

완결과제 최종보고서

일반과제(○), 보안과제()

(과제번호 : PJ010146)

국가 온실가스 데이터 확충용 양돈시설 유래 CH₄과 N₂O 배출량 조사

(Quantification of CH₄ and N₂O emissions from swine facilities for national greenhouse gas data expansion)

강원대학교

연구수행기간

2014.02 ~ 2016.12

농촌진흥청

제 출 문

농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “국가 온실가스 데이터 확충용 양돈시설 유래 CH_4 과 N_2O 배출량 조사”
(개발기간 : 2014. 02. ~ 2016. 12.) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

제1세부연구과제 : 권역 및 계절별 양돈시설 유래 CH_4 과 N_2O 배출량 조사
제1협동연구과제 : 양돈 관련 축산시설의 온실가스 배출특성 연구

2017 . 02. .

제1세부 연구기관명 : 강원대학교

제1세부 연구책임자 : 박규현

참여연구원 : 박준용, 김진경, 지은숙, 윤정임, 천시내

제1협동 연구기관명 : 농촌진흥청 국립축산과학원

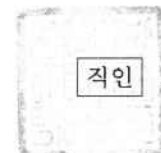
제1협동 연구책임자 : 김민석

참여연구원 : 양승학, 오영균, 백열창

주관연구책임자 : 박 규 현



주관연구기관장 : 강원대학교 산학협력단장



농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업 운영규정 제51조에 따라 보고서
열람에 동의합니다.

* 반드시 기관장 직인을 받아서 스캔 첨부

보고서 요약서

과제번호	PJ010146		연구기간	2014. 02. 01. ~ 2016. 12. 31.	
연구사업명	단위사업명	농업공동연구			
	세부사업명	농업기후변화대응체계구축			
	내역사업명	농업분야기후변화대응기술개발			
연구과제명	주관과제명	권역 및 계절별 양돈시설 유래 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 조사			
	세부(협동) 과제명	(1세부) 권역 및 계절별 양돈시설 유래 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 조사 (1협동) 양돈 관련 축산시설의 온실가스 배출 특성 연구			
연구책임자	구분	연구기관		소속	성명
	1세부	강원대학교		동물생명과학대학	박규현
	1협동	농촌진흥청 국립축산과학원		영양생리팀	김민석
총 연구기간 참여 연구원 수	총: 15 명 내부: 10 명 외부: 5 명		총 연구개발비	정부: 810,000 천원 민간: - 천원 계: 810,000 천원	
위탁연구기관명 및 연구책임자	디에스과학 이 경		참여기업명		
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
요약				보고서 면수	
우리나라 가축분뇨 저장시설에서의 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 및 그 특성, 그리고 IPCC 가이드라인에 따른 축산부문 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 및 가축분뇨 내 혐기미생물 다양성을 분석했음.				106	

〈 국 문 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 권역 및 계절별 양돈시설, 가축분뇨 자원화 공동처리시설 유래 CH₄, N₂O 배출량 데이터 확보 ○ 정책 변화, 기술 발전의 영향을 예측하여 온실가스 감축 효율성 증대 방안 제시
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경기, 강원, 충청, 전라, 경상 지역의 양돈시설, 그리고 가축분뇨 자원화 공동처리시설 CH₄, N₂O 배출량 데이터 확보 ○ 우리나라 양돈분뇨 저장시설에서의 CH₄ 배출량 <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 1996년 가이드라인 Tier 1에 비해 2006년 가이드라인 Tier 1은 2.67배 높았음 - IPCC 1996년 가이드라인 Tier 1에 비해 가축분뇨 VS를 이용하는 1996년 가이드라인 Tier 2는 0.43~1.99배였음 - IPCC 1996년 가이드라인 Tier 1에 대한 실측값의 비는 0.44~1.89이었음 - 가축분뇨 VS를 이용하는 1996년 가이드라인 Tier 2에 비해 실측값의 비는 0.23~0.96이었음 ○ 우리나라 가축분뇨 저장시설에서의 N₂O 배출량 <ul style="list-style-type: none"> - 일반적으로 N₂O 배출량은 미미하였으며, 무시할 수 있었음 ○ 바이오가스 생산 가축분뇨 공공처리시설에서는 CH₄를 생산하여 이용하고 있으나, 바이오가스 생산시설에 투입 전 시설에서 CH₄과 N₂O 배출이 발생하였으며, N₂O 배출량이 CH₄ 배출량보다 현저히 높았음 <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 2006 가이드라인의 CH₄과 N₂O의 100년 기준 온난화지수(global warming potential)인 25와 298을 각각 적용한다면 CH₄과 N₂O의 이산화탄소 환산량은 각각 25.3 kg/일, 405.3 kg/일이었으므로 CH₄에 비해 N₂O의 영향이 16배 높은 것으로 나타났음 ○ IPCC 가이드라인 방법론 분석 및 적용방안 <ul style="list-style-type: none"> - 메탄 배출계수 값은 1996 IPCC 지침보다 2006 IPCC 지침에서 더 높았음 - 가축분뇨 내 질소량 값은 1996 IPCC 지침보다 2006 IPCC 지침에서 더 낮았음 - 1996 IPCC 메탄 배출계수 기본값은 3이었고, 국가고유 돼지 VS값(1.25)을 적용하여 도출된 메탄 배출계수는 액비화시설 3.5이고 퇴비화 시설은 1.6이었음 ○ 온실가스 감축 효율성 증대방안을 반영하여 향후 온실가스 배출특성 변화 <ul style="list-style-type: none"> - 가축분뇨 에너지화 시설 이용했을 때, 에너지 시설을 이용하지 않을 경우 산출된 배출량의 30% 수준으로 감소가 예상됨 - 가축분뇨 자원화 시설 이용했을 때, 자원화 시설을 이용하지

	<p>않을 경우 산출된 배출량의 35% 수준으로 감소가 예상됨</p> <p>○ 가축분뇨 내 혐기미생물 다양성 분석</p> <p>- Bacteroidetes, Firmicutes, Proteobacteria가 가축분뇨 내에서 우점하였음</p> <p>- 폭기 처리를 하였을 때 Bacteroidetes가 감소하였음</p>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<p>○ 축산부문 온실가스 국가 보고서를 Tier 2 방법으로 작성</p> <p>○ 온실가스 배출량 산정의 정확도 향상 및 고도화</p> <p>○ 저탄소 축산물 산정에 이용</p> <p>○ 향후 양돈 축산시설 발전에 따른 온실가스 배출특성변화 예측</p>				
중심어 (5개 이내)	기후변화	온실가스	메탄	아산화질소	양돈

〈 Summary 〉

Purpose& Contents	<ul style="list-style-type: none"> ○ Collecting regional and seasonal CH₄ and N₂O emissions from swine facilities and centralized animal manure recycling facilities ○ Suggestion of plans to improve the efficiency of greenhouse gas mitigation
Results	<ul style="list-style-type: none"> ○ Collecting regional and seasonal CH₄ and N₂O emissions from swine facilities and centralized animal manure recycling facility from Gyeonggi, Kangwon, Chungcheong, Jeolla, and Gyeongsang ○ CH₄ emissions from swine slurry storage facilities <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 1996 Guideline Tier 1 method showed 2.67 times higher CH₄ emissions compared to 2006 Guideline Tier 1 - The ratio of IPCC 1996 Guideline Tier 2 method to 1996 Guideline Tier 1 were 0.43~1.99 - The ratio of field measurement to 1996 Guideline Tier 1 were 0.43~1.99 - The ratio of field measurement to IPCC 1996 Guideline Tier 2 method using VS were 0.23~0.96 ○ N₂O emissions from swine slurry storage facilities <ul style="list-style-type: none"> - General N₂O emissions were detected but negligible ○ Centralized animal manure recycling facility focused on CH₄ production emitted CH₄ and N₂O from related facilities rather than biogas reactors. Also N₂O emissions was much higher than CH₄ emissions <ul style="list-style-type: none"> - With the concept of global warming potential, which were 25 and 298 for CH₄ and N₂O, respectively, CO₂-equivalent of CH₄ and N₂O emissions were 25.3 kg/day and 405.3 kg/day(N₂O emissions were 16 times higher than CH₄ emissions) ○ Examination of methodology of IPCC guidelines for greenhouse gas inventories and its application <ul style="list-style-type: none"> - Methane emission factor was greater in 2006 IPCC than in 1996 IPCC - The N_{ex}(kg N/head/yr) value was lower in 2006 IPCC than 1996 IPCC - Methane emission factor in 1996 IPCC is 3 - Methane emission factors that were calculated using the country-specific swine VS value(1.25) are 3.5 for solid storage and drylot, and 1.6 for liquid system ○ Characteristics of greenhouse gas emissions based on improvement of the efficiency of greenhouse gas mitigation <ul style="list-style-type: none"> - The use of renewable energy from a manure digester plant is thought to reduce greenhouse emissions by 30%

	<ul style="list-style-type: none"> - The use of resource-recovery processes from livestock manure is thought to reduce greenhouse emissions by 35% ○ Investigation of microbial diversity in livestock manure <ul style="list-style-type: none"> - Bacteroidetes, Firmicutes and Proteobacteria were dominant phyla - The abundance of Bacteroidetes was reduced by aeration 				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ○ Using Tier 2 method for National Inventory Report for livestock sector ○ Improving and enhancing greenhouse gas emission evaluation ○ Low carbon livestock product evaluation ○ Prediction of the characteristics of greenhouse gas emissions based on development of livestock facilities 				
Keywords	climate change	greenhouse gas	CH ₄	N ₂ O	Swine

〈 목 차 〉

제 1 장	연구개발과제의개요	9
제 2 장	국내외 기술개발 현황	13
제 3 장	연구수행 내용 및 결과	13
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	94
제 5 장	연구결과의 활용계획 등	95
제 6 장	연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	95
제 7 장	연구개발성과의 보안등급	95
제 8 장	국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비현황	95
제 9 장	연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 .	95
제 10 장	연구개발과제의 대표적 연구실적	95
제 11 장	기타사항	99
제 12 장	참고문헌	100

제 1 장 연구 개발 과제의 개요

제1절 연구 개발 목적

현재 외국은 축산부문 온실가스 배출량 산정을 활발히 진행 중에 있으며, 일부 국가에서는 국내 각 지역의 지리 및 기후에 적합한 온실가스 배출 계수 및 산정 방법을 적용할 수 있도록 국가 데이터를 확충하며 산정 도구를 개발 중에 있다.

우리나라는 현재 축산부문 온실가스 배출량 산정을 위한 틀을 구축하였으나, 전국 각 지역의 축산부문 온실가스 배출량 파악이 미흡하며, 온실가스 배출량의 신뢰도를 높이기 위한 기본 데이터가 부족하다.

따라서 양돈부문 온실가스 배출량 계산에 사용할 국가고유자료 확보를 위한 연구가 필요하며, 이를 통해 아래와 같은 성과를 얻는 것을 목적으로 한다.

- 권역 및 계절별 양돈시설 유래 CH₄과 N₂O 배출량 데이터 확보
- 가축분뇨 자원화 공동처리시설 유래 유래 CH₄과 N₂O 배출량 데이터 확보
- 지속적 측정 및 조사를 통한 시계열 자료 확보

제2절 연구 개발의 필요성

1. 연구개발의 개요

2009년 12월 18일 덴마크 코펜하겐에서 열린 기후변화회의에서는 우리 정부의 녹색성장 정책기조 성명 및 기후변화 대응을 위한 각국의 행동을 촉구하였으며, 2020년까지 BAU 대비 30% 감축이라는 자발적 온실가스 감축 목표를 발표하였다. 매년 GDP의 2%를 녹색 기술개발 및 인프라 구축에 투입할 예정이다.

국가 목표인 2020년 온실가스 배출량 BAU 대비 30% 감축을 평가할 수 있는 온실가스 배출량에 대한 인벤토리 자료에 대한 요구가 증가하고 있다. 농업부문의 BAU 대비 5.2% 감축목표 달성을 위한 기본 자료가 필요하며, 축산(천CO₂환산톤) 분야에서는 가축 분뇨 에너지화(-163), 분뇨처리(-450), 장내발효(-188)가 있다. 2011년부터 저탄소 녹색성장 기본법에 따라 온실가스 에너지 목표관리제 시행되었으며, 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률에 따라 배출권거래제가 준비 중이다.

또한, 축산 각 부문의 정확한 구분 및 각 부문별 온실가스 배출량에 대한 정확한 평가 필요하다. 먼저, 온실가스 감축량 평가를 위해서는 온실가스 배출량에 대한 정확한 통계가 필요하며, 온실가스 배출량의 신뢰도를 높이기 위해서는(불확실성을 감소하기 위해서는) 온실가스 배출량에 대한 실측 자료가 필요하다. 국가 온실가스 배출량 산정은 국제기준(UNFCCC reporting guideline)에 적합해야 하며 작성에 있어 투명성, 완벽성, 일관성, 비교가능성, 정확성이 보장되어야 한다. 현재 UNFCCC에 제출할 국가 온실가스 배출량 계산에 국내 자료 부족으로 국가 고유 데이터를 사용하지 못하고 있으며, 우리나라 양

돈부문 CH_4 과 N_2O 배출량의 기본값 도출을 위해 원시자료(raw data)의 확보의 필요성이 증대되고 있다. 국내·외 환경 정책 수립을 위한 고유 데이터의 필요성도 증가하고 있다.

온실가스 국제 규제에 대응하기 위한 축산부문 기초 자료(활동도 데이터 등) 획득을 위한 장기적 연구와 우리나라 축산 현실에서 발생하는 온실가스 측정 시설 및 온실가스의 직접적·반복적 측정이 필요하다. 그리고 International Panel on Climate Change(IPCC)의 온실가스 배출량 간접 계산법과 축산 현장에서 직접 측정한 값을 비교하여 IPCC 방법의 국내 적용 가능성 탐색 및 국가 고유 자료 획득이 필요하며, 우리나라 축산 현장의 온실가스 배출량 실시간 지속 측정 가능한 시스템도 필요하다. 또한, 국가 온실가스 배출량 산정 방법의 고도화 진행이 필요하다. 현재 사용하는 1996 IPCC guideline의 Tier 1에서 Tier 2 방식으로의 고도화와 향후 2006 IPCC guideline 적용에 대비한 국내 산정체계 개선이 필요하다.

2. 연구개발 대상 기술의 국내외 현황

가. 국내 기술 수준 및 시장 현황

국내에서는 국립축산과학원이 중심이 되어 온실가스 인벤토리 연구를 추진하였으며, 축산부문 온실가스 배출계수 관련 연구(축산부문 온실가스 배출계수 개발 및 배출량 평가, '09~'13)를 최초로 시작하여 연구 기본 틀을 설정하였다. 또한, 온실가스 배출량 계산을 위해 전과정평가 기술을 이용한 기초 모델 개발(축산부문 탄소이력추적 기반구축 연구, '10~'12) 수행으로 배출단위에 대한 평가체계 기본 틀을 제시하였다. 그러나 지역별, 축종별, 가축분뇨처리시스템별 온실가스 배출량 측정이 진행되지 않았으며, 연구시설 및 연구인원의 부족으로 전국적 측정이 시도되지 못하였다.

나. 국외 기술 수준 및 시장 현황

축산 선진국(유럽, 미국, 호주, 뉴질랜드 등)은 각국의 온실가스 배출량 평가를 지속적으로 수행하고 있으며, IPCC는 미국, 캐나다, 호주, 유럽 등 축산 선진국들의 자료를 이용하여 온실가스 배출량 평가를 위한 지침서를 만들어 국가 온실가스배출량 보고서 작성에 적용하고 있다. IPCC 가이드라인을 이용하여 우리나라의 축산 현장의 온실가스 배출량을 반영하는데 한계가 있다.

제3절 연구 개발 범위

1. 양돈 시설에서의 온실가스 배출량 측정 및 DB화

○ 지역별 양돈시설 설정

2006 IPCC 가이드라인에 따르면 연평균 온도 1℃ 차이로 가축분뇨 처리시설의 온실가스 배출량이 변화하는 것으로 default값이 정해지므로, 지역별 연평균 온도 차이를 반영하고, 가능하다면 하나의 농장에서 다양한 측정이 가능한 일관사육 농장을 측정 사이트로 선발한다.

○ 온실가스 지속 측정방법 설정

준(準) 연속적(quasi-continuous) 측정을 위해, 분석기기 및 샘플링 방법을 설정하고 분석기기 보호, 안정적 전원 공급, 지속적 샘플링을 위한 사이트별 대책을 마련한다.

2. 가축분뇨 자원화 공동처리시설 유래 온실가스 배출량 측정 및 DB화

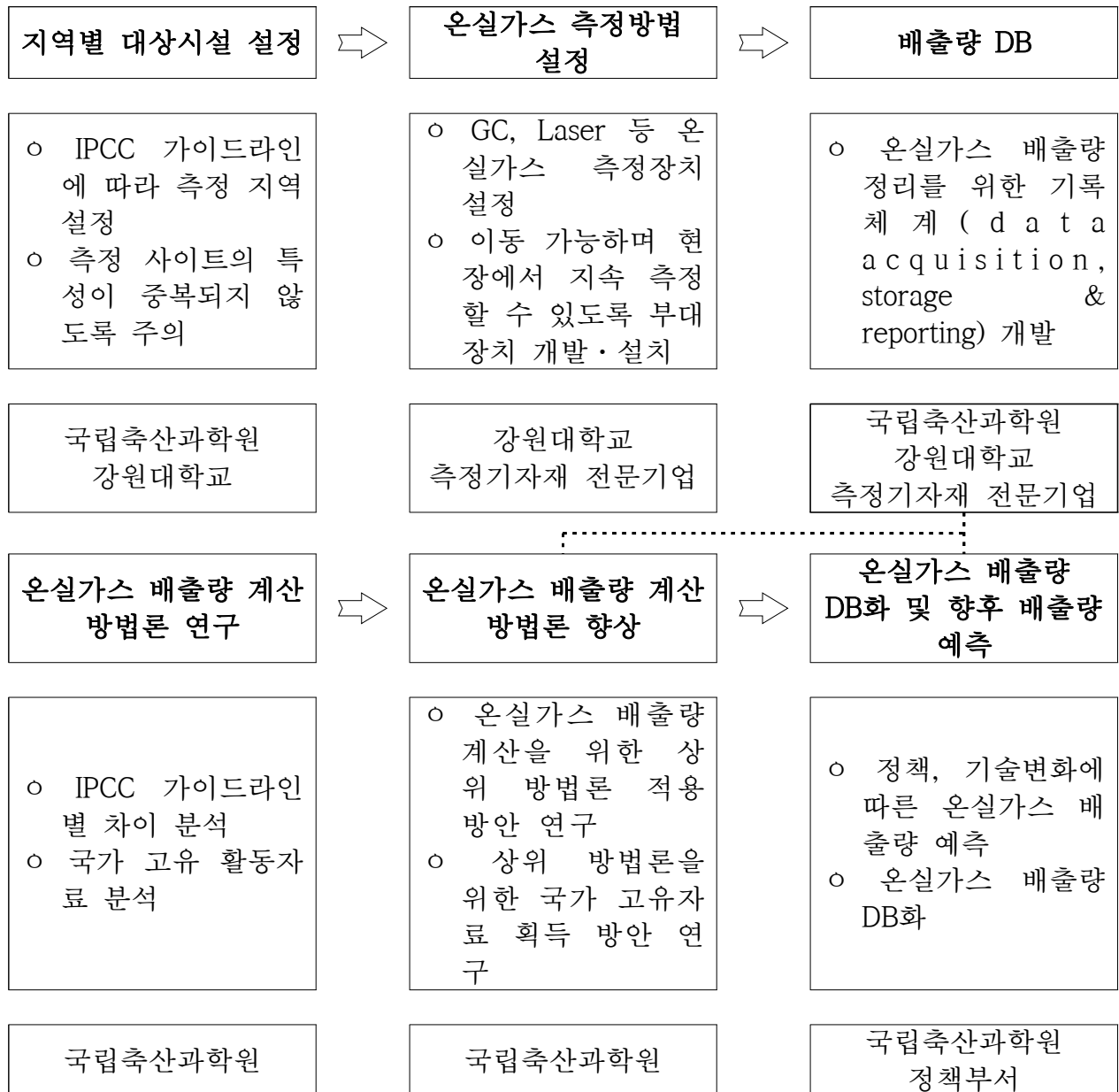
○ 자원화 과정의 온실가스 배출량

퇴·액비 생산시설의 온실가스 배출량 측정을 위한 사이트와 준(準) 연속적(quasi-continuous) 측정을 위한 분석기기 및 샘플링 방법을 설정하고, 분석기기 보호, 안정적 전원 공급, 지속적 샘플링을 위한 사이트별 대책을 마련한다.

3. 가축분뇨의 이화학적 분석

○ IPCC 가이드라인에서는 가축분뇨의 VS, 질소를 이용한 계산법 사용

국내 축종별, 성장단계별, 처리시설별 VS와 질소량에 대한 자료가 부족하므로 분석 후 DB화한다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

□ 가축분뇨 처리과정 (농촌진흥청, 2013)

가축분뇨 처리과정에서 배출되는 CH₄과 N₂O 배출량 계산을 위한 배출계수 관련 연구는 농촌진흥청의 연구 과제를 통해서 실측하는 방법으로 수행하고 있다. 가축분뇨 처리과정의 온실가스 배출량 계산을 위해서는 배출계수 계산을 위한 다양한 활동자료가 필요하기 때문에 우선 활동자료 수집에 중심을 두었으며 배출량은 직접 측정을 하였다. 한우와 젖소의 깔짚에서 배출되는 CH₄과 N₂O의 경우에 축사 면적을 기준으로 하여 보고하였다.

한우와 젖소의 깔짚에서 배출되는 CH₄, N₂O 배출량 측정 결과(현장시험)

축종		CH ₄		N ₂ O		
		단위면적당 일일배출량 (mg/m ² /day)	가축두당 배출계수 (g/head/yr)	단위면적당 일일배출량 (mg/m ² /day)	가축두당 배출계수 (g/head/yr)	배출량 (kg N ₂ O-N/ kg N)
한우	1	0.1913	0.9774	16.0832	82.1851	0.00127
	2	0.0836	0.4270	24.2389	123.8605	0.00191
	3	0.6074	3.1036	38.7413	197.9681	0.00305
	평균	0.2941	1.5027	26.3545	134.6712	0.0021
젖소	1	0.1195	1.8934	15.5551	246.4076	0.00087
	2	0.1234	1.9543	15.6066	247.2248	0.00087
	3	0.3616	5.7281	33.5756	531.8718	0.00188
	평균	0.2015	3.1919	21.5791	341.8347	0.0012

제 3 장 연구 수행 내용 및 결과

제1절 기후변화와 축산

세계 곳곳에서 기후변화에 따른 심각한 피해가 동시다발적으로 발생함에 따라 기후변화에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 오세아니아에 있는 몰디브와 투발루는 기후변화로 인한 해수면 상승으로 바다 속에 잠길 위험에 놓여있다. 기상청 홈페이지의 내용을 살펴보면 기후변화는 다양한 원인에 의해 현재의 기후체계가 점차 변화하는 것을 말하는데, 그 원인은 자연적 요인과 인위적 요인으로 나눌 수 있다. 자연적 요인은 대기가 다른 기후시스템과의 상호작용에 의해 변화하는 내적 요인과 화산 분화에 의한 성층권의 에어로졸 증가, 태양 활동의 변화, 태양과 지구의 천문학적 상대위치 관계 등의 외적 요인으로 구분된다. 인위적 요인은 강화된 온실효과, 산업화에 의한 에어로졸의 효과, 토지 피복의 변화, 삼림 파괴 등이 있다.

IPCC 4차 평가보고서에 의하면 지구 평균 온도가 1.5~2.5℃ 상승하면 동물 및 식물종의 약 20~30%가 멸종할 위기에 직면하고 생물다양성의 25%가 멸종할 것으로 예상하였다 (Lee, 2013; IPCC, 2007). 우리나라도 이러한 기후변화의 영향에서 예외가 아니며 오히려

려 지구 평균보다 더 큰 영향을 받고 있다(KMA, 2010). 1906년부터 2005년 사이의 지구 평균 온도는 0.74℃ 상승한 반면(IPCC, 2007), 1912년부터 2008년 사이의 국내 평균 온도는 지구 평균의 2배 이상인 1.7℃ 상승하였다(Kwon, 2005). 평균 기온의 상승은 지구온난화를 발생시키고 이에 따라 남극 빙산이 해빙되어 결국 해수면의 상승을 초래하고 있다. 1999년부터 2008년까지의 최근 10년간 제주 부근의 평균 해수면 상승률은 연평균 약 7.2 mm으로(KHOA, 2009) 이는 1993년부터 2003년까지의 전세계 연평균 해수면 상승률인 3.1 mm의 2배가 넘었다(IPCC, 2007). 강수량의 변화는 증가 추세를 보이며 그 빈도와 발생강도가 이전과 비교했을 때 극심하게 변하는 경향을 지닌다. 1971년부터 2007년까지 국내 주요 도시의 평균 강수량은 연평균 105 mm에서 121 mm로 약 15% 증가했다(AU, 2007).

기후변화는 특히 환경의존도가 높은 1차 산업에 직접적인 영향을 미친다(Gu, 2009). 영국의 경우 기후변화만 고려된 연구에서 작물 대부분의 수량이 감소하였고 이산화탄소가 대기 중에 증가했을 때에는 작물 모두의 수량이 증가하였다(Downing et al., 2003). 캐나다의 경우 이산화탄소 농도가 배가 될 때 알버타 지역에서 옥수수과 소맥의 생산량이 21~124% 증가할 것이고(McGinn et al., 1999) 퀘벡 지역에서 옥수수와 사탕수수 생산량은 20% 증가하며 콩과 소맥 생산량은 20~30% 감소할 것으로 연구되었다(Singh et al., 1998). 호주의 경우 2002년 3월부터 10월까지 8개월간 호주대륙의 약 70% 지역의 강수량이 1900년 동일 시기의 강수량의 최저 10%에 달하는 대가물을 경험하였고 2002년 겨울과 봄에 호주 전역 평균 최대 기온이 가장 높았다. 이 시기(2002년 3월)에 호주 4대 작물인 소맥, 보리, 카놀라, 루핀의 생산량은 14.8 백만 ton으로 2001년 3월의 생산량인 34.1 백만 ton에서 57% 감소하였다(Passey, 2003). 따라서 향후 기후변화가 더욱 가속화되면서 국가의 기반이 되는 농업, 수산업, 임업 등 1차 산업의 취약점을 파악하고 그 영향을 최소화하여 피해를 줄일 수 있는 방안이 필요하다.

1950년부터 1993년 사이 밤 평균 온도는 10년당 0.2℃ 상승하였는데 이는 낮 평균 온도보다 2배 많은 상승률로써(IPCC, 2001), 이는 일교차가 점차 줄어들고 있으며 여름에 열대야의 발생가능성이 높다는 것을 시사하고 있다. 따라서 축산부문에서는 축사 환경 조절을 위한 에너지 사용량이 증가될 수 있다. ‘교토 의정서 이행에 따른 농업부문 대응전략’ 보고서(Kim et al., 2007)에 따르면, 온실가스 감축을 위해 탄소세를 부과할 경우 우리나라는 화석에너지 의존도가 높은 시설 원예와 축산업의 경영비가 크게 상승할 것이라고 분석하였고 특히 축산부문은 비육돈 6.7%, 산란계 6.4%, 번식우 6.2%, 젖소 4.0%, 비육우 3.2%의 경영비 상승이 나타날 것이라고 예상하였다.

FAO(2008)의 식품안전분야영향보고서에 따르면 혹한, 가뭄, 다습, 고온 등의 환경 스트레스에 따라 동물의 질병감수성도 증가한다. 기후변화는 매개체와 보균체의 범위, 개체수를 증가시켜 가축 건강에 위협이 된다.

1. 기후변화와 사료

기후변화에 따른 강수량 변화는 사료작물 및 목초 생산에 영향을 주어 궁극적으로 가

축의 사료 생산에 영향을 미친다(Hisas, 2011). Fig. 1과 같이 2010년 하반기 이후 국제 곡물 시장은 전 세계적인 이상기후로 인하여 곡물생산량이 감소하고 중국과 인도의 경제 성장에 따른 식량 및 사료 수요 증가로 국제 곡물 수급 불균형이 빈번하게 발생하고 있으며 이는 국제 곡물 가격 상승에 반영되며(Seung and Han, 2011; Sung, 2012) 이는 국내 배합 사료 가격 인상으로 연결된다.

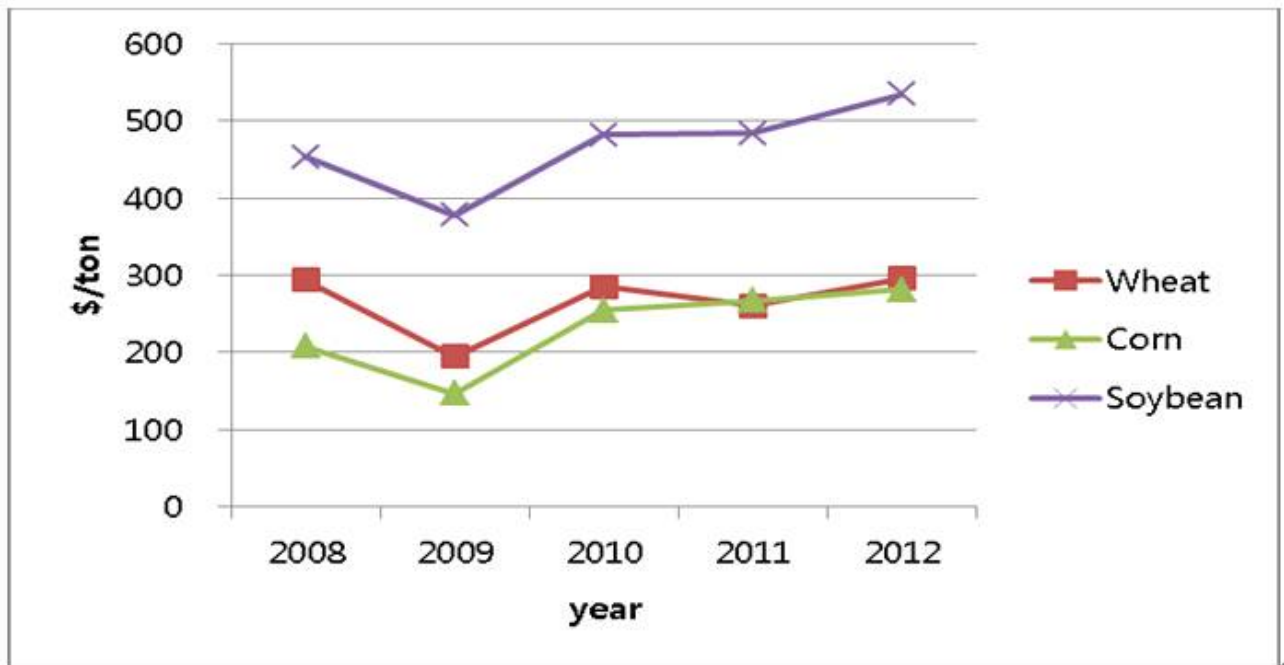


Fig. 1. 국제 곡물가격 (adapted from Seung and Han (2011) and Sung (2013)).

국제유가의 상승과 대체 에너지의 수요 증가는 바이오 수요를 증가시키고 있다. 2011년 세계 바이오 에탄올 소비량은 1,009 억 리터로 전년보다 8.5% 증가하고 바이오 디젤 소비량은 228 억 리터로 전년보다 12.0% 증가할 것으로 예상되었다(Van Dijk et al., 2010). 이는 세계 곡물 수요를 증가시키고 그 가격 또한 상승시킬 것으로 예상된다. 이와 같이 점차 증가하는 바이오 에너지 소비량은 바이오 에너지 생산용 작물 요구량을 증가시키고 이에 따라 가축의 사료원료와 경쟁 관계를 형성하고 있다. 또한 기후변화에 따라 생태계의 변화가 생기고 사료의 종류에 변화를 가져오게 된다. 이에 따른 영향은 기업규모의 농장보다는 소규모 농장에서 더 큰 영향을 받게 된다. 서리가 끼거나 기후가 건조화되는 지역에서는 옥수수보다 저항력이 더 큰 혼합 작물 시스템으로 바뀌게 된다(Sietz et al., 2012). 따라서 사료작물 이용을 변화시켜야 할 필요가 있다.

2. 기후변화와 축산 생산성

Kim(2013)의 조사에 따르면, 2013년 3월 호주의 우유 생산량은 661,870 만 리터로 전년 동월 대비 7.1% 감소하였는데 그 이유로 여름의 고온 건조한 기후 정도가 증가하여 젖소가 받는 스트레스가 예년보다 많고 방목 환경의 악화를 들었다. 뉴질랜드의 연간 원유 생산량은 2012년과 2013년을 비교했을 때 기후 변화에 따라 약 2% 감소하였다.

2013년 1월 원유생산량은 전년 대비 증가세를 유지했으나 50여년 만에 최악으로 기록된 가뭄이 2012년 말부터 2013년 초까지 발생하여 2012년 12월 북부지역을 시작으로 2013년 2,3월 남부지역에 이르기까지 원유 생산에 영향을 미쳤다고 분석하였다.

