탄발생의 일부에 집중하기보다는 메탄 발생의 주범을 보는 게 맞다 생각함. 하지만, 축산분야에서도 연구와 검증을 통해 메탄 발생을 줄이려는 노력이 필요함.

### [축우 농가 답변]

- 탄소중립에는 찬성하지만, 가축을 사육하면서 생길 수 있는 변화는 너무 빠르기 때문에 쉽게 접근하

지 않고, 충분한 연구와 시간을 가지고 접근하기를 바람.

- 외국의 사양조건에서 메탄 발생은 국내 사양조건에서 발생하는 수준이 다를 것으로 생각됨. 국내 기후환경에 미치는 영향이 과도하게 평가된 것 같으며, 감축목표에 대한 설정 시 축종별로 차별화할 필요가 있음. 국내산 자급 조사료의 이용에 대한 인센티브 또는 이용 장려금을 낙농가에게 직접 지급하는 제도가 필요함.
- 반추가축이 메탄가스를 생산한다는 것은 잘 알려져 있지만, 화력 발전소나 제철소에서 석탄을 태워 발생시키는 막대한 이산화탄소와는 비교가 되지 않음.
- 가축에 대한 안정성과 사양 저하 및 가격 상승 부담을 완화해줄 제도적 장치가 필요함.
- 저메탄사료 사양의 생산성 저하 방지, 안전성, 비용 증가 방지에 대한 적극적인 설명이 필요함.
- 탄소배출권이 국제적으로 인증을 받을 경우, 저메탄 사료 또는 사료첨가제를 먹인 가축을 국제시장에 수출할 수 있는지 의문.
- 정부와 농가, 그리고 소비자 모두의 공동체 의식 확보가 필요함.
- 깔짚으로 톱밥을 많이 사용하고 있음. 정부에서 적극적으로 퇴비를 지원 확충하면 충분한 퇴비 발효를 통하여 톱밥 사용을 줄이고 퇴비를 재사용함으로써 퇴비 부숙시 발생하는 메탄, 이산화가스 등을 줄일 수 있다고 생각함.

### [사료 업계 답변]

- 한시적으로라도 국가가 검증비용을 부담해야한다고 생각함. 모든 정책방안은 최종단계인 농가에 적용이 가능한지 판단해야함.
- 저메탄 사료첨가제에 대한 확실한 효능과 데이터가 축적되어야 할 것이며, 특히 외국산이 아닌 국내산 첨가제 개발이 선행되어야함. 사료원료의 95% 이상을 외국에서 수입하는 상황에서 메탄 저감을 위해 외국산 첨가제를 사용한다면, 저메탄에 대한 국내 축산물 소비자들의 호응을 얻기에 부족할 것으로 판단됨.
- 소비자와 메탄 저감 사료의 필요성에 대한 공감대 형성이 중요함.
- 단위동물 사료 생산 상황이나, 상기 내용에 대한 의견을 말하자면, 메탄 저감 및 온실가스 감축은 사료회사보다는 사육현장에서 규제 혹은 인증을 통해 실현되어야 할 부분임. 10~80%까지 조사료 혹은 원료(부산물, 폐기물 등)로 대체되기 때문에 메탄저감 사료의 사용여부만으로 메탄저감/온실가스 감축을 실현했다고 보기 힘들 것으로 예상함.
- 규제의 편리성에서는 사료 혹은 첨가제 등의 사용만으로 인증하는 것이 효율적이나, 실제 효과의 획득을 위해서는 현장 내 인증 및 규제 방안이 필요할 것으로 판단됨.
- 추가로 축산업 전체의 온실가스 저감을 위해서는 현재 추진 중인 반추가축의 메탄 저감용 사료 첨가제의 개발 및 가축사료의 조단백저감 방안과 같이 단기적인 대책 이외에도, 가축의 생산 효율성 증진, 가축 분뇨 처리 방식의 개선 등 장기적 방법을 확대하거나 개발 가능성에도 정책 방향에 보이지 않은 것은 아쉬움.
- 특히 가축 분뇨의 자원화, 에너지화는 2018 온실가스 감축 계획에도 포함되어 있으며, 온실가스 감축 및 축산 농가의 환경문제 해결을 위한 좋은 해결방향으로 정부의 관심과 투자가 필수라고 생각함.

### [협회 답변]

- 농업분야에서 발생하는 온실가스 배출량이 국가 전체 배출량의 3% 수준인데. 과연 반추가축의 메탄 발생이 어느 정도 수준인지 산정할 수 있는 명확한 통계시스템(inventory)이 구축되어야함. 또한 정부 차원의 메탄저감 사료 생산 기술 개발을 위한 과감한 투자가 필요함.

- 저 메탄 사료첨가제에 대한 확실한 효능과 데이터가 축적되어야 할 것이며, 특히 외국산이 아닌 국내산 첨가제 개발이 선행되어야 할 것임.
- 사료원료의 95% 이상을 외국에서 수입하는 상황에서 메탄 저감을 위해 외국산 첨가제를 사용한다면 저 메탄에 대한 국내 축산물 소비자들의 호응을 얻기에도 부족할 것으로 판단됨.

☞ 7번 문항 ‘기타 농가 입장에서 반추가축 메탄 저감 방안 등 축산분야 온실가스 감축을 위한 정책 방안 수립에 대하여 제안하고자 하는 의견 제시’에 대한 답변 핵심 내용 요약

- 농가:
  - 축산업은 다른 산업에 비해 온실가스 발생량은 적은 수준임. 추진하고자 하는 정책들이 의도치 않게 일반인들로 하여금 축산업이 온실가스의 주범이라는 인식을 갖지 않도록 유의해야함.
- 사료 업계 및 협회:
  - 저메탄 축산물에 대한 소비자의 공감을 얻기 위해서는 국내산 온실가스 저감제의 개발이 필요함.

### 3-2. 적정단백질 사료/적정광물질 사료 분야에 대한 설문 내용

- 1번 문항 : 농가 수 정보 등으로 통계 생략
- 2번 문항 : 사육 두수 정보 등으로 통계 생략
- 3번 문항 : 축산 농가에서 적정 단백질 사료 또는 적정 광물질 사료 공급을 통해 잉여 질소 또는 잉여 중금속 배출량 저감의 필요성에 대하여 들어본 적 있는가?
  - ① 들어본 적 있다 : 26
  - ② 들어본 적 없다 : 9

⇒ 다수 (74%)가 사료내 잉여 단백질/광물질 배출량 저감의 필요성에 대해 알고 있으나, 온실 감축 필요성 만큼 대부분 (96%)이 인식하고 있지는 않은 상황으로, 필요성에 대한 추가적인 홍보가 필요할 것으로 판단됨
- 4번 문항 : 농장으로 공급되고 있는 배합사료의 조단백질 수준이 얼마인지 알고 있는가? 그 수준이 적절하다고 생각하는가? (농가 설문 조사 문항)
  - ① 알고 있으며 적절한 수준이라고 생각한다. : 18
  - ② 알고 있으며 높은 수준이라고 생각한다. : 5
  - ③ 알고 있으며 낮은 수준이라고 생각한다. : 2
  - ④ 알고 있으나 그 수준에 대하여 생각해본 적이 없다. : 1
  - ⑤ 알고 있지 않다. : 0

⇒ 다수(69%)가 현재 급여하는 조단백질 수준이 적절하다고 답변함. 사료 단백질 감축의 당위성과 필요성에 대한 홍보가 필요할 것으로 판단됨
- 주관식 조사문항 5 : 농림축산식품부 (이하 농식품부)에서 사료에 조단백질 감축 계획을 추진하고 있는데 이에 대한 희망 사항이나 우선시 되어야 하는 사항에 대한 의견을 기술하여 주십시오.



## [양돈 농가 답변]

- 현재 양돈선진국인 덴마크나 네덜란드에 비해 과량의 잉여 질소공급원이 공급되고 있으므로 이를 정부에서 법적으로 규제를 하여 성장에 전혀 도움이 되지 않는 과량의 잉여 조단백질함량을 줄여야 함. 지금도 사료내 조단백질이 EU에 비해서 4~5%가 높은 실정임.
- NRC 기준에 맞게 설정한 영양학적 수준을, 환경적인 기준에만 맞게 상한치를 정한다면, 결국 농가에서 첨가제나 생균제 혹은 약품을 사용하여 추가 비용이 발생함. 또한, 퇴비는 6개월 이상 부숙해야 하는데, 현장에서 한번 써보고 만족스럽지 않으면 퇴비를 가져가지 않음. 무엇보다도 농림부에서 영양학적인 상한치를 감축·추진하는 것은 옳지 않다고 생각함.
- 농가를 대상으로 하는 교육이 필요하며 정책추진과 관련하여 농가의 의견도 참고해야함. 현재 양돈농가에서는 사료에 대한 지식이 부족하고, 대부분 사료회사에 맡겨서 운영하고 있음. 조단백질을 낮추어도 성장에 문제가 없는 실험결과와 교육이 필요함.
- 농가와 충분한 협의와 설명이 필요함. 현재 우리나라 양돈 농가들은 아프리카돼지열병(ASF) 문제로 농식품부에 큰 반감을 느낌. 이 문제와 맞물려 충분한 이해와 설명 없이 조단백질 감축을 추진한다면, 더 큰 반감을 느낄 것이라고 생각함. 배합사료내 조단백 수준을 농가가 먼저 파악하게 하고, 이런 고단백 사료가 어떤 문제를 일으키는지 논리적으로 설명한다면, 농가들도 충분히 이해하고 받아들일 것이라고 생각함.
- 단백질 수준 저감은 동의하나, 주요 곡물인 옥수수과 대두박의 품질에 대한 논의가 선행되어야함. 유럽과 미국의 사료용 곡물은 신선한 것에 비해 국내로 유통되는 곡물은 질이 떨어지므로 이에 대한 개선책을 먼저 고려해야함.

## [축우 농가 답변]

- 저단백질 사료 급여로 성장 지체와 생산성 저하로 인한 사육 두수 증가로 이어질 염려가 있음. 충분한 연구를 통해 완성도 있는 사료 개발이 필요함.
- 젖소의 개량과 사료효율을 증가시키는 고품질 사료원의 공급이 중요하다고 생각함. 개량은 단기간에 이루어질 수 없어 장기적인 목표와 단계적인 접근이 중요함. 유생산량 저하가 우려되며, 이에 대한 보완 대책 필요함. 성장단계별 감축 목표에 대한 근거가 필요함
- 항상 정부의 정책은 근시안적으로 무조건 농가에 강압적으로 시행하는 모습을 보임. 장시간 깊은 연구 결과를 토대로 해서 성장단계별로 조단백질을 2-3% 감축해도 성장에 문제가 없다면 상관없음. 하지만 조단백질을 감축하면 성장률이 저하될 것이고, 이는 생산성과 직결된다고 봄. 생산성이 저하되면 생산 비용이 증가하므로 결국은 소비자 가격 상승으로 이어짐.
- 가축의 성장과 양질의 우유 생산, 번식 장애가 발생하는 않는 범위 내에서의 감축이 제시되어야 하며, 그 기준에 맞춰 유대 산정도 같이 고려해야함.
- 단백질 섭취 감소로 인한 사양 저하와 이에 따라 수반되는 생산성 저하를 보전해 줄 방법이 필요함.
- 단백질 섭취량 감소로 발생하는 생산성 문제에 대한 해결책이 필요함.
- 단백질을 감축하면, 부족한 단백질을 대체할 첨가제가 필요할 것임. 기존 방법보다 가격이 상승하여 결국 사료값 인상으로 이어져 농가 부담이 더 커질 것으로 우려됨.
- 어려운 문제이므로 충분한 의견 조율이 필요함.
- 감축시 생산성 저하에 따른 농가 손실을 보상해야 된다고 생각.
- 시행 전후의 철저한 분석으로 농가의 생산성, 효과, 부작용 등을 검증하여 농가에 가감없이 공개해야 한다고 생각.

### [양계/육계 농가 답변]

- 타 축종이라 조단백질의 감축이 미치는 영향을 정확하게 파악하기는 어려우나 우리나라의 배합사료는 단백질 과잉상태로 알고 있어서 증체에만 영향을 미치는 않는다면 감소시켜도 무방하다고 생각됨.
- 국제 곡물가가 치솟고 있고, 안정화시기를 예상할 수 없으므로 만약 사료 내 조단백질 함량을 감축한다면, 실질적으로 농가의 생산성만 저해될 수 있음. 올해 국제 곡물가가 전년대비 높아져 사료 내 단백질 수준과 필수 아미노산 함량에 있어 품질이 떨어진다는 의견이 많음. 이는 실제로 떨어진 생산성과도 연관이 있다고 판단하여 축산 농가들의 수익과 생산성 문제를 우선적으로 고려하기를 희망함.
- 조단백질 감축은 사료비 절감과 지속가능한 생태 조성을 위하여 필요한 계획이지만, 농가별 상황이 다르다는 점을 고려하여 단계적으로 시행할 것과 생산성에 대한 피드백이 전제되어야 함.
- 최근 축산업에 대한 지나친 규제가 축산물에 대한 원가 상승과 축산농가의 경영에 불리하게 작용함. 또한 축산업은 생물을 다루는 산업이므로 자칫 기관 주도의 규제가 일변도로 가축에 피해를 줄 수 있다고 사료됨.
- 현재의 사료 스펙은 국내에서 계란 판매에 유리한 쪽으로 개발되었으니, 소비자들이 가장 선호하는 크기의 계란을 생산하는 사료 연구가 필요함.

### [사료 업계 답변]

- 소비자뿐만 아니라 기업 경영에서도 ESG 경영은 매우 중요한 가치와 목표가 되었으며, 지속 가능한 축산과 2050년 탄소중립을 위해 농림축산식품부의 방향성에는 적극적으로 동의함. 또한 축산 관련 산학연의 의견을 청취하고 규제안을 조정해 가는 과정도 바람직하다고 생각함.
- 그러나 질소 배출량을 줄이기 위한 목적으로 사료 내 함량만을 고려한다면 ①섭취량에 따라 성장/도체중/사료효율에 영향을 주거나, ②실제 질소 배출량에 효과가 크지 않을 수 있음.
- 한편으로 국내 소화율 기반의 아미노산 기준으로 원료평가 및 성장단계별 요구량이 확립될 때까지는 단계를 두어 규제 안의 변화폭을 융통성 있게 조절하는 것이 축산업의 지속성을 지키며 효율적으로 탄소중립을 이룩할 수 있는 길이 아닐까 판단함.
- 유전능력 대비 영양소 하향이 현실성이 있는지 의문임. 농가 단위에서 급여량 또는 드레싱 사료 수준이 관행처럼 높은 상황에서 규제가 가능한지 알 수 없음. 생산성 대비 적정 단백질 공급 수준에 대한 명확한 규명이 필요함
- 환경부담 저감을 위해 조단백질 설정 상한을 두는 취지는 소화되지 않는 미소화 단백질이 환경에 배출되는 것을 최소화하는 것으로 돼지의 가소화단백질, 특히 아미노산 영양부족이 발생해서는 안됨. 따라서 성장단계별로 사료업계 배합 및 품질관리 전문가의 의견이 반드시 반영되어야 함.

### [협회 답변]

- 조단백질 감축에 따른 메탄 감축량에 대해 국가 차원의 인벤토리 구성이 필요함.
- 환경부담 저감을 위해 조단백질 설정 상한을 두는 취지는 소화되지 않는 미소화단백질이 환경에 배출되는 것을 최소화하는 것으로 돼지의 가소화단백질, 특히 아미노산 영양부족이 발생되어서는 안될 것임. 따라서 성장단계별로 사료업계 배합 및 품질관리 전문가의 의견이 반드시 반영되어야 할 것임.

**☞ 5번 문항 ‘농식품부에서 사료에 조단백질 감축 계획을 추진하고 있는데 이에 대한 희망 사항 또는 의견 제시’에 대한 답변 핵심 내용 요약**

- 농가:
  - 환경을 생각한 단백질 저감은 좋은 취지이지만 생산성 하락이 발생할 경우 이를 보완하기 위한 추가적인 비용이 발생하므로 생산성과도 연계해서 적절히 조정해야함.

- 사료 단백질 수준 감축으로 인해 생산성 하락, 번식 장애, 질병 발병율 증가 등에 문제가 없고 부작용이 없음에 대한 농가에 충분한 홍보와 교육이 필요함.
- 사료 업계 및 협회:
  - 단순히 사료내 단백질 함량만을 생각하기보다 단백질의 이용효율, 유전적 개량 등의 다양한 대체 방안도 발전시켜나아가야 함.
  - 성장단계별 적정 단백질 공급 수준이 명확해지기 전까지는 충분한 연구를 수행하면서 단백질 제한폭을 융통성 있게 조정할 필요가 있음

○ **주관식 조사문항 6 : 농식품부에서 가금과 소 사료에 대하여 조단백질 상한치 신규 설정을 추진하는 데 있어 희망 사항이나 우선시 되어야 하는 사항에 대한 의견을 기술하여 주십시오.**

**[양돈 농가 답변]**

- 축산 선진국들의 상황을 먼저 살펴보고, 현재 국내에서 제조하는 배합사료 내 단백질 함량에 대한 전면적인 재조정이 필요함.
- 퇴비나 분뇨 처리에 대한 정부의 공공 처리시설에 대한 확보 및 할당이 필요함.
- 농가의 의견을 적극적으로 반영해야함.
- 국가 차원의 과제로, 다양한 실험기관에서 나온 데이터를 기반으로 상한치가 설정되기를 희망함.
- 성장 초기단계(취약시기)에 대한 유연한 규제를 희망함.

**[축우 농가 답변]**

- 젖소 사료 단백질 함량은 소화율 개선에 대한 문제라고 판단되고, 특히 고능력우의 경우 단백질 생산을 위한 조사료 품질 및 양질의 조사료원 공급이 중요하여 수입 조사료 쿼터의 확대가 필요함.
- 우선되어야 할 점은 이러한 규정을 신설하기 전에 충분한 연구가 선행되어야 하며 가축의 사료효율이 우수한 쪽으로 개량되어야 함. 조사료 쿼터제를 해제하는 것이 적절해 보임.
- 현장에 맞는 현실적인 제도로 운영되기를 희망함.
- 조단백질의 상한 설정은 중립적인 연구기관에서 증명된 결과를 기초로 설정하는 것이 바람직함.
- 사료 중 조단백질의 상한치 설정은 단백질의 종류와 함량, 급여량에 따른 체내 질소 출납에 관한 연구를 근거로 설정되어야 함.
- 송아지와 육성우의 성장에 문제가 없는지 명확한 답변이 필요함.
- 농가에서 수급하여 능동적으로 받아들이는 방법이 필요함.
- 계획 추진에 앞서 이득과 손해 부분을 정확한 데이터 기반으로 보상 및 의견 수렴이 동반되어야 한다고 생각.
- 1. 단백질원료는 항체생성 즉 면역력과 관련이 있는 영양소임. 어린 가축에 있어서 부족하면 항병성이 떨어져서 질병 발생율이 올라가는 부작용이 염려됨 2. 또한 고급육 생산과 가식부위 확장을 위해 가장 필요한 영양소라고 생각함. 즉, 부족시 저등급 유발, 불가식 부위 비중이 더 커지는 부작용이 염려됨 3. 설령 이 법을 적용하더라도 많은 농가들이 단백질원료의 효과 및 이용 기술을 잘 알고 있기에 농가 현장에서의 적용과 효과는 의문임.

