

발 간 등 록 번 호

11-1543000-001795-01

농업부문 온실가스 감축효과 산정을 위한 경종 및 축산부문 배출계수와 검증 가이드라인 개발

서울대학교

농 립 축 산 식 품 부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업부문 온실가스 감축효과 산정을 위한 경종 및 축산부문 배출계수와 검증 가이드라인 개발” (개발기간 : 2014. 12. 19 ~ 2017. 02. 18)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 02. .

주관연구기관명 : 서울대학교 (대표자) (인)
연구기관(용역)명 : 한국품질재단
위탁연구기관명 : 경상대학교

주관연구책임자 : 김경훈 교수
용역연구책임자 : 정유심 팀장
위탁연구책임자 : 김필주 교수

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	314081-2	해 당 단 계 연 구 기 간	2014.12.19. ~2017.02.18. (2년2월)	단 계 구 분	(해당단계)/ (총 단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	예시) 농생명산업기술개발사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	농업부문 온실가스 감축효과 산정을 위한 경종 및 축산부문 배출계수와 검증 가이드라인 개발			
연구책임자	김경훈	해당단계 참여 연구원 수	총: 20 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:300,000 천원 민간: 천원 계: 천원
		총연구기간 참여 연구원 수	총: 36 명 내부: 명 외부: 명	총연구개발비	정부: 600,000 천원 민간: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 국제농업기술대학원			참여기업명	
위탁연구	연구기관명: 경상대학교			연구책임자: 김필주	

<p>요약</p> <ul style="list-style-type: none"> - 축산 장내발효부문 저탄소사료 메탄 배출계수 <u>14건</u> 그리고 경종부문 저탄소비료의 메탄 배출계수 <u>2건</u>, 아산화질소 배출계수 <u>2건</u>을 연구를 통해 얻음. 투입기술 관점에서 감축효과를 산정하기 위한 배출계수가 연구된 것은 축산과 경종부문에서 처음이고, 필수적으로 함께 이루어져야 하는 개발과정의 검증 가이드라인이 함께 구축 - 이전의 배출계수 연구는 작물별, 가축별로 이루어졌지만, 본 연구는 투입기술(저탄소비료, 저탄소사료)의 배출계수와 베이스라인의 배출계수를 동시에 얻어 비교함으로써 경종 및 축산 현장에서의 투입기술별 감축효과 인정 범위를 결정할 수 있는 자료를 제공하고 있기 때문에 감축사업을 위한 방법론 개발과 현장 감축사업 확대에 기여할 것임 	보고서 면수
--	--------

국문 요약문

		코드번호	D-01			
축산부문 연구의 목적 및 내용	본 연구에서는 축산 장내발효 온실가스 배출량을 저감하기 위해 사료급여 방식(TMR과 분리급여), 지방첨가 사료, 양질의 조사료 급여 조건에서 온실가스 배출계수를 개발하고, 가축분뇨 메탄생산과의 상관성을 분석함					
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 습식 TMR 급여 방법이 분리급여(SF) 방법보다 장내발효 메탄생산량이 높았음 ○ 건식 TMR 급여에 의한 메탄발생량이 SF 방법보다 많다는 것을 재확인함. ○ 지방이 함량이 높은 linseed 첨가사료의 메탄저감 효과가 없었음 ○ 국내산 양질의 조사료(Italian ryegrass 베일사일리지)와 국내산 벚짚을 섭취한 한우의 1일 메탄발생량은 본 실험에서 차이가 없었음 ○ 장내발효 메탄 발생량과 가축분뇨의 메탄발생량은 부의 상관성이 확인됨 ○ 권취식 다접보온커튼의 시제품 열전도율은 평균 81.9%이었고, 15년 사용한 것도 약 75% 이상으로 큰 변화가 없었음 					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 축산부문의 경우, 당초 감축효과가 있을 것으로 예상했던, TMR, linseed, 양질조사료 모두 감축효과가 없는 실험결과가 도출되어 감축사업에 활용하기는 어려운 것으로 판단됨 ○ 또한 TMR(혼합급여) 대비 분리급여가 오히려 감축효과가 있는 것으로 나왔지만 TMR을 권장하고 있는 농업정책 흐름상 분리급여를 감축기술로 보고 신규방법론을 고려하는 것도 어려운 것으로 보임 ○ 그러나 (향후 활용방안 관점에서) 이 연구결과를 향후 다른 연구자가 활용하도록 토대를 마련할 필요는 있음. 그리고 향후 다른 연구자가 유사 연구를 수행할시 주의해야할 점 또는 실험계획시 고려해야할 점 등을, 먼저 연구를 수행한 선행연구자의 관점에서 제시한다면, 이로부터 본 연구의 활용가능성을 높일 수 있을 것으로 판단됨. 					
중심어 (5개 이내)	장내발효	사료급여방식	지방첨가	양질조사료	메탄	

		코드번호		D-01	
경종부문 연구의 목적 및 내용	<p>본 연구에서는 경종분야의 온실가스 배출량을 저감하기 위해 ① 저탄소 비료의 생산과정에서의 온실가스 배출계수를 개발, ② 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출량 감축효과를 산정하고자 하였음. 이를 위해 완효성 비료 생산과정에서의 온실가스 배출계수를 조사하였으며, 논과 밭에서 완효성 비료의 시비량 감축효과를 구명, 시비량 감축에 따른 온실가스 배출계수를 개발하고자 하였음</p>				
연구개발성과	<p>벼논에서 N₂O 배출량은 요소 처리구(control)에서 약 0.66 kg ha⁻¹, 완효성비료 100% 처리구에서 약 0.55 kg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 17% 저감되었음. CH₄ 배출량의 경우 요소 처리구에서 약 351.2 kg ha⁻¹, 완효성비료 100% 처리구에서 약 290.9 kg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 15% 저감되는 것으로 나타났다. 벼 수량은 요소 처리구에서 약 6.1 Mg ha⁻¹, 완효성비료 100% 처리구에서 약 6.9 Mg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 13% 증가하였음. 속효성 질소 비료 90 kg N ha⁻¹ 처리했을 때와 동일량의 벼 수량을 얻기 위해서 필요한 완효성 질소 비료의 시비량은 평균 59.5 kg N ha⁻¹ 로 질소 처리량을 약 34% 저감할 수 있었음. 또한 완효성 질소 비료 시용에 의한 질소 시비량 저감은 벼 재배 기간 중 발생한 N₂O 및 CH₄를 각각 약 32.5, 35.1% 저감 시킬 수 있었음</p> <p>밭에서 고추 재배 시 N₂O 배출량은 요소 처리구에서 약 6.8 kg ha⁻¹, 완효성 비료 100% 처리구에서 약 4.7 kg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 31% 저감되었음. CH₄ 배출량의 경우 요소 처리구에서 약 4.1 kg ha⁻¹, 완효성비료 100% 처리구에서 약 3.8 kg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 7% 저감되는 것으로 나타났다. 고추 수량은 요소 처리구에서 약 1.37 Mg ha⁻¹, 완효성비료 100% 처리구에서 약 1.49 Mg ha⁻¹로, 완효성 비료 시비 시 동일량의 속효성 비료 시비 보다 약 9% 증가하였음. 속효성 질소 비료 190 kg N ha⁻¹ 처리했을 때와 동일량의 고추 수량을 얻기 위해서 필요한 완효성 질소 비료의 시비량은 평균 132 kg N ha⁻¹ 로 질소 처리량을 약 33% 저감할 수 있었음. 또한 완효성 질소 비료 시용에 의한 질소 시비량 저감은 고추 재배 기간 중 발생한 N₂O를 약 38% 저감 시킬 수 있었음</p> <p>앞의 결과들을 통해 논에서 벼 재배 기간 중 N₂O와 CH₄의 배출계수는 각각 0.0018 kg N₂O-N/N kg, 1.1376 kg CH₄-C/N kg 이었으며, 밭에서 고추 재배 기간 중 N₂O와 CH₄의 배출계수는 각각 0.0134 kg N₂O-N/N kg, 0.0260 kg CH₄-C/N kg 이었음</p>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<p>본 연구를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 세계적인 학술지에 논문을 투고할 예정이며, 개발한 논과 밭에서 저탄소비료의 온실가스 배출계수를 국가고유 배출계수로 등록하고자 함. 우리나라 농경지에서의 온실가스 배출량 저감을 위해 정책제안과 영농활용 자료로 활용할 계획임.</p>				
중심어 (5개 이내)	완효성 비료	배출계수	아산화질소	메탄	경종

가이드라인 연구의 목적 및 내용	<p><위탁(한국품질재단): 경종 및 축산부문 배출계수 개발·검증 가이드라인 개발></p> <p>□ 연구목적</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 농업부문 온실가스 감축제도 배출계수 현황분석 및 배출계수 개발 계획 수립 ○ 경종 및 축산부문 배출계수 불확도 평가 ○ 농업부문 온실가스 감축제도 배출계수 개발·검증 가이드라인 개발 <p>□ 연구내용</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 배출원별 국가 인벤토리에서의 배출계수 적용 현황 파악 ○ 감축사업에서 국가배출계수 이용실태 분석 ○ 감축사업에서 활용가능한 배출계수에 대한 개발계획 수립 ○ 본 연구의 개발 배출계수에 대한 불확도 평가계획 수립 ○ 본 연구의 개발 배출계수에 대한 불확도 평가 ○ 본 연구를 통해 개발되는 배출계수 개발 접근방식 분석을 통한 개발, 검증 가이드라인 표준화 ○ 경종 및 축산부문 배출계수 개발 검증 가이드라인 개발 				
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 농업부문 온실가스 감축사업의 신뢰성 제고를 위해, 지속적인 배출계수 개발 연구가 필요함. 이를 위해 우선 국가 온실가스 인벤토리의 배출계수 현황, 이와 별도로 농업부문 감축사업 배출계수 현황 분석 등을 통해 감축사업 배출계수 관리방안을 제시하고, 추가적인 배출계수 개발을 위한 개발계획을 수립함 ○ 온실가스 감축사업 배출계수 개발의 경우, 국가배출계수에 비해 검증과정의 엄밀성이 상대적으로 덜하지만, 감축사업의 결과물인 감축실적의 신뢰성을 높이기 위해서는 배출계수 개발과정 및 배출계수에 대한 품질관리가 필요함. 이를 위해 본 연구의 경종 및 축산부문 배출계수 개발과정을 검토·분석하여 불확도 평가를 수행함 ○ 또한 향후 다른 감축계수 개발시 해당 계수의 신뢰성을 높이기 위해서, 개발과정 간 검토해야할 내용을 절차에 따른 가이드라인으로 개발하였고, 연구자의 용이한 자체검토를 위해 체크리스트를 함께 마련하였음 				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구에서 수립된 감축사업 배출계수 개발계획을 검토하여, 추가로 개발이 필요한 감축사업 배출계수 선정시 활용 ○ 본 연구에서 개발된 감축사업 배출계수를 검토하여, 향후 감축사업 방법론에 적용해 감축사업에서 활용토록 함 ○ 본 연구는 시공간적 제약상 감축사업 배출계수 개발연구로 한정되었지만, 향후 관련 국가배출계수 연구시 본 연구의 결과물(데이터 및 배출계수)은 차기 연구자에게 선행연구로서 활용될 것으로 기대 ○ 본 연구에서 개발된 배출계수 개발·검증 가이드라인(체크리스트 포함)은 향후 감축사업 배출계수 연구자들이 배출계수의 자체품질관리를 위한 지침을 제공 				
중심어 (5개 이내)	온실가스 감축사업	배출계수	불확도	가이드라인	경종 및 축산

< SUMMARY >

		코드번호	D-02			
<Enteric fermentation> Purpose& Contents	<p>The purpose of this experiment is to determine CH₄ production and ruminal characteristics when cattle fed 1) separate feeding of concentrate and forage (SF) and TMR 2) diets supplemented with linseed 3) different quality of forages. Investigation were performed to quantify the relationship between enteric and slurry CH₄ production on individual cattle basis because of concern of the CH₄ production from manure storage.</p>					
Results	<p>No differences ($P > 0.1$) in methane emissions were observed in animals fed diets at 2.4% of BW in experiment 1. Animals fed TMR at 2% BW in experiment 2 emitted significantly more methane (138.5 vs. 118.2 L/d; $P < 0.05$) and lost more methane energy (3.98 vs. 3.49 %; $P = 0.005$) compared to those fed SF. Overall, these results indicate that, compared to TMR, SF significantly reduces methane emission from ruminants and increases VFA production without affecting the total tract digestion.</p> <p>There were no statistically differences in CH₄ production (g/d) and conversion rate (%) between for steers fed diets supplemented with linseed and IRG and RS even though indirect estimates of apparent OM and NDF digestibility (g/kgDM) of IRG (0.674 and 0.635, respectively) also were higher ($P=0.009$) than those of RS (0.614 and 0.557, respectively).</p> <p>There were no statistically differences in CH₄ production (g/d) and conversion rate (%) for steers fed IRG and RS even though indirect estimates of apparent OM and NDF digestibility (g/kgDM) of IRG (0.674 and 0.635, respectively) also were higher ($P=0.009$) than those of RS (0.614 and 0.557, respectively).</p>					
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Plan for development emission factors can be used when practitioners of offset program make a decision for research and development of emission factors. ◦ These guidelines and checklists can be used for quality control in emission factor development process. ◦ Verifier process of developed emission factors investigate development process using these guidelines and checklists. 					
Keywords	Enteric fermentation	Feeding system	Fat additive	Forage quality	Methane	

<Agriculture> Purpose& Contents	<p>To reduce greenhouse gases we conducted ① development of GHGs emission factor during low-carbon fertilizer manufacturing process, ② effect of low-carbon fertilization on reducing fertilization level and fluxes of GHGs. We investigated the fluxes of GHGs during low-carbon fertilizer manufacturing process, effect of slow-release fertilizer on reducing fertilization level and GHGs emission factors according to reducing of fertilization level.</p>				
Results	<p>In the rice paddy, N₂O flux was 0.66 kg ha⁻¹ in urea treatment(90 kg ha⁻¹, control treatment) and 0.55 kg ha⁻¹ in slow-release fertilizer 100% treatment(slow 100 treatment) during rice cultivation. Slow-release fertilization reduced 17% of the N₂O flux as compared to urea fertilization. Methane flux was 351.2 kg ha⁻¹ in control treatment and 290.9 kg ha⁻¹ in slow 100 treatment. Slow-release fertilization reduced 15% of the CH₄ flux as compared to urea fertilization. Rice yield was 6.1 Mg ha⁻¹ in control treatment and 6.9 Mg ha⁻¹ in slow 100 treatment. Slow-release fertilization increased 13% of rice yield as compared to urea fertilization. To get the same rice yield in control treatment, slow-release fertilizer should be applied as 59.5 kg N ha⁻¹ which could reduce 34% of N fertilization. And this N fertilization level reduction could reduce 32.5% of N₂O and 35.1% of CH₄ emission.</p> <p>In the upland, N₂O flux was 6.8 kg ha⁻¹ in urea treatment(190 kg ha⁻¹, control treatment) and 4.7 kg ha⁻¹ in slow-release fertilizer 100% treatment during chilli cultivation. Slow-release fertilization reduced 31% of N₂O flux as compared to urea fertilization. Methane flux was 4.1 kg ha⁻¹ in control treatment and 3.8 kg ha⁻¹ in slow 100 treatment. Slow-release fertilization reduced 7% of the CH₄ flux as compared to urea fertilization. Chilli yield was 1.37 Mg ha⁻¹ in control treatment and 1.49 Mg ha⁻¹ in slow 100 treatment. Slow-release fertilization increased the rice yield by 9% as compared to urea fertilization. To get the same rice yield in control treatment, slow-release fertilizer should be applied as 132 kg N ha⁻¹ which could reduce 33% of N fertilization. And this N fertilization level reduction could reduce 38% of N₂O emission.</p> <p>Using these results, N₂O and CH₄ emission factors were 0.0018 kg N₂O-N/N kg and 1.1376 kg CH₄-C/N kg from paddy during rice cultivation and 0.0134 kg N₂O-N/N kg, 0.0260 kg CH₄-C/N kg from upland during chilli cultivation.</p>				
Expected Contribution	<p>We are planing to apply this results to the international journals and register this developed emission factor as country-specific emission factor. And we are planing to propose as policy suggestion and utilize as data of agricultural activity.</p>				
Keywords	slow release fertilizer	emission factor	nitrous oxide	methane	agriculture

<Guideline> Purpose & Contents	<p style="text-align: center;"><kfq> Guidelines for Development and Verification of Emission Factors in Agricultural and Livestock Sector</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ This study focuses on developing guidelines for Development and Verification of Emission Factors in Agricultural and Livestock Sector. The guidelines include recommendations on applicabilities for offset program, methods for calculating uncertainties of emission factors. ○ In addition, this study build a plan for development of emission factors for agricultural offset program. The plan was built considering propagation of agricultural offset program and accuracy of emission reduction amounts. 				
Results	<ul style="list-style-type: none"> ○ Research on emission factors in agricultural sector is necessary to propagate agricultural offset program. Higher tier methodologies are developed, more accurate emission reduction amounts can be evaluated. This study surveyed current practice for emission factors application in agricultural offset program and emission factors in national inventory reports. It founded that newly developed national emission factors (Tier 2) were not applied to offset program. Therefore, recommended management practices of emission factors in offset program is set up. ○ Emission factors in offset program shulde be accurate because they are related to offset credit, which has value in money. To increase reliability of offset credit, quality management on emission factors is needed. This study investigated emission factor development process and evaluated uncertainties. ○ In addition, the findings of this study are organized into guidelines that provide recommendation about application of emission factor to offset program and includes checklists for developers. 				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ○ Plan for development emission factors can be used when practitioners of offset program make a decision for research and development of emission factors. ○ These guidelines and checklists can be used for quality control in emission factor development process. ○ Verifier process of developed emission factors investigate development process using these guidelines and checklists. 				
Keywords	Greenhouse Gas	emission factor development	uncertainty	offset program	agriculture and livestock

영문목차

1. Summary of Research	1
1) Aim of the research	1
2) Significance of the research	2
3) Range of the research	5
2. Present State of Technologies at Home and Abroad	8
1) Enteric fermentation	8
2) Multi layer curtain	23
3) Agriculture sector	24
4) Guideline for development and verification	25
3. Research Contents and Results	26
1) Overall Strategy	26
2) Enteric fermentation	37
3) Multi layer curtain	52
4) Agriculture sector	58
5) Guideline for development and verification	68
<Appendix>	179
4. Degree of Accomplishment in Research and Contribution to Related Fields	207
5. Achievements of Research and Further Prospects	211
6. Information of Related Technologies Abroad	214
7. Security Level of Research and Developments Output	217
8. List of experimental facilities	217
9. Implementation of security	217
10. Representative Research Performance of the Project	218
11. The others	219
12. Reference	220

〈 목 차 〉

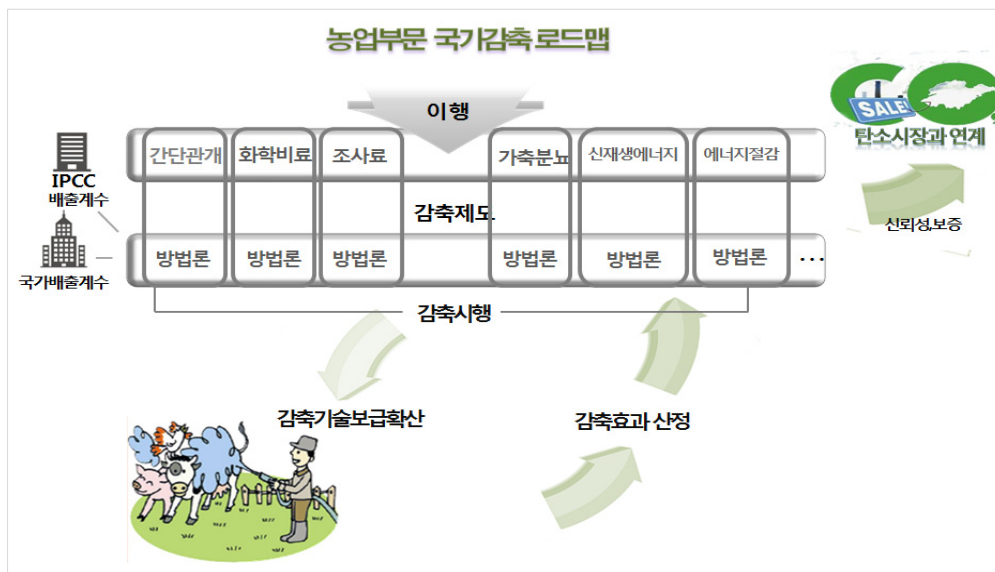
제1장. 연구개발과제의개요	1
제1절. 연구개발 목적	1
제2절. 연구개발의 필요성	2
제3절. 연구개발 범위	5
제2장. 국내외 기술개발 현황	8
제1절. 축산 장내발효 저탄소사료	8
제2절. 다겹보온커튼	23
제3절. 경종부문 저탄소비료	24
제4절. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발	25
제3장. 연구수행 내용 및 결과	26
제1절. 총괄 연구개발 추진전략	26
제2절. 축산부문 감축사업 활용을 위한 배출계수 개발 및 감축량 산정	37
제3절. 다겹보온커튼	52
제4절. 농업부문 감축사업 활용을 위한 배출계수 개발 및 감축량 산정	58
제5절. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발	68
〈별첨〉 농업부문 감축사업을 위한 경종 및 축산부문 배출계수 및 검증 가이드라인	179
제4장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	207
제1절. 목표 달성도	207
제2절. 관련분야 기여도	209
제5장. 연구결과의 활용계획 등	211
제1절. 경종과 축산부문의 연구결과	211
제2절. 추가로 개발이 필요한 감축사업 배출계수의 선정	211
제3절. 개발된 배출계수의 적용가능성 검토 후 감축사업에서 활용	212
제4절. 추가적인 감축사업 배출계수 또는 국가배출계수 개발의 토대	212
제5절. 배출계수 개발 연구시 가이드라인 활용	212
제6장. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	214
제7장. 연구개발성과의 보안등급	217
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비현황	217
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적	217
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구실적	218
제11장. 기타사항	219
제12장. 참고문헌	220

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발 목적

농업부문 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서, 경종 및 축산부문 감축량 산정 및 검증에 필요한 배출계수 및 가이드라인을 개발

- 저탄소 사료(지방 첨가, 양질조사료, 섬유질배합사료)의 반추가축 장내발효 메탄 발생 감축량 산정 및 유지기간 설정
- 저탄소비료 생산과정에서의 온실가스 배출계수 개발 및 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출량 감축효과 산정
- 농업부문 감축사업에서 필요로 하는 신규방법론을 개발하고 활용하기 위해서 관련 배출계수 개발연구의 개발과정 투명성과 개발된 배출계수의 신뢰성을 보장하기 위한 불확도 수준을 제시하고, 감축사업의 활성화를 위한 배출계수 개발계획 수립 및 검증가이드라인을 개발



**배출계수의 불확도평가를 포함한 배출계수 개발 검증 가이드라인 개발
 감축량 산정을 위한 배출계수 개발
 감축수단의 보급 확대**

- 농업분야의 온실가스 감축기술 적용 → 농업부문 온실가스 감축목표 달성
- 검·인증을 통한 농업부문의 온실가스 감축량 → 인센티브(탄소배출권 등) 획득
- 농업분야 탄소배출권 획득 → 정부 또는 기업으로의 판매 및 농업 이외 부문에서의 감축활동으로 활용 가능

제2절 연구개발의 필요성

1. 축산 장내발효부문 저탄소사료

현재까지 국내에서는 장내발효 메탄저감이 가능한 사료 또는 급여 시스템에 대한 현장 실증 비교 연구가 없을 뿐 아니라, 배출계수와 감축사업 등록 사례도 없다. 따라서 축산현장에 적용할 수 있는 감축기술 개발과 감축기술이 투입된 사료, 넓은 의미의 “저탄소사료”를 급여했을 때의 배출계수 개발이 필요하다.

* “저탄소사료”는 메탄을 저감할 수 있는 저감제가 들어간 사료는 물론 사료급여 체계 까지도 포함하는 광의의 정의가 필요함

가. 지방 또는 지방산 첨가사료

- 캐나다나 호주에서 장내발효 메탄 감축사업 적용 사례가 있다는 면에서는 국내 감축사업의 후보로 최우선 검토되어야 하겠지만, 생산성 극대화를 위해 지방 약 4.5%정도가 이미 함유되어 있는 국내 배합사료에 추가 첨가는 어렵기 때문에 국내 적용 우선순위는 낮다고 판단된다.

나. 양질조사료 급여에 의한 메탄감축

- 한국의 경우, 반추가축 사료는 대략 농후사료 60%, 조사료 40%의 비율로 구성되어 있으며, 과거에는 볏짚 의존도가 높았으나 양질조사료의 중요성이 강조되면서 매년 양질조사료의 비율이 증가되고 있다. 양질조사료 급여량 확대에 의한 가축생산성 향상 및 단위축산물 생산량당 메탄배출량의 감소를 기대하고 있지만, 국외는 물론 국내에서도 연구보고가 극히 제한적이다.

다. 사료급여 시스템

- TMR은 식품제조 또는 농산물제조 부산물을 사료 원료로 사용할 수 있는 사료급여 방식이면서 영양학적 그리고 생산성 관점에서 분리급여 보다 많은 장점이 있다고 알려져 있다(이 등, 2016).
- 한우 생산비 중 사료비 비율이 높은 우리나라는 사료비 절감을 위해서도 부산물 이용과 함께 TMR 보급이 필요하다는 정책적 판단으로 90년대 후반부터 비육우 현장에서 TMR이 보급되기 시작하였다.
- 우리나라 비육우 사료급여 방식은 2015년 축산물 생산비 통계로 TMR 23%, 분리급여 (Separately) 77%로 크게 양분된다
- TMR의 장내발효 메탄발생량이 분리급여보다 적다는 연구결과만 있다면, 현재의 분리급여 농가가 TMR 급여로 전환하는 경우 감축량을 인정하는 방법론 개발이 필요할 것이다.

2. 경종부문 저탄소비료

가. 경종부문 온실가스 배출량은 국가고유 배출계수(emission factor)와 활동계수 (activity)를 이용하여 산출하고 있다

- 대상 온실가스: 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)
- 온실가스 배출량 = \sum Emission factors \times Activities

- Emission factor = Baseline factor × Scaling factors

나. 2014년 현재까지 우리나라는 농업부문의 국가고유 배출계수가 개발되지 않아 IPCC 배출계수(default 값)를 활용하여 온실가스 배출량을 산정하고 있지만, 대부분의 선진국에서는 자국의 고유배출계수를 개발하여 농경지로부터의 온실가스 배출량을 정확하게 산정하려 노력하고 있다

⇒ 우리나라 농업부문의 온실가스 배출량을 정확하게 산정하기 위해서는 경종부문과 축산부문의 국가고유 배출계수 개발 및 등록 작업이 필요함

다. 현재까지 개발된 농업부문의 다양한 온실가스 배출계수를 국가고유 배출계수로 등록하기 위해서는 다음의 6단계의 검증과정을 거쳐야 하며, 농업부문 온실계수 고유배출계수 개발을 위해서는 이에 대응한 자료구축이 요구된다(법적근거 : 녹색성장기본법 제 45조 제 1항)

라. 국내 경종부문에서는 다양한 시험을 통해 논과 밭에서 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)의 배출계수가 개발되어 2014년 국가온실가스 배출계수로 등록되었으나, 아직까지 이를 이용한 경종부문 온실가스 배출량은 제대로 산출되지 못하고 있다

- 농촌진흥청 산하 연구기관을 중심으로 2009-2012년 사이 논과 밭에서 주요 토양관리 조건별 메탄과 아산화질소의 배출계수가 개발되어, 2014년 국가고유 배출계수로 등록을 완료하였음

→ 벼논에서 메탄의 기본배출계수 2.32 kg CH₄/ha/day과 중간낙수 보정계수(scaling factor, SFw) 0.49, 볏짚시용 보정계수(SFo) 2.5, 녹비시용 보정계수(SFo) 8.8을 등록하였음

→ 밭에서 고추 콩 배추의 아산화질소 배출계수, 그리고 질소 시비량 변화에 따른 통합 배출계수(0.00596 kg N₂O-N/N kg)가 개발되어 등록이 완료되었음

마. 경종분야의 온실가스 배출량을 정확하게 산출하고 현실성 있는 온실가스 배출량 감축정책을 수립하기 위해서는 등록된 배출계수 이외에 다양한 영농조건 하에서의 온실가스 배출계수 개발이 요구된다.

- 논과 밭에서 완효성 비료 시용에 온실가스 배출량 감축효과

- 밭에서 녹비작물 활용에 따른 온실가스 배출량 감축효과

- 무경운과 최소경운 관리에 온실가스 배출량 감축효과 등

바. 저탄소(완효성) 비료 사용에 따른 비료사용량 및 온실가스 배출량 저감 기대효과는 다음과 같다.

- 논과 밭에서 작물을 재배하는 과정 중 일반 속효성 비료를 완효성 비료로 대체 사용 시 시비량을 약 30% 저감시킬 수 있으며, 이에 따른 비료성분 유출을 크게 줄일 수 있는 것으로 알려져 있음

- 속효성 비료는 작기 중 총 시비량을 3-4회 나누어 분시하고 있으나, 완효성 비료는 전량 기비로 사용되고 있어 노동력 절감효과가 크게 있는 것으로 알려져 있음

⇒ 완효성 비료시용을 통해 시비량 저감과 노동력 절감에 의한 온실가스 배출량 감축효과가 크게 있을 것으로 기대되나, 이에 대한 연구는 현재까지 이루어지지 못하고 있음

3. 경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인 개발

가. 미래 기후변화에 대응하기 위해 세계 각국은 온실가스를 감축하기 위해 노력하고 있다. 특히 기후변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 이하

UNFCCC)으로서 교토의정서는 선진국 국가에 대해 일정비율의 온실가스 감축을 강제하고 있다. 우리나라는 비록 의무 감축국은 아니지만 국제사회의 온실가스 감축 노력에 발맞추어 국가온실가스감축목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 부문별 감축수단을 담은 국가온실가스감축로드맵을 수립하였다. 이 중 경종·축산분야에서는 ‘저탄소 농업 실현’이라는 구호아래 2020년까지 농업부문 온실가스 배출전망치(Business as Usual, BAU)인 28.5백만톤 CO₂-e 대비 5.2%를 감축하기 위하여 다양한 정책적 수단을 활용하고 있다. 우리나라의 감축목표는 국제법적인 구속력은 없으나 교토체제와 같이 감축의무 이행을 점진하고 불이행에 따른 제재조치를 취하는 의무준수체계(compliance mechanism)와는 차이가 있다. 대신 감축목표와 감축행동 이행에 대한 투명성(transparency)이 강조되면서 측정·보고·검증(Measure, Report, Verify, MRV) 체계의 강화에 대한 합의가 있었다.