Table 1.에서 보면 온도 및 습도 변화에 따른 사료섭취량과 우유 생산량에 대한 영향을 635 kg 젖소를 대상으로 Cornell Net Carbohydrate and Protein System(CNCPS)를 통해 평가하였다. 실험 3, 4를 비교할 때 밤 온도 상승은 다른 요인들의 상관관계보다 사료 섭취량과 우유 생산량 감소에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. 사료섭취율과 우유 생산량에 온도와 습도가 미치는 영향 (adapted from Chase, 2006).

No.	Day temperature (°C)	Night temperature (°C)	Humidity (%)	Maintenance energy (Mcal)	DMI (kg)	ME milk (kg)	MP milk (kg)
1	15.5	10	50	16.38	48.8	38.7	37.1
2	32.2	15.5	50	18.27	47.2	35.3	35.8
3	32.2	15.5	70	19.95	46.6	33.2	35.3
4	32.2	23.9	70	19.95	39.8	26.2	29.7

DMI : Dry Matter Intakes

ME : Milk production calculated from metabolic energy

MP : Milk production calculated from metabolic protein

3. 기후변화와 가축의 건강

온도 상승으로 인하여 질병 원인 곤충의 서식처가 고산 지역, 고위도 지역으로 퍼져감에 따라 말라리아, 진드기에 의한 질병 등이 그 지역에서 발생하며 발생 기간 또한 길어지고 수면병, 청설병 등 지역적 매개체 전파질환이 범 지구적으로 퍼질 가능성도 있다(Woolhouse, 2011; Thornton and Gerber, 2010). 영국에서는 온도 상승으로 기생충병의 계절적, 지역적 발생이 증가한다고 보고되었다(Van Dijk et al., 2010). 호주에서는 기후변화의 영향으로 지구온난화가 일어나면 소 진드기의 월동이 빨라져 진드기 매개질환이 증가하여 육우 산업에 영향을 줄 것이라고 연구되었다(White et al., 2003). 강수량 및 강수 강도 변화 역시 습도에 영향을 주기 때문에 질병의 발생에 큰 영향을 미치고 질병 발생 장소와 기간에도 영향을 준다. 기생충 감염의 경우 온도와 습도에 의한 영향이 크기 때문에 오랜 시간 그 지역의 기후 조건에 알맞게 적응한 가축에 새로운 감염원이 나타날 수 있다.

기후변화와 관련된 동물전염병은 매개체 전염병, 수인성 전염병, 식품 매개 전염병, 기타 전염병 등의 4가지로 나눌 수 있다(Lee, 2010). 매개체 전염병(Vector borne diseases)은 모기 매개에 의한 말라리아, 뎅기열, 일본뇌염, 웨스트나일 등과 진드기 매개에 의한 라임병, 아나플라스마, 에를리키아, 타일레리아, 바베시아, 야토병, 리슈만편모충, 찌르가무시, 큐열 등이 있다. 온도 상승으로 인하여 모기와 진드기의 발생이 증

가하고 이에 따라 매개체 전염병도 발병율이 늘고 있다. 수인성 전염병(Water borne diseases)은 콜레라, 이질 등이 있는데, 온도 상승과 강수량 증가에 따라 식품의 보관상에 문제가 생길 가능성이 많고 집단급식을 주로 하는 학교와 관공서 등에서 주로 발병한다. 식품 매개 전염병(Food borne diseases)은 살모넬라, 장출혈성대장균 O157, 캄피로박터, 황색포도상구균 등이 있으며 기타 전염병은 설치류 매개에 의한 렙토스피라병, 페스트, 바토넬라, 신증후군출혈열 등과 철새 및 야생동물에 의한 조류 인플루엔자, 광견병 등, 그리고 토양(홍수)에 의한 탄저, 보툴리눔 등이 있다. 농림축산식품부의 자료에 따르면, 국내 가축전염병으로 인한 경제적 피해사항은 2003년부터 2007년까지 9,900 억원이 지출된 것으로 나타났다.

온도상승은 가축의 사망률을 상승시킬 것으로 예상된다(Thornton and Gerber, 2010). Chae(2010)의 보고서에 의하면 2008년 7월 폭염에 의하여 경북 21,300여 마리, 강원 4,700여 마리, 충북 5,100여 마리의 닭이 폐사한 것으로 비공식 집계됐는데 폭염에 의한 가축 폐사의 경우 보상기준이 없어 농가에서 신고하지 않는 경우가 많고 지자체의 관리 감독을 받지 않는다고 한다.

Van Dijk et al.(2010)는 열 스트레스가 젖소에 미치는 영향을 연구하였다(Table 2). 가축이 열 발산을 통해 체온을 유지할 수 없을 경우 열 스트레스를 받게 되는데 열 스트레스는 온도, 습도, 복사에너지 등에 영향을 받는다. 열 스트레스는 THI를 사용하여 정량화할 수 있다. 열 스트레스는 THI 지수가 72를 넘어가면서부터 발생하고 THI 지수가 점점 올라감에 따라 젖소는 호흡이 가빠지고 우유 생산과 번식 활동이 급격히 감소함을 알 수 있다.

Table 2. 열 스트레스가 젖소에 미치는 영향 (adapted from Van Dijk et al., 2010).

THI	Stress level	Impacts
<72	None	
72-79	Mild	Dairy cows will adjust by seeking shade, increasing respiration rate and dilation of the blood vessels. The effect on milk production will be minimal.
80-89	Moderate	Both saliva production and respiration rate will increase. Feed intake may be depressed and water consumption will increase. There will be an increase in body temperature. Milk production and reproduction will be decreased.
90-98	Severe	Cows will become very uncomfortable due to high body temperature, rapid respiration (panting) and excessive saliva production. Milk production and reproduction will be markedly decreased.
>98	Danger	Potential cow deaths can occur

기후변화, 생물다양성, 사육방법의 변화

기후변화는 생물 종 및 자연 환경을 변화시킬 가능성이 매우 높고 이에 따라 생물다양성 분야에도 영향을 미친다. 여러 지역에서 세계화로 인하여 농업의 유전적, 문화적 다양성이 크게 손실되고 있으며(Ehrenfeld, 2005), 산업혁명 이후 지구 평균온도가 2.5℃ 증가할 경우 식물 종과 동물 종의 20~30%가 멸종할 위험에 처하게 된다(IPCC, 2007). 즉 생태계와 종은 기후변화에 취약성을 갖고 있으며(Thornton et al., 2007) 희귀 품종은 기후변화와 전염병에 의해 멸종할 위험이 크다. 따라서 축산 부문에서는 사료작물과 가축 종의 변화를 가져 올 가능성이 크다. 이에 대응하기 위해서는 축산 부문에서의 생물다양성을 높이고 기후변화에 강한 종을 육성할 수 있어야 한다. 또한 다양한 사료작물과 목초를 재배하여 예측 불가능한 기후변화에 대비하고 가축 품종의 다양성을 확보하여 식량 수급 불안정을 준비할 필요가 있다.

Thornton and Gerber(2010)은 개발 도상국에서 축산에 미치는 기후변화의 직·간접적인 영향을 요약하였다(Table 3). 비 방목 시스템에서 사육 환경을 제어하고 가축을 축사시설 내에 사육하는 방법을 통해 기후변화의 직접적인 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 비록 물 가용성의 감소가 예상되지만 농장관리를 통해 피해를 줄일 수 있으므로 방목 시스템에 비해 기후변화에 의한 영향은 적을 수 있다.

Table 3. 열대지방에서 기후변화가 직·간접적으로 미치는 영향 (adapted from Thornton and Gerber, 2010).

Category	Grazing systems	Non-grazing systems
Direct impacts	<ul style="list-style-type: none"> - Water availability - Extreme weather events - Drought and floods - Productivity changes due to temperature increases and rainfall shifts 	<ul style="list-style-type: none"> - Water availability - Extreme weather events
Indirect impacts	<p>Agro-ecological changes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fodder quality and quantity - Host-pathogen interactions - Disease epidemics 	<ul style="list-style-type: none"> - Increased resource price (e.g. feed and energy) - Disease epidemics - Increased cost of animal housing (e.g. cooling systems)

제2절 축산부문 온실가스 배출특성 분석

우리나라의 농업 부문의 온실가스 배출량은 경종부문과 축산부문으로 구분하여 보고하고 있다. 경종부문에서는 벼재배, 농경지토양, 작물잔사소각 등이 있으며, 축산부문에서는 장내발효, 가축분뇨처리 등이 있다.

장내발효는 가축의 소화기관(腸) 내 미생물의 활동에 의해 발생하는 CH_4 배출량을 계산한다. 소, 양 등을 일컫는 반추(反芻)가축은 4개의 위를 가지고 있으며 반추위(反芻胃)에 존재하는 미생물들이 탄수화물 형태인 셀룰로스(cellulose)를 소화하는 과정에서 CH_4 을 많이 생산하게 된다. 또한 비반추 가축도 소화 과정에서 미생물들이 CH_4 을 만들 수 있다. 하지만 소화하는 방법에 따라 CH_4 이 생성되는 양이 다르다. 주요 반추 가축인 소, 염소, 면양은 혹위(전위) 안에 서식하는 미생물들이 가축이 섭취한 사료를 여러 단계를 거쳐 분해하며 그 과정에서 많은 양의 CH_4 를 생성하는 발효작용이 일어나기 때문에 CH_4 배출량이 높다. 이와는 다르게 맹장이 발달하여 풀 등의 사료를 이용할 수 있는 유사 반추(pseudo-ruminant)가축인 말 등과 위가 하나이며 맹장이 발달하지 않은 단위(單胃, monogastric)가축인 돼지, 닭 등은 반추가축에 비해 소화과정에서 더 적은 양의 CH_4 을 생성하므로 CH_4 배출량이 적게 되는 것이다. 이러한 과정에서 보듯, 장내 발효에 의해 배출되는 CH_4 의 양은 가축의 종류와 연령, 체중, 사료의 질과 양, 그리고 에너지 소비량에 따라 다르다. 우리나라에서 사용하는 장내발효 부분의 축종별 CH_4 배출계수는 아래 Table 4. 와 같다.

Table 4. 장내발효 부분의 축종별 CH_4 배출

축종	배출계수(kg CH_4 /head/yr)	배출계수 출처	배출계수 계산법
젖소	118	IPCC 기본값(북미)	IPCC, Tier 1
한·육우	47	IPCC 기본값(북미)	IPCC, Tier 1
돼지	1.5	IPCC 기본값(선진국)	IPCC, Tier 1
염소, 사슴, 면양	5	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1
말	18	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1

* 가금류(닭, 오리) 배출계수는 IPCC GL에서 제공하지 않는다.

출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

가축분뇨처리는 가축분뇨가 공기가 없는(혐기적) 상황에서 미생물의 유기물 분해에 따라 생산되는 CH_4 과 공기가 있으나 부족한 상황에서 미생물이 활동하면서 생산하는 N_2O 배출량을 산정한다. 가축분뇨의 CH_4 배출량에 영향을 주는 요인에는 분뇨 발생량, 분뇨 내 유기물 양, 혐기성 분해되는 분뇨의 비율 등이 있다. 분뇨 발생량과 분뇨 내 유기물 양은 축종별 단위 배설량과 개체 수, 섭취 사료에 따라 다르다. 혐기성 분해되는 분뇨의 비율은 분뇨 관리와 처리법에 따라 다르며, 분뇨가 액체 형태로 저장, 처리될 때 혐기성 분해 비율이 더 높은 경향이 있어 더 많은 양의 CH_4 이 배출된다. 분뇨가

고체 형태(퇴비화 등)로 관리되거나 초원과 목장 등에서 가축이 방목지에서 배설하는 경우에는 호기 분해되는 경향이 있으며, 이때는 혐기성 분해보다 CH₄이 적게 발생된다. 우리나라에서 사용하는 가축분뇨처리 부문의 축종별 CH₄ 배출계수는 아래 Table 5. 과 같다.

Table 5. 가축분뇨처리 부문의 축종별 CH₄ 배출계수

축종	배출계수 (kg CH ₄ /head/yr)	배출계수 출처	배출계수 계산법
젖소	36	IPCC 기본값(북미, 한대)	IPCC, Tier 1
한·육우	1	IPCC 기본값(북미, 한대)	IPCC, Tier 1
돼지	3	IPCC 기본값(서유럽, 한대)	IPCC, Tier 1
닭·오리	0.078	IPCC 기본값(선진국, 한대)	IPCC, Tier 1
염소·사슴	0.11	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1
면양	0.10	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1
말	1.09	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1

출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

가축분뇨의 N₂O 배출은 분뇨 내 질소 성분이 산소 공급 수준에 따라 질산화 및 탈질화를 거치면서 분해되어 발생한다. 이러한 과정을 통해 배출되는 N₂O의 양은 가축분뇨처리방법과 기간의 영향을 받는다. 이를 위해 필요한 축종별 분뇨 내 질소량, 가축분뇨처리시설별 N₂O 배출계수 그리고 축종별 분뇨처리시설 이용비율은 아래 Table 6, Table 7, Table 8. 에 차례대로 나타낸다.

Table 6. 축종별 분뇨 내 질소량

축종	배출계수 (kg N/head/yr)	배출계수 출처
젖소	100	IPCC 기본값(북미)
한·육우	70	IPCC 기본값(북미)
돼지	20	IPCC 기본값(서유럽)
닭·오리	0.6	IPCC 기본값(서유럽)
염소, 사슴, 말	40	IPCC 기본값(극동아시아)
면양	12	IPCC 기본값(극동아시아)

출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

Table 7. 가축분뇨 처리시설별 N₂O 배출계수

가축분뇨처리시설의 종류	배출계수 (kg N ₂ O-N/kg N)
액비화시설(liquid system)	0.001
퇴비화시설(solid storage and drylot)	0.02
기타시설(other system)	0.005

출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

Table 8. 축종별 분뇨처리시설 이용 비율

분뇨처리시설	젖소	한·육우	돼지	닭	오리	기타 가축
액비화 시설	2011 0.14	0.34	16.18	0.33	0.58	-
	2012 1.30	0.32	19.45	0.11	1.04	-
	2013 0.14	0.19	19.51	0.10	1.27	-
퇴비화 시설	2011 86.18	92.04	45.60	68.81	67.83	100.00
	2012 85.24	92.64	38.00	71.41	72.06	100.00
	2013 85.72	93.86	38.22	76.20	78.09	100.00
기타 시설	2011 13.68	7.62	38.22	30.87	31.59	-
	2012 13.46	7.04	42.56	28.48	26.90	-
	2013 14.14	5.95	42.27	23.70	20.64	-

자료 : 통계청 농림어업조사(2011, 2012, 2013)
 * 기타 시설 : 정화처리, 기타자체처리, 위탁처리 포함
 ** 기타 가축 : 염소, 사슴, 말, 면양(축종별 분뇨처리시설 이용비율 적용을 위한 기타 가축군 분류이며, CRF 상의 기타 가축과는 다름)
 *** 소수점 이하 3자리에서 반올림하여 적용
 출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

이를 이용하여 계산한 축산부문의 2013년 온실가스 배출량은 다음과 같다. 가축분뇨 처리 부문은 5.5 백만톤 CO₂-eq. 였으며 농업의 총 배출량(20.7 백만톤 CO₂-eq.) 대비 26.5%, 장내발효 부문은 4.4 백만톤 CO₂-eq.이었고 농업의 총 배출량 대비 21.1%였다. 농업부문의 온실가스 배출량은 1990년 20.8 백만톤 CO₂-eq.이었고 1996년과 1997년에 최대값인 22.7 백만톤 CO₂-eq.을 기록한 후 점차 감소하여 2013년에는 20.7 백만톤 CO₂-eq.을 기록하였다. 이는 경종 부문의 감소를 축산부문의 증가로 인한 것이다. 축산 부문 내에서도 가축분뇨 처리시설에서 배출되는 온실가스의 증가 속도가 장내발효의 그것에 비해 빠르는데 그 이유는 단위가축의 증가에 의한 것이다. 연도별 자세한 배출량은 아래 Table 9에서 볼 수 있다.

Table 9. 연도별 축산부문 온실가스 배출량 (백만톤 CO₂-eq.)

부 문	1990	1995	2000	2005	2010	2013
장내발효	3.0	4.1	3.4	3.3	4.3	4.4
가축분뇨	3.1	4.5	4.3	4.6	5.4	5.5
총계(A)	6.1	8.6	7.7	7.9	9.7	9.9
농업(B)	20.8	22.3	20.8	20.0	21.1	20.7
A/B (%)	29.3	38.6	37.0	39.5	46.0	47.8

출처 : 국가온실가스인벤토리보고서(GIR, 2015)

제3절 축산부문 온실가스 배출원 분석

1. 가축의 장내발효

○ 가축의 개념

축산법(시행 2015.12.23.) 제1장 제2조(정의)의 1항에 따르면 ‘가축’은 소·말·양(염소 등 산양을 포함)·돼지·사슴·닭·오리·거위·칠면조·메추리·타조·꿩, 그 밖에 농림축산식품부령으로 정하는 동물(動物) 등을 말한다. 또한 농림축산식품부령(축산법 시행규칙)에서는 제2조에서 노새·당나귀·토끼·개·꿀벌 및 농림축산식품부장관이 고시하는 동물로 정하고 있다. 농림축산식품부장관이 고시하는 동물로는 오소리·십자매·금화조·문조·호금조·금정조·소문조·남양청홍조·붉은머리청홍조·카나리아·앵무·비둘기·금계·은계·백한·공작·지렁이가 있다.

○ 가축 중 온실가스 배출원

우리나라의 장내발효 배출원은 젓소, 한·육우, 돼지, 닭, 염소(산양), 면양, 말, 사슴, 오리로 나눌 수 있다. 장내발효 과정에서 배출되는 온실가스는 CH₄이며, 가축의 소화과정에서 생기는 일반적 부산물이다. 가축이 섭취한 사료가 소화되는 과정에서 장(腸)에 있는 미생물들이 그것을 발효하는 과정에서 발생하는 것이다. 반추(反芻) 가축은 소화관에 있는 특정 미생물의 존재 때문에 탄수화물 형태인 셀룰로스(cellulose)를 소화하는 과정에서 CH₄의 발생량이 많지만 비 반추가축도 역시 CH₄을 만들어 낸다. 이러한 과정을 장내발효(腸內醱酵)라고 부른다.

소화기관의 유형은 CH₄ 방출의 비율에 중요한 영향을 끼치고 있다. 반추가축은 혹위(전위) 안에서 많은 양의 CH₄ 생성 발효작용이 일어나기 때문에 CH₄의 배출량이 높다. 주요 반추 가축은 소, 염소, 양 및 낙타가 있다. 유사 반추위 가축(Pseudo-ruminant animals : 말, 노새, 당나귀)과 단위가축(monogastric animals : 돼지, 닭 등)은 소화기관에서 반추가축에 비해 적은 CH₄ 생성 장내발효로 인해 상대적으로 적은 CH₄ 배출량을 보인다. 배출된 CH₄의 양은 가축의 유형, 나이, 무게, 사료의 질과 양, 그리고 에너지 소비에 따라 다르다.

2. 가축분뇨처리

○ 배출원 개요

가축 분뇨는 유기물로 구성되어 있으며, 이 유기물이 혐기적 환경(산소가 없는 경우)에서

분해될 때 CH_4 생성 미생물에 의해 CH_4 이 발생한다. 가축 분뇨의 CH_4 배출량에 영향을 주는 주요 요인은 분뇨량, 분뇨의 유기물 양과 혐기적으로 분해되는 분뇨의 분율이다. 분뇨량 및 분뇨의 유기물 양은 한 마리당 배설하는 양과 개체수, 그리고 섭취 사료에 따라 다르며, 혐기적으로 분해된 분뇨의 분율은 분뇨의 관리법에 따라 달라진다. 분뇨가 액체로 저장되거나 처리될 때(예 : lagoons, 연못, 탱크, 구덩이) 혐기적으로 분해되는 경향이 있고 이에 따라 많은 양의 CH_4 을 생산한다. 분뇨가 고체 형태(예 : 퇴비화 등)로 관리될 때 또는 방목하는 가축이 초원과 목장 등 방목지에서 배설할 경우 그 분뇨는 호기적으로 분해되는 경향이 있고 CH_4 은 혐기적 상황에서 보다 적게 발생된다.

가축분뇨의 N_2O 배출은 가축분뇨의 질소 성분의 분해 과정에서 일어난다. 분뇨가 질산화 및 탈질화 과정을 거치면서 질소 성분이 분해되어 질소가스가 되는 과정의 전 단계의 부산물로 발생하거나 산소가 부족한 상황에서 질산화 과정 도중에 발생하기도 한다. 질산화는 산소의 공급이 원활할 경우 일어나는 현상이며 탈질화는 산소의 공급이 원활하지 않아 산소가 부족한 환경에서 일어나는 현상이다. 이러한 과정을 통해 배출되는 N_2O 의 양은 분뇨처리 체계와 기간에 달려 있다. 따라서 가축분뇨의 특성 및 가축분뇨 처리방법은 CH_4 과 N_2O 배출량에 영향을 미친다.

○ 가축분뇨 처리과정의 온실가스 배출원 : CH_4

우리나라는 IPCC의 기후조건에 따라 cool climate region에 속하며, 가축분뇨 처리과정의 CH_4 배출계수 선택은 IPCC(1996)의 각 지역별 Tier 1의 배출계수에 대한 설명을 참조하여 국가 현실에 적합한 배출계수를 선택하여, Tier 1 방법을 이용하여 가축사육두수와 배출계수의 곱으로 배출량을 계산한다(Table 10).

Table 10. 축종 별 가축분뇨 처리 과정의 CH_4 배출계수 및 출처

축종	배출계수 (CH_4 /두수/년)	배출계수 출처	배출계수 계산법
젖소	36	IPCC 기본값(북미)	IPCC, Tier 1
한·육우	1	IPCC 기본값(북미)	IPCC, Tier 1
돼지	3	IPCC 기본값(서유럽)	IPCC, Tier 1
닭 · 오리	0.078	IPCC 기본값	IPCC, Tier 1
염소 · 사슴	0.11	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1
말	1.09	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1
면양	0.10	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1

출처 : IPCC(1996)

○ 가축분뇨 처리과정의 온실가스 배출원 : N_2O

가축분뇨처리과정 중 배출되는 N_2O 배출량은 Tier 2 방법을 이용하여 계산하며 가축분

뇨처리시설에서의 CH₄ 배출량과는 달리, 직접적 N₂O 배출량은 가축분뇨처리시설의 비율, 가축 당 배출하는 연평균 질소량, 가축분뇨처리시설의 직접적 N₂O 배출계수를 이용하여 계산해야 한다(Table 11).

Table 11. 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출계수 (IPCC 1996)

가축분뇨처리시설의 종류	배출계수 (kg N ₂ O-N/kg 분뇨 내 질소량)
Anaerobic lagoon	0.001
Liquid system	0.001
Daily spread	0.0
Solid storage and drylot	0.02
Pasture range and paddock	0.02
Other system	0.005

제4절 축산부문 분뇨 유래 온실가스 배출량 산정 방법론 분석(1996 IPCC GL vs. 2006 IPCC GL)

1. 카테고리

1996 GL과 2006 GL의 카테고리 구분은 크게 장내발효 과정과 가축분뇨 처리과정의 CH₄ 및 N₂O 배출로 나뉘며, 각 과정별로는 각 축종별로 구분이 되어 있고 축종은 성장 단계 등을 이용한 하부 카테고리로 구분된다.

2006 GL에서는 1996 GL과는 달리 주요(key) 카테고리의 결정을 위한 방법에 대해 1 권 4장(volume 1, chapter 4)에서 자세히 설명하고 있으며, 주요 카테고리의 결정을 위한 판단 조건은 “배출량의 절대적 수준, 배출 경향, 그리고 불확도에 대한 고려를 통해 해당 카테고리가 국가 인벤토리 시스템에 있어서 중요한 영향을 미칠 수 있는 것” 이라고 한다. 2006 GL에서는 위의 개념을 이용한 방법을 approach 1이라 부르며 하위 카테고리의 배출량 합이 전체 배출량의 95%가 되는 수준까지로 보고 있으며, 각 하위 카테고리가 불확도에 미치는 영향에 대한 평가를 통해 하위 카테고리 중 주요 카테고리를 찾는 approach 2도 설명하고 있다. Approach 2는 approach 1 이외에 부가적으로 실시하는 분석이며 이러한 두 과정을 거칠 경우 우수실행(good practice)이라 할 수 있다.

2. 배출계수

가축분뇨 처리과정의 메탄 및 아산화질소 배출량을 계산하기 위해서는 장내발효 과정과 마찬가지로 Tier 1, Tier 2, Tier 3 방법을 사용할 수 있다.

○ Tier 1

Tier 1 방법은 장내발효의 그것과 마찬가지로 IPCC의 기본값을 이용하며, 해당 국가의 환경과 각 배출계수의 정의에 적합한 것을 이용해야 한다. Tier 1 방법을 사용할 때 카테고리 별 메탄 배출계수가 사용되며, IPCC 기본값 배출계수는 연평균 기온, 축종별, 지

역별 분류에 따라 해당 값을 찾을 수 있다. 2006 GL에서는 가금류의 배출계수를 자세히 구분하였고 그 외에 사슴, 순록, 토끼, 모피가축의 배출계수도 명시하였다.

○ Tier 2

가축분뇨 처리과정의 배출량 계산을 위해 Tier 2 방법을 선택하기 위해서는, 장내발효 과정의 Tier 2 사용 조건과 마찬가지로 분뇨처리 과정이 주요한 배출원이고 IPCC의 기본 배출계수 도출을 위해 사용한 자료가 해당 국가의 가축 및 분뇨 처리 조건과 잘 일치하지 않을 때 적용하게 된다. 소, 물소, 돼지의 특성과 분뇨관리시스템은 국가별로 매우 다양할 수 있으므로 해당 가축 사육두수가 많은 국가의 경우 배출량 계산을 위해서는 Tier 2 방법을 이용하는 것을 고려해야 한다. Tier 2 방법은 분뇨로부터의 배출계수 산정에 영향을 미치는 두 가지 주요한 유형의 입력 자료(분뇨특성, 분뇨처리 시스템 특성)에 의존한다.

○ 가축분뇨에서 발생하는 CH_4 와 N_2O

가축 분뇨는 원칙적으로 유기물로 구성되어 있으며, 이 유기물이 혐기적 환경(산소가 없는 경우)에서 분해될 때, CH_4 생성 미생물에 의해 CH_4 가 발생한다. 가축 분뇨에서 나오는 CH_4 배출량에 영향을 주는 주요한 요인은 생성된 분뇨의 양과 혐기적으로 분해된 분뇨의 분율이며, 생산된 분뇨량은 한 마리당 배설하는 양과 개체수의 곱에 따른다. 혐기적으로 분해된 분뇨의 부분은 분뇨가 어떻게 관리되느냐에 따라 다르다. 분뇨가 액체로 저장되거나 처리될 때(예 : lagoons, 연못, 탱크, 구덩이) 이는 혐기적으로 분해되는 경향이 있고 많은 양의 CH_4 를 생산한다. 분뇨가 고체로 관리될 때(예 : 더미 또는 구덩이) 또는 초원과 목장에 방치될 때는 호기적으로 분해되는 경향이 있고 CH_4 는 아주 적게 발생하거나 발생되지 않기도 하지만 N_2O 의 배출량은 증가할 수 있다. CH_4 배출량을 측정하기 위해서 가축 개체수는 가축 당 생성되는 다양한 분뇨량과 분뇨가 취급되는 방식을 반영하기 위하여 반드시 하위그룹으로 분류되어야 하며, 이때 하위그룹의 개체수 산정은 그 분류법에 따라야 한다. N_2O 는 분뇨 질소화 되거나 탈질소화 될 때 형성되며, 배출된 N_2O 의 양은 분뇨처리 체계와 기간에 달려있다. 분뇨의 저장과 관리(분뇨가 토양에 이용되기 전) 중 발생하는 N_2O 는 직접적 배출이며 토양으로 유출된 분뇨 혹은 분뇨에서 발생한 암모니아와 질소산화물이 토양에 축적되어 발생한 N_2O 는 간접적 배출로 여긴다.

3. 가축분뇨에서 발생하는 CH_4

○ Tier 1

이 방법은 장내발효의 그것과 마찬가지로 IPCC의 기본 배출계수를 이용하며, 해당 국가의 환경과 각 배출계수의 정의에 적합한 것을 이용해야 한다. Tier 1 방법을 사용할 때 가축 범주 또는 하위 범주별 CH_4 배출계수가 사용되며 연평균 기온에 의한 IPCC 기본값 배출계수는 축종별, 지역별 분류로 구분되는데 아래 표에 제시되어 있으며 IPCC96과 IPCC06의 자료로 구분되어 있다. 표에서 보듯 배출계수는 가축분뇨가 처리되는 지역의 기온, 가축분뇨의 휘발성 고형물 함량과 각 지역에서 사용하는 가축분뇨 관리방법의 범위에 따라 다르다. 또한 IPCC96과 IPCC06의 배출계수의 차이가 존재하며 IPCC06에서는 가금류

의 배출계수를 자세히 구분하였고 그 외에 사슴, 순록, 토끼, 모피가축의 배출계수도 명시하였다. 이 연구에서는 돼지를 기준으로 하겠다.

○ Tier 2

고유 가축의 종/범주가 국가 배출량의 큰 비율을 차지하는 경우, 가축분뇨처리 과정의 CH_4 배출계수 산출을 위해서는 좀 더 복잡한 방법을 이용해야 하며, 국가의 고유한 환경에 맞는 배출계수를 개발하는데 사용될 가축의 특성과 가축분뇨 처리과정에 대한 자세한 정보를 필요로 한다. Tier 2 방법은 분뇨관리가 주요한 배출원이고, IPCC의 기본 배출계수 도출을 위해 사용한 자료가 해당 국가의 가축 및 분뇨 처리 조건과 잘 일치하지 않을 때 적용할 수 있다. 소 물소, 돼지의 특성과 분뇨관리시스템은 국가별로 매우 다양할 수 있으므로 해당 가축 사육두수가 많은 국가의 경우, CH_4 배출을 산정하기 위해서 Tier 2 방법을 이용하는 것을 고려해야 한다. Tier 2 방법은 분뇨로부터의 배출계수 산정에 영향을 미치는 두 가지 주요한 유형의 입력 자료(분뇨특성, 분뇨처리 시스템 특성)에 의존한다.

○ 분뇨특성

분뇨에서 발생된 휘발성 고형물(VS)의 양과 그 분뇨로부터 발생될 수 있는 CH_4 의 최대 발생량(B_0)을 포함한다. 분뇨 중 VS량은 Tier 2의 장내 발효 배출계수를 도출하는데 사용되는 변수이기도 한 사료 섭취량 및 사료 소화성에 근거하여 산정되거나 가축분뇨를 실험실에서 분석한 결과에 근거할 수 있다. B_0 은 축종과 사료의 종류에 따라 달라지며, 분뇨의 VS의 양에 의거한 이론상의 CH_4 최대 발생량이다. 축사의 깔짚(짚, 톱밥, 나무조각 등)은 Tier 2 방법에서 VS에 포함되지 않는데, 이러한 깔짚 재료의 종류와 사용은 국가마다 매우 다양하며 일반적으로 고형물 저장 시스템과 관련이 있으므로 전체 CH_4 발생량에 커다란 영향을 미치지 않을 것이기 때문이다.

○ 분뇨 처리 시스템 특성

분뇨관리에 이용된 시스템의 유형과 시스템 고유의 B_0 비율을 반영하는 CH_4 변환 계수(MCF)를 포함한다. IPCC가 제시한 각각의 분뇨처리 시스템에 대한 MCF 값들은 Table 12와 Table 13에 명시되어 있다. 분뇨처리시스템의 지역 평가는 각각의 분뇨처리기술로 처리되는 분뇨의 비율을 산정하는데 사용된다. 이러한 분뇨처리시스템에 대한 설명은 Table 14에 포함되어 있다. MCF 값은 분뇨 처리 방식과 기후에 따라 달라지며, 이론적으로 0-100% 사이의 값을 가진다. 또한 기온과 계류시간 양자 모두 MCF의 산정에 중요한 역할을 한다. 한 예로, 열대 환경에서 액체 상태로 장시간동안 관리된 분뇨는 CH_4 형성을 촉진시키며 분뇨관리환경에 따라 65-80% 정도의 높은 MCF 값을 가질 수 있다. 이에 비해 한대기후에서 건조 상태로 관리된 분뇨는 CH_4 를 거의 발생시키지 않으므로, 약 1% 정도의 MCF 값만 가지게 된다. Tier 2 배출계수 개발은 각 기후 지역에서 각 분뇨처리시설에 의해 처리되는 분뇨의 평가를 이용하여 가중평균 MCF를 결정하는 것을 포함한다. 그 다음 평균 MCF를 VS 배설율과 가축 범주의 B_0 을 이용하며 계산식은 아래 Eq 1. 과 같다.