**[양계 농가 답변]**

- 최대한 일당 증체에 영향을 미치지 않는 선에서 조단백의 감소는 가능하다고 생각됨.

- 생산성적에 큰 영향이 없고 실제 적용 이전에 몇몇 농가를 대상으로 많은 실험과 평가가 선행되기를 희망함.
- 상한치 신규 설정의 명확한 근거가 있어야하고, 농가별로 사양조건이 다르다는 전제가 있어야함.
- 현 상태를 유지하기를 희망함.
- 산란계 사료의 cp(17%) 함량은 메추리 농장의 cp(22%) 함량 보다 낮고, 이는 계란의 성분및 난각 형성에 지대한 영향을 미치므로 여기에서 무조건적인 수치의 하락보단 그에 보완하는 성분을 확보하고 서서히 준비하는 것이 더 중요하다고 생각됨.
- 현재 계란 가격 폭등으로 인해 계란을 수입하는 상황에서 조단백질의 함량을 줄이면 그만큼 산란률에 영향을 주기 때문에 계란 가격에 어떠한 영향을 미치지 우려됨.
- 충분히 연구 결과가 확인될 때 시행하는 게 바람직하다고 생각됨.
- 생산성에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 계획을 추진해야함.
- 가축의 성장에 지장이 없는 수준이라면 조단백질 상한치 신규 설정은 괜찮다고 생각

### [사료 업계 답변]

- 가금과 소 사료에 있어 조단백질 상한치를 설정하는 것은 필요한 결정이라고 생각함. 그러나 현재 사료 관리법에서는 비육우의 “명칭”과 “사용범위 및 용도”가 현실과 맞지 않음. 현재의 한우의 성장에 맞게 현실적으로 조정되기를 희망함.
- 가금은 초기부터 후기까지 다양한 사료가 생산되고 보급되고 있음. 사육과정에서 생산성 저하에 영향을 주지 않고, 균형적인 영양이 공급될 수 있도록 사료배합비 기준 설정에 어려움이 없어야 함.
- 농가 단위 드레싱 사료 급여에 대한 제한이 가능한지 궁금함.
- 일령에 맞는 정책이 필요함. 초기 일령에는 고단백 사료가 오히려 효율적이고 배출량도 많지 않지만, 후기에는 배설량이 많아지는 시기이므로 적절한 감축이 필요해보임.
- 상한 설정을 신규로 하는 만큼 사료업계 전문가의 의견이 충분히 반영되어야 함. 특히 현재의 성장단계별 사료 명칭 구분에 대한 재정립이 필요하다고 판단됨.

### [협회 답변]

- 명확한 메탄 감축효과에 대해 농가들에게 충분한 설명이 필요.
- 가금은 다양한 사료(초이사료부터 후기사료까지)가 생산, 보급되고 있음. 사육과정에서 생산성 저하에 영향을 주지 않고 균형적인 영양이 공급될 수 있는 사료배합비 기준이 만들어 지는데 지장이 없어야 함.
- 상한설정을 신규로 하는 만큼 사료업계 전문가의 의견이 충분히 반영되어야 할 것임. 특히 현재의 성장단계별 사료명칭 구분에 대한 재정립이 필요하다고 판단됨.

**☞ 6번 문항 ‘농식품부에서 가금과 소 사료에 대하여 조단백질 상한치 신규 설정을 추진하는 데 있어 희망 사항 또는 의견 제시’에 대한 답변 핵심 내용 요약**

- 농가:
  - 저단백질 사료의 필요성, 질소 배설 및 온실 가스 감축 효과에 대해 농가에 설명이 필요함.
  - 동물의 성장, 생산을 위해서 단백질은 필수적이고 중요한 영양소이며 무조건적인 규제보다는 충분한 선행 연구가 필요함
- 사료 업계 및 협회:
  - 성장단계별 특성에 따른 적절한 조정이 필요함.
  - 성장단계별 사료명칭 구분, 사료관리법 상 비육우의 “명칭”과 “사용범위 및 용도”가 현실적으로 조정 되어야함.

○ 주관식 조사문항 7 : 사료 내 단백질 함량에 대한 규제가 시행/강화되는 정책에 대해 기대하는 바와 우려하는 바에 대한 의견을 기술하여 주십시오.

**[양돈 농가 답변]**

- 유럽이나 미국에서는 사료 내 조단백질에 대한 규제 자체가 이미 사라진 상황임. 국내 사료관리법에 서도 배합사료 내 조단백질 함량 규제보다 사료 내 총 lysine 함량을 규제하는 것이 바람직한 방향이라고 생각됨.
- 단백질 함량 감축에 대한 퇴비사 중금속 배출 저감이 기대됨. 반대로 사료회사의 배합비 변경으로 인한 사료비 상승과 농가 운영에 있어서 부담 상승이 우려됨.
- 단계별 사료 급여가 어려운 상황에 농가에서 정책을 수용할지 의문임.
- 조단백질 함량이 사료 원가에 상당 부분을 차지하므로 원료 가격이 비쌀 때, 적절하게 사료를 공급받을 수 있다는 점에서 기대됨. 하지만 농가들이 충분히 이해하지 못한 상태에서 일이 진행되어 반대 여론이 강하지 않을까 우려됨.
- 규제가 강화됨에 따라 영세 농가들은 질병 관리가 열악하여 더 큰 피해를 입지 않을까 우려됨.

**[축우 농가 답변]**

- 사료 내 단백질 규제와 함께 고품질 조사료가 공급될 수 있도록 해야함. 현재 농가에 공급되는 조사료는 이전과 비교하여 품질이 많이 떨어짐.
- 생산량 저하 및 사료비 증가가 우려됨. 농가가 대응할 수 있는 충분한 시간이 필요함.
- 저단백질 사료를 급여했을 때 발생하는 생산성 및 발육 저하는 결국 농가 개인이 손해를 입게 됨.
- 농후사료에 대한 규제가 이루어진다면, 조사료의 단백질 보충이 이루어져야 하므로 조사료 쿼터제 폐지하기를 희망함.
- 규제를 적용하기 전에, 먼저 질소 이용효율을 높이는 보조제나 생균제 등의 추가 연구가 먼저 선행되어야함. 추가 연구를 통하여 긍정적인 효과를 확실히 증명하는 것이 우선이라고 생각됨.
- 사료 내 단백질 함량이 높으면 분뇨의 질소 함량이 높아질 것이라는 점에서 이러한 규제를 시행하려는 것으로 보임. 그러나 규제 이전에 사료 중 질소 이용을 어떻게 극대화할 수 있는지 연구가 선행되어야 함. 분뇨의 질소 함량을 낮추기 위해 질소 함량이 낮은 사료를 급여하는 방법이나 반대로 다량의 질소를 함유한 사료임에도 이용효율을 극대화하거나 적은 양을 급여하는 방법 등이 존재함. 사료 내 단백질 함량만 규제하는 것보다 질소 배출에 대해 다양한 해결책을 고려하는 것이 더 바람직하다고 판단됨.
- 규제를 시행하기 앞서 농민이 정부를 믿고 안심할 수 있는 대책을 먼저 마련해야 함.
- 농가에서 조단백질 함량이 높은 재료를 구매해서 사용할 경우, 이에 대한 처리 방법도 고려해야함.
- 이제는 환경을 생각 하는게 맞다. 다만, 철저한 준비와 데이터 기반에 정책 수립.
- 1. 시행 시기는 충분한 검증과 실증 가능한 효과를 전제로 서서히 적용했으면 좋겠다. 2. 농가의 직간접 손실과 부산물을 활용한 풍선포 효과 등의 부작용이 우려되고, 모든 축종의 사양관리 프로그램의 변화, 농가의 사양관리 인식이나 습관도 바뀌어야 되는 문제가 있다고 생각.

**[양계 농가 답변]**

- 단백질 함량 감소로 인하여 환경오염이 줄어든다면 시행에 찬성함. 다만 생산성에 영향을 미치지 않아야 하고, 그러한 상황에서 시행한다면 환경오염과 관련된 문제들이 많이 해결될 것이라고 예상됨.
- 단백질 함량을 규제함으로써 환경오염을 방지하고, 사료가격 인상에 대응할 수 있다는 점에서 기대가

되지만, 오히려 사료의 질이 떨어져서 사육일령이 늘거나 생산성 저하 등의 피해를 입지 않을까 우려됨.

- 정책이 농가에게 일방적인 희생 또는 손해를 강요해서는 안되고 서로 상생하고 납득할 수 있어야함.
- 농가 내 생산성적 저하로 인한 경제적 피해가 우려됨.
- 사료비 절감과 친환경 축산 경영이 가능하다는 점에서 기대됨. 그러나 사양기술이 부족한 농가에서는 성적이 저하될 우려가 있음.
- 환경오염의 개선에 긍정적 영향을 줄 수 있으나 가축의 생리에 얼마나 큰 타격을 주는지도 면밀히 검증해야 된다고 생각됨.
- 농장주 입장에서는 단백질 함량을 줄임으로써 나타나는 질소, 암모니아 가스 및 중금속 배출 저하 효과를 크게 느끼지 못할 수도 있음. 오히려 계란 산물에 영향을 준다고 판단하여 반대하는 입장일 수도 있음.
- 중소가축, 특히 가금의 경우 단백질 함량과 밀접한 관계가 있으므로 충분한 연구결과를 토대로 시행해야함.
- 생산성 저하와 국내에서 선호하지 않는 크기의 난종이 되지 않을까 우려됨.
- 가축 분뇨로 인한 환경오염이 감소할 것으로 예상, 축사 주변의 주민들과 냄새로 인한 분쟁, 민원이 줄어들 것으로 예상.

#### [사료 업계 답변]

- 질소 배출이 환경에 미치는 영향을 고려하여 사료 내 단백질 함량을 규제하는 것은 지속 가능한 축산을 위해 필요한 조치라고 봄. 그러나 근거나 데이터가 충분하지 않은 상황에서 진행이 되고 있어서 생산성 감소나 농가의 경제적 피해 등이 우려됨.
- 본 정책이 온실가스 감축과 사료비 절감이라는 효과가 있을 것으로 기대되나 온실가스의 주범이 축산 분야라는 인식을 높여 축산물 소비에 영향을 주지 않을까 우려됨.
- 인센티브 및 검증방식 재검토가 필요함. 배출되는 분뇨에 대한 잉여 질소 총량을 조절하는 것이 목적이어야 함.
- 가축의 생산성 저하로 사육일령 증가, 사료섭취량 증가로 배설량이 증가하는 문제가 발생할 수 있음. 저단백 사료가 저가 사료가 되어 농가의 피해가 발생할 수 있음.
- 축산환경 부담을 최소화하고 탄소중립을 위해 선제적인 정책을 수립하는 것은 일정부분 동의함. 하지만 에너지 등 타 산업의 경우 기업에 대한 규제에 신중히 접근하고 있는 만큼 사료 내 단백질 함량 규제 강화에 대한 과학적인 연구가 선행되기를 희망함.

#### [협회 답변]

- 생산성에 미치는 영향이 없다는 내용에 대해 충분히 공유할 필요가 있음.
- 본 정책이 온실가스 감축과 사료비 절감이라는 효과가 있을 것으로 기대되나 온실가스의 주범이 축산 분야라는 인식을 높여 축산물 소비에 영향을 주지 않을까 우려됨.
- 축산환경 부담을 최소화하고 탄소중립을 위해 선제적인 정책을 수립하는 것은 일정부분 공감 및 동의 하지만 에너지 등 타 산업의 경우 기업에 대한 규제에 신중히 접근하고 있는 만큼 사료 내 단백질 함량 규제 강화에 대한 과학적인 연구가 선행되기를 희망함.
- 단백질함량의 규제가 좀 더 연구에 기반이 되어 탄소절감 효과가 얼마나 있는지, 다른 더 좋은 방안은 없는지 검토가 필요. 정부에서 하고자 해서 실증연구가 부족한 상태에서 진행되고 있지 않은지 우려됨

☞ 7번 문항 ‘사료 내 단백질 함량에 대한 규제가 시행/강화되는 정책에 대해 기대하는 바와 우려하는 바에 대한 의견 제시’에 대한 답변 핵심 내용 요약

- 농가:

- 저단백질 사료 급여에 의한 생산성 저하와 이로 인한 경제적 손실이 우려됨.
- 농가들이 충분히 이해하지 못한 상태에서 정책이 추진되면 반대 여론이 강하지 않을까 우려됨.
- 단백질 제한 보다는 사료 중 질소의 이용효율을 높이는 관점에서 접근하기를 희망함.
- 저 단백질 사료에 대한 농가의 인식개선, 이해가 필요함
- 농가에서 단백질 사료를 추가로 급여할 경우에 대한 대책도 필요

- 사료 업계 및 협회:

- 충분한 실증 연구를 바탕으로 단백질 함량을 규제하는 것이 필요.
- 생산성에 미치는 영향이 없다는 것에 대한 충분한 공유가 필요

○ 주관식 조사문항 8. 기타 축산분야 냄새 저감 및 중금속 배출 저감 방안 마련을 위한 정책 방안 수립에 대하여 제안하고자 하는 의견을 기술하여 주십시오.

[양돈 농가 답변]

- 현재 사료관리법에서는 아연과 구리를 높은 수준으로 사용할 수 있도록 허용하였는데, 사료관리법에서 허용한 양을 배합사료에 사용할 경우(특히 이유자돈사료), 비료관리법에서 돈분 또는 유기질 비료 내 높은 수준의 아연과 구리에 대한 규제를 받아 국내 양돈장들이 돈분처리에 어려움을 겪고 있음. 현재 이유자돈 전기사료에 2,500ppm까지 사용할 수 있는 아연의 함량을 500ppm으로 낮추고, 이유자돈 후기 사료 내에는 300ppm 이하만 첨가하도록 사료관리법을 바꾸어야만 국내 양돈장들이 비료관리법에 저촉되지 않고 돈분을 처리할 수 있음. 사료관리법에 따라 배합사료를 생산한다고 하지만, 현재와 같이 높은 수준의 광물질 사용을 허용한다면 국내 양돈농가들을 범법자로 만들 것이며, 토양과 수질오염이 예상되므로 지금부터 강력하게 규제해야함.
- 오히려 방목형 목장을 권장하거나 정부에서 민원을 조율해야하며, 우리나라 축산업의 자금률이 떨어지지 않도록 조기에 조치해야함. 또한, 분뇨처리 공공시설을 군 단위로 설치해야하며 관리 할당제를 도입하는 것이 필요함. 이는 실제로 농가 수가 계속 줄어들고 있는 상황에서 정화처리 방식이 늘어나고 있어서 가능하다고 판단함.
- 마을이 축소되거나 없어진 곳에 이격거리를 완화해서 정부 관할의 공공기관 스마트팜을 만들고 정책을 수립하여 연구농장을 설립하는 것도 좋을 것 같음.
- 냄새 저감은 분뇨처리가 가장 중요하므로 지역마다 분뇨처리 시설이나 액비 센터를 추가 설립하여 분뇨를 쉽게 처리할 수 있도록 해야 함.
- 현재 농가에서 가장 크게 고민하는 것은 약취 문제로, 양돈에서 기존 시설만으로 약취를 해결하는 것은 상당히 어려움. 하지만 양돈장 약취의 대부분이 미소화단백질이라는 것을 인지하고, 저단백 사료를 사용함과 동시에 약취저감 시설을 이용한다면 상승효과를 기대할 수 있음. 따라서 정부에서는 저단백 사료 이용 농가에게 적극적으로 약취저감에 참여할 수 있도록 보조 및 지원 사업을 더욱 활성화하고, 신 개축을 행정적으로 적극 장려하면 더욱 효과적일 것이라 예상됨.
- 저 조단백사료의 정착이 냄새저감 및 배출에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단됨. 하지만 중금속의 경우, 사료 내 아연 및 구리의 함량을 줄이고 농장 내 폐사축 처리 시스템의 보완이 필요하다고 생각됨.

[축우 농가 답변]

- 냄새와 중금속에 대한 문제는 과잉공급에 따른 문제라 판단되고, 적정 수준의 공급방안 또는 사양표

준 제시가 필요함.

- 퇴비사의 구조를 변경함으로써 농가의 부담이 증가함.
- 기존에 축사를 운영하는 경우, 다른 지역으로 이주할 시 이주 허가 절차가 더 간소화되기를 희망함.
- 퇴비사 규제를 완화하여 충분한 부숙공간을 확보할 수 있도록 해야 함.
- 충분한 시간을 갖고 홍보와 연구 및 검증을 하여 실행해주길 바람.

### [양계 농가 답변]

- 과잉 단백질의 분해에 중점을 두고 연구 조사하여 정책을 시행하는 것이 바람직함.
- 약취 및 중금속 배출 저감은 사료 한 가지로만으로는 큰 효과를 얻기 어려우며 종합적인 실천방안이 필요함. 농가를 대상으로 하는 충분한 설명과 이해가 있어야 함.
- 육계의 경우 환기 관리를 잘하면 거의 냄새가 발생하지 않음. 환경에 관한 정책은 필요함.
- 근본적인 개선사항은 폭발적으로 증가하는 가축 마리 수를 규제하고, 대형화하는 농장의 규제를 강화할 필요가 있음. 저감 방안이 있어 실천 정도에 따라 차등 혜택을 지급하여 농가의 적극적인 참여를 권장할 필요가 있음.
- 퇴비 부숙도 검사를 이미 시행하고 있으므로, 퇴비부숙도 검사부터 안정화하여 순차적으로 도입하는 것이 적절해보임.
- 농가의 냄새를 저감할 수 있는 사료 첨가제 공급을 보조 사업으로 시행해 주기 바람.

### [사료 업계 답변]

- 농식품부에서는 양돈사료 내 특정 성분(구리, 아연, 인)을 현행 대비 40% 감축하는 방안을 준비 중으로 알고 있음. 토양/수질/병원균의 항생제 내성 등 환경에 미치는 영향을 고려한다면, 지속 가능한 축산을 위해 바람직하다고 생각하며, 퇴비부숙도 관리법과 같은 배출 단계에서 관리 및 규제가 이루어지고 있음. 인은 값비싼 영양소이므로 소화율 기반의 설계와 그 이용성을 높이기 위한 노력을 행하고 있으며, 구리는 원료 자체에서 오는 양의 변폭을 고려한다면 실제 첨가하는 양은 이미 많이 제한되어 있음. 아연의 경우 생리적으로 많은 역할을 담당하고 있으며, 특히 어린 구간에서의 섭취량/분변안정성/생존율/치료필요 두수감소, 번식용 돼지(모돈, 웅돈)의 번식능력에 매우 중요하게 작용함. 어린 구간에서 치료용 고농도 산화아연을 2022년부터 금지하기 위해 EU의 경우 2017년부터 준비를 해 오고 있지만, 단일 대체제로는 대응이 불가능하며, 생산비 상승을 동반한 여러 대응 장치들(사료 내 첨가제들, 음수를 통한 조치, 사양관리 개선 등)로도 부족함이 있다고 판단하여 지속적으로 개선방안을 찾고 있음. 번식용 돼지의 아연 관련 사료관리법은 과거 75 ppm에서 번식능력 개선을 위해 유럽과 같이 150 ppm으로 상향되었는데, 다시 하향된다면 다산성 모돈 유전자가 확산되는 한돈산업에 어떤 영향을 미칠지 검토하는 것이 필요하다고 생각함.
- 본 정책과 함께 친환경 개선제 개발 및 보급에 지속적인 관심을 가지고 추진되어야 함..
- 사육밀도 조절이 최적의 대안이라고 판단되며, 친환경 축산물에 대한 우대정책으로 농가 및 소비자 인식개선이 필요함.
- 중금속의 경우에도 가축의 질병 방지를 위한 필수적인 부분이므로, 중금속 제한 시 질병 발생에 대한 다양한 연구 결과가 나온 이후에 추진되는 게 맞다고 생각함.