- 나. 농림축산식품부는 농식품부문의 자발적인 온실가스 감축을 유도하고, 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여하기 위해 2012년 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축제도 시범사업」을 도입하였다. 이후 2014년에 시범사업을 종료하고, 2015년부터 본격적으로 본 사업이 시작되었다. 농림축산식품부는 현재 제도 정착 및 활성화를 위하여 임시로 농가의 감축실적을 구매하고 있으며 향후 제도 안착과 함께 시장거래형으로의 전환을 유도하고 있다. 이러한 추진 배경 하에 사업의 활성화를 위한 핵심과제로 농업부문에서의 감축사업의 규모 및 농가의 모니터링 수준을 고려한 방법론(감축계수)의 개발의 필요성이 제기되었다. 특히 경종, 축산부문은 감축규모가 상대적으로 작고, 농가에서의 감축효과의 직접적인 모니터링이 근본적으로 한계가 있어, 합리적인 감축계수 개발 접근법이 필요하다. 또한 '15년 도입되는 배출권거래제와의 연계를 위해 '14년' 시범사업 '의 운영이 종료되고 본 사업이 '15년부터 추진됨에 따라 기 개발된 배출계수별 적정성 검토 및 검증이 수행되어야 한다.
- 다. 현재 배출계수 개발과 관련하여 공개된 문서는 국가온실가스종합정보센터에서 개발하여 활용하고 있는 ‘배출계수 검증 가이드라인’ 과 ‘사업장 고유배출계수 개발 가이드라인(국가온실가스종합정보센터)’ 으로서 개발계수의 신뢰성 확보를 위한 개발 프로세스에의 QA/QC를 중심으로 정리되어 있다. 그동안 농업(경종, 축산) 부문에서뿐만 아니라, 타 부문에서도 계수 개발에 대한 다양한 연구가 있었지만, 신뢰성 보장을 위한 개발 과정과 결과값의 불확도 제시가 미흡한 상황이다. 신뢰성 또는 국가관리체계의 효율성 등과 같은 이유로 국가 인벤토리 산정에 사용되는 국가 고유 배출계수 중 일부만 온실가스종합정보센터에 등록, 관리되고 있는 상황이다.
- 라. 따라서 농업부문 감축사업에서 필요로 하는 신규방법론을 개발하고 활용하기 위해 관련 배출계수 개발연구가 체계적으로 추진되어야 한다. 또한 국가 인벤토리 및 온실가스 감축사업에서 활용되는 배출계수는 배출원의 특성에 적정해야 하며, 개발과의 투명성 및 불확도 수준을 제시함으로써 개발된 계수의 신뢰성을 보장하여야 한다. 이러한 배경 하에 본 연구는 감축사업의 활성화를 위하여 배출계수 개발계획을 수립하고 검증가이드라인을 개발하고자 한다.

제3절. 연구개발 범위

1. 축산 장내발효 부문 저탄소사료

가. 본 연구에서 검토한 저탄소사료의 범위

- (1) 저감제(식물성 지방 또는 지방산)첨가 사료 : (현재 사업신청 중)
- (2) 볏짚을 양질조사료로 대체하는 사료급여 시스템을 대상으로 추진
- (3) 조사료·농후사료 분리급여와 혼합급여(TMR) 비교 연구

나. 호흡챔버를 이용한 메탄발생량 측정 비교

- (1) 1년차 : 저감제(지방 또는 지방산)첨가 사료
 - 반추가축 장내발효에 따른 메탄발생 감축량 산정
- (2) 2년차 : 볏짚을 양질조사료로 대체하는 사료급여 시스템
 - 반추가축 장내발효에 따른 메탄발생 감축량 산정 및 유지 기간 설정
 - 장내발효로 인한 메탄발생량과 가축분뇨 메탄발생량의 상관성 분석
- (3) 2년차 : 조사료·농후사료 분리급여와 혼합급여(TMR) 비교
 - 반추가축 장내발효에 따른 메탄발생 감축량 산정 및 유지 기간 설정
 - 장내발효로 인한 메탄발생량과 가축분뇨 메탄발생량의 상관성 분석

2. 다겹 보온커튼의 보온율(설치 후 5, 7, 10년)산정

가. 1년차 : 다겹보온커튼 설치 후 1~5년까지의 보온율 분석을 통한 함수식 개발

- (1) 다겹보온커튼에 대한 정부지원기간 고려하여 5년 이상된 보온커튼의 파악은 어려움
- (2) 다겹보온커튼은 각기 다른 종류의 보온용 자재 5겹으로 구성된 자재를 통칭하는 바, 일반적으로 폴리프로필렌 소재, 부직포, 화학솜, 폴리폼, 부작포의 순으로 자재를 겹쳐 누빈 형태로 유형 분류가 용이하지 않음
- (3) 본 연구의 목적이 내구연수 기준 마련이라는 점을 고려하여, 가능한 한 보편적으로 사용되고 있는 유형을 선정하여, 분석 예정임
 - 상기 접근은 다겹보온커튼의 유형 분류를 통해, 유형별로 실시

나. 2년차 : 가속열화시험에 의한 수명평가 가능성 파악, 가능한 경우, 평가 실시

- (1) 상기 접근은 다겹보온커튼의 유형 분류를 통해, 유형별로 실시
- (2) 다겹 보온커튼 유형 분류 및 유형별 커튼의 설치 후 5, 7, 10년 보온율 변화 산정
- (3) 다겹 보온커튼의 내구연수 기준 마련

3. 경종부문 저탄소비료

가. 저탄소비료 생산과정에서 온실가스 배출계수 개발

- (1) 대상비료: 수도용과 원예용 완효성 비료
- (2) 조사항목: 완효성 비료 생산과정 중 이산화탄소 배출량
- (3) 조사방법
 - 단비 생산과정 중 이산화탄소 배출량 산정: 국가온실가스배출계수 활용
 - 단비 코팅과정 중 이산화탄소 배출량 산정: 국외 연구자료 활용

나. 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출량 감축효과 산정

- (1) 대신토양 및 작목: 논 토양(벼)과 밭 토양(고추)
- (2) 대상비료: 일반 화학비료와 완효성비료
- (3) 처리량: 작목별 추천 시비량의 100, 75, 50, 0%
- (4) 조사항목
 - (가) 생육 및 수량특성
 - (나) 온실가스 배출특성
 - 대상온실가스: 메탄과 아산화질소
 - 조사방법: Closed Chamber Method
 - (다) 논과 밭에서 온실가스(CH₄와 N₂O) 배출계수

다. 저탄소비료의 온실가스 배출계수 개발 및 국가고유배출계수로 등록

- (1) 대상 온실가스: 메탄과 아산화질소
- (2) 등록: 국가온실가스정보센터

4. 경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인 개발

가. 감축사업의 배출계수 현황분석 및 배출계수 개발 계획 수립

- (1) 1년차
 - 배출원별 국가 인벤토리에서의 배출계수 적용 현황 파악
 - 감축사업에서 국가배출계수 이용실태 분석
 - 감축사업에서 국가 인벤토리 배출계수를 일관성 있게 활용할 수 있도록 지속적인 현황관리 방안 제안
- (2) 2년차
 - 감축사업에서 직접적으로 개발 및 관리할 수 있는 감축계수에 대한 개발계획 수립
 - 개발 필요 계수, 개발 시급성을 고려한 개발 기한, 개발계수 관리방안

나. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발

- (1) 1년차

- 본 연구를 통해 개발되는 배출계수 개발 접근방식 분석을 통한 개발, 검증 가이드라인 표준화
 - 개발 배출계수에 대한 불확도 평가계획 수립
- (2) 2년차
- 개발 배출계수에 대한 불확도 평가
 - 경종, 축산부문 배출계수 개발 검증 가이드라인 개발

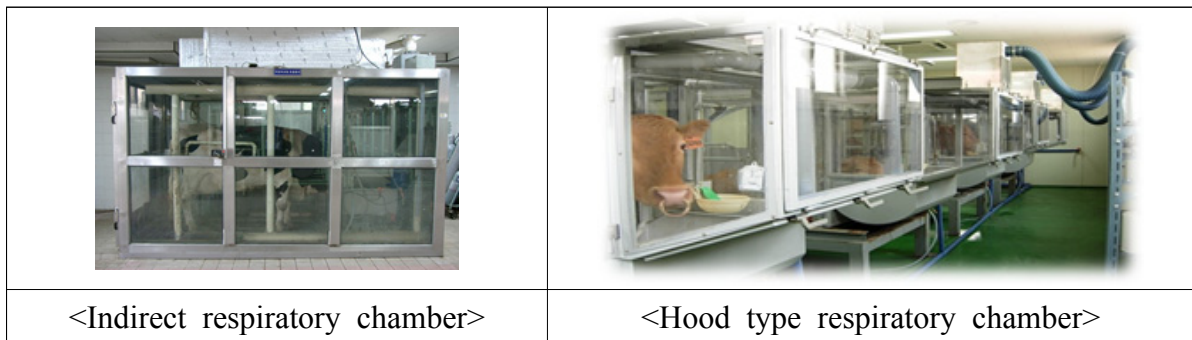
제2장. 국내외 기술개발 현황

제1절 축산 장내발효 저탄소사료

1. 연구장비 현황

국내 반추가축 장내발효 메탄 배출계수 개발 연구는 호흡챔버라고 하는 특수시설이 필요하기 때문에 국립축산과학원에서 유일하게 수행되어 왔다.

- 국립축산과학원은 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 Indirect respiratory chamber를 국내에서 유일하게 1대를 보유하고 있었고, 약 15년간 사용하다가 2006년 이후로 가동 중단
- 2005년부터는 Hood type의 respiratory chamber 4대를 제작하여 실험에 이용하였고, 2008년부터 2대를 추가 제작하여 총 6대를 사용하였으나, 현재는 기관의 이전으로 사용을 중단



- 현재는 선진 축산국가가 보유하고 있는 수준의 첨단 장치 보유하고 있음

2. 호흡챔버를 이용한 국내 선행 연구

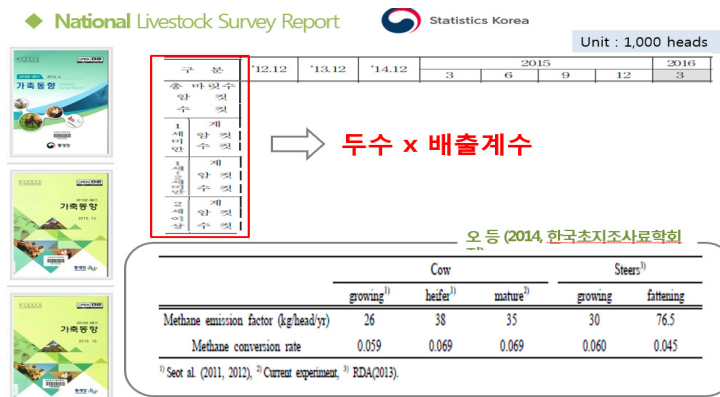
가. 선행 연구결과

- 국립축산과학원의 장내발효 메탄배출계수 연구는 UNFCCC에 제출하기 위한 국가 배출 통계를 목표로 수행되었기 때문에 아래 그림과 같이 가축의 성별 그리고 성장단계별 배출계수를 얻기 위해 수행되었다
- 국내에서 수행된 축산부문 온실가스 배출계수 개발 연구(농촌진흥청, 2013)를 모두 정리하면 다음과 같다
 - 거세 한우 : 육성기(28~32kg/두/년), 비육후기(50kg)
 - 한우 암소 : 육성기(26~30kg), 성성숙전(36~39kg), 성빈우(60~69kg)
 - 홀스타인 숫 송아지(9~12kg)
 - 한우 암소 경산우 메탄배출계수(김 등, 2013) : 34.4kg/두/년

나. 배출계수 등록

- 현재까지의 반추가축 장내발효 메탄 배출계수 개발 연구는 앞서 기술한 바와 같이 품

종별, 성별, 그리고 성장 단계별로 극히 제한적으로 이루어졌고, 국가 배출 계수 등록 사례가 아직 없다.



3. 감축사업에 적용하기 위한 배출계수 연구

가. 국내 연구 현황

- 국내에서 “메탄저감사료” 라는 용어가 처음 등장한 것은 국립축산과학원에서 10~13년에 수행된 “가축의 장내발효 메탄저감사료개발” 과제이다. 본 연구에서는 각 사료 원료별 메탄발생 기여도를 밀(wheat)을 기준으로 지수화한 것을 사료배합시 영양소함량 및 가격 등과 함께 고려하여 배합한 사료를 개발하기 위해 착수되었으나, 현장에 적용하기에는 추가 연구가 필요
- 국립축산과학원에서(14~16년) 수행된 저메탄 사료급여체계 구축에 필요한 TMR과 분리급여 비교 연구가 유일함

나. 국외 연구 현황

- EU에서는 2020년까지 메탄 5% 저감을 목표로 “low emission animal feed” 를 개발하기 위해서 5개 관련 기업과 3개 연구소의 연구자들이 참여하는 프로젝트를 2011년부터 착수하였음
 - 본 연구는 옥수수의 전분 가공 또는 섭취량과 메탄발생량, 조사료의 품질, 숙기 또는 질소 시비량, 목초 사일리지의 품질 등과 메탄발생량 등을 조사 (<https://www.wageningenur.nl/en/show/Lowemission-animal-feed-bursting-with-energy.htm>)

다. 장내발효에 의한 메탄발생량과 가축분뇨 메탄발생량의 상관성 분석

- 장내발효에 의한 메탄발생량 감축효과 방법론은 가축분뇨 온실가스 배출량에 미치는 영향을 고려해야 하지만, 이 분야의 연구는 국내외적으로도 찾아보기 어려움
- 그 이유는 감축의 대상인 장내발효보다 가축분뇨에서의 메탄발생량을 모니터링하는

데 상당한 시간과 비용 소요되기 때문

4. 우리나라 반추가축 사양 환경(베이스라인)과 투입 가능한 감축기술 검토

가. 지방 또는 지방산 첨가

(1) 외국 감축사업 적용 사례

캐나다 Alberta주의 “Quantification protocol For Emission Reductions From Dairy Cattle” 와 호주의 “Carbon Farming Initiative - Methodology for reducing greenhouse gas emissions in milking cows through feeding dietary additives” 탄소상쇄 방법론은 식물성 지방 seed를 사료에 첨가하였을 때, 메탄 감축을 인정하고 있다. 즉, oilseed (linseed 등)를 첨가하여 건물 중 지방함량이 1% 증가하면 섭취에너지 중 메탄에너지로 전환되는 비율(Y_m)의 5%가 감소하는 것으로 인정하는 것이다. 그러나 반추가축의 사료 건물 중 지방함량이 높으면 사료섭취량과 섬유소 소화율이 낮아지고, 생산성이 나빠지기 때문이다, 4~6% 이하로 제한하고 있다(Sutton 등, 1983).

<캐나다 알버타주에서 적용하고 있는 축산부문 장내발효 탄소상쇄 방법론>

Situations in which adjustments apply to Y_M values above*		
1. Use of monensin ionophores either as CRC bolus or in feed		10% reduction**
2. Feeding fats*		
Calcium salts of palm oil (or similar bypass fats)		No reduction
Oilseeds, not to exceed 6% on dry matter basis.		5% reduction for every 1.0% added fat on DM basis

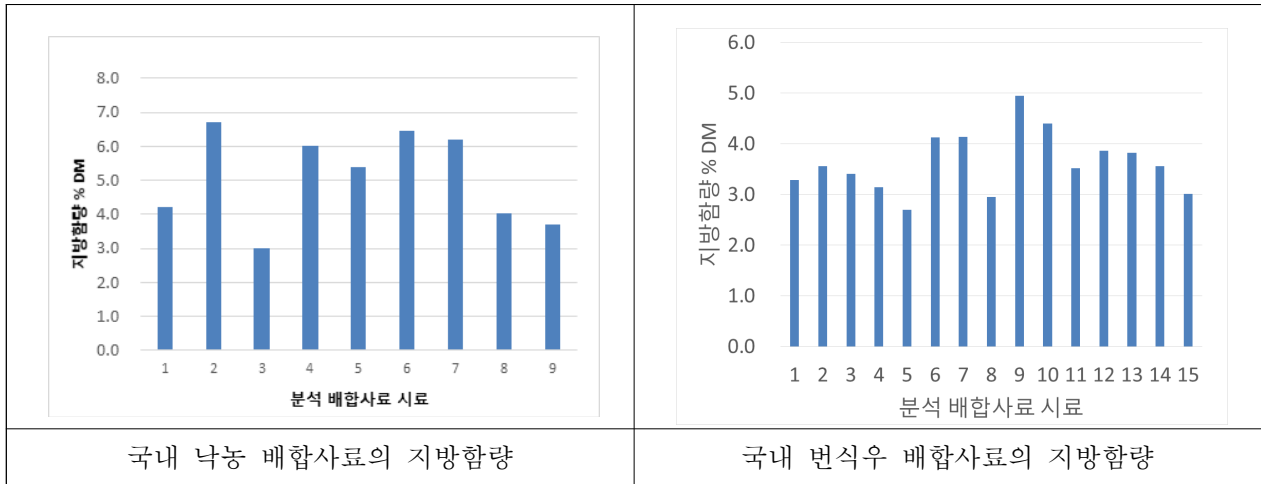
국내 축산부문에서 실행되고 있는 감축사업은 방법론은 없다. 따라서 농림축산식품부는 외국의 사례를 참조하여 “식물성 오일 추가급여” 하는 “메탄저감사료를 급여하여 젖소의 장내 발효에 따른 메탄발생 저감 방법론”을 2014년 개발(관리번호 A05-04-01) 기타 감축사업 방법론으로 등록 한 바 있다. 그러나 국내 연구결과가 없어서 현장 적용은 이루어지고 있지 않다.

(2) 국내 감축사업 기술 적용의 문제점

한우 및 젖소용 국내 시판사료를 19개 구매하여 조지방함량을 분석한 결과, 최저 3.0%~최고 6.7%의 범위를 보였고, 평균은 4.7%이었다(표 2). 우리나라는 캐나다나 호주와 다르게 좁은 면적에서 최대의 생산성을 얻기 위한 집약적 축산을 하고 있기 때문에 식물성지방과 같이 고에너지 원료가 이미 농후사료에 첨가된 배합사료가 생산되고 있고, 축산농가는 이들 시판사료를 구매하여 급여하는 독특한 사료급여 체계를 보여주고 있다. 즉, 우리나라는 외국의 사례와 같이 식물성지방을 더 추가할 수 없기 때문에 국내 적용 가능성은 회의적이다

장내발효 온실감축 분야에서 감축효과의 지속성에 관한 연구는 매우 적고 지방 첨가 기간이 6주~36주까지 많은 차이가 있는 7개의 국외 논문들에서도 그 결과는 일정하지 않다.

결론적으로, 농장단위에서 자체적으로 사료원료 구성과 지방첨가량을 결정하는 외국의 경우는 기술투입 전(baseline)과 기술투입 후(project)의 메탄발생량을 결정할 수 있지만, 우리나라는 이미 식물성 지방이 첨가된 배합사료를 모든 농가가 구매하여 이용해 왔기 때문에 감축사업의 방법론 개발은 우선 순위가 낮다고 판단된다



나. 양질조사료 급여에 의한 메탄저감 효과와 배출계수 개발

(1) 국내 축산 현황

양질 조사료의 자급 생산기반을 확보하고 국내 부존자원의 활용과 생산기반 확대를 도모하기 위해서 우리나라는 조사료 생산기반시설 확충 사업을 추진하고 있다. 이 사업은 조사료용 기계와 장비지원, 볏짚 등 부존자원 활용 지원, 초지 조성 및 기반시설 지원, 사료작물을 이용한 사일리지 제조와 운송비 지원 등으로 이루어지고 있다. 특히 젓소와 한우에 급여하는 조사료 대 농후사료의 비율을 현재 4:6에서 6:4로 전환하면서 양질의 조사료 급여량을 높이기 위한 정책적 노력을 하고 있다.

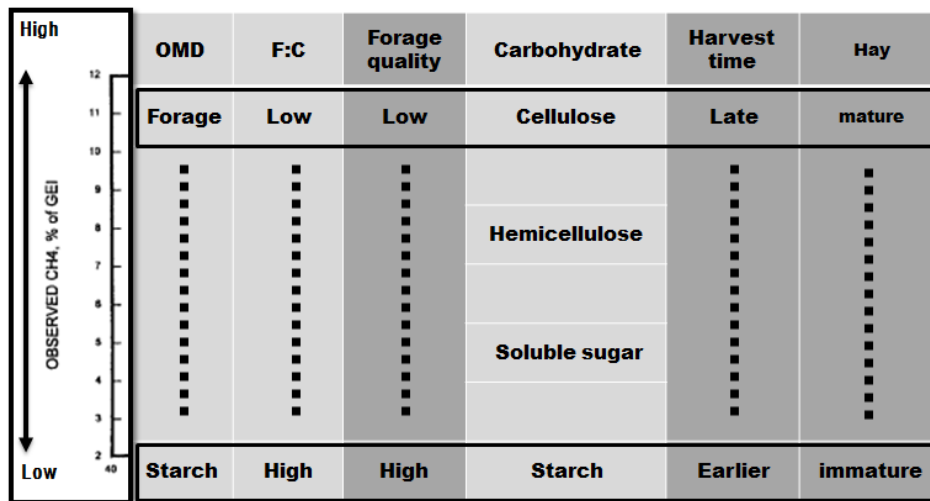
- 우리나라 조사료 공급 현황(2010년)
 - 볏짚(45%), 자급 목초 및 사료작물(37%), 수입조사료(18%)
- 볏짚의 사료 이용으로 토양 산성화 등 문제점 지적
 - 볏짚 토양 환원 운동 확산(천안 등)
- 최근 볏짚의 농약 잔류 한우 폐사 발생(2014. 4. 24 영남일보)

우리나라가 추진하고 있는 “기후변화대응 종합계획”은 범지구적인 기후변화 완화 노력에 자발적으로 동참하고 녹색성장을 통한 저탄소사회를 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 양질조사료 급여 확대는 농축산 저탄소 농업정책의 하나로 추진되고 있지만, 실제 감축사업 방법론 개발에 필요한 배출계수 연구가 국내에서 수행된 적이 없다.

(2) 국외 감축사업 사례 및 관련 연구

양질의 조사료 급여에 의한 감축량 인정 방법론에 대한 외국 사례를 아직 찾지 못하였다. 또한 조사료의 품질과 메탄배출량과의 관계를 볼 수 있는 연구는 많지 않고, 양질 조사료가 저질 조사료 보다 메탄을 저감한다는 주장은 “1일 배출하는 메탄량이 아닌 메탄전변율(Ym, 섭취에너지 중 메탄으로 전환된 에너지)이 상대적으로 낮다” 는 연구결과를 근거로 하고 있다.

Jonson과 Jonson(1995)은 반추가축이 섭취한 사료 에너지는 반추위 미생물에 의해 이용되는 과정에서 약 2~12%가 메탄으로 손실(메탄 전변율)된다고 하였다. 아래 그림은 적은 수의 연구 결과를 정리한 것이지만, 조사료 품질이 좋을수록, 어린 풀일수록 메탄에너지 전변율이 적다는 것을 보여주고 있다.



(김경훈 작성)

(3) 국내 감축사업 적용 전에 검토되어야 할 사항

양질의 조사료는 영양성분 뿐 아니라 기호성 등이 저질 조사료 보다 좋다. 따라서 양질과 저질 조사료를 무제한급여 조건에서 비교하면 양질의 조사료 섭취량이 높고 메탄발생량도 많아지는 것은 의심할 여지가 없다. Kurihara 등 (1999)의 연구에 의하면, 양질의 조사료를 저질 조사료 보다 2배 많은 양 섭취하였고, 따라서 1일 메탄발생량도 2배 증가하였다. 이들 연구에서는 양질조사료의 메탄 전변율이 통계적 유의성은 없으나 저질 조사료 보다 약 10% 높았다. 그러나 가소화 유기물(organic matter, OM) 1kg 대비 메탄발생량은 75g과 65g으로 양질조사료에서 약 13% 감소하는 것을 보여주고 있다.

	Kurihara 등 (1999)	
	저질	양질
건물섭취량(kg/d)	3.6a	7.1b
메탄생산량(g/d)	113a	257b
메탄 g/kg 가소화 OM	75a	65b
전변율 (%)	10.4a	11.4a

상기 논문은 2006 IPCC Guideline에서도 인용된 논문이고, 양질의 조사료와 저질 조사료가 메탄발생량에 미치는 영향을 아주 분명하게 보여주고 있지만, **양질의 조사료가 메탄을 저감할 수 있다는 근거는 오직 가소화 유기물 섭취량(Digestible organic matter intake) 기준에서만 찾아볼 수 있다.** 이 분야의 연구는 외국에서도 아직 매우 적고, 국내는 전혀 수행된 바가 없을 뿐 아니라, **외국 감축사업 사례도 찾아보기 어렵다.**

다. 국내 조사료·농후사료 분리급여와 혼합급여(섬유질배합사료, TMR)

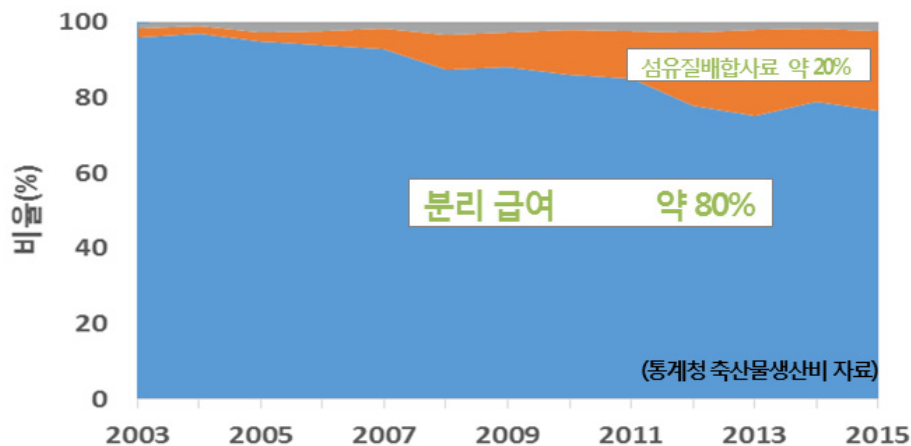
(1) 국외 연구 및 감축사업 사례

동일한 원료를 분리급여 또는 TMR방식으로 급여하였을 때의 메탄발생량 차이를 보고한 논문은 Holter 등(1977)가 유일하며 감축사업에 적용된 사례도 없다

(2) 국내 축산 현황과 연구 필요성

우리나라의 비육우 농장 사료급여 방식은 분리급여와 TMR 급여 방식 2가지로 나눌 수 있다. 비육우 현장의 사료급여는 전통적으로 분리급여 방식이었지만, 90년대 후반부터 수입 사료 원료의 가격 변동 폭이 커지면서 국내 식품부산물과 농산부산물의 활용에 관심이 높아졌고 결과적으로 TMR이용에 관심을 갖기 시작했다. TMR은 부존 사료자원을 이용하기 용이한 방식이었고, 반추가축의 반추위 생리적인 면에서도 장점이 있기 때문에 일부 농가에서 적용되기 시작하였다(이 등, 2016). 그 이후로 농림부와 국립축산과학원은 TMR 보급을 위한 노력에 의해 2015년 TMR은 20%까지 증가했지만, 여전히 분리급여 농가가 80%를 차지하는 것으로 조사되었다.

또한 한우 생산비 중 사료비 비율이 높은 우리나라는 사료비 절감을 위해서도 부산물 이용과 함께 TMR 보급이 필요하다. 따라서 TMR 급여 방식이 장내발효 메탄발생량도 적다는 것이 증명된다면 농림부의 정책방향과도 부합하고 감축사업의 대상이 될 수 있다고 판단된다.



국내 비육우 농가의 사료급여 방식 (통계청 자료 근거)

(3) 국내 감축사업 적용 가능성 검토

(가) 국내 기존 연구

국립축산과학원에서 수행된 연구(2015)에 의하면, TMR급여 방식이 분리급여 방식보다 메탄 발생량을 30% 감소시키고 메탄을 만드는 세균수도 50이상 감소하였다. 이러한 결과는 TMR 급여로 전환하는 농가에게 메탄저감을 인정해주는 방법론의 접근이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 외국의 사례도 아직 없고, 국내외연구 결과도 매우 적기 때문에 장기적인 연구투자가 필요하다.

(나) 감축사업 방법론 적용 조건의 적절성 검토

현재 사료급여 방식의 80%를 차지하는 분리급여를 베이스라인(baseline) 그리고 향후 TMR 급여방식으로의 전환을 기술 투여(project)로 정의)로 보고, 감축사업의 방법론 적용 조건의 적절성을 사전에 검토해 보았고, 그 결과는 다음과 같다.