Eq 1. 가축분뇨시설에서의 CH₄ 배출량

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \cdot 365) \cdot B_{0(T)} \cdot 0.67 \text{ kg/m}^3 \cdot \sum_{S,k} \frac{MCF_{S,k}}{100} \cdot MS_{(T,S,k)}$$

EF_(T) = 가축 범주 T에 대한 CH₄ 배출계수, (kg CH₄ 가축⁻¹ yr⁻¹)

YS_(T) = 가축 범주 T에 대한 일간 배설 휘발성 고형물, kg 건물질 가축⁻¹ day⁻¹

365 = 연간 VS 발생을 계산하는 근거, days yr⁻¹

B_{0(T)} = 가축 범주 T에서 발생된 분뇨의 최대 CH₄ 발생 량, m³ CH₄ kg⁻¹ VS 배설 량

0.67 = m³ CH₄를 kg CH₄로 바꾸기 위한 변환 계수

MCF_(S,k) = 기후 지역 K 별 각 분뇨관리 시스템 S에 대한 CH₄ 변환 계수, %

MS_(T,S,k) = 기후 지역 K에서 분뇨처리시스템 S를 이용해 관리되는 가축 범주 T의 분뇨의 비율, 단위 없음

일부 국가의 경우 Tier 2 방법에서 제시한 세부 변수들에 대한 모든 값을 가지고 있지 않더라도, 가축의 체중, VS 배출량, 기타 요소와 같은 국가 고유의 기초 자료를 배출량 산정의 정확성을 향상시키는데 사용할 수 있다. 국가 고유의 자료가 단지 일부분의 이러한 변수에 대해서만 사용가능하여도 Table 12, Table 13. 의 자료를 이용하여 빠진 부분을 채워 국가고유의 배출계수를 산정하는 것이 좋다.

배출량은 지역과 가축의 종/범주에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 배출량 산정은 국가 내 다른 지역 간의 사육두수 및 분뇨 처리법의 다양성과 범위를 가능한 한 많이 반영해야 하기 때문에 각 지역을 위한 각각의 산정법의 개발이 필요할 것이다. 분뇨 특성과 관리법의 변화를 설명할 수 있도록 배출계수는 주기적으로 갱신해야 하며 이러한 변화는 과학적으로 검토된 신뢰할 수 있는 자료에 근거를 두어야 한다. 따라서 자주 모니터링을 함으로써 주요한 모델의 매개변수를 검증하고 축산업의 변화하는 경향을 추적하는 것이 바람직하다.

○ VS 배설율

휘발성 고형물(VS)는 가축분뇨에서 유기물질이며, 생물분해성 부분과 생물비분해성 부분 두 가지로 구성되어 있다. 아래 식에서 요구되는 B₀ 값은 시스템에 들어가는 총 VS값에 근거하기 때문에 각 축종에 의해 배설되는 총 VS가 필요하다. 일평균 VS 배설율을 얻는 가장 좋은 방법은 국가 내에서 발간된 자료를 이용하는 것이며 만약 그러한 자료가 없다면 국가 고유의 VS 배출율을 사료 섭취 수준으로부터 산정할 수 있다.

분뇨의 VS 함량은 소화되지 않고 대변으로 배출된 양과 소변으로 배출된 양의 합과 같다. 총에너지 섭취량과 사료의 소화율이 산정되면, VS 배설율은 아래 Eq 2. 를 이용하며, IPCC96의 식과 비교하였을 때 IPCC06의 식은 소변으로 손실되는 에너지(UE•GE)를 고려하고 있다. 회분 함량 비율 값은 가축의 유형에 따라 실질적으로 변동될 수 있으며, 국가 환경을 반영해야 한다.

Eq 2. VS 배설율

IPCC96

$$VS = \text{Intake} \times (1 \text{ kg}/18.45 \text{ MJ}) \times (1 - \text{DE}\%/100) \times (1 - \text{ASH}\%/100)$$

IPCC06

$$VS = \left[GE \cdot \left(1 - \frac{DE\%}{100} \right) + (UE \cdot GE) \right] \cdot \left[\left(\frac{1 - ASH}{18.45} \right) \right]$$

VS (kg dm/day) = 건조-유기 물질 베이스의 일당 휘발성 고형물 배설

Intake (MJ/day) = 일간 평균 사료 섭취량

GE (MJ/day) = 총 에너지 섭취량

DE% = 백분율로 표시된 사료의 소화율 (예. 60%)

(UE • GE) = GE의 부분으로 표현된 소변 에너지. 일반적으로 0.04 GE는 대부분의 반추 가축들의 소변 에너지 배설로 간주될 수 있다 (85% 또는 그 이상 곡물 식이로 먹인 되새김질 가축이나 돼지는 0.02로 감소). 국가고유값이 있는 곳에서는 국가고유의 값 사용

ASH% = 건조된 사료 섭취량의 분수(분율)로 계산된 분뇨의 회분 함량(예, 소의 경우 0.08). 국가 고유의 값 사용

18.45 = 건조량 기준(kg) 당 소화할 수 있는 GE에 대한 환산계수. 이 값은 가축이 보통 소비하는 광범위한 목초 및 곡물사료에서 상대적으로 일정

○ B0 값

분뇨의 최대 CH₄ 발생량은 종과 사료에 따라 변동되며 국가 고유의 B0 측정값을 이용하는 것이 좋다. Tier 2 계산은 총 배설된 VS에 근거를 두고 있으므로 샘플링 방법을 포함해 B0 측정을 표준화하고, 만약 총 배설된 VS 값이 아니라면 생물분해성 VS에 근거를 두었는지 확인하는 것이 중요하다. 국가 고유의 B0 측정값이 불가능할 경우 표 12와 Table 13을 이용한다.

○ MCFs

MCFs는 고유 분뇨 처리 시스템에 대해 결정되고, B0에 비교하였을 때 발생하는 CH₄량의 비율을 나타낸다. 고유 분뇨 처리시스템에서 발생된 CH₄의 양은 현재 혐기성 환경의 정도, 시스템의 온도, 시스템에서의 유기물질의 체류시간에 영향을 받는다. Lagoon의 기본 값은 더 긴 체류시간의 효과가 포함되어 그 결과로 대부분의 다른 환경의 시스템보다 높은 수치를 나타낸다. 또한 액체 베이스 시스템은 기온효과에 매우 민감하다. 이러한 기온 범위가 대부분의 기후 조건을 반영해야 하므로, 섭씨 10에서 28도 범위 밖의 극도

의 고온이나 저온의 연평균 기온을 갖는 지역에서는 범위 끝 값(즉, 10도 또는 28도)을 이용하거나 국가 고유의 값을 개발해야만 한다. 이러한 기본값 계수는 관리 시스템의 한정된 범주내의 잠재적으로 광범위한 변수를 모두 포함할 수 없을 것이다. 따라서 가능하다면 고유 국가나 지역에서 사용되는 고유의 관리 시스템을 반영하는 국가 고유의 MCF가 개발되어야 한다. 특히, 가축 개체수가 많거나 여러 기후 지역을 가지고 있는 국가의 경우 더욱 더 중요하다. 그러한 경우, 가능하다면, 기본값 MCF를 대체하기 위해서 각 기후 지역에 대한 실측이 행해져야 하며 ① 저장/적용 시기; ② 축정부지의 사료 및 가축 특성; ③ 저장시간; ④ 분뇨특성(예, 액체 시스템의 VS 유입과 유출 농도); ⑤ CH₄생성 미생물 집종원으로 저장설비에 남은 분뇨 양의 결정; ⑥ 실내와 실외 저장간의 시간과 온도 분포; ⑦ 일간 기온변동; 그리고 ⑧ 계절적 기온 변화 등을 포함해야 한다.

Table 12. 돼지에 대한 분뇨 처리 CH₄ 배출계수 유도

연 평균 기온(℃)			분뇨 처리 시스템 MCFs (%)										
			Lagoon ¹	액체/슬러리	고체 저장	건조 부지	Pit < 1달	Pit > 1달	매일 살포	소화조	기타		
한대	IPCC96		90	10	1.0	1.0	5.0	10	0.1	10	1.0		
	IPCC06	10	66	17	2.0	1.0	3.0	17	0.1	10.0	1.0		
		11	68	19	2.0	1.0	3.0	19	0.1	10.0	1.0		
		12	70	20	2.0	1.0	3.0	20	0.1	10.0	1.0		
		13	71	22	2.0	1.0	3.0	22	0.1	10.0	1.0		
		14	73	25	2.0	1.0	3.0	25	0.1	10.0	1.0		
온대	IPCC96		90	35	1.5	1.5	18	35	0.5	10	1.0		
	IPCC06	15	74	27	4.0	1.5	3.0	27	0.5	10.0	1.0		
		16	75	29	4.0	1.5	3.0	29	0.5	10.0	1.0		
		17	76	32	4.0	1.5	3.0	32	0.5	10.0	1.0		
		18	77	35	4.0	1.5	3.0	35	0.5	10.0	1.0		
		19	77	39	4.0	1.5	3.0	39	0.5	10.0	1.0		
		20	78	42	4.0	1.5	3.0	42	0.5	10.0	1.0		
		21	78	46	4.0	1.5	3.0	46	0.5	10.0	1.0		
		22	78	50	4.0	1.5	3.0	50	0.5	10.0	1.0		
		23	79	55	4.0	1.5	3.0	55	0.5	10.0	1.0		
		24	79	60	4.0	1.5	3.0	60	0.5	10.0	1.0		
		25	79	65	4.0	1.5	3.0	65	0.5	10.0	1.0		
		열대	IPCC96		90	65	2.0	5.0	33	65	10	10	1.0
			IPCC06	26	79	71	5.0	2.0	30	71	1.0	10.0	1.0
27	80			78	5.0	2.0	30	78	1.0	10.0	1.0		
28	80			80	5.0	2.0	30	80	1.0	10.0	1.0		
지역	돼지 특성				분뇨 처리 시스템 용법(MS%)								
		질량 ^a kg	m ³ B ₀ ^b VS/kg	VSC ^c kg/ha/day									
북아메리카 ^d	IPCC96	82	0.45	0.5	24	1	2	16	10	26	0.0	0.0	19
	IPCC06	46	0.48	0.27	32.8	18.5	4.2	4.0	0.0	40.6	0.0	0.0	0.0
서유럽	IPCC96	82	0.45	0.5	0	0	21	2.0	3	73	0	0	1
	IPCC06	50	0.45	0.3	8.7	0.0	13.7	0.0	2.8	69.8	2.0	0.0	3.0
동유럽	IPCC96	82	0.45	0.5	8	0	39	14	19	19	0.0	0.0	1
	IPCC06	50	0.45	0.3	3.0	0.0	42.0	0.0	24.7	24.7	0.0	0.0	5.7
오세아니아	IPCC96	82	0.45	0.5	54	0	3	15	91	0.0	0.0	0.0	28
	IPCC06	45	0.45	0.28	54.0	0.0	3.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0
라틴아메리카	IPCC96	28	0.29	0.3	0.0	8	10	41	0	0	2	0.0	40
	IPCC06	28	0.29	0.3	0.0	8.0	10.0	41.0	0.0	0.0	2.0	0.0	40.0
아프리카	IPCC96	28	0.29	0.3	0.0	6	6	87	1	0	0.0	0	0.0
	IPCC06	28	0.29	0.3	0.0	6.0	6.0	87.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
중동	IPCC96	28	0.29	0.3	0.0	14	0.0	69	0	17	0.0	0	0
	IPCC06	28	0.29	0.3	0.0	14.0	0.0	69.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0
아시아	IPCC96	28	0.29	0.3	0	40	0	54	0	0	0	7	0.0
	IPCC06	28	0.29	0.3	0.0	40.0	0.0	54.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0
인도대륙	IPCC96	28	0.29	0.3	9	22	16	30	3	0	9	8	3
	IPCC06	28	0.29	0.3	9.0	22.0	16.0	30.0	3.0	0.0	9.0	8.0	3.0
a 각각의 지역에 대한 평균 판매용 돼지 질량(기본 산정은 ±20%) b B ₀ 산정은 ±15% c 평균 판매용 돼지에 대한 일당, 두당, 평균 VS 생산(기본 산정은 ±25%) d IPCC96에서는 판매용/번식용 돼지의 구분이 없음					1 lagoon과 액체/슬러리 MCFs는 생물학적 활동에 대한 온도와 관계있는 van't Hoff-Arrhenius 식에 기초하여 계산되었다. Lagoon MCFs는 또한 더 긴(일년 이상) 저류 시간에 기초하여 계산되었다.[Mangino, et. al(2001)]								

Table 13. 번식돈에 대한 분뇨 처리 CH₄ 배출계수 유도

연 평균 기온(℃)				분뇨 처리 시스템 MCFs (%)								
				Lagoon ¹	액체/슬러리	고체 저장	건조 부지	Pit < 1달	Pit > 1달	매일 살포	소화조	기타
한대	10			66	17	2.0	1.0	1.0	0.1	10.0	10.0	1.0
	11			68	19	2.0	1.0	1.0	0.1	10.0	10.0	1.0
	12			70	20	2.0	1.0	1.0	0.1	10.0	10.0	1.0
	13			71	22	2.0	1.0	1.0	0.1	10.0	10.0	1.0
	14			73	25	2.0	1.0	1.0	0.1	10.0	10.0	1.0
온대	15			74	27	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	16			75	29	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	17			76	32	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	18			77	35	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	19			77	39	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	20			78	42	4.0	1.5	1.5	0.5v	10.0	10.0	1.0
	21			78	46	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	22			78	50	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	23			79	55	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
	24			79	60	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0
25			79	65	4.0	1.5	1.5	0.5	10.0	10.0	1.0	
열대	26			79	71	5.0	2.0	2.0	1.0	10.0	10.0	1.0
	27			80	78	5.0	2.0	2.0	1.0	10.0	10.0	1.0
	28			80	80	5.0	2.0	2.0	1.0	10.0	10.0	1.0
지역	번식용 돼지 특성 묘사			분뇨 처리 시스템 용법(MS%)								
	질량 ^a kg	B ₀ ^b m ³ CH ₄ /kg VS	VS ^c kg/hd/day									
북 아메리카	198	0.48	0.5	32.8	18.5	4.2	4.0	0.0	40.6	0.0	0.0	0.0
서 유럽	198	0.45	0.46	8.7	0.0	13.7	0.0	2.8	69.8	2.0	0.0	3.0
동 유럽	180	0.45	0.5	3.0	0.0	42.0	0.0	24.7	24.7	0.0	0.0	5.7
오세아니아	180	0.45	0.5	54.0	0.0	3.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0
라틴 아메리카	28	0.29	0.3	0.0	8.0	10.0	41.0	0.0	0.0	2.0	0.0	40.0
아프리카	28	0.29	0.3	0.0	6.0	6.0	87.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
중동	28	0.29	0.3	0.0	14.0	0.0	69.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0
아시아	28	0.29	0.3	0.0	40.0	0.0	54.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0
인도대륙	28	0.29	0.3	9.0	22.0	16.0	30.0	3.0	0.0	9.0	8.0	3.0
^a 각각의 지역에 대한 평균 번식용 돼지 질량(기본 산정은 ±20%) ^b B ₀ 산정은 ±15% ^c 평균 번식용 돼지에 대한 일당, 두당, 평균 VS 생산(기본 산정은 ±25%)				¹ lagoon과 액체/슬러리 MCFs는 생물학적 활동에 대한 온도와 관계있는 van't Hoff-Arrhenius 식에 기초하여 계산되었다. Lagoon MCFs는 또한 더 긴(일년 이상) 저류 시간에 기초하여 계산되었다.[Mangino, et. al(2001)]								

4. 가축분뇨처리에 의한 N₂O 발생

직접적인 N₂O 배출은 분뇨 속에 포함된 질소의 질산화과정과 탈질화과정을 통해 생겨나며, 분뇨를 저장과 처리 하는 동안의 N₂O 배출은 분뇨 중 질소와 탄소량에 따르며 저장기간과 처리방법에 따라 달라진다. 질산화과정(암모니아의 질산염화)은 가축 분뇨의 N₂O 배출에 필수적인 선행요인이며 가축분뇨에 충분한 산소 공급이 제공될 때 발생한다. 아질산염과 질산염은 혐기적인 조건에서 탈질화과정을 통해 N₂O와 질소(N₂)로 바뀌며, N₂O와 질소의 비율은 일반적으로 산성도 증가, 질산염 농도 증가, 수분 감소와 함께 증가한다. 즉, 가축분뇨의 N₂O 생성 및 배출은 호기적 환경에서 아질산염과 질산염이 생긴 후 그것이 혐기적 환경 속에서 탈질화 과정을 통해 일어난다.

간접적인 N₂O 배출은 휘발성 질소로부터 만들어지는데, 이는 암모니아와 산화질소(NO_x)의 형태에서 일어난다. 요소(포유류)와 요소산(가금류)와 같은 간단한 형태의 유기질소는 매우 빠르게 암모니아성 질소로 광물화(mineralization)되며 그것은 휘발성이 강하고 공기 중으로 쉽게 확산된다. 질소손실은 축사와 다른 가축생산장소(착유장 등)에서 배설하는 순간 일어나며 가축분뇨 처리시설과 같이 목장 내에서 계속 발생한다. 질소는 실외, 사양시설, 그리고 목초지의 분뇨가 있는 장소에서 runoff와 leaching으로 손실된다.

분뇨처리시스템에서의 N₂O 배출량 예측을 위해 사용된 방법론과 세부사항의 수준은 국가의 상황에 달려있고 그 국가의 상황에 적절한 Tier 수준을 선택해야 한다. 가축분뇨 처리 시스템으로부터의 직·간접적인 N₂O 배출량을 계산하기 위한 각 Tier들의 방법들은 아래와 같다(Table 14).

Table 14. 가축분뇨 처리시스템의 정의

시스템	정의
목초지/방목지/방목장	목초지와 방목지에서 풀을 뜯어 먹는 가축들의 분뇨는 퇴적되도록 그냥 두는 것이 허용되고, 관리되지 않음
일일 살포	분뇨가 주기적으로 축사시설에서 제거되어, 배설 후 24시간 안에 경작지나 목초지에 뿌림
고형물 저장	전형적으로 몇 달의 기간 동안, 퇴적 또는 더미로 옥외에 쌓아 둠. 분뇨는 충분한 양의 바닥갈래 재료 또는 증발에 의한 습기 손실 발생 가능
건조장	축적되는 분뇨가 주기적으로 제거되는, 두드러질 만한 식물성 덮개가 없는 포장 또는 비포장 노천 축사 지역
액체/슬러리	분뇨는 가축 축사 외부의 탱크나 토양호지에서 배설된 상태로 또는 소량의 물을 첨가하여 보통 1년 미만의 기간 동안 저장

덮개 없는 혐기성 lagoon	폐기물 안정화와 저장을 겸하도록 운영되고 설계된 일종의 액체 저장 시스템. Lagoon의 상층수는 보통 lagoon에 연결된 축사시설로부터 분뇨를 제거하는데 사용된다. 혐기성 lagoon은 기후지역, 휘발성 고형물 부하속도, 기타 운용 요소에 따라 저장기간(1년 또는 그 이상)이 다양하게 설계된다. Lagoon으로부터의 물은 청소수로 재활용되거나, 논밭의 관개수로 사용된다.
가축 축사 아래 pit에 저장	무창 가축 축사시설의 전형적인 얇은 축사 바닥 밑(pit)에서 거의 또는 전혀 물을 첨가하지 않은 상태로 분뇨를 수집하고 저장함.
혐기성 소화조	가축 배설물을 수집하여 커다란 격납용기 또는 덮개 있는 lagoon에서 혐기적으로 소화함. 소화조는 복합유기화합물을 CO ₂ 와 CH ₄ 로 생물학적으로 감소시켜 폐기물의 안정화를 꾀하도록 운영되고 설계됨. 바이오가스는 연료로 연소 가능.
연료로 연소	대변과 소변이 들판에 배설됨. 태양에 의해 건조된 대변 덩어리는 연료로서 연소됨.
두꺼운 축사 바닥 깔개 (소 및 돼지)	생산 주기 동안(약 6~12개월 동안) 계속 배설되는 분뇨의 습기를 흡수하도록 바닥깔개가 끊임없이 추가된다. 이 분뇨관리 시스템은 깔짚 방식 분뇨 처리 시스템이라고도 알려져 있으며, 드라이 로트 또는 목초지와 결합되어 사용될 수 있다.
용기내 퇴비화	강제 통기와 끊임없는 혼합을 통해, 전형적으로 무창 채널에서의 퇴비화
정치식 퇴비화	강제 통기는 하나 혼합은 하지 않으며 더미 상태로 퇴비화
집중 야적식 퇴비화	혼합과 통기를 위해 정기적(적어도 매일)으로 뒤집기해주는 건조더미에서의 퇴비화
수동 야적식 퇴비화	혼합과 통기를 위해 간헐적으로 뒤집기해주는 건조더미에서의 퇴비화
깔짚 있는 가금류 분뇨	보통 드라이 로트(건조장)이나 목초지와 결합시켜 사용하지 않는 점을 제외하고, 소 및 돼지의 두꺼운 축사바닥깔개 시스템과 유사. 전형적으로 모든 가금류 종계군과 식육용 닭(육계) 생산, 기타 가금류에 이용된다.
깔짚 없는 가금류 분뇨	무창 가축 축사 시설의 노천 pit와 유사하거나 분뇨가 축적됨에 따라 건조되도록 운영되도록 설계됨. 후자는 고층 분뇨 처리 시스템으로 알려져 있으며 적절하게 설계되고 작동되면 일종의 수동 야적식 퇴비화가 된다.
호기성 처리	강제 혹은 자연 통기를 거쳐 액체 상태로 수집된 분뇨의 생물학적 산화법. 자연통기는 호기성 임의성 안정화지 및 습지 시스템에 한정되며 주로 광합성에 기인한다. 따라서 이러한 시스템은 전형적으로 기간 동안 태양빛을 받지 못하면 무산소성이 된다.

5. 가축분뇨 처리과정 중 직접적 N₂O 발생

○ Tier 1

IPCC96과 IPCC06 계산법에서 N₂O 배출계수와 질소배설량에 대한 차이가 존재한다. Tier 1 방법은 각각의 분뇨처리 방법의 배출계수를 알아야 하며, IPCC의 N₂O 배출계수는 다음의 표들에서 볼 수 있다(Table 15~20).

Table 15. 분뇨처리방법에서의 N₂O 기본 배출계수 (IPCC96)

분뇨처리방법	배출계수 (EF ₃)
혐기적 저장조	0.001 (<0.002)
액상저장시설	0.001 (<0.001)
매일 살포	0.0 (no range)
건조보관	0.02 (0.005~0.03)
목초지	0.02 (0.005~0.03)
기타	0.005

Table 16. 분뇨 처리로부터 직접적인 N₂O 배출계수 기본

시스템	정의		EF ₃ [kg N ₂ O-N (kg 질소배설) ⁻¹]	EF ₃ 의 불확도 범위	출처
목초지/ 방목지/ 방목장	목장과 가축을 방목하는 구역에서 축적되는 분뇨를 의미한다.		경작지와 농장, 방목 구역, 작은 목장에 놓인 분뇨와 관계된 직접적, 간접적인 N ₂ O 배출은 토양으로부터의 N ₂ O 배출에서 취급된다.		
일일 살포	분뇨는 일상적으로 사육시설에서 제거되고 목초지나 농장에 24시간 안에 뿌려진다. 토지 살포에 의한 N ₂ O 배출은 농업 토양 범주 하에서 커버된다.		0	적용 불가능	IPCC 전문가 그룹의 견해 (공동의 장, 편집자, 전문가; 분뇨 처리로부터의 N ₂ O 참조)
고형물 저장	일반적으로 가축분뇨를 퇴적시켜 몇 개월간 저장한다. 증발에 의해 습기를 잃는다.		0.005	2배	Amon et al. (2001)과 협력한 IPCC 전문가 그룹견해, 이는 N ₂ O-N(kg N-1) 0.0027~0.01kg의 범위의 배출 보임
건조장	상당한 식물성 커버가 없는 포장되거나 포장되지 않은 열린 사육장에 분뇨를 쌓고 일정기간마다 제거한다. 건조 부지는 대부분 전형적으로 건조기후대에서 발견되나 습윤지대에서도 사용		0.02	2배	Kulling (2003)과 협력한 IPCC 전문가 그룹의 견해
액체/슬러리	분뇨는 배설된 채로 액상으로 최소한의 물의 추가와 함께 탱크에 저장되거나 연못에 묻는다.	자연적인 딱딱한 덮개 있음	0.005	2배	Sommer et al.(2000)과 협력한 IPCC 전문가 그룹의 견해
		덮개 없는 혐기성 lagoon	0	적용 불가능	다음의 연구들과 협력한 IPCC 전문가 그룹 견해: Harper et al.(2000), Lague et al.(2004), Monteny et al.(2001), Wagner-Riddle and Marinier (2003). 배출은 스템 안에서 일어나는 질화 과정과 탈질화 과정의 낮은 가능성과 함께 이 시스템으로 들어가는 질소의 산화된 형태가 없는 것에 기초하여 무시할 만하다고 여겨진다.

시스템	정의	EF ₃ [kg N ₂ O-N (kg 질소배설) ⁻¹]	EF ₃ 의 불확도 범위	출처
덮개없는 혐기성 lagoon	혐기성 늪은 폐기물을 안정화하고 저장하기 위한 조합된 목적으로 설계된다. 늪은 보통 관련된 제한된 시설에서 늪으로 분뇨를 제거하기 위해서 사용된다. 혐기성 늪은 기후에 따라 휘발성 고체 부하율과 다른 운영적 인 계수다양한 길이로 설계 된다 (1년~그 이상). 슬지로부터의 물은 화장실용, 관개, 분뇨용으로 재활용된다.	0	적용 불가능	다음의 연구들과 협력한 IPCC 전문가 그룹의 견해: Harper et al.(2000), Lague et al.(2004), Monteny et al.(2001), Wagner-Riddle and Marinier (2003). 배출은 시스템 안에서 일어나는 질화 과정과 탈질화 과정의 낮은 가능성과 함께 이 시스템으로 들어가는 질소의 산화된 형태가 없는 것에 기초하여 무시할 만하다고 여겨진다.
분뇨 pit	분뇨의 수집과 저장은 보통 적은 물 또는 물이 없이 일반적으로 축사의 지하에서 이루어진다.	0.002	2배	다음의 연구들과 협력한 IPCC 전문가 그룹의 견해: Amon et al. (2001), Kulling (2003), 그리고 Sneath et al. (1997)

Table 17. 분뇨 처리로부터 직접적인 N₂O 배출계수 기본(계속)

시스템	정의		EF ₃ [kg N ₂ O-N (kg 질소배설)-1]	EF ₃ 의 불확도 범위	출처
혐기성 소화조	혐기성 소화조는 유기물을 미생물이 분해하며 CH ₄ 과 CO ₂ 를 배출하며 이를 통해 폐기물의 안정화를 이룬다. 이러한 발생 기체는 회수되어 불태우거나 연료로 사용한다.		0	적용 불가능	다음의 연구들과 협력한 IPCC 전문가 그룹 견해: Harper et al.(2000), Lague et al. (2004), Monteny et al.(2001), Wagner-Riddle and Marinier (2003). 배출은 시스템 안에서 일어나는 질화과정과 탈질화 과정의 낮은 가능성과 함께 시스템으로 들어가는 질소의 산화된 형태가 없는 것에 기초하여 무시할 만하다고 여겨진다.
연료로써 또는 폐기물로써 소각	대변은 들판에 배설되며 건조시켜 연료로 사용한다.		대변을 태우는 것과 연관된 배출은 대변이 연료로 이용된다면 IPCC 범주 ‘연료 연소’ 하에서, 대변이 에너지 회수 없이 소각된다면 IPCC 범주 ‘폐기물 소각’ 하에서 보고 된다.		
	소변 N은 목장에 퇴적된다.		농업용 토양과 목장, 방목구역, 작은 방목장에 퇴적되는 소변에 관련된 직접적이고 간접적인 N ₂ O 배출은 관리된 토양으로부터의 N ₂ O 배출로 다루어진다.		
소와 돼지의 깊은 깔짚	분뇨가 축적됨에 따라 바닥 깔짚은 가축 생산과정 동안 연속적으로 습기를 흡수하며 새로운 깔짚이 추가된다. 6-12개월간 가능하다. 분뇨 처리 시스템은 건조 부지 또는 목장과 조합될 수 있다.	혼합 없음	0.01	2배	Sommer and Moller (2000), Sommer et al.(2000), Amon et al. (1998), Nicks et al. (2003)에 기초한 평균값
		활발한 혼합	0.07	2배	Nicks et al.(2003), 그리고 Moller et al.(2000)에 기초한 평균값. 어떤 문헌들은 잘 유지되고(maintained), 활발한 혼합이 일어나는 것을 위해 20% 높은 값을 인용한다. 그러나 그런 시스템들은 전형적이지 않은 암모니아 처리를 포함.
용기내 퇴비화	강제적 공기 주입과 지속적인 혼합이 이루어지는 enclosed channel에서 전형적인 퇴비화		0.006	2배	IPCC 전문가 그룹 견해. 고정된 더미와 비슷할 것으로 기대.
정치식 퇴비화	강제적 공기 주입을 하고 혼합하지는 않는 파일에서의 퇴비화		0.006	2배	Hao et al.(2001)

시스템	정의	EF ₃ [kg N ₂ O-N (kg 질소배설)-1]	EF ₃ 의 불확도 범위	출처
집중 야적식 퇴비화	혼합과 공기 주입을 위한 규칙적인 뒤집음이 있는 건조 줄의 퇴비화	0.1	2배	IPCC 전문가 그룹의 견해. 배출은 전환 빈도의 함수이므로 건조 줄의 강한 퇴비화 작용보다 클 것으로 기대됨.
수동 야적식 퇴비화	혼합과 공기 주입을 위한 때때로의 뒤집음이 있는 창에서의 퇴비화	0.01	2배	Hao et al.(2001)
깔짚을 쓰는 가금류 분뇨	깊은 바닥 깔개 시스템과 유사함. 전형적으로 모든 종류의 닭고기 생산용 유형에서 사용한다.	0.001	2배	질화/탈질화에서의 질소 유효성이 제한된 시스템으로부터의 암모니아의 높은 손실량에 기초한 IPCC 전문가 그룹 견해
깔짚을 쓰지 않는 가금류 분뇨	분뇨가 축적됨에 따라 분뇨를 말리기 위해 설계되고 운영됨.	0.001	2배	질화/탈질화에서의 질소 유효성이 제한된 시스템으로부터의 암모니아의 높은 손실량에 기초한 IPCC 전문가 그룹의 견해

Table 18. 분뇨 처리로부터 직접적인 N₂O 배출계수 기본(계속)

시스템	정의		EF ₃ [kg N ₂ O-N(kg 질소배설) ⁻¹]	EF ₃ 의 불확도 범위	출처
호기성 처리	액체 상태로 수집된 분뇨를 강제적이거나 자연적인 폭기와 함께 생물학적 산화를 시킨다. 자연적인 폭기는 호기성, 연못과 습지에 제한되고 우선적으로 광합성에 의존하므로 이러한 시스템은 전형적으로 태양광이 없는 곳에서는 기간 중에 무산소성 상태가 된다.	자연적 폭기 체계	0.01	2배	IPCC 전문가 그룹의 견해. 질화-탈질화는 N ₂ O 배출은 무시할만하고, 한 곳에 국한된 공업 폐수의 생물학적 처리 안에서 질소제거를 위해 널리 사용된다. 제한된 산화는 강제된 폭기 체계와 비교하여 배출을 증가시킬 수 있다.
		강제된 폭기 체계	0.005	2배	IPCC 전문가 그룹의 견해. 질화-탈질화는 N ₂ O 배출은 무시할만하고, 한 곳에 국한된 공업 폐수의 생물학적 처리 안에서 질소 제거를 위해 널리 사용된다.

Table 19. 질소 배설율의 기본값 (kg N animal⁻¹ year⁻¹) (IPCC96)

지역	축 종					
	젖소	다른 소	닭	양	돼지	기타
북미	100	70	0.6	16	20	25
서유럽	100	70	0.6	20	20	25
동유럽	70	50	0.6	16	20	25
오세아니아	80	60	0.6	20	16	25
라틴 아메리카	70	40	0.6	12	16	40
아프리카	60	40	0.6	12	16	40
중동/지중해	70	50	0.6	12	16	40
아시아/극동	60	40	0.6	12	16	40

Table 20. 질소 배설율의 기본값^a [kg N (1,000 kg animal mass)⁻¹ day⁻¹] (IPCC06)

가축의 범주	지역							
	북아메리카	서유럽	동유럽	오세아니아	라틴아메리카	아프리카	중동	아시아
젖소	0.44	0.48	0.35	0.44	0.48	0.60	0.70	0.47
다른 소	0.31	0.33	0.35	0.50	0.36	0.63	0.79	0.34
돼지 ^b	0.50	0.68	0.74	0.73	1.64	1.64	1.64	0.50
매매	0.42	0.51	0.55	0.53	1.57	1.57	1.57	0.42
번식	0.24	0.42	0.46	0.46	0.55	0.55	0.55	0.24
가금류	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
암탉 ≥1 yr	0.83	0.96	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
어린 암탉	0.62	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
기타 닭	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
어린 닭	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
칠면조	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
오리	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
양	0.42	0.85	0.90	1.13	1.17	1.17	1.17	1.17
염소	0.45	1.28	1.28	1.42	1.37	1.37	1.37	1.37
말 (그리고 노새, 나귀)	0.30	0.26	0.30	0.30	0.46	0.46	0.46	0.46
낙타 ^c	0.38	0.38	0.38	0.38	0.46	0.46	0.46	0.46
물소 ^c	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
밍크와 긴털 족제비 (kg N head ⁻¹ yr ⁻¹) ^d	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59
토끼 (kgN head ⁻¹ yr ⁻¹)	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10
여우와 미국너구리 (kg N head ⁻¹ yr ⁻¹) ^d	12.09	12.09	12.09	12.09	12.09	12.09	12.09	12.09

이 산정에서의 불확도는 ±50%

^a : 1996 IPCC 가이드라인에서 요약, 1997; 유럽 환경청(European Environmental Agency), 2002; USA EPA 국가 암모니아(NH₃) 인벤토리 보고서 초안, 2004; 그리고 2004년에 UNFCCC 사무국에 제출된 아넥스 원 국가들(별첨I Parties)의 온실가스 인벤토리의 자료.