### [협회 답변]

- 미생물 제재 기술 개발이 보다 활성화 되어야 하고, 냄새 저감 효과가 높은 다양한 제품이 공급되어야 함. 발생 중금속에 대한 기준이 설정되어야 하고, 측정 장비도 보급되어야함.



- 본 정책과 함께 친환경개선제 개발, 보급에도 지속적인 관심을 갖고 추진되어야 함.
- 중금속의 경우에도 가축의 질병방지를 위해 필요한 부분인 만큼 중금속 제한 시 질병 발생에 대한 다양한 실험 및 연구결과가 나온 이후 추진되어야 할 것임.
- 축산분야의 큰 틀은 공감하지만 축종별, 사료와 분뇨의 영양 성분별 대책안이 마련이 되어야 함. 또한 축종의 축종의 특성에 맞는 축사형태, 사료 성분, 축분 처리방법 등을 반영하여 대안을 마련해야 함

**☞ 8번 문항 ‘기타 축산분야 냄새 저감 및 중금속 배출 저감 방안 마련을 위한 정책 방안 수립에 대하여 제안하고자 하는 의견 제시’에 대한 답변 핵심 내용 요약**

- 농가:
  - 지역별 분뇨처리시설 및 액비 센터를 설치하고 퇴비사 규제를 완화하는 등 분뇨 처리의 개선이 필요함.
  - 사료관리법, 비료관리법 등의 법령을 개선하여 환경보호는 물론 원활한 분변처리가 가능토록 해야함.
  - 양돈 농가에서 가장 크게 고민하는 것은 악취 문제로 저단백질 사료 보급이 필요함
  - 악취 및 중금속 배출 저감은 환경부담 저감 사료만으로는 큰 효과를 얻기 어려우므로, 종합적인 대책이 필요함
- 사료 업계 및 협회:
  - 일부 중금속의 경우 생산성과 밀접하게 관련되어 있으므로 성장단계별 다양한 상황에 비추어 설정이 필요함.
  - 중금속의 경우에도 가축의 질병 방지를 위한 필수적인 부분이므로, 중금속 제한 시 질병 발생에 대한 다양한 연구 결과를 바탕으로 추진할 필요가 있음
  - 친환경 개선제, 미생물 제제 등의 개발과 보급이 지속적으로 이루어져야 함.

#### 4. 설문 조사 결과 요약

**1. 축산 분야 온실가스 감축 분야에 대한 설문 조사 요약**

- 농가, 사료 회사, 생산자 단체들 대부분(96%, 23/24건)이 축산분야 온실가스 감축 필요성에 대한 이슈를 공감하고 있음
- 저메탄사료 보급 및 축산분야 온실가스 감축을 위한 정책 방안 수립에 대한 의견
  - 저메탄 사료시 생산성(출하 성적 등), 기호성, 안전성이 담보되어야 함
  - 저메탄 사료 사용에 의한 비용 증가에 따른 인센티브 제도 필요
  - 저메탄 축산의 환경적 가치가 소비 가치로 전환될 수 있도록 축산인과 소비자의 공동체적 관심이 필요
  - 메탄저감 사료에 대한 기술 확립이 중요하고, 기술 개발을 위한 정부 지원이 필요
  - 축산농가가 저메탄 사료첨가제가 포함된 배합사료를 일정 비율 사용할 수 있는 정책 마련 필요
  - 축산업은 다른 산업에 비해 온실가스 발생량은 적은 수준임: 추진하고자 하는 정책들이 의도치 않게 국민들로 하여금 축산업이 온실가스의 주범이라는 인식을 갖지 않도록 유의해야 함
  - 저메탄 축산물에 대한 소비자의 공감을 얻기 위해서는 국내산 온실가스 저감제의 개발이 필요

○ 소 메탄발생 감축에 의한 탄소배출권 도입에 대한 의견

- 메탄 배출량과 감축량을 정확히 판별할 수 있는 측정 기술이 공인되어야 하며 국가 차원에서 일원화된 연구를 통해 객관적인 자료를 바탕으로 평가되어야 함
- 메탄 저감 효과가 확실히 있는 검증된 사료 및 첨가제를 이용해야 함
- 공정하고 신뢰성 있는 탄소배출권 거래가 이루어져야 함
- 탄소배출권 인증 농가 확대를 위한 인센티브 제도 필요

2. 적정 단백질 사료/적정 광물질 사료 분야에 대한 설문 조사 요약

○ 농가, 사료회사, 생산자 단체 다수가(74%, 26/35건) 축산분야 잉여 단백질/광물질 배출량 저감 필요성에 대한 이슈를 공감하고 있음. 하지만 온실가스 감축 이슈 만큼 대부분 (96%)이 인식하고 있지는 않은 상황.

○ 사료내 조단백질 감축 및 사료 조단백질 상한치 신규 설정 추진에 대한 의견

- 생산성 하락, 번식 장애, 질병 발병률 증가 등에 문제가 없는 수준에서 사료 단백질 감축 정책이 추진되어야 함
- 성장단계별 적정 단백질 수준 결정, 단백질 이용효율 증진, 유전적 개량 등의 다양한 방안에 대한 연구 지원이 필요
- 적정 단백질 사료 급여에 의한 질소 배설 및 온실 가스 감축 효과에 대해 농가에 홍보가 필요
- 농가에서 자체적으로 단백질 사료를 추가로 급여할 경우에 대한 대책이 필요

○ 기타 축산분야 냄새 저감 및 중금속 배출 저감 정책 수립에 대한 의견

- 악취 및 중금속 배출 저감은 환경부담 저감 사료만으로는 큰 효과를 얻기 어려우므로, 종합적인 대책이 필요
- 지역별 분뇨처리시설 및 액비 센터를 설치하고 퇴비사 규제를 완화하는 등 분뇨 처리의 개선이 필요함
- 사료관리법, 비료관리법 등의 법령을 개선하여 환경보호는 물론 원활한 분변처리가 가능토록 해야함
- 가축의 생산성 저하, 질병 발병 증가에 영향을 주지 않는 범위에서 사료내 중금속 감축 수준을 성장단계별로 구분하여 설정할 필요가 있음
- 양계의 경우 축우나 양돈에 비해 환경에 대한 부담이 덜하다는 인식이 있어 이러한 의견을 고려할 필요가 있음

## VI. 정책과제 결과 홍보

### □ 정책과제 결과 홍보

- 양돈 사료 단백질 수준 저감에 대한 언론 기사 보도 예정
  - 환경부담 저감 사료 개발 보급에 대한 논리, 명분 제공, 국가적 붐 조성 효과
- 반추가축 메탄 저감에 대한 언론 기사 보도 예정

## Ⅶ. 환경부담 저감 사료 개발·보급을 위한 정책 제안

### 1. 메탄 저감 사료 개발 및 보급 확산을 위한 연구 개발 및 정책 제안

#### 1) 탄소 제로 추진을 위한 저메탄 사료 개발 연구 제안

##### (1) 메탄 저감 효과 검증을 위한 메탄 측정 시스템 구축 지원

###### ○ 메탄 측정 호흡챔버 시설 구축 지원

- 가장 정확한 메탄 발생 측정 시스템으로 정밀한 메탄 저감 효능 평가를 위해서는 국가적인 차원에서 예산 지원이 필수적임
- 호흡챔버는 저메탄사료의 메탄 저감 보정계수 개발에 우선 사용되어야함
- 현재 감축기술 실증과 감축량 배출 계수 개발을 위한 호흡챔버의 수가 너무 적음
- 호흡챔버 시설 운용 경험이 있는 연구 기관에 복수 이상으로 지원하여 안정적인 국가 평가 체계 구축이 필요
- 지원 대상 기관: 국립축산과학원, 서울대 등

###### ○ 신속 간편 메탄 측정 시스템 확립 지원

- 호흡 챔버로 메탄 측정을 하는 데는 고액의 예산 투입, 장기간의 평가 기간 소요, 전문인력 필요 등으로 대단위 실험이 어려움
- 신속 간편 메탄 측정 시스템 확립 및 보급을 통해 메탄 저감 효과 검증 연구 기간을 단축하고 대단위 실험 체계를 구축할 필요가 있음
- 축산 농가에 저 메탄 사료 보급후 사후 검정 등의 대단위 실험을 위해서도 필요함
- 간편 메탄 측정 시스템 종류: CO2법, Lazer 법 등
- 호흡챔버와 간편 메탄 측정방법의 비교 실험을 통해서 간편 측정 방법의 정확성 및 타당성을 검증할 필요가 있음

###### ○ 메탄 측정 장치 보유 기관의 컨소시엄 구성 및 실험의 표준화 필요 (그림 7-1)

- 기기 운영 표준화 : 스펠다드 메탄 gas, 분석기 span, zero 농도 조정 방법 등
- 정기적 기기 분석 조건 점검(기기 전문 기관에 의뢰)
- 기초사료 종류, 사료 적응 및 측정 주기, 분석 시료 등 사전 협의
- 장기간 효과 확인을 위한 시험 기간 (최소 100일 이상) 및 필요 두수 확보

###### ○ 참고 자료: 국내 메탄 측정 장비 구축 기관 현황

표 7-1. 국내 메탄 측정 장비 구축 기관 현황

메탄 측정법	보유 기관	보유 대수	측정 가능 축종 (성축 기준)	비고
Respiration chamber	- 국립축산과학원	- 6기 (현재 가동중) - 8기 (현재 구축중)	- 젃소, 한우	
	- 서울대학교 (김경훈 교수)	- 4기 (현재 가동중)	- 한우	
	- 경북대학교 (김은중 교수)	- 4기 (현재 가동중)	- 흑염소, 면양	
	- 충남대학교 (안희권 교수)	- 2기 (현재 가동중) - 1기 (현재 구축중)	- 흑염소, 면양	
GreenFeed	- 순천대학교 (이상석 교수)	- 1기 (현재 가동중)	- 젃소, 한우	
CO2법	- 서울대학교 (백명기 교수)	- 1기 (간이 시스템 가동중)	- 한우 - 젃소에도 적용 가능	

(2) 반추가축 탄소거래 인증 확보 방안 연구

□ ‘한우 탄소 배출권’ 인증 필요성

- ‘소 탄소 배출권’ 또는 탄소상쇄 크레딧이란 저메탄 사료를 급여하여 메탄 발생을 감축하고 상쇄했음을 인증받는 일종의 증서임.
  - 환경부가 배출량인증위원회의 심의를 거쳐 KOC(Korean offset credit)를 발급
- 아래 3개 물질을 이용하여 ‘한우 탄소배출권 (Hanwoo carbon credit)’ 인증 추진
  - 3-NOP: 선진국에서는 3-NOP를 이용하여 탄소배출권 인증을 추진할 가능성이 있음. 외국에서 먼저 인증을 받을 경우, 3-NOP를 이용하여 국내 탄소 배출권 인증이 가능할지는 검토가 필요함
  - 루민업, 나팔꽃씨 등을 이용한 한우 탄소배출권 인증도 병행 추진
  - 스위스의 무트랄사와 유사한 절차로 ‘한우 탄소배출권’ 인증 추진

□ 탄소 배출권 인증을 위한 메탄 저감제 후보 물질에 대한 국내 실증 연구

- 글로벌하게 승인이 예상되는 메탄 저감 첨가제 확보 및 한우 등 국내 실증 연구 수행
  - 후보물질: 3-NOP; DSM 한국 지사
    - 3-NOP 메탄저감 효과: 평균 35% (7 ~ 81%); 7가지 생체 실험
- 글로벌하게 메탄 저감 효과가 확인되었고, 국내 연구결과 in vitro 메탄 저감 효과를 검증하여 국내

보급 가능한 물질에 대한 in vivo 실증 연구 수행

- 후보물질: 루민업 (캐슈넛 부산물 CNSL 포함), 퓨오바이더스 사: 일본, 유럽 등에서도 추천한 물질
  - 국내 시판중 (퓨오바이더스)
  - CNSL 메탄 저감 효과: 평균 21.6% (8~38%): 4가지 생체 실험
  - 한우 급여효과 실험: 사육기간 단축, 증체, 육질/육량 증진, 경제성 확인
  - In vitro 실험에서 평균 33.4% 메탄 저감 확인함 (서울대 김경훈 백명기 교수, 카길 오준표 박사 연구팀)
- 국내 연구진이 발굴한 메탄 저감 첨가제 실증 연구 수행
  - 초기 시스템 구축 목적으로 외국 제품을 사용하나, 국내 원천기술 확보를 위해서는 국내 개발 물질을 보급해야함
  - 후보물질: 나팔꽃씨(견우자): 서울대 김경훈 교수 연구팀이 개발중인 물질
    - 국내 한우 1회 시험(5% DMI)에서 소화율 향상과 메탄저감(13% - 24%)
- 상기 3개 물질에 대하여 메탄 저감 보정 계수 개발
  - 국내 모든 호흡챔버 보유기관간의 컨소시엄을 구성하여 국외에서 개발된 메탄 저감 보정계수 개발을 위한 체계적인 공동연구 필요
  - 배출계수는 베이스라인(감축기술 투입 전) 개념, 보정계수는 프로젝트(감축기술 투입 후) 개념

☞ 메탄 저감제 후보 물질 정보 요약

물질 명	평균 메탄 저감 효과 (저감 범위)	두당 1일 급여량	국내 연구 현황	제품 정보	국내 보급 현황
3-NOP	35% (7~81%)	60 mg /kg 건물 사료	국내 선행 연구 없음	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 네델란드 DSM 사 생산. 유럽 가등록. 글로벌하게 등록 추진중</li> <li>• DSM 한국지사 취급</li> </ul>	사료 관리법상 제품 등록후 보급 가능
루민업: 캐슈넛 부산물 CNSL 함유	21.6% (8~38%)	3-5g/100kg 소 체중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 서울대 in vitro 실험 결과: 평균 33.4% 메탄 감축 확인</li> <li>• 한우 생산성에 대한 선행 연구: 사육기간 단축, 증체 및 육질 개선 경향, 수익증대 효과 확인</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 이데미츠 사 생산</li> <li>• 국내 퓨오바이더스 사 취급</li> <li>• 두당 연간 급여 비용: 7.5만원/5g/d; 대량 보급시 가격 인하 협상 가능 (50%수준?)</li> </ul>	사료 첨가제로 시판 중이므로 즉시 보급 가능
원재료 (나팔꽃씨)	1) 13%: g/일 기준 2) 24%: g/OMI 기준 - 미발표 자료	50g/kg 건물사료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내에서 호흡챔버 실험으로 유일하게 효과가 검증된 물질임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 견우자(백축, 흑축)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 예로부터 소가 속이 불편하면, 찾아 먹었다고 해서 "견우자"라 불림</li> <li>- 실험결과, 섬유소 소화율 23% 증가</li> </ul> </li> </ul>	추출물 제조 등 추가 연구 필요

□ **국내 및 국제기구 탄소거래 인증 확보 추진 (그림 7-1)**

- 환경부 배출량인증위원회의 (Korean offset credit: KOC)에서 ‘한우 탄소배출권’ 인증 추진
- 국제 공인기구에서 소 탄소배출권을 인증 추진
  - 무트랄사의 소 탄소배출권은 Verra에 의해서 인증받음.
    - Verra: 탄소배출 상쇄인증 비영리단체
  - 무트랄사의 탄소배출권(Cow Carbon credits)은 국제항공 탄소상쇄·감축제도(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation: CORSIA)를 포함하여 세계적인 탄소삭감제도 일부로 사용할 수 있도록 인증을 받음.
    - 기업이 소 탄소배출권을 구입해 탄소 배출량을 상쇄시키는데 사용할 수 있음.