〈방법론 명〉

“TMR 사료를 급여하여 비육우의 장내발효에 따른 메탄발생 저감 방법론”

〈적용조건〉

- 비육우를 대상으로 하며, 분리급여 농가가 TMR 급여로 전환하여 장내발효에 따른 메탄 발생을 저감하는 경우

〈베이스라인 정의〉

- 분리급여 방식에서의 메탄 발생량

〈모니터링 용이성〉

- 분리급여 농가 였는지 : 사료구입 대장으로 확인 가능
- TMR 급여 농가 전환 여부 : 사료구입 대장으로 확인 가능

〈사업의 확장 가능성〉

- 현재 비육우 농가의 약 80%가 분리급여 방식으로 운영

〈사업자〉

- TMR 생산자 단체 (한국단미사료 협회)

1. 방법론 일반사항 및 용어정의 : 방법론 적용조건의 적절성 (품질재단 작성)		
1.1. 방법론명		
평가항목	유사 방법론	검토의견
<ul style="list-style-type: none"> - 방법론명에 방법론을 적용할 수 있는 사업 유형이 포함되었는가? * 특정 감축사업의 사업 명 사용 불가 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ CDM AMS-III.BK <ul style="list-style-type: none"> - Small-scale Methodology: Strategic feed supplementation in smallholder dairy sector to increase productivity ◆ Carbon Farming Initiative (호주) <ul style="list-style-type: none"> - Reducing Greenhouse Gas Emissions by Feeding Nitrates to Beef Cattle ◆ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 <ul style="list-style-type: none"> - 메탄저감사료를 급여하여 젖소의 장내발효에 따른 메탄발생 저감 방법론 	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 단계에서 검토 제외
1.2. 적용조건		
평가항목	유사 방법론	검토의견
<ul style="list-style-type: none"> - 방법론을 적용하기 위해 충족되어야 하는 사업 조건을 기술하였는가? * 베이스라인 상태에 관한 내용은 해당되지 않음. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ CDM AMS-III.BK <ul style="list-style-type: none"> - 착유우에 식이보조제를 급여하여 착유량을 증가시키고, 착유량 대비 온실가스 배출량을 저감. (장내발효 억제를 통한 메탄 기술은 아님.) - 주요 적용조건 <ul style="list-style-type: none"> · 보조제는 사업대상국가에서 반추동물에 요구되는 영양요구량에 적합하고 지역규제와 부합해야 한다. · 보조제가 착유량을 증가시킨다는 것을 확인하기 위해 사업참여자는 사업계획서 상에 보조제의 GE가 해당 베이스라인 하에서 비유기별 착유우의 기초배급량의 전체 GE대비 10%를 초과하지 않음을 입증해야 한다. · 보조제가 가축에 미치는 영향이 확인되어야 하며, 참여농가에게 알리기 위한 방법(트레이닝 등)이 마련, 시행되어야 한다. · 농가와 보조제 공급자에게 감축실적이 이증으로 청구되지 않도록 계약동의 같은 수단이 시행되어야 하며, 이러한 조치가 사업계획서 상에 기술되어야 한다. ◆ Carbon Farming Initiative (호주) <ul style="list-style-type: none"> - 가축에 질산염보조제를 급여하여 배출량을 저감하고 탄소 저감 도모 - 주요 적용조건 <ul style="list-style-type: none"> · 가축사양 조건 (국가 분류기준) · 베이스라인 조건 (사업시행 5년 전 요소첨가 1회 이상) · 질산염 첨가 방식 : 첨가제 형태, 사료에서 유황의 비중, 질산염 급여 기간 산정기준 	<ul style="list-style-type: none"> - 본 방법론은 ‘반추가축에 TMR을 급여하여 장내발효로 인한 메탄배출량을 저감’하는 기술로 다음과 같은 적용 조건을 규정하는 것이 적절한지 검토가 필요, ① 적용 가능한 가축 사양 규정 (한국가축사양표준 등) : 축종별(예: 젖소, 한우)에 따라 메탄 발생률이 다르기 때문에 적용대상 축종에 대한 검토 필요 (1차년 자문회의 의견) ② TMR사료의 종류(업체, 농가 직접 혼합 등) 규정, 즉, TMR로 대체한다는 것이 어떠한 의미인지 <ul style="list-style-type: none"> * 사업 대상사료의 사양 규정 시 성분조성 뿐만 아니라 총에너지, 가소화영양소 등 규정할 필요가 있는지 검토 필요 ③ 가축 사양에 적합한 형태와 조성으로 공급됨을 보장 : TMR로 대체하였을 경우 기존 사료 급여량과 조성에 차이가 없고 단지 혼합여부

	<ul style="list-style-type: none"> · 질산염 첨가 제한 : 질산염 적용 기간 준수, 적용 기간 동안 질산염 첨가량, 정식 급여 기간 동안의 질산염 첨가량 ◆ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 <ul style="list-style-type: none"> - 본 방법론은 짓소 중 착유우를 대상으로 하며, 식물성 오일을 추가로 급여하여 장내발효에 따른 메탄발생을 저감하는 경우 적용 가능하다. - 본 방법론 적용을 위하여 사업 후 사료의 종류 및 급여량을 모니터링 할 수 있는 체제가 완비되어야 한다. 	<p>만 차이가 있다고 가정할 수 있는지? 만약 그렇다면 모니터링을 할 때 급여량을 일일이 기록하지 않고 TMR시행여부로부터 하면 될 수 있는지 검토 (TMR시행여부는 TMR구매대장 등)</p> <p>④ TMR을 급여한 시기를 모두 인정할 것인지 적용기간(2주)을 제외 할 것인지</p>
--	---	--

1.3. 사업경계

평가항목	유사 방법론 : CDM AMS-III.BK	검토의견
<ul style="list-style-type: none"> - 사업 경계를 명확히 설정하였는가? - 사업 경계 내에 포함되는 온실가스 배출원과 온실가스의 종류를 배이스라인 배출원과 사업활동 배출원으로 구분하여 모두 포함하였는가? - 사업 경계 내의 배출원 중, 고려대상에서 제외시키는 배출원에 대해 그 이유를 명확히 설명하였는가? 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ CDM AMS-III.BK <ul style="list-style-type: none"> - 사업경계 <ul style="list-style-type: none"> · 사업활동에 사용되는 보조제 생산 · 보조제를 받아 대형반추가축에 공급하는 소규모 참여농가 · 보조제의 운송이 이루어지는 여정 - 배이스라인 온실가스 배출원 <ul style="list-style-type: none"> · 착유우의 장내발효로 인한 메탄 배출량 - 사업활동 온실가스 배출원 <ul style="list-style-type: none"> · 첨가제 급여동안 장내발효 메탄 배출량 · 첨가제 생산 및 운송과정의 에너지 소비로 인한 배출량 ◆ Carbon Farming Initiative (호주) <ul style="list-style-type: none"> - 장내발효로 인한 메탄배출량만 산정 ◆ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 <ul style="list-style-type: none"> - 장내발효로 인한 메탄배출량 및 분뇨처리로 인한 메탄배출량만 산정 	<ul style="list-style-type: none"> - 해외 유사방법론(호주 CFI¹⁾,)의 경우, 장내발효에 의한 메탄 발생뿐만 아니라 분뇨에 의한 메탄 및 아산화질소도 주요 온실가스 배출원으로 포함하고 있음. 따라서 분뇨에 의한 온실가스도 배출원으로 포함할 것인지에 대한 검토 필요 장내발효와 분뇨의 영향에 있어 사료효율과 소화율의 차이가 없음을 가정할 수 있다면, 분뇨에 의한 추가적인 메탄발생은 없을 것으로 판단됨(1차년 자문회의 의견). - 만약 분뇨에 의한 메탄발생의 차이가 있다면 사업경계로 포함하는 것이 필요 - TMR은 기존사료를 대체하는 것이므로 TMR생산에 따른 생산과정 및 운송과정의 배출량의 차이는 없다고 가정

2. 배이스라인 방법론 : 배이스라인 방법론 기술의 적정성

2.1. 배이스라인 시나리오 정의

평가항목	기존 방법론	검토의견
<ul style="list-style-type: none"> - 배이스라인 선정 절차를 단계별로 제시하고, 제안된 절차가 사업유형과 적용조건에 적절 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ CDM AMS-III.BK <ul style="list-style-type: none"> - 보조제 첨가가 없는 현재의 급여체계가 지속된다는 가정이 가장 합리적인 배이스라인이라고 입증될 수 있는 경우에만 적용 	<ul style="list-style-type: none"> - 배이스라인을 현재와 같은 분리급여 방식이 지속된다고 가정할 때, <ol style="list-style-type: none"> ① 분리급여 농가 비율 ② 분리급여 시, 기존 사료의 종류에 따라 베이

<p>한 이유를 설명하였는가?</p> <ul style="list-style-type: none"> - 베이스라인 선정 절차에 가능한 베이스라인 대안들을 모두 제시하고 각각의 베이스라인 시나리오에 대한 설명을 제시하였는가? - 후보 베이스라인 시나리오 중 적합한 베이스라인 시나리오를 선정하는 절차를 논리적, 분석적으로 명확히 설명하고 있는가? 	<p>◇ Carbon Farming Initiative (호주)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 프로젝트 시행 전 질산염대신 요소(urea)를 첨가하였다고 가정 <p>◇ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업</p> <ul style="list-style-type: none"> - 사업이 진행되지 않았을 경우, 기존의 사료를 급여하여 젖소의 장내발효 및 분뇨에 의한 메탄이 발생하였을 것이다. 	<p>스라인 배출량에 유의미한 차이가 발생할 수 있는지? 즉 기존에 농가가 급여하는 사료가 표준화되어 있는지? (한국표준사료 성분표에 따른 사료급여로 일반화할 수 있는지?)</p>
<p>2.2 추가성 입증</p>		
<p>평가항목</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 단계에서 검토 제외 	<p>기존 방법론</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 단계에서 검토 제외 	<p>검토의견</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 단계에서 검토 제외
<p>2.3 온실가스 배출량 산정방법</p>		
<p>평가항목</p>	<p>기존 방법론</p>	<p>검토의견</p>
<ul style="list-style-type: none"> - 베이스라인 배출량, 사업 배출량, 누출량 산정 절차를 단계별로 기술하고 있는가? - 계산에 사용된 수식과 활동자료, 계수들을 기술하고 있는가? - 방법론에서 기본값을 제공하는 인자들에 대해 참고문헌을 정확하 	<p>◇ CDM AMS-III.BK</p> <ul style="list-style-type: none"> - 베이스라인과 프로젝트 배출량 산정 시 동일한 메탄전변율 Y_m(%) 사용 - 1년 365일 동일한 급여조건(단일 사육방식, 단일 축종, 비착유우, 단일 사료) 가정 시, $BE_y = GE_{BL,y} \left[\frac{MJ}{day} \right] \times 365/55.65 \times Y_m \times N_{PJ,y} \times GWP_{CH_4}/1000$ $= DMI_{BL,y} \left[\frac{kg}{day} \right] \times GE'_{BL,y} \left[\frac{MJ}{kg} \right] \times 365/55.65 \times Y_m \times N_{PJ,y} \times GWP_{CH_4}/1000$ $= \frac{5.4 - AW_{BL,y}}{500 \times (1 - TDN_{BL,y})} \times GE'_{BL,y} \left[\frac{MJ}{kg} \right] \times 365/55.65 \times Y_m \times N_{PJ,y} \times GWP_{CH_4}/1000$ $PE_y = GE_{PJ,y} \left[\frac{MJ}{day} \right] \times 365/55.65 \times Y_m \times N_{PJ,y} \times GWP_{CH_4}/100 + PE_{EG,y} + PE_{trans,y}$	<ul style="list-style-type: none"> - 감축량 산정시 다음 방안 중 선택 가능: <p>① 베이스라인 배출량 산정 시 IPCC기본배출계수 사용</p> $BE_y, PE_y = EF_{BL,PJ} \times N_{PJ,y} \times GWP_{CH_4}/1000$ <ul style="list-style-type: none"> - 실험을 통해 TMR의 단일배출계수(kgCH₄/마리/년)를 제시해야 함. - 배출량을 산정하기 위해 사육두수만 곱함으로써 산정방식은 간소화되나 TMR 사료별 특성(가소화영양소 총량, 대사에너지량 등) 차이를 반영하기 어려움.

계 기술하였는가?
 - 사업자가 선택해서 사용해야 하는 변수들의 자료 출처, 연도, 자료 수준 등의 선택 기준을 명시하고 있는가?
 - 계산에 사용되는 변수들의 단위를 국제규격 (SI units)에 따라서 제시하고 있는가?

BE_y, PE_y : y년도 베이스라인 및 프로젝트 배출량
 $GE_{BE,y}, GE_{PL,y}$: 일일 총에너지량 (MJ/day)
 $GE_{BE,y}, GE_{PL,y}$: 사료의 건조중량당 에너지량 (MJ/kg)
 Y_m : 메탄전변율 (%)
 $N_{PL,y}$: 프로젝트 착유우 사육두수 (계산값)
 $PE_{EG,y}$: 첨가제 생산으로 인한 배출량
 $PE_{trans,y}$: 첨가제 운송으로 인한 배출량

- 누출량
 · 보조제가 추가됨에 따른 보조제 생산, 이동으로 인한 배출량 추가
 · 보조제에 요소가 포함될 경우 요소 생산으로 인한 배출량을 누출량으로 고려

◆ Carbon Farming Initiative (호주)
 - 온실가스 감축량 산정을 위해 Nitrates Calculator를 제공하며 입력 값(모니터링 값)으로 가축 두수, 가축 평균중량, 질산염 급여 시작 및 종료 시점 질산염 재고량, 질산염 급여 시작 및 종료시점 비단백태 질소 첨가물 재고량을 제시
 - 입력값을 입력하면 자동으로 산정결과가 나타나며 사용된 수식은 명시적으로 제시하지 않음.

◆ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업
 - 베이스라인과 프로젝트 배출량 산정 시 기본 메탄전변율 $Y_m(\%)$ 을 사료의 오일함량에 따라 보정
 - 분뇨에 의한 메탄배출량은 현재 단계의 검토대상이 아니므로 제외

$$BE_{EN,y} = \sum_i (GE_i \times (Y_{M,i}/100) \times N_i) \times 365/55.65 \times GWP_{CH_4}/1000$$

$$GE_i = (NE_i/REM + NE_{g,i}/REG) / 0.75$$

$$Y_{M,i} = Y_{Mdefault} \times \{1 - (FE_{oil} \times 0.05)\}$$

$$NE_{g,i} = (1.42 \times ME_i - 0.174 \times ME_i^2 + 0.0122 \times ME_i^3 - 1.65) \times 4.1868$$

기호	정의	단위
$BE_{EN,y}$	y 연도 장내발효에 의한 베이스라인 배출량	tCO ₂ /년
GE_i	총에너지 섭취량	MJ/일
$Y_{M,i}$	사료의 총에너지 중 메탄으로 전환되는 비율	%
N_i	착유우 두수	-
NE_i	정미에너지 (한국가축사양표준)	MJ/일
REM	유지정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율(0.5408)	-
$NE_{g,i}$	증체정미에너지	MJ/일
ME_i	대사에너지	Mcal/일
REG	증체정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율(0.3519)	-
$Y_{M,i}$	사료의 총에너지 중 메탄으로 전환되는 비율	%
$Y_{Mdefault}$	YM 기본값(6.5)	%
FE_{oil}	사업 전 사료의 건물 섭취량 대비 식물성 오일함량	%
0.05	식물성 오일 1% 첨가에 따른 YM 변화율	-

② 자발적 감축사업의 산정식 사용
 - 총 에너지량 (GE_i)을 가축사양표준에 따라 산정하고 있으므로, 실험을 통해 TMR의 메탄전변율 ($Y_{M,i}$)을 제시
 - 감축량 산정 시 베이스라인의 메탄전변율은 기본값(6.5)을 사용
 - 단, 가축의 체중, 사료전과 후의 영양성분차이 (총 에너지, 대사에너지 등)를 고려하지 못함.

③ CDM 방법론의 산정방식
 - 총 에너지량을 계산하기 위해 가축의 체중, 가소화영양총량 등 다양한 모니터링인자를 요구함에 따라 사업 특성을 배출량에 반영하기 용이하나 모니터링 및 데이터 관리가 복잡
 - 감축량 산정 시 사업 전의 메탄전변율은 기본값을 사용하고 실험을 통해 도출된 TMR의 메탄전변율 적용

3. 모니터링 방법론 : 모니터링 방법론 기술의 적정성		
3.1. 모니터링 절차		
평가항목	기존 방법론	검토의견
- 모니터링 지점 및 자료 수집 체계 설명 - 측정 장비, 검교정 절차의 불확도 수준, 방법론 제시	- 현재 단계 검토대상 아님.	- 현재 단계 검토대상 아님.
3.2. 베이스라인 고정 데이터 및 인자		
평가항목	기존 방법론	검토의견
- 사업기간 동안 베이스라인 배출량, 사업 배출량, 누출량을 산정하기 위하여 모니터링 하지 않아도 되는 고정인자 제시 - 각각의 인자들에 대해서 데이터의 출처 및 적용 값 타당성 입증	- 현재 단계 검토대상 아님.	- 현재 단계 검토대상 아님.
3.3. 모니터링 데이터 및 인자		
평가항목	기존 방법론	검토의견
- 사업기간 동안 베이스라인 배출량, 사업 배	<div style="border: 1px dotted black; padding: 2px;"> ◆ CDM AMS-III.BK - 가축사육 두수 </div>	- 2.3 온실가스 배출량 산정 방식을 어떤 것으로 택하느냐에 따라 모니터링인자가 달라짐.

<p>출량, 누출량을 산정하기 위하여 모니터링 해야 하는 인자들을 제시하고 있는가?</p> <p>- 각각의 인자들에 대해서 모니터링 주기 및 측정 방법, 측정 기구의 검교정 절차, 불확도 저감 방안, QA/QC 절차를 상세히 기재하고 있는가?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 가축 평균 체중 - 일일 지방보정유량 - 비유기간 - 분만간격 - 건물섭취량 - 농가에서 구입한 첨가제 중량* - 착유우 두수 - 손실된 또는 타 가축에 급여한 첨가제 중량 * 교차확인 되어야 함. <p>◆ Carbon Farming Initiative (호주)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 질산염 급여기간 - 질산염 적응기간 - 가축 분류별 사육 두수 (1년 미만, 1년 이상으로 구분) - 가축 분류별 평균 체중 (1년 미만, 1년 이상으로 구분) - 질산염소비량 - 질산염이 아닌 비단백태 질소화합물소비량 - 모든 비단백태 질소화합물(질산염 포함)의 화학조성 (판매자 신고서, 공인된 기관의 인증서 등) <p>◆ 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업</p> <ul style="list-style-type: none"> - 착유우 두수 - 정미에너지 - 착유량 - 유지방 - 대사에너지 - 사료의 건물 섭취량 대비 식물성 오일함량(사료 급여일지를 통해 사료 종류, 급여량, 건물섭취량, 식물성 오일함량 기록) 	<p>- TMR급여 여부는 사료급여일지, TMR 생산자가 제공한 성분표, 구입증명을 통해 제시 하도록 규정</p>
---	--	---

1) CFI: Carbon Farming Initiative, 호주 온실가스 감축제도

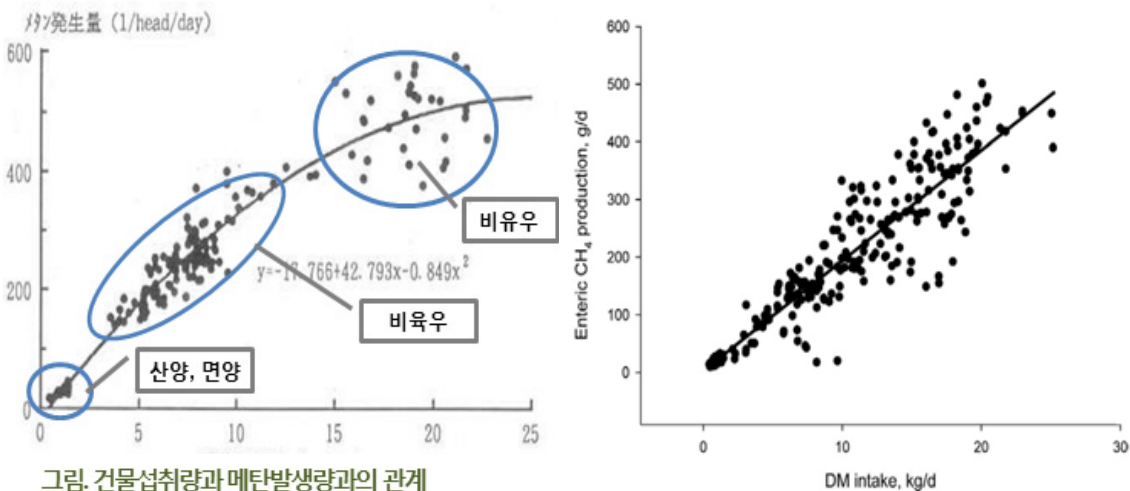
<분리급여와 TMR의 영양소 함량과 사료섭취량에서 차이가 없는지?>

- 상기 두 방법은 단순히 조사료와 농후사료를 섞어 급여하느냐, 각기 급여하느냐 차이만 있음
- 두 방식 모두, 영양소 함량과 급여량 결정은 대상 가축의 생산목표(번식, 비육)에 따라서 동일하게 적용됨. 즉, 생산목표를 달성하기 위한 영양소 기준과 사료급여량이 동일하게 적용됨(한국가축사양표준, 사료관리법 시행규칙 제12조 사료성분의 등록 등)

비육 단계	육성기					비육전기					비육중기					비육후기									
생후 월령	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
평균 체중(kg)	160	184	208	233	258	284	310	337	366	395	425	455	486	518	549	581	611	638	662	683	704	724	743	762	
일당 중세량(kg)	0.80	0.80	0.83	0.85	0.85	0.87	0.90	0.95	0.97	1.00	1.00	1.05	1.05	1.05	1.05	1.00	0.90	0.80	0.70	0.70	0.67	0.63	0.63	0.60	
1 (kg)	육성기 TMR	6.5	7.5	8.5	9.5	10.0	11.0	6.0																	
	비육전기 TMR							6.0	13.0	14.0	15.0	15.0	7.5												
	비육중기 TMR													7.5	15.0	15.0	15.0	15.0	7.5						
	비육후기 TMR																			7.5					자유급여

<축종 차이는 배출계수 값에 영향을 미치는지?>

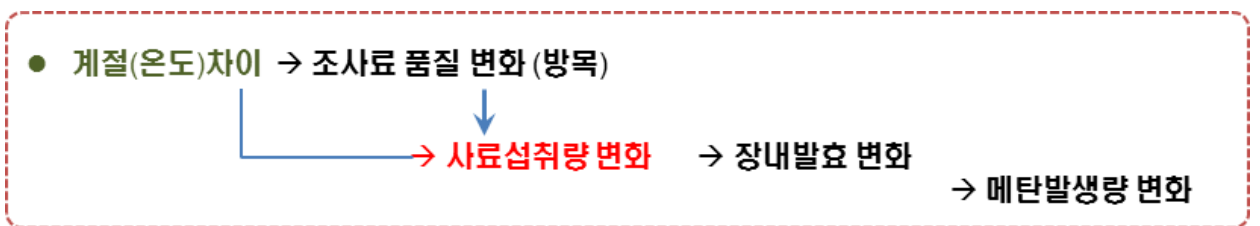
- 메탄발생량과 배출계수 변화의 제1 요인은 건물섭취량 차이임
- 아래 그래프는 일본(왼쪽)과 호주(오른쪽)의 예



- 모든 국가들은 건물섭취량과 메탄발생량과의 관계식을 설정하기 위해 노력 중
- 상기 그래프는 건물섭취량이 차이가 나는 소동물(산양, 면양), 비육우(5~12kg), 젖소(15~28kg 건물섭취) 등의 자료로 만들어짐
- 따라서 배출계수는 한우, 젖소 등의 실험동물 차이가 아니라 건물섭취량에 의해 가장 크게 영향을 받음

<계절 차이는 배출계수 값에 영향을 미치는지?>

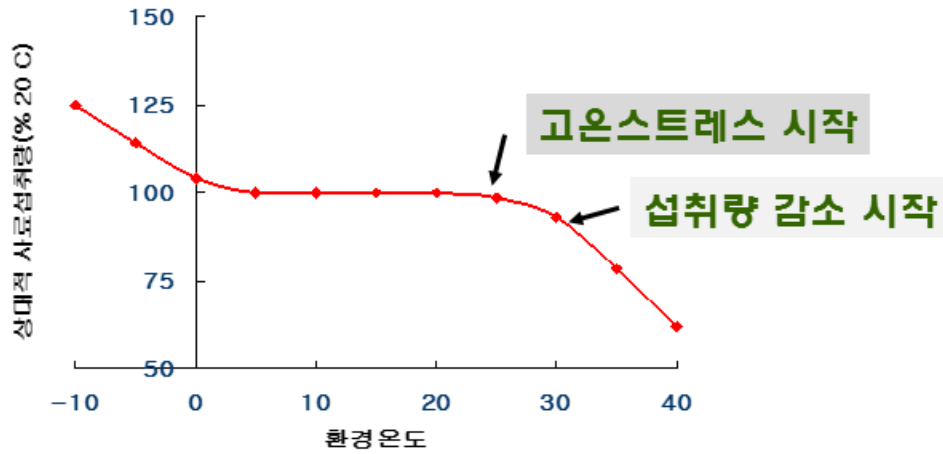
- 계절변화에 의한 온도 변화는 사료섭취량에 영향을 줌



- 미국 사양표준 (NRC, 1981)에서도 환경온도(고온스트레스)와 사료섭취량과의 관계를 중요하

게 다루고 있음

- 즉, 수행되는 각 실험의 배출계수는 그 때의 계절과 온도 변화에 영향을 받은 사료 섭취량에 의해 결정되는 것이기 때문에 온도 영향을 보정할 필요가 없음



<건물섭취량 이외에 배출계수에 영향을 주는 다른 요인은 없는지?>

- 동일 개체간의 차이가 매우 큼
- 동일한 체중의 개체들이 동일한 사료를 섭취하여도 개체간 1일 메탄 배출량에서 큰 차이를 보임 (위 건물섭취량과 메탄발생량 관계 그래프에서도 나타남)
- > 따라서 배출계수는 외국의 예와 같이 많은 실험의 결과를 통해서만 의미있는 결과를 얻을 수 있음

<감축효과를 검토한 기존 연구>

- 해외 문헌 : 유일한 문헌 (Holter 등, 1977) - 차이 없음
- 국내 연구 사례 : 유일한 선행 연구 (TMR 30% 메탄 감소)
(<http://m.blog.naver.com/clay90/220447242071>)

제2절 다접보온커튼

1. 실험 추진 배경

농업에너지이용효율화사업은 '08년 유가급등 이후 정부가 에너지절감을 위해 마련한 대책으로 '09년부터 보온덮개, 자동개폐기와 다접보온커튼, 순환식수막시설, 공기열냉난방시설 등 설치비용을 보조하는 사업으로 원예시설의 다접보온커튼 도입을 위해서도 적극 장려되고 있다.

농가의 다접보온커튼 이용은 '14년부터 <농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업>의 온실가스 감축 방법론으로 등록되어 감축실적으로 인정받고 있고 <농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업>('12~)은 농가의 저탄소 농업기술 도입에 따른 온실가스 감축실적을 인증하여 인센티브를 지원하는 사업이다. 본 방법론은 다접보온커튼 도입을 통한 화석연료 절감계수를 바탕으로 화석연료 절감량에 따른 온실가스 감축량을 산정하고 다접보온커튼의 열화, 부식 등을 고려하여 절감계수를 매년 5%씩 삭감하여 적용하도록 하고 있다.

그러나 보온율 변화 실험 및 관련 데이터가 전무한 상황에서 상기와 같은 적용방식은 다접보온커튼의 감축량을 과도하게 보수적으로 산정(과소평가)하는 것이라는 의견이 지속적으로 제기되고 있고, 다접보온커튼 제조사별로 주장하고 있는 수명이 3~10년으로 큰 차이가 존재함에 따라 실제 다접보온커튼의 설치연수에 따른 보온율 변화 실험을 통해 합리적인 삭감율을 마련하는 것이 필요하다

2. 다접보온커튼의 정의

본 실험의 목적은 자발적 감축사업의 방법론 적용을 위한 **다접보온커튼의 보온율 변화를 확인**하는 것으로 자발적 감축사업의 다접보온 커튼 정의 및 분류를 먼저 검토하는 것이 필요하다고 판단된다. 자발적감축사업에서 다접보온커튼(고효율 보온자재)은 5겹 이상의 보온재료를 사용한 보온커튼 또는 알루미늄스크린의 겹수를 포함한 5겹 이상의 보온재료를 사용한 다층 보온커튼으로 정의하고 있다

구분	기술명	기술내용 (*유의사항)
에너지이용 효율화사업	○ 다접보온커튼	-원예시설의 난방효율을 높이기 위하여 원예시설에 다접보온커튼을 설치한 사업 * 보온자재 보온율(항온법 기준) 70% 이상, 알루미늄스크린의 겹수를 포함한 5겹 이상의 보온 재료를 사용한 다층의 보온커튼 보온율(항온법 기준) 55% 이상

* 출처 : '16년 농림축산식품사업 시행지침서 <52.저탄소 농림축산식품 기반구축 사업>

농가의 에너지 효율화를 위한 농림축산식품부의 <농업에너지이용효율화 사업> 역시 다접보온커튼 설치 지원사업을 위한 다접보온커튼의 정의 및 분류를 아래와 같이 규정하고 있다.

세부사업	단가	지원내용
○ 다겹보온커튼	수평권취식 13천원이하/㎡	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수분흡수 방지를 위한 코팅 보온재를 포함한 5겹 이상의 보온 재료를 사용한 보온커튼 - 단, 저온성 작물 또는 제주도 등 품목별·지역별 특성을 감안하여 3겹 보온커튼으로 대체가 가능할 경우 지자체장이 종합적으로 판단하여 3겹 보온커튼으로 지원 가능 ○ 보온자재(항온법 기준 보온율 70% 이상) ○ 알루미늄스크린의 겹수를 포함한 5겹 이상의 보온 재료를 사용한 다층 보온커튼(항온법 기준 보온율 55% 이상) * 보온효과 향상을 위해 보온율은 점진적으로 강화
	예인식, 외부권취식 11천원이하/㎡	
	알루미늄스크린 11천원이하/㎡	○ 보온율(항온법 기준) 42% 이상

* 출처 : '16년 농림축산식품사업 시행지침서 <25.농업에너지이용효율화사업

제3절 경종부문 저탄소비료

1. 국내 연구 현황

2020년까지 산업발전과 함께 자연 증가할 것으로 예상되는 우리나라 온실가스 총 배출량(BAU 기준)은 813 Mt CO₂-eq.이며, 정부는 자발적으로 예상배출량의 30%를 감축하여 2005년 배출수준(569 Mt CO₂-eq.)으로 유지하는 것을 정책목표로 하고 있다. 감축목표 달성을 위해서는 각 산업별 온실가스 배출량 감축을 위한 적극적 노력 이외에 각 산업별 온실가스 배출량의 정확한 산정이 선행 되어야 하는 실정이다. 경종분야의 온실가스 배출량을 정확하게 산출하고 현실성 있는 온실가스 배출량 감축정책을 수립하기 위해서는 등록된 배출계수 이외에 다양한 영농조건 하에서의 온실가스 배출계수 개발이 요구되고 있다. 온실가스 배출량을 감축시킬 수 있는 방법에는 논과 밭에서 완효성 비료 시용, 밭에서 녹비작물 활용, 무경운과 최소경운 관리 등의 방법들이 있다.

논과 밭에서 작물을 재배하는 과정 중 일반 속효성 비료를 완효성 비료로 대체 사용 시 시비량을 약 30% 저감시킬 수 있으며, 이에 따른 비료성분 유출을 크게 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 속효성 비료는 작기 중 총 시비량을 3-4회 나누어 분시하고 있으나, 완효성 비료는 전량 기비로 시용되고 있어 노동력 절감효과가 크게 있는 것으로 알려져 있다. 완효성 비료시용을 통해 시비량 저감과 노동력 절감에 의한 온실가스 배출량 감축효과가 크게 있을 것으로 기대되나, 이에 대한 연구는 현재까지 이루어지지 못하고 있다.

2. 국외 연구 현황

국내에서와 비슷하게 선진 외국에서도 농경지에서의 온실가스 배출량 저감을 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 토양수분관리, 유기물 처리방법과 처리량 조정, 시비관리, CH₄ 생성균(methanogen)의 활성에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자의 영향성을 평가하여 작물의 재배기간

중 온실가스 배출량 감축을 위한 다각적 연구를 시도하고 있다. 특히 시비관리는 작물의 생산성에 직접적으로 영향을 미치기에 필수적이며 이에 따른 온실가스 배출량 감축에 대한 연구는 더욱 중요하다고 할 수 있다. 시비관리에는 시비량 조절, 완효성비료 시용 등이 있으며, 시비량에 따른 온실가스 배출량을 측정하는 연구는 많이 진행되어 있으나 완효성비료시용에 따른 온실가스 배출량을 측정하는 연구는 미미한 실정이다.

제4절 경종 및 축산부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발

국가배출계수를 등록하기 위해서는 배출계수와 함께 불확도를 의무적으로 제시하도록 하고 있으나 우리나라 국가인벤토리 보고서에서는 벼 재배 메탄 배출량에 대해 불확도 값을 제시하지 않고 있다. 해외 선진국에서는 국가인벤토리 보고서 상에 벼 재배 배출계수에 대한 불확도 값을 제시하고 있으나 불확도 산정 방법에 대해 상세히 기술하고 있지는 않다. 벼재배 및 축산 부문에 적합한 불확도 평가 방법을 적용하기 위하여 벼 재배 국가배출계수 개발 과정을 다른 국내의 논문을 검토하였으나 관련 논문 역시 불확도 산정에 대한 구체적인 내용은 제시하지 않고 있다.

IPCC 가이드라인 역시 불확도 산정절차에 대해 일반적이고 개론적인 수준에서 서술되어 있어 벼 재배 배출계수에 대한 구체적이고 상세한 불확도 산정 가이드라인은 공식적으로 존재하지 않으며 또한 농업 부문 온실가스 인벤토리 산정기관인 농업과학원과 축산과학원이 소속된 농촌진흥청에 질의한 결과 현재 공식적인 배출계수 불확도 산정 가이드라인은 존재하지 않음을 확인하였다. 불확도 산정에 관련된 국제표준 및 국내외 국가인벤토리를 검토한 결과 불확도 산정 방법은 크게 두 가지가 이용되고 있다. 하나는 측정자료의 분포로부터 표준편차를 구하는 방법과 다른 하나는 에너지 부문 사업장 고유 배출계수 개발시 활용되고 있는 것으로 측정기기의 오차를 조합하여 불확도를 산정하는 방식이다.