^b : 90%의 매매 돼지와 10%의 사육 돼지의 산정된 국가 개체수에 기초한 돼지의 질소 배출.

^c : 유럽 환경청(European Environmental Agency)에서 수정, 2002.

^d : Hutchings et al.의 자료, 2001.

그리고 분뇨 처리 시스템 데이터의 기본값(Table 12, Table 13)을 이용한다. Eq 3. 은 가축분뇨 처리과정의 직접적 N₂O 발생량 계산식이며 식 안에 필요한 배출계수가 나타나 있다.

Eq 3. 가축분뇨 처리로부터 직접적인 N₂O 배출량 (IPCC96, IPCC06)

$$N_{2O\ D} = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} \cdot N_{ex(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \right] \cdot EF_{3(S)} \right] \cdot \frac{44}{28}$$

N₂O_{D(mm)} = 국가 내에서 분뇨 처리로부터의 직접적인 N₂O 배출, kg N₂Oyr⁻¹

N_(T) = 국가 내에서 가축 종류와 분류에 따른 두수

N_{ex(T)} = 국가 내에서 가축 당 배출하는 연 평균 질소량, kg N 가축⁻¹yr⁻¹

MS_(T,S) = 국가 내에서 분뇨 처리 시스템 S안에서 관리하는 각각의 가축 수의 총 연간 배출량의 부분

EF_{3(s)} = 국가 내에서 분뇨 처리 시스템 S로부터 직접적인 N₂O 배출계수, 분뇨처리 시스템 S의 kg N₂O-N kg⁻¹ N

S = 분뇨 처리 시스템

T =가축의 종류/ 분류

44/28 = N₂O-N을 N₂O로 전환

○ Tier 2

Tier 2 방법은 Tier 1과 같은 계산방법을 따르나 일부 혹은 모든 변수들에서 국가 특성 데이터를 이용한다.

○ Tier 3

Tier 3 방법은 국가 특성 방법에 기반을 둔 IPCC 계산법의 대안이다. 예를 들면, 처음 사료 급여부터 마지막 사료 급여까지의 질소공급량에 기반한 질소의 질량보존법을 이용하여 Tier 3 방법으로 이용할 수 있다. Tier 3 방법은 측정과정을 명확하게 설명할 수 있어야 한다.

6. 가축분뇨 처리과정 중 간접적 N₂O 발생

분뇨가 처리되는 장소에서 다른 형태의 질소(예, 암모니아와 질소산화물)의 손실이 있을 것이다. 휘발성 암모니아 형태의 질소는 분뇨처리지역으로부터 바람이 불어가는 지역에 축적되며 간접적인 N₂O 배출을 일으킨다. 배설되고, 분뇨처리시설에서 관리되고, 최종적으로 토양에 적용하는 분뇨의 질소를 추적하기 위해 질량보존적 접근 방법인 Tier 3을 사용하는 것이 좋다.

○ Tier 1

Tier 1은 가축분뇨 처리시설에서 관리되는 질소량과 가축분뇨 처리시설의 질소산화물과 암모니아의 형태로 휘발되는 질소량에 의해 계산할 수 있다. 질소 배출 데이터 기본값 (Table 21), 분뇨 처리 시스템 데이터 기본값 (Table 12, Table 13), 그리고 휘발에 의한 가축분뇨 처리시설에서 질소 손실의 분율 기본값은 아래 표에 달려있다.

Table 21. 분뇨 처리로부터 NH₃와 NO_x 휘발로 인한 질소 손실량 기본값(IPCC06)

가축 유형	분뇨 처리 시스템 (MMS) ^a	N-NH ₃ 와 N-NO _x 의 휘발로 인한 MMS로부터의 질소 유실량 (%) ^b FracGasMS (FracGasMS의 범위)
돼지	혐기성 늪	40% (25-75)
	구덩이 저장소	25% (15-30)
	깊은 깔짚	40% (10-60)
	액체/슬러리	48% (15-60)
	고체 저장소	45% (10-65)
젖소	혐기성 늪	35% (20-80)
	액체/슬러리	40% (15-45)
	구덩이 저장소	28% (10-40)
	건조 부지	20% (10-35)
	고체 저장소	30% (10-40)
	매일 살포	7% (5-60)
가금류	깔짚을 쓰지 않는 가금류	55% (40-70)
	혐기성 늪	40% (25-75)
	깔짚을 쓰는 가금류	40% (10-60)
다른 소	건조 부지	30% (20-50)
	고체 저장소	45% (10-65)
	깊은 깔짚	30% (20-40)
기타 ^c	깊은 깔짚	25% (10-30)
	고체 저장소	12% (5-20)

^a 분뇨 처리 시스템은 여기서 주택과 마지막 저장 체계에서 관계 있는 질소 유실량을 포함한다.
^b IPCC 전문가 그룹의 견해와 다음의 출처들에 기초한 휘발률: Rotz (2003), Hutchings *et al.* (2001), U.S.EPA (2004).
^c 기타는 양, 말, 그리고 모피 가축을 포함한다.

IPCC96 계산법에서 휘발에 의한 간접적 N₂O 배출량, IPCC06 계산법에서 휘발에 의한 질소 손실량과 이를 통해 휘발에 들어간 간접적 N₂O 배출량은 아래 Eq 4. 에서 계산할 수 있다.

Eq 4. 휘발에 의한 질소 손실량과 이를 통해 휘발에 들어간 간접적 N₂O 배출량

IPCC96

$$N_2O_{(G)} = (N_{FERT} \times Frac_{GASF} + N_{EX} \times Frac_{GASM}) \times EF_4$$

N₂O_(G) = 휘발된 NH₃와 NO_x로 인한 간접적 N₂O 배출량

Frac_{GASM} = 배설된 질소량에서 NH₃와 NO_x로 휘발되는 질소의 비율

EF₄ = 휘발된 질소에 의한 간접적 N₂O 배출계수 (kg N₂O-N/kg NH₃-N and NO_x-N)

IPCC06

$$N_{volatilization - MMS} = \sum_S \sum_T [N_{(T)} \times N_{ex(T)} \times MS_{(T,S)}] \times \left(\frac{Frac_{GasMS}}{100} \right)_{(T,S)}$$

N_{volatilization-MMS} = NH₃와 NO_x로 손실되는 분뇨의 질소량, kg N yr⁻¹

N_(T) = 국가 내에서 가축 종류와 분류에 따른 두수

N_{ex(T)} = 국가 내 가축 당 배출하는 연평균 양, kg N 가축⁻¹ yr⁻¹

MS_(T,S) = 국가 내에서 분뇨 처리 시스템 S 안에서 관리하는 각각의 가축 수의 총 연간 배출량의 부분, 단위 없음

Frac_{GasMS} = 분뇨 처리 시스템 S안에서 NH₃와 NO_x로 휘발되는 가축 분류 T에서, 처리된 분뇨의 질소 백분율, %

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilization - MMS} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28}$$

N₂O_{G(nm)} = 국가 내에서 분뇨 처리로부터의 N의 휘발 때문에 간접적인 N₂O 배출량, kg N₂O yr⁻¹

EF₄ = 토양과 물 표면의 대기상태의 N₂O 배출의 배출계수, kg N₂O-N (휘발된 kg NH₃-N + NO_x-N)⁻¹, 기본값 : 0.01 kg N₂O-N (kg NH₃-N + NO_x-N)⁻¹ (표 27).

○ Tier 2

국가들은 국가 고유의 환경을 반영하여 배출계수 산출의 불확도를 감소시키기 위해 Tier 2를 개발할 것이다. 분뇨 처리로부터의 직접적 N₂O 배출 측정 방법과 같이, Tier 2는 Tier 1과 같은 계산 방법을 사용하지만 부분적 혹은 모든 변수를 위해 국가 고유 데이터를 사용할 수 있다. Tier 2 방법은 국가에서 사용되는 축사와 분뇨처리시스템을 통한 질소의 흐름에 대한 자세한 정보가 필요하다.

다양한 분뇨관리시스템에서 leaching과 runoff 손실에 대한 극히 제한적인 측정값들이 있다. 일반적으로 가축이 drylot에 있을 때 leaching과 runoff로 가장 큰 질소 손실

을 발생한다. 건조한 기후에서, runoff 손실은 강우량이 많은 곳보다 더 적고 배설한 질소의 약 3~6%로 산출되고 있다. Eghball and Power, 1994). Bierman et al. (1999)의 연구에서는 runoff로 인한 손실은 배설량의 5~19%이고 10~16%는 땅속으로 스며든다고 (leaching) 하였는데, 다른 데이터들은 고형물 저장시 leaching을 통한 상대적으로 적은 질소 손실을 보였고(배설된 질소의 5%보다 적음) 또한 더 많은 손실도 발생했다(Rotz, 2004). 더 많은 연구가 이러한 손실이 발생하는 환경과 처리법, 그리고 예상되는 손실을 향상시키기 위해 필요하다. 아래 첫 식은 가축분뇨처리시설에서 leaching과 runoff에 따른 질소 손실 분율에 대한 국가 고유 정보가 있는 경우에 사용할 수 있다. 따라서 분뇨처리시설에서 leaching과 runoff로 질소 손실을 산출하는 것은 Tier 2와 3 방법의 변수로 고려된다. Leaching과 runoff 과정에서 N₂O 배출량은 아래 Eq 5, Eq 6, Eq 7. 에 나타나 있으며 배출계수는 아래 Table 22. 에 나타나 있다.

Eq 5. 토양으로부터의 유출(leaching/runoff)에 기인한 N 손실량 (IPCC96)

$$N_{LEACH} = (N_{FERT} + N_{EX}) \times \text{Frac}_{LEACH}$$

$$N_{2O_{GwAdw}} = N_{LEACH} \times EF_{5-g}$$

N_{leaching} = 토양으로부터 침출되어 손실되는 N

Frac_{leaching} = 유출로 인한 토양에 투입한 질소 손실에 대한 분율

EF_{5-g} = leaching/runoff의 배출계수 (kg N₂O-N/kg N_{leaching/runoff})

Eq 6. 가축분뇨 처리과정의 leaching/runoff에 기인한 N 손실량 (IPCC06)

$$N_{leaching-MMS} = \sum_S \left[\sum_T \left(N_{(T)} \cdot N_{ex(T)} \cdot MS_{(T,S)} \cdot \left(\frac{\text{Frac}_{leachMS}}{100} \right)_{(T,S)} \right) \right]$$

N_{leaching-MMS} = 분뇨 처리 시스템으로부터 침출되는 분뇨 질소의 양, kg N yr⁻¹

N_(T) = 국가에서 가축 종/범주 T의 두수

N_{ex(T)} = 국가에서 가축 종/범주 T의 두당 연 평균 질소 배설, kg N 가축⁻¹ yr⁻¹

MS_(T,S) = 국가에서 분뇨 처리 시스템 S에서 관리되는 가축 종/범주 T 각각에 대한 총 연간 질소 배출의 분율

Frac_{leachMS} = 분뇨의 토양과 액상 저장을 하는 동안 물에 씻겨 나가거나 침출에 기인한 가축 범주 T에 대한 분뇨 질소 손실의 백분율 (전형적으로 1-20%)

Eq 7. 가축분뇨 처리과정의 leaching/runoff에 기인한 간접적인 N₂O 배출량 (IPCC06)

$$N_2O_{L(mm)} = (N_{leaching-MMS} \cdot EF_5) \cdot \frac{44}{28}$$

N₂O_{L(mm)} = 분뇨 처리로부터 침출과 우수에 의해 씻김 등에 기인한 N₂O의 간접적인 배출, kg N₂O yr⁻¹

EF₅ = 침출과 우수에 의해 씻김으로부터 N₂O 배출을 위한 배출계수, kg N₂O-N/kg 침출 혹은 강우에 의해 씻겨나간 N (기본 값 0.0075 kg N₂O-N(kg N leaching/runoff)⁻¹

Table 22. 간접적 토양 N₂O 배출량을 위한 휘발 및 유실에 대한 배출계수

요인		기본 배출계수	불확도 범위
EF ₄ (질소 휘발 및 재축적) kg N ₂ O-N / (kg 휘발된 NH ₃ -N + NO _x -N)	IPCC96	0.01	0.002-0.02
	IPCC06	0.01	0.002-0.05
EF ₅ (유실) kg N ₂ O-N / (Kg 유실된 질소)	IPCC96	0.025	0.002-0.12
	IPCC06	0.0075	0.005-0.025

제5절 현장 실험장소 및 미생물 분석 방법

본 실험은 경기, 강원, 충청, 전라, 경상도의 5대 권역의 양돈농장과 1개 가축분뇨공공시설을 대상으로 하여 CH₄과 N₂O 배출량에 대한 실측 실험을 진행하였다(Fig 2).



Fig. 2. 5대 권역에 속하는 실험 대상 농장의 위치

1. 김제

전북 김제시 백산면에 위치한 농장으로 여름철부터 가을철(8월~11월)까지 연구를 수행하였으며, 비육돈 사육두수가 연 평균 2,000두를 유지하고 있다. 환기방식은 지붕강제환기방식을 사용하고 있으며, 분뇨 처리방식은 슬러리 피트형태로 분뇨를 저장하고 있다(Fig 3).



Fig 3. 전북 김제시 실험농가 돈사(왼쪽), 전북 김제시 실험농가 돈사 지붕(오른쪽)

○ 돈사에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

무창돈사 전체가 하나의 챔버이기 때문에 본 연구에는 Mega chamber 방법을 사용하였다. 신선한 가스를 일정하게 공급할 수 있도록 설계를 하였고 내부로 들어가는 공기와 돈사를 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기와 환기구(배기구)에서 나오는 가스를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량을 계산하였다(Fig 4).

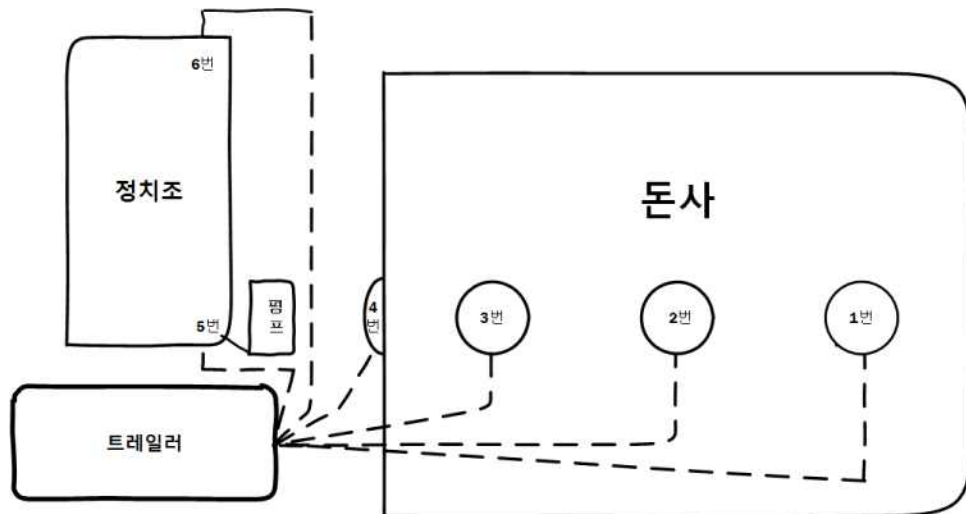


Fig 4. 무창돈사 배출구에서 샘플링 및 설계 모식도

○ 분뇨저장소(정치조)에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

분뇨저장소도 무창돈사와 같이 전체를 하나의 챔버로 Mega chamber법을 사용하였다. 내부로 들어가는 공기와 분뇨저장소(정치조)를 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기와 송풍기에서 나오는 가스를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량을 계산하였다(Fig 5).



Fig 5. 분뇨저장소(정치조) 및 송풍기에서 샘플링

○ CH₄과 N₂O의 배출량 계산식

$$Flux = \frac{FR \times \Delta c}{A}$$

위 식에서 FR은 floating chamber에 공급되는 공기량(m³/s), A는 floating chamber의 밑 부분 면적(m²), Δc는 floating chamber에 들어가기 전의 CH₄과 N₂O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경농도)와 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 간의 차이이다.

Δc 계산식은 $\Delta c = \frac{(c_{out} - c_{in}) \times P \times M}{T \times R}$ 으로, c_{out}은 floating chamber를 통과한 후 (floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 (ppm), c_{in}은 floating chamber에 들어가기 전의 CH₄과 N₂O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경 농도)(ppm), P는 공기압(Pa), M은 CH₄과 N₂O의 분자량, T는 분석공기의 절대온도(K), 그리고 R은 유니버설가스상수(8.314×10³ Pa m³/kmol/K)이다.

○ CH₄과 N₂O 분석

GC-PDD (Gas chromatography photo ionization detector) 분석 시스템을 사용하며, 본 실험을 위해 CH₄과 N₂O 분석을 위한 GC-PDD 분석기와 온실가스 발생 현장에서 가스를 샘플링하고 GC-PDD 분석기까지 가져오고 분배할 수 있는 분석 시스템 이용한다. GC-PDD는 현장 분석에 적합하도록 Helium Ionization Detector를 이용하여 안정성이 높고 낮은 전력을 사용하도록 한다. 진공펌프와 연결된 8-port multiposition valve를 이용하여, 여러 측정 대상에서 동시에 샘플링한 가스들을 valve 안에 있는 sample loop에 저장한 후 차례로 분석하여 동 시간대의 샘플 데이터를 축적하고 비교할 수 있도록 한다.

○ 이화학적 분석항목

- 고형물(Total solids, TS; Total volatile solids; TVS)과 부유물질(Suspended solid, SS), 화학적 산소요구량(chemical Oxygen Demand, COD), 암모니아성 질소(NH₄-N), 질소(nitrite % nitrate; NO_x-N), TKN(Total Kjeldahl Nitrogen), TKP(Total Kjeldahl Phosphorus)
- 샘플링 방법 : 샘플링 대상은 3곳(A, B, C)에서 샘플링을 하였다. 분뇨의 표면(Scum)을 상 중 하로 나누어 샘플링을 하였고 표면(Scum)아래 슬러리(깊이 30cm, 60cm 두 곳)를 샘플링 하였다(Fig 6).



Fig 6. 분뇨저장소(정치조) 샘플링

- 고형물과 부유물질 분석 : 분뇨를 샘플링한 후 실험실에서 American Public Health Association(1998) 방법을 사용하여 분석하였다.
- 질소 성분 분석 : 분뇨를 샘플링한 후 실험실에서 block digester(BD46, LACHAT)를 이용하여 소화한 후, 자동수질분석기(QuickChem 8500 series, LACHAT)로 Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) 분석하였다.
- 화학적 산소요구량 분석 : 분뇨를 샘플링한 후 실험실에서 Spectrophotometer(OPTIZEN

2120UV)를 이용하여 분석하였다.

2. 화천

강원 화천군 간동면에 위치한 농장이다. 육성돈 사육두수가 연 평균 1,700두를 유지하고 있다. 환기방식은 윈치 커튼 방식을 채택하였고 분뇨 분석은 육성돈사 내에 있는 슬러리를 샘플링하여 수행하였다.

○ 돈사에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

무창돈사 전체가 하나의 챔버이기 때문에 본 연구에는 Mega chamber 방법을 사용하였다. 내부로 들어가는 공기와 돈사를 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기와 지붕에 있는 환기구(배기구)에서 나오는 가스를 Pump(OIL-Less Diaphragm Pump)를 사용하여 수집하고 샘플링을 할 수 있도록 설계하였다(Fig. 1.). 수집된 공기를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량을 계산하였다(Fig 7).

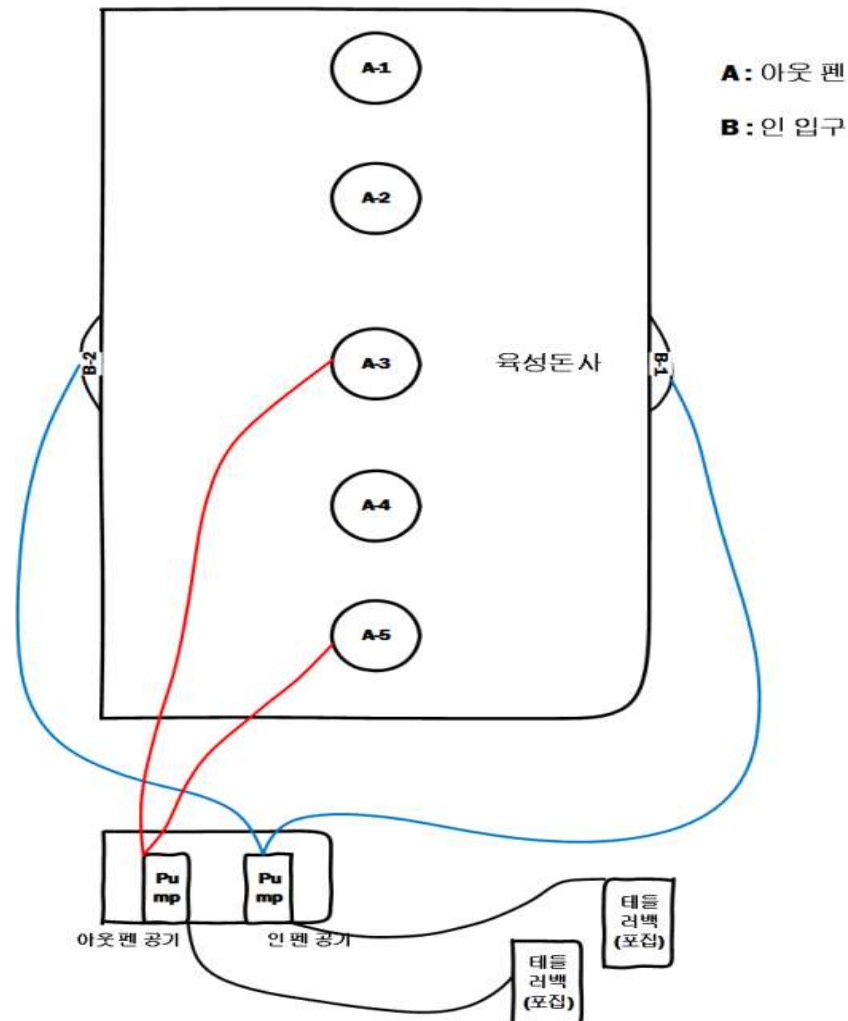


Fig 7. 샘플링 시스템

공기 샘플링은 일주일에 3번(월, 수, 금) 2번(오전, 오후)씩 2곳(지붕 환기구, 돈사 인입구)에서 하였고 포집한 뒤 실험실에 가져와 분석을 하였다.

제작된 가스 샘플링 시스템을 이용하여 가스를 채취 할 수 있었으며, 가스 시료 채취 시 정상상태 조건을 유지시키기 위하여 윈치커튼은 모두 닫고 포집 전 10분 정도 Pump(OIL-Less Diaphragm Pump)를 작동시킨 후 테들러백에 3분 동안 가스 시료를 포집 하였다(Fig 8).



Fig 8. 배기구, 인입구에서 샘플링

○ CH₄과 N₂O의 배출량 계산식

$$Flux = \frac{FR \times \Delta c}{A}$$

위 식에서 FR은 floating chamber에 공급되는 공기량(m³/s), A는 floating chamber의 밑 부분 면적(m²), Δc는 floating chamber에 들어가기 전의 CH₄과 N₂O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경농도)와 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 간의 차이이다.

Δc 계산식은 $\Delta c = \frac{(c_{out} - c_{in}) \times P \times M}{T \times R}$ 으로, c_{out}은 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 (ppm), c_{in}은 floating chamber에 들어가기 전의 CH₄과 N₂O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경 농도)(ppm), P는 공기압(Pa), M은 CH₄과 N₂O의 분자량, T는 분석공기의 절대온도(K), 그리고 R은 유니버설가스상수(8.314×10³ Pa m³/kmol/K)이다.

○ CH₄과 N₂O 분석

GC-PDD (Gas chromatography photo ionization detector) 분석 시스템 사용하고, Standard 범위는 1ppm, 과 100ppm 사이로 맞추어 Calibration을 설정하였다. 그리고 1 mL Syringe를 사용하여 테들러백에 포집된 샘플을 0.5mL 추출한 뒤 iGC7200(Intelligent Gas Chromatograph)에 injection하여 분석하였다.

○ 분뇨 주요항목 분석

온실가스 발생원인 분뇨의 성분 및 특성변화가 온실가스 발생량과의 상관관계를 알아보기 위하여 분뇨 시료를 비육사 피트 밑에서 1L 채수병에 채취하였다. 샘플을 실험실에 가져온 뒤 American Public Health Association(1998)방법과 자동수질분석기(QuickChem 8500 series, LACHAT), Spectrophotometer(OPTIZEN 2120UV)를 이용하여 TKN, NH₄-N, Nox-N, TS, VS, SS, CODmn의 분석을 수행하였다.

3. 사천

경남 사천시 웅현면에 위치한 일관사육 농장이다. 비육돈, 육성돈, 자돈, 분만돈, 임신돈 등 사육두수가 연 평균 1,500두를 유지하고 있다. 환기방식은 측면배기방식을 사용하며 모든 돈사에서 나오는 공기를 한곳에 모아 오존수 처리를 하여 악취저감을 기대한다. 가스 샘플링은 이 오존수 처리하는 장소에서 샘플링을 하였으며, 분뇨 분석은 비육사 내에 있는 슬러리를 샘플링 하여 수행하였다.

○ 돈사에서 배출되는 CH₄과 N₂O

무창돈사 전체가 하나의 챔버이기 때문에 본 연구에는 Mega chamber 방법을 사용하였다. 내부로 들어가는 공기와 돈사를 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기와 오존수 처리장 내 환기구(배기구)에서 나오는 가스를 Pump(OIL-Less Diaphragm Pump)를 사

용하여 수집하고 샘플링을 할 수 있도록 설계하였다(Fig 9). 수집된 공기를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량을 계산하였다.

공기 샘플링은 일주일에 3번(월, 수, 금) 2번(오전, 오후)씩 2곳(오존수 처리장, 돈사 인입구 펜)에서 하였고 포집한 뒤 실험실에 가져와 분석을 하였다. 제작된 가스 샘플링 시스템을 이용하여 가스를 채취 할 수 있었으며, 가스 시료 채취 시 정상상태 조건을 유지시키기 위하여 포집 전 3~5분 정도 Pump(OIL-Less Diaphragm Pump)를 작동시킨 후 테들러백에 3분 동안 가스 시료를 포집하였다(Fig 10).

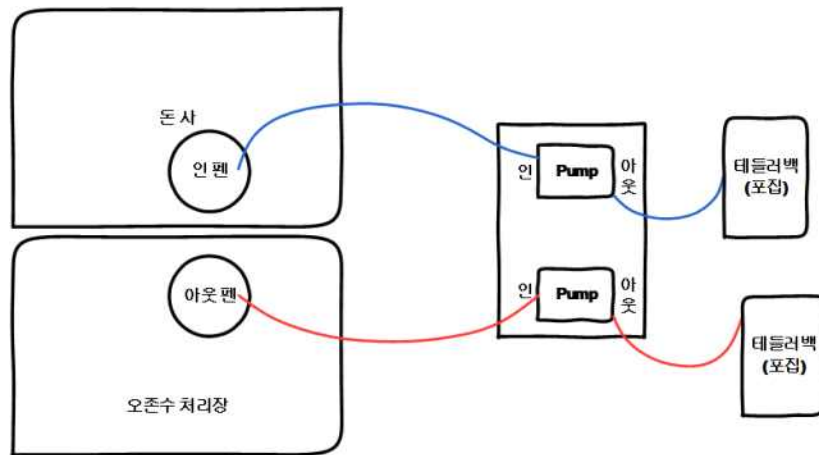


Fig 9. 샘플링 시스템



Fig 10. 오존수 처리장 내 배기구 및 인입구에서 샘플링

○ CH_4 과 N_2O 의 배출량 계산식

$$Flux = \frac{FR \times \Delta c}{A}$$

위 식에서 FR은 floating chamber에 공급되는 공기량(m^3/s), A는 floating chamber의 밑 부분 면적(m^2), Δc 는 floating chamber에 들어가기 전의 CH_4 과 N_2O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경농도)와 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH_4 과 N_2O 를 포함한 공기)의 CH_4 과 N_2O 농도 간의 차이이다.

Δc 계산식은 $\Delta c = \frac{(c_{out} - c_{in}) \times P \times M}{T \times R}$ 으로, c_{out} 은 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH_4 과 N_2O 를 포함한 공기)의 CH_4 과 N_2O 농도 (ppm), c_{in} 은 floating chamber에 들어가기 전의 CH_4 과 N_2O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경 농도)(ppm), P는 공기압(Pa), M은 CH_4 과 N_2O 의 분자량, T는 분석공기의 절대온도(K), 그리고 R은 유니버설가스상수($8.314 \times 10^3 \text{ Pa m}^3/\text{kmol/K}$)이다.

○ CH_4 과 N_2O 분석

GC-PDD (Gas chromatography photo ionization detector) 분석 시스템을 이용하고, Standard 범위는 1ppm, 과 100ppm 사이로 맞추어 Calibration을 설정하였다. 그리고 1 mL Syringe를 사용하여 테들러백에 포집된 샘플을 0.5mL 추출한 뒤 iGC7200(Intelligent Gas Chromatograph)에 injection하여 분석하였다.

○ 분뇨 주요항목 분석

온실가스 발생원인 분뇨의 성분 및 특성변화가 온실가스 발생량과의 상관관계를 알아보기 위하여 분뇨 시료를 비육사 피트 밑에서 1L 채수병에 채취하였다. 샘플을 실험실에 가져온 뒤 American Public Health Association(1998)방법과 자동수질분석기(QuickChem 8500 series, LACHAT), Spectrophotometer(OPTIZEN 2120UV)를 이용하여 TKN, $\text{NH}_4\text{-N}$, Nox-N , TS, VS, SS, CODmn의 분석을 수행하였다.

4. 홍천

본 연구에 사용되어진 공시 재료는 강원도 홍천군 북방면에 위치한 가축분뇨 공공처리시설이다. 가스 샘플링은 아웃 펜이 설치 된 장소(음식 고액분리, 분뇨 고액분리, 탈취조)와 인입구(건물인입구, 주차장)에서 샘플링을 하였다.

○ 가축분뇨 공공처리시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

가축분뇨 공공처리시설 전체가 하나의 챔버이기 때문에 본 연구에는 Mega chamber 방법을 사용하였다. 내부로 들어가는 공기와 가축분뇨 공공처리시설을 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기(건물인입구, 주차장)와 배기구(음식고액분리, 분뇨고액분리, 탈취조)에서 나오는 가스를 Pump(DAP-3043, DC12V)를 사용하여 수집하고 샘플링을 하였다 (Fig 11). 수집된 공기를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량을 계산하였다.

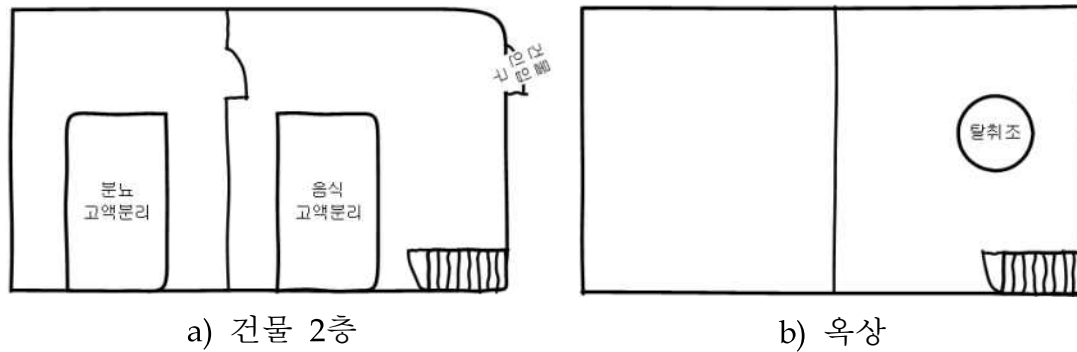


Fig 11. 가축분뇨 공공처리시설 건물 모식도

기 샘플링은 일주일에 3번(월, 수, 금), 1번(오후), 5곳(탈취조, 분뇨고액분리, 음식고액분리, 건물인입구, 주차장)에서 하였고 ump(DAP-3043, DC12V)를 이용하여 가스를 채취할 수 있었으며, 가스 시료 채취 시 정상상태 조건을 유지시키기 위하여 포집 전 2~5분 정도 Pump(DAP-3043, DC12V)를 작동시킨 후 테들러백에 3분 동안 가스 시료를 포집하였다(Fig 12).



a) 건물인입구



b) 탈취조



c) 분뇨 고액분리



d) 음식 고액분리

Fig 12. 인입구(a) 및 아웃 펜(b,c,d)에서 샘플링

○ CH₄과 N₂O의 배출량 계산식

$$Flux = \frac{FR \times \Delta c}{A}$$

위 식에서 FR은 floating chamber에 공급되는 공기량(m³/s), A는 floating chamber의 밑 부분 면적(m²), Δc는 floating chamber에 들어가기 전의 CH₄과 N₂O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경농도)와 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 간의 차이이다.