**<탄소거래 인증 확보를 위한 효과적인 연구 추진 방향 제안 (그림 7-1)>**

**1. 탄소거래 인증 확보를 위한 국가 예산 지원**

- 메탄 저감 효과 검증을 위한 메탄 측정 시스템 구축 지원
  - 메탄 저감 후보 물질 감축 계수 개발을 위한 메탄측정시스템 구축 지원
- 충분한 실험동물 확보와 장기간 효과 검증에 필요한 예산 지원
  - 반추가축은 개체별 1일 메탄발생량이 크게 3배까지 달라서 동물 반복수가 많아야 함
  - 최소 6개월 이상의 장기효과 검증을 위한 실험 동물의 유지, 반복적인 챔버에 수용 등 연구 내용의 특수성에 상응하는 지원비 지원이 필요
- 탄소중립과 메탄 선언 이행을 위한 기술 개발을 위해 국가 예산 지원이 시급함
  - 기존의 ‘메탄 저감 개발 과제’는 in vivo 실험이 없기 때문에 본 제안 내용과 “중복”된다고 할 수 없음

**2. 국내 가용 챔버의 통합 운영 체계 구축**

- 결과의 신뢰성을 위해 다양한 축종에서 감축효과 확인이 필요
  - 기관별로 중소반추가축(면양, 염소)와 대형반추가축(한우, 젃소)을 분담하여 연구
- 각 기관의 호흡챔버 운영방식 표준화 필요
  - 국내 호흡챔버는 챔버, 챔버 공조기, 챔버 공기 유출 유량계, 가스 분석기, 챔버 가동 순서 조절기 등으로 구성됨.
  - 각 기관의 호흡챔버 구축은 대부분 전문성이 없는 업체가 연구자와의 협의를 통해 이루어졌고, 예산의 범위 내에서 제작되는 한계도 있었음
  - 현재로서는 가장 신뢰성이 높은 방식이지만, 반대로 단계별로 오차 요인이 매우 많은 방식이기도 하고, 국내 시설은 상대적으로 많은 문제점을 안고 있음
  - 기관별로 다른 현재의 운영 방식을 통일해서 감축계수의 신뢰성을 높여야 함



### (3) IPCC Tier 2 방법에 의한 한우 국가 고유 메탄배출계수 개발

- 우리나라 축종(젓소, 한우)의 가축통계 분류(현재 연령별, 성별)별 국가 고유 메탄 배출계수 개발을 위한 연구가 계속되어야 함
- 가축의 메탄 배출계수 개발 방법은 호흡챔버를 이용한 실측방법이 아니고, 2017년 기준 선진국 포함 62개 국가가 이용하고 있는 IPCC Tier 2 방법으로 개발되어야 함
  - 이 방법은 국내 가축의 성장특성 및 생산성(평균체중, 성숙체중, 일당증체량, 유생산량)과 섭취사료의 소화율 특성(가소화영양소 함량) 자료를 이용하여 IPCC에서 제안한 회귀식에 적용하여 산출함
  - 따라서 개발된 배출계수는 해당 국가의 데이터 품질에 따라 좌우됨. 그래서 데이터 품질을 개선해야 하는 항목을 선정하여 관련 기관과 협동으로 품질 개선을 위한 프로젝트를 진행해야 함
- 실측을 권장하지 않는 이유는, 우리나라 호흡챔버 보유 대수가 너무 적기 때문임
  - 호흡챔버는 감축기술 개발과 감축기술 적용시 감축 보정계수 개발 연구에 투입되어야 함
- 본 배출계수가 반드시 개발되고 비정기적이라도 개정되어야 하는 이유는 감축기술에 의한 감축량 산정시 베이스라인으로 이용이 되기 때문임

### (4) 저메탄 발생 한우의 특성 규명 및 저메탄 발생 소 선발 연구

- 한우 고능력우와 저능력우 메탄 발생량 비교 연구
- 저메탄 한우 선발과 생물학적 마커 발굴 연구
- 한우 고능력우와 저능력우의 사육 기간 단축 비교
  - 고능력우의 경우 사육기간 단축이 가능

### (5) 분뇨처리 개선 (바이오가스 플랜트, 분뇨처리)을 통한 온실가스 감축 연구



## 2) 국내 '저탄소 농장 인증' 제도 도입을 위한 정책 제안

- 현행 제도에서 축산물에 주는 인증과 별도로 온실가스 배출을 줄이는 생산단계를 평가하여 **농장에 인증하는 기준을 마련**해야 함
  - '저탄소 농축산물 인증'은 저탄소 농업기술을 활용하여 생산 전과정에서 온실가스 배출을 줄인 농축산물을 대상으로 함.
  - 많은 농산물 작목은 농장 생산단계에서 포장되어 가공 과정 없이도 시장에 출하됨
  - 하지만, 축산물은 농장 생산단계에서 가축 자체 또는 원유 형태로 농장을 떠나서 가공공장을 거쳐서 시장에 나오는 차이가 있음.
  - 따라서 현재의 저탄소 농축산물 인증 기준은 축산 농가 생산단계의 생산물에 인증을 주지 못하고 있음.
  - 축산부문은 축산물이 아니라 온실가스 배출을 줄이는 생산단계를 평가하여 농장에 인증을 주는 기준을 마련해야 함. 농장단계에서 저탄소 기술이 적용된다면 바로 '**농가인증 사례**'도 나올 수 있음.
- 친환경 GAP인증과 저탄소 농축산물 인증을 분리 제안
  - 현재의 친환경 농축산물 인증은 친환경 GAP 인증을 받은 농축산물을 대상으로 적용
  - GAP 기준은 생산에서 유통소비까지 전과정을 체계적으로 관리하는 식품안전 예방조치 관리방법으로 저탄소와는 무관
  - 현행 제도에서는 저탄소 축산물 인증도 생산에서 유통소비까지의 '전 과정에 대한 탄소 평가(Life cycle assessment: LCA)'를 요구하고 있음.
  - 이러한 제도는 상기 "축산물 생산단계의 농장"을 대상으로 하는 인증 기준 마련에 대한 장벽으로 작용하고 있음

## 2. 가축 사료내 적정 단백질 수준 결정 및 질소 배설 저감 관련 정책 제안

### 1) 반추동물 사료내 적정 단백질 수준 결정 및 질소 배설 저감 방안 연구 제안

#### (1) 한우 사육기간 단축을 통한 질소 배설 및 온실가스 감축 기술 개발 연구

- 거세 한우 사육기간을 10% 이상 단축할 수 있는 방안 연구
  - 최근 5년간 거세 한우 평균 사육기간은 30.8개월 (30.3 ~ 31.2).
  - 현재의 사육기간을 10% 줄이면서 생산성을 유지할 수 있으면 메탄 발생 및 질소 배출을 각각 10% 감축할 수 있음
  - 사육기간을 단축해도 주요 도체 성적은 단축 이전의 성적과 유사해야 함

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>○ 2020년 거세한우 주요 도체 성적 (2020 축산물등급판정 통계연보, 축산물 품질평가원)<ul style="list-style-type: none"><li>- 근내지방도 (No) : 28개월(5.7) → 31개월(6.0)</li><li>- 도 체 중 (kg) : 28개월(439.0) → 31개월(454.7)</li><li>- 생 체 중 (kg)* : 28개월(732) → 31개월(758) : *도체율 60.0%로 환산값(2021 통계청 도체율)</li></ul></li><li>○ 사육기간을 31개월령에서 28개월령으로 3개월 단축하였을때 도체성적은 31개월령과 유사한 도체성적을 보여야 실질적인 단축효과가 있음</li></ul> |
|---|

- 반추위 미분해 단백질 급여를 통한 사료 단백질 이용성 향상 및 사육기간 단축 연구
  - 질소 배출이 감소하면 암모니아 발생 감소에 의한 냄새 저감 및 아산화 질소 발생 저감에 의한 온실

가스 감축 효과도 동시에 기대됨.

- 메탄 저감 효과가 있으면서 동시에 사육 기간 단축 효과가 있는 첨가제 개발 연구: 지방 첨가 효과 연구 등

## (2) 질소 배설 및 아산화 질소 감축을 위한 사료 단백질 이용성 향상 기술 개발

- 반추 가축에서 반추위 미분해 단백질 급여를 통한 사료 단백질 이용성 향상 연구
- 가축 사료내 합성 아미노산 첨가를 통한 단백질 이용성 향상 연구

## 2) IPCC (1996)의 양돈 가축분뇨처리 배출량 산정 공식 정확도 검증 및 개발 제안

### (1) IPCC (1996)의 양돈 가축분뇨처리 배출량 산정 공식 정확도 검증

- IPCC (1996)의 메탄 배출 계수의 과대평가
  - 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (2019)에 따르면, 2017년 양돈 부문 연간 CO<sub>2</sub>eq. 배출량은 1,581 (천톤 CO<sub>2</sub>eq.)이고, 그중 장내발효 부문이 약 20%를 가축분뇨처리 부문이 약 80%를 차지.
  - 국가 인벤토리 보고서 (2019)의 양돈에서 장내발효 부문 온실가스 배출량은 IPCC (1996)의 공식 및 메탄 배출 계수를 이용함.
  - 하지만, 북미에서 진행한 실험 결과, IPCC (1996)에 제시된 메탄 배출 계수는 과대평가되었음 (그림 7-2).

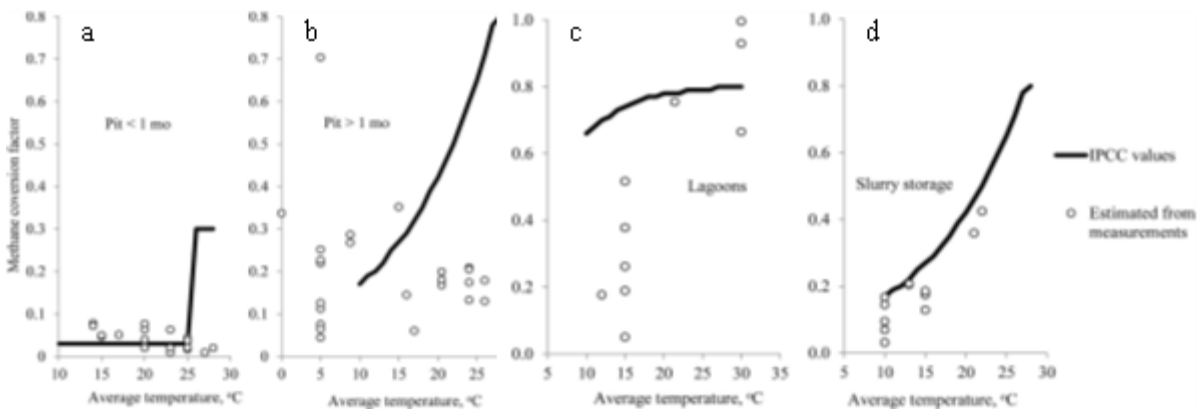


그림 7-2. 양돈 분뇨처리시설에서의 평균 온도에 따른 메탄 배출 계수. a) 피트조 (1달 미만), b) 피트조 (1달 이상), c) 라군 및 d) 슬러리 저장조에서 분뇨처리 할 때를 나타냄.

- 국내 양돈산업의 현실에 맞는 분뇨 처리 시설에서의 메탄 배출 계수 개발과 더불어 분뇨 처리 시설에서의 연평균 질소량 배출 계수 및 장내 발효로 인해 배출되는 메탄 배출 계수 또한 검증 및 개발이 필요
  - 이를 바탕으로 국내 양돈산업에서의 정확한 온실가스 배출량 보고가 가능할 것으로 기대됨.

## 3) 가금 사료내 적정 단백질 수준 및 질소 배설 저감 관련 연구 개발 제안

- (1) 환경부담저감을 위한 육계 및 산란계의 성장 및 생산단계별 사료내 적정 단백질 수준 및 아미노산 수준 설정
  - 양계 사료 배합비 작성시 실제로는 조단백질에 대한 요구량은 사용하고 있지 않고 필수아미노산의

요구량만을 고려하여 배합비를 작성하고 있으므로 조단백질의 함량을 줄이고 필수아미노산의 요구량을 채워 환경부담을 저감하는 사료의 개발이 가능

- 하지만 필수아미노산의 요구량을 충족시켜주더라도 조단백질함량이 부족한 경우 성장이 저하되는 결과를 보여주는 연구가 있으며, 그 이유는 줄어든 조단백질에 따라 비필수아미노산의 공급이 원활히 되지 않아 필수아미노산이 비필수아미노산의 합성에 사용되어 필수 아미노산의 부족으로 성장이 저하된다는 의견이 있음.
- 이에, 조단백질 함량과 필수 및 비필수 아미노산을 모두 고려한 적정 단백질 수준 및 아미노산 요구량 측정연구가 필요함
- 육계는 초기 성장이 매우 빨라 성장단계에 따른 요구량의 변화도 빠르게 일어나기 때문에 이를 고려하여 현재 전기(0-21일령)/후기(21-28일령)로 나누어지는 육계의 성장단계를 세 단계 초기(0-10일령)/전기(10-21일령)/후기(21-28일령)으로 나눠서 요구량의 측정이 필요함.

## (2) 육계 및 산란계 성장단계별 주요 원료사료의 단백질 및 아미노산 이용성 측정에 대한 연구

- 양계사료에 사용되는 원료는 대부분 수입에 의존하고 그 가격은 국제원료사료 가격의 변동에 영향을 받고 있어 사료가격의 안정이 어려운 실정임. 또한 다양한 대체원료사료의 사용도 이루어지고 있어 이에 대한 정확한 이용률 평가가 반드시 이루어져야 함.

## 3. 가축 사료내 적정 중금속 수준 결정 및 중금속 배설 저감 관련 정책 제안

### 1) 환경부담 저감을 위한 가금 사료내 적정 광물질 수준 및 광물질 배설 저감 관련 연구 개발 제안

#### (1) 가금 사료내 칼슘/인 이용성의 정확한 측정 방법 연구

- 사료 내 인과 칼슘의 대표적인 공급원인 무기태 칼슘/인 공급원들은 주로 재생산이 불가능한 광석임
- 국제적으로 매장량이 고갈되어 가고 있어 공급 가능한 무기태 칼슘/인 대한 가격이 오르고 예측 또한 어려워지고 있어 가금사료 내 과다 또는 부족하지 않은 정확한 칼슘/인 첨가량 결정을 위한 칼슘/인 이용성에 대한 정보가 필요함
- 동물이 원료사료 또는 배합사료에서 이용할 수 있는 인의 함량을 표현하는 방법에는 가용인(available P)과 가소화인(digestible P)으로 나타낼 수 있음
- 칼슘을 사료내 공급시에는 대부분은 총칼슘(total calcium)을 사용하며 이는 동물의 이용성을 고려하지 않은 값임.
- 가용인은 특정 기준원료에 대한 인의 이용성을 100%라고 가정하고 비교하고자 하는 원료사료 또는 배합사료에서의 인 이용성을 상대적으로 평가하는 방법을 통해 측정됨
- 실제 동물의 이용성은 기준에 따라 달라지는 상대적인 양이 아닌 절대적인 양으로 측정되어야 정확한 사료배합비 작성이 가능함
- 따라서, 실제 소화기관 내에서 소화를 거쳐 이용될 수 있는 절대적인 양을 알아보는 가소화 칼슘과 인 함량 측정이 적절하다고 유추되지만 이러한 연구는 국내외적으로 매우 부족함

#### (2) 가금사료내 이용성을 바탕으로 하는 칼슘/인 요구량 설정 연구

- 현재 한국 가금사양표준에서 제시하는 가금의 성장단계별 칼슘과 인 요구량은 각각 가금의 이용성을 고려하지 않은 총 칼슘과 총 비피틴테 인의 값으로 제시되고 있으며 이를 바탕으로 사료배합비 작성 시 가금사료 내에 칼슘과 인이 부족 또는 과다 우려가 있음

#### 4. 환경부담 저감 사료의 보급 활성화 계획 요약

구 분	정 의	제 도	연구현황	추가과제
1. 메탄 발생 저감 사료 (저메탄사료)	메탄을 저감할 수 있는 메탄 저감제가 들어간 사료와 사료급여 체계까지도 포함하는 광의의 정의로서, 축산현장의 온실가스 감축사업에 적용할 수 있는 감축기술 그리고 그 감축기술이 투입된 사료	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 자발적 온실가스 감축사업                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 축산부분 사례 없음</li> </ul> </li> <li>▶ KOC (Korean offset credit)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 축산부분 사례 없음</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 장내발효 온실가스 배출계수 개발(축산원, 3년)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 젓소 3건, 한우 3건 완료</li> </ul> </li> <li>▶ 장내발효조절기술(부산대, 3년)</li> <li>▶ 가축 온실가스 발생 저감 기술 개발(순천대, 4년9개월)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 메탄 측정 시스템 구축 지원 (2022년, 3년)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호흡챔버 구축 지원</li> <li>- 신속 간편 간이 측정 시스템 확립 지원</li> </ul> </li> <li>▶ 반추가축 탄소거래 인증 지원 (2022년, 4년)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 메탄저감제별·축종별·성장단계별 사용량 저감계수 산정</li> <li>- 계수의 온실가스 종합정보센터 등록</li> <li>- 저감제의 환경부 KOC 인증</li> <li>- 국제기구 탄소거래 인증</li> </ul> </li> <li>▶ IPCC (1996)의 양돈 가축분뇨처리 배출량 산정 공식 정확도 검증 및 개발 (2023, 3년)</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 저탄소 농축산물 인증제                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 축산물 기준 없음</li> </ul> </li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ (정책 건의)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 축산 농장단계 인증 추진</li> <li>- 유기농 GAP 인증과 분리</li> </ul> </li> </ul>
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 메탄저감 장비 효과 검증                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소 마스크(Zelp社) 등 축산기자재 활용</li> </ul> </li> <li>▶ 사육기간 단축 등 메탄저감을 위한 소 사양관리 기준 제시 (2022년, 3년)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관행 사육방식 대비 기간 단축에 따른 메탄감소율 등</li> </ul> </li> <li>▶ 메탄저감 소 품종 개량 (2023년, 4년)</li> <li>▶ 메탄저감 효과별·지원 대상별 인센티브안 마련</li> </ul>
2. 적정 단백질 사료 (저단백사료)	가축의 생산성에 영향 없이 질소 배출을 감소시키기 위해 적정 수준의 단	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 사료공정서                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조단백질 제한</li> <li>※ 규제심사 중</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 축종별 사료 내 영양소 수준이 가축의 생산성, 소화율, 분뇨 및 악취발생에 미치는 영</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 한우 사육기간 단축을 통한 질소 배출 및 온실가스 감축 기술 개발 연구 (2022, 3년)</li> <li>▶ 질소 배설 및 아산화질소 감축을 위한 반추가축 사</li> </ul>

	백질을 투입한 사료		향 연구(서울대, 2년9개월)	료 단백질 이용성 향상 기술 개발 (2023년, 3년) ▶ 조단백질 감축(사료공정서 개정)에 따른 온실가스 감축 효과 검증 및 감축계수 산정 ▶ 양돈용 원료사료의 성장단계별 이용성 및 질소 배출량 평가 ▶ 성장단계별 소화율 변화에 따른 메탄 및 아산화질소 변화량 평가
3. 구리·아연·인 저감 사료 (퇴비충족 사료)	가축의 생산성에 영향 없이 중금속 및 인의 배출을 저감하여 토양과 수질 오염을 방지하고, 퇴비기준을 충족하는 사료	▶ 사료공정서 - 구리·아연·인 제한 ※ 개정작업 중	▶ 육계에서 인 이용율 측정 방법의 검증과 이를 반영한 인 요구량 측정 (경북대, 3년)	▶ 축종별 사료 내 구리·아연·인의 적정 요구량의 산정 방법의 검증 및 이에 따른 요구량 재산정 ▶ 축종별 사료내 구리·아연·인 요구량에 따른 한국형 감축안(표준기준) 산정 ▶ 중금속 등 감축(사료공정서 개정)에 따른 분뇨 내 중금속 배출 감축 효과 검증
			▶ 돼지의 아연, 구리 체내 이용효율 및 급여효과 구명 (축산과학원, 2년)	

## VII. 참고문헌

### (반추동물)

- 김경훈, 이창현. 2016. 견우자 추출물을 유효성분으로 함유하는 반추동물 메탄 저감용 사료첨가제 조성물(특허출원번호 10-2016-0105661)
- 농림축산식품부. 2017. 농업부문 온실가스 감축효과 산정을 위한 경종 및 축산부문 배출계수와 검증 가이드라인 개발.
- 농업기술실용화재단. 2020. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업: 방법론 15건.
- 온실가스종합정보센터. 2012. 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침
- 온실가스종합정보센터. 2014. 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 1차 계획(2015~2019)
- RDA. 기후변화에 따른 농업부문 적응기반 구축. 완결과제 최종보고서. 2008.
- RDA. 환원적 초산생성유도를 통한 메탄저감 및 사료효율 개선 연구. 완결과제 최종보고서. 2013.
- RDA. 반추가축 장내발효 온실가스 저감을 위한 메탄생성미생물 조절. 완결과제 최종보고서. 2014.
- RDA. 지구온난화 대비 한우 사양관리 개선 연구. 완결과제 최종보고서. 2014.
- RDA. 한우 반추위 메탄균 다양성 분석을 통한 메탄저감 제어기술 개발. 완결과제 최종보고서. 2017.
- 한국반추위미생물연구회 제 2회 국제 Webinar 자료. (2021.08.77)
- 한국반추위미생물연구회 제 3회 국제 Webinar 자료. (2021.09.17.)
- 한우신문. 2021. [해외 축산뉴스] 스위스, 세계 최초 소 트림 탄소배출권 개발. [www.hanwoonews.kr/news/article.html?no=23919](http://www.hanwoonews.kr/news/article.html?no=23919)
- Alemu, A. W., L. K. D. Pekrul, A. L. Shreck, C. W. Booker, S. M. McGinn, M. Kindermann, and K. A. Beauchemin. 2021. 3-Nitrooxypropanol Decreased Enteric Methane Production From Growing Beef Cattle in a Commercial Feedlot: Implications for Sustainable Beef Cattle Production. *Frontiers in Animal Science* 2(4). Article 641590.
- Beauchemin, K. A., S. M. McGinn, and H. V. Petit. 2007. Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets. *Canadian Journal of Animal Science* 87(3):431-440.
- Bharanidharan, R., S. Arokiyaraj, M. Baik, R. Ibidhi, S. J. Lee, Y. Lee, I. S. Nam, and K. H. Kim. 2021. In Vitro Screening of East Asian Plant Extracts for Potential Use in Reducing Ruminal Methane Production. *Animals (Basel)* 11(4):1020.
- Biswas, A. A., S. S. Lee, L. L. Mamuad, S. H. Kim, Y. J. Choi, C. Lee, K. Lee, G. S. Bae, and S. S. Lee. 2018. 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* 89(1):114-121.
- Branco, A. F., F. Giallongo, T. Frederick, H. Weeks, J. Oh, and A. N. Hristov. 2015. Effect of technical cashew nut shell liquid on rumen methane emission and lactation performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98(6):4030-4040.
- Bristow, A. W., D. C. Whitehead, and J. E. Cockburn. 1992. Nitrogenous constituents in the urine of cattle, sheep and goats. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 59(3):387-394. (<https://doi.org/10.1002/jsfa.2740590316>).