(측정기기의 허용오차를 활용한 불확도 산정) 현재 산업 부문에서 활용하고 있는 불확도 산정방법은 국제표준화기구(International Organization for Standardization, 이하 ISO)에서 제시한 불확도 평가방법에 기초하고 ISO는 측정의 불확도를 측정 결과에 대한 불확도로 간주하여 측정기기의 불확도를 이용하여 계량값에 대한 불확도를 추정한다. 이러한 방식의 불확도 산정 방법을 채택할 경우 실험에 이용되는 측정기기의 불확도가 주요한 불확도 결정인자이다. 농업 부문의 불확도 산정 방법 역시 배출계수 개발과정에서 사용하는 측정장비의 허용오차를 이용하여 불확도 산정이 가능하다.

(측정 데이터의 분포를 활용한 불확도 산정) 측정 데이터의 분포를 활용한 불확도를 산정 방법은 IPCC 가이드라인에서 제시된 오차 전파법 및 몬테카를로 방법이 대표적이다. 최근 해외 학술저널에 우리나라 벼 재배 메탄 배출량 데이터를 활용하여 오차 전파법과 몬테카를로 방법이 아닌 Pooled Standard Deviation (PSD) 과 Standardized t Bootstrap Method (STBM)을 이용하여 불확도를 평가한 논문이 게재되어 이를 검토하였다.

(불확도 평가방법 검토) 측정 데이터의 분포가 정규분포인지, 대칭인지, 시공간적 변동(Temporal & Spatial Variability) 이 있는지 등에 따라 적용가능한 방법이 다르므로 실제 불확도 평가방법은 실험데이터 및 측정기기의 허용오차 등 관련 정보 수집 후 데이터 특성에 따라 적합한 방법론을 선택하여 불확도 평가계획을 수립하여야 한다.

제3장. 연구수행 내용 및 결과

제1절. 총괄 연구개발 추진전략

1. 연구개발 추진 전략

본 과제에서는 농업부문 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서, 경종 및 축산부문 감축량 산정에 필요한 배출계수 개발 그리고 검증 가이드라인을 개발하고자 하였다. 축산부문에서는 저탄소 사료(지방 첨가, 양질조사료, 섬유질배합사료)의 반추가축 장내발효에 따른 메탄 발생 감축량 산정 및 유지기간 설정하고, 경종부문에서는 저탄소비료 생산과정에서의 온실가스 배출계수 개발 및 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출량 감축효과 산정하였다. 농업부문 감축사업에서 필요로 하는 신규방법론을 개발하고 활용하기 위해 관련 배출계수 개발연구는 개발과정이 투명해야 하고 개발된 배출계수의 신뢰성이 보장되어야 하기 때문에 축산 및 경종부문에서 개발된 배출계수의 불확도 수준을 제시하고, 감축사업의 활성화를 위한 배출계수 개발계획 수립 및 검증가이드라인을 개발하였다.



그림 1. 연구 개요 및 결과 활용방안

2. 연구개발 방법

가. 축산 장내발효부문 저탄소사료 배출계수 연구

본 과제에서 메탄배출량 측정은 서울대학교 평창캠퍼스에 설치되어 있는 호흡챔버 4기를 이용하여 수행되었다. 각 호흡챔버의 내부 면적은 폭 137 × 길이 265 × 높이 200cm이며, 사료급여통과 음수장치가 장착되어 있다. 또한 온도 조절 장치와 습기 제거를 위한 시설을 갖추고 있으며, 호흡가스는 이들 장치와 호흡가스 내부를 순환하면서 원하는 온도와 습도를 유지하게 되며, 챔버 내부의 공기와 균일하게 혼합되어진다.

실험가축은 호흡챔버가 있는 건물과 바로 인접한 우방에서 실험사료와 개체별 사료급여장치에 적응한 후, 호흡챔버로 이동하기 때문에 축산 현장과 최대한 동일한 환경에서 실험결과를 얻을 수 있다. 메탄분석기의 측정범위 0~1000ppm, 분석오차는 ±2%이며, 각 실험을 수행하기 전과 후에 표준가스(volume 10.2L, 메탄 25%)와 디지털 flow meter를 이용하여 일정 유속의 메탄을 챔버 내에 불어 넣고, 측정치와 이론치를 비교하여 회수율을 얻고, 최종 실험 결과를 보정하였다.

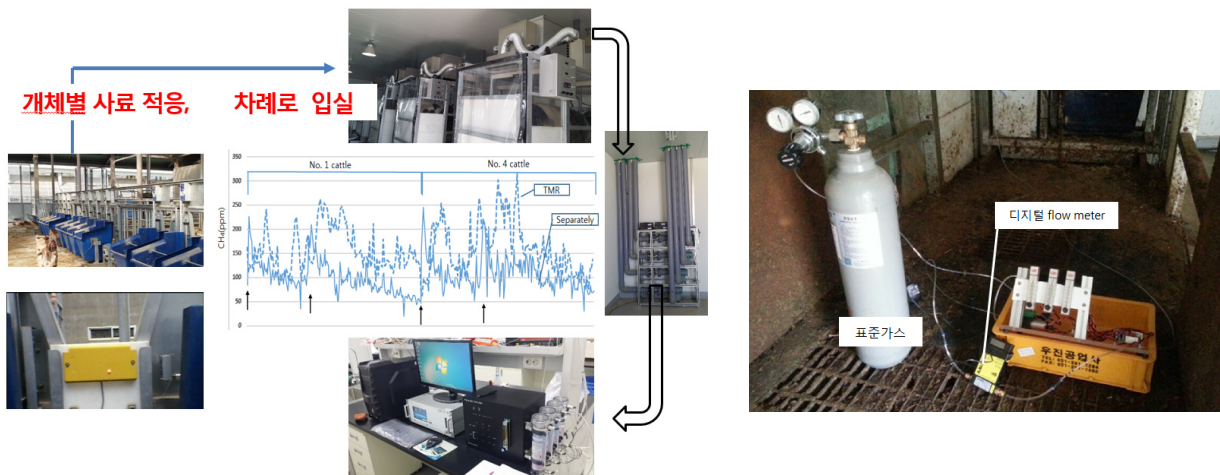


그림 2. 우방에서의 적응과 호흡챔버에서의 메탄발생량 측정 흐름도

(1) 습식 TMR과 분리급여 방식 차이 연구 (실험 1, 2, 3)

본 연구는 사료섭취량 수준을 체중의 1.8(실험 1), 2.0(실험 2), 2.4%(실험 3)로 다른 조건에서 3회 실험 모두 표 (1, 2)와 같은 원료로 구성된 TMR과 분리급여가 메탄발생에 미치는 영향을 조사하였다.

실험축은 육우 거세우 6두를 이용하였으며, 3두는 체중이 232 ~ 307kg 범위, 다른 3두는 510~554kg 범위였고, 한우 사양표준(2012)에 따라 체중별 급여량을 결정하였으며 매일 아침 9 시와 저녁 6시에 균등 급여하였다. 실험은 triplicated 2× 2 Latin square design으로 수행하였고, 각 period는 11일간 우방에서 사료 적응 그리고 6일간의 호흡챔버 수용, 그리고 마지막 2일간 메탄 발생량을 측정하여 평균값을 통계 분석하였다 (그림 2).

표 1. 실험사료의 원료 구성 및 영양소 함량

Ingredients	composition (% DM)	Chemical composition	
<i>Concentrate</i>			
Corn gluten feed	23.0	DM %	
Wheat bran	1.0	TMR	90.0
Coconut meal	13.5	Concentrate	83.0
Broken corn	5.6	OM %	79.2
Corn flake	2.4	CP, % DM	16.6
Cotton hull pellet	11.8	CF, % DM	4.4
Water	2.0	NDF, % DM	28.7
Cotton seed	4.0	ADF, % DM	12.6
Yeast culture	3.0	GE, Mcal/Kg DM	3.9
Limestone	1.0		
Salt	0.2		
Molasses	5.0		
Mineral-vitamin mixture	0.5		
<i>Roughages</i>			
Alfalfa hay	5.0		
Perennial rye grass	10.0		
Annual rye grass	10.0		
Klein grass	0.2		

(2) 건식 TMR과 분리급여 방식 차이가 메탄발생량 및 분뇨 메탄발생량과의 상관성

본 실험에서는 홀스타인 거세우 4두(300±47kg)와 한우 거세우 4두(280±60kg)를 이용하였으며, TMR과 분리급여의 사료 조성은 다음과 같으며(표 2), 조사료와 농후사료는 75:25 비율로 급여하였다. 챔버를 이용한 실험방법은 위 실험과 동일하게 수행하였다.

표 2. 실험사료의 원료 구성

Ingredient composition (%)	
<i>Concentrate</i>	
Broken corn	0.95
Wheat	12.75
Sodium bicarbonate	0.62
Rice bran	5.03
Salt	0.23
Molasses	2.03
Ammonium chloride	0.11
CMS ^a	1.13
Corn flake	15.00
DDGS ^b	7.19
Soybean Hull	1.35
Amaferm	0.04
Corn Gluten Feed	15.00
Limestone	2.45

Palm kernel meal	11.00
Mineral-vitamin mixture ^c	0.15

Roughages

Tall fescue	25.00
-------------	-------

^a CMS: Condensed Molasses Soluble

^b DDGS: Dried Distiller's Grains with Solubles

^c Provided following nutrients per kg of additive (Grobec-DC, Bayer Health Care, Leverkusen, Germany): Vit. A, 2,650,000 IU; Vit. D3, 530,000 IU; Vit. E, 1,050 IU; Niacin, 10,000 mg; Mn, 4,400 mg; Zn, 4,400 mg; Fe, 13,200 mg; Cu, 2,200 mg; I, 440 mg; Co, 440 mg

(3) 지방첨가(Extruded linseed) 사료 급여

Oil seed 첨가 실험 1과 2는 각각 홀스타인 거세우 4두(413±34kg)와 홀스타인 거세우 4두(462±30kg)를 실험축으로 duplicated 2×2 Latin square design으로 실험을 수행하였다. 메탄저감 효과가 보고된 Extruded linseed를 약 3.8% 넣은 배합사료(처리구)와 linseed를 넣지 않은 배합사료(대조구)를 조사료(Tall fescue)와 65:35의 비율로 하여 1일 체중의 2.8% (원물 기준) 수준으로 오전 9시와 오후 6시 2회 균등히 급여하였다. 각 period에서 공시축은 개체별 사료급여가 가능한 우방에서 2주간 사료에 적응한 후, 호흡챔버에 1주일간 수용되었으며 마지막 2일간 메탄 발생량을 측정하였다 (그림 2). 매일 아침 사료 급여 전에 잔량을 회수하여 무게를 측정하였다.

표 3. 실험에 사용된 배합사료와 조사료의 성분함량

	Non-Linseed	Linseed	Tall fescue
Dry matter (g/kg)	877	889	867
Organic matter (g/kg DM)	932	922	932
Crude protein (g/kg DM)	237	235	49
Ether extract (g/kg DM)	70	80	27
Neutral-detergent fiber (g/kg DM)	241	265	728
Acid-detergent fiber (g/kg DM)	101	105	436
Gross energy (cal/g DM)	4725	4717	4388

(4) 옥수수 가공방법

옥수수 micronization(두께 2.5mm), 옥수수 flake(두께 2.9, 3.1 그리고 3.3mm)의 in situ 분해율과 in vitro 메탄발생량을 비교하였다. In situ 실험에서는 가공된 옥수수 원형 그대를 담은 nylon bag을 반추위 2두의 Holstein steers 반추위 각각 4반복씩 넣고, 0, 3, 6, 9, 12, 24, 48시간 간격으로 nylon bag을 꺼내서 흐르는 물로 맑아질 때까지 세정하고, 건조기에서 건물을 특정한 후, 건물 분해율을 계산하였다.



그림 3. 건물 분해율 측정을 위한 In situ 실험 과정

In vitro 발효 실험에서는 동일 공여축 2두로부터 오전 사료급여 30분 전에 채취 혼합한 반추위액을 McDougall buffer와 혼합(1:2)하여 200mg의 분쇄 corn이 들어 있는 60ml serum bottle에 30ml씩 분주하였다. 발효 후 12시간과 48시간의 발효성상(pH, VFA, NH₃-N, CH₄) 변화를 각각 3반복 조사하였다.

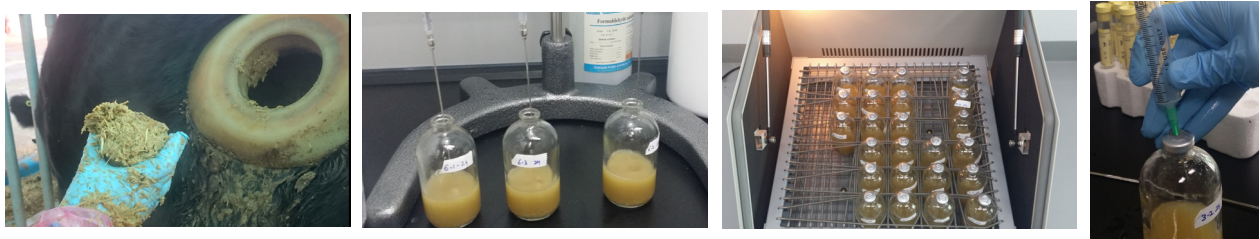


그림 4. 발효성상 변화를 측정하기 위한 In vitro 실험 과정

(5) 조사료 품질 차이

한우 거세우 4두(374±40kg)를 공시하여 duplicated 2× 2 Latin square design으로 실험을 수행하였다. 저질조사료는 벧짚을 그리고 양질의 조사료는 이탈리아라이그라스(Italian ryegrass) 베일 사일리지 이용하였으며, 조사료는 자유채식, 배합사료는 1일 3.2kg 제한급여하였다. 사료는 오전 9시와 오후 6시 2회 균등히 급여하였고, 시험사료의 성분 함량 (표 4), 가축의 사료 적응 그리고 호흡챔버에서의 메탄분석 등 모든 실험 절차는 <실험 1>과 동일하게 수행하였다.

표 4. 실험에 사용된 조사료와 농후사료의 성분함량

	Rice Straw	Italian Ryegrass	Concentrate
Dry matter (g/kg)	805	585	907
Organic matter (g/kg DM)	880	891	920
Neutral-detergent fiber (g/kg DM)	586	641	326
Acid-detergent fiber (g/kg DM)	361	410	157
Crude protein (g/kg DM)	43	106	197
Ether extract (g/kg DM)	13	22	53
Gross energy (cal/g DM)	3880	4231	4441

나. 다겹보온커튼항

(1) 국내 다겹보온커튼 설치 현황

2014년 기준 국내 원예시설 99.2%는 비닐하우스이며 단동비닐하우스의 비중은 전체 원예 시설의 85.3%를 차지하고 있다.

합계	비닐하우스				경질판 온실			유리온실		
	합계	단동	연동	기타	합계	단동	연동	합계	단동	연동
51,787 (100%)	51,382 (99.2%)	44,177 (85.3%)	5,897 (11.4%)	1,308 (2.5%)	76 (0.15%)	35 (0.07%)	41 (0.08%)	329 (0.63%)	2 (0.00%)	327 (0.63%)

* 출처: 농림축산식품부. 2014 시설채소온실현황 및 채소류 생산 실적

이 중 단동형 원예시설의 12.8% 연동형 원예시설의 35.8%에 다겹보온커튼이 설치되어 있음.

합계	단동				연동				
	다중 피복	다겹 보온	보온 덮개	기타	합계	부직포류	알루미늄 스크린	다겹 보온	기타
44,371 (100.0%)	13,704 (30.9%)	5,669 (12.8%)	10,674 (24.1%)	14,324 (32.3%)	6,833 (100%)	2,787 (40.8%)	412 (6.0%)	2,449 (35.8%)	1,185 (17.3%)

* 출처: 농림축산식품부. 2014 시설채소온실현황 및 채소류 생산 실적

(2) 실험 설계 방안

현재 구축된 방법론은 연료절감 효과 연구를 기초로 만들어졌고, 삭감율(매년 5%) 또한 자료에 기초한 것이 아니라 임의로 설정된 것이기 때문에, 다겹보온커튼의 설치연수에 따른 보온율 변화를 측정하여 합리적인 삭감율을 마련해야 한다. 다겹보온커튼의 종류가 단동과 연동으로 구분되는 것이 아니기 때문에, 현장에서 설치연수에 따른 열화와 부식 정도는 개폐 방식(권취식과 예인식)에 따라 크게 다르다는 지적에 기초하여 개폐방식 별로 각각 10개의 시료를 채취하여 분석하였다.

<<다겹보온커튼 도입에 따른 화석연료 감축률>>

데이터/인자	RF_y
데이터 단위	%
설명	y년도 감축률
데이터 출처	온실 커튼자재별 보온효과 및 설치방법 규명, 국립농업과학원(2003) 시설원에 에너지 절감을 위한 보온자재 선발 및 농가현장 적용 연구, 국립원예특작과학원(2010)
적용된 값	- 연동 비닐하우스: 설치 후 1년 동안(46%), 이후 매년 5%씩 삭감 - 단동 비닐하우스: 설치 후 1년 동안(38%), 이후 매년 5%씩 삭감
측정 방법/절차	-
모니터링 주기	-
QA/QC 절차	-
데이터 목적	베이스라인 배출량 산정
기타 의견	

- 가. (1단계) 다겹보온커튼의 소재와 개폐 방식 등에 따라 내구연수가 다를 것으로 가정되므로 농가에서 일반적으로 사용되고 있는 다겹보온커튼의 현황을 바탕으로 보온율 변화 실험을 위한 다겹보온커튼의 종류를 구별
- 나. (2단계) 각 종류별로 설치 후 5년, 7년, 10년이 지난 농가의 다겹보온커튼 시료 채취
- 다. (3단계) 실험그룹별 표본 크기 결정 (신뢰수준 결정)
- 라. (4단계) 공인시험기관을 통한 보온율 검사

(3) 실험그룹별 표본 크기 결정

실험그룹별 적정 표본의 크기는 신뢰수준을 90% 또는 95%로 설정하고 기존 샘플조사에서 시행했던 다겹보온커튼의 평균 보온율과 표준편차, 허용오차에 근거하여 도출하였다.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2}\sigma}{E} \right)^2$$

단, n 는 표본의 크기

$Z_{\alpha/2}$ 는 신뢰수준 95% 1.96, 신뢰수준 90%일 때 1.64

σ 는 모평균의 표준편차로 알려져 있지 않은 경우 사전 샘플조사에 따른 표준편차 이용

E 는 허용 가능한 오차의 크기

다. 경종부문 저탄소비료 배출계수 연구

(1) 벼 재배에서 저탄소 비료 시용에 따른 온실가스 저감 효과 평가

본 연구는 2015, 2016년 2년 동안 경상남도 사천시 두량읍 경상대학교 시험 포장(35° 14' N and 128° 07' E)에서 실시되었으며, 선발 처리구 토양은 전형적인 haplaquent의 미사질 양토로 이화학적 특성으로 pH는 6.9±0.3, 유기물 함량은 20.4±3.9 g kg⁻¹, 전질소 함량은 1.68±0.09 g kg⁻¹ 이었다. 동진벼를 공시 품종으로 선발하여 5월 말 30cm×15cm의 재식거리로 손 이양하여 10월 초에 수확하였다. 논 토양에서 저탄소 비료의 시용이 온실가스 저감에 미치는 영향을 측정하기 위하여 저탄소 비료로는 완효성 비료를 선발하였고, 이와 비교를 위한 속효성 비료로는 요소 비료를 선발하였다. 속효성 비료를 처리한 control 처리구에는 관행에 따라 90 kg N ha⁻¹의 요소를 처리하였으며, 저탄소(완효성) 비료 처리구에는 추천 시비량인 90 kg N ha⁻¹의 0, 0.5, 0.75, 1배를 각각 처리하였다. 질소 비료 외의 비료는 추천 시비량 (P₂O₅-K₂O=45-57 kg ha⁻¹) 따라 시비하였다.

벼 재배과정 중 발생한 온실가스는 closed chamber method(Rolston, 1986; Ali et al., 2008, 2009; Haque et al., 2013)를 이용하여 벼 재배과정 중 발생하는 주요 온실가스(CH₄, N₂O) 배출량을 조사하였다. 투명한 아크릴 chambers(W 62cm×L 62cm×H 112cm)를 벼 이양 후 설치하여 CH₄ 및 N₂O 배출량 조사에 이용하였다. Chamber 내에는 8주의 벼가 들어가도록 설치하였으며, chamber의 아래에 2개의 구멍을 뚫어 5~7cm의 수위 유지가 가능하도록 하였다. 모든 chamber는 가스시료 채취 시간을 제외하고 열린 상태를 유지하였다. Chamber 내에 온도계를

설치하여 지속적으로 온도를 조사하였으며, 팬(pan)을 설치하여 균질한 가스시료를 채취하도록 하였다. 가스시료는 50 mL gas-tight syringe를 이용하여 chamber 개폐 전(0분)과 30분 경과 후의 시료를 각각 채취하여 분석이 이용하였다. 가스 채취 시기는 하루 평균 온실가스 배출 시간대 별 3회 (8:00-12:00-16:00) 실시하였다. 각각의 반복 처리구에서 채취한 가스 시료는 3-way stop cock를 이용하여 20mL 크기의 butyl rubber septum으로 밀봉된 진공 유리병에 옮겨 담아 이후 분석에 이용하였다. 두 가지 온실가스의 농도는 Gas chromatography(Shimadzu, GC-2010, Japan), Porapak NQ column (Q 80-100 mesh)를 이용하여 분석하였다. 사용한 detector는 flame ionization detector (FID)와 63Ni electron capture detector(ECD)를 이용하여 각각 CH₄, N₂O 농도를 분석하였다. 기기의 분석조건으로, column, injector, detector의 온도조건은 CH₄분석 시 100, 200, 200°C, N₂O 분석 시 70,80, 320°C였다. Helium과 H₂ 가스를 carrier 및 burning 가스로 각각 사용하였다.

CH₄, N₂O 배출량은 chambers 개폐 전(0분)과 30분경과 후 chambers 내 CH₄, N₂O의 농도차로 아래와 같이 환산하였다(Rolston, 1986, 식 1).

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \dots\dots\dots \text{식 1}$$

여기서, F는 CH₄(mg m⁻² hr⁻¹), N₂O(μ g N₂O m⁻² hr⁻¹); ρ 는 표준조건에서 CH₄, N₂O의 밀도 (mg cm⁻³); V는 chamber 부피(m³); A는 chamber 면적(m²); $\Delta c/\Delta t$ 는 CH₄, N₂O gas 축적율 (mg m⁻³ hr⁻¹); T는 chamber 내 절대온도(273+평균온도, °C).

CH₄, N₂O의 Seasonal flux는 아래 식2를 이용하여 환산하였다(Singh et al., 1999, 식 2).

$$\text{Seasonal CH}_4 \text{ and N}_2\text{O flux} = \sum \ln(R) \dots\dots\dots \text{식 2}$$

여기서, R_i는 i번째 시료의 CH₄, N₂O flux (g m⁻² d⁻¹); D_i는 i번째 시료의 경과일수, n은 시료채취 수.

벼 재배과정 중 배출되는 온실가스가 지구 온난화에 미치는 영향을 동일한 기준으로 평가하기 위해 각 처리구별 Global Warming Potential(GWP)을 CO₂를 기준으로 아래 식3을 이용하여 산정하였다(Robertson et al., 2000). 이 때, CO₂ 대비 CH₄의 GWP는 25배, N₂O의 GWP는 298배로 구하여 계산하였다(IPCC, 2007).

$$\text{GWP (CO}_2\text{equivalent)} = \text{CH}_4 \times 25 + \text{N}_2\text{O} \times 298 \dots\dots\dots \text{식 3}$$

토양 깊이 3~5cm에 온도계를 설치하여 지속적인 온도 변화를 관찰하였다. 동일한 깊이로 Eh 백금전극(EP-201, Fujiwara, 24cm)을 설치하여 Eh meter(PRN-41, DKK-TOA Corporation)를 이용해 지속적으로 토양의 산화환원전위를 조사하였다. 벼 수량구성요소로서 이삭 당 알곡수, 천립중, 등숙율을 조사하였다(RDA, 1995). 통계적 분석은 SAS package, version9.1(SAS Institute, 2003)을 이용하여 처리구 간의 평균을 유의확률 p≤0.05에서 비교분석 하였다.

(2) 밭 작물 재배에서 저탄소 비료 시용에 따른 온실가스 저감 효과 평가

본 연구는 2015, 2016년 2년 동안 경상남도 진주시 가좌동 경상대학교 시험 포장(35° 08' N and 128° 05' E)에서 실시되었으며, 선발 처리구 토양은 미사질 식양토로 배수가 다소 불리한 특징을 나타냈다. 토양 내 유기 탄소 함량은 $9.0 \pm 0.9 \text{ g kg}^{-1}$, 토양 pH는 5.9 ± 0.3 (1:5 with H_2O)이었다. 고추(팔도강산)를 시험 작물로 선발하여 5월 말에 이식, 10월 중순에 수확하였다. 밭 토양에서 저탄소 비료의 시용이 온실가스 저감에 미치는 영향을 측정하기 위하여 저탄소 비료로는 완효성 비료를 선발하였고, 이와 비교를 위한 속효성 비료로는 요소 비료를 선발하였다. 속효성 비료를 처리한 control 처리구에는 관행에 따라 90 kg N ha^{-1} 의 요소를 처리하였으며, 저탄소(완효성) 비료 처리구에는 추천 시비량인 190 kg N ha^{-1} 의 0, 0.5, 0.75, 1.0배를 각각 처리하였다. 질소 비료 외의 비료는 추천 시비량($\text{P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=123\text{-}155 \text{ kg ha}^{-1}$) 따라 시비하였다.

고추 재배과정 중 발생한 온실가스는 closed chamber method(Rolston, 1986; Ali et al., 2008, 2009; Haque et al., 2013)를 이용하여 고추 재배과정 중 발생하는 주요 온실가스(CH_4 , N_2O) 배출량을 조사하였다. 원통형 불투명한 아크릴 chambers(지름 24cm × 높이 20cm)를 고추 이식 후 설치하여 CH_4 및 N_2O 배출량 조사에 이용하였다. Chamber는 작물 사이에 설치하여 chamber 내에는 식물이 들어가지 않도록 설치하였다. 모든 chamber는 가스시료 채취 시간을 제외하고 열린 상태를 유지하였다. Chamber 내에 온도계를 설치하여 지속적으로 온도를 조사하였으며, 팬(pan)을 설치하여 균질한 가스시료를 채취하도록 하였다. 가스시료는 50 mL gas-tight syringe를 이용하여 chamber 개폐 전(0분)과 30분 경과 후의 시료를 각각 채취하여 분석이 이용하였다. 가스 채취 시기는 하루 평균 온실가스 배출 시간대 별 3회(8:00-12:00-16:00) 실시하였다. 각각의 반복 처리구에서 채취한 가스 시료는 3-way stop cock를 이용하여 20mL 크기의 butyl rubber septum으로 밀봉된 진공 유리병에 옮겨 담아 이후 분석에 이용하였다. 두 가지 온실가스의 농도는 Gas chromatography (Shimadzu, GC-2010, Japan), Porapak NQ column (Q 80-100 mesh)를 이용하여 분석하였다. 사용한 detector는 flame ionization detector (FID)와 ^{63}Ni electron capture detector(ECD)를 이용하여 각각 CH_4 , N_2O 농도를 분석하였다. 기기의 분석조건으로, column, injector, detector의 온도조건은 CH_4 분석 시 100, 200, 200°C, N_2O 분석 시 70, 80, 320°C였다. Helium과 H_2 가스를 carrier 및 burning 가스로 각각 사용하였다.

CH_4 , N_2O 배출량은 chambers 개폐 전(0분)과 30분경과 후 chambers 내 CH_4 , N_2O 의 농도차로 아래와 같이 환산하였다(Rolston, 1986, 식 1).

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \dots\dots\dots \text{식 1}$$

여기서, F는 CH_4 ($\text{mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$), N_2O ($\mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$); ρ 는 표준조건에서 CH_4 , N_2O 의 밀도 (mg cm^{-3}); V는 chamber 부피(m^3); A는 chamber 면적(m^2); $\Delta c/\Delta t$ 는 CH_4 , N_2O gas 축적율 ($\text{mg m}^{-3} \text{ hr}^{-1}$); T는 chamber 내 절대온도($273+\text{평균온도}$, °C).

CH_4 , N_2O 의 Seasonal flux는 아래 식2를 이용하여 환산하였다(Singh et al., 1999, 식 2).

$$\text{Seasonal CH}_4 \text{ and N}_2\text{O flux} = \sum \text{in}(R_i \times D_i) \dots\dots\dots \text{식 2}$$

여기서, R_i 는 i 번째 시료의 CH_4 , N_2O flux ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$); D_i 는 i 번째 시료의 경과일수, n 은 시료채취 수.

고추 재배과정 중 배출되는 온실가스가 지구 온난화에 미치는 영향을 동일한 기준으로 평가하기 위해 각 처리구별 Global Warming Potential(GWP)을 CO_2 를 기준으로 아래 식3을 이용하여 산정하였다(Robertson et al., 2000). 이 때, CO_2 대비 CH_4 의 GWP는 25배, N_2O 의 GWP는 298배로 구하여 계산하였다(IPCC, 2007).

$$GWP\ (CO_2\ equivalent) = CH_4 \times 25 + N_2O \times 298 \dots\dots\dots \text{식 3}$$

토양 깊이 3~5cm에 온도계를 설치하여 지속적인 온도 변화를 관찰하였고, 토양을 채취하여 지속적으로 토양의 수분함량을 조사하였다. 고추의 수량 및 중량을 측정하여 수량을 조사하였다. 통계적 분석은 SAS package, version9.1(SAS Institute, 2003)을 이용하여 처리구 간의 평균을 유의확률 $p \leq 0.05$ 에서 비교분석 하였다.

(3) 전과정 평가 방법

전과정 평가 (Life cycle assessment) 는 제품 또는 시스템의 모든 과정인 원료채취 단계, 가공, 조립, 수송, 사용, 폐기의 모든 과정에 걸쳐 에너지와 광물자원의 사용, 그리고 이로 인한 대기 및 수계, 토양으로의 환경 부하량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 악영향을 규명하며, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여, 이를 저감, 개선하고자 하는 기법이다 (Curran, 2006). 본 연구에서는 저탄소 비료의 시용에 따른 농경지에서의 온실가스 저감 효과를 평가하기 위해, 비료의 생산과정에서부터 수송 및 농경지에 시용 시 발생하는 온실가스가 지구온난화에 미치는 영향을 전 과정 평가하기 위해 Gabi software (PE International, Stuttgart, Germany) 를 사용하였다. 전체 시스템은 4개의 하위 과정 (비료 생산 공정, 운송, 디젤유 공급, 농경지 발생) 으로 나뉘어졌다. 본 연구에서는 Reference flow와 Mass balance라는 두 개의 원칙이 적용되었다. Reference flow 원칙은 functional unit을 기준으로 과정 중 사용된 물질과 에너지를 추적하는 것이다. Mass balance는 농경지 발생을 제외한 하위 과정에서의 유입과 배출 flow 간의 등가균형을 맞춰준다. 측정 및 계산된 온실가스가 지구온난화에 미치는 영향은 지구온난화지수 (global warming potential, GWP) (Guinee, 2002; Institute of Environmental Science, 2010) 를 사용하여 평가되었다.