Δc 계산식은 $\Delta c = \frac{(c_{out} - c_{in}) \times P \times M}{T \times R}$ 으로, c_{out}은 floating chamber를 통과한 후 (floating chamber가 포집한 CH₄과 N₂O를 포함한 공기)의 CH₄과 N₂O 농도 (ppm), c_{in}은

floating chamber에 들어가기 전의 CH_4 과 N_2O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경 농도)(ppm), P 는 공기압(Pa), M 은 CH_4 과 N_2O 의 분자량, T 는 분석공기의 절대온도(K), 그리고 R 은 유니버설가스상수($8.314 \times 10^3 \text{ Pa m}^3/\text{kmol/K}$)이다.

○ CH_4 과 N_2O 분석

GC-PDD (Gas chromatography photo ionization detector) 분석 시스템 이용하고 Standard 범위는 1ppm, 과 100ppm 사이로 맞추어 Calibration을 설정하였다. 그리고 1mL Syringe를 사용하여 테들러백에 포집된 샘플을 0.5mL 추출한 뒤 iGC7200(Intelligent Gas Chromatograph)에 injection하여 분석하였다.

5. 포천

○ 돈사에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

무창돈사 전체가 하나의 챔버이기 때문에 내부로 들어가는 공기와 돈사를 거쳐 나오는 공기를 샘플링하기 위해 외부 공기와 환기구(배기구)에서 나오는 가스를 샘플링하고 분석하여 그 농도 차이를 이용하여 배출량 계산(메가챔버법 이용)하였다(Fig 13).



Fig 13. 무창돈사 인입구 및 배출구에서 샘플링

○ 가축분뇨처리시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O

외부에 설치되어 있는 팬을 이용하여 floating chamber 내부의 공기를 교환하고, 이때 공기 인입구와 배기구에 샘플링 라인을 설치하여 샘플링(Floating chamber법 이용)하였다(Fig 14).

○ CH_4 과 N_2O 의 배출량 계산

$$Flux = \frac{FR \times \Delta c}{A}$$

위 식에서 FR 은 floating chamber에 공급되는 공기량(m^3/s), A 는 floating chamber의 밑 부분 면적(m^2), Δc 는 floating chamber에 들어가기 전의 CH_4 과 N_2O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경농도)와 floating chamber를 통과한 후(floating chamber가 포

집한 CH_4 과 N_2O 를 포함한 공기)의 CH_4 과 N_2O 농도 간의 차이이다.

Δc 계산식은 $\Delta c = \frac{(c_{out} - c_{in}) \times P \times M}{T \times R}$ 으로, c_{out} 은 floating chamber를 통과한 후 (floating chamber가 포집한 CH_4 과 N_2O 를 포함한 공기)의 CH_4 과 N_2O 농도 (ppm), c_{in} 은 floating chamber에 들어가기 전의 CH_4 과 N_2O 농도(floating chamber 주변 농도; 배경 농도)(ppm), P 는 공기압(Pa), M 은 CH_4 과 N_2O 의 분자량, T 는 분석공기의 절대온도(K), 그리고 R 은 유니버설가스상수($8.314 \times 10^3 \text{ Pa m}^3/\text{kmol/K}$)이다.



Fig 14. 포천농장 가축분뇨 처리시설. (좌) 폭기 가능 가축분뇨처리시설, (가운데) Floating chamber 설치, (우) Floating chamber 내 공기 공급 및 배기 장치

○ 가축분뇨 샘플링 및 주요항목 분석

- 샘플링 대상의 3곳 깊이에서 가축분뇨를 샘플링한 후 실험실에서 American Public Health Association(1998) 방법을 사용하여 분석
- 휘발성 고형물(volatile solid), 총 고형물(total solid), 수분함량, 부유고형물(SS), 질소 성분 분석
- 샘플링 대상의 3곳 깊이에서 가축분뇨를 샘플링한 후 실험실에서 American Public Health Association(1998) 방법, block digester(BD46, LACHAT)를 이용하여 소화한 후, 자동수질분석기(QuickChem 8500 series, LACHAT)로 Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) 분석

○ CH_4 과 N_2O 분석

GC-PDD (Gas chromatography photo ionization detector) 분석 시스템을 이용하여 분석하였으며, 본 실험을 위해 CH_4 과 N_2O 분석을 위한 GC-PDD 분석기와 온실가스 발생 현장에서 가스를 샘플링하고 GC-PDD 분석기까지 가져오고 분배할 수 있는 분석 시스템 이용하였다. GC-PDD는 현장 분석에 적합하도록 Helium Ionization Detector를 이용하여 안정성이 높고 낮은 전력을 사용하도록 하였다.

진공펌프와 연결된 8-port multiposition valve를 이용하여, 여러 측정 대상에서 동시

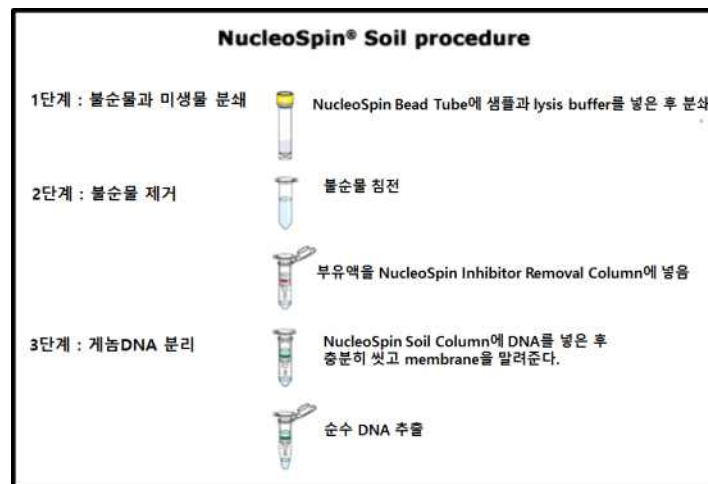
에 샘플링한 가스들을 valve 안에 있는 sample loop에 저장한 후 차례로 분석하여 동시간대의 샘플 데이터를 축적하고 비교할 수 있도록 하였다.

6. 미생물 분석

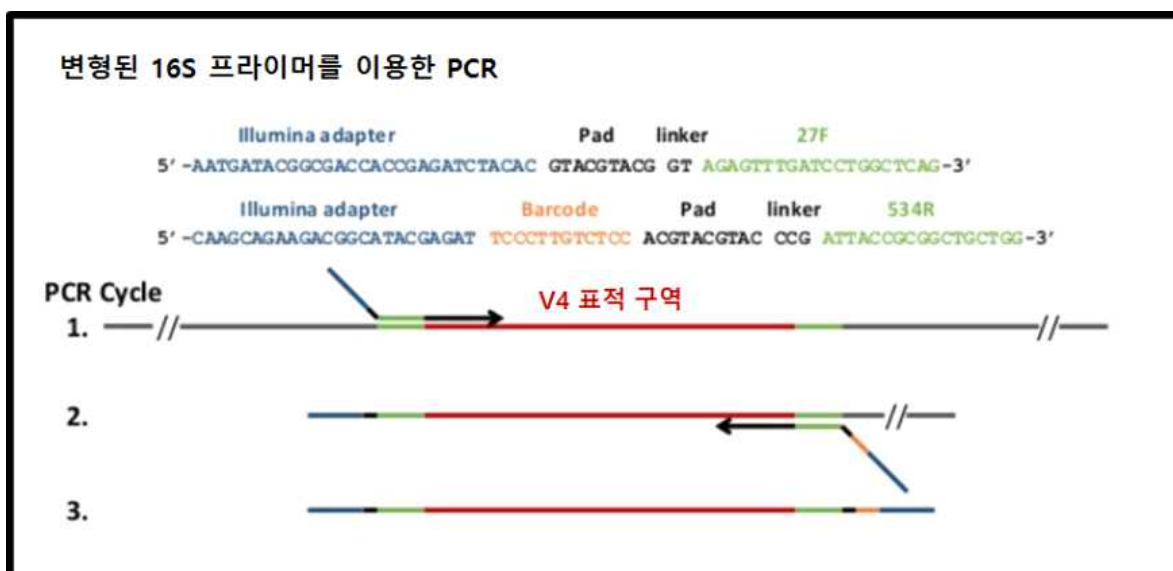
○ 미생물 군집 변화

가축분뇨 처리시설의 CH_4 , N_2O 등의 가스 배출은 미생물의 분해에 의해 발생하므로 미생물의 군집 변화가 배출 차이를 만들 수 있다. 그러나 가축분뇨 처리시설은 혐기, 호기가 동시에 존재하므로 미생물을 동정하여 분석하기가 어렵다.

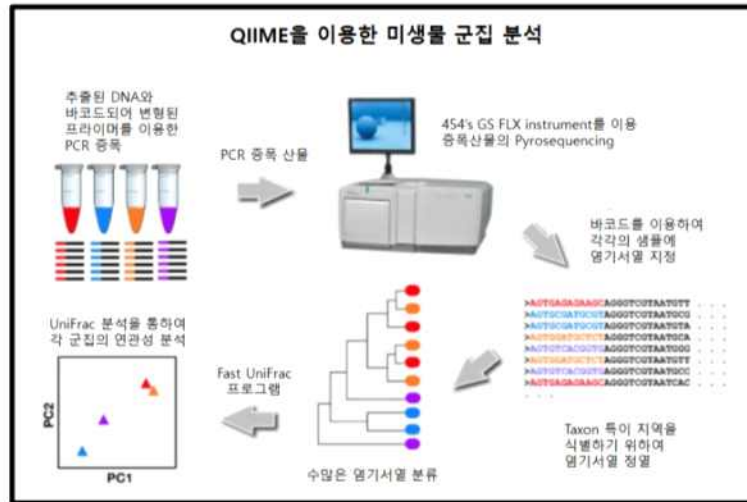
- Next Generation Sequencing (NGS)를 이용한 분석 방법
 - 돈분뇨에서 genomic DNA 추출



- Barcoded primer를 이용하여 추출된 genomic DNA에서 표적구역 증폭



- QIIME을 이용하여 미생물 군집 분석



7. IPCC 온실가스 인벤토리 가이드라인의 방법론 분석 및 적용방안

우리나라는 2020년까지의 온실가스 감축 목표는 온실가스배출전망치(BAU; Business As Usual) 대비 30%이고 그 중에서 농림어업부문은 5.2%이다. 이러한 감축 목표는 2015년에 2030년까지 37%로 상향 조정되었다. 이러한 감축 목표를 달성하기 위해 IPCC 지침을 기반으로 하여 정확한 국가 온실가스 인벤토리 배출량을 조사하여야 한다. 현재 우리나라는 1996 IPCC 지침을 사용하여 축산부문 온실가스 배출량을 계산하고 있지만, 더 발전된 2006 IPCC 지침을 적용하기 위한 노력이 필요하다. 축산부문에서 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침에서 카테고리는 장내발효부문과 가축분뇨처리부문으로 크게 두 가지로 분류된다. 활동자료는 3년간의 데이터를 사용하고 배출계수는 IPCC 기본값이나 직접 측정한 값을 사용한다. 메탄의 경우 장내발효부문과 가축분뇨처리부문 배출계수를 분리하여 산출한다. CH₄ 배출량의 계산은 가축사육두수와 배출계수의 곱으로 계산된다. Tier 1 수준에서 CH₄ 배출량 계산 시 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침의 공통점은 아래의 표와 같다(Table 23).

Table 23. Tier 1 수준에서 1996 IPCC GL과 2006 IPCC GL 비교

단계	CH ₄ 배출량 계산 : Tier 1 (1996, 2006 GL 공통점)
Step 1	활동도 데이터 결정 : Sub-categories (livestock population data : 3년간의 활동도 데이터 이용 추천
Step 2	배출계수 산출(직접 측정 혹은 기본값) - Estimate emission factors (EFs) : 메탄의 경우, 장내발효와 가축분뇨 처리과정 분리하여 EF 산출
Step 3	배출량 계산(Animal head in sub-categories x EF)

배출량을 계산할 때 활동자료의 결정 과정이 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침에서 차이가 난다. 1996 지침의 경우 활동자료의 결정이 cool, temperate, warm 간격으로 정해진 반면에, 2006 지침의 경우는 활동자료가 1℃ 간격으로 결정된다. 따라서, 2006 IPCC 지침을 사용하기 위해서는 climate zone에 따른 각 축종별 개체 수 및 가축분뇨 처리시설 데이터 필요하다. CH₄ 배출량 계산 시(Tier 1) 1996 IPCC 지침과 2006 지침의 다른 점은 아래의 표와 같다(Table 24).

Table 24.. Tier 1수준에서 1996 IPCC GL과 2006 IPCC GL 비교

단계	CH ₄ 배출량 계산 : Tier 1 (1996, 2006 GL 다른 점)
Step 1	활동자료 결정 <ul style="list-style-type: none"> • 1996GL : cool, temperate, warm • 2006GL : 1℃ 간격 • 2006GL 사용 위해 climate zone에 따른 각 축종별 개체 수 및 가축분뇨 처리시설 데이터 필요
Step 2	CH ₄ 배출계수 결정

배출계수 기본 값 또한 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침에서 차이가 난다. 장내발효의 경우 젖소와 한·육우의 경우 2006 IPCC 지침의 메탄 배출계수 기본 값이 1996 IPCC 지침의 기본 값과 차이가 난다(Table 25).

Table 25. 장내발효 과정의 주요 축종별 메탄 배출계수 (kg CH₄/마리/년)

	젖소	한·육우	돼지	닭
1996 GL (A)	118	47	1.5	NE
2006 GL (B)	121	53	1.5	NE
B/A	1.03	1.13	1.0	

가축분뇨처리부문의 경우도 배출계수 기본 값이 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침에서 차이가 난다. 젖소와 돼지의 경우 2006 지침의 배출계수 기본 값이 1996 배출계수 기본 값보다 높았고, 닭의 경우에는 2006 지침의 배출계수 기본 값이 1996 배출계수 기본 값보다 낮았다(Table 26).

Table 26. 가축분뇨 처리과정의 주요 축종별 메탄 배출계수 (kg CH₄/마리/년)

	젖소	한·육우	돼지	닭
1996 GL (A)	36	1	3	0.078
2006 GL (B)	58	1	8.38	0.0245
B/A	1.61	1.0	2.79	0.31

가축분뇨처리부문에서 N₂O 배출계수 결정에 사용되는 가축분뇨 내 질소량 배출단위가 1996 IPCC 지침과 2006 IPCC 지침에서 차이가 났다. 1996 IPCC 지침의 경우 (kg N/마리/년)이었고, 2006 IPCC 지침의 경우 (kg N/1,000kg 가축체중/일)이었다. 주요 축종의 가축분뇨 내 질소량을 (kg N₂O/마리/년)으로 비교했을 때, 주요 축종에서 모두 2006 IPCC 지침의 가축분뇨 내 질소량이 1996 IPCC 지침의 가축분뇨 내 질소량보다 낮았다(Table 27).

Table 27. 주요 축종의 가축분뇨 내 질소량 (kg N₂O/마리/년)

	젖소	한·육우	돼지	닭
1996 GL (A)	100	70	20	0.6
2006 GL (B)	67.9	39.6	17.4	0.51
B/A	0.68	0.57	0.87	0.85

2006 IPCC 지침을 적용할 때는 국가지역의 설정이 중요하며, 원칙적으로 아시아 개도국 또는 선진국의 기본계수를 적용 판단해야한다(국가 온실가스 인벤토리에 관한 2006년 IPCC 지침' 국내 적용을 위한 기본계획(관계부처 합동, 2014.8)).

1996 및 2006 IPCC 지침 대응 축산부문 국가 온실가스 통계량 DB검증 도구 개발에서 실행흐름도는 크게 입력과정, 처리과정, 출력과정으로 구분된다. 입력과정에서는 1996 및 2006 IPCC 지침에 준한 활동자료 및 배출계수를 입력 및 DB를 구축 과정을 거친다. 산정에 필요한 축적된 활동자료가 일괄 입력되고 당해년도 자료가 입력된다. 처리과정에서는 국가보고서용 및 공통보고양식에 맞는 형식 하에 DB 분리 및 산정과정을 거친다. 이 과정에서 각종 형식에 맞게 자료가 재분류 및 재계산되고 산정데이터 분석 및 동향 분석이 출력된다. 산정결과의 출력 및 산정단계 검토를 통해 자체 검증

되고 산정결과의 추이 및 분석이 실행된다(Fig. 15). 온실가스 통계량 검증 수행화면은 Fig 16과 같다.



Fig 15. 온실가스 통계량 산정 및 검증 실행흐름도

축산과학원 NIR 및 CRF 데이터 조회 프로그램 (Version 1.0)

파일열기 | 파일저장 | 검색시작 | 검색종료

데이터베이스 자료 조회

자료조회 시작 | [검색 시작 일자] | [검색 마지막 일자]

2014년 | 10월 | 27일 | 2014년 | 10월 | 27일

AUTO | SYNC | TIME

온실가스 배출량(CO2 ton)						
CO2 환산 ton	장내 발효	분뇨 처리	축산	분뇨 처리	축산	축산
	메탄	메탄	메탄	아산화질소	아산화질소	온실가스
1990	2,983,123	812,936	3,796,059	2,305,944	2,305,944	6,102,002
1991	3,025,637	830,510	3,856,147	2,378,508	2,378,508	6,234,655
1992	3,160,340	845,840	4,006,180	2,537,620	2,537,620	6,543,800
1993	3,421,232	890,811	4,312,042	2,782,483	2,782,483	7,094,525
1994	3,700,211	933,451	4,633,662	3,012,400	3,012,400	7,646,062
1995	3,948,988	974,352	4,923,340	3,222,300	3,222,300	8,145,640
1996	4,175,939	1,008,933	5,184,872	3,425,395	3,425,395	8,610,267
1997	4,336,783	1,037,277	5,374,060	3,581,207	3,581,207	8,955,267
1998	4,390,813	1,067,510	5,458,323	3,638,186	3,638,186	9,096,508
1999	4,151,045	1,085,747	5,236,792	3,516,059	3,516,059	8,752,851
2000	3,789,903	1,112,698	4,902,601	3,325,069	3,325,069	8,227,670
2001	3,406,699	1,135,629	4,542,329	3,131,149	3,131,149	7,673,478
2002	3,204,356	1,169,415	4,373,771	3,049,066	3,049,066	7,422,837
2003	3,110,860	1,189,227	4,300,087	3,025,657	3,025,657	7,325,744
2004	3,136,771	1,189,797	4,326,569	3,069,920	3,069,920	7,396,489
2005	3,204,450	1,185,253	4,389,703	3,154,426	3,154,426	7,544,129
2006	3,327,015	1,186,048	4,513,063	3,279,985	3,279,985	7,793,049

온실가스 통계량 | 장내발효 온실가스 배출량 | 사육두수(3년평균) | 장내발효 CH4 배출계수 | 분뇨처리 CH4 배출계수 | 분뇨처리 N2O 배출계수

데이터베이스 RDA(NIAS)

Fig 16. 온실가스 통계량 검증 수행화면

제6절 실험결과

1. 포천

○ 가축분뇨 저장시설의 분뇨 성분

정치조는 간헐폭기조에 비해 분석 성분이 모두 높게 나타났으며, 이는 정치조에 보관중인 가축분뇨를 간헐폭기조로 이송하여 처리하기 때문이다. 정치조의 샘플 분석 결과는 Table 28과 같다.

Table 28. 정치조 저장 가축분뇨 샘플 분석 결과

샘플명	TS(%)	VS(%)	SS(%)	VSS(%)	NH ₄ ⁺ -N	OP	TKN
					mg/L		
정치조	8.7±0.4	4.8±0.2	9.7±1.4	6.7±1.0	3,014.8±27.3	8.8±0.1	3,110.0±35.7
간헐 폭기조	2.5±0.1	1.5±0.1	2.2±0.2	1.6±0.2	2,305.3±13.1	8.2±0.1	2,495.2±15.5

○ 가축분뇨 저장시설에서 배출되는 CH₄

무폭기 정치조의 메탄 배출량($3.37 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 5.51$)이 간헐적 폭기가 이루어지는 저장 시설(간헐폭기조)에서의 메탄 배출량($2.98 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 2.97$)에서 보다 13% 더 많은 메탄 배출량과 표준편차를 보였다(Fig. 17).

무폭기 정치조의 경우 가축분뇨를 빼내는 등의 경우를 제외하고는 폭기 시설을 가동하지 않고, 간헐 폭기조는 하루에 한 번 2시간의 폭기를 수행하였으며(단, 6/11~6/25까지 폭기 시간을 증가하였음), 배출량의 변이 차이가 높게 나타났다. 최고 배출량이 $35.0 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ 에 달하였으며, 이는 heterogeneous한 특성을 잘 보여주었다. 간헐 폭기조의 경우 부족한 폭기량으로 인해 폭기의 효과를 보기 어려웠다. 하지만 폭기량 증가 기간(6/11~6/25)에는 상대적으로 메탄 배출량이 적었으며, 메탄 배출량 변이도 적었다(Fig. 18).

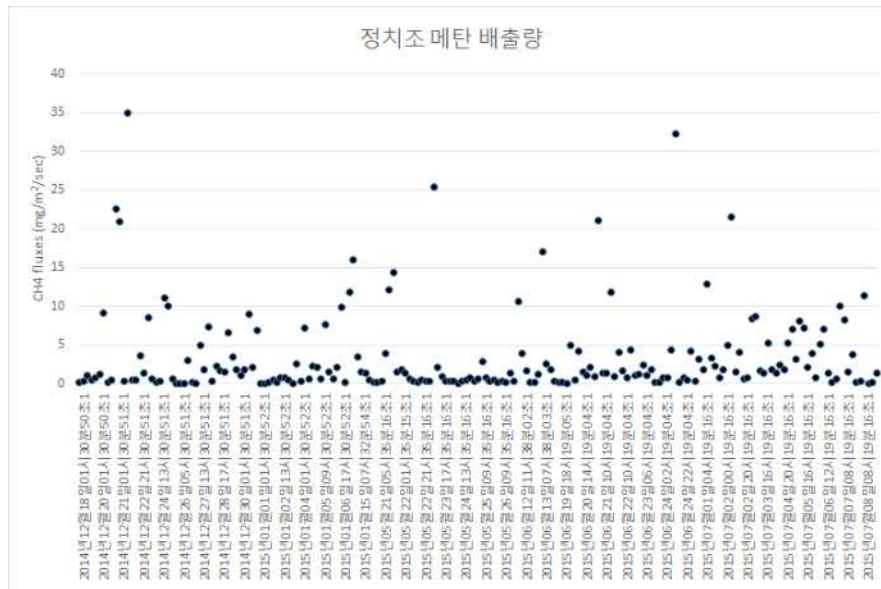


Fig. 17. 무폭기 정치조에서의 메탄 배출량

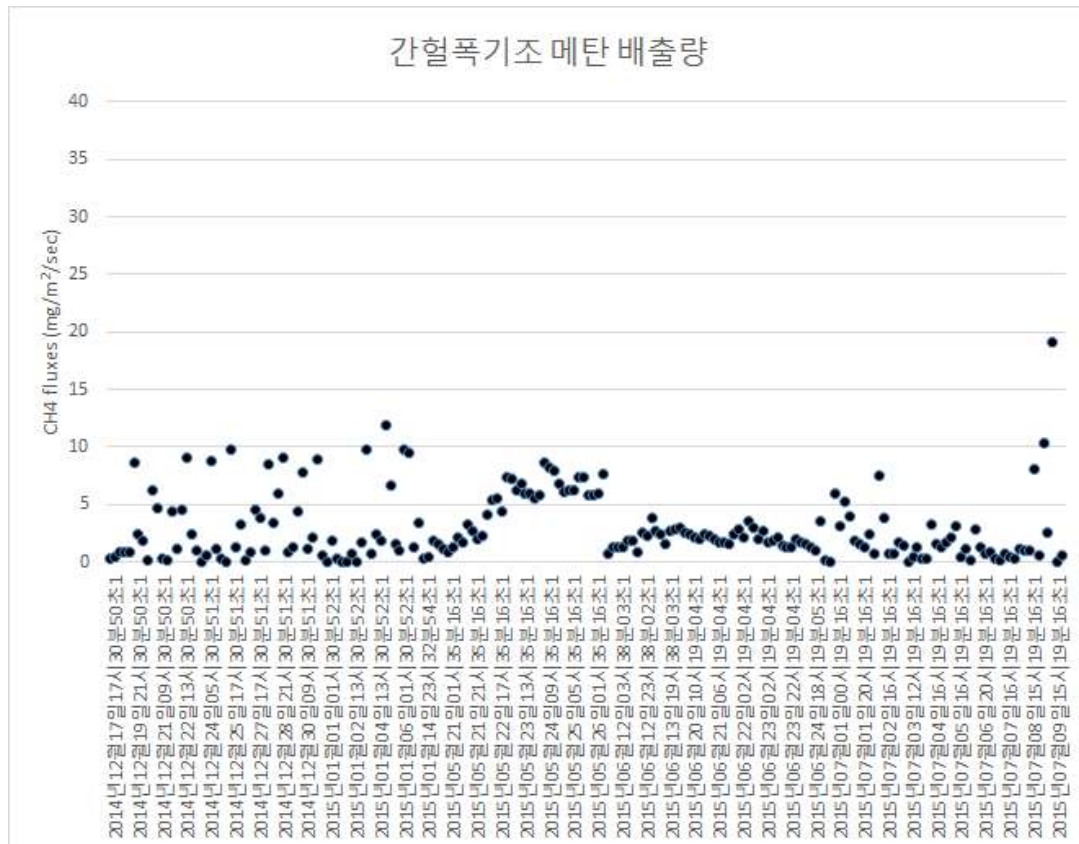


Fig. 18. 간헐 폭기조에서의 메탄 배출량

○ 돈사에서 배출되는 CH₄

돈사에서 배출되는 메탄 배출량은 $0.109 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.115$ 로 기록되었으며, 이는 무פק기 정치조의 3.2%, 간헐 폭기조의 3.66%였다. 돈사 내부의 slurry 저장시설의 경우 한 번이 batch가 끝난 후 가축분뇨저장시설로 저장 분뇨를 이송하기 때문에 장기간 보관을 하지 않았다. 저장 분뇨의 이송 이후에는 가축분뇨가 다시 저장되기 시작하므로 메탄 생성을 위한 조건이 이루어지지 않아 적은 양이 배출되지만, 시간이 지나면서 가축분뇨 저장량이 늘어나며 배출량이 증가되기 시작한다(Fig. 19).

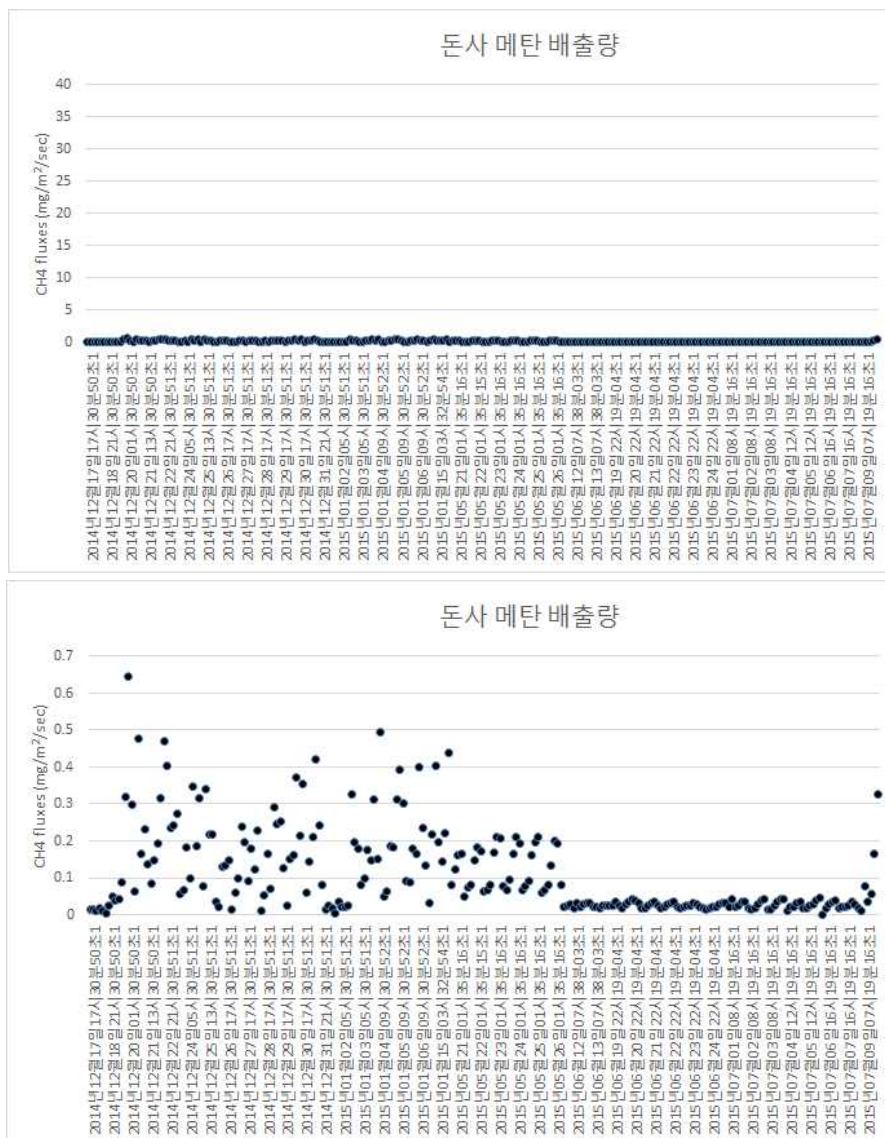


Fig. 19. 간헐 폭기조에서의 메탄 배출량. 가축분뇨 저장시설의 메탄 배출량 측정 범위와 맞춘 배출량 그래프(위) 및 확대도(아래)

○ 가축분뇨 저장시설 및 돈사에서 배출되는 N_2O

무폭기 정치조의 아산화질소 배출량은 $-0.0009 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.0349$ 이었고 간헐 폭기조에서의 아산화질소 배출량은 $0.0534 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.1555$ 이었다. 하지만, 무폭기 정치조와 간헐 폭기조의 경우 폭기량 증가 기간(6/11~6/25)에는 anoxic 환경 발생에 이로운 조건이 유지되어 다른 기간에 비해 상대적으로 많은 아산화질소 배출량을 보였으며 이 때의 메탄 배출량은 상대적으로 적었던 것으로 생각된다(Fig. 20).