- Broderick, G. A. 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 86(4):1370–1381.
- Broderick, G. A. 2018. Review: Optimizing ruminant conversion of feed protein to human food protein. *Animal* 12(8):1722–1734.
- Burreson, B. J., R. E. Moore, and P. P. Roller. 1976. Volatile halogen compounds in the alga *Asparagopsis taxiformis* (Rhodophyta). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 24(4):856–861.
- Bussink, D. W., and O. Oenema. 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51(1):19–33.
- Carulla, J., M. Kreuzer, A. Machmüller, and H. Hess. 2005. Supplementation of *Acacia mearnsii* tannins decreases methanogenesis and urinary nitrogen in forage-fed sheep. *Australian journal of agricultural research* 56(9):961–970.
- Castillo, C., J. L. Benedito, J. Méndez, V. Pereira, M. López-Alonso, M. Miranda, and J. Hernández. 2004. Organic acids as a substitute for monensin in diets for beef cattle. *Animal Feed Science and Technology* 115(1):101–116.
- CFI. Methodology for reducing greenhouse gas emissions in milking cows through feeding dietary additives. Australian government.
- CNN Business. (2021). This supplement can reduce methane in cows and make farmers money <https://edition.cnn.com/2021/05/18/business/cow-burps-methane-feed-supplement-mootral-spc-intl/index.html>
- Chagunda, M. G. G., and T. Yan. 2011. Do methane measurements from a laser detector and an indirect open-circuit respiration calorimetric chamber agree sufficiently closely? *Animal Feed Science and Technology* 165(1):8–14.
- Choi, C. W., K. H. Kim, S. S. Chang, and N. J. Choi. 2012. Soluble Non-ammonia Nitrogen in Ruminal and Omasal Digesta of Korean Native Steers Supplemented with Soluble Proteins. *Asian-Australas J Anim Sci* 25(9):1269–1275.
- Cole, N. A., P. J. Defoor, M. L. Galyean, G. C. Duff, and J. F. Gleghorn. 2006. Effects of phase-feeding of crude protein on performance, carcass characteristics, serum urea nitrogen concentrations, and manure nitrogen of finishing beef steers. *J Anim Sci* 84(12):3421–3432.
- Colmenero, J. J. O., and G. A. Broderick. 2006. Effect of Amount and Ruminant Degradability of Soybean Meal Protein on Performance of Lactating Dairy Cows<sup>1</sup>. *J. Dairy Sci.* 89(5):1635–1643.
- Daniel, J. B., N. C. Friggens, P. Chapoutot, H. Van Laar, and D. Sauvant. 2016. Milk yield and milk composition responses to change in predicted net energy and metabolizable protein: a meta-analysis. *Animal* 10(12):1975–1985.
- Danielson, R., A. Werner-Omazic, M. Ramin, A. Schnürer, M. Griinari, J. Dicksved, and J. Bertilsson. 2014. Effects on enteric methane production and bacterial and archaeal communities by the addition

of cashew nut shell extract or glycerol—An in vitro evaluation. *J. Dairy Sci.* 97(9):5729–5741.

- Dijkstra, J., A. Bannink, J. France, E. Kebreab, and S. van Gastelen. 2018. Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *J. Dairy Sci.* 101(10):9041–9047.
- Dohme, F., A. Machmüller, A. Wasserfallen, and M. Kreuzer. 2000. Comparative efficiency of various fats rich in medium-chain fatty acids to suppress ruminal methanogenesis as measured with RUSITEC. *Canadian Journal of Animal Science* 80(3):473–484.
- Dohme, F., A. Machmüller, A. Wasserfallen, and M. Kreuzer. 2001. Ruminal methanogenesis as influenced by individual fatty acids supplemented to complete ruminant diets. *Lett Appl Microbiol* 32(1):47–51.
- Doreau, M., M. Arbre, Y. Rochette, C. Lascoux, M. Eugène, and C. Martin. 2018. Comparison of 3 methods for estimating enteric methane and carbon dioxide emission in nonlactating cows. *J Anim Sci* 96(4):1559–1569.
- Duval, S., & Kindermann, M. (2012). Use of nitrooxy organic molecules in feed for reducing enteric methane emissions in ruminants, and/or to improve ruminant performance. International patent application WO, 84629, A1.
- Eom, J. S., S. J. Lee, Y. Lee, H. S. Kim, Y. Y. Choi, H. S. Kim, D. H. Kim, and S. S. Lee. 2020. Effects of supplementation levels of *Allium fistulosum* L. extract on in vitro ruminal fermentation characteristics and methane emission. *PeerJ* 8:e9651.
- Finlay, B. J., G. Esteban, K. J. Clarke, A. G. Williams, T. M. Embley, and R. P. Hirt. 1994. Some rumen ciliates have endosymbiotic methanogens. *FEMS Microbiology Letters* 117(2):157–161.
- Foley, P. A., D. A. Kenny, J. J. Callan, T. M. Boland, and F. P. O'Mara. 2009. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emission, and rumen fermentation in beef cattle. *Journal of Animal Science* 87(3):1048–1057.
- Garnsworthy, P. C., G. F. Difford, M. J. Bell, A. R. Bayat, P. Huhtanen, B. Kuhla, J. Lassen, N. Peiren, M. Pszczola, D. Sorg, M. H. P. W. Visker, and T. Yan. 2019. Comparison of Methods to Measure Methane for Use in Genetic Evaluation of Dairy Cattle. *Animals* 9(10)
- Giallongo, F., M. T. Harper, J. Oh, J. C. Lopes, H. Lapierre, R. A. Patton, C. Parys, I. Shinzato, and A. N. Hristov. 2016. Effects of rumen-protected methionine, lysine, and histidine on lactation performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99(6):4437–4452.
- Giallongo, F., M. T. Harper, J. Oh, C. Parys, I. Shinzato, and A. N. Hristov. 2017. Histidine deficiency has a negative effect on lactational performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 100(4):2784–2800.
- Giallongo, F., A. N. Hristov, J. Oh, T. Frederick, H. Weeks, J. Werner, H. Lapierre, R. A. Patton, A. Gehman, and C. Parys. 2015. Effects of slow-release urea and rumen-protected methionine and histidine on performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98(5):3292–3308.
- Goel, G., and H. P. S. Makkar. 2012. Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins.



Tropical Animal Health and Production 44(4):729–739.

- Greenhouse gas inventory report (GIR) of Korea. Korea's third national communication under the United Nations Framework Convention on climate change: Low carbon, green growth. Greenh. Gas Invent. Res. Cent. 2012, 1, 1 - 200. Available online: <https://unfccc.int/resource/docs/natc/kornc3.pdf>
- Haisan, J., Y. Sun, L. L. Guan, K. A. Beauchemin, A. Iwaasa, S. Duval, D. R. Barreda, and M. Oba. 2014. The effects of feeding 3-nitrooxypropanol on methane emissions and productivity of Holstein cows in mid lactation. *J. Dairy Sci.* 97(5):3110–3119.
- Haisan, J., Y. Sun, L. Guan, K. A. Beauchemin, A. Iwaasa, S. Duval, M. Kindermann, D. R. Barreda, and M. Oba. 2017. The effects of feeding 3-nitrooxypropanol at two doses on milk production, rumen fermentation, plasma metabolites, nutrient digestibility, and methane emissions in lactating Holstein cows. *Animal Production Science* 57(2):282–289.
- Higuchi, K., I. Nonaka, F. Ohtani, T. Motoshima, and K. Yunokawa. 2019. Low CP diet with synchrony of ruminal nitrogen and energy decreased nitrogen excretion in dairy cow, EAAP Scientific Series. Wageningen Academic Publishers. p. 251–263.
- Hristov, A. N., and F. Giallongo. 2014. Feeding protein to dairy cows – what should be our target? p 75–84. Ohio State University, Ohio.
- Hristov, A. N., M. Hanigan, A. Cole, R. Todd, T. A. McAllister, P. M. Ndegwa, and A. Rotz. 2011. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots. *Canadian Journal of Animal Science* 91(1):1–35.
- Hristov, A. N., and A. Melgar. 2020. Short communication: Relationship of dry matter intake with enteric methane emission measured with the GreenFeed system in dairy cows receiving a diet without or with 3-nitrooxypropanol. *Animal* 14(S3):s484–s490.
- Hristov, A. N., J. Oh, F. Giallongo, T. W. Frederick, M. T. Harper, H. L. Weeks, A. F. Branco, P. J. Moate, M. H. Deighton, S. R. O. Williams, M. Kindermann, and S. Duval. 2015. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(34):10663.
- Huhtanen, P., and A. N. Hristov. 2009. A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92(7):3222–3232.
- Ibidhi, R., T.-H. Kim, R. Bharanidharan, H.-J. Lee, Y.-K. Lee, N.-Y. Kim, and K.-H. Kim. 2021. Developing Country-Specific Methane Emission Factors and Carbon Fluxes from Enteric Fermentation in South Korean Dairy Cattle Production. *Sustainability* 13(16)
- IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2006. Eggleston, S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe.
- Jeong, J., N.-I. Seong, I.-K. Hwang, S.-B. Lee, M.-S. Yu, I.-S. Nam, and M.-I. Lee. 2010. Effects of level of CP and TDN in the concentrate supplement on growth performances and carcass characteristics in Hanwoo steers during final fattening period. *Journal of Animal Science and*

Technology 52(4):305–312.

- Johnson, K. A., and D. E. Johnson. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science* 73(8):2483–2492.
- Jordan, E., D. K. Lovett, F. J. Monahan, J. Callan, B. Flynn, and F. P. O'Mara. 2006. Effect of refined coconut oil or copra meal on methane output and on intake and performance of beef heifers. *Journal of Animal Science* 84(1):162–170.
- Kamiya, M., T. Yamada, and M. Higuchi. 2020. Influence of dietary crude protein content on fattening performance and nitrogen excretion of Holstein steers. *Animal Science Journal* 91(1):e13438. (<https://doi.org/10.1111/asj.13438>).
- Kamiya, M., T. Yamada, and M. Higuchi. 2021. Effects of low-crude protein diets supplemented with rumen-protected lysine and methionine on fattening performance and nitrogen excretion of Holstein steers. *Animal Science Journal* 92(1):e13562. (<https://doi.org/10.1111/asj.13562>).
- Katongole, C. B., and T. Yan. 2020. Effect of Varying Dietary Crude Protein Level on Feed Intake, Nutrient Digestibility, Milk Production, and Nitrogen Use Efficiency by Lactating Holstein-Friesian Cows. *Animals* 10(12):2439
- Kidane, A., M. Øverland, L. T. Mydland, and E. Prestløkken. 2018. Interaction between feed use efficiency and level of dietary crude protein on enteric methane emission and apparent nitrogen use efficiency with Norwegian Red dairy cows<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 96(9):3967–3982.
- Kim, B. K., D. Y. Oh, E. G. Hwang, Y. H. Song, S. O. Lee, K. K. Jung, and J. J. Ha. 2013. The effects of different crude protein levels in the concentrates on carcass and meat quality characteristics of Hanwoo steers. *Journal of Animal Science and Technology* 55(1):61–66.
- Kim, J.-H., Y.-K. Oh, K.-H. Kim, C.-W. Choi, S.-K. Hong, Y.-J. Seol, D.-H. Kim, G.-C. Ahn, M.-K. Song, and K.-K. Park. 2009. Effects of Protein Supply from Soyhulls and Wheat Bran on Ruminal Metabolism, Nutrient Digestion and Ruminal and Omasal Concentrations of Soluble Non-ammonia Nitrogen of Steers. *Asian-Australas J Anim Sci* 22(9):1267–1278.
- Kim, K. H., S. Arokiyaraj, J. Lee, Y. K. Oh, H. Y. Chung, G.-D. Jin, E. B. Kim, E. K. Kim, Y. Lee, and M. Baik. 2016. Effect of rhubarb (*Rheum* spp.) root on *in vitro* and *in vivo* ruminal methane production and a bacterial community analysis based on 16S rRNA sequence. *Animal Production Science* 56(3):402–408.
- Kim, M. J., J. S. Lee, S. Kumar, M. M. Rahman, J. S. Shin, and C. S. Ra. 2012. Indirect Estimation of CH<sub>4</sub> from Livestock Feeds through TOCs Evaluation. *Asian-Australas J Anim Sci* 25(4):496–501.
- Kim, S.-H., C. Lee, H. A. Pechtl, J. M. Hettick, M. R. Campler, M. D. Pairs-Garcia, K. A. Beauchemin, P. Celi, and S. M. Duval. 2019. Effects of 3-nitrooxypropanol on enteric methane production, rumen fermentation, and feeding behavior in beef cattle fed a high-forage or high-grain diet<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 97(7):2687–2699.
- Konda, S., R. Onodera, E. Kanchanasatit, P. Boonsaen, S. Sawanon, K. Nagashima, Y. Suzuki, S. Koike,

- and Y. Kobayashi. 2019. Effect of cashew nut shell liquid feeding on fermentation and microbiota in the rumen of Thai native cattle and swamp buffaloes. *Livestock Science* 226:99–106.
- KÜLLing, D. R., H. Menzi, T. F. KrÖBer, A. Neftel, F. Sutter, P. Lischer, and M. Kreuzer. 2001. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from different types of dairy manure during storage as affected by dietary protein content. *The Journal of Agricultural Science* 137(2):235–250.
- Lee, C., A. N. Hristov, T. W. Cassidy, K. S. Heyler, H. Lapierre, G. A. Varga, M. J. de Veth, R. A. Patton, and C. Parys. 2012a. Rumen-protected lysine, methionine, and histidine increase milk protein yield in dairy cows fed a metabolizable protein-deficient diet. *J. Dairy Sci.* 95(10):6042–6056.
- Lee, C., A. N. Hristov, C. J. Dell, G. W. Feyereisen, J. Kaye, and D. Beegle. 2012b. Effect of dietary protein concentration on ammonia and greenhouse gas emitting potential of dairy manure. *J. Dairy Sci.* 95(4):1930–1941.
- Lee, C., A. N. Hristov, K. S. Heyler, T. W. Cassidy, H. Lapierre, G. A. Varga, and C. Parys. 2012c. Effects of metabolizable protein supply and amino acid supplementation on nitrogen utilization, milk production, and ammonia emissions from manure in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 95(9):5253–5268.
- Lee, C., D. L. Morris, K. M. Lefever, and P. A. Dieter. 2020a. Feeding a diet with corn distillers grain with solubles to dairy cows alters manure characteristics and ammonia and hydrogen sulfide emissions from manure. *J. Dairy Sci.* 103(3):2363–2372.
- Lee, H. J., S. C. Lee, J. D. Kim, Y. G. Oh, B. K. Kim, C. W. Kim, and K. J. Kim. 2003. Methane Production Potential of Feed Ingredients as Measured by In Vitro Gas Test. *Asian-Australas J Anim Sci* 16(8):1143–1150.
- Lee, S. J., Y. J. Lee, J. S. Eom, H. S. Kim, Y. Y. Choi, S. U. Jo, S. N. Kang, H. Y. Park, D. H. Kim, and S. S. Lee. 2020b. Effects of the Appropriate Addition of Antioxidants from *Pinus densiflora* and *Mentha canadensis* Extracts on Methane Emission and Rumen Fermentation. *Animals* 10(10)
- Lee, Y. H., F. Ahmadi, M. Lee, Y.-K. Oh, and W. S. Kwak. 2020c. Effect of crude protein content and undegraded intake protein level on productivity, blood metabolites, carcass characteristics, and production economics of Hanwoo steers. *Asian-Australas J Anim Sci* 33(10):1599–1609.
- Lopes, J. C., L. F. de Matos, M. T. Harper, F. Giallongo, J. Oh, D. Gruen, S. Ono, M. Kindermann, S. Duval, and A. N. Hristov. 2016. Effect of 3-nitrooxypropanol on methane and hydrogen emissions, methane isotopic signature, and ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99(7):5335–5344.
- Lovett, D., S. Lovell, L. Stack, J. Callan, M. Finlay, J. Conolly, and F. P. O'Mara. 2003. Effect of forage/concentrate ratio and dietary coconut oil level on methane output and performance of finishing beef heifers. *Livestock Production Science* 84(2):135–146.
- Machado, L., M. Magnusson, N. A. Paul, R. de Nys, and N. Tomkins. 2014. Effects of Marine and Freshwater Macroalgae on In Vitro Total Gas and Methane Production. *PLoS One* 9(1):e85289.
- Machmüller, A., C. R. Soliva, and M. Kreuzer. 2003. Methane-suppressing effect of myristic acid in sheep as affected by dietary calcium and forage proportion. *British Journal of Nutrition* 90(3):529–540.