본 연구의 범위는 2015, 2016년에 논과 밭의 각 경계 내에서 직·간접적으로 발생하는 온실가스(CH_4 , N_2O and fossil CO_2) 배출을 포함한다. 농경지에서 발생하는 생물학적인 CO_2 발생은 중립적인 분해로 인식되어 본 연구의 대상에서 제외되었다. 운송에 사용된 장비의 디젤유 사용으로 인한 온실가스 배출도 고려되었다. 본 연구에서의 functional unit은 농경지 면적인 1ha 이며, 농경지 1ha에 시용된 비료를 생산하는 과정, 비료를 농경지로 운송하는 과정, 비료 시용 후 농경지에서 작물이 재배되는 과정에서의 온실가스 배출량이 평가되었다. 본 연구에서 사용된 GWP는 CO_2 당량으로 변환하여 기후 변화를 평가하였으며, 농경지에서 발생한 CH_4 과 N_2O 관측 값과 European Emission Standard 3 and 4 (European Parliament Council, 2000)에 따라 제공되는 Gabi database에서 비료 생산 공정과 트럭을 통한 운송과 디젤유 공급의 database를 사용하였다.

라. 경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인 개발

(1) 현재 배출계수 개발 및 검증에 대한 전반적인 내용을 담고 있으며 신뢰수준이 높은 가이드라인은 IPCC가이드라인과 국가배출계수 개발검증 가이드라인이 있다. IPCC 가이드라인은 모든 국가인벤토리 작성의 기본 지침이 되고 있지만 배출량 산정·보고·검증 전반을 다루고 있기 때문에 배출계수 개발과 검증에 있어 개발자가 직접 활용할 수 있도록 실제적이고 구체적인 내용을 다루고 있지는 않다. 온실가스종합정보센터에서 개발한 「국가인벤토리 배출계수 개발검증 가이드라인」은 국가온실가스 인벤토리 산정 및 배출계수 개발 체계 전반에 대한 설명과 더불어 배출계수 개발자가 개발과정에서 고려해야할 사항과 배출계수를 검증하는 검증위원회가 고려해야할 사항들을 상세히 제시하고 있다. 따라서 감축제도 배출계수 개발검증 가이드라인을 개발함에 있어 온실가스종합정보센터에서 개발한 「국가인벤토리 배출·계수 개발검증 가이드라인」의 구성 항목을 참고하였다.

(2) 「국가인벤토리 배출계수 개발검증 가이드라인」은 크게 개발지침과 검증지침으로 구성되어 있다. 개발지침은 개발과정에서 고려해야할 사항들을 개발 방법론, 계수대표성, 측정·분석 정확성, 자료관리 등 네 가지 항목에 대해서 제시하고 있으며 계수 개발 전 과정에 대해 품질보증 및 관리 (Quality Assurance and Quality Control, QA/QC)를 수행하도록 일련의 지침을 제공하고 있다. 또한 개발된 계수에 대해 불확도를 산정하도록 명시하고 있으며 개발자를 위한 체크리스트를 부록으로 제공하여 개발과정에서 고려해야할 사항들이 누락되지 않도록 하고 있다.

여기서 제시한 개발자 체크리스트는 본 보고서의 부록으로 제시되어 있다. 개발 방법론은 기본적으로 IPCC의 가이드라인과 목표관리 지침 등 신뢰도가 높은 문헌에 제시된 방법론을 사용하도록 권고하고 있다. 모든 고려사항에 대해 IPCC 가이드라인과 국내외 공인된 문헌에 제시된 사항을 따를 것을 규정하고 있으며 단 농업 부문의 배출활동 특성에 대한 내용은 IPCC 배출계수 가이드라인 중 국내 실정에 맞도록 일부 수정되었다. 다음은 「국가인벤토리 배출·계수 개발검증 가이드라인」중 계수 개발 지침의 구성항목이다. 이외에 개발자를 위한 체크리스트와 검증지침은 아래 제시된 항목과 동일한 구조로 이루어져 있다.

(3) 향후 사업의 확대를 고려할 때 감축제도의 배출계수 개발은 국내외 공인된 방법론을 적용하여 이루어져야 하므로 국가인벤토리 배출계수 개발 지침의 기준에 부합하는 것이 필요하다. 단 모니터링이 어려운 비에너지 부문의 방법론의 경우 이를 계수 개발과정에서 고려하는 것이 필요할 것이다.

QA/QC는 배출계수 개발 전과정에 걸쳐서 수행하도록 하며 이때 QA/QC를 적용하는 기준 역시 IPCC 가이드라인과 국내 목표관리 지침이 가장 우선시 되며 해당 지침에서 제시되지 않는 배출원 및 배출활동 특성을 고려하는 계수 일 경우 기타 자체 기준 등을 사용할 수 있다.

불확도 평가는 계수의 신뢰도를 확보할 수 있는 중요한 단계로 국가배출계수 개발검증 가이드라인에서도 이를 수행할 것을 명시하고 있다. 그러나 구체적인 불확도 평가 방법을 제시하지는 않고 있으며 ‘국내외 공인된 불확도 평가 방법’을 적용할 것을 권고하고 있다. 여기서 ‘국내외 공인된 불확도 평가 방법’은 IPCC 가이드라인과 국내 목표관리 지침 상에서 제시된 불확도 평가 방법 등이 있다. IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 불확도 평가 방법은 오차전파법과 몬테카를로 시뮬레이션 두가지가 있다. 그러나 이 두 방법이 모든 경우에 서로 대체하여 적용가능한 것은 아니며 측정데이터의 특성에 따라 적합한 방법이 존재한다. 국내 배출계수

개발검증 가이드라인 및 IPCC 가이드라인, 목표관리 지침에서 제시하고 있는 불확도 평가방법은 이를 모두 포괄하고 있지 않다. 본 연구의 배출계수 개발과정에서 적용할 불확도 평가계획은 앞장에서 보다 상세히 다루었다.

제2절 축산부문 감축사업 활용을 위한 배출계수 개발 및 감축량 산정

1. 습식 TMR과 분리급여 방식 차이에 따른 메탄발생량 조사

가. 실험 1 : 체중의 1.8% 급여 실험

습식 TMR과 분리급여 사료는 원료의 구성과 배합비가 모두 동일하였다. TMR은 공장에서 배합되어 실험목장으로 운송되었고, 분리급여를 위한 농후사료는 표 1과 같이 물을 포함한 구성원료만을 혼합하여 비닐백에 넣어 배달되었다. TMR에 사용된 조사료는 별도로 공장에서 구매하여 실험에 사용하였다. 따라서 TMR과 분리급여용 사료는 농후사료와 조사료의 비율이 73:27%로 동일하고, 수분함량도 차이가 없도록 하였다. TMR과 농후사료는 비닐백으로 포장하였기 때문에 시험축에 급여할 때는 미약한 발효가 진행되었으며, pH와 유산(lactic acid)함량이 각각 5.49와 1.8% DM, 그리고 5.29와 1.4% DM이었다. TMR에 포함된 조사료는 TMR 배합기에서 혼합되는 과정에서 어느 정도 파쇄가 되었지만, 분리급여용 조사료는 사각베일 그대로 급여하였기 때문에, 길이(particle size)에서 차이가 있었다.

본 실험의 결과, TMR을 섭취한 소의 메탄발생량이 분리급여 보다 21% 통계적으로 유의성 있게($P < 0.05$) 높았고, 유기물 단위섭취량 당 메탄발생량 역시 수치상으로는 21% 높았으나 통계적 차이는 없었다. 섭취에너지 중 메탄에너지로 전환된 비율은 각각 7.2와 5.6%로 유의적인 차이를 보였다.

표 3. 체중의 1.8% 섭취 수준에서 TMR과 분리급여 사료의 메탄발생량 차이

	Treatment		SEM	P value	
	TMR	Separately			
DM intake					
	CH ₄ ,L/day	169.9	140.1	6.92	0.030
	CH ₄ ,g/day	121.4	100.1	4.94	0.030
1.8 % BW	CH ₄ ,g/kg of DMI	20.5	17.0	1.42	0.183
	CH ₄ ,g/kg of OMI	23.3	19.3	1.62	0.220
	CH ₄ -E, % GEI	7.2	5.6	0.37	0.010

나. 실험 2 : 체중의 2.0% 급여 시험

실험 1과 동일한 실험사료(표 1)를 그리고 실험축은 평균체중 319kg 3두 그리고 561kg 3두, 총 6두를 이용하였다. 기타 실험 디자인과 방법도 실험 1과 동일하게 수행하였다.

본 실험에서는 아침사료 급여 후 1.5, 3.0 그리고, 4.5시간에 구강을 통해 반추위액을 채취하여 TMR과 분리급여 사료가 반추위내에서 어떤 발효 특성 차이를 보이는 지 조사하였다. 또한 표식물질(marker)인 Cr₂O₃를 실험 시작 일부터 1일 섭취량의 0.2% 혼합 급여하고, 아침사료 급여 전과 저녁 사료 급여 전까지 1시간 간격으로 직장에 손을 넣어 분 시료를 채취(grab sampling)하고, 모든 시료를 혼합 Cr 함량을 분석하였다.



그림 2. 반추위액 채취 및 분 시료 채취 과정

본 실험은 실험 1과 같이 TMR을 섭취한 소의 메탄발생량이 분리급여 보다 21% 통계적으로 유의성 있게(P = 0.029) 높았고, 유기물 단위섭취량 당 메탄발생량 역시 18% 높았다(P = 0.054). 섭취에너지 중 메탄에너지로 전환된 비율은 각각 4.1과 3.4%로 유의적인 차이(P < 0.01)를 보였다(표 4).

표 4. 체중의 2.0% 섭취 수준에서 TMR과 분리급여 사료의 메탄발생량 차이

		TMR ¹	SF ¹	SEM	P value
2.0% BW	CH ₄ L/day	138.5	118.2	3.17	0.029
	CH ₄ g/day	96.1	84.4	2.26	0.029
	CH ₄ g/kg of DMI	11.3	10.3	0.11	0.011
	CH ₄ g/kg of OMI	13.4	11.7	0.53	0.054
	CH ₄ g/kg of DOM	20.7	20.1	0.46	0.338
	CH ₄ -E, % GEI	4.0	3.5	0.04	0.005

다. 실험 3 : 체중의 2.4% 급여 시험

실험 1과 동일한 실험사료(표1), 실험축은 평균체중 280kg 3두 그리고 517kg 3두, 총 6두를 이용하였다. 기타 실험 디자인과 방법도 실험 1과 동일하게 수행하였다. 본 실험은 실험 1, 2와 다르게 TMR을 섭취한 소의 메탄발생량과 분리급여 결과 간에 차이가 없었다. 또한 유기물 단위섭취량 당 메탄발생량 그리고 섭취에너지 중 메탄에너지로 전환된 비율에서도 차이가 없었다.

표 5. 체중의 2.4% 섭취 수준에서 TMR과 분리급여 사료의 메탄발생량 차이

	TMR ¹	SF ¹	SEM	P - value
CH ₄ L/day	149.4	145.6	21.04	0.862
CH ₄ g/day	106.7	104.0	15.02	0.862
2.4% BW				
CH ₄ g/kg of DMI	12.2	11.6	1.37	0.660
CH ₄ g/kg of OMI	14.0	13.2	1.56	0.654
CH ₄ -E, % GEI	4.2	4.0	0.47	0.656

라. 실험 1, 2, 3 결과에 대한 고찰

TMR과 분리급여 방식은 조사료와 농후사료를 혼합 또는 각각 분리 급여하는 차이를 말하지만, 본 실험에서 TMR을 mixer로 혼합하는 과정에서 조사료의 세절 현상이 발생함에 따라 1.18mm 체를 통과하는 작은 입자비율에서 분리급여의 조사료보다 많은 비율($P < 0.05$)이었고, 19mm 이상의 길이가 긴 조사료 비율이 분리급여 조사료보다 적었다($P = 0.01$). 이러한 영향은 TMR 급여 농가의 공통적인 특징이기도 하다. 이러한 조사료의 길이 차이가 전체소화관 소화율에 미치는 영향은 없었다($P > 0.1$).

표 6. 체중의 2.0% 섭취 수준에서 TMR과 분리급여 사료의 영양소 소화율 차이

	TMR ¹	SF ¹	SEM	P value
DM, %	59.57	59.95	1.54	0.809
OM, %	61.82	62.53	0.36	0.107
CP, %	63.87	65.32	1.54	0.369
NDF, %	35.17	33.66	2.49	0.560
Energy, %	57.05	57.75	1.90	0.720

표 7. TMR과 분리급여 사료의 particle size 차이

Particle size (mm)	Total feed particles (%)		P value
	TMR	SF	
> 19	5.43 ± 1.29	18.12 ± 3.91	0.012
19 - 8.0	29.41 ± 0.76	23.37 ± 0.84	0.002
8.0 - 1.18	35.45 ± 0.41	35.65 ± 1.87	0.890
< 1.18	29.71 ± 2.08	22.86 ± 1.91	0.026

반추위 pH, 휘발성 지방산 비율(총 VFA, acetate, propionate, butyrate, iso acids), ammonia-N 농도는 TMR과 분리급여 간에 매우 다른 특징을 보여주고 있고, 실험 1과 2에서는

체중의 1.8 그리고 2.0% 수준에서 TMR 급여구가 왜 분리급여 보다 메탄발생량이 21% 높은지 설명하고 있다. 특히 아침사료 급여 3시간 전과 후의 발효 특성이 완전히 뒤바뀌었다는 점과 그 변화가 4시간까지 지속되고 있는 것으로 볼 때, 4시간 이후도 같은 양상을 보일 것으로 판단된다. 즉, 3시간 이후의 분리급여 (SF)는 낮아지지만, TMR 급여구는 높아지고 있는 것은 지금까지의 연구결과 등과 일치하며, 반추위 pH가 낮으면 메탄이 감소한다는 연구결과들을 뒷받침하고 있다. 또한 TMR 급여와 반대로 분리급여에서는 acetate(C2) 농도 감소, propionate(C3) 농도 증가 그리고 C2/C3 비율 감소를 보였고, 이 결과는 분리급여 방식은 반추위 발효 과정에서 생성된 수소(H)가 메탄 합성 보다는 propionate 합성에 더 많이 사용되었다는 설명이 가능하다. 다시 말하면, TMR 급여에서는 propionate 보다 메탄 합성에 더 많은 수소가 사용되었다고 판단된다.

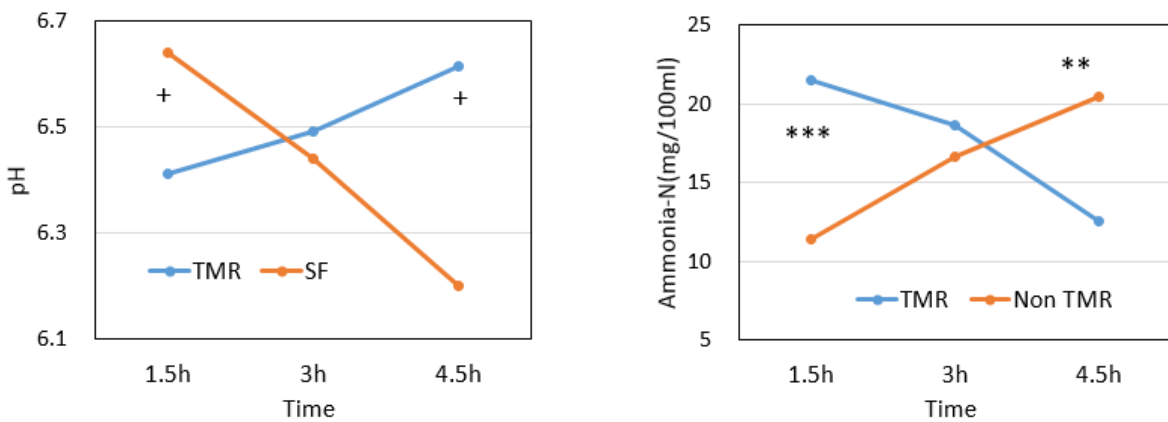


그림 3. 사료 급여 후 시간별 반추위 pH, NH3의 농도

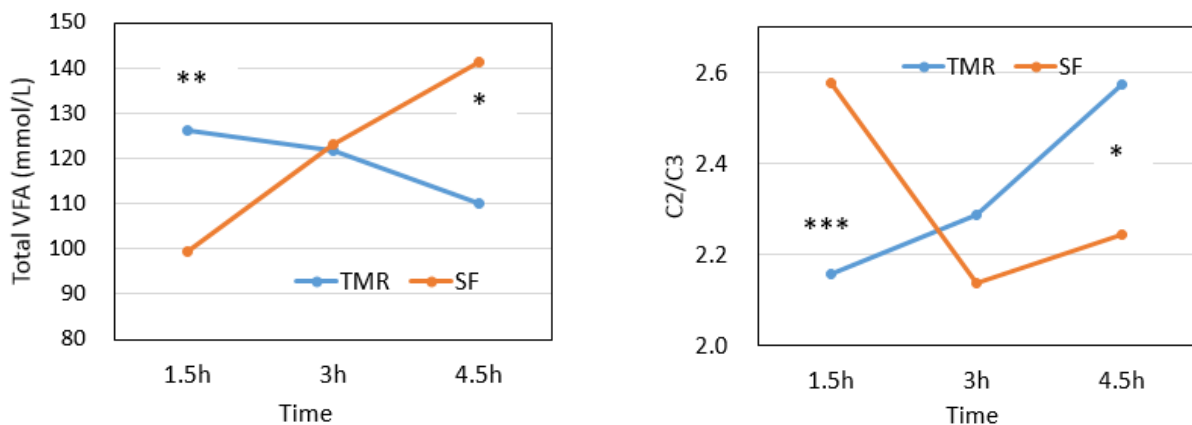


그림 4. 사료 급여 후 시간별 반추위 Total VFA 농도, C2/C3

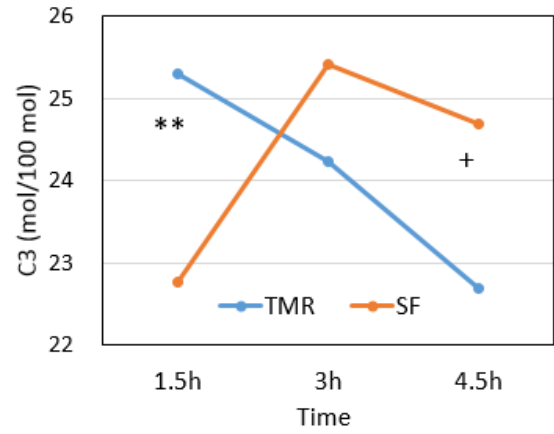
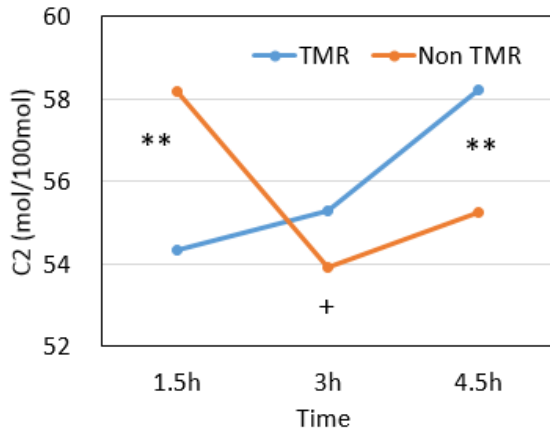


그림 5. 사료 급여 후 시간별 반추위 C2, C3 농도

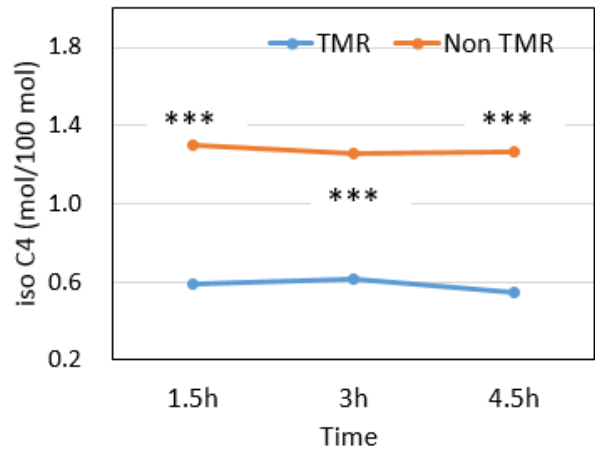
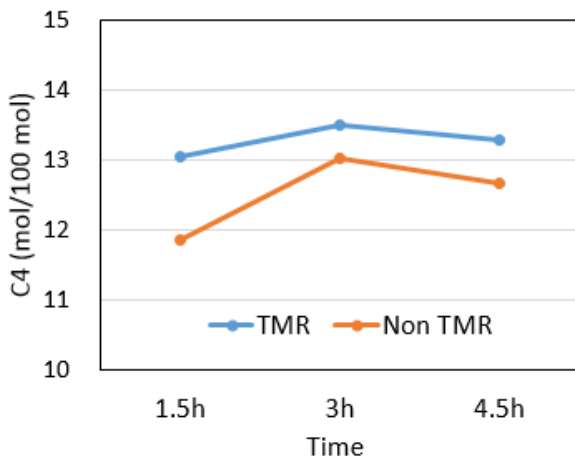


그림 6. 사료 급여 후 시간별 반추위 C4, iso-C4 농도

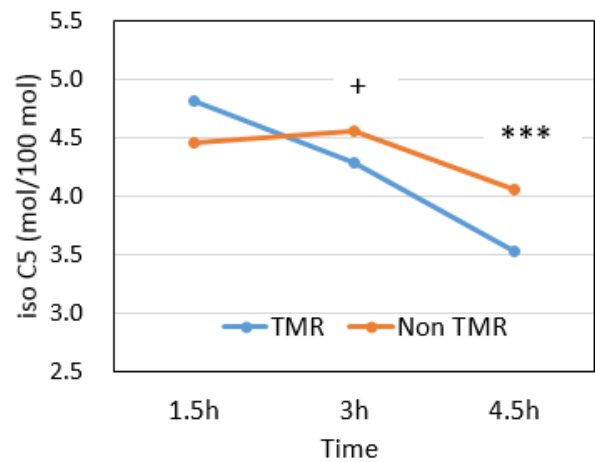
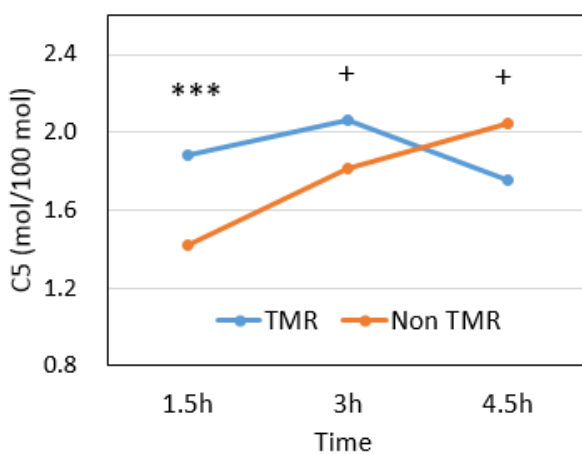


그림 7. 사료 급여 후 시간별 반추위 C5, iso-C5 농도

2. 건식 TMR과 분리급여 방식 차이가 메탄발생량 및 분뇨 메탄발생량과의 상관성

가. 실험 1 : 한우 급여 실험

본 실험에서도 분리급여한 한우의 1일 메탄 발생량이 TMR 급여구 보다 약 30% 메탄이 감소하였다($P < 0.05$). 건물 및 NDF 섭취량 당 메탄발생량도 약 18% 감소하였지만, 통계적인 유의성은 없었다. 그러나 가소화 NDF 섭취량을 기준으로 보면 분리급여의 메탄 발생량이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서도 영양소 소화율에서는 두 사료급여 방식 간에 차이가 없었다.

표 8. TMR과 분리급여 사료의 메탄발생량과 소화율 차이

Item	Treatment		SEM	P-value
	TMR	SF		
CH ₄ (g/d)	67.70	48.08	3.190	0.025
CH ₄ (g/kg DMI)	11.93	9.75	0.730	0.212
CH ₄ /OMI (g/kg DM)	12.78	9.50	0.740	0.136
CH ₄ /DOM (g/kg DM)	23.96	20.36	3.012	0.332
CH ₄ /NDF (g/kg DM)	31.23	27.65	2.867	0.398
CH ₄ /DNDF(g/kg DM)	88.52	37.30	12.610	0.003
Digestibility				
DM, %	50.23	40.15	5.852	0.164
OM, %	54.15	49.80	4.980	0.343
NDF, %	37.60	46.61	6.007	0.161
ADF, %	30.20	40.60	5.267	0.068
MCR (%)	3.68	2.78	0.208	0.138
EF	24.72	17.54	1.165	0.026

The diet contained 25% forage, 75% concentrate on a DM basis

MCR: Metabolic conversion rate

EF: Emission factor

나. 실험 2 : 홀스타인 급여 실험

본 실험에서는 분리급여한 홀스타인의 1일 메탄 발생량이 TMR 급여구 보다 약 10% 메탄이 감소하였다($P < 0.05$). 또한 실험 1과 다르게 건물 및 NDF 섭취량 당 메탄발생량이 통계적으로 유의성 있게 감소하였다. 그리고 가소화 NDF 섭취량 기준에서도 분리급여의 메탄 발생량이 유의적으로 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서도 영양소 소화율에서는 두 사료급여 방식 간에 차이가 없었다.

표 9. TMR과 분리급여 사료의 메탄발생량과 소화율 차이

Item	Treatment		SEM	P-value
	TMR	SF		
CH ₄ (g/d)	49.98	44.73	0.010	0.001
CH ₄ (g/kg DMI)	7.87	5.47	0.554	<.000
CH ₄ /OMI (g/kg DM)	8.43	5.23	0.606	<.000
CH ₄ /DOM (g/kg DM)	15.30	9.19	0.001	0.000
CH ₄ /NDF (g/kg DM)	20.58	15.03	1.537	<.000
CH ₄ /DNDF (g/kg DM)	54.87	58.26	9.716	0.133
Digestibility				
DM, %	52.78	53.98	4.121	0.730
OM, %	55.95	60.20	3.728	0.219
NDF, %	39.98	45.88	4.244	<.000
ADF, %	30.95	41.65	0.006	0.000
MCR (%)	2.43	1.53	0.000	0.000
EF	18.24	16.33	2.112	<.000

The diet contained 25% forage, 75% concentrate on a DM basis

MCR: Metabolic conversion rate

EF: Emission factor

다. 분뇨 메탄발생량

TMR과 분리급여를 한 실험축이 배설한 분과 뇨가 발효될 때, 메탄 발생 특성을 비교하기 위하여 다음의 그림(8)과 같은 시스템을 구축하여 그림(9)과 같이 발효를 진행하였다. 약 3~4 일 간격으로 테들러 백에 모인 가스를 수집하여 총가스 발생량을 측정하였고, 가스 중의 메탄 가스 농도를 측정된 결과, 초기 10일 정도 발효가 활발히 진행되다가 그 후에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 그리고 각 처리별 개체간 변이가 크게 나타났지만, 처리간의 차이가 있다는 것을 명확히 증명하고 있다. 즉, 장내발효에서 메탄발생량이 적었던 분리급여구의 실험축이 배설한 분뇨를 발효하는 과정에서는 TMR 보다 더 많은 메탄을 발생하는 것으로 나타났다.

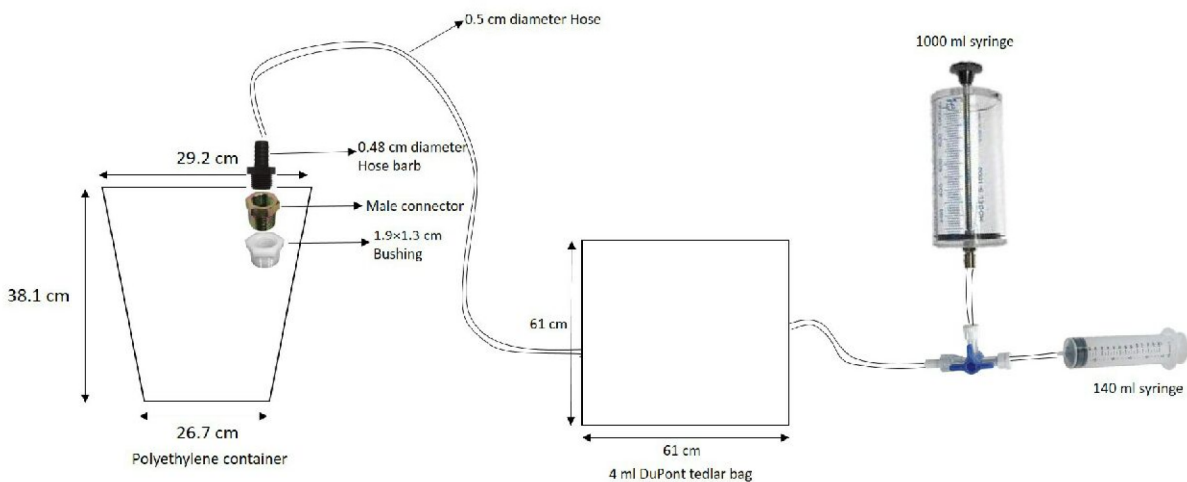


그림 8. 분뇨 메탄발생량 분석 시스템



그림 9. 분뇨 메탄발생량 실험 과정

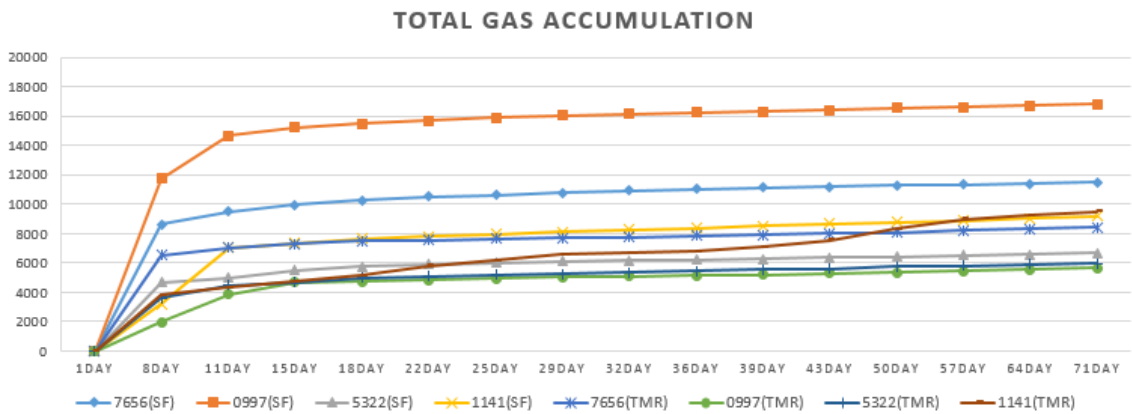


그림 10. TMR과 분리급여 실험축의 분뇨 총 가스발생량

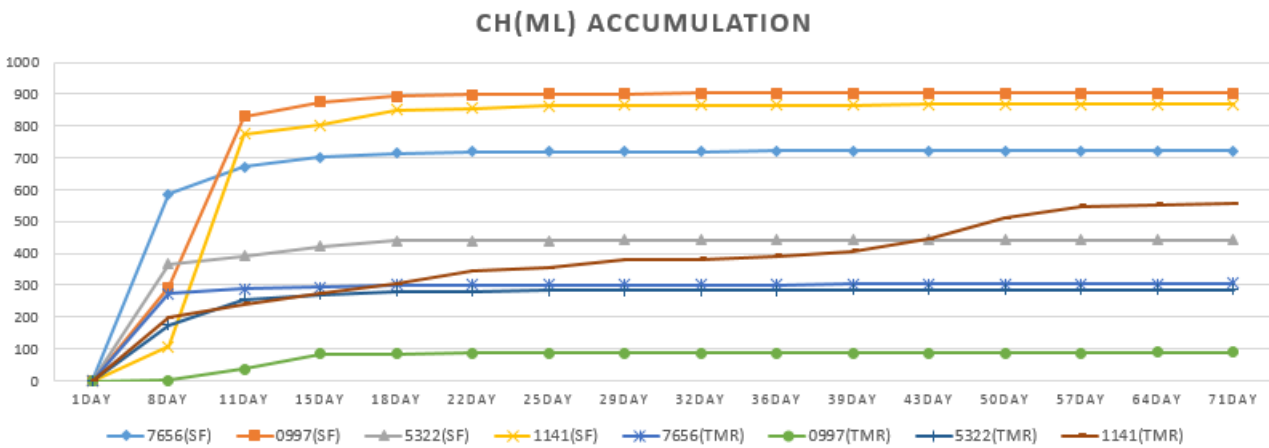


그림 11. TMR과 분리급여 실험축의 분뇨 메탄발생량

3. 지방첨가(Extruded linseed) 사료 급여에 의한 메탄발생량 측정

가. 실험 1 :

대조구와 처리구 배합사료는 건물(dry matter), 유기물(organic matter), 조단백질(crude

protein), NDF(neutral detergent fiber), ADF(acid detergent fiber) 함유비율에서 차이가 없었고, 처리구 배합사료에 linseed가 첨가되었지만 지방(ether extract)비율도 대조구 사료와 큰 차이가 없었다. Tall fescue는 조단백질 함유비율이 4.9% 그리고 NDF가 73%이었다 (표 3).