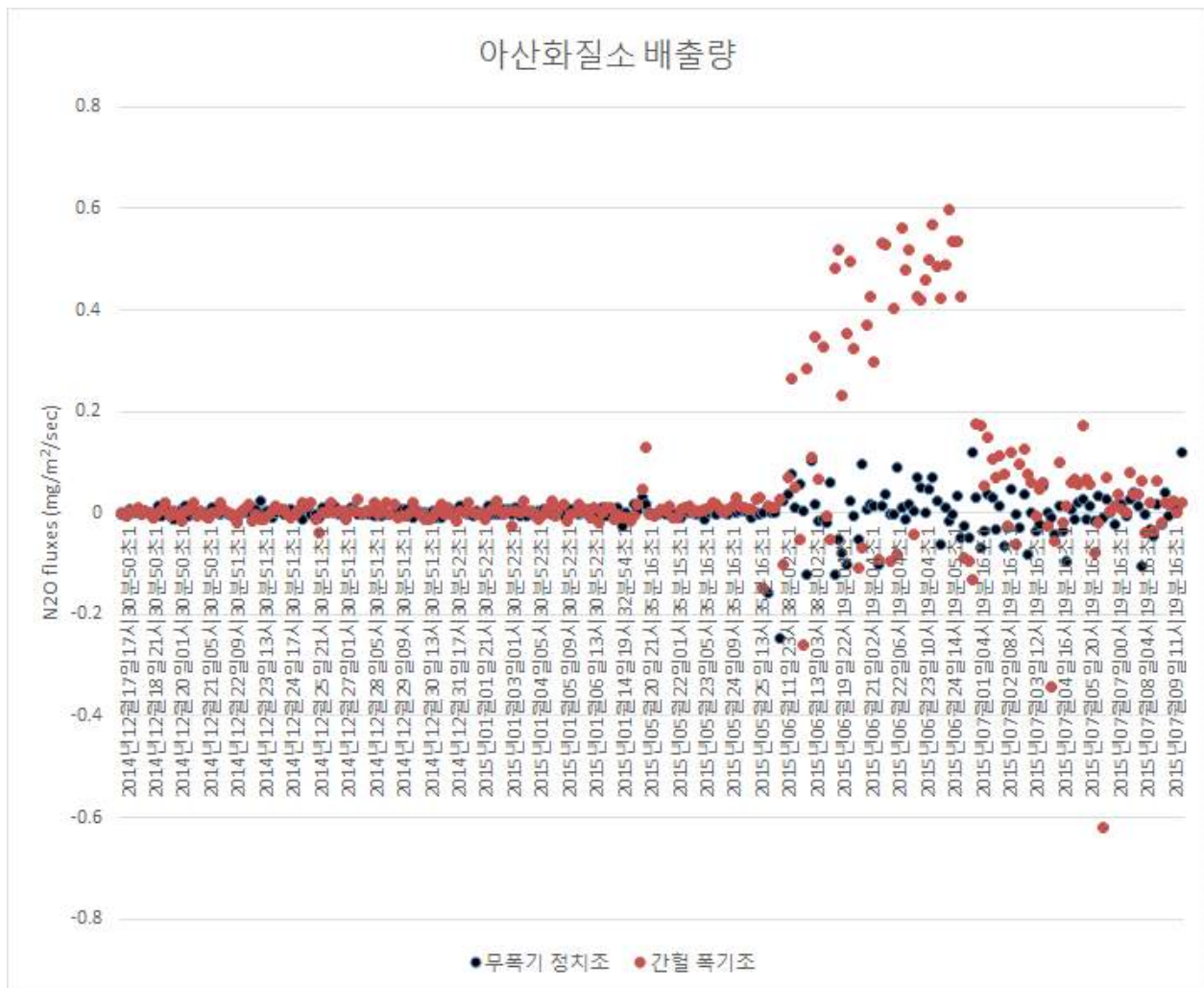


Fig. 20. 무폭기 정치조 및 간헐 폭기조의 아산화질소 배출량

돈사의 아산화질소 배출량은 $0.0025 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.0167$ 이었으나, 축사 내 slurry제거 이전($0.00434 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.00536$)과 이후($-0.00043 \text{ mg/m}^2/\text{s} \pm 0.01898$)에 배출량 패턴이 달랐다. 돈사의 경우, 가축분뇨가 slat에 머물러 있고 공기와 접촉하며 분해될 환경이 유지되므로 아산화질소의 배출이 가능하다. 이는 배출량이 지속적으로 $0 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ 이상으로 유지되는 것으로 알 수 있다. 돈사 청소 이후에는 변이가 많이 생기며 이는 돈사 내부 배출

량이 적어 농도차가 일정히 유지되지 않고 외부 환경에 영향을 많이 받기 때문에 발생한 것으로 생각된다(Fig. 21).

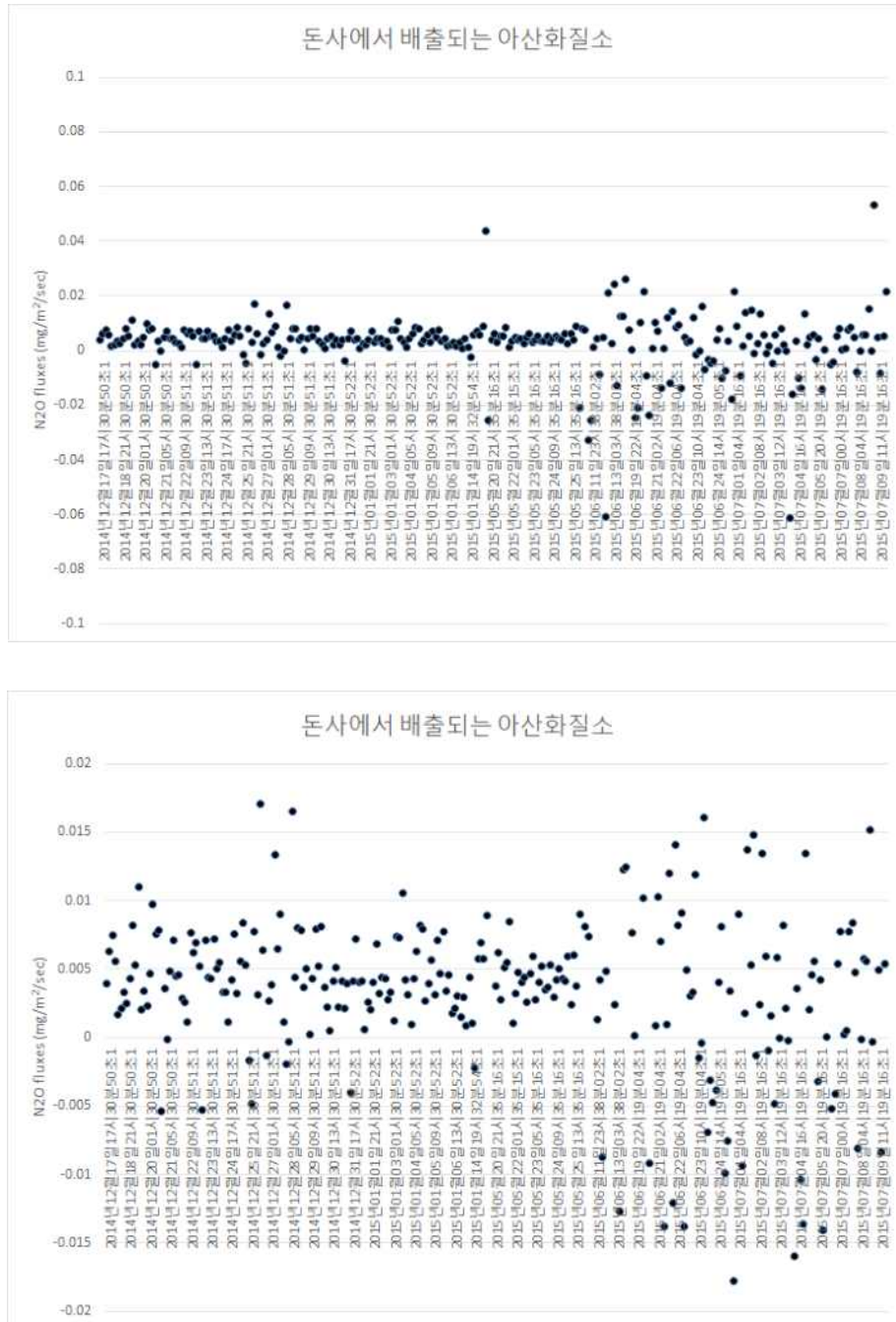


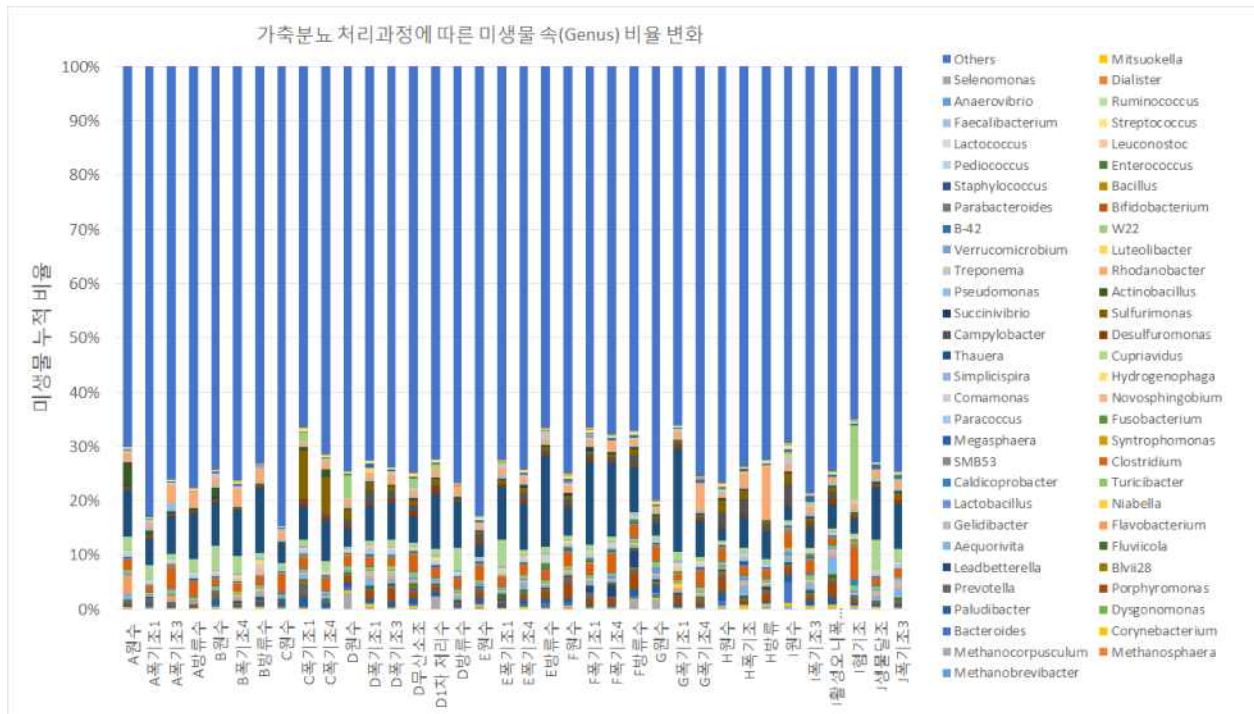
Fig. 21. 돈사에서 배출되는 N₂O(상). Flux의 양이 -0.02~0.02 mg/m²/s 사이의 범위를 확대(하)

2. 미생물 분석

○ 가축분뇨 내 미생물 성장 변화

가축분뇨 처리과정의 특성(혐기, 호기, 혐호기 상태)에 따른 미생물 변화를 위해 속(Genus, 屬) 분류를 수행하였다. 구분되지 않는(others) 부분이 66~83%까지 나타났으며, 편성혐기성균(obligatory anaerobes)/통성혐기성균(facultative anaerobes)/미호기성균(microaerophiles)/편성호기성균(obligatory aerobes)을 동시에 분류할 수 있었다.

가축분뇨 처리과정의 특성(혐기, 호기, 혐호기 상태)에 따라 같은 농장의 미생물 군집도 변화가 생겼으며, 편성혐기성균인 Bacteroid의 경우 호기적 처리를 하지 않는 원수에서 상대적으로 비율이 높았다(Fig. 22). 이러한 미생물 군집 변화에 따라 미생물에 의한 대사산물의 농도가 달라지고, 대사산물 중 가스의 농도가 바뀔 수 있으므로 예측을 위한 주요 척도가 될 수 있다.



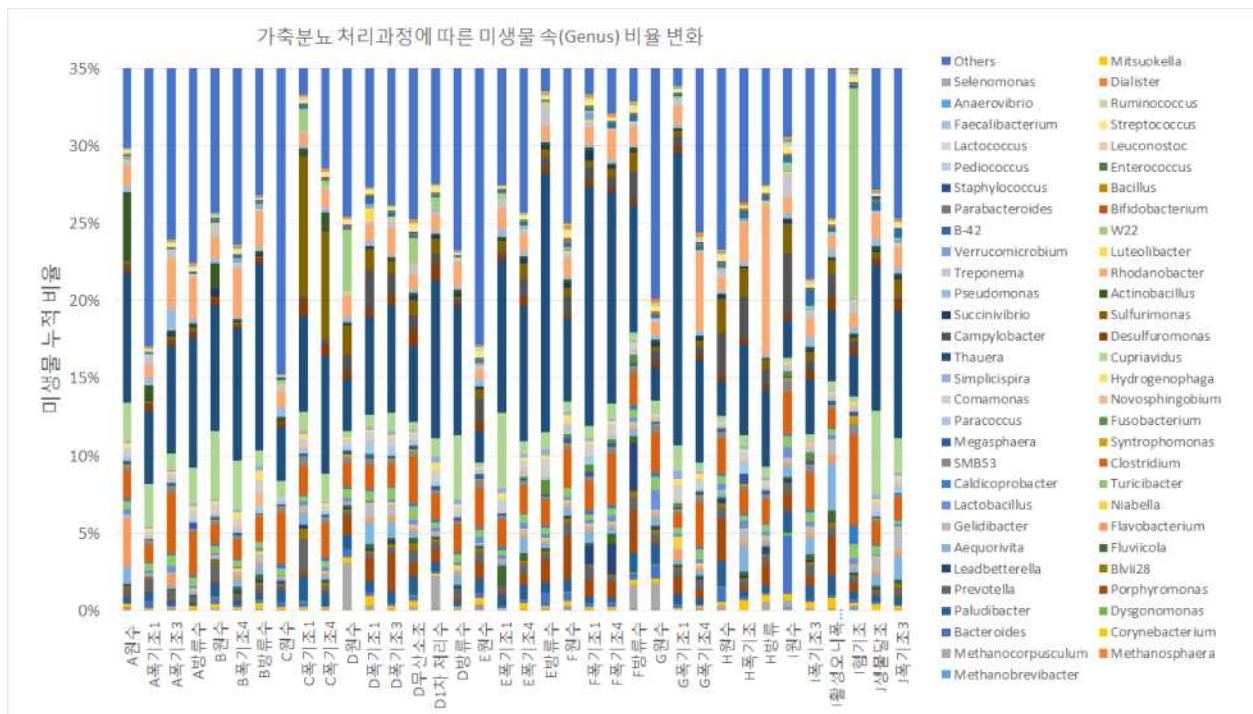


Fig. 22. 가축분뇨 처리과정에 따른 미생물 속(Genus) 비율(상). 변화속(Genus)을 정하지 못한 others를 제외하기 위해 35%까지의 데이터만 확대(하)

3. 천안

충청남도 천안 지역의 양돈 시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 양을 조사하였다. 천안 지역 실험 대상 농장에서는 비육돈방들과 육성돈방들을 하나의 통합형 돈사에서 사육하였으며, 실험기간 중 평균 사육두수는 2,000두였다. 통합형 돈사는 무창 슬러리 형태였으며 면적은 $3,134\text{m}^2$ 였다. 돈사의 공기 인입구와 공기 배출구에서의 CH_4 과 N_2O 농도차이를 이용하여 연간 돼지 한 마리당 배출량을 계산하였으며, 현재 사용하고 있는 IPCC의 1996년 가이드라인과 더불어 2006년 가이드라인에서의 Tier 1 계산 값들과 비교하였다. 또한 현재 국가보고서에 사용하고 있지는 않지만, 실험결과로 나온 VS 값을 이용하여 1996년 가이드라인 Tier 2 방법을 이용하여 CH_4 배출량을 계산하였다. 그 결과는 아래 Table 29와 같다.

Table 29. 천안 실험농가 정보 및 CH_4 배출량

사육축종	사육두수(평균)	대상돈사형태	돈사크기	지역
비육, 육성돈	2,000두	무창슬러리 돈사	$3,134.57\text{m}^2$	충청남도 천안시
실측 기간을 이용한 CH_4 배출량 (kg/head/yr)	IPCC 가이드라인 Tier 1 (kg/head/yr)		VS 이용 배출량 계산 (1996GL Tier 2이용) (kg/head/yr)	
	1996GL	2006GL		
3.99	3	8	4.64	

Table 29에서 보듯, CH_4 배출량은 현재 사용하고 있는 IPCC 1996 가이드라인의 Tier 1 방법에 비해 동 방법론의 Tier 2 방법은 약 2.67배 높게 계산되는 것으로 나타났다. 실측 기간 동안의 값은 1996 가이드라인 Tier 1 값과 보다는 1.33배 높게 나타났으나, VS 값을 이용하여 계산한 값은 실측 값과 비교하였을 때 약 1.16배 높게 나타났다.

Fig. 23은 통합돈사에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 시간에 따른 배출량의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 시간에 따른 배출량의 차이는 저장된 가축분뇨의 처리 등 일부 이벤트를 제외하고는 차이가 발견되지 않았다. 아산화질소의 경우는 그 차이가 더더욱 미미하였는데, 이는 혐기적으로 저장하고 있는 가축분뇨의 경우 N_2O 배출량이 미미하기 때문인 것으로 판단된다. 아산화질소의 평균 배출량은 0.576 kg/두/년 으로 계산되었다.

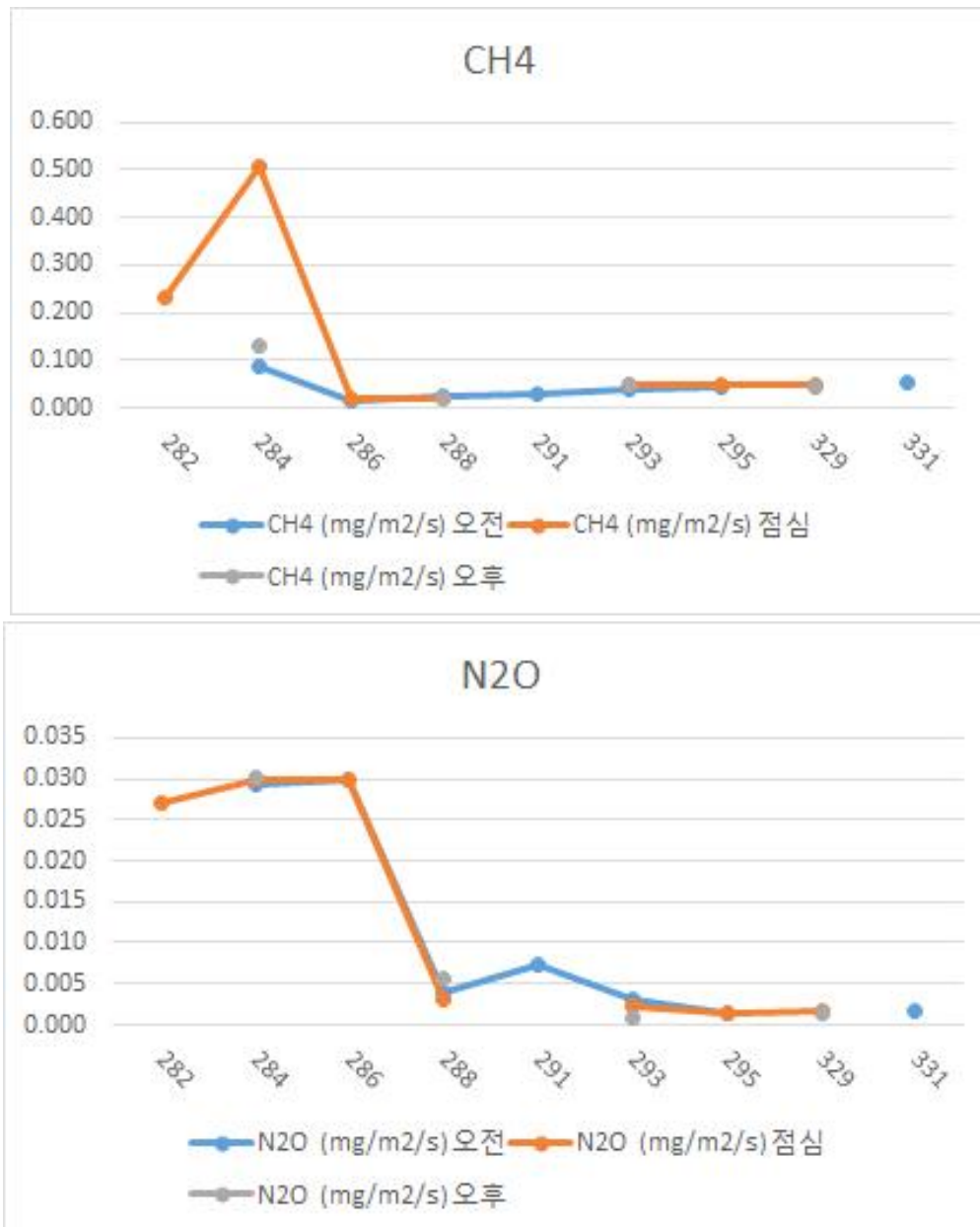


Fig 23. 각 일별 오전, 점심, 오후 CH₄ (위) 및 N₂O (아래) 배출량

4. 김제

전라남도 김제 지역의 양돈 시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 양을 조사하였다. 김제 지역 실험 대상 농장에서는 비육돈사를 대상으로 실험을 하였으며, 실험기간 중 평균 사육두수는 400두였다. 비육 돈사는 무창 슬러리 형태였으며 지붕배기 형식과 측면배기 형식을 혼용하여 사용하고 있었다. 해당 돈사의 면적은 624m^2 였다. 김제 실험 농장의 경우 외부에 있는 가축분뇨저장시설의 CH_4 과 N_2O 배출량도 조사하였다. 돈사와 외부 가축분뇨저장시설의 공기 인입구와 공기 배출구에서의 CH_4 과 N_2O 농도 차이를 이용하여 연간 돼지 한 마리당 배출량을 계산하였으며, 현재 사용하고 있는 IPCC의 1996년 가이드라인과 더불어 2006년 가이드라인에서의 Tier 1 계산 값들과 비교하였다. 또한 현재 국가보고서에 사용하고 있지는 않지만, 실험결과로 나온 VS 값을 이용하여 1996년 가이드라인 Tier 2 방법을 이용하여 CH_4 배출량을 계산하였다. 그 결과는 Table 30에서 볼 수 있다.

Table 30. 김제 실험농가 정보 및 CH_4 배출량

사육축종	사육두수(평균)	대상돈사형태	돈사크기	지역
비육	400두	무창슬러리 돈사	624m^2	전라북도 김제시
실측 기간을 이용한 CH_4 배출량 (kg/head/yr)	IPCC 가이드라인 Tier 1 (kg/head/yr)		VS 이용 배출량 계산 (1996GL Tier 2이용) (kg/head/yr)	
	1996GL	2006GL		
5.67	3	8	5.89	

Table 30에서 보듯, CH_4 배출량은 현재 사용하고 있는 IPCC 1996 가이드라인의 Tier 1 방법에 비해 동 방법론의 Tier 2 방법은 약 2.67배 높게 계산되는 것으로 나타났다. 실측 기간 동안 비육돈사와 외부가축분뇨저장시설에서의 CH_4 배출량은 1996 가이드라인 Tier 1 값과 보다는 1.89배 높게 나타났으나, VS 값을 이용하여 계산한 값은 실측 값과 비교하였을 때 약 1.04배 높게 나타났다.

Fig. 24는 비육돈사와 외부 가축분뇨저장시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 측정 위치에 따른 배출량의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 돈사에서 배출되는 CH_4 의 양보다는 외부가축분뇨저장시설에서 배출되는 CH_4 의 양이 변동이 많이 됨을 알 수 있다. 이것은 농장관리를 하면서 돈사 내 가축분뇨의 배출과 연관이 되어 있었다. 아산화질소의 경우에는 돈사의 측정장소와 외부 가축분뇨저장시설에서 모두 일별 변동성이 높은 것으로 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯 양의 배출량과 음의 배출량이 발생하면서 배출량이 낮아지게 되었는데 이는 혐기적으로 저장되는 N_2O 의 배출량은 미미하기 때문에, 돈사와 외부 가축분뇨저장시설로 들어가는 공기에 포함된 N_2O 의 농도에 많은 영향을 받을 수 있기 때문이다. 외부 가축분뇨저장시설의 경우 scum의 형성이 조사되었다. Scum은 N_2O 가 생성되는

부분이기도 하지만 혐기적으로 저장되는 가축분뇨에서 생성된 CH_4 이 대기 중으로 배출되는데 저항이 되어 배출량을 줄이는 역할을 할 수도 있으므로, 아래 그림의 배출량을 설명할 수 있다. 아산화질소의 평균 배출량은 0.080 kg/두/년으로 계산되었다.

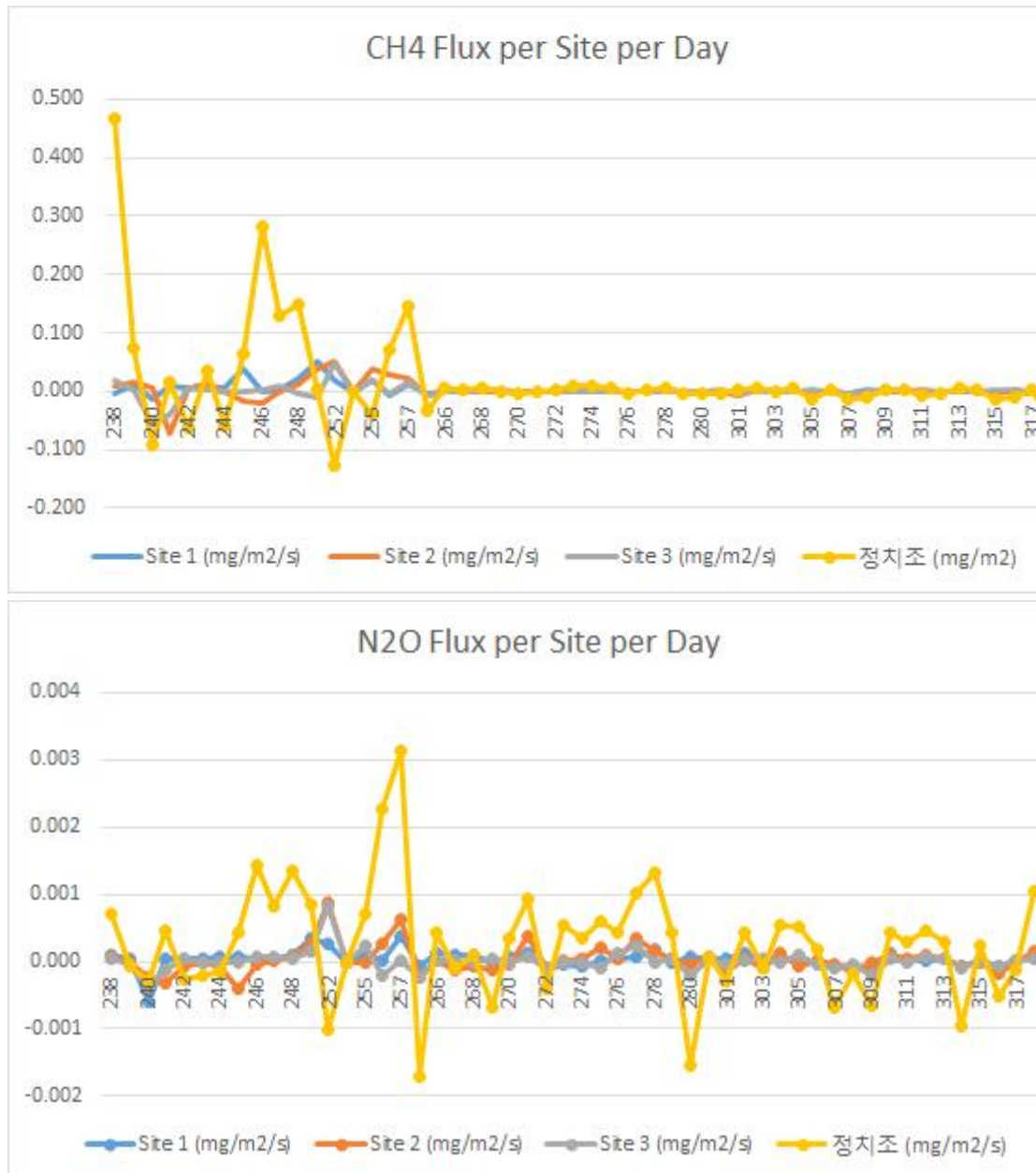


Fig. 24. 각 일별, 측정 위치별(site) CH_4 (위) 및 N_2O (아래) 배출량

5. 사천

경상남도 사천 지역의 양돈 시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 양을 조사하였다. 사천 지역 실험 대상 농장은 복층 돈사를 사용하고 있었으며, 돈사 측면의 공기 흡입구에서 신선한 공기를 흡입하고, 측면의 고압팬을 이용한 강제 환기 배출구에서 나오는 모든 돈사의 배출 공기를 수세식 필터를 이용한 악취 방지시설을 통과하도록 하는 환기 방식을 이용하였다. 따라서 돈사 주변의 공기를 인입공기로 샘플링하였으며, 악취 방지시설에서 나오는 공기를 배출공기로 샘플링하게 되었다. 농장 내 모든 비육사, 육성사, 자돈사, 분만사, 임신돈사의 공기가 한 곳으로 모아 배출하였으므로 전체 돈사의 배출량을 계산할 수 있었다. 실험기간 중 평균 사육두수는 1,000두였다. 돈사는 무창형태였으며, 돈사 내의 분뇨 저장방법은 슬러리 형태였다. 해당 돈사의 면적은 3,092 m^2 였다. 돈사의 공기 인입구와 공기 배출구에서의 CH_4 과 N_2O 농도 차이를 이용하여 연간 돼지 한 마리당 배출량을 계산하였으며, 현재 사용하고 있는 IPCC의 1996년 가이드라인과 더불어 2006년 가이드라인에서의 Tier 1 계산 값들과 비교하였다. 또한 현재 국가보고서에 사용하고 있지는 않지만, 실험결과로 나온 VS 값을 이용하여 1996년 가이드라인 Tier 2 방법을 이용하여 CH_4 배출량을 계산하였다. 그 결과는 Table 31에서 볼 수 있다.

Table 31. 사천 실험농가 정보 및 CH_4 배출량

사육축종	사육두수(평균)	대상돈사형태	돈사크기	지역
비육, 육성, 자돈, 분만, 임신돈	1,000두	무창슬러리 돈사	3,092 m^2	경상남도 사천시

실측 기간을 이용한 CH_4 배출량 (kg/head/yr)	IPCC 가이드라인 Tier 1 (kg/head/yr)		VS를 이용한 배출량 (1996GL Tier 2이용) (kg/head/yr)
	1996GL	2006GL	
0.89	3	8	1.30

Table 31에서 보듯, CH_4 배출량은 현재 사용하고 있는 IPCC 1996 가이드라인의 Tier 1 방법에 비해 동 방법론의 Tier 2 방법은 약 2.67배 높게 계산되는 것으로 나타났다. 실측 기간 동안 모든 돈사에서 나온 공기를 분석한 결과로 나온 CH_4 배출량은 1996 가이드라인 Tier 1 값에 비해 매우 낮은 배출량을 보였는데 그 값은 1996 가이드라인 Tier 1 값의 약 29.7%에 불과하였다. 또한 IPCC 1996 가이드라인의 VS를 이용한 Tier 2 계산법을 이용하여 계산한 배출량과 비교하였을 때, 실측 기간의 CH_4 배출량은 VS를 이용한 Tier 2 배출량의 약 68.5%에 불과하였다. 사천 농장의 경우 사육 면적에 비해 사육두수가 적고 이로 인해 가축분뇨 배출량도 적기 때문으로 판단된다. 하지만 IPCC의 Tier 2 방법인 VS를 기준으로 계산한 값과 비교하였을 때 IPCC Tier 2 값은 과대배출량을 보였다.

Fig. 25는 사천 농장에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 시간에 따른 배출량의 차이를 나타낸

것이다. 그림에서 보듯 시간에 따른 배출량의 차이는 저장된 가축분뇨의 처리 등 일부 이벤트를 제외하고는 차이가 발견되지 않았다. 아산화질소의 경우는 배출량이 양의 값 또는 음의 값을 나타내었는데 이는 혐기적으로 저장하고 있는 가축분뇨의 경우 N_2O 배출량이 미미하기 때문인 것으로 판단된다. 아산화질소의 평균 배출량은 -0.003 kg/두/년으로 계산되었다.