- Maeda, K., V. T. Nguyen, T. Suzuki, K. Yamada, K. Kudo, C. Hikita, V. P. Le, M. C. Nguyen, and N. Yoshida. 2021. Network analysis and functional estimation of the microbiome reveal the effects of cashew nut shell liquid feeding on methanogen behaviour in the rumen. *Microbial Biotechnology* 14(1):277–290.
- Martin, C., D. P. Morgavi, and M. Doreau. 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal* 4(3):351–365.
- Martin, C., J. Rouel, J. P. Jouany, M. Doreau, and Y. Chilliard. 2008. Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 86(10):2642–2650.
- Martínez-Fernández, G., L. Abecia, A. Arco, G. Cantalapiedra-Hijar, A. I. Martín-García, E. Molina-Alcaide, M. Kindermann, S. Duval, and D. R. Yáñez-Ruiz. 2014. Effects of ethyl-3-nitrooxy propionate and 3-nitrooxypropanol on ruminal fermentation, microbial abundance, and methane emissions in sheep. *J. Dairy Sci.* 97(6):3790–3799.
- Martínez-Fernández, G., S. Duval, M. Kindermann, H. J. Schirra, S. E. Denman, and C. S. McSweeney. 2018. 3-NOP vs. Halogenated Compound: Methane Production, Ruminal Fermentation and Microbial Community Response in Forage Fed Cattle. *Front Microbiol* 9(1582)
- McAllister, T. A., and C. J. Newbold. 2008. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(2):7–13.
- McCourt, A. R., T. Yan, and S. Mayne. 2008. Validation of the sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer technique as a method of predicting methane output from dairy cows. *Proceedings of the British Society of Animal Science* 2008:120–120.
- McGinn, S. M., K. A. Beauchemin, T. Coates, and D. Colombatto. 2004. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 82(11):3346–3356.
- Melgar, A., K. C. Welter, K. Nedelkov, C. M. M. R. Martins, M. T. Harper, J. Oh, S. E. Räsänen, X. Chen, S. F. Cueva, S. Duval, and A. N. Hristov. 2020. Dose-response effect of 3-nitrooxypropanol on enteric methane emissions in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 103(7):6145–6156.
- Melgar, A., C. F. A. Lage, K. Nedelkov, S. E. Räsänen, H. Stefanoni, M. E. Fetter, X. Chen, J. Oh, S. Duval, M. Kindermann, N. D. Walker, and A. N. Hristov. 2021. Enteric methane emission, milk production, and composition of dairy cows fed 3-nitrooxypropanol. *J. Dairy Sci.* 104(1):357–366.
- Min, B. R., T. N. Barry, G. T. Attwood, and W. C. McNabb. 2003. The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages: a review. *Animal Feed Science and Technology* 106(1):3–19.
- Min, B. R., K. Hernandez, W. E. Pinchak, R. C. Anderson, J. E. Miller, and E. Valencia. 2015. Effects of Plant Tannin Extracts Supplementation on Animal Performance and Gastrointestinal Parasites Infestation in Steers Grazing Winter Wheat. *Open Journal of Animal Sciences* Vol.05No.03:8.

- Min, B. R., W. E. Pinchak, J. D. Fulford, and R. Puchala. 2005. Effect of feed additives on in vitro and in vivo rumen characteristics and frothy bloat dynamics in steers grazing wheat pasture. *Animal Feed Science and Technology* 123-124:615-629.
- Min, B. R., W. E. Pinchak, M. E. Hume, and R. C. Anderson. 2021. Effects of Condensed Tannins Supplementation on Animal Performance, Phylogenetic Microbial Changes, and In Vitro Methane Emissions in Steers Grazing Winter Wheat. *Animals* 11(8)
- Mitsumori, M., O. Enishi, T. Shinkai, K. Higuchi, Y. Kobayashi, A. Takenaka, K. Nagashima, M. Mochizuki, and Y. Kobayashi. 2014. Effect of cashew nut shell liquid on metabolic hydrogen flow on bovine rumen fermentation. *Animal Science Journal* 85(3):227-232.
- Mootral. CARBON PROJECTS & CREDITS. <https://mootral.com/carbon/carbon-projects-carbon-credits/> Quantification protocol for emission reductions from dairy cattle. Ver 1. 2010. Government of Alberta.
- Morris, D. L., S. H. Kim, and C. Lee. 2018. Effects of corn feeding reduced-fat distillers grains with or without monensin on nitrogen, phosphorus, and sulfur utilization and excretion in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 101(8):7106-7116.
- Muñoz, C., T. Yan, D. A. Wills, S. Murray, and A. W. Gordon. 2012. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows. *J. Dairy Sci.* 95(6):3139-3148.
- Murphy, M. R., R. L. Baldwin, and L. J. Koong. 1982. Estimation of Stoichiometric Parameters for Rumen Fermentation of Roughage and Concentrate Diets. *Journal of Animal Science* 55(2):411-421.
- Oh, Y.-K., J.-H. Kim, K.-H. Kim, C.-W. Choi, S.-W. Kang, I.-S. Nam, D.-H. Kim, M.-K. Song, C.-W. Kim, and K.-K. Park. 2008. Effects of Level and Degradability of Dietary Protein on Ruminant Fermentation and Concentrations of Soluble Non-ammonia Nitrogen in Ruminant and Omasal Digesta of Hanwoo Steers. *Asian-Australas J Anim Sci* 21(3):392-403.
- Ondersteijn, C. J. M., A. C. G. Beldman, C. H. G. Daatselaar, G. W. J. Giesen, and R. B. M. Huirne. 2002. The Dutch Mineral Accounting System and the European Nitrate Directive: implications for N and P management and farm performance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 92(2):283-296.
- Patra, A. K. 2016. Recent Advances in Measurement and Dietary Mitigation of Enteric Methane Emissions in Ruminants. *Frontiers in Veterinary Science* 3(39)(Review).
- Patra, A. K., and J. Saxena. 2009. Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of the effects on microbial populations. *Antonie van Leeuwenhoek* 96(4):363-375.
- Patra, A. K., and J. Saxena. 2010. A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry* 71(11):1198-1222.
- Patra, A. K., and Z. Yu. 2013. Effects of gas composition in headspace and bicarbonate concentrations in media on gas and methane production, degradability, and rumen fermentation using in vitro gas production techniques. *J. Dairy Sci.* 96(7):4592-4600.

- Patra, A. K., and Z. Yu. 2015. Effects of Adaptation of In vitro Rumen Culture to Garlic Oil, Nitrate, and Saponin and Their Combinations on Methanogenesis, Fermentation, and Abundances and Diversity of Microbial Populations. *Front Microbiol* 6:1434. (10.3389/fmicb.2015.01434).
- Pinares-Patiño, C. S., K. R. Lassey, R. J. Martin, G. Molano, M. Fernandez, S. MacLean, E. Sandoval, D. Luo, and H. Clark. 2011. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:201-209.
- Puchala, R., B. R. Min, A. L. Goetsch, and T. Sahl. 2005. The effect of a condensed tannin-containing forage on methane emission by goats<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 83(1):182-186.
- Rajaraman, B., Y. J. Seol, Y. K. Oh, S. S. Chang, J. G. Kim, I. S. Nam, and K. H. Kim. 2017. Effects of caprylic acid and  $\beta$ -cyclodextrin complexes on digestibility, energy balance, and methane production in Korean Hanwoo heifers. *Animal Feed Science and Technology* 234:72-77.
- Rehman, A., M. Arif, M. Saeed, A. Manan, A. Al-Sagheer, M. E. A. El-Hack, A. A. Swelum, and A. N. Alowaimier. 2020. Nutrient digestibility, nitrogen excretion, and milk production of mid-lactation Jersey  $\times$  Friesian cows fed diets containing different proportions of rumen-undegradable protein. *An Acad Bras Cienc* 92 Suppl 1:e20180787.
- Reynal, S. M., and G. A. Broderick. 2005. Effect of Dietary Level of Rumen-Degraded Protein on Production and Nitrogen Metabolism in Lactating Dairy Cows\*. *J. Dairy Sci.* 88(11):4045-4064.
- Reynolds, C. K., D. J. Humphries, P. Kirton, M. Kindermann, S. Duval, and W. Steinberg. 2014. Effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission, digestion, and energy and nitrogen balance of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97(6):3777-3789.
- Reynolds, C. K., and N. B. Kristensen. 2008. Nitrogen recycling through the gut and the nitrogen economy of ruminants: An asynchronous symbiosis<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 86(suppl\_14):E293-E305.
- Ricci, P., M. G. G. Chagunda, J. Rooke, J. G. M. Houdijk, C. A. Duthie, J. Hyslop, R. Roehe, and A. Waterhouse. 2014. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 92(11):5239-5250.
- Romero-Perez, A., E. K. Okine, S. M. McGinn, L. L. Guan, M. Oba, S. M. Duval, M. Kindermann, and K. A. Beauchemin. 2014. The potential of 3-nitrooxypropanol to lower enteric methane emissions from beef cattle<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 92(10):4682-4693.
- Romero-Perez, A., E. K. Okine, S. M. McGinn, L. L. Guan, M. Oba, S. M. Duval, M. Kindermann, and K. A. Beauchemin. 2015. Sustained reduction in methane production from long-term addition of 3-nitrooxypropanol to a beef cattle diet<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 93(4):1780-1791.
- Sajeev, E. P. M., B. Amon, C. Ammon, W. Zollitsch, and W. Winiwarter. 2018. Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110(1):161-175.
- Salo, S. 2018. Effects of Quality and Amounts of Dietary Protein on Dairy Cattle Reproduction and the

- Schilde, M., D. von Soosten, L. Hüther, S. Kersten, U. Meyer, A. Zeyner, and S. Dänicke. 2021. Dose - Response Effects of 3-Nitrooxypropanol Combined with Low- and High-Concentrate Feed Proportions in the Dairy Cow Ration on Fermentation Parameters in a Rumen Simulation Technique. *Animals* 11(6)
- Seo, J. K., J. Yang, H. J. Kim, S. D. Upadhaya, W. M. Cho, and J. K. Ha. 2010. Effects of Synchronization of Carbohydrate and Protein Supply on Ruminal Fermentation, Nitrogen Metabolism and Microbial Protein Synthesis in Holstein Steers. *Asian-Australas J Anim Sci* 23(11):1455-1461.
- Shinkai, T., O. Enishi, M. Mitsumori, K. Higuchi, Y. Kobayashi, A. Takenaka, K. Nagashima, M. Mochizuki, and Y. Kobayashi. 2012. Mitigation of methane production from cattle by feeding cashew nut shell liquid. *J. Dairy Sci.* 95(9):5308-5316.
- Sinclair, K. D., P. C. Garnsworthy, G. E. Mann, and L. A. Sinclair. 2014. Reducing dietary protein in dairy cow diets: implications for nitrogen utilization, milk production, welfare and fertility. *Animal* 8(2):262-274.
- Soliva, C. R., L. Meile, A. Cieślak, M. Kreuzer, and A. Machmüller. 2004. Rumen simulation technique study on the interactions of dietary lauric and myristic acid supplementation in suppressing ruminal methanogenesis. *British Journal of Nutrition* 92(4):689-700.
- Tamminga, S., A. Bannink, J. Dijkstra, and R. L. G. Zom. 2007. Feeding strategies to reduce methane loss in cattle.
- Tiemann, T. T., C. E. Lascano, H. R. Wettstein, A. C. Mayer, M. Kreuzer, and H. D. Hess. 2008. Effect of the tropical tannin-rich shrub legumes *Calliandra calothyrsus* and *Flemingia macrophylla* on methane emission and nitrogen and energy balance in growing lambs. *Animal* 2(5):790-799.
- Twigge, J. R., and L. G. M. Van Gils. 1984. 13 - PRACTICAL ASPECTS OF FEEDING PROTEIN TO DAIRY COWS. In: W. Haresign and D. J. A. Cole, editors, *Recent Advances in Animal Nutrition - 1984*. Butterworth-Heinemann. p. 201-217.
- Van Kessel, J. A. S., and J. B. Russell. 1996. The effect of pH on ruminal methanogenesis. *FEMS Microbiology Ecology* 20(4):205-210.
- Van Wesemael, D., L. Vandaele, B. Ampe, H. Cattrysse, S. Duval, M. Kindermann, V. Fievez, S. De Campeneere, and N. Peiren. 2019. Reducing enteric methane emissions from dairy cattle: Two ways to supplement 3-nitrooxypropanol. *J. Dairy Sci.* 102(2):1780-1787.
- Verified Carbon Standard. METHODOLOGY: VCS Version 3. METHODOLOGY FOR THE REDUCTION OF ENTERIC METHANE EMISSIONS FROM RUMINANTS THROUGH THE USE OF 100% NATURAL FEED SUPPLEMENT. Document Prepared by MOOTRAL SA, in collaboration with ALLCOT. [https://verra.org/wp-content/uploads/2019/03/Reduction-of-Enteric-Methane-Emissions\\_Public-Comment\\_FEB\\_2019.pdf](https://verra.org/wp-content/uploads/2019/03/Reduction-of-Enteric-Methane-Emissions_Public-Comment_FEB_2019.pdf)
- von Soosten, D., U. Meyer, G. Flachowsky, and S. Dänicke. 2020. Dairy Cow Health and Greenhouse

Gas Emission Intensity. Dairy 1(1)

- Vyas, D., A. W. Alemu, S. M. McGinn, S. M. Duval, M. Kindermann, and K. A. Beauchemin. 2018. The combined effects of supplementing monensin and 3-nitrooxypropanol on methane emissions, growth rate, and feed conversion efficiency in beef cattle fed high-forage and high-grain diets<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 96(7):2923–2938.
- Vyas, D., S. M. McGinn, S. M. Duval, M. Kindermann, and K. A. Beauchemin. 2016. Effects of sustained reduction of enteric methane emissions with dietary supplementation of 3-nitrooxypropanol on growth performance of growing and finishing beef cattle<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 94(5):2024–2034.
- Wageningen University and Research. Project Low-emission animal feed. <https://www.wur.nl/en/show/Low-emission-animal-feed.htm>
- Wedlock, D. N., G. Pedersen, M. Denis, D. Dey, P. H. Janssen, and B. M. Buddle. 2010. Development of a vaccine to mitigate greenhouse gas emissions in agriculture: Vaccination of sheep with methanogen fractions induces antibodies that block methane production in vitro. *New Zealand Veterinary Journal* 58(1):29–36.
- Wilkes, A., and S. v. Dijk. 2018. Tier 2 inventory approaches in the livestock sector: a collection of agricultural greenhouse gas inventory practices.
- Wright, A. D. G., P. Kennedy, C. J. O'Neill, A. F. Toovey, S. Popovski, S. M. Rea, C. L. Pimm, and L. Klein. 2004. Reducing methane emissions in sheep by immunization against rumen methanogens. *Vaccine* 22(29):3976–3985.
- Wu, L., X. Chen, W. Wei, Y. Liu, D. Wang, and B.-J. Ni. 2020. A Critical Review on Nitrous Oxide Production by Ammonia-Oxidizing Archaea. *Environmental Science & Technology* 54(15):9175–9190.
- Yejun, L., L. Su Kyoungh, L. Shin Ja, E. Jong-Su, and L. Sung Sill. 2019. Effects of *Lonicera japonica* extract supplementation on in vitro ruminal fermentation, methane emission, and microbial population. *Animal Science Journal* 90(9):1170–1176.
- Zhang, X. M., M. L. Smith, R. J. Gruninger, L. Kung, D. Vyas, S. M. McGinn, M. Kindermann, M. Wang, Z. L. Tan, and K. A. Beauchemin. 2021. Combined effects of 3-nitrooxypropanol and canola oil supplementation on methane emissions, rumen fermentation and biohydrogenation, and total tract digestibility in beef cattle. *J Anim Sci* 99(4)

## (양돈, 가금)

- 김유용. 2021. 유럽의 양돈사료 실제 분석. 서울대학교.
- Abdel-Maksoud, A., F. Yan, S. Cerrate, C. Coto, Z. Wang, and P. Waldroup. 2010. Effect of dietary crude protein, lysine level and amino acid balance on performance of broilers 0 to 18 days of age. *Int. J. Poult. Sci.* 9:21–27.
- Abdel-Megeed, A., and A. Tahir. 2015. Reduction of phosphorus pollution from broilers waste through



- supplementation of wheat based broilers feed with phytase. *J. Chem.* 2015:867014.
- Adeola, O. 1995. Digestive utilization of minerals by weanling pigs fed copper- and phytase-supplemented diets. *Can. J. Anim. Sci.* 75:603-610.
- Alagawany, M., A. E. Mohamed, M. Arif, E. A. Ashour. 2016. Individual and combined effects of crude protein, methionine, and probiotic levels on laying hen productive performance and nitrogen pollution in the manure. *Environ Sci Pollut Res.* 23:22906-22913.
- Alebrante, L., J. L. Donzele, R. F. M. Oliveira, A. Saraiva, S. E. F. Guimaraes, and A. S. Ferreira. 2011. Available phosphorus levels in diets for pigs with high genetic potential for lean meat deposition kept in thermoneutral environment from 15 to 30 kg. *Rev. Bras. Zootec.* 40:323-330.
- Al-Sharafat, A., B. Al-Desiet, S. Al-Kouri. 2009. The effect of calcium level, microbial phytase and citric acid on performance parameters and eggshell quality of laying hens fed corn soybean meal diet. *J. Anim. Vet. Adv.* 8:1829-1837.
- Ammerman, C. B., D. B. Baker, and A. J. Lewis. 1995. *Bioavailability of Nutrients for Animals*. Academic Press, New York, 367-398.
- Angel, R., W. W. Saylor, A. D. Mitchell, W. Powers, and T. J. Applegate. 2006. Effect of dietary phosphorus, phytase, and 25-hydroxycholecalciferol on broiler chicken bone mineralization, litter phosphorus, and processing yields. *Poult. Sci.* 85:1200-1211.
- Apgar, G., and E. Kornegay. 1996. Mineral balance of finishing pigs fed copper sulfate or a copper-lysine complex at growth-stimulating levels. *J. Anim. Sci.* 74:1594-1600.
- ARC. 1981. *The nutrient requirements of pigs*. Commonwealth Agricultural Breaux, Slough, England.
- Armstrong, T., Cook, D., Ward, M., Williams, C., Spears, Jerry. 2004. Effect of dietary copper source (cupric citrate and cupric sulfate) and concentration on growth performance and fecal copper excretion in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 82:1234-1240.
- Arrendondo, M. A., G. A. Casas, and H. H. Stein. 2019. Increasing levels of microbial phytase increases the digestibility of energy and minerals in diets fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 248:27-36.
- Ball, M. E., E. Magowan, K. J. McCracken, V. E. Beattie, R. Bradford, F. J. Gordon, M. J. Robinson, S. Smyth, and W. Henry. 2013. The effect of level of crude protein and available lysine on finishing pig performance, nitrogen balance and nutrient digestibility. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 26:564-572.
- Barszcz, M., M. Taciak, A. Tuśnio, K. Čobanová, and L. U. Grešáková. 2019. The effect of organic and inorganic zinc source, used in combination with potato fiber, on growth, nutrient digestibility and biochemical blood profile in growing pigs. *Livest. Sci.* 227:37-43.
- Bikker, P., J. van Baal, G. P. Binnendijk, J. Th. M. van Diepen, L. M. P. Troquet, and A. W. Jongbloed. 2015. Copper in diets for weaned pigs; influence of level and duration of copper supplementation. Wageningen: Wageningen UR (Univesity & Research centre) Livestock Research,

Livestock Research Report 830.