사료의 건물섭취량은 실험 1과 같이 체중의 2.4%이었으며 유기물, 조단백질, NDF, ADF 섭취량에서도 차이가 없었다(표 10). 착우유를 이용한 실험에서 extruded linseed를 전체사료의 5% 첨가 (Livingstone et al., 2015), 8% 첨가(Martin et al., 2011), 14% 첨가(Chilliard et al., 2008)한 실험에서 사료 건물섭취량이 감소한 것은 8% 이상에서 나타났다. Chilliard et al. (2008)은 건물섭취량 감소와 함께 섬유소 소화율 감소가 유생산량에도 영향을 미쳤다고 했지만, 본 실험의 extruded linseed의 첨가량은 전체사료의 2.3%로서 상기 연구들의 5~14%과 비교하여 매우 적은 양이었고, 사료섭취량에 전혀 영향을 미치지 않았다.

표 10. 건물 및 영양소 섭취량(kg/d)

	Non-Linseed	Linseed
Dry matter	9.86	10.1
Organic matter	9.19	9.32
Crude protein	1.78	1.79
Neutral-detergent fiber	3.83	4.11
Acid-detergent fiber	1.99	2.08

착우유를 이용한 실험에서 extruded linseed를 전체사료의 5% 첨가 (Livingstone et al., 2015)한 실험은 메탄저감 효과가 없었지만, 8% 첨가(Martin et al., 2011)한 실험은 무첨가구보다 15~20% 메탄이 감소하였고, 14% 첨가(Chilliard et al., 2008)에서는 38%가 감소하였다. 그러나 본 실험에서 extruded linseed를 첨가한 처리구의 1일 메탄 발생량은 165g으로 대조구 보다 51%나 유의성 있게 ($P < 0.05$) 높은 값을 보였고, 위에 인용된 실험들과 완전히 반대되는 결과를 보였다.

표 11. Linseed 첨가 사료의 메탄저감 효과

	Treatment		SEM	P-value
	Linseed	Non-Linseed		
CH ₄ (g/d)	165a	109b	16.9	0.045
CH ₄ /DMI (g/kg DM)	16.2a	10.9b	1.92	0.041
CH ₄ /OMI (g/kg DM)	17.5a	11.7b	2.06	0.038
CH ₄ /NDF (g/kg DM)	39.7	28.4	5.90	0.306
MCR (%)	4.3a	2.9b	0.50	0.032
Emission Factor (kg/year)	60.2	39.7	6.16	0.045

나. 실험 2

육우(홀스타인) 거세우 4두(462±30kg)를 공시하여 duplicated 2×2 Latin square design으로 실험을 수행하였다. 메탄저감 효과가 보고된 Extruded linseed를 약 3.8% 넣은 배합사료(처리구)와 linseed를 넣지 않은 배합사료(대조구)를 조사료(Tall fescue)와 65:35의 비율로 하여 1일 체중의 2.8% (원물 기준) 수준으로 오전 9시와 오후 6시 2회 균등히 급여하였다. 시험사료의 성분 함량 (표 1), 가축의 사료 적응 그리고 호흡챔버에서의 메탄분석 등 모든 실험 절차는 <실험 1>과 동일하게 수행하였다.

사료의 건물섭취량은 체중의 2.4%이었으며 유기물, 조단백질, NDF, ADF 섭취량에서도 처리간 차이가 없었다(표 12). 착우유를 이용한 실험에서 extruded linseed를 전체사료의 5% 첨가(Livingstone et al., 2015), 8% 첨가(Martin et al., 2011), 14% 첨가(Chilliard et al., 2008)한 실험에서 사료 건물섭취량이 감소한 것은 8% 이상에서 나타났다. Chilliard et al. (2008)은 건물섭취량 감소와 함께 섬유소 소화율 감소가 유생산량에도 영향을 미쳤다고 했지만, 본 실험의 extruded linseed의 첨가량은 전체사료의 2.3%로서 사료섭취량에 영향을 주지 않았다.

표 12. 건물 및 영양소 섭취량(kg/d)

	Non-Linseed	Linseed
Nutrient Intake (kg)		
Dry matter	10.7	11.1
Organic matter	10.0	10.2
Neutral-detergent fiber	4.1	4.5
Acid-detergent fiber	2.1	2.2
Crude protein	2.0	2.0

실험 1과 동일하게 수행된 실험 2는 완전 반대의 결과를 보였다. Extruded linseed를 첨가한 사료를 섭취한 대조구의 1일 메탄 발생량은 대조구와 비교하여 15% 유의성 있게 감소하였다. Extruded linseed 첨가 1% 당 약 3.8%씩 감소한 것으로서 첨가량 1% 증가당 메탄 2.7% 감소를 보였던 Chilliard et al. (2008)의 결과보다 효과적이었다.

그러나 건물, 유기물 그리고 NDF 섭취 kg당 메탄발생량에서도 extruded linseed 첨가구가 여전히 낮은 수준이지만, 통계적 유의성은 나타나지 않았다. Extruded linseed를 5% 첨가한 livingstone et al. (2015)의 실험에서도 섭취영양소 중량 당 메탄발생량은 대조구와 차이가 없었다.

표 13. Linseed 첨가 사료의 메탄저감 효과

	Treatment		SEM	P-value
	Non-Linseed	Linseed		
CH ₄ (g/d)	173a	147b	7.73	0.044
CH ₄ /DMI (g/kg DM)	16.4	13.3	1.68	0.241
CH ₄ /OMI (g/kg DM)	17.6	14.4	1.80	0.250
CH ₄ /NDFI (g/kg DM)	44.7	33.0	7.25	0.262
MCR (%)	4.30	3.55	0.468	0.276
Emission Factor (kg/year)	63.2a	53.8b	2.83	0.045

다. 지방첨가(Extruded linseed) 사료 급여에 의한 반추위 발효특성 변화

- Linseed 첨가가 반추위 발효 특성에 미치는 영향은 없었다.

표 14. 실험사료의 반추위 pH, 휘발성 지방산 비율, ammonia-N 농도 차이

Treatment	Non-Linseed				Linseed				SEM
	0 hr	1 hr	3 hrs	6 hrs	0 hr	1 hr	3 hrs	6 hrs	
Time interval									0.057
pH	7.19	6.60	6.25	6.50	7.27	6.78	6.45	6.75	8.48
Total VFA (mM)	75.9	72.4	87.8	78.1	61.5	69.3	66.4	62.2	0.966
Acetate (%)	57.9	50.5	51.1	54.9	58.8	50.7	50.0	53.7	0.382
Propionate (%)	20.8	28.9	26.4	23.3	20.9	28.8	27.5	24.1	0.218
iso-Butyrate (%)	1.54	0.981	1.12	1.06	1.84	1.17	1.30	2.33	0.485
Butyrate (%)	16.0	16.3	17.5	17.6	14.7	15.9	17.2	17.5	0.124
iso-Valerate (%)	2.44	1.95	1.81	1.61	2.53	1.99	1.85	1.74	0.107
Valerate (%)	1.22	1.38	2.09	1.57	1.17	1.42	2.14	1.61	0.069
C2/C3	2.78	1.74	1.94	2.37	2.82	1.76	1.82	2.24	2.45
NH ₃ -N (mg/L)	8.73	20.4	16.8	7.80	9.45	21.2	20.3	10.6	

4. 옥수수 가공방법이 in situ 분해율과 in vitro 메탄발생에 미치는 영향

Flake corn은 다른 가공기술과 비교하여 모든 시간에서 가장 낮은 분해율(12.5, 18.9, 25.6, 26.0, 34.2, 52.8, 73.9%)을 보였다. Micronized corn은 Flake corn-C와 비교하면 모든 시간에서 8, 93, 95, 104, 81, 46, 27%의 유의성 있는(P<0.001) DM 분해율 증가를 보였고, 다음으로 Flake corn-A가 30, 45, 42, 38, 31, 24, 11%, 그 다음으로 Flake corn-B 가 4, 17, 18, 25, 17, 20, 10%의 유의성 있는(P<0.001) DM 분해율 증가를 보였다. In vitro 12시간 발효 후에는 micronized corn이 flake corn들 보다 total gas, total VFA 그리고 CH₄ 생산량이 유의성 있게(P<0.05) 높았으며, pH는 낮았다. 48시간에서도 micronized corn의 total gas와 CH₄ 생산량은 5~10% 유의성 있게(P<0.05) 높았고 C2/C3는 10~20% 유의성 있게(P<0.01) 감소하였지만, NH₃-N 농도(18.1mg/dl)는 차이가 없었다. 본 실험에서는 높은 DM 분해율을 보인 가공방법이 total gas와 CH₄ 생산도 높았지만, total VFA와 각 VFA비율에서는 처리방법 간 다른 특성을 보였다.

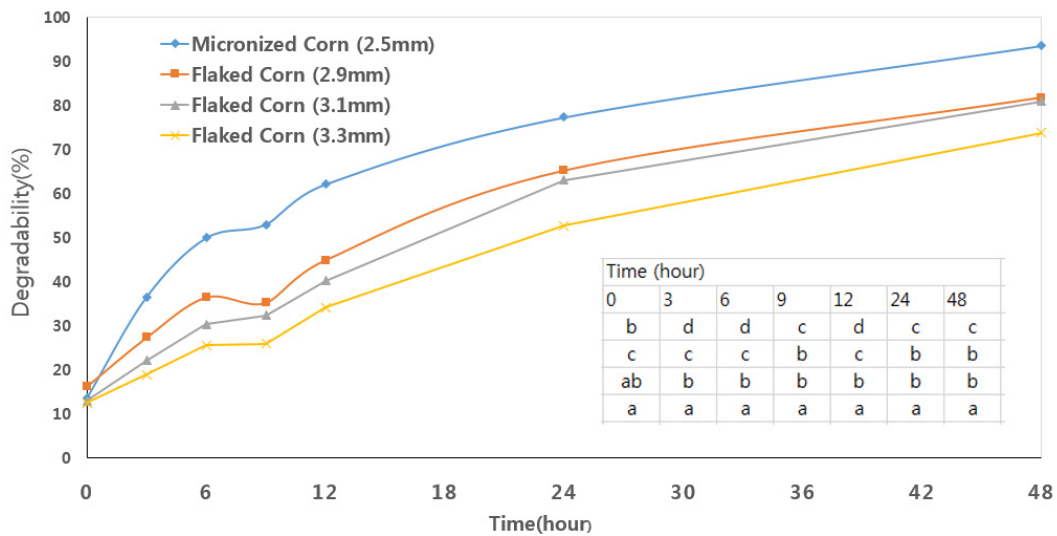


그림 12. 옥수수 가공방법 차이에 따른 분해율

표 14. 옥수수 가공방법 차이에 따른 메탄발생량, 총 가스, 반추위 pH, 휘발성 지방산 비율

(총 VFA, acetate:propionate), ammonia-N 농도

48h	M. Corn (2.5mm)	F. Corn (2.9mm)	F. Corn (3.1mm)	F. Corn (3.3mm)	SEM	p-value
DMD(%)	91.8 ^c	70.5 ^{bc}	55.7 ^a	67.3 ^b	5.36	0.088
CH ₄ (ml)	8.2 ^c	7.3 ^{bc}	4.6 ^a	6.6 ^b	0.42	0.001
Total gas(ml)	51.0 ^c	48.1 ^{bc}	38.5 ^a	45.0 ^b	1.51	0.001

48h	M. Corn (2.5mm)	F. Corn (2.9mm)	F. Corn (3.1mm)	F. Corn (3.3mm)	SEM	p-value
Total VFA	73.64 ^a	96.28 ^b	72.41 ^a	78.51 ^a	3.78	0.015
C2/C3	1.37 ^a	1.73 ^c	1.55 ^b	1.53 ^b	0.05	0.008
CH ₄ /Digested Corn(ml/g)	22.34	25.89	20.93	24.41	0.82	0.130
pH	6.37	6.38	6.39	6.39	0.00	0.139
NH ₃ -N	18.10 ^b	18.69 ^b	14.69 ^a	18.08 ^b	0.51	0.004

5. 조사료 품질 차이와 장내발효 메탄발생

한우 거세우 4두(462±30kg)를 공시하여 duplicated 2× 2 Latin square design으로 실험을 수행하였다. 저품질 조사료로 대표되는 볏짚과 양질의 조사료라 할 수 있는 이탈리아 라이그라스 베일 사일리지를 급여한 결과, 건물섭취량에서 유의적인 차이는 없었지만 이탈리아 라이그라스 급여구의 영양소 소화율에서 유의적이 차이를 보였다. 이와 같은 이유 때문에 1일 메탄발생량에서는 차이가 없었지만, 가소화 섬유소 단위 섭취량 당 메탄발생량은 양질의 조사료인 이탈리아 라이그라스 베일사일리지가 적게 나타났다.

표 15. 실험사료의 건물 및 영양소 섭취량(kg/d)

	Rice Straw	IRG silage	SEM	P-value
Initial BW (kg)	374 (SD = 40)			
Nutrient Intake (kg)				
Dry matter	6.38	6.93	0.253	0.118
Organic matter	5.70	6.25	0.218	0.086
Neutral-detergent fiber	2.98	3.53	0.185	0.059
Acid-detergent fiber	1.73 ^b	2.13 ^a	0.123	0.047
Crude protein	0.708 ^b	0.926 ^a	0.062	0.038

표 16. 실험사료의 외관상 소화율

	Rice Straw	IRG silage	SEM	P-value
Dry matter (g/kg DM)	0.554 ^b	0.646 ^a	0.009	0.014
Organic matter (g/kg DM)	0.614 ^b	0.674 ^a	0.010	0.009
Neutral-detergent fiber (g/kg DM)	0.557 ^b	0.635 ^a	0.013	0.009
Acid-detergent fiber (g/kg DM)	0.554 ^b	0.632 ^a	0.015	0.014

표 17. 실험사료의 메탄발생량 차이

	Treatment		SEM	P-value
	Rice Straw (n=4)	IRG silage (n=4)		
CH ₄ (g/d)	57.8	68.2	5.98	0.134
CH ₄ /DMI (g/kg DM)	9.08	9.85	0.641	0.313
CH ₄ /OMI (g/kg DM)	10.1	10.9	0.698	0.322
CH ₄ /DOMI (g/kg DM)	16.5	16.1	0.876	0.706
CH ₄ /NDF (g/kg DM)	19.4	19.4	1.15	1.00
CH ₄ /DNDF (g/kg DM)	35.0	30.5	1.64	0.071
MCR (%)	2.93	3.03	0.199	0.633
Emission Factor (kg/year)	21.1	24.9	2.18	0.132

표 18. 실험사료의 반추위 pH, 휘발성 지방산 비율, ammonia-N 농도 차이

Treatment Time interval	Rice Straw			Italian Ryegrass			SEM	P value (Feed)
	0 hr	1.5hrs	3 hrs	0 hr	1.5hrs	3 hrs		
pH	7.40	7.16	7.08	7.47	7.10	7.16	0.104	0.771
Total VFA (mM)	65.9	88.4	86.2	60.6	93.7	86.9	3.15	0.950
Acetate (%)	52.0	46.5	47.7	53.7	47.4	49.4	0.284	0.001
Propionate (%)	21.3	24.5	23.8	22.2	25.2	23.8	0.628	0.411
iso-Butyrate (%)	1.55	1.55	1.47	2.11	2.02	1.86	0.132	0.003
Butyrate (%)	22.9	24.4	24.3	19.0	21.6	21.6	0.561	0.001
iso-Valerate (%)	1.2	1.35	1.22	1.79	1.75	1.40	0.131	0.012
Valerate (%)	0.93	1.62	1.59	1.18	2.03	1.97	0.121	0.012
C2/C3	2.47	1.90	2.02	2.42	1.88	2.08	0.052	0.980
Ammonia-N (mg/L)	2.93	15.9	11.0	3.49	17.7	12.3	2.25	0.591

6. 장내발효 결과 종합분석

- 본 연구과제는 처음으로 감축사업 방법론에 필요한 기술들(project) “지방산, 양질조사료 그리고 TMR” 이 메탄발생량에 미치는 효과를 연구 함
- “우리나라 반추가축 사양환경(베이스라인)과 투입 가능한 감축기술 검토(2장 1절 4.)” 에서 기술하였듯이, 지방 첨가는 외국의 사례는 있지만 우리나라 적용에 부적합하다고 판단
- TMR은 외국의 방법론 사례를 찾지 못하였을 뿐 아니라 본 연구결과에서 감축효과가 없는 것으로 나타남
- 양질의 조사료는 UNFCCC에 제출하는 “국가 보고서” 의 제도적 조치의 하나이지만, 외국의 자료와 본 실험결과를 볼 때, 배출량 절대값과 전변을 측면에서 감축 효과를 없는 것으로 나타남
 - 단, 양질조사료의 메탄 감축효과는 가소화 NDF 섭취량 기준으로 환산하였을 때에만 확인됨($P < 0.07$). 따라서 건물섭취 kg 단위, 가소화영양소 섭취 kg, 증체 kg, 유생산 kg 단위 기준으로 메탄발생량을 환산한 값을 비교해야 할 것으로 판단.
 - 그러나 이들 값을 감축사업에 어떻게 적용할지는 감축사업 방법론 전문가들의 숙고가 필요하다는 판단됨.

표 19. 본 과제에서 적용된 기술의 종류와 배출계수(kg/1두/1년) 변화

실험축		분리 (베이스라인)	TMR	
홀스타인 거세우 235~554kg (평균 395kg)	실험 1	36.5	44.3	
	실험 2	30.1	35.1	
	실험 3	38.0	38.9	
	평균	34.8	39.4	13% 증가
홀스타인 거세우	실험 1	17.5	24.7	41% 증
한우 거세우	실험 2	16.3	18.2	12% 증가
홀스타인 거세우	실험 1	대조구	Linseed	
		39.7	60.2	51.6% 증가
		63.2	53.8	14.9% 감소
한우 거세우		저질	양질	
		21.1	24.9	18% 증가
		CH ₄ /DNDF (g/kg DM)		
		35.0	30.5	13% 감소

- 국내에서 수행된 장내발효 온실가스 배출계수 연구 결과를 보면, 체중 약 500kg 이하의 메탄배출계수는 40kg 이하였고, 체중 500kg 이상은 약 77kg 범위였다.
- 본과제에서 사용된 실험축이 체중 500kg 이하였고, 배출계수도 기존 연구결과와 같이 30~40kg의 범위를 보여주고 있다.

오 등 (2014 한국초지조사료학회지)

	Cow			Steers ³⁾	
	growing ¹⁾	heifer ¹⁾	mature ²⁾	growing	fattening
Methane emission factor (kg/head/yr)	26	38	35	30	76.5
Methane conversion rate	0.059	0.069	0.069	0.060	0.045

¹⁾ Seot et al. (2011, 2012), ²⁾ Current experiment, ³⁾ RDA(2013).

7. 양질의 조사료 감축사업 활용 방안

“기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(2006)”에서는 양질조사료 급여량을 점차 증가시키는 정책적 조치에 의한 메탄감축효과를 다음과 같이 산정하고 있고, 3차

국가 보고서 감축량 예측에 포함되어 있다. 이 방법은 양질 조사료 급여 조치에 의해 소에는 8%의 생산성 증진 효과가 있다는 자료(기후변화협약 관련 국가보고서 및 대응방안연구 <축산 부문> (1998)를 기초로, 양질 조사료를 한우는 2%씩, 젖소는 1%씩 매년 급여 비율을 증가시킬 때, 저질조사료를 급여하였을 때 보다 생산성이 증가하기 때문에 사육가축두수 감소를 유도할 수 있고, 메탄을 저감시킬 수 있다고 관점에 근거하고 있다.

<양질 조사료 급여에 따른 가축 장내발효에 의한 메탄 배출량 전망치>

- 한우 송아지 : $(\text{양질조사료 급여비율}^1) \times \text{한우 송아지 메탄배출계수} \times \text{연도별 한우 송아지 사육 두수 예측치} + (1 - \text{양질조사료 급여비율}^1) \times \text{한우 송아지 메탄배출계수} \times \text{연도별 한우 송아지 사육 두수 예측치} \times (1 - 0.08^3)$
- 한우 비육우 : $(\text{양질조사료 급여비율}^1) \times \text{한우 비육우 메탄배출계수} \times \text{연도별 한우 비육우 사육 두수 예측치} + (1 - \text{양질조사료 급여비율}^1) \times \text{한우 비육우 메탄배출계수} \times \text{연도별 한우 비육우 사육 두수 예측치} \times (1 - 0.08^3)$
- 젖소 송아지 : $(\text{양질조사료 급여비율}^2) \times \text{젖소 송아지 메탄배출계수} \times \text{연도별 젖소 송아지 사육 두수 예측치} + (1 - \text{양질조사료 급여비율}^2) \times \text{젖소 송아지 메탄배출계수} \times \text{연도별 젖소 송아지 사육 두수 예측치} \times (1 - 0.08^3)$
- 젖소 착유우 : $(\text{양질조사료 급여비율}^2) \times \text{젖소 착유우 메탄배출계수} \times \text{연도별 젖소 착유우 사육 두수 예측치} + (1 - \text{양질조사료 급여비율}^2) \times \text{젖소 착유우 메탄배출계수} \times \text{연도별 젖소 착유우 사육 두수 예측치} \times (1 - 0.08^3)$

¹ 양질조사료 급여비율 ; 한우 30%에서 매년 2%씩 증가

² 양질조사료 급여비율 ; 젖소 80%에서 매년 1%씩 증가

³ 생산성 증가 비율(%)

제3절. 다접보온커튼

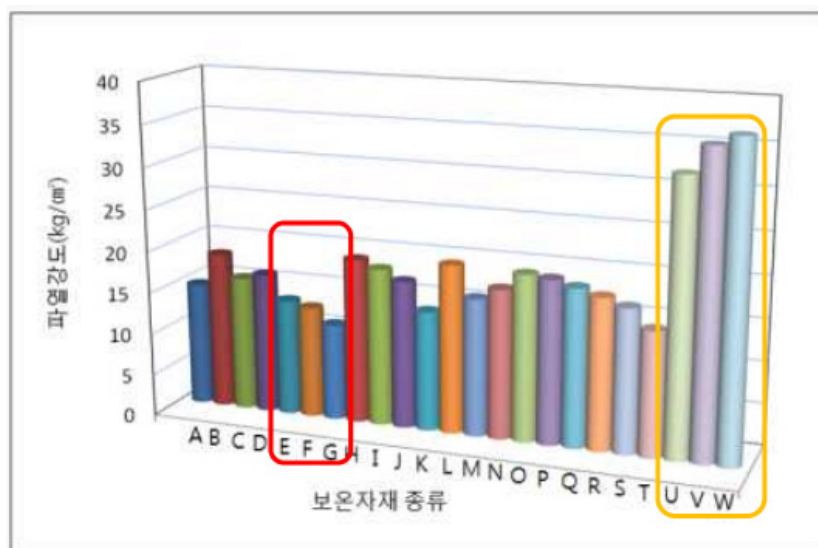
1. 고효율 보온자재 사양

다접보온커튼에 사용되는 보온자재의 내구성에 따라 보온을 유지 기간이 달라질 것이라고 가정할 수 있다. 그러나 다접보온커튼 제조업체가 다양한 만큼 모든 업체에서 사용되고 있는 다접보온커튼의 자재 구성도 매우 다양하였다. 따라서 본 실험을 위한 실험그룹 구성의 시사점을 얻고자 보온자재구성에 따른 강도를 조사한 실험결과(시설원예 에너지절감을 위한 보온자재 선발 및 농가현장 적용 연구, 국립농업과학원 2003)를 정리한 결과, 고효율 보온자재의 보온율에 영향을 미치는 보온자재의 구성(사양)은 각 제조사 매우 다르지만 일반적으로 폴리프로필렌, 화학솜, 부직포 등을 사용되고 있었다.

연번	다겹보온자재 구성 (23종)	접수
(A)	부직포 80g+니드편칭+부직포 80g+폴리폼 2장	4
(B)	폴리프로필렌+부직포 40g+니드편칭+코팅폴리폼 1장+부직포 80g	5
(C)	폴리프로필렌+부직포 40g+니드편칭+폴리폼 1장+부직포 80g	5
(D)	부직포 80g+니드편칭+부직포 80g+코팅폴리폼 2 장	4
(E)	부직포 100g+화학솜 4 온스+부직포 100g	3
(F)	부직포 80g+화학솜 4 온스+부직포 100g	3
(G)	부직포 80g+화학솜 4 온스+부직포 80g	3
(H)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 8 온스+코팅폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(I)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 8 온스+폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(J)	부직포 80g+화학솜 10 온스+폴리폼 2 장+흑색부직포 80g	4
(K)	부직포 80g+화학솜 8 온스+폴리폼 2 장+흑색부직포 80g	4
(L)	폴리프로필렌+부직포 40g+차광망+폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(M)	부직포 80g+차광망+폴리폼 2 장+부직포 80g	4
(N)	부직포 80g+차광망+코팅폴리폼 2 장+부직포 80g	4
(O)	폴리프로필렌+부직포 40g+차광망+폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(P)	폴리프로필렌+부직포 40g+차광망+코팅폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(Q)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 6 온스+코팅폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(R)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 6 온스+폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(S)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 4 온스+코팅폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(T)	폴리프로필렌+부직포 40g+화학솜 4 온스+폴리폼 1 장+부직포 80g	5
(U)	부직포 80g+기모원단+폴리폼 2 장+부직포 80g	5
(V)	부직포 80g+기모원단+코팅폴리폼 2 장+부직포 80g	5
(W)	부직포 80g+기모원단+코팅폴리폼 2 장+흑색다후다	5

* 출처: (발표자료) 이시영. 농촌진흥청. 시설원예에너지절감기술

상기의 다겹보온자재 구성에 따른 강도 실험 결과를 살펴본 결과, 5겹 이상의 다겹보온자재를 조합한 경우 강도는 유사한 수준인 것으로 나타났으며 이중 가장 강도가 낮은 것은 폴리프로필렌, 부직포, 화학솜, 폴리폼, 부직포 조합이며, 기모원단을 혼용한 경우 가장 강도가 높은 것으로 나타났다.



* 출처: (발표자료) 이시영. 농촌진흥청. 시설원예에너지절감기술

상기 모든 보온자재 조합에 대하여 실험을 수행하는 것이 이상적이나 시간과 비용이 제한되어 있음을 고려하여 기모원단이 혼용된 경우 외에는 5겹이상의 다겹보온자재의 조합은 유사한 내구성을 보인다고 가정하여 별도의 보온자재 구성에 대한 구분을 두지 않아도 될 것으로 보인다.

2. 다겹보온커튼의 보온을 변화

가. 권취식 다겹보온커튼 제조회사 방문(탐이엔지, 경북 경산 소재)

1) 시제품의 열 전도율 분석자료 확보 : 평균 81.9%

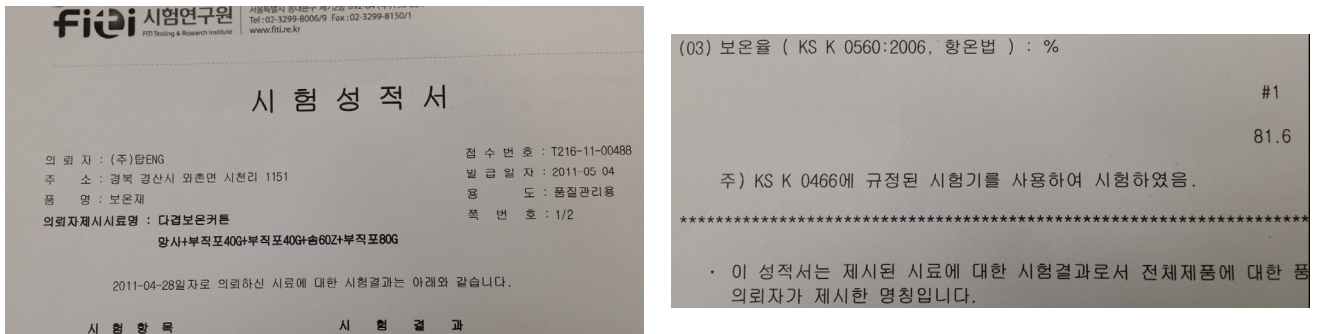


그림 13. 한국의류시험연구소 시험성적서

2) 다겹보온커튼 시료 채취 농가 리스트 (총 10개) :

본 연구를 수행함에 있어 가장 어려운 점은, 사용 중인 온실의 다겹보온커튼을 펼친 상태에서 약 1m × 1m 시료를 채취하는 것에 동의하는 농장주가 없다는 것이다. 향후 이와 유사한 연구가 수행되는 경우, 시료 채취 방법에서 사용 중인 것에서 시료를 얻는 방법은 선택해서는 안될 것이다.

따라서 공급업체의 도움을 받아, 에프터서비스를 해주는 조건에서 매우 제한적으로 시료를 얻을 수 있었다. 이러한 방식으로 협조를 하겠다는 농가만을 대상(전북 2농가, 경북 3농가, 충남 2농가, 경남 1농가, 강원 2농가)으로 방문해 본 결과, 재배작물이 파프리카 4농가, 화훼 1농가, 방울토마토 2농가, 토마토 2농가, 고추 1농가이었다.