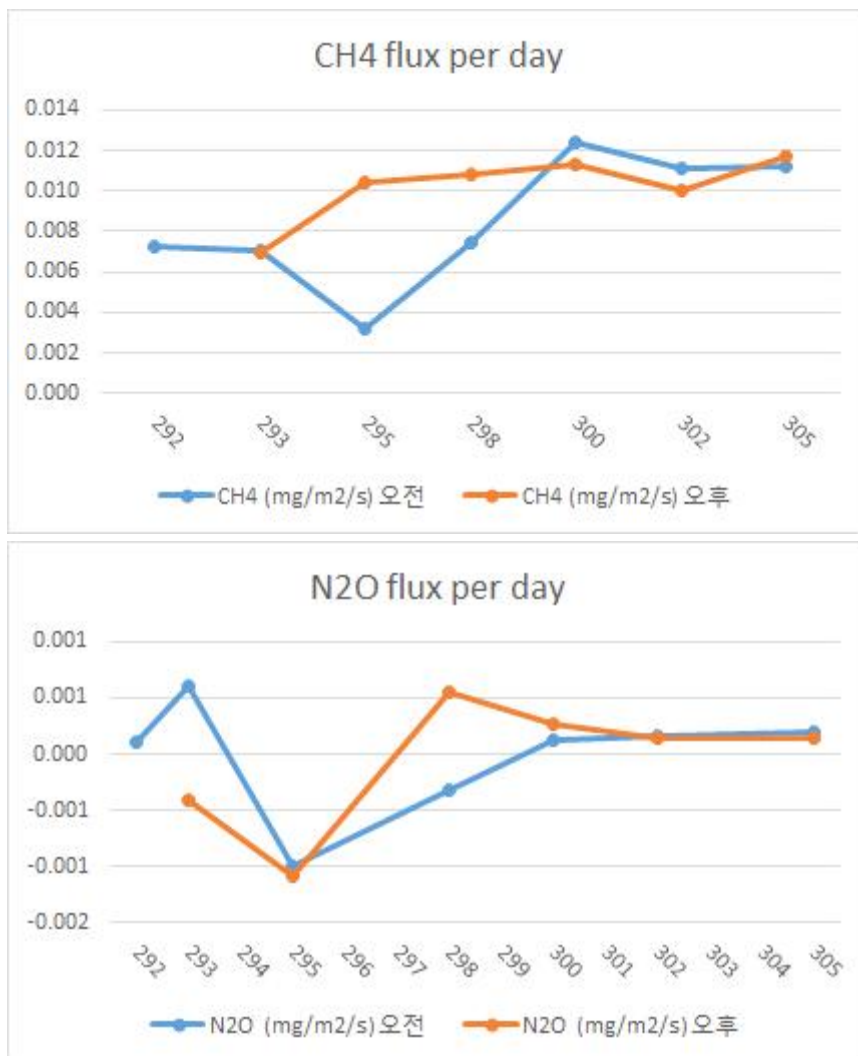


Fig. 25. 각 일별 오전, 오후 CH_4 (위) 및 N_2O (아래) 배출량

6. 화천

강원도 화천 지역의 양돈 시설에서 배출되는 CH_4 과 N_2O 의 양을 조사하였다. 화천 지역 실험 대상 농장은 원치커튼 방식과 지붕강제환기 방식의 이중 환기 구조로 된 돈사를 사용하고 있었다. 따라서 돈사의 원치커튼 주변의 공기를 인입공기로 샘플링하였으며, 지붕 강제환기구에서 배출 공기를 샘플링하였다. 농장 내 육성돈사를 대상으로 하였으며, 대상 평균 사육두수는 280두였다. 돈사 내의 분뇨저장방법은 슬러리 형태였고 해당 돈사의 면적은 248m^2 였다. 돈사의 공기 인입구와 공기 배출구에서의 CH_4 과 N_2O 농도 차이를 이용하여 연간 돼지 한 마리당 배출량을 계산하였으며, 현재 사용하고 있는 IPCC의 1996년 가이드라인과 더불어 2006년 가이드라인에서의 Tier 1 계산 값들과 비교하였다. 또한 현재 국가보고서에 사용하고 있지는 않지만, 실험결과로 나온 VS 값을 이용하여 1996년 가이드라인 Tier 2 방법을 이용하여 CH_4 배출량을 계산하였다. 그 결과는 Table 32에서 볼 수 있다.

Table 29. 천안 실험농가 정보 및 CH_4 배출량

사육축종	사육두수(평균)	대상돈사형태	돈사크기	지역
육성돈	280두	원치커튼 슬러리 돈사	248m^2	강원도 화천군

실측 기간을 이용한 CH_4 배출량 (kg/head/yr)	IPCC 가이드라인 Tier 1 (kg/head/yr)		VS를 이용한 배출량 (1996GL Tier 2이용) (kg/head/yr)
	1996GL	2006GL	
1.38	3	8	5.96

Table 32에서 볼 수 있듯, CH_4 배출량은 현재 사용하고 있는 IPCC 1996 가이드라인의 Tier 1 방법에 비해 동 방법론의 Tier 2 방법은 약 2.67배 높게 계산되는 것으로 나타났다. 실측 기간 동안 육성돈사에서 CH_4 배출량은 1996 가이드라인 Tier 1 값에 비해 매우 낮은 배출량을 보였는데 그 값은 1996 가이드라인 Tier 1 값의 약 45.3%에 불과하였다. 또한 IPCC 1996 가이드라인의 VS를 이용한 Tier 2 계산법을 이용하여 계산한 배출량과 비교하였을 때, 실측 기간의 CH_4 배출량은 VS를 이용한 Tier 2 배출량의 약 23.2%에 불과하였다. 화천 농장의 경우 돈사 pit 아래의 슬러리를 트랙터의 펌핑 기계를 이용하여 외부 가축분뇨저장시설로 한 달에 한 번씩 옮기는 방식을 사용한다. 이 때 돈사 아래 pit를 교반하지 않기 때문에 sludge 부분은 계속 쌓이게 되었다. 가축분뇨의 물리화학분석을 위해 샘플링을 할 때 sludge의 일부분이 분뇨 샘플에 빨려 들어갔으며 이로 인해 VS의 농도가 높은 것으로 나타났다. 또한 실험에 사용한 돈사의 경우 pit 아래의 sludge가 오랜 기간 축적되어 있었기 때문에 CH_4 을 발생시키는데 그 영향이 적었던 것으로 판단된다.

따라서 우리나라의 가축분뇨 저장탱크의 일반적인 문제인 sludge 축적 문제는 향후 IPCC 1996 가이드라인의 Tier 2 방법을 이용할 경우, 높은 VS 농도에 의해 과대 배출량 계산이 될 것이므로 적용에 있어 주의가 필요하다.

Fig. 26은 화천 농장에서 시간별 CH_4 과 N_2O 배출량의 차이를 보여준다. 그림에서 보듯 시간에 따른 배출량의 차이는 저장된 가축분뇨의 처리 등 일부 이벤트를 제외하고는 차이가 발견되지 않았다. 아산화질소의 평균 배출량은 $0.127\text{kg}/\text{두}/\text{년}$ 으로 계산되었는데 이는 샘플링 데이터 중 갑작스런 N_2O 증가를 보인 데이터에 의한 영향이 크다. 그 외의 배출량 데이터들을 보면 혐기적으로 저장되는 다른 곳의 가축분뇨에서 배출되는 N_2O 의 양처럼 미미하였다.

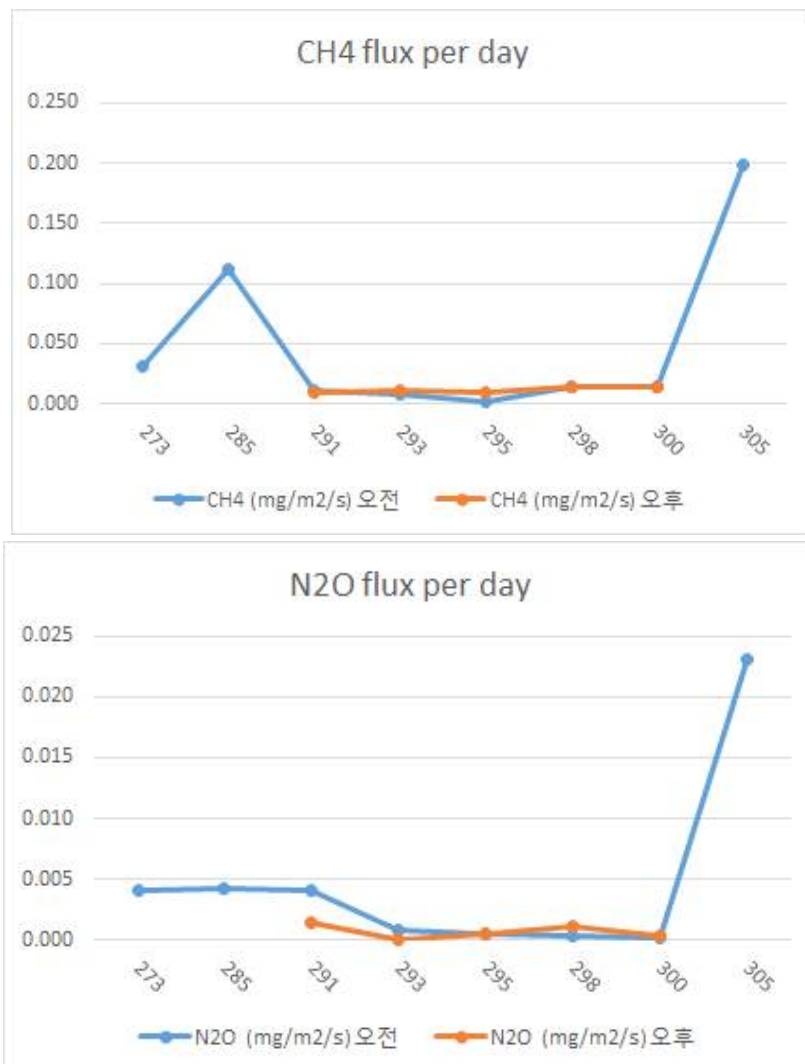


Fig. 26. 각 일별 오전, 오후 CH_4 (위) 및 N_2O (아래) 배출량

7. 홍천

이 실험은 강원도 홍천군에 위치한 시설에서 실시되었다. 이 시설은 바이오가스 시설을 이용하기 때문에 완전 밀폐형 시설로 설계가 되어 있었으며 악취 방지를 위해 가축분뇨와 음식물 쓰레기의 입고부터 모든 건물의 공기가 음압을 이용하여 포집되었다. 모든 포집된 공기는 악취제거 시스템을 통과하기 때문에 고농도 악취제거 시스템을 통과한 공기와 기타 공기 표집관을 통과한 공기는 최종 악취제거 시스템으로 모여 처리가 되었다. 따라서 시설 주변의 공기를 포집하여 인입 공기의 농도로 분석하였으며, 최종 악취제거 시스템에 들어가는 공기를 포집하여 배출 공기의 농도로 분석하였다. 상기 시설은 탈수기실, 연계처리수조, 유기성 폐기물 반입장, 가축분뇨 반입장, 가축분뇨 전처리실, 유기성 폐기물 전처리실, 슬러지 저류조, 반입 저류조, 유량조정조, 자동과쇄선별기, 협작물 반출실 등 여러 시설들을 가지고 있으며 이들 시설들의 면적은 552㎡였다(Table 33).

Table 33. 홍천지역 가축분뇨처리 공공처리장 정보 및 CH₄ 배출량

구분	처리대상 유기물	지역
바이오가스 생산시설	가축분뇨, 음식물 쓰레기	강원도 홍천군
실측 기간을 이용한 CH ₄ 배출량 (mg/㎡/일)		대상 시설의 면적
1,833.3		552㎡

상기 시설의 경우 바이오가스 생산시설이기 때문에 가축분뇨 등의 유기물들은 바이오가스 반응조에서 분해가 되고 그 가스들은 정제되어 도시가스 공급시설로 유입이 된다. 하지만 가축분뇨 등을 수집하고 보관하고 고액분리 등 일부 과정 중에서 배출되는 CH₄의 경우는 바이오가스 반응조와 연계된 시설이 아닌 외부 배기가 된다. 바이오가스 시설을 제외한 다른 시설의 운영과정에서 배출된 CH₄ 배출량은 1,833.3 mg/㎡/일로 계산되었다. 이를 일 배출량으로 계산을 하면 1.012 kg/일이었다. 같은 시설에서 아산화질소 배출량을 계산하였다. 이 시설에 들어오는 음식물 쓰레기의 경우 일정 시간 발효를 시켜 반입하여 처리하게 된다. 가축분뇨와 아산화질소는 질소 성분이 높게 있으며 발효 과정 중에서 N₂O의 배출량이 증가할 수 있다. 이를 반영하듯 N₂O 배출량은 2,463.3 mg/㎡/일로 계산되었다. 이를 일 배출량으로 계산하면 1.360 kg/일이었다(Fig. 27). 이는 CH₄ 배출량보다 1.34배 높은 값이었으며 이산화탄소 환산량으로 계산할 경우 더 많은 차이를 보이게 된다. 만약 IPCC 2006 가이드라인의 CH₄과 N₂O의 100년 기준 온난화지수(global warming potential)인 25와 298을 각각 적용한다면 CH₄과 N₂O의 이산화탄소 환산량은 각각 25.3 kg/일, 405.3 kg/일이었으므로 CH₄에 비해 N₂O의 영향이 16

배 높은 것으로 나타났다. 따라서 상기 시설은 N_2O 배출을 관리하는 것이 온실가스 감축의 관점에서 중요하다고 할 수 있다.

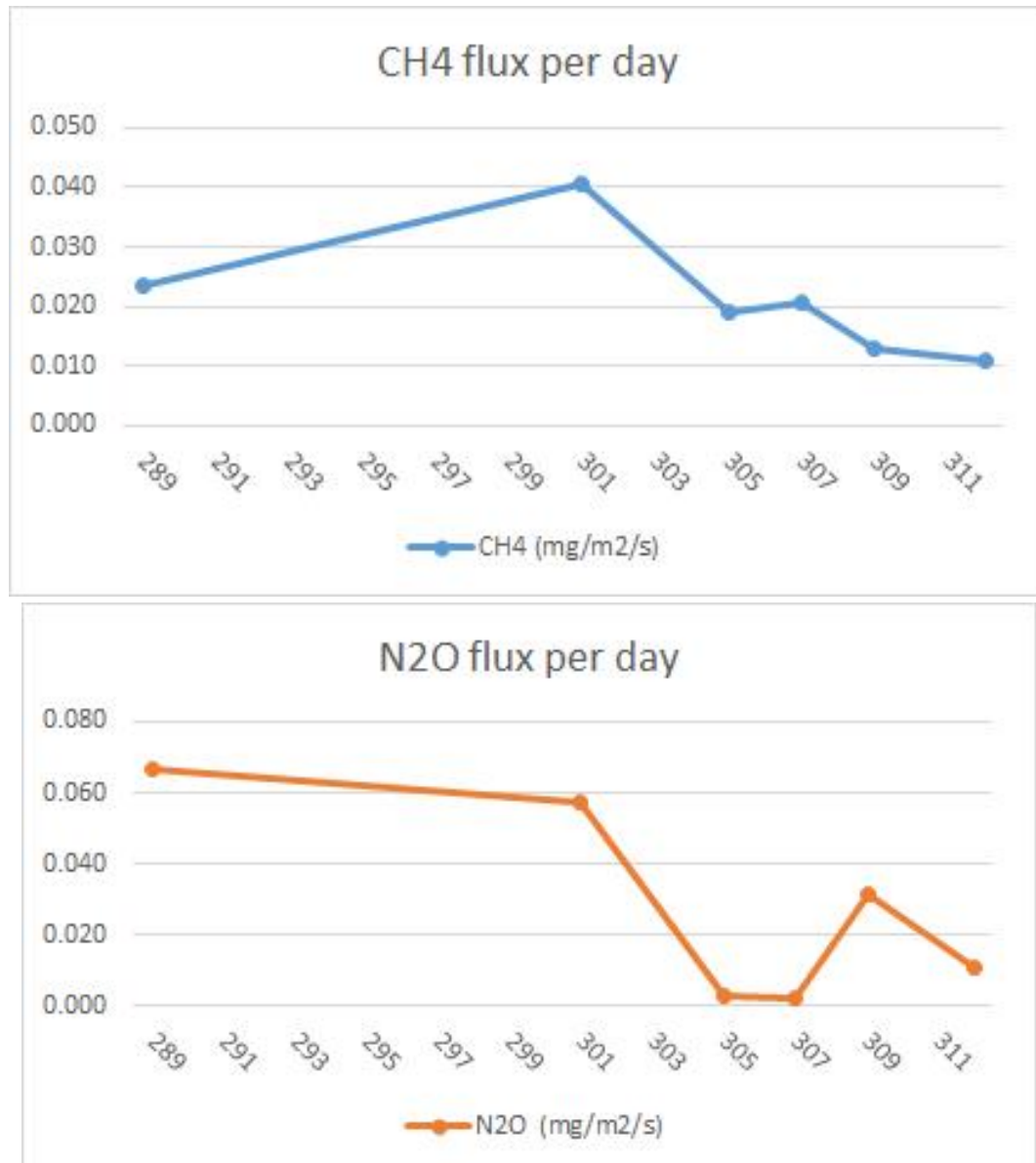


Fig. 27. 각 일별 CH_4 (위) 및 N_2O (아래)배출량

8. 축산부문 장내발효와 가축분뇨 유래 온실가스 배출량 계산법

축산부문 온실가스 배출량은 장내발효에 의한 CH₄ 배출과 가축분뇨처리과정에서의 CH₄ 및 N₂O 배출로 구분하여 산정하였다. 온실가스 배출원은 젖소, 한·육우, 양(면양), 염소(산양), 말, 돼지, 가금류(닭, 오리), 기타 가축(사슴)으로 구분된다.

활동자료로는 축종별 사육두수를 적용하였다. 분기별 자료 확보가 가능한 젖소, 한·육우, 돼지, 닭, 오리는 분기별 사육두수의 연평균 값을 적용하였고, 연간 자료 확보가 가능한 양, 염소, 말, 사슴은 3년 평균값(해당년도 및 직전 2개년까지의 사육두수)을 적용하였다.

산정 방법으로는 1996 IPCC 지침의 Tier 1 방법을 사용하였고, 산정기간(1990-2013)의 장내발효 및 가축분뇨 부문 온실가스 배출량을 계산하였다.

○ 장내발효

장내발효에 의한 CH₄ 배출량은 축종별 활동자료(사육두수)에 1996 IPCC 지침의 Tier 1 기본 배출계수(Table 34)를 곱하여 산정하였다. 배출계수는 1996 IPCC 지침의 각 지역별 Tier 1 배출계수가 얼마나 국가 현실에 적합한지를 고려하였다. 장내발효에 의한 CH₄ 배출량 계산식(Eq. 7)은 다음과 같다.

Eq. 7. 장내발효 부문의 CH₄ 배출량 산정식

$$E_i = EF_i \times population_i (10^6 \text{ kg} / \text{Gg})$$

E_i = 가축종 i 의 CH₄ 배출량(천톤 CH₄/year)

EF_i = 가축종 i 의 배출계수(kg CH₄/head/year)

Population _{i} = 가축종 i 의 사육두수(head)

Table 34. 장내발효의 CH₄ 배출계수 (IPCC, 1996)

Livestock	CH ₄ Emission factor (kg/head/year)	Regional characteristics	Method
Dairy cattle	118	IPCC default (North America)	Tier 1
Non-dairy cattle	47	IPCC default (North America)	Tier 1
Swine	1.5	IPCC default (Western Europe)	Tier 1
Sheep, Goats, Deer	5	IPCC default (Developing countries)	Tier 1
Horses	18	IPCC default (Developing countries)	Tier 1

○ 가축분뇨처리

가축분뇨처리 중 발생하는 온실가스는 CH₄와 N₂O이다. 배출량은 1996 IPCC 지침을 기반으로 하여 액비화 시설(Liquid system), 퇴비화 시설(Solid storage and drylot), 기타 시설(정화처리 및 기타자체처리, 위탁처리)로 구분하여 산정되었다.

가축분뇨처리 중 발생하는 CH₄는 장내발효 부문에서 사용된 산정식과 동일하게 축종별 활동자료에 1996 IPCC 지침의 Tier 1 기본 배출계수(Table 35)를 곱하여 산정하였다.

Table 35. 가축분뇨 처리과정 중의 CH₄ 배출계수 (IPCC, 1996)

Livestock	CH ₄ Emission factor (kg/head/year)	Regional Characteristics	Method
Dairy cattle	36	IPCC default (North America, Cool region)	Tier 1
Non-dairy cattle	1	IPCC default (North America, Cool region)	Tier 1
Swine	3	IPCC default (Western Europe, Cool region)	Tier 1
Chickens, Ducks	0.078	IPCC default (Developed countries, Cool region))	Tier 1
Goats, Deer	0.11	IPCC default (Developing countries, Cool region)	Tier 1
Sheep	0.10	IPCC default (Developing countries, Cool region))	Tier 1
Horses	1.09	IPCC default (Developing countries, Cool region))	Tier 1

가축분뇨처리 중 N₂O 배출량은 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출계수, 축종별로 배출되는 연평균 질소량. 가축분뇨처리시설의 비율을 이용하여 산정하였다. N₂O 배출계수(Table 36)와 축종별로 배출되는 연평균 질소량(Table 37)은 1996 IPCC 지침의 기본값을 사용하였다. 축종별 가축분뇨처리시설 이용 비율은 통계청 농림어업조사의 자료를 이용하였다(Table 38). 가축분뇨처리 부문 N₂O 배출량 산정식은 다음과 같다(Eq. 8).

Eq. 8. 가축분뇨처리 부문 N₂O 배출량 산정식

$$N_2O_D = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_T \times N_{ex(T)} \times MS_{(T,S)}) \right] \times EF_{3(s)} \right] \times 44/28$$

N₂O_D(mm) = 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출량(kg N₂O/year)

N_(T) = 가축 종류와 분류에 따른 연간 사육두수

N_{ex(T)} = 축종별 분뇨로 배출하는 연평균 질소량 질소량(kg N/축종/year)

MS_(T,S) = 가축분뇨처리시설 S의 이용비율

EF_{3(s)} = 가축분뇨처리시설 S의 직접적인 아산화질소 배출계수(kg N₂O-N/kg N)

S = 가축분뇨처리시설

T = 가축의 종류/분류

44/28 = N을 N₂O로 전환하는 계수

Table 36. 가축분뇨처리과정의 N₂O 배출계수 (IPCC, 1996)

Animal waste management system	N ₂ O emission factor (kg N ₂ O-N/kg N)
Liquid system	0.001
Solid storage and drylot	0.02
Other system	0.005

Table 37. 가축 한 마리당 질소 배설 값 (IPCC, 1996)

Livestock	N excretion (kg N/head/year)	Source
Dairy cattle	100	IPCC default (North America)
Non-dairy cattle	70	IPCC default (North America)
Swine	20	IPCC default (Western Europe)
Chicken, Duck	0.6	IPCC default (Western Europe)
Goats, Deer, Horses	40	IPCC default (Asia & Far East)
Sheep	12	IPCC default (Asia & Far East)

Table 38. 가축분뇨처리시설의 이용율 (Statistics Korea, 2015)

							Units: %
Animal waste management system	year	Dairy cattle	Non-dairy cattle	Swine	Chickens	Ducks	Other
Liquid system	2011	0.14	0.34	16.18	0.33	0.58	-
	2012	1.30	0.32	19.45	0.11	1.04	-
	2013	0.14	0.19	19.51	0.10	1.27	-
Solid storage and drylot	2011	86.18	92.04	45.60	68.81	67.83	100.00
	2012	85.24	92.64	38.00	71.41	72.06	100.00
	2013	85.72	93.86	38.22	76.20	78.09	100.00
Other system	2011	13.68	7.62	38.22	30.87	31.59	-
	2012	13.46	7.04	42.56	28.48	26.90	-
	2013	14.14	5.95	42.27	23.70	20.64	-

○ 가축 사육두수 변화

축산부문 온실가스 배출량 산정을 위한 활동자료인 가축 사육두수는 Table 39와 같다. 2013년 한·육우, 돼지, 닭의 사육두수는 1990년에 비해 각각 90%, 129%, 115% 증가하였다.

Table 39. 가축사육두수 활동자료

Year	Units: 1,000 heads								
	Dairy cattle	Non-dairy cattle	Sheep	Goats	Horses	Swine	Chicken	Duck	Deer
1990	500	1,579	3	169	4	4,412	69,190	605	45
1991	500	1,724	3	238	5	4,810	76,719	834	53
1992	499	1,935	4	353	5	5,366	78,354	984	62
1993	537	2,198	3	468	5	5,670	77,039	1,089	70
1994	555	2,369	2	554	5	5,884	78,867	1,258	79
1995	550	2,514	2	614	6	6,226	87,581	1,696	89
1996	557	2,796	2	653	6	6,479	89,790	2,507	100
1997	548	2,842	2	653	7	6,799	91,854	2,844	113
1998	555	2,632	1	606	8	7,558	87,050	3,114	126
1999	534	2,103	1	549	8	7,599	98,353	3,555	135
2000	541	1,731	1	498	9	8,150	104,252	4,363	143
2001	546	1,468	1	465	10	8,520	107,996	5,545	149
2002	545	1,423	1	445	12	8,880	111,668	6,558	153
2003	535	1,426	1	456	14	9,149	105,111	7,852	151
2004	507	1,620	1	485	16	8,994	105,103	8,369	146
2005	488	1,764	1	511	18	8,895	124,089	8,557	136
2006	471	1,959	1	505	21	9,198	126,668	8,680	125
2007	456	2,161	1	454	23	9,518	129,629	9,429	111
2008	446	2,397	2	369	25	9,126	129,101	9,867	96
2009	442	2,589	3	296	27	9,297	145,861	10,983	84
2010	435	2,867	4	253	29	9,819	151,931	12,278	73
2011	402	2,982	4	247	30	7,580	152,895	14,061	64
2012	413	3,063	4	250	30	9,534	149,750	15,552	55
2013	421	2,998	3	249	30	10,097	148,883	14,385	47

- 1996 IPCC 가이드라인의 Tier 2 방법론 이용한 돼지의 장내발효와 가축분뇨 유래 온실가스 배출량 계산

1996 IPCC 지침 및 2006 IPCC 지침의 Tier 2 방법론 이용한 배출량 계산을 위해서 먼저 Tier 1 방법론을 이용하여 돼지분뇨처리부문 CH₄ 배출량을 계산하였다. 돼지분뇨처리부문 CH₄ 배출량 계산식(사육두수 × 배출계수)은 다음과 같다(Fig. 28).

<가축분뇨처리 부문 CH₄ 배출량 산정식>

$$CH_4 \text{ Emissions}_{(mm)} = EF \cdot \text{population} (10^6 \text{ kg} / \text{Gg})$$

CH₄ Emissions_{mm}: 가축종별 분뇨처리 시 CH₄ 배출량[Gg CH₄/yr]
 EF: 가축종별 분뇨처리 배출계수[kg CH₄/head/yr]
 Population: 가축종별 사육 두수[head]

출처: GPG 2000, Equation 4.15, 4.30

Fig 28. CH₄ 배출량 산정식

돼지분뇨처리부문에서 1996 IPCC 지침의 CH₄ 배출계수는 3이고, 2006 IPCC 지침의 CH₄ 배출계수는 8.38이다. 이러한 CH₄ 배출계수에 돼지의 사육두수(1990년부터 2013년까지 국가통계자료를 활용)를 곱하여 돼지분뇨처리부문 CH₄ 배출량(CO₂ eq.)을 산정하였다.

1996 IPCC 지침 및 2006 IPCC 지침의 Tier 2 방법론 이용한 배출량 계산을 위해 VS값과 MS값은 국가 행정통계 값을 이용하였다. 돼지 VS값은 1.25로 2000년 축산기술연구소 자료를 활용하였고, MS 값은 통계청 농림어업조사 자료를 국가 고유 자료로 활용하였다. 나머지 배출계수 계산에 필요한 B₀, MCF 값은 IPCC 가이드라인의 기본값 사용하였다. 가축분뇨처리과정의 배출계수의 계산식은 다음과 같다(Fig. 29).

가축분뇨처리과정의 배출계수 계산

$$EF = (VS_{(T)} \times 365) \times [B_0 \times 0.67 \times \sum_{S,K} \frac{MCF_{S,K}}{100} \times MS_{(T,S,K)}]$$

EF_(T) = 가축 범주 T에 대한 CH₄ 배출계수, (kg CH₄ 가축⁻¹ yr⁻¹)
 VS_(T) = 가축 범주 T에 대한 일간 배설 휘발성 고형물, kg 건물질 가축⁻¹ day⁻¹
 365 = 연간 VS 발생을 계산하는 근거, days yr⁻¹
 B_{0(T)} = 가축 범주 T에서 발생된 분뇨의 최대 메탄 발생 량, m³ CH₄ kg⁻¹ VS 배설량
 0.67 = m³ CH₄를 kg CH₄로 바꾸기 위한 변환 계수
 MCF_(S,K) = 기후 지역 K 별 각 분뇨관리 시스템 S에 대한 메탄 변환 계수, %
 MS_(T,S,K) = 기후 지역 K에서 분뇨 처리 시스템 S를 이용해 관리되는 가축 범주 T의 분뇨의 비율, 단위 없음

Fig. 29. 가축분뇨처리과정의 배출계수 계산법

국가고유 VS 값과 MS 값을 이용하여 도출된 CH₄ 배출계수는 아래의 표와 같다(표 40).

Table 40. VS값을 이용하여 도출된 처리시설별 CH₄ 배출계수

돼지분뇨처리시설 종류	배출계수	비고
액비화 시설	3.5	VS 값을 적용한 Tier 2
퇴비화 시설	1.6	VS 값을 적용한 Tier 2
기타시설	3	1996 IPCC GL 배출계수

도출된 배출계수에 돼지사육두수를 곱하여 돼지분뇨처리부문의 Tier 2 수준에서 CH₄ 배출량을 계산하였다. 산정된 CH₄ 및 N₂O 배출량은 지구온난화지수(CH₄=21, N₂O=310)를 곱하여 이산화탄소 환산량(CO₂-eq.)으로 변환되었다. 1996 IPCC 지침 및 2006 IPCC 지침의 Tier 1 방법과 Tier 2 방법론 이용한 돼지분뇨처리부문 1990년-2013년 CH₄ 배출량(CO₂ eq.)은 다음과 같다(Table 41).

Table 41. 1990년부터 2013년까지 돼지분뇨처리부문 CH₄ 배출량

단위: 천톤(Gg) CO₂eq

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
돼지 (96 IPCC GL)	277.97	303.01	338.04	357.22	370.68	392.24	408.19	428.35	476.14	478.76
돼지 (06 IPCC GL)	776.46	846.41	944.26	997.84	1,035.44	1,095.65	1,140.21	1,196.52	1,330.01	1,337.33
돼지 (Tier 2)	226.31	246.70	275.22	290.84	301.80	319.35	332.34	348.75	387.65	389.79
부문	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
돼지 (96 IPCC GL)	513.44	536.77	559.41	576.37	566.63	560.37	579.48	599.63	574.96	585.69
돼지 (06 IPCC GL)	1,434.20	1,499.36	1,562.63	1,609.99	1,582.79	1,565.31	1,618.69	1,674.98	1,606.06	1,636.02
돼지 (Tier 2)	418.02	437.02	455.46	469.26	461.33	456.24	471.80	488.20	468.11	476.85
부문	2010	2011	2012	2013						
돼지 (96 IPCC GL)	618.61	477.55	600.66	636.11						
돼지 (06 IPCC GL)	1,727.99	1,333.94	1,677.84	1,776.86						
돼지 (Tier 2)	503.65	388.80	489.04	517.90						

돼지분뇨처리부문에서 N₂O 배출량 계산식은 다음과 같다(Fig. 30).

<가축분뇨처리 부문 N₂O 배출량 산정식>

$$N_2O_{(mm)} = \sum_{(S)} \{ [\sum_{(T)} (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T)})] \cdot EF_{3(S)} \} \cdot 44/28$$

N₂O_{mm} : 국내 분뇨처리시설의 N₂O 총배출량[kg N₂O/yr]
 N₀ : 국내 가축종 T의 수[head]
 Nex₀ : 국내 가축종 T의 N 총배출량[kg N/head/yr]
 MS₀ : 국내 가축종 T의 분뇨처리시설 S의 가축분뇨 처리비율
 EF_{3(S)} : 분뇨처리시설 S의 N₂O 배출계수[kg N₂O-N/kg N in MS₀]
 S : 가축분뇨처리시설
 T : 가축종
 44/28 : 가축분뇨처리 N 배출량[kg N₂O-N/yr]의 N₂O 환산계수

출처: GPG 2000, Equation 4.18, 4.42

Fig. 30. N₂O 배출량 산정식

1996 IPCC GL의 N 배출량 N_{ex}(kg N/두수/년)은 20이고, 2006 IPCC GL의 N 배출량 N_{ex}(kg N/두수/년)은 17.4이다. 이러한 기본값을 아래의 식에 대입하여 Tier 1 수준에서 N₂O 배출량을 계산하였다. 또한, 국가고유 N 배출량 N_{ex}(kg N/두수/년) 7.67 값을 아래의 식에 대입하여 Tier 2 수준에서 N₂O 배출량을 계산하였다. 돼지분뇨처리부문 N₂O 배출량(CO₂ eq.)의 비교는 다음과 같다(Table 42).

Table 42. 1990년부터 2013년까지 돼지분뇨처리부문 N₂O 배출량

단위: 천톤(Gg) CO₂eq

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
돼지 (96 IPCC GL)	277.97	303.01	338.04	357.22	370.68	392.24	408.19	428.35	476.14	478.76
돼지 (06 IPCC GL)	776.46	846.41	944.26	997.84	1,035.44	1,095.65	1,140.21	1,196.52	1,330.01	1,337.33
돼지 (Tier 2)	226.31	246.70	275.22	290.84	301.80	319.35	332.34	348.75	387.65	389.79
부문	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
돼지 (96 IPCC GL)	513.44	536.77	559.41	576.37	566.63	560.37	579.48	599.63	574.96	585.69
돼지 (06 IPCC GL)	1,434.20	1,499.36	1,562.63	1,609.99	1,582.79	1,565.31	1,618.69	1,674.98	1,606.06	1,636.02
돼지 (Tier 2)	418.02	437.02	455.46	469.26	461.33	456.24	471.80	488.20	468.11	476.85

부문	2010	2011	2012	2013						
돼지 (96 IPCC GL)	618.61	477.55	600.66	636.11						
돼지 (06 IPCC GL)	1,727.99	1,333.94	1,677.84	1,776.86						
돼지 (Tier 2)	503.65	388.80	489.04	517.90						

돼지분뇨처리부문 지역별 온실가스 배출량 또한 지역별 돼지사육두수 통계를 적용하여 계산되었다(Table 43).