- Blair, R., J. P. Jacob, S. Ibrahim, P. Wang. 1999. A quantitative assessment of reduced protein diets and supplements to improve nitrogen utilization. *J. Appl. Poult. Res.* 8:25-47.
- Boscato, M. M., Woodworth, J. C., Dritz, S. S., Amachawadi, R. G., Nagaraja, T. G., Capps, K., Tokach, M. D., DeRouchey, J. M. and Goodband, R. D. 2018. Impact of Added Copper and Chlortetracycline on Growth Performance of Nursery Pigs. *J. Anim. Sci.* 96:118-119.
- Bougouin, A., J. A. D. R. N. Appuhamy, E. Kebreab, J. Dijkstra, R. P. Kwakkel, J. France. 2014. Effects of phytase supplementation on phosphorus retention in broilers and layers: A meta-analysis. *Poult. Sci.* 93:1981-1992.
- Brady, S. M., J. J. Callan, D. Cowan, M. McGrane, and J. V. O'Doherty. 2002. Effect of phytase inclusion and calcium/phosphorus ratio on the performance and nutrient retention of grower-finisher pigs fed barley/wheat/soya bean meal-based diets. *J. Sci. Food Agric.* 82:1780-1790.
- Braude, R., and K. Ryder. 1973. Copper levels in diets for growing pigs. *J. Agric. Sci.* 80:489-93.
- Broom, L. J., Miller, H. M., Kerr, K. G. and Knapp, J. S. 2005. Effect of zinc oxide and *Enterococcus faecium* SF68 dietary supplementation on the performance, intestinal microbiota and immune status of weaned piglets. *Research in Veterinary Science* 80:45 - 54.
- Buchanan, J. R., C. R. Mote., and R. B. Robinson. 1994. Thermodynamics of struvite formation. *T. ASABE.* 37:617-621.
- Burch, D. G. 2014. Effects of tetracycline and zinc on selection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) sequence type in pigs. *Vet. Microbiol.* 173:398-400.
- Burdick Sanchez, N. C., J. A. Carroll, J. R. Corley, P. R. Broadway, and T. R. Callaway. 2019. Changes in the hematological variables in pigs supplemented with yeast cell wall in response to a salmonella challenge in weaned pigs. *Front. Vet. Sci.* 6:246.
- Cabahug, S., V. Ravindran, P. H. Selle, W. L. Bryden. 1999. Response of broiler chickens to microbial phytase supplementation as influenced by dietary phytic acid and non-phytate phosphorus contents. I. Effects on bird performance and toe ash. *Br. Poult. Sci.* 40:660-666.
- Canh, T. T., A. J. A. Aarnink, J. B. Schutte, A. Sutton, D. J. Langhout, and M. W. A. Verstegen. 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing - finishing pigs. *Livest. Prod. Sci.* 56:181-191.
- Carpenter, C. B., J. C. Woodworth, J. M. DeRouchey, M. D. Tokach, R. D. Goodband, S. S. Dritz, F. Wu, and J. L. Usry. 2018. Effects of increasing copper from tri-basic copper chloride or a coppermethionine chelate on growth performance of nursery pigs. *Transl. Anim. Sci.* 369 - 376.
- Carson, R. T. and Vignali, D. A. 1999. Simultaneous quantitation of 15 cytokines using a multiplexed flow cytometric assay. *J. Immunol Meth* 227: 41 - 52.
- Case, C. L. and Carlson, M. S. 2002. Effect of feeding organic and inorganic sources of additional zinc

on growth performance and zinc balance in nursery pigs, *Journal of Animal Science*. 80:1917 - 1924.

- Charmaine, E. D, Stein, H. H. 2021. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: A review. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 12:1-12.
- Cho, J. H., P. Y. Zhao, and I. H. Kim. 2011. Probiotics as a dietary additive for pigs: a review. *J. Anim. Vet. Adv.* 10:2127-2134.
- Cinq-mars, D., G. Goulet, and G. Brisson. 1988. Response of piglets to suboptimal protein diets supplemented with lysine, methionine, threonine and tryptophan. *Can. J. Anim. Sci.* 68:311-313.
- Coble, K. 2017. The effects of copper source and concentration on growth performance, carcass characteristics, and pen cleanliness in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:4052-4059.
- Correll, D. L. 1999. Phosphorus: a rate limiting nutrient in surface waters. *Poult. Sci.* 78:674-682.
- Cromwell, G. L., M. D. Lindemann, H. J. Monegue, D. D. Hall, and D. E. Orr Jr. 1998. Tribasic copper chloride and copper sulfate as copper sources for weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 76:118-23.
- Davis, E., C. Maxwell., B. Kegley., B. D. Rodas., K. Friesen., D. H. Hellwig., Z. Johnson, and D. W. Kellogg. 1999. Efficacy of mannan oligosaccharide (Bio-Mos®) addition at two levels of supplemental copper on performance and immunocompetence of early weaned pigs. *Agric. Exp. Sta. Res. Series* 470:15-18.
- Decuyper, C., L. Nollet, M. Aluwe, J. De Boever, L. Doudah, E. Vanderbeke, N. Outchkourov, S. Petkov, and S. Millet. 2010. Effect of supplementing phytase on piglet performance, nutrient digestibility and bone mineralisation. *J. Appl. Anim. Nutr.* 8:3-10.
- Delezie, E., L. Maertens, G. Huyghebaert. 2012. Consequences of phosphorus interactions with calcium, phytase, and cholecalciferol on zootechnical performance and mineral retention in broiler chickens. *Poult. Sci.* 91:2523-2531.
- Ekpe, E. D., R. T. Zijlstra, and J. F. Patience. 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 82:541-549.
- Espinosa, C. D., and H. H. Stein. 2021. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 12:13.
- EUR-Lex, 2017 COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU). 2017.02.15. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0302&from=PL>.
- Gao, Y., Y. W. Che., D. Adams., and S. Yang, 2020. Advances in the mechanism of high copper diets in restraining pigs growth. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 104:667-678.
- Gaterell, M. R., R. Gay, R. Wilson, R. J. Gochin, and J. N. Lester. 2000. An economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment

works in existing UK fertiliser markets. *Environ. Technol.* 21:1067–1084.

Girard, M., and G. Bee. 2020. Invited review: Tannins as a potential alternative to antibiotics to prevent coliform diarrhea in weaned pigs. *Animal* 14:95–107.

Gómez, R., A. Lewis, P. Miller, and H. Y. Chen. 2002. Growth performance, diet apparent digestibility, and plasma metabolite concentrations of barrows fed corn–soybean meal diets or low–protein, amino acid–supplemented diets at different feeding level. *J. Anim. Sci.* 80:644–653.

Grela, E. R., S. Muszynski, A. Cezch, J. Donaldson, P. Stanislawski, M. Kapica, O. Brezvyin, V. Muzyka, I. Kotsyumbas, and E. Tomaszewska. 2020. Influence of phytase supplementation at increasing doses from 0 to 1500 FTU/kg on growth performance, nutrient digestibility, and bone status in grower–finisher pigs fed phosphorus–deficient diets. *Animals* 10:847.

Hahn, J. D., and Baker D. H. 1993. Growth and plasma zinc responses of young pigs fed pharmacologic levels of zinc. *J. Anim. Sci.* 71:3020–3024.

Hansen, B. C., and A. J. Lewis. 1993. Effects of dietary protein concentration (corn:soybean meal ratio) on the performance and carcass characteristics of growing boars, barrows, and gilts: mathematical descriptions. *J. Anim. Sci.* 71:2122–2132.

Harn, J. V., M. A. Dijkslag, M. M. V. Krimpen. 2019. Effect of low protein diets supplemented with free amino acids on growth performance, slaughter yield, litter quality, and footpad lesions of male broilers. *Poult. Sci.* 98:4868–4877.

Hartman, G. H. 1979. Removal of phytate from soy protein. *Lipids* 56:731–735.

Hawbaker, J. A., V. C. Speer., V. W. Hays., J. H. Hawbaker., and D. V. Catron. 1961. Effects of copper sulfate and other chemotherapeutics ingrowing swine rations. *J. Anim. Sci.* 20:163–167.

Henman, D. 2001. Organic mineral supplements in pig nutrition: performance and meat quality, reproduction and environmental responses. *Biotechnology in the feed industry proceedings of Alltech’s 17th annual symposium.* 281–304.

Heo, J. M., F. O. Opapeju, J. R. Pluske, J. C. Kim, D. J. Hampson, and C. M. Nyachoti. 2013. Gastrointestinal health and function in weaning pigs: a review of feeding strategies to control post–weaning diarrhoea without using in–feed antimicrobial compounds. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 97:207–237.

Hernández, F., M. López, S. Martínez, M. Megias, P. Catalá, and J. Madrid. 2012. Effect of low–protein diets and single sex on production performance, plasma metabolites, digestibility, and nitrogen excretion in 1– to 48–day–old broilers. *Poult. Sci.* 91:683–692.

Hernández, F., S. Martínez, C. López, M. Megías, M. López, and J. Madrid. 2011. Effect of dietary crude protein levels in a commercial range, on the nitrogen balance, ammonia emission and pollutant characteristics of slurry in fattening pigs. *Animal* 5:1290–1298.

Hill, G. M., D. C. Mahan, S. D. Carter, G. L. Cromwell, R. C. Ewan, R. L. Harrold, A. J. Lewis, P. S.

- Miller, G. C. Shurson, and T. L. Veum. 2001. Effect of pharmacological concentrations of zinc oxide with or without the inclusion of an antibacterial agent on nursery pig performance. *J. Anim. Sci.* 79:934–941.
- Hill, G. M., D. C. Mahan, and J. S. Jolliff. 2014. Comparison of organic and inorganic zinc sources to maximize growth and meet the zinc needs of the nursery pig. *J. Anim. Sci.* 92:1582 – 1594.
- Hill, G., P. Ku, E. Miller, D. Ullrey, T. Losty, and B. O'Dell. 1983. A copper deficiency in neonatal pigs induced by a high zinc maternal diet. *J. Nutr.* 113:867–872.
- Hofmann, P., W. Siegert, Á. Kenéz, V. D. Naranjo, and M. Rodehutschord. 2019. Very low crude protein and varying glycine concentrations in the diet affect growth performance, characteristics of nitrogen excretion, and the blood metabolome of broiler chickens. *J. Nutr.* 149:1122–1132.
- Hollis, G.R., S.D. Carter, T.R. Cline, T.D. Crenshaw and G.L. Cromwell. 2005. Effects of replacing pharmacological levels of dietary zinc oxide with lower dietary levels of various organic zinc sources for weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 83: 2123–2129.
- Hwangbo, J., and E. C. Hong. 2012. The effect of dietary phytase on nitrogen and phosphorus excretion of gestating and lactating sows. *J. Anim. Sci. Technol.* 54:291–297.
- Ibrahim, S., J. P. Jacob, R. Blair. 1999. Phytase supplementation to reduce phosphorus excretion of broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 8:414–425.
- Jang, Y. D., E. Van Heugten, B. G. Kim, C. V. Maxwell, and J. S. Radcliffe. 2014. Effects of phytase supplementation on reproductive performance, apparent total tract digestibility of Ca and P and bone characteristics in gestating and lactating sows. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 27:178–193.
- Jendza, J. A., R. N. Dilger, S. A. Adedokun, J. S. Sands, and O. Adeola. 2005. *Escherichia coli* phytase improves growth performance of starter, grower, and finisher pigs fed phosphorus-deficient diets. *J. Anim. Sci.* 83:1882–1889.
- Jensen, J., M. M. Larsen, and J. Bak. 2016. National monitoring study in Denmark finds increased and critical levels of copper and zinc in arable soils fertilized with pig slurry. *Environ. Pollut.* 214: 334–340.
- Jian, J., Pi, J., Cai, J., 2018. The Advancing of Zinc Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications. *Bioinorg. Chem. Appl.* 18.
- Jianguo, W. Zhu, X., Guo, Y. 2016. Influence of Dietary Copper on Serum Growth-Related Hormone Levels and Growth Performance of Weanling Pigs. *Biol Trace Elem Res.* 172:134 – 139.
- Jin, C., J. Kim, I. K. Han, and S. Bae. 1998. Effects of supplemental synthetic amino acids to the low protein diets on the performance of growing pigs. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 11:1–7.
- Johansen, M.; Jørgensen, L.; Schultz, M.S. 2007. Effect of Zinc and Organic Acids on Diarrhoea in the Weaner Period; SEGES: Copenhagen, Denmark.
- Johnston, S. L., S. B. Williams, L. L. Southern, T. D. Bidner, L. D. Bunting, J. O. Matthews, and B. M.

- Olcott. 2004. Effect of phytase addition and dietary calcium and phosphorus levels on plasma metabolites and ileal and total-tract nutrient digestibility in pigs. *J. Anim. Sci.* 82:705–714.
- Jørgensen, H., Prapasongsa, T., Vu, V.T.K. 2013. Models to quantify excretion of dry matter, nitrogen, phosphorus and carbon in growing pigs fed regional diets. *J. Animal. Sci. Biotechnol.* 4:42
- Kamran, Z., H. D. Sarwar, M. U. Nisa, M. A. Nadeem, S. Mahmood. 2010. Effect of low levels of dietary crude protein with constant metabolizable energy on nitrogen excretion, litter composition and blood parameters of broilers. *Int. J. Agric. Biol.* 12:401–405.
- Kerr, B. J., and R. A. Easter. 1995. Effect of feeding reduced protein, amino acid-supplemented diets on nitrogen and energy balance in grower pigs. *J. Anim. Sci.* 73:3000–3008.
- Keshavarz, K. and R. E. Austic. 2004. The use of low-protein, low-phosphorus, amino acid-and phytase-supplemented diets on laying hen performance and nitrogen and phosphorus excretion. *Poult. Sci.* 83:75–83.
- Kim, H., B. Hong, and B. G. Kim. 2021. Digestible phosphorus requirements of growing pigs determined in experiments are greater than those estimated using modeling approach, *J. Anim. Sci.* 99(Suppl. 1):204(Abstr.).
- Kristensen, H. H. and Watches, C. M. 2000. Ammonia and poultry welfare: a review. *World's Poult. Sci. J.* 56:235–245.
- Kuhn, I., and K. Partanen. 2005. Phytase improves apparent total tract digestibility of phosphorus and calcium in piglets fed diets with adequate or reduced phosphorus content. *J. Anim. Sci.* 90:194–196.
- Kumar. V., J. Kalita., H. K. Bora, and U. K. Misra. 2016. Temporal kinetics of organ damage in copper toxicity: A histopathological correlation in rat model. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 81:372–380.
- Lagos, L. V., S. A. Lee, G. Fondevila, C. L. walk, M. R. Murphy, J. J. Loor, and H. H. Stein. 2019. Influence of the concentration of dietary digestible calcium on growth performance, bone mineralization, plasma calcium, and abundance of genes involved in intestinal absorption of calcium in pigs from 11 to 22 kg fed diets with different concentrations of digestible phosphorus. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10:47.
- Law, F. L., I. Zulkifli, A. F. Soleimani, J. B. Liang, E. A. Awad. 2018. The effects of low-protein diets and protease supplementation on broiler chickens in a hot and humid tropical environment. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 31:1291–1300.
- Le Bellego, L., and J. Noblet. 2002. Performance and utilization of dietary energy and amino acids in piglets fed low protein diets. *Livest. Prod. Sci.* 76:45–58.
- Le Bellego, L., C. Relandeau, and S. Van Cauwenberghe. 2001. Managing growth and carcass quality of growing pigs fed low protein diets. In: *Ajinomoto Eurolysine Information No. 24.*
- Lebel, A., J. J. Matte, and F. Guay 2014. Effect of mineral source and mannan oligosaccharide supplements on zinc and copper digestibility in growing pigs. *Arch. Tierernahr.* 68:370–384.

- Lee, J., M. Song, W. Yun, S. Liu, H. Oh, J. An, Y. Kim, C. Lee, H. Kim, and J. Cho. 2020. Effects of silicate derived from quartz porphyry supplementation in the health of weaning to growing pigs after lipopolysaccharide challenge. *J. Appl. Anim. Res.* 48:440–447.
- Lee, S. A., D. Nagalakshmi, M. V. Raju, S. V. R. Rao, M. R. Bedford. 2017. Effect of phytase superdosing, myo-inositol and available phosphorus concentrations on performance and bone mineralisation in broilers. *Anim. Nutr.* 3:247–251.
- Lee, S., A. Hosseindoust, A. Goel, Y. Choi, I. K. Kwon, B. Chae. 2016. Effects of dietary supplementation of bacteriophage with or without zinc oxide on the performance and gut development of weanling pigs, *Ital. J. Anim. Sci.* 15:3:412–418.
- Lee, S. A., C. S. Park, and B. G. Kim. 2021. Novel two-slope equations to predict amino acid concentrations using crude protein concentration in soybean meal. *Agriculture* 11:280.
- Lehringer A. L., D. L. Nelson, M. M. Cox. 1998. Principle of biochemistry. german edition. Spektrum Akademischer Verlag.
- Lemme, A., P. Hiller, M. Klahsen, V. Taube, J. Stegemann, and I. Simon. 2019. Reduction of dietary protein in broiler diets not only reduces n-emissions but is also accompanied by several further benefits. *J. App. Poult. Res.* 28:867–880.
- Li, X., D. Zhang, T. Y. Yang, and W. L. Bryden. 2016. Phosphorus bioavailability: A key aspect for conserving this critical animal feed resource with reference to broiler nutrition. *Agriculture* 6:25.
- Li, X., J. Yin, D. Li, X. Chen, J. Zang, and X. Zhou. 2006. Dietary supplementation with zinc oxide increases IGF-I and IGF-I receptor gene expression in the small intestine of weanling piglets. *J. Nutr.* 136:1786–1791.
- Liebert, F., C. Wecke, and F. J. Schoner. 1993. Phytase activity in different gut contents of chickens as dependent on levels of phosphorus and phytase supplementation. *Proc. Symp. Enzyme Anim. Nutr.* 202–205.
- Lim, H. S., H. Namkung, J. S. Um, K. R. Kang, B. S. Kim, I. K. Paik. 2001. The effects of phytase supplementation on the performance of broiler chickens fed diets with different levels of non-phytate phosphorus. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 14:250–257.
- Liu, F. F., M. Aazd, A. Kalam, Z. H. Li, J. Li, K. B. Mo, and H. J. Ni. 2021. Zinc supplementation forms influenced zinc absorption and accumulation in piglets. *Animals* 11:36.
- Liu, Y., Y. L. Ma, J. M. Zhao, M. Vazquez-Añón, and H. H. Stein. 2014. Digestibility and retention of zinc, copper, manganese, iron, calcium, and phosphorus in pigs fed diets containing inorganic or organic minerals. *J. Anim. Sci.* 92:3407–3415.
- Lordelo, M. M., A. M. Gaspar, L. Le Bellego, and J. P. Freire. 2008. Isoleucine and valine supplementation of a low-protein corn-wheat-soybean meal-based diet for piglets: growth performance and nitrogen balance. *J. Anim. Sci.* 86:2936–2941.