표 19. 다겹보온커튼 설치 년도에 따른 농가 리스트 및 커튼 구성 소재

설치 년식	시료 번호	내 용
5년	1	○ 면적 및 재배작물 : 2000평, 파프리카 ○ 사업년도 : 2010년 ○ 구성소재 : 미니마트+부직포80g+단열재1T(코팅)+솜6온스+부직포40g +망사

	2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 2200평, 파프리카 ○ 사업년도 : 2010년 ○ 구성소재 : 미니마트+부직포80g+단열재1T(코팅)+솜6온스+부직포40g +망사
8년	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 2000평, 화훼 ○ 사업년도 : 2007년 ○ 구성소재 : 부직포 80g+단열재1T 1장(일반)+솜6온스+부직포40g +망사
	2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 2000평, 파프리카 ○ 사업년도 : 2007년 ○ 구성소재 : 조사중
9년	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 800평, 방울토마토 ○ 사업년도 : 2006년 ○ 구성소재 : 부직포80g+단열재2T 3장(코팅)+부직포40g 2장 +망사
11년	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농가명 : 한상대(강원도 평창군 대관령면 병내리 478번지) ○ 면적 및 재배작물 : 1400평, 파프리카 ○ 사업년도 : 2004년 ○ 구성소재 : 조사중
12년	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 1000평, 방울토마토 ○ 사업년도 : 2003년 ○ 구성소재 : 부직포80g+단열재1T(코팅)+솜6온스+부직포40g +마대
	2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 1200평, 토마토 ○ 사업년도 : 2003년 ○ 구성소재 : 부직포 80g+단열재1T 1장(일반)+솜6온스+부직포40g +망사
	3	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 1200평, 토마토 ○ 사업년도 : 2003년 ○ 구성소재 : 부직포80g+솜6온스+단열재 2장(코팅, 일반)+부직포40g+망사
15년	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 면적 및 재배작물 : 1300평, 고추 ○ 사업년도 : 2000년 ○ 구성소재 : 부직포80g+단열재1T 1장(일반)+솜4온스+부직포80g



그림 14. 다겹보온커튼 시료 채취 모습과 시료의 크기

설치 년수는 5년 2농가, 8년 2농가, 9년 1농가, 11년 1농가 12년 3농가, 15년 1농가이었다 (표 20). 출시제품 평균 보온율이 81.9%와 비교하여 보온율의 감소가 크지 않은 것으로 나타났다. 설치 년수에 따라서는 1개의 시료 값만 있기 때문에, 본 결과를 5년 단위로 구분하여 설치 년수 간의 보온율 차에 대한 통계적 분석을 한 결과, 유의적 차이가 없었다($P = 0.999$). 즉, 권취식의 개폐방식은 설치 년수가 15년이 경과해도 보온율이 변화가 없는 것으로 분석되었다.

다른 한편, 출시제품의 평균 81.9%를 이용하고, 12년차의 시료 중 보온율이 85.5로 분석된 값을 제외(출시제품보다 보온율이 높게 나왔기 때문)하고 회귀분석을 한 결과(그림 14), 보온율이 약 0.3%씩 감소하고 있지만 R2값은 낮게 나타났다.

표 20. 다겹보온 커튼 설치 년도에 따른 보온율 차이(한국의류시험연구소 분석)

경과년수	시료			평균
	1	2	3	
5년	77.1	81.9		79.5
8년	81.1	81.8		81.5
9년	75.9			75.9
11년	78.8			78.8
12년	79.3	85.5	79.7	81.5
15년	74.8			74.8

표 21. 설치년수 5년 간격의 통계 분석

Year	Average	ANOVA Procedure	
		F Value	P Value
0~5 (n=2)	79.5	0.00	0.9992
6~10 (n=3)	79.6		
11~15 (n=5)	79.6		

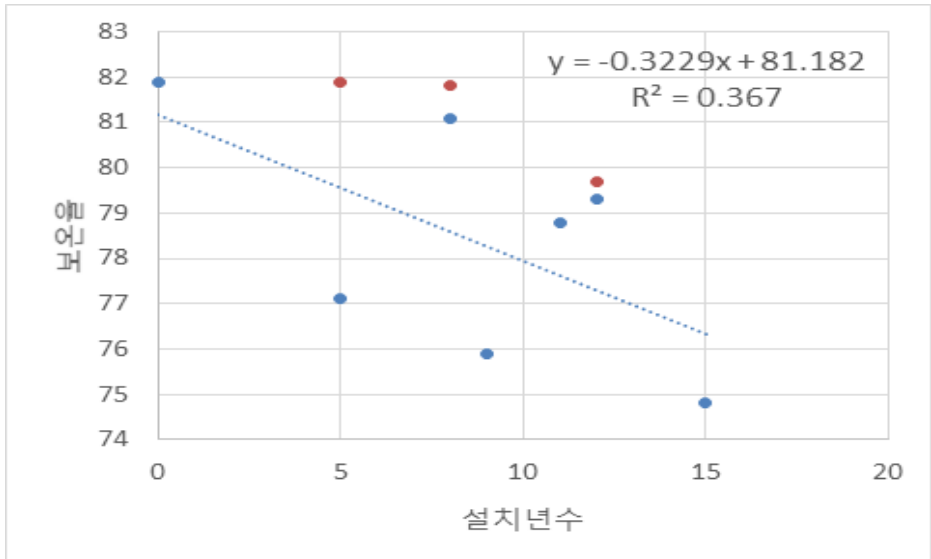


그림 15. 설치 년수와 보온율과의 관계.

제4절. 농업부문 감축사업 활용을 위한 배출계수 개발 및 감축량 산정

1. 논 토양 주요 결과

가. 벼 재배 기간 중 온도 및 Eh 변화

조사기간 동안 평균적인 토양온도는 약 23.2°C (2015년), 22.5°C (2016년)으로 2015년에 비해 2016년에 온도가 조금 더 낮았으며, 처리구 간의 유의적인 토양 온도 차이는 확인할 수 없었다(그림 1). 토양의 호기 및 혐기조건을 나타내는 산화환원전위의 경우 벼 재배를 위한 담수 이후 급격히 감소하여 -200mV 부근의 값을 유지하였으며, 역시 처리구간의 유의적인 차이는 확인할 수 없었다.

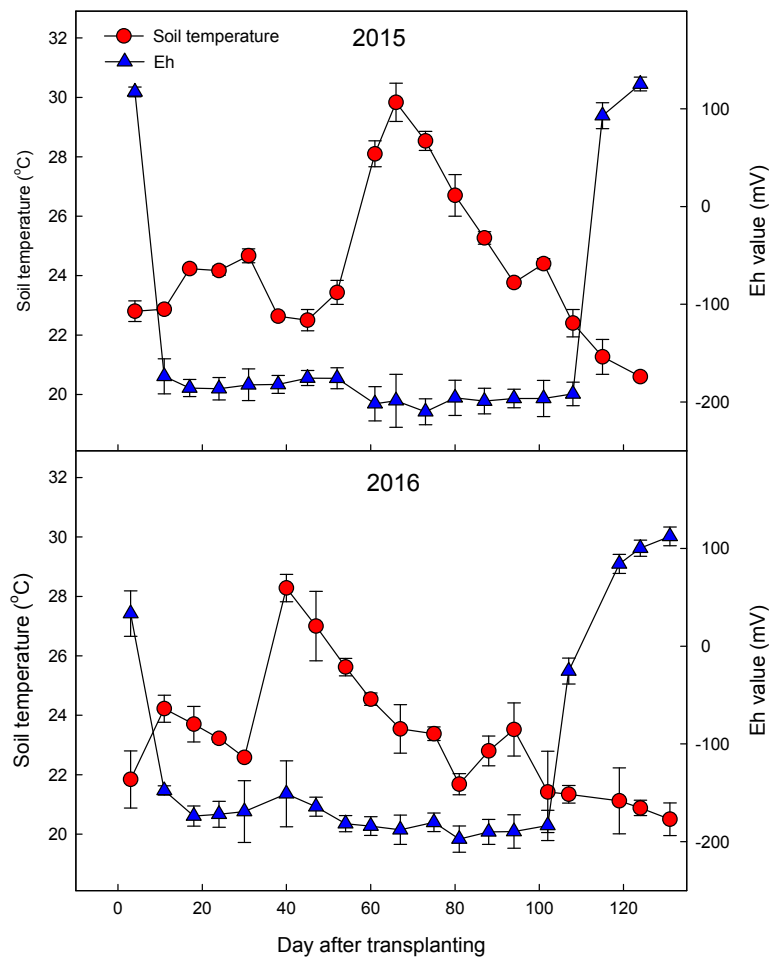


그림 1. 벼 재배과정 중 온도 및 Eh 값의 변화

나. 벼 수량 변화

벼 생육조사 및 수량 특성 조사 결과, 속효성 질소 시비 시 벼 수량은 6.7, 7.8 Mg ha⁻¹였으며, 동일 양의 완효성 질소 시비 시 수량이 약 3.0, 4.6% 증가하였다(그림 2). 이는 완효성 질

소 시비 시 질소가 서서히 배출됨에 따라 벼가 질소를 이용할 기회가 증가하여 수량이 증가한 것으로 보인다. 속효성 질소 비료 90 kg N ha⁻¹ 처리했을 때와 동일 양의 벼 수량을 얻기 위해서 필요한 완효성 질소 비료의 시비량은 평균 74 kg N ha⁻¹ 이었다. 결과적으로 완효성 질소 비료 처리를 통해 질소 처리량을 약 18% 저감할 수 있었다.

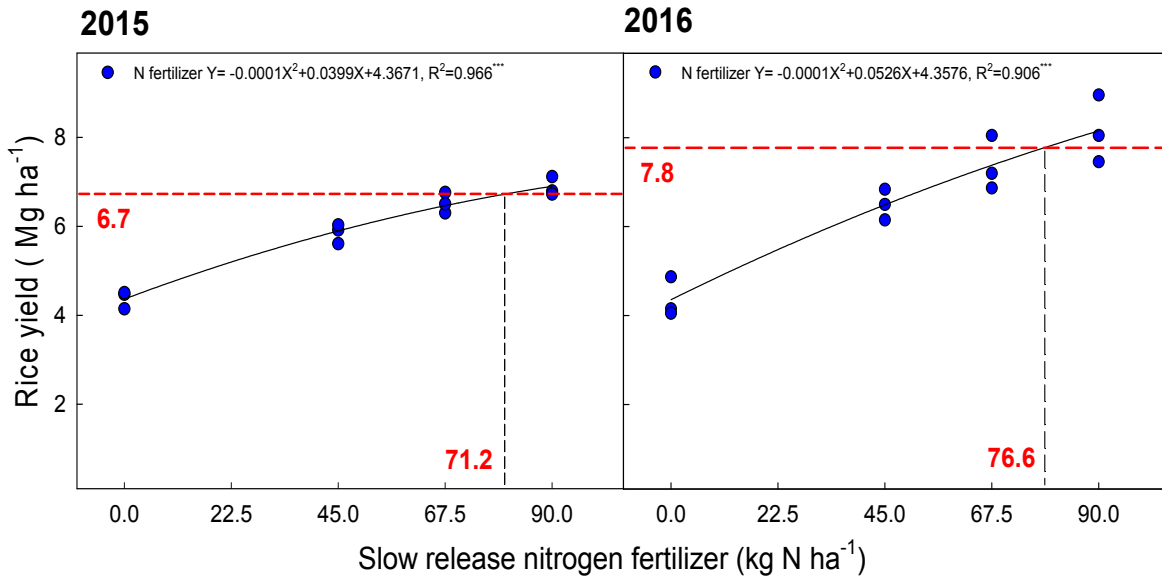


그림 2. 벼 재배기간 중 완효성 요소 시비량에 따른 벼 수량 변화

다. 벼 재배 기간 중 N₂O 배출 특성

벼 재배 기간 중 완효성 비료의 시비가 N₂O 발생 저감 효능을 평가하기 위해, 완효성 비료 시비량에 따른 N₂O 발생량을 조사하여 그림 2와 같은 결과를 얻었다. 벼 재배 과정 중 발생한 N₂O의 배출량은 밭 작물 재배 과정에 비해 상당히 낮은 결과를 보여주었는데, 이는 발생된 N₂O의 대부분이 혐기적 조건 하에서 즉시 탈산소 과정을 통해 N₂로 제거되며, 그 결과 담수 논토양에서 N₂O의 배출량은 매우 적은 것으로 알려져 있다(Minami and Fukushi, 1984). 속효성 비료의 경우 시비 직후 N₂O의 발생량이 증가하는 경향을 보였으나, 완효성 비료의 경우 시비가 아닌 벼의 생장에 따라 N₂O의 발생량이 점차 증가하는 경향을 보였으며, 유수분화기에 가장 높은 배출량을 보였다. 완효성 비료의 처리구 간의 발생량은 차이가 있으나 서로 비슷한 N₂O 발생 패턴을 보여주었으나 속효성 비료 처리구의 경우 완효성비료 처리구와 다른 발생 패턴을 보였다. 속효성 비료의 경우 시비 즉시 바로 질소 성분이 환경에 노출되어 N₂O의 배출에 영향을 주지만, 완효성 비료의 경우 시비 후 질소 성분이 서서히 배출되기 때문에 시비 시기 보다는 토양 온도나 벼의 생장에 따라 N₂O 발생 패턴이 변화하는 것으로 보인다.

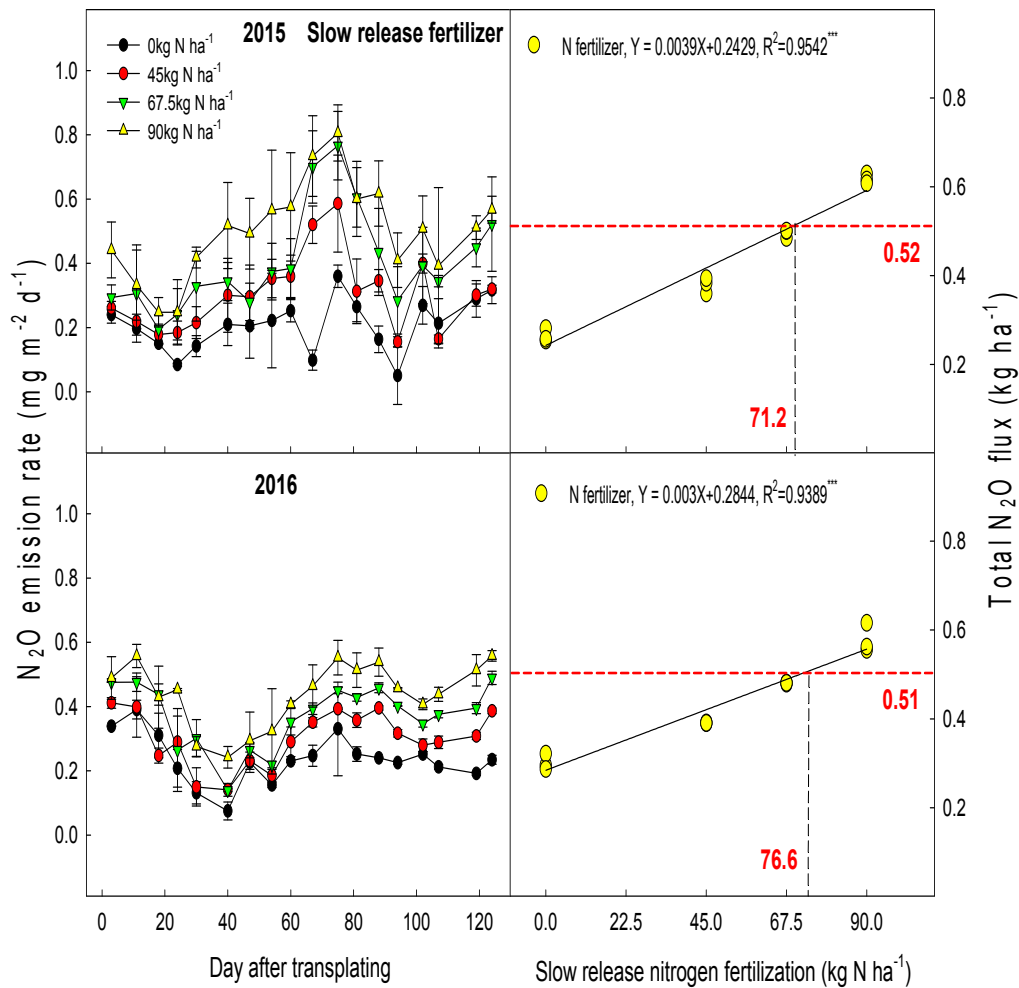


그림 3. 벼 재배기간 중 완효성 요소 시비에 의한 N₂O 배출 변화 및 총 배출량

벼 재배 기간 중 총 N₂O 배출량은 Control 처리구(Urea)에서 약 0.78(2015년), 0.68(2016년) kg ha⁻¹였다. 2015년이 2016년에 비해 통계적으로 유의차는 없지만 더 많은 배출량을 보였는데, 이는 2015년의 평균 토양온도가 2016년에 비해 조금 높았기 때문으로 보인다. 완효성 비료 처리량이 증가함에 따라 N₂O의 배출량도 증가하는 경향을 보였다(그림 3). 속효성 비료 처리구(urea 90 N kg ha⁻¹)에 비해 완효성 비료 처리구(slow release urea 90 N kg ha⁻¹)에서 N₂O 배출을 약 13~23% 정도 저감시키는 경향을 보였다. 비록 연간 N₂O 배출량의 저감율은 다르지만 확연한 저감 효과가 나타났는데, 속효성 비료의 경우 한 번에 질소가 공급되면서 벼가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 적어져 상당량이 대기 중으로 배출되는 반면 완효성 비료의 경우 질소가 서서히 배출됨에 따라 벼가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 많아 대기 중으로 배출되는 N₂O의 양이 적은 것으로 보인다. 속효성 질소 시비 시와 동일 벼 수량을 얻을 때 완효성 질소 시비량은 평균 74 kg N ha⁻¹ 이었으며, 이 때 N₂O의 배출량은 0.52, 0.51 kg ha⁻¹ 으로 약 30%의 N₂O 배출 저감 효과를 보였다.

라. 벼 재배 기간 중 CH₄ 배출 특성

벼 재배 기간 중 완효성 비료의 시비가 CH₄ 발생에 미치는 영향을 평가하기 위해, 완효성 비료 시비량에 따른 CH₄ 발생량을 조사하여 그림 4와 같은 결과를 얻었다. 벼 재배 과정 중 발생한 CH₄의 배출량은 밭 작물 재배 과정에 비해 상당히 높은 결과를 보여주었는데, 이는 CH₄의 대부분이 혐기적 조건 하에서 메탄생성균에 의해서 생성되기 때문에 상대적으로 산소가 부족하여 혐기적인 논에서 밭보다 더 많은 CH₄이 발생된다(Takai, 1961; Garcia, 2000). 속효성 비료의 경우 시비 직후 CH₄의 발생량이 증가하는 경향을 보였으나, 완효성 비료의 경우 N₂O의 경우와 마찬가지로 시비가 아닌 벼의 성장에 따라 CH₄의 발생량이 점차 증가하는 경향을 보였으며, 유수분화기에 가장 높은 배출량을 보였다. 완효성 비료의 처리구 간의 발생량은 차이가 있으나 서로 비슷한 CH₄ 발생 패턴을 보여주었으며, 속효성 비료 처리구의 경우 완효성비료 처리구와 다른 발생 패턴을 보였다. 속효성 비료의 경우 시비 즉시 바로 질소 성분이 환경에 노출되어 메탄생성균의 활성을 증대시켜 CH₄의 배출에 영향을 주지만, 완효성 비료의 경우 시비 후 질소 성분이 서서히 배출되기 때문에 시비 시기 보다는 토양 온도나 벼의 성장에 따라 CH₄ 발생 패턴이 변화하는 것으로 보인다.

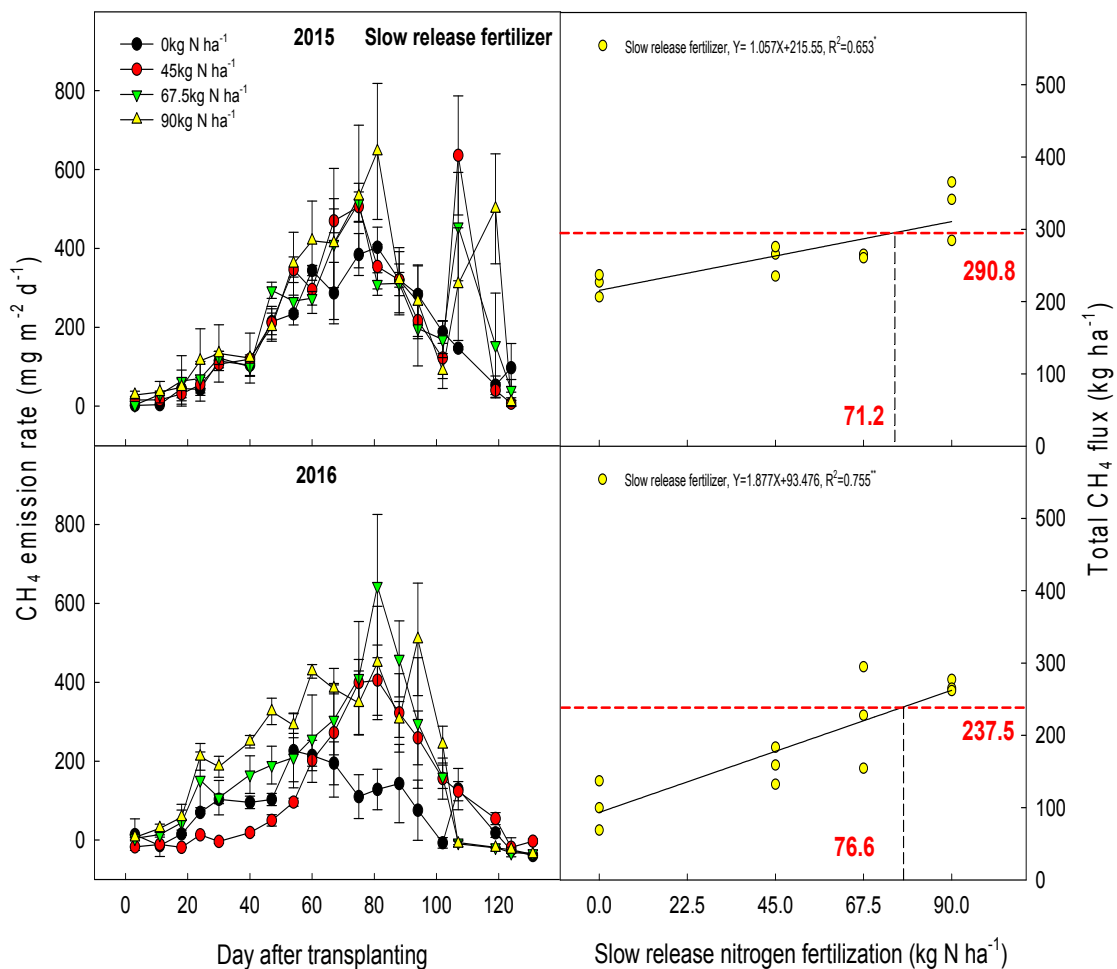


그림 4. 벼 재배기간 중 완효성 요소 시비에 의한 CH₄ 배출 변화 및 총 배출량

벼 재배 기간 중 총 CH₄ 배출량은 Control 처리구(Urea)에서 약 315.0(2015년), 387.4(2016년) kg ha⁻¹ 으로 연도간의 큰 차이는 없었다(그림 5). 완효성 비료 처리량이 증가함에 따라 CH₄의 배출량도 증가하는 경향을 보였다. 속효성 비료 처리구(urea 90 N kg ha⁻¹)에 비해 완효성 비료 처리구(slow release urea 90 N kg ha⁻¹)에서 CH₄ 배출을 약 13% 정도 저감시키는 경향을 보였다. 2년 모두 CH₄ 배출량의 확연한 저감 효과가 나타났는데, 속효성 비료의 경우 한번에 질소가 공급되면서 벼가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 적고 상당량이 환경에 노출되면서 메탄생성균이 이를 이용하여 활성이 증가함에 따라 CH₄ 배출량이 증가되는 반면, 완효성 비료의 경우 질소가 서서히 배출됨에 따라 벼가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 많아 토양 내 메탄생성균이 이용할 수 있는 질소의 양이 적고 그에 따라 메탄생성균의 활성이 낮아 CH₄의 발생량이 적은 것으로 보인다. 속효성 질소 시비 시와 동일 벼 수량을 얻을 때 완효성 질소 시비량은 평균 74 kg N ha⁻¹ 이었으며, 이 때 CH₄의 배출량은 290.8, 237.5 kg ha⁻¹ 으로 약 25%의 CH₄ 배출 저감 효과를 보였다.

마. 벼 재배 기간 중 발생하는 온실가스의 배출계수

벼 재배 기간 중 발생한 온실가스의 배출계수는 CH₄의 경우 1.1376이었으며, N₂O의 경우 0.0018이었다(표 1).

표 1. 벼 재배 기간 중 발생한 온실가스 배출량 및 배출계수

		Total flux (kg ha ⁻¹)		Emission factor
		Slow N 0%	Slow N 100%	
CH ₄	2015	223.47	330.36	0.8907
	2016	101.91	268.05	1.3845
	Average	162.69	299.21	1.1376
N ₂ O	2015	0.26	0.62	0.0025
	2016	0.32	0.48	0.0012
	Average	0.29	0.55	0.0018

바. 벼 재배 시스템에서의 전과정 평가

벼 재배 시스템의 전과정에서 발생하는 온실가스의 지구온난화 영향을 평가하기 위해 Gabi[®] 4.4 software (PE International, Stuttgart, Germany) 를 사용하여 전과정 평가를 실시하였다. 트럭 및 디젤 공급 등의 온실가스 배출량 데이터는 European Emission Standards 3 and 4 에서 가져온 Gabi[®] database를 통해 얻을 수 있었다(European Parliament Council, 2000). 비료 생산 과정에서 발생하는 온실가스의 배출량 또한 Gabi[®] database를 통해 구할 수 있었으며, 이는 West 와 Marland(2002)가 제시한 결과로 확인할 수 있다. 전과정에서의 지구온난화지수는 control(9314 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 100%(7861 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 75%(6585 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 50%(5570 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 0%(4208 kg CO₂-eq ha⁻¹) 순으로 높았다(표 2). 네 개의 하위 과정 중 농경지 발생이 약 94.6~98.7%로 가장 높은 지구온난화지수를 보여주었고, 비료 생산(1.2~5.4%), 운송(0.03%), 디젤유 공급(0.004%) 순으로 높은 지구온난화지수를 보

여주어, 농경지가 온실가스 발생원임을 알 수 있었다. 세 개의 주요 온실가스 중 CH₄이 92.5~96.7%로 가장 큰 비중을 차지하였고, 전체 CH₄ 발생 중 농경지 발생이 99%이상을 차지하여, CH₄이 벼재배 시스템에서의 주요 발생 온실가스인 동시에 저감 대상임을 알 수 있었다.

표 2. 벼 재배 시스템에서 발생한 온실가스의 전과정 평가

Treatments	Parameter	Transportation	Land application	Fertilizer production	Diesel supply	Total
Control (Urea)	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.517	-	335.4	0.314	338.2
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	8779.4	0.0	0.040	8779.5
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.013	196.7	0.0	0.002	196.7
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.530	8976.2	335.4	0.356	9314.4
Slow N 0%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.429	-	52.4	0.178	54.0
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	4067.3	0.0	0.023	4067.3
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.007	86.9	0.0	0.001	87.0
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.437	4154.3	52.4	0.203	4208.3
Slow N 50%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.928	-	237.2	0.241	239.4
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	5216.4	0.0	0.031	5216.4
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.010	114.0	0.0	0.002	114.0
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.938	5330.3	237.2	0.273	5569.7
Slow N 75%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.223	-	329.6	0.278	332.1
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	6114.4	0.0	0.035	6114.5
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.012	138.7	0.0	0.002	138.8
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.235	6253.2	329.6	0.315	6585.3
Slow N 100%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.518	-	434.4	0.314	437.0
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	7271.8	0.0	0.040	7271.9
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.013	164.0	0.0	0.002	164.1
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.531	7435.9	434.4	0.357	7873.0

표 3. 벼 재배 시스템에서 완효성 요소 시비 시 동일 수량에서의 온실가스 배출량

	속효성 요소	완효성 요소
벼 재배 과정		
N 시비량 (kg N ha ⁻¹)	90	74
N ₂ O 발생량 (kg ha ⁻¹)	0.73	0.51
CH ₄ 발생량 (kg ha ⁻¹)	351	264
Total GWP (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	8993	6777
비료 제조 과정		
비료생산 (kg N)	90	74
온실가스 배출량 (kg CO ₂ -eq)	335	366
전체 과정		
총 온실가스 배출량 (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	9328	7143

벼 재배 시스템에서 속효성 요소 시비와 동일 수량을 얻기 위한 완효성 요소 시비량은 74 kg N ha⁻¹ 였으며, 이 때 벼 재배 과정 중 N₂O 및 CH₄ 발생량은 0.51, 264 kg ha⁻¹ 였고 비료

제조 과정 중 온실가스 배출량은 $366 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ 로 총 온실가스 배출량은 $7143 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ 이었다. 이는 속효성 요소 시비 시 전체 과정에서 배출된 온실가스 $9328 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ 보다 약 23% 낮은 양으로, 벼 재배 시스템에서 완효성 요소의 시비는 속효성 비료의 시비보다 온실가스 발생 저감에 효과적이라고 할 수 있다.

2. 밭 토양 주요 결과

가. 고추 재배 기간 중 온도 및 수분함량 변화

조사기간 동안 평균적인 토양온도는 약 24.9°C (2015년), 24.5°C (2016년)으로 비슷하였으며, 처리구 간의 유의적인 토양 온도 차이는 확인할 수 없었다(그림 5). 토양의 수분 함량은 25~40% 범위에 있었으며, 역시 처리구간의 유의적인 차이는 확인할 수 없었다.

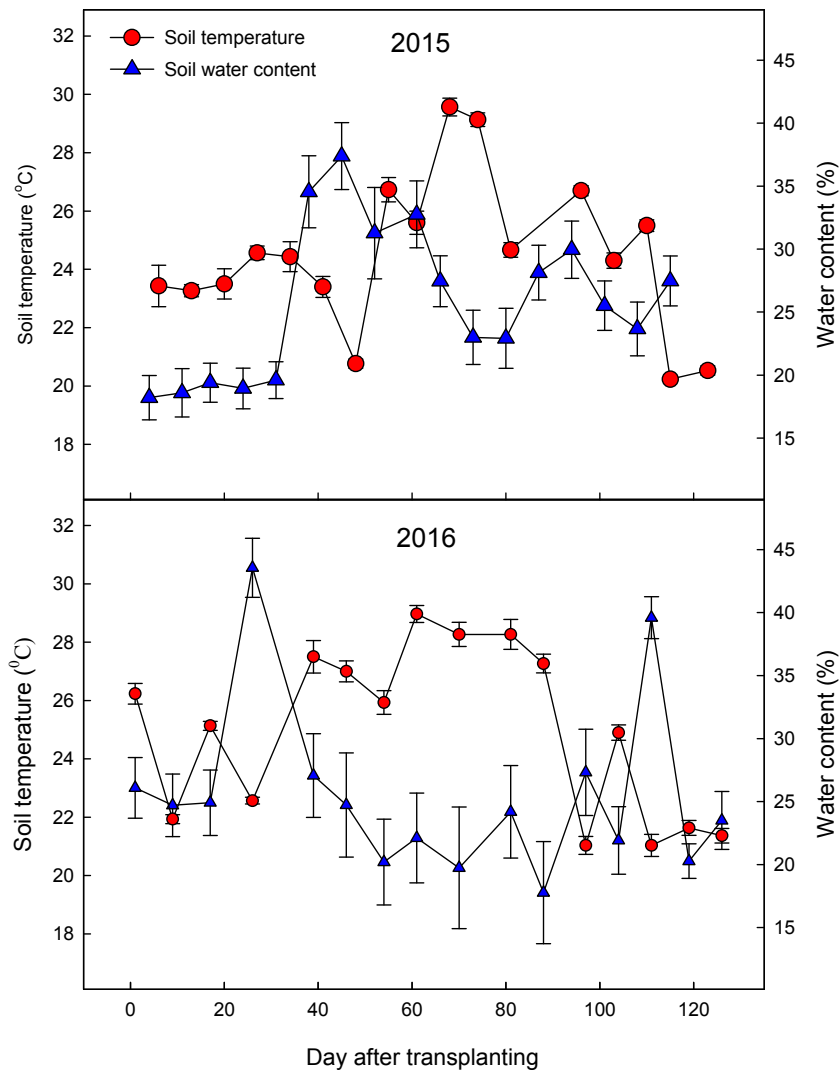


그림 5. 고추 재배기간 중 토양 온도 및 수분 함량 변화

나. 고추 수량 변화

고추 생육조사 및 수량 특성 조사 결과, 속효성 질소 시비 시 고추의 수량은 1.47, 1.27 Mg ha⁻¹였으며, 동일 양의 완효성 질소 시비 시 수량이 약 4% 증가하였다(그림 6). 이는 완효성 질소 시비 시 질소가 서서히 배출됨에 따라 고추가 질소를 이용할 기회가 증가하여 수량이 증가한 것으로 보인다. 속효성 질소 비료 190 kg N ha⁻¹ 처리했을 때와 동일 양의 고추 수량을 얻기 위해서 필요한 완효성 질소 비료의 시비량은 평균 154 kg N ha⁻¹ 이었다. 결과적으로 완효성 질소 비료 처리를 통해 질소 처리량을 약 11% 저감할 수 있었다.