Table 43. 돼지분뇨처리부문 지역별 온실가스 배출량

단위: 천톤(Gg) CO₂eq

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
돼지 (96 IPCC GL)	481.15	524.49	585.13	618.33	641.64	678.94	706.56	741.45	824.17	828.71
돼지 (06 IPCC GL)	418.60	456.31	509.06	537.95	558.22	590.68	614.71	645.06	717.03	720.98
돼지 (국가고유 N _{ex})	184.52	201.14	224.40	237.13	246.07	260.37	270.97	284.35	316.07	317.81
부문	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
돼지 (96 IPCC GL)	888.73	929.11	968.32	997.66	980.81	969.98	1,003.06	1,037.94	995.23	1,013.79
돼지 (06 IPCC GL)	773.20	808.33	842.43	867.97	853.31	843.88	872.66	903.00	865.85	882.00
돼지 (국가고유 N _{ex})	340.83	356.32	371.35	382.60	376.14	371.99	384.67	398.05	381.67	388.79
부문	2010	2011	2012	2013						
돼지 (96 IPCC GL)	1,070.79	826.61	921.71	979.07						
돼지 (06 IPCC GL)	931.59	719.15	801.89	851.79						
돼지 (국가고유 N _{ex})	410.65	317.00	353.48	375.47						

9. 국가 온실가스 관련 정책 변화 및 기술 발전을 반영한 온실가스 감축 효율성

증대방안을 반영하여 향후 온실가스 배출특성 변화 예측

○ 가축분뇨 에너지화 시설의 과정별 온실가스 배출량 시범산정

먼저 가축분뇨 에너지화 시설 가동시 배출특성 변화를 예측하였다. 돼지분뇨 유래 CH₄ 배출량은 3 kg CH₄/head/year(1996 IPCC GL 기준)이고, 에너지시설의 평균 VS 분해율이 50%(전문가 의견)로 예상된다. 따라서, 에너지화 시설 가동시 1.5 kg CH₄/head/year의 CH₄이 배출될 것으로 추정된다. VS량은 50% 감소하므로 CH₄의 경우 0.275kg CH₄/head/year로 보지만(other system의 MCF는 1%), 에너지시설에서는 암모니아 등의 휘발이 억제되어 질소의 양은 변화가 없다고 보고 0.1 kg N₂O-N/head/year가 배출되는 것으로 예상된다. 따라서, CO₂-eq는 36.8 kg CO₂-eq/head/year라고 추정된다.

에너지 시설을 이용하지 않을 경우 배출특성을 예측해 보았다. 이 경우에는 액비처리 양돈분뇨는 IPCC의 liquid storage로 처리될 것으로 보인다. 따라서, 아래와 같은 계산식(Eq. 9)으로 계산 시 CO₂-eq는 121.7 kg CO₂-eq/두/년으로 추정된다.

$$\text{Eq. 9.} \quad EF_T = VS_T \times 365 \times B_{0T} \times 0.67 \times \sum_{Sk} \frac{MCF_{Sk}}{100} \times MS_{TSk}$$

결과적으로 에너지 시설 이용했을 때, 에너지 시설을 이용하지 않을 경우 산출된 배출량의 30% 수준으로 감소될 것으로 예상된다(121.7 kg CO₂-eq vs. 36.8 kg CO₂-eq).

○ 가축분뇨 자원화 시설의 과정별 온실가스 배출량 시범산정

다음으로 가축분뇨 자원화 시설 가동시 배출특성 변화를 예측해 보았다. 돼지분뇨 위 액상분뇨가 공동자원화시설로 갈 경우 other system으로 간주된다(other system의 MCF는 1%). 따라서 이 경우 0.55 kg CH₄/head/year와 0.1 kg N₂O-N/head/year로 되어 CO₂-eq 기준으로 42.55 kg CO₂-eq/head/year이 된다.

자원화 시설을 이용하지 않을 경우 배출특성 변화 예측해 보았다. 이 경우 액비처리 양돈분뇨는 IPCC의 liquid storage로 처리될 것이고, 아래와 같은 계산식으로 계산 시 CO₂-eq는 121.7 kg CO₂-eq/head/year로 추정된다.

$$EF_T = VS_T \times 365 \times B_{0T} \times 0.67 \times \sum_{Sk} \frac{MCF_{Sk}}{100} \times MS_{TSk}$$

결과적으로 자원화 시설 이용했을 때, 자원화 시설을 이용하지 않을 경우 산출된 배출량의 35% 수준으로 감소될 것으로 예상된다(121.7 kg CO₂-eq vs. 42.55 kg CO₂-eq).

- 지속적 측정 및 조사를 통한 시계열 자료 확보(현재 사용하고 있는 '96년 IPCC 가이드라인을 이용한 배출량 계산)

지속적인 측정 및 조사를 통한 시계열 자료 확보를 위해 1990년부터 2014년까지 가축분뇨처리부문 온실가스 배출량(단위: 천톤 CO₂-eq)을 계산하였다. 가축분뇨처리부문의 배출원은 가축분뇨의 처리 시 발생하는 CH₄와 N₂O가 주요 배출원이다. 축종별 가축분뇨처리부문 CH₄ 배출계수(Table 44)와 N₂O 배출계수(Table 45, Table 46)는 1996년도 IPCC 기본값을 사용하였다.

Table 44. 축종별 가축분뇨처리 부문의 CH₄ 배출계수

축종	배출계수(kg CH ₄ /head/yr)	배출계수 출처
젖소	36	북미
한·육우	1	북미
돼지	3	서유럽
닭·오리	0.078	선진국
염소(산양), 사슴	0.11	개발도상국
말	1.09	개발도상국
양(면양)	0.10	개발도상국

출처: 1996 IPCC 지침

Table 45. 축종별 N 배출량

축종	분뇨 내 질소 함유량(kg N/두수/yr)	배출계수 출처
젖소	100	북미
한·육우	70	북미
돼지	20	서유럽
닭·오리	0.6	서유럽
양(면양)	12	아시아 및 극동아시아
기타 가축(염소, 사슴, 말)	40	아시아 및 극동아시아

출처: 1996 IPCC 지침

Table 46. 가축분뇨처리시설별 N₂O-N 배출계수(EF₃(s))

가축분뇨처리시설 종류	N ₂ O-N 배출계수(kg N ₂ O-N/kg N)
액비화 시설	0.001
퇴비화 시설	0.02
기타 시설	0.005

출처: 1996 IPCC 지침

배출량 계산에 필요한 축종별 가축분뇨처리시설 이용비율(퇴비화 시설, 액비화 시설, 기타 시설)은 농림어업조사 통계자료를 활용하였다(Table 47).

Table 47. 축종별 가축분뇨처리시설 이용비율

처리시설	년도	한·육우	젓소	돼지	닭	오리	기타가축
퇴비화 시설	2011	87.56%	84.29%	25.39%	50.24%	37.27%	100.00%
	2012	86.18%	83.92%	16.89%	40.16%	36.84%	100.00%
	2013	88.97%	81.48%	15.92%	42.79%	43.73%	100.00%
	2014	88.65%	79.23%	15.12%	36.00%	25.56%	100.00%
액비화 시설	2011	0.47%	0.15%	27.93%	0.61%	0.03%	
	2012	0.26%	1.11%	24.27%	4.19%	0.05%	
	2013	0.16%	0.16%	28.85%	4.70%	3.69%	
	2014	0.33%	0.22%	30.74%	4.52%	4.94%	
기타 시설	2011	11.97%	15.56%	46.68%	49.15%	62.70%	
	2012	13.57%	14.97%	58.85%	55.65%	63.11%	
	2013	10.87%	18.36%	55.23%	52.51%	52.58%	
	2014	11.02%	20.55%	54.14%	59.48%	69.50%	

출처: 통계청 농림어업조사(2011, 2012, 2013, 2014), 1990년도부터 2011년까지는 2011년 이용비율 적용

위의 활동자료를 이용하여 1990년부터 2014년까지 가축분뇨처리부문 온실가스 배출량을 계산하였고 CO₂-eq 값으로 변환하였다(Table 48).

Table 48. 가축분뇨처리부문 온실가스 배출량

단위: 천톤(Gg) CO₂eq

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
4B1 젓소	807	808	806	868	897	888	900	885	897	863
4B1한·육우	1,009	1,101	1,236	1,404	1,513	1,605	1,786	1,814	1,681	1,343
4B3 양(면양)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4B4 염소(산양)	66	93	138	184	217	241	256	256	237	215

4B6 말	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
4B8 돼지	609	663	740	782	812	859	894	938	1,402	1,048
4B9 가금류	369	410	420	413	424	472	487	500	476	538
4B10 사슴	18	21	24	27	31	35	39	44	49	53
합계	2,880	3,099	3,367	3,680	3,896	4,102	4,364	4,441	4,386	4,064
부문	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
4B1 젖소	874	881	881	863	818	788	761	737	721	715
4B1한·육우	1,105	938	909	911	1,035	1,127	1,251	1,380	1,531	1,654
4B3 양(면양)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
4B4 염소(산양)	195	182	174	179	190	200	198	178	145	116
4B6 말	4	4	5	6	7	8	9	9	10	11
4B8 돼지	1,124	1,175	1,225	1,262	1,241	1,227	1,269	1,313	1,259	1,282
4B9 가금류	573	598	622	594	596	698	712	731	730	824
4B10 사슴	56	58	60	59	57	53	49	44	37	33
합계	3,931	3,838	3,876	3,874	3,944	4,100	4,249	4,392	4,434	4,635
부문	2010	2011	2012	2013	2014					
4B1 젖소	703	649	665	672	675					
4B1한·육우	1,831	1,905	1,936	1,938	1,816					
4B3 양(면양)	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3					
4B4 염소(산양)	99	97	98	98	98					
4B6 말	12	12	12	12	12					
4B8 돼지	1,354	1,046	1,210	1,249	1,201					
4B9 가금류	863	876	794	804	765					
4B10 사슴	29	25	22	19	17					
합계	4,891	4,610	4,737	4,792	4,583					

2014년도 가축분뇨처리부문 온실가스 배출량은 4,583 천톤 CO₂-eq으로 축산부문 총 배출량의 52.2%를 차지하였다. 2014년 가축분뇨처리부문 배출량은 전년대비 4.4% 감소하였고, 1990년도 대비 59.1% 증가하였다.

향후 국가 고유배출계수를 개발하여 온실가스 배출량 계산에 적용하고 업데이트된 시계열 자료를 지속적으로 확보해 나가야 할 것이다.

10. 가축분뇨 내 혐기 미생물에 대한 조사

- 메타분석을 통한 가축분뇨 내 미생물 조사

16S rRNA 유전자는 박테리아에 존재하는 유전자로 미생물 Taxonomy 분류를 위한 마커로 사용된다. 따라서 가축분뇨 중에서 돼지분뇨 내 혐기 미생물에 대한 조사를 위해 RDP 데이터베이스로부터 돼지분뇨 유래 16S rRNA 유전자(총 1,967 gene sequences)를 획득하였다. 획득된 유전자들을 ARB 프로그램을 사용하여 돼지분뇨 유래 Taxonomy Tree를 획득하였다(Fig. 31).

Taxonomy tree 분석 결과 박테리아의 경우 Bacteroidetes(763 sequences, 총 Bacterial 중 38.8%)와 Firmicutes(718 sequences, 총 Bacterial 중 36.5%)가 우점하는 phylum이었다. 다음으로 Proteobacteria(254 sequences, 총 Bacterial 중 12.9%)가 세 번째로 우점하였다. 메탄가스를 생성하는 Archaea의 경우는 총 495 sequences가 획득되었고, 그 중에서 Euryarchaeota가 우점하는 phylum으로 총 Archaea 중 99.4%(492 sequences)를 차지하였다. 대부분의 Euryarchaeota는 메탄을 생성하는 미생물로 가축분뇨처리시설에서 메탄저감을 위한 연구에 DB로 활용할 수 있을 것이다. Fungi 유전자는 총 236 sequences 이었고, 그 중에서 Ascomycota(223 sequences, 94.5%)가 우점하였다. 이러한 메타분석 결과는 향후 양돈분뇨처리부문 온실가스 배출 관련 미생물과의 상관관계 분석과 양돈분뇨처리시설에서의 온실가스 저감 연구에 활용할 수 있을 것이다.

○ 차세대염기서열분석을 이용한 가축분뇨 내 미생물 분석

16S rRNA 유전자는 또한 차세대염기서열분석(next generation sequencing)을 통해서 분석할 수 있다. 먼저 한 농장의 양돈분뇨처리시설의 정치조와 간헐 폭기조에서 분뇨 샘플링을 한 후에 미생물 DNA를 추출하였다. 추출된 DNA로부터 16S rRNA 유전자를 차세대염기서열분석법을 이용하여 분석하였다. 분석결과 양돈분뇨처리시설에서 우점하는 박테리아 phylum은 정치조와 간헐 폭기조 모두에서 Bacteroidetes, Firmicutes, Spirochaetes, Proteobacteria였다(Table 49).

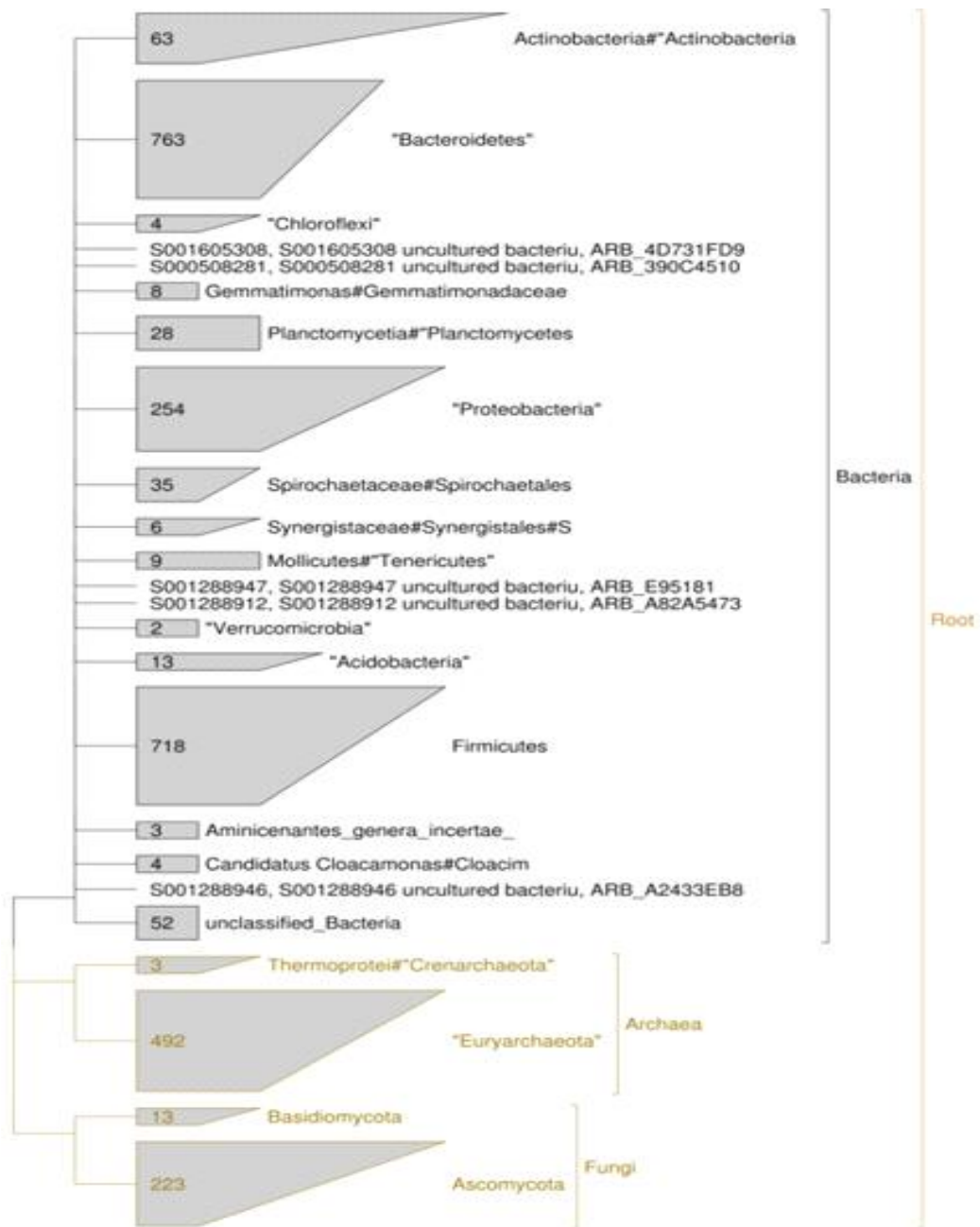


Fig. 31. 돼지분뇨 유래 미생물 taxonomy tree

Table 49. 양돈분뇨처리시설에서 분뇨 미생물 조사

1차 실험				2차 실험			
Phylum	정치조 (1)	간헐 폭기조 (2)	(2) - (1)	Phylum	정치조 (1)	간헐 폭기조 (2)	(2) - (1)
<u>Bacteroidetes</u>	<u>48.25%</u>	<u>41.96%</u>	<u>-6.29%</u>	<u>Bacteroidetes</u>	<u>36.11%</u>	<u>34.51%</u>	<u>-1.60%</u>
Firmicutes	19.22%	18.56%	-0.66%	Firmicutes	18.95%	19.46%	0.51%
Proteobacteri a	6.94%	7.98%	1.04%	Proteobacteri a	5.11%	6.20%	1.09%
Spirochaetes	9.68%	11.10%	1.42%	Spirochaetes	14.36%	12.75%	-1.61%
Fibrobacteres	1.81%	2.79%	0.98%	Fibrobacteres	1.38%	1.92%	0.54%
Tenericutes	1.82%	2.33%	0.51%	Tenericutes	2.77%	3.10%	0.34%
Other phyla	12.28%	15.28%	3.00%	Other phyla	21.33%	22.06%	0.73%

Bacteroidetes는 1, 2차 실험 모두에서 정치조 및 간헐 폭기조에 상관없이 가장 우점하였고, 전체 박테리아의 30%이상을 차지하였다. Bacteroidetes는 1, 2차 실험 모두에서 정치조에 비해 간헐 폭기조에서 감소하였다. 따라서 Bacteroidetes 내에 있는 미생물이 온실가스 생성에 관여하고 폭기에 의해 감소된 것으로 보여진다. Firmicutes는 정치조 및 간헐 폭기조에 상관없이 두 번째로 우점하는 미생물로서 전체 박테리아의 약 20%를 차지하였다. 1차 실험에서는 Firmicutes가 폭기에 의해 약간 감소하였지만, 2차 실험에서는 폭기에 의해 약간 증가하였다. 향후 추가 실험에 의해 폭기에 의한 Firmicutes의 효과를 좀더 깊이 있게 확인해야 할 것이다. Spirochaetes 또한 분뇨처리 시설의 폭기 과정이 미생물에 미치는 영향에 대한 결과가 1차 실험과 2차 실험에서 서로 달랐다. 따라서 폭기에 의한 Spirochaetes의 효과를 향후 연구에서 다시 확인해 봐야 할 것이다. 나머지 Proteobacteria, Fibrobacteres, Tenericutes, other phyla는 폭기에 의해 미생물이 약간 증가하였다. 이러한 미생물들은 폭기에 의해 공급되는 산소에 의해 성장이 활성화 된 것처럼 보인다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

제1절 : 목표대비 달성도

당초 목표	가중치(%)	개발 내용	달성도(%)
경기, 강원지역의 축사 및 가축분뇨처리시설 유래 온실가스 배출량 지속 측정 사이트 설정	10	측정장비 설치 및 실험 진행	100
준(準) 연속 방법을 이용한 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 측정기술 제시	10	측정장비 설치 및 실험 진행	100
한 달 내 사이트 이동을 위한 방법 제시	10	측정장비 설치 및 실험 진행	100
충청, 전라, 경상지역의 축사 및 가축분뇨처리시설 유래 온실가스 배출량 지속 측정 사이트 설정	35	측정장비 설치 및 실험 진행	100
가축분뇨 자원화 공동처리시설 유래 온실가스 배출량 지속 측정 사이트 설정	35	측정장비 설치 및 실험 진행	100
국가 축산부문 온실가스 배출량 측정망 및 측정법 제시	100%	데이터 산출	100

제2절 : 정량적 성과(논문게재, 특허출원, 기타)를 기술

성과지표명		연도	당초 목표 (전체)	실적	달성도 (%)	가중치 (%)
논문게재	SCI		3	0	0	20
	비SCI		4	3	75	20
산업재산권	출원		2	2	100	10
	등록					
학술발표	국제		2	4	200	10
	국내		7	9	171	10
기술이전						
정책자료 기관제출			3	4	133	10
정책자료 채택			-	2		
농가기술지도/컨설팅			-	3		
측정사이트(곳)			7	7	100	
DB 구축 및 활용			7	13	171	20
홍보성과			-	48.4		

제 5 장 연구 결과의 활용 계획

- 축산부문 온실가스 국가 보고서를 Tier 2 방법으로 작성
- 온실가스 배출량 산정의 정확도 향상 및 고도화
- 저탄소 축산물 산정에 이용
- 결과를 이용하여 SCI 급 논문 2건 제출 준비 중임

제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학 기술 정보

- 참고문헌

제 7 장 연구 개발 결과의 보안 등급

- 일반

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

- 해당없음

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

- 학생 및 연구원들의 실험실 안전교육 실시

제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
1	D B 구축	가축 한 마리당 연간 온실가스 배출량	강원대	주담 당			2014년 11월		
2	D B 구축	가축분뇨처리시설 비 율	강원대	주담 당			2014년 11월		
3	D B 구축	축산 온실가스 배출 량(2014)	강원대	주담 당			2014년 11월		
4	D B 구축 및 활 용	1996 및 2006 IPCC Guideline에 따른 돼 지 질소 배설량 활동 자료	강원대	주담 당			2015년 11월		

5	D 구 및 용	B 축 활	1996 및 2006 IPCC Guideline에 따른 젓 소 질소 배설량 활동 자료	강원대	주담 당			2015년 11월		
6	D 구 및 용	B 축 활	1996 및 2006 IPCC Guideline에 따른 한·육우 질소 배설 량 활동자료	강원대	주담 당			2015년 11월		
7	D 구 및 용	B 축 활	IPCC Guideline 분류 에 따른 돼지 성장 단계별 휘발성 고형 물(VS) 배설량	강원대	주담 당			2015년 11월		
8	D 구 및 용	B 축 활	Tier 2 계산을 위한 닭 질소 배설량 활 동자료	강원대	주담 당			2015년 11월		
9	D 구 및 용	B 축 활	축산부문 국가 온실 가스 인벤토리	축산원	주담 당			2015년 11월		
10	D 구 및 용	B 축 활	가축분뇨 저장(처리) 시설에서의 메탄 배 출량 통계 DB 구축 (사천시)	강원대	주담 당			2016년 11월		
11	D 구 및 용	B 축 활	가축분뇨 저장(처리) 시설에서의 메탄 배 출량 통계 DB 구축 (천안시)	강원대	주담 당			2016년 11월		
12	D 구 및 용	B 축 활	가축분뇨 저장(처리) 시설에서의 메탄 배 출량 통계 DB 구축 (홍천군)	강원대	주담 당			2016년 11월		
13	D 구 및 용	B 축 활	가축분뇨 저장(처리) 시설에서의 메탄 배 출량 통계 DB 구축 (화천군)	강원대	주담 당			2016년 11월		
14	논 문 계 (비 SCI)	문 재	축산부문에 미치는 기후변화의 영향 및 대응방안 연구	강원대	주담 당			2015년 06월		
15	논 문 계 (비 SCI)	문 재	Next Generation Sequencing을 통한 미생물 군집 분석의 축산분야 활용	축산원	주담 당			2015년 11월		
16	논 문 계 (비 SCI)	문 재	1990년부터 2013년까 지 우리나라 축산부 문 온실가스 배출량 평가	축산원	주담 당			2016년 11월		

17	농 기 지 도/ 컨 팅/ 현 기 지 장 술 원	온실가스 측정시스템 기술지원	축산원	주담 당			2016년 04월		
18	농 기 지 도 컨 팅 현 기 지 장 술 원	· 친환경 동물복지 및 축산환경(강원대학교 농촌사회교육원)	강원대	주담 당			2014년 06월		
19	농 기 지 도 컨 팅 현 기 지 장 술 원	· 친환경 동물복지 및 축산환경(강원도농업 기술원 미래농업교육 원)	강원대	주담 당			2014년 07월		
20	산 재 산 출 권 원	동물 및 가축분뇨 처 리과정의 호흡/배출 가스 측정용 환경조 절챔버	강원대	주담 당			2015년 11월		
21	산 재 산 출 권 원	온실가스 측정시스템	강원대	주담 당			2016년 11월		
22	정 책 자 료 관 제 출	2016년 국가 온실가 스 통계량 중 축산 부문 배출량 제출	축산원	주담 당			2016년 11월		
23	정 책 자 료 관 제 출	농림축산식품부문 기 후변화 관련 표준용 어 활용	축산원	주담 당			2016년 11월		
24	정 제 안 기 관 제 출	축산부문 국가 온실 가스 통계량 검증프 로그램 활용	축산원	주담 당			2014년 11월		
25	정 제 안 기 관 제 출	2015년 국가 온실가 스 통계량 중 축산 부문 배출량 제출	축산원	주담 당			2015년 11월		

26	정 책 제 안 채택	축산부문 국가 온실 가스 통계량 검증프 로그램 활용	축산원	주담 당			2014년 12월		
27	정 책 제 안 채택	2015년 국가 온실가 스 통계량 중 축산 부문 배출량 제출	축산원	주담 당			2015년 12월		
28	학 술 발 표 (국내)	Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from conventional and animal welfare farm of raising dairy cow	강원대	주담 당			2014년 06월		
29	학 술 발 표 (국내)	퇴비화 과정 중 온실 가스 배출량에 대한 챔버 측정 방법과 폭 기의 효과	강원대	주담 당			2014년 06월		
30	학 술 발 표 (국내)	2012년 축산부문 온 실가스 배출량 인벤 토리 산정	축산원	주담 당			2014년 10월		
31	학 술 발 표 (국내)	유우 동적 시스템에 서의 기준흐름	강원대	주담 당			2015년 09월		
30	학 술 발 표 (국내)	2013년도 축산부문 온실가스 인벤토리 산정 연구	축산원	주담 당			2015년 11월		
33	학 술 발 표 (국내)	경기 북부 지역의 가 축분뇨 처리시설과 돈사에서 발생하는 CH ₄ 과 N ₂ O 배출량 조사	강원대	주담 당			2016년 06월		
34	학 술 발 표 (국내)	농림축산식품부문 기 후변화정책 발전방향 연구	강원대	주담 당			2016년 11월		
35	학 술 발 표 (국내)	1990-2014년도 축산 부문 온실가스 인벤 토리 산정 연구	축산원	주담 당			2016년 10월		
36	학 술 발 표 (국내)	2014년도 축산분야 가 축 분 뇨 처 리 부 문 권역별 온실가스 배 출량 평가	축산원	주담 당			2016년 10월		
37	학 술 발 표 (국제)	Decision supporting tool for sustainable dairy cow system	강원대	주담 당			2014년 10월		
38	학 술 발 표 (국제)	Reference flow for dynamic system of dairy cow	강원대	주담 당			2015년 11월		

39	학 술 발 표 (국제)	Investigation of bacterial diversity in swine manure treatment system in Korea	강원대	주담 당			2016년 06월		
40	학 술 발 표 (국제)	A Meta-analysis of Microbial Diversity in Swine Manure	축산원	주담 당			2016년 06월		

제 11 장 기타사항

○ 해당없음

제 12 장 참고문헌

- AU. 2007. The development of climate change impact monitoring system and adaptation strategies for human health. Ministry for Health, Welfare and Family Affairs.
- Chae, J.S. 2010. The current situation of agricultural & fishery sectors and their measures for the global climate change - Status and countermeasures of the veterinary and livestock sector on climate change. The Korean Academy of Science and Technology.
- Chase, L.E. 2006. Climate change impacts on dairy cattle. Climate change and agriculture: promoting practical and profitable responses.
 <<http://dbccc.onep.go.th/Climate/attachments/article/105/Climate%20Change%20Impacts%20on%20Dairy%20Cattle.pdf>>(retrieved 2015.06.01)
- Downing, T.E., Butterfield, R.E., Edmonds, B., Knox, J.W., Moss, S., Piper, B.S and Weatherhead, E.K. With the CCDeW project team. 2003. Climate change and demand for water. Research Report (Stockholm Environment Institute Oxford Office, Oxford.)
- Ehrenfeld, D. 2005. The environmental limits to globalization. *Conserv. Biol.* 19(2), 318-326
- FAO. 2008. 2008 The state of food and agriculture. Electronic Publishing Policy and Support Branch Communication Division FAO
- FAO. 2013. Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in Livestock Production: A review of technical options for non-CO₂ emissions.
- Gu, H.S. 2009. The impacts of climate change on livestock: Research trends in foreign countries livestock. *J. Clim. Res.* 4(2), 110-117
- Hisas, L. 2011. The impacts of climate change on food production: a 2020 perspective. Universal Ecological Fund.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, T, (Eds.), The Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.

- IPCC. 2007. Climate change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York
- KHOA. 2009. Study on sea level changes by global warming. Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA).
- Kim, C.G., Kim, B.S., Kim, T.Y., Kim, M.K. and Anderson, J. 2007. Countermeasures of agriculture for Kyoto Protocol fulfillment. Korea Rural Economic Institute.
- Kim, J.N. 2013. Dairy industrial trend of Australia and New Zealand. World Agri. 154, 1-46
- KMA. 2010. 2010 Special report on abnormal climate. Korea Meteorological Administration (KMA).
- Kwon, W.T. 2005. Current status and perspectives of climate change sciences. ASIA-PAC. J. Atmos. Sci. 41, 325-336
- Lee, E.K. 2013. Considering on relation between agriculture and environmental law. Environ. Law Res. 35(2), 329-356
- Lee, M.H. 2010. The current situation of agricultural & fishery sectors and their measures for the global climate change. The Korean Academy of Science and Technology
- McGinn, S.M., Toure, A., Akinremi, O.O., Major, D.J., Barr, A.G. 1999. Agroclimate and crop response to climate change in Alberta, Canada. Outlook. Agric. 28(1), 19-28
- Passey, R. 2003. Uncertain harvest: The predicted impacts of global warming on Australia agriculture. Australia Wind Energy Association and Climate Action Network Australia.
- Seung, J.H., and Han, S.H. 2011. Trend and prospect of world crop supply and demand, in: Agricultural Prospect 2011: Agriculture, rural area, and agri-food industries: New market and opportunity. pp511-532
- Sietz, D., Choque, S.E.M., Lüdeke, M.K.B. 2012. Typical patterns of smallholder vulnerability to weather extremes with regard to food security in the Peruvian Altiplano. Reg. Environ. Change. 12, 489-505
- Singh, B., El Maayar, M., André P., Christopher, R.B. and Thouez, J.P. 1998. Impacts of a GHG-Induced Climate Change on Crop Yields: Effects of Acceleration in Maturation, Moisture Stress and Optimal Temperature. Climatic change 38(1), pp.51-86
- Sung, M.H. 2012. World crop price trend. World Agri. 137, 1-7

- Thornton, P., Herrero, M., Freeman, A., Mwai, O., Rege, E., Jones, O., and McDermott, J. 2007. Vulnerability, climate change and livestock - Research Opportunities and Challenges for Poverty Alleviation. *J. SAT. Agri. Res.* 4(1), 1-23
- Thornton, P.K and Gerber, P.J. 2010. Climate change and the growth of the livestock sector in developing countries. *Mitigation Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 15, 169-184
- Van Dijk, J., Sargison, N. D., Kenyon, F. and Skuce, P. J. 2010. Climate change and infectious disease: helminthological challenges to farmed ruminants in temperate regions. *Animal* 4, 377-392
- White, N., Sutherst, R. W., Hall, N., and Wish-Wilson, P. 2003. The vulnerability of the Australia beef industry to impacts of the cattle tick (*Boophilus Microplus*) under climate change. *Climate Change* 61, 157-190
- Woolhouse, M. 2011. How to make predictions about future infectious disease risks. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 366, 2045-2054
- Yang SH, Choi DY, Cho SB, Hwang OH. 2014. Estimation of greenhouse gas (GHG) emissions from livestock agriculture in Korea. *Journal of Animal Environmental Science* 20(4):139-146. (In Korean with English abstract)

주 의

1. 이 보고서는 농촌진흥청에서 시행한 「농업기후변화대응체계구축사업」의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농촌진흥청에서 시행한 「농업기후변화대응체계구축사업」의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.