- Lorenzen, E. J., and S. E. Smith. 1947. Copper and manganese storage in the rat, rabbit, and guinea pig. *J. Nutr.* 33:143–154.
- Luo, X. G., and C. R. Dove. 1996. Effect of dietary copper and fat on nutrient utilization, digestive enzyme activities, and tissue mineral levels in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 74:1888–1896.
- Lyberg, K., H. K. Andderson, A. Simonsson, and J. E. Lindberg. 2006. Influence of different phosphorus levels and phytase supplementation in gestation diets on sow performance. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 91:304–311.
- Lynch, M. B., T. Sweeney, B. F. J. J. Callan, and J. V. O'Doherty. 2007. The effect of high and low dietary crude protein and inulin supplementation on nutrient digestibility, nitrogen excretion, intestinal microflora and manure ammonia emissions from finisher pigs. *Animal* 1:1112–1121.
- Ma, Y., Q. Huang, M. Lv, Z. Wu, Z. Xie, and X. Han. 2014. Chitosan–Zn chelate increases antioxidant enzyme activity and improves immune function in weaned piglets. *Biol. Trace Elem. Res.* 158:45–50.
- Macelline, S. P., S. S. Wickramasuriya, H. M. Cho, E. Kim, T. K. Shin, J. S. Hong, J. C. Kim, J. R. Pluske, H. J. Choi, and Y. G. Hong. 2020. Broilers fed a low protein diet supplemented with synthetic amino acids maintained growth performance and retained intestinal integrity while reducing nitrogen excretion when raised under poor sanitary conditions. *Poult. Sci.* 99:949–958.
- Maddaiah, V. T., A. A. Kurnick, and B. L. Reid. 1964. Phytic acid studies. *Exp. Biol. Med.* 115:391–393.
- Madsen, E., and J. D. Gitlin. 2007. Copper and iron disorders of the brain. *Annu. Rev. Neurosci.* 30:317–337.
- Malomo, G. A., S. A. Bolu, S. G. Olutade. 2013. Effects of dietary crude protein on performance and nitrogen economy of broilers. *Sustain. Agric. Res.* 2.
- Manangi, M., K., and C. N. Coon. 2008. Phytate phosphorus hydrolysis in broilers in response to dietary phytase, calcium, and phosphorus concentrations. *Poult. Sci.* 87:1577–1586.
- Marinussen, M., Kool, A., 2010. Environmental Impacts of Synthetic Amino Acid Production. *Blonk Milieu Advies BV, The Netherlands.*
- McAlpine, P., C. J. O'Shea, P. F. Varley, B. Flynn, and J. V. O'Doherty. 2012. The effect of seaweed extract as an alternative to zinc oxide diets on growth performance, nutrient digestibility, and fecal score of weaned piglets. *J. Anim. Sci.* 90:224–226.
- Meda, B., M. Hassouna, C. Aubert, P. Robin, and J.-Y. Dourmad. 2011. Influence of rearing conditions and manure management practices on ammonia and greenhouse gas emissions from poultry houses. *Worlds Poult. Sci. J.* 67:441–456.
- Meluzzi, A., F. Sirri, N. Tallarico, A. Franchini. 2001. Nitrogen retention and performance of brown laying hens on diets with different protein content and constant concentration of amino acids and energy. *Br. Poult. Sci.* 42:213–217.
- Missotten, J. A. M., J. Goris, M. J. Michiels, E. Van Coillie, L. Herman, S. De Smet, N. A. Dierick, and



- M. Heyndrickx. 2009. Screening of isolated lactic acid bacteria as potential beneficial strains for fermented liquid pig feed production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 150:122–138.
- Mullins, G. 2009. Phosphorus, agriculture & the environment. Virginia Tech. Accessed Aug. 18, 2021. [http://pubs.ext.vt.edu/424/424-029/404-029\\_pdf](http://pubs.ext.vt.edu/424/424-029/404-029_pdf).
- Nasi, M. 1990. Microbial phytase supplementation for improving availability of plant phosphorus in the diet of growing pigs. *J. Agric. Sci. Finl.* 62:435–442.
- Nitrayova, S., W. Windisch, E. Von Heimendahl, A. Müller, and J. Bartelt. 2012. Bioavailability of zinc from different sources in pigs. *J. Anim. Sci.* 90:185–187.
- Noblet, J., X. S. Shi, and S. Dubois. 1994. Effect of body weight on net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:648–657.
- NRC. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th ed. Washington (DC): The National Academies Press.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th rev. ed. Washington (DC): The National Academies Press.
- Nyachoti, C. M., J. S. Sands, M. L. Connor, and O. Adeola. 2006. Effect of supplementing phytase to corn- or wheat-based gestation and lactation diets on nutrient digestibility and sow and litter performance. *Can. J. Anim. Sci.* 86:501–510.
- O’Connell, J., J. Callan, and J. O’Doherty. 2006. The effect of dietary crude protein level, cereal type and exogenous enzyme supplementation on nutrient digestibility, nitrogen excretion, faecal volatile fatty acid concentration and ammonia emissions from pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 127:73–88.
- O’Doherty, J. V., S. Forde, and J. J. Callan. 1999. The use of microbial phytase in grower and finisher pig diets. *Ir. J. Agric. Food Res.* 38:227–239.
- Oh, S. M., Kim, M., Hosseindoust, A., Kim, K. Y., Choi, Y. H., Ham, H. B., Hwang, S. J., Lee, J. H., Cho, H. J., Kang, W. S. 2020. Hot melt extruded-based nano zinc as an alternative to the pharmacological dose of ZnO in weanling piglets. *Asian-Australas J. Anim. Sci.* 33:992.
- Opapeju, F. O., M. Rademacher, G. Blank, and C. M. Nyachoti. 2008. Effect of low-protein amino acid-supplemented diets on the growth performance, gut morphology, organ weights and digesta characteristics of weaned pigs. *Animal* 2:1457–1464.
- Ospina-Rojas, I. C., A. E. Murakami, C. Eyng, R. V. Nunes, C. R. Duarte, and M. D. Vargas. 2012. Commercially available amino acid supplementation of low-protein diets for broiler chickens with different ratios of digestible glycine+serine:lysine. *Poult. Sci.* 91:3148–3155.
- Ospina-Rojas, I. C., A. E. Murakami, C. R. Duarte, C. Eyng, C. A. Oliveira, and V. Janeiro. 2014. Valine, isoleucine, arginine and glycine supplementation of low-protein diets for broiler chickens during the starter and grower phases. *Br. Poult. Sci.* 55:766–773.
- Oster, M., C. Gerlinger, K. Heide, F. Just, L. Borgelt, P. Wolf, C. Polley, B. Vollmar, E. Murani, S. Ponsuksili, and K. Wimmers. 2018. Lower dietary phosphorus supply in pigs match both animal

welfare aspects and resource efficiency. *Ambio* 47:20–29.

- Otto, E. R., M. Yokoyama, P. K. Ku, N. K. Ames, and N. L. Trottier. 2003. Nitrogen balance and ileal amino acid digestibility in growing pigs fed diets reduced in protein concentration. *J. Anim. Sci.* 81:1743–1753.
- Pallauf, J., and G. Rimbach. 1997. Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Arch. Anim. Nutr.* 50:301–319.
- Peng, X., L. Hu, Y. Liu, C. Yan, Z. Fang, Y. Lin, S. Xu, J. Li, C. Wu, and D. Chen. 2016. Effects of low-protein diets supplemented with indispensable amino acids on growth performance, intestinal morphology and immunological parameters in 13 to 35 kg pigs. *Animal* 10:1812–1820.
- Persia, M. E. and W. W. Saylor. 2006. Effects of broiler strain, dietary nonphytate phosphorus, and phytase supplementation on chick performance and tibia ash. *J. Appl. Poult. Res.* 15:72–81.
- Pérez, V. G., A. M. Waguespack, T. D. Bidner, L. L. Southern, T.M. Fakler, T. L. Ward, M. Steidinger, and J. E. Pettigrew. 2011. Additivity of effects from dietary copper and zinc on growth performance and fecal microbiota of pigs after weaning. *J. Anim. Sci.* 89:414–425.
- Portejoie, S., J.-Y. Dourmad, J. Martinez, and Y. Lebreton. 2004. Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livest. Prod. Sci.* 91:45–55.
- Poulsen, H. 1998. Zinc and copper as feed additives, growth factors or unwanted environmental factors. *J. Anim. Feed Sci.* 7:135–142.
- Poulsen, H. D. 1995. Zinc oxide for weanling piglets. *Acta Agric. Scand. A Anim. Sci.* 45:159–167.
- Powell, S., S. Johnston, L. Gaston, L. L. Southern. 2008. The effect of dietary phosphorus level and phytase supplementation on growth performance, bone-breaking strength, and litter phosphorus concentration in broilers. *Poult. Sci.* 87:949–957.
- Praes, M. F. F. M., O. M. Junqueira, A. A. Pereira, R. S. Filardi, K. F. Duarte, S. Sgavioli, C. H. F. Domingues. 2014. High-fiber diets with reduced crude protein for commercial layers. *Braz. J. Poult. Sci.* 16:43–49.
- RDA (Rural Development Administration). 2017. Korean feeding standard for swine. 3rd edition. National Institute of Animal Science, Jeonju, Korea. [in Korean]
- Reddy, N. R., S. K. Sathe, and D. K. Salunkhe, 1982. Phytates in legumes and cereals. *Adv. Food Res.* 28:1–92
- Roberts, S. A., H. Xin, B. J. Kerr, J. R. Russell, K. Bregendahl. 2007. Effects of dietary fiber and reduced crude protein on ammonia emission from laying-hen manure. *Poult. Sci.* 86:1625–1632.
- Rodrigues, V. V., V. S. Cantarelli, N. O. Amaral, M. G. Zangeronimo, J. A. Concalves de Brito, and E. T. Fialho. 2011. Nutrient reduction in rations with phytase for growing pigs. *R. Bras. Zootec.* 40:370–376.

- Rousseau, X., M. P. Létourneau-Montminy, N. Mème, M. Magnin, Y. Nys, and L. Narcy. 2012. Phosphorus utilization in finishing broiler chickens: Effects of dietary calcium and microbial phytase. *Poult. Sci.* 91:2829–2837.
- Ryu., H. D, K. H. Ahn, E. G. Chung, Y. Kim, and D. Rhew. 2017. Recovery of recycling of nitrogen and phosphorus as struvite from livestock excreta. *J. Environ. Sci.* 26:119–131.
- Sales, J. 2014. Optimal dietary copper levels for pig growth. *Arch. Zootech.* 17:5.
- Santos T. D. , Tiago, Srinongkote, Saksit, Bedford, Michael, Walk, C.. 2013. Effect of High Phytase Inclusion Rates on Performance of Broilers Fed Diets Not Severely Limited in Available Phosphorus. *Asian–Australasian journal of animal sciences.* 26:227–32.
- Saraiva, A., J. L. Donzele, R. F. M. Oliveira, M. L. T. Abreu, F. C. Oliveira Silva, and F. Almeida Santos. 2009. Available phosphorus levels in diets for sines from 15 to 30 kg genetically selected for meat deposition. *R. Bras. Zootec.* 38:307–313.
- Scheiber. I., R. Dringen., and J. F. Mercer. 2013. Copper: Effects of deficiency and overload. *Met. Ions Life Sci.* 13:359–387.
- Selle, P. H., and Ravindran, V. 2008. Phytate-degrading enzymes in pig nutrition. *Livest. Sci.* 113:99–122.
- Shao, D., Y. Shen, X. Zhao, Q. Wang, Y. Hu, S. Shi, H. Tong. 2018. Low-protein diets with balanced amino acids reduce nitrogen excretion and foot pad dermatitis without affecting the growth performance and meat quality of free-range yellow broilers. *Ital. J. Anim. Sci.* 17: 698–705.
- Shelton, J. L., L. L. Southern, T. D. Binder, M. A. Persica, J. Braun, and B. Cousins. 2003. Effect of microbial phytase on energy availability, and lipid and protein deposition in growing swine. *J. Anim. Sci.* 81:2053–5062.
- Shelton, N. W., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, R. D. Goodband, S. S. Dritz, J. M. DeRouchey, and G. M. Hill. 2011. Effects of copper sulfate, tri-basic copper chloride, and zinc oxide on weanling pig performance. *J. Anim. Sci.* 89:2440–2451.
- Shim, Y. H., B. J. Choi, and J. H. Lee. 2004. Effects of phytase and enzyme complex supplementation to diets with different nutrient levels on growth performance and ileal nutrient digestibility of weaned pigs. *Asian–Australas. J. Anim. Sci.* 17:523–532.
- Shriver, J. A., S. D. Carter, A. L. Sutton, B. T. Richert, B. W. Senne, and L. A. Pettey. 2003. Effects of adding fiber sources to reduced-crude protein, amino acid-supplemented diets on nitrogen excretion, growth performance, and carcass traits of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 81:492–502.
- Stahly, T. S., G. L. Cromwell., and H. J. Monegue. 1980. Effects of the dietary inclusion of copper and antibiotics on the performance of weaning pigs. *J. Anim. Sci.* 51:1347–1352.
- Stansbury, W. F., L. F. Tribble., and D. E. Orr. 1990. Effect of chelated copper sources on performance of nursery and growing pigs. *J. Anim. Sci.* 68:1318–1322.
- Streyl K., J. Carlstron, E. Dantos, R. Mendoza, J. A. T. Islas, and C. Bhushan. 2015. Field evaluation of

the effectiveness of an oral toltrazuril and iron combination in maintaining weaning weight by preventing coccidiosis and anaemia in neonatal piglets. *Parasitol. Res.* 114:193–200.

- Sun, J. 2018. Rabobank. RaboResearch. Food&Agribusiness. China's New Feed Standards May Bring Radical Changes to Soybeans, Feed, and Livestock-Farming. Accessed Oct. 2021. <https://research.rabobank.com/far/en/sectors/farm-inputs/china-s-new-feed-standards.html>.
- Taheri, H. R., A. Heidari, M. H. Shahir. 2015. Effect of high-dose phytase supplementation in broilers from 22 to 42 days post-hatch given diets severely limited in available phosphorus. *Br. Poult. Sci.* 56:330–336.
- Toledo, J. B., A. C. Furlan, P. C. Pozza, J. Carraro, G. Moresco, S. L. Ferreira, and A. G. Gallego. 2014b. Reduction of the crude protein content of diets supplemented with essential amino acids for piglets weighing 15 to 30 kilograms. *Rev. Bras. Zootec.* 43:301–309.
- Toledo, J. B., A. Furlan, P. Pozza, L. Piano, P. Carvalho, L. Peñuela-Sierra, and L. Huepa. 2014a. Effect of the reduction of the crude protein content of diets supplemented with essential amino acids on the performance of piglets weighing 6 - 15 kg. *Livest. Sci.* 168:94–101.
- Tsai, T. C., R. Dove, M. R. Bedford, and M. J. Azain. 2020. Effect of phytase on phosphorus balance in 20-kg barrows fed low or adequate phosphorus diets. *Anim. Nutr.* 6:9–15.
- Ullrich, C., M. Langeheine, R. Brehm, V. Taube, D. Siebert, and C. Visscher. 2018. Influence of reduced protein content in complete diets with a consistent arginine - lysine ratio on performance and nitrogen excretion in broilers. *Sustainability* 10:3827.
- Underwood, E. J. 1977. Trace elements in human and animal nutrition. 4th ed. NewYork: Academic.
- USDA. 2021. Nutrient Management Technical Note. United States Department of Agriculture 190:NM-8.
- Valaja, J., and H. Siljander-Rasi. 1998. Effect of dietary crude protein and energy content on nitrogen utilisation, water intake and urinary output in growing pigs. *Agric. Food Sci.* 7:381–390.
- Veum, T. L., D. R. Ledoux, M. C. Shannon, and V. Raboy. 2009. Effect of graded levels of iron, zinc, and copper supplementation in diets with low-phytate or normal barley on growth performance, bone characteristics, hematocrit volume, and zinc and copper balance of young swine. *J. Anim. Sci.* 87:2625–2634.
- Vertago. 2019. Zincoret® S: low environmental impact microencapsulated zinc oxide for pigs. <https://www.vetagro.com/prodotto/zincoret-s/>
- Veum, T., M. Carlson, C. Wu, D. Bollinger, and M. R. Ellersieck. 2004. Copper proteinate in weanling pig diets for enhancing growth performance and reducing fecal copper excretion compared with copper sulfate. *J. Anim. Sci.* 82:1062–1070.
- Villagómez Estrada, S., J. F. Pérez, S. van Kuijk, D. Melo Durán, R. Karimirad, and D. Solà-Oriol. 2020. Effects of two zinc supplementation levels and two zinc and copper sources with different solubility characteristics on the growth performance, carcass characteristics and digestibility of

- growing finishing pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 105:59–71.
- Walk, C. L., P. Wilcock, and E. Magowan. 2015. Evaluation of the effects of pharmacological zinc oxide and phosphorus source on weaned piglet growth performance, plasma minerals and mineral digestibility. *Animals* 9:1145–1152.
- Wealleans, A. L., R. M. Bold, Y. Dersjant-Li, and A. Awati. 2015. The addition of a *Buttiauxella* sp. phytase to lactating sow diets deficient in phosphorus and calcium reduces weight loss and improves nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 93:5283–5290.
- Woyengo, T. A., B. A. Slominski, and R. O. Jones. 2010. Growth performance and nutrient utilization of broiler chickens fed diets supplemented with phytase alone or in combination with citric acid and multcarbohydrase. *Poult. Sci.* 89:2221–2229.
- Wu, F., M. D. Tokach, S. S. Drits, J. C. Woodworth, J. M. DeRouchey, R. D. Goodband, M. A. D. Goncalves, and J. R. Bergstrom. 2018. Effects of dietary calcium to phosphorus ratio and addition of phytase on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 96:1825–1837.
- Yan, F., J. H. Kersey, C. A. Fritts, and P. W. Waldroup. 2003. Phosphorus requirements of broiler chicks six to nine weeks of age as influenced by phytase supplementation. *Poult. Sci.* 82:294–300.
- Yen, F. T. P. 2015. Impact of dietary calcium and phosphorus on sow reproductive performance and bone development in piglets. Ph.D Dissertation. University of Saskatchewan, Canada.
- Yiming, Z., Zhou, J., Dong, Z., Li, G., Wang, J., Li, Y., Wan, D., Yang, H., and Yin, Y. 2019. Effect of Dietary Copper on Intestinal Microbiota and Antimicrobial Resistance Profiles of *Escherichia coli* in Weaned Piglets. *Frontiers in microbiology.* 10:2808.
- Yin, J., X. Li, D. Li, T. Yue, Q. Fang, J. Ni, X. Zhou, and G. Wu. 2009. Dietary supplementation with zinc oxide stimulates ghrelin secretion from the stomach of young pigs. *J. Nutr. Biochem.* 20:783–790.
- Young, L. G., Leunissen, M. and Atkinson, J. L. 1993. Addition of microbial phytase to diets of young pigs. *J. Anim. Sci.* 71(8):2147–2150.
- Zhang, F., W. Zheng., R. Guo., and W. Yao. 2017. Effect of dietary copper level on the gut microbiota and its correlation with serum inflammatory cytokines in Sprague–Dawley rats. *J. Microbiol.* 55:694–702.
- Zhang Y, Ward TL, Ji F, Peng C, Zhu L, Gong L, Dong B. 2018. Effects of zinc sources and levels of zinc amino acid complex on growth performance, hematological and biochemical parameters in weanling pigs. *Asian–Australasian journal of animal sciences.* 31:1267.
- Zhao, Y., G. Tian, D. Chen, P. Zheng, J. Yu, J. He, X. Mao, Z. Huang, Y. Luo, J. Luo, and B. Yu. 2019. Effect of different dietary protein levels and amino acids supplementation patterns on growth performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10:75.