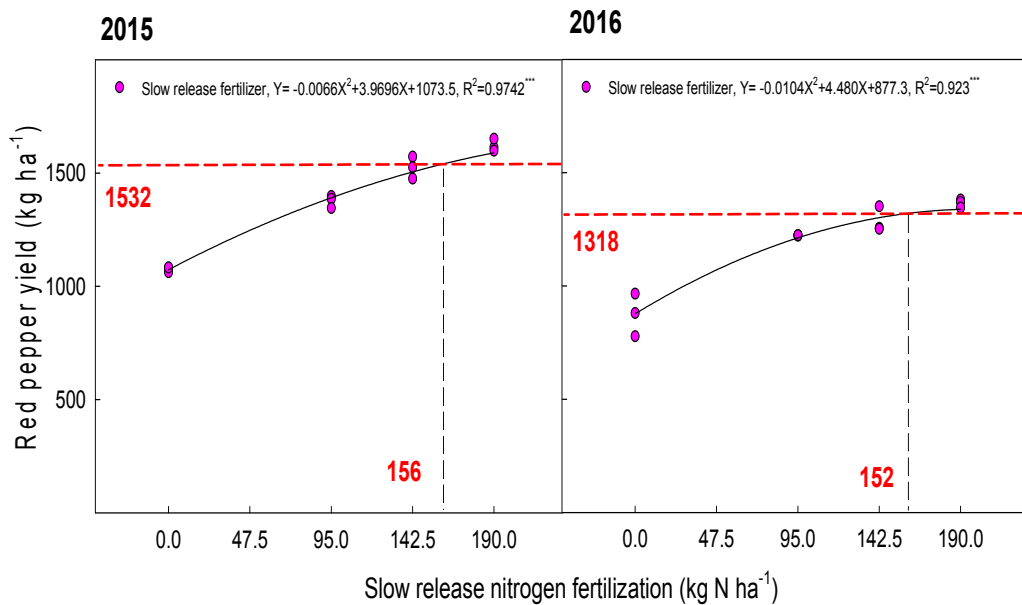


그림 6. 완효성 시비량에 따른 고추 수량 변화

다. 고추 재배 기간 중 N₂O 배출 특성

고추 재배 기간 중 완효성 비료의 시비가 N₂O 발생 저감 효능을 평가하기 위해, 완효성 비료 시비량에 따른 N₂O 발생량을 조사하여 그림 7와 같은 결과를 얻었다. 속효성 비료의 경우 시비 직후 N₂O의 발생량이 증가하는 경향을 보였으나, 완효성 비료의 경우 시비가 아닌 일정한 N₂O의 발생 패턴을 보이지 않았다. 완효성 비료의 처리구 간의 발생량은 차이가 있으나 서로 비슷한 N₂O 발생 패턴을 보여주었으나 속효성 비료 처리구의 경우 완효성비료 처리구와 다른 발생 패턴을 보였다. 속효성 비료의 경우 시비 즉시 바로 질소 성분이 환경에 노출되어 N₂O의 배출에 영향을 주지만, 완효성 비료의 경우 시비 후 질소 성분이 서서히 배출되기 때문에 시비 시기 보다는 토양 온도나 고추의 생장에 따라 N₂O 발생 패턴이 변화하는 것으로 보인다.

고추 재배 기간 중 총 N₂O 배출량은 Control 처리구(Urea)에서 약 7.19(2015년), 6.35(2016년) kg ha⁻¹였으며, 벼 재배 기간에 비해 상당히 높은 배출량을 보였다(그림 7). 2015년과 2016년간의 유의적인 N₂O 배출량 차이는 없었으며, 완효성 비료 처리량이 증가함에 따라 N₂O의 배출량도 증가하는 경향을 보였다. 속효성 비료 처리구(urea 190 N kg ha⁻¹)에 비해 완효성 비료 처리구(slow release urea 190 N kg ha⁻¹)에서 N₂O 배출을 약 30% 정도 저감시키는 경향을 보

였다. 연간 N₂O 배출량에서 확인한 저감 효과가 나타났는데, 속효성 비료의 경우 한 번에 질소가 공급되면서 고추가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 적어져 상당량이 대기 중으로 배출되는 반면 완효성 비료의 경우 질소가 서서히 배출됨에 따라 고추가 질소를 흡수할 기회가 상대적으로 많아 대기 중으로 배출되는 N₂O의 양이 적은 것으로 보인다. 또한 속효성 질소 시비 시와 동일 고추 수량을 얻을 때 완효성 질소 시비량은 평균 154 kg N ha⁻¹ 이었으며, 이 때 N₂O의 배출량은 약 4.0 kg ha⁻¹ 으로 약 40%의 N₂O 배출 저감 효과를 보였다.

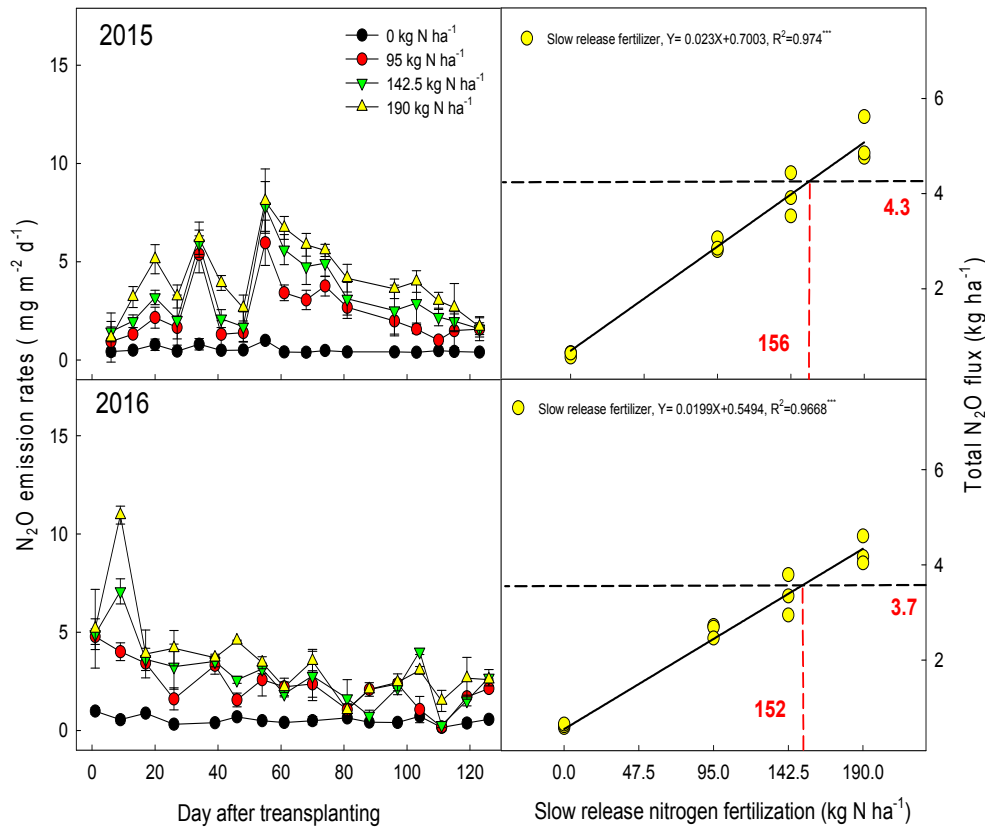


그림 7. 고추 재배 기간 중 완효성 비료 시비에 따른 N₂O 배출량 변화 및 총 배출량

라. 고추 재배 기간 중 발생한 온실가스의 배출계수

고추 재배 기간 중 발생한 온실가스의 배출계수는 CH₄의 경우 0.026, N₂O의 경우 0.0134 이었다.

표 4. 고추 재배 기간 중 발생한 온실가스 배출량 및 배출계수

		Total flux (kg ha ⁻¹)		Emission factor
		Slow N 0%	Slow N 100%	
N ₂ O	2015	0.63	5.08	0.0148
	2016	0.62	4.28	0.0121
	Average	0.62	4.68	0.0134

마. 고추 재배 시스템에서의 전과정 평가

고추 재배 시스템의 전과정에서 발생하는 온실가스의 지구온난화 영향을 평가하기 위해 Gabi[®] 4.4 software (PE International, Stuttgart, Germany) 를 사용하여 전과정 평가를 실시하였다. 트럭 및 디젤 공급 등의 온실가스 배출량 데이터는 European Emission Standards 3 and 4 에서 가져온 Gabi[®] database를 통해 얻을 수 있었다(European Parliament Council, 2000). 비료 생산 과정에서 발생하는 온실가스의 배출량 또한 Gabi[®] database를 통해 구할 수 있었으며, 이는 West 와 Marland(2002)가 제시한 결과로 확인할 수 있다. 전과정에서의 지구온난화지수는 control(2765 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 100%(2310 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 75%(1807 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 50%(1329 kg CO₂-eq ha⁻¹), Slow N 0%(265 kg CO₂-eq ha⁻¹) 순으로 높았다(표 5). 네 개의 하위 과정 중 농경지 발생이 약 64~79%로 가장 높은 지구온난화지수를 보여주었고, 비료 생산(19~35%), 운송(0.5%), 디젤유 공급(0.03%) 순으로 높은 지구온난화지수를 보여주어, 농경지가 온실가스 발생원임을 알 수 있었다. 세 개의 주요 온실가스 중 N₂O가 60.3~73.1%로 가장 큰 비중을 차지하였고, 전체 N₂O 발생 중 농경지 발생이 99%이상을 차지하여, N₂O가 고추 재배 시스템에서의 주요 발생 온실가스인 동시에 저감 대상임을 알 수 있었다.

표 5. 고추 재배 시스템에서 발생한 온실가스의 전과정 평가

Treatments	Parameter	Transportation	Land application	Fertilizer production	Diesel supply	Total
Control (Urea)	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.869	-	637.2	0.483	641.6
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.001	103.3	0.0	0.062	103.4
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.020	2019.7	0.0	0.004	2019.7
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.889	2123.1	637.2	0.548	2764.7
Slow N 0%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.429	-	52.4	0.178	54.0
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	25.5	0.0	0.023	25.5
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.007	185.7	0.0	0.001	185.7
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	1.437	211.2	52.4	0.203	265.2
Slow N 50%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.517	-	434.3	0.331	437.2
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.000	67.0	0.0	0.042	67.0
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.014	824.9	0.0	0.003	824.9
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2.531	891.8	434.3	0.376	1329.1
Slow N 75%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.259	-	625.3	0.407	629.0
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.001	86.1	0.0	0.052	86.1
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.017	1091.4	0.0	0.003	1091.4
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.276	1177.4	625.3	0.462	1806.5
Slow N 100%	CO ₂ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.869	-	816.3	0.483	820.6
	CH ₄ (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.001	95.7	0.0	0.062	95.7
	N ₂ O (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	0.020	1393.8	0.0	0.004	1393.8
	Sum (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	3.889	1489.4	816.3	0.548	2310.1

고추 재배 시스템에서 속효성 요소 시비와 동일 수량을 얻기 위한 완효성 요소 시비량은 154 kg N ha⁻¹ 였으며, 이 때 고추 재배 과정 중 N₂O 발생량은 4.0 kg ha⁻¹ 였고 비료 제조 과정 중 온실가스 배출량은 797 kg CO₂-eq ha⁻¹ 로 총 온실가스 배출량은 1989 kg CO₂-eq ha⁻¹

이었다. 이는 속효성 요소 시비 시 전체 과정에서 배출된 온실가스 2664 kg CO₂-eq ha⁻¹ 보다 약 25% 낮은 양으로, 벼 재배 시스템에서 완효성 요소의 시비는 속효성 비료의 시비보다 온실가스 발생 저감에 효과적이라고 할 수 있다.

표 6. 고추 재배 시스템에서 완효성 요소 시용 시 동일 수량에서의 온실가스 배출량

	속효성 요소	완효성 요소
고추 재배 과정		
N 시비량 (kg N ha ⁻¹)	190	154
N ₂ O 발생량 (kg ha ⁻¹)	6.8	4.0
Total GWP (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2026	1192
완효성 비료 제조 과정		
비료생산 (kg N)	190	154
온실가스 배출량 (kg CO ₂ -eq)	740	797
전체 과정		
총 온실가스 배출량 (kg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	2664	1989

제5절. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발

본 연구의 과업 중 불확도 산정연구와 배출계수 개발·검증 가이드라인 개발연구와 관련하여 본 보고서와 같이 연구범위를 구성하게 된 배경을 요약하면 다음과 같다.

(산업부문과 농업부문의 불확도 특성 차이) 우선 산업부문에서 ‘불확도’라 함은 ‘측정불확도’를 의미한다. 측정불확도라함은 각종 계량기의 오차(설계오차, 운영오차 등 제품 시방서나 교정 성적서에 기재된 오차)값들을 이용해 상대확장불확도를 산출하는 방식의 결과값이다. 그러나 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구의 경우 산업부문과 가장 큰 차이는 원데이터(raw data)가 계량기의 오차가 아니라 챔버를 통해 측정된 가스의 농도 데이터(flux)라는 점이다. 둘의 가장 큰 차이는 산업부문에서 배출계수 불확도 산정시 활용되는 데이터(기기오차)의 개수는 5개 내외로 매우 적은 반면, 농업부문의 flux데이터는 수 백 개 내외이다. 따라서 산업부문과 달리 통계적인 오차 산출을 통해 불확도를 산정하며, 이 과정에서 반복성과 재현성의 고려여부가 중요하다.

(배출계수 도출과정의 품질관리를 위한 불확도 요인 목록화) 또한 본 연구의 가장 큰 차별화는 본 연구에서는 여러번의 현장조사 및 자문회의를 통해, 경종 및 축산부문 배출계수 연구과정의 가능한 모든 불확도 요인을 도출했다는 점이다. 그리고 불확도 관련 전문가, 기타 학계 전문가가 참석한 워크숍 및 포럼에서 이와 같은 농업부문과 산업부문 불확도 특성에 대해 자세히 논의하였다.(151 쪽) 그 결과를 반영하여, 본 연구의 불확도 산정방식은 두 가지 방안으로 진행하였다. 첫째, 향후 경종 및 축산부문 배출계수 개발 연구자가 참고할 수 있는 ‘불확도 발생요인 목록’을 만들기 위해, 가능한 모든 요인을 목록화하는 것이다. 이것이 보고서 157~163쪽에 해당하는 내용으로서 이후 실험현장의 연구진 및 자문회 의견을 반영하여 보완되었다. 단 이 목록의 불확도 요인 중 정량적으로 계량화가 가능한 요인은 매우 적지만, 이같은 목록도출 자체가 큰 의미가 있고 이것이 가이드의 한

양식이 될 수 있다. 이 목록을 체크리스트처럼 가공하지 않은 이유는 배출계수 개발연구의 경우 이 목록의 모든 요인이 다른 배출계수 개발연구에 모두 해당하는 것이 아니고, 각 연구의 실험설계에 따라 적용요인이나 방식이 매우 다를 수 있기 때문이다. 따라서 향후 후속 연구자가 활용할 수 있도록, 기존 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구에서는 어떤 불확도 요인들을 도출해서 품질관리에 사용하였는지 가이드를 제시하기 위한 것이다. 그리고 이와는 별도로 일반적인 사항들에 관한 체크리스트는 별도로 작성해 보고서에 기재하였다.(223~쪽) 둘째, 위와 같이 정성적인 형태의 가이드와 별도로, 앞서 논의한 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구의 원데이터인 flux데이터를 통계적으로 처리한 정량적인 불확도 값을 산출하였다. 여기서는 반복성과 재현성의 고려가 중요하기때문에 이를 반영하여 값을 산출하였다.(164~168쪽)

(정성적인 불확도 요인 목록과 정량적인 불확도값 산정 별도 제시, 정성적인 불확도 요인 목록은 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구에서 ‘구체적 항목’에 대한 가이드로 활용되며, 이와 별도로 농업부문 배출계수 실험에 적용되는 ‘일반적인 항목’에 대한 가이드 및 체크리스트는 별도로 첨부) 요컨대 가이드라인은 보통 적용성 확대 측면에서는 정제되고 간결한 가이드가 선호되고, 구체성 측면에서는 자세한 항목으로 구성되는 가이드가 선호되기 때문에, 양단의 균형을 찾는 것이 중요하다. 이 같은 고민아래 본 연구에서는 구체적이고 정성적인 목록을 제시함과 동시에, 정제된 가이드 및 체크리스트를 별도로 작성해서 보고서에 모두 포함시켰다. 선행연구 또는 문헌조사시 많은 시간을 할애했음에도, 현재 농업부문 불확도 산정방식에 관한 가이드는 없는 것으로 판단된다. 단 IPCC 가이드라인2006이나 불확도 관련 세부 가이드인 GPG2000에서 권고하는 바는, 불확도 산정방안은 연구자의 판단에 따라 산정항목 및 산정방식을 결정할 수 있으며, 불확도값의 높고 낮음에 따라 관련 불확도의 가치가 좋고 나쁨을 논하기는 어렵고, 대신 불확도 산정 본래의 취지를 고려하면 불확도값이 커지더라도 가능한 많은 불확도 요인을 고려하는 것이 바람직하다고 권고하고 있다. 농업 부문 불확도 산정 사례를 조사한 결과, 우리나라를 포함한 대부분의 국가인벤토리에서도 농업부문 배출계수 불확도는 제시되어 있지 않고, 일본 핀란드 등 일부 국가만 산출결과를 기재하고 있다. 그러나 이 경우에도, 그 불확도 값의 산출방식 및 과정은 제시되지 않고 있다.

(산출된 정량적 불확도값의 대표성) 이같은 제한적 여건을 고려할 때, 일본 핀란드의 농업 불확도 산정방식을 알 수 없는 상황에서 우리 연구의 불확도 도출결과가 일본 핀란드의 산출결과에 상응하는지 여부를 논할 수는 없는 상황이다. 그럼에도 불구하고, 각 국가의 농업부문 불확도 산정방식이 동일할 필요는 없으며, 단 해당 산정방식으로 정량적 불확도값을 산정한 근거에 대한 연구자의 논거가 필요하다. 이는 국내 불확도 관련 전문가 모임인 ‘국가인벤토리 산정기관 전문가’ 워크샵에서도 수차례 논의되고 공감대를 얻은 사항이다. 따라서 정량적 불확도의 산정방식이 논리적이려면 그 불확도값을 제시할 수 있으며, 외국사례의 최소 최대값에 상응한다고 판단할 수 있다.

경종 및 축산 부문 배출계수 개발실험의 ‘정량적’ 불확도평가 결과는 보고서 164~168쪽에 제시되어 있다. 축산부문 TMR실험의 경우 불확도 산정시에는 하나의 데이터 세트로 판단하여 불확도를 산정한 것이다. 그 이유는 데이터의 반복성 및 재현성 구분과 관련된다. 보고서에서 농업부문 실험데이터의 가장 중요한 특성인 반복성과 재현성을 비중있게 언급하였다.(151~152, 158, 164~168쪽) 그리고 본 보고서 불확도 산정에서는 이같이 중요한 반복성과 재현성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 불확도결과를 비교한 것이 중요한 의미가 있다. 반복성이란 동일하게 실험처리가 된 실험구를 여럿 두는 것을 의미하며, 재현성이란 한 세트의 실험을 다른 기간(시점)에 여러번 시행하는 것을 의미한다. 예를 들어, 경종부문에서 동일한 완효성 비료를 시비한 실험구에 4개의 챔버를 설치한 경우 반복성을 4회 고려한 것이고, 이와 같이 4개의 챔버를 설치한 실험을 1세트로 보았을 때, 서로

다른 시기에 3회 실험을 수행한 경우 재현성을 3회로 보는 것이다. 따라서 TMR 실험1(습식), TMR 실험2(건식), 그리고 린시드 실험의 경우 본 보고서 정량적 불확도 산정에서는 재현성과 반복성을 함께 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 불확도 값을 산출하고 이 두 값을 비교분석하였다. 단 실험의 불확도 요인을 모두 목록화한 정성적인 가이드는 TMR, 린시드, 양질조사료 실험에 모두 적용된다.

한편 경종부문 및 축산부문 연구에서 도출된 배출계수와 각 배출계수별 불확도값을 정리·요약하여 별도로 보고서에 수록하였다.(169~171쪽) 그리고 「농업 부문 감축사업을 위한 경종 및 축산 부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인」은 201쪽에 별첨하였다.

1. 감축사업의 배출계수 현황분석 및 배출계수 개발 계획 수립

가. 국가배출계수 현황 분석

(1) 국가온실가스인벤토리 개요

온실가스 인벤토리란 온실가스 배출량을 계산할 수 있도록 배출원을 규명하고 각 배출원에 따른 배출량을 산정할 수 있도록 하는 통계시스템이다. 배출량을 측정하는 대상에 따라 국가 온실가스 인벤토리와 기업 온실가스 인벤토리로 구분할 수 있으며, 국가 전체의 온실가스 배출량을 산정하는 국가인벤토리는 국가 및 산업부문별 온실가스 감축목표 설정의 기초자료가 되고 감축목표를 효과적으로 달성하기 위한 정책수단과 시책을 개발하고 운용하는데 활용된다. 우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법에 따라 온실가스종합정보센터가 국가 온실가스 통계를 총괄하고 있으며, 매년 국가 온실가스 통계를 작성하여 「국가 온실가스 인벤토리 보고서」를 발간하고 있다.

국가 온실가스 배출량 산정은 분야별 관장기관과 총괄기관, 의사결정기구 역할을 하는 위원회를 통해 이루어진다. 환경부 온실가스종합정보센터가 국가 온실가스 산정·보고·검증(Measurement, Reporting and Verification, MRV)지침을 관장기관에 제공하면, 관장기관을 이룰 바탕으로 분야별 온실가스 통계를 산정하여 센터에 제출하고 센터는 이를 검증하여 수정·보완한다. 이렇게 완성된 국가 온실가스 통계는 기술협의체의 기술적 검토와 관장기관 담당자로 구성된 실무협의회의 협의를 거쳐 최종적으로 관리위원회에서 심의의결하고 이를 온실가스종합정보센터가 공표한다(온실가스 종합정보센터, 2014).

표 1. 국가 온실가스 인벤토리 작성 절차

주요절차		담당	내용	일정
산정 · 보고	MRV 지침 고시	온실가스종합정보센터 → 관장기관	· MRV 제공 · ※ 매년 개정사항 반영	2월
	분야별 산정·보고	관장기관 → 온실가스종합정보센터	· NIR와 CRF 작성제출	3-6월
검증	내(외)부 검증	온실가스종합정보센터	· 검증보고서 작성 · 관장기관에 보완사항 통보 및 수정	7-8월
심의 · 확정	분야별 기술협의체 검토	온실가스종합정보센터 (기술협의체)	· 검증보고서와 지침의 주요 개정사항 등에 대한 기술적 검토 · ※ 통계청 의견 수렴	9월
	관계부처 실무협의	온실가스종합정보센터 (실무협의체)	· 주요 쟁점에 대해 심의	10-11월
	최종 심의·확정	온실가스종합정보센터 (관리위원회)	· NIR와 CRF의 심의·확정	
대외 공표		온실가스종합정보센터	· 대외 공표	12월

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014). 국가온실가스 인벤토리 보고서, pp19.

인벤토리 산정은 측정이나 계산을 통해 온실가스 배출·흡수량을 정량화하는 것을 의미한다. 국가 단위 온실가스 배출량 산정지침은 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)에서 발간한 1996년 가이드라인(1996 IPCC GL)과 2006년 가이드라인(2006 IPCC GL)이 있다. 우리나라는 주로 1996년 IPCC GL에 따라 인벤토리를 산정하고 있으며 2014년 인벤토리에서 농업분야의 벼 재배 부문, 폐기물 분야의 6D 기타 부문은 2006 IPCC GL에 따라 산정하였다. GPG 2000은 국가 온실가스 인벤토리에 있어 국가별 상황에 적합한 산정방법을 선택하는 문제와 불확도 평가에 대한 구체적 방법론을 제시하여 IPCC 1996 GL을 보완하기 위한 목적으로 2000년에 발간되었다. GPG-LULUCF은 GPG 2000에 포함되지 않은 국가 육상생태계의 토지이용 및 토지이용 변화에 따른 온실가스 배출·흡수량 산정방법론으로 2003년에 발간되었다.

가장 최근 발표된 2014년 국가온실가스 인벤토리는 1990~2012년 우리나라의 온실가스 배출·흡수량을 1996 IPCC GL 분류에 따라 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change and Forest, 이하 LULUCF로 표기), 폐기물 분야로 나뉘어 산정하고 있다.

표 2. 2014 국가 인벤토리 산정방법론에 적용된 IPCC 지침

· 국가 온실가스 인벤토리에 관한 개정된 IPCC지침 (1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 이하 1996 IPCC GL)
· 국가온실가스 인벤토리의 불확도관리와 우수실행에 관한 IPCC지침 (IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 이하 GPG 2000)
· 토지이용, 토지이용 변화 및 임업에 관한 IPCC 지침 (IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, 이하 GPG-LULUCF)

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014). 국가온실가스 인벤토리 보고서, pp20.

(2) 국가배출계수 정의 및 등록현황

온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 산정방법, 활동자료, 배출·흡수계수 등이 규정되어야 한다. 산정방법이 복잡할수록 산정등급이 높아지며 Tier1~4 수준의 등급이 존재한다. 산정등급이 높아질수록 배출량 산정의 정확도가 높아진다(표 3).

표 3. 산정등급(Tier) 구분

구분	산정등급	방법	배출계수 적용
계산법	Tier 1	연료·원료 등 활동자료 측정	IPCC GL 기본계수
	Tier 2		국가고유배출계수
	Tier 3		시설단위 배출계수
연속측정방법	Tier 4	CO ₂ 농도, 배기가스 유량 연속측정	-

※ 출처 : 환경부·한국환경공단. (2011). 온실가스·에너지 명세서 작성해설서. pp37

현재 국가온실가스 인벤토리의 각 분야별 산정방법론은 대부분 Tier 1 수준이며, 일부 부문의 경우 보다 자세한 활동자료나 국가 고유배출·흡수계수가 개발되어 Tier2 수준으로 산정하고 있다. 2014년 국가온실가스인벤토리 보고서에서는 에너지 분야의 연료연소, 농업분야의 벼재배 부문, LULUCF 분야의 산림지 부문, 폐기물 분야의 폐기물소각과 하폐수 처리 부문에 대하여 Tier 2 수준의 산정방법론을 적용하였다.

표 4. Tier 2 산정방법론 적용부문(2014년 국가인벤토리 기준)

분야	부문	세부적용내용
에너지	1A 연료연소 CO ₂	18개 연료에 대해 국가고유배출계수 적용
	1A1 에너지산업 부문 공공전기 및 열생산 CH ₄ , N ₂ O	발전설비별 활동자료 수집이 가능하여 설비별 배출량 산정
농업	4C 벼 재배 부문 CH ₄	국가고유 배출계수 적용
LULUCF	5A 산림지 부문 CO ₂	국내 산림지 임상별 국가고유 흡수계수 적용
폐기물	6C 폐기물소각 부문 N ₂ O	폐기물 성상별, 공공하수 처리 방법별, 산업폐수 업종별 국가고유 배출계수 적용
	6B 하폐수처리 부문 CH ₄	

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014). 국가온실가스인벤토리 보고서. pp20

산정등급이 높아질수록 배출량의 정확도가 높아지므로 국가 온실가스 인벤토리의 정확성을 높이고 국제 수준에 부합하기 위해서는 주요 배출·흡수원에 대한 국가고유배출·흡수계수(이하 국가배출계수로 통칭함)를 개발해야 한다. 온실가스종합정보센터의 검증과정을 거쳐 승인된 우리나라의 국가배출계수는 2014년 기준 163개가 있다.²⁾

2) 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp7

표 5. 국가 고유배출 · 흡수계수 개발 현황

분야	산정식 요구계수	개발 계수	승인 계수	적용***	비고
에너지	93*	67	43	43	신규 발열량 고시마다 개발 필요
에너지(수송)	8	-	-	-	-
산업공정	23	8	-	-	CDM과 명세서 계수 불포함
농업	24	12	11	8	축종별 계수 미분리
LULUCF**	112	18	6	6	IPCC 지침 기본계수 외에 수종별 계수 개발
폐기물	134	107	103	10	개발계수는 과거 계수 갱신 내역도 포함
계	394	212	163	67	-

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp7
 ※ 주 : 계수의 개수(단위 : 계)는 IPCC 지침의 분야별 최하위 배출원 중 국내 배출원 산정식에 대입되는 계수 기준으로 계산
 ※ 주(*) : 계획기간(2015-2019) 내 신규 발열량 고시될 예정이므로 2016년 발열량 기준 계수 24개 추가
 ※ 주(**) : LULUCF 분야는 수종별 계수를 합산한 통합 계수 개수
 ※ 주(***) : 폐기물과 농업 분야 승인계수 중 미적용 계수는 2016 지침 방법론에서 적용 가능

온실가스 인벤토리에서는 농업 분야의 배출원을 축산과 경종에 따른 CH₄와 N₂O배출원으로 나누고 있다. 세부적으로는 축산 부문에 대해서는 가축의 장내발효(4A), 가축분뇨처리(4B)로 구분되며 경종 부문에 대해서는 벼 재배(4C)와 농경지 토양에서 배출되는 배출량(4D)으로 구분된다.

온실가스 배출량 산정에 적용되는 산정방법론은 대부분 Tier1 수준이며 배출계수역시 IPCC 기본배출계수(Tier 1 수준)을 활용하고 있다. 단, 2014년 온실가스 인벤토리에서는 벼 재배에 대하여 Tier2 수준의 국가배출계수 및 배출량 산정방법론이 적용되었으며, 농경지 토양에서 N₂O의 직접 배출량 산정방법론은 GPG 2000의 Tier 1 방법론을 이용하였으나 밭에 대한 배출계수는 국가 배출계수를 적용하였다.

표 6. 2013, 2014 NIR 적용 농업 부문 배출량 산정방법 및 배출계수 Tier 수준

배출원	Tier		배출계수 산정식
	산정방법	배출계수	
장내발효 (4A)	소(4A1)	1	CH_4 배출량= $E_i * EF_i * P(10^{-6})$ EF=가축 i종의 배출계수(Tier 1적용)
	양(4A3)	1	
	염소(4A4)	1	
	말(4A6)	1	
	돼지(4A8)	1	
	가금류(닭,오리)(4A9)	1	
	기타(사슴)(4A10)	1	
가축분뇨처리 (4B)	소(4B1)	1	CH_4 배출량= $E_i * EF_i * P(10^{-6})$ EF=가축 i종의 배출계수(Tier 1적용) (장내발효식과 동일한산식 배출계수만 차이) N_2O 배출량= $\left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} * N_{ex(t)} * MS_{(T,S)}) \right] * EF_{3(S)} \right] * \frac{44}{28}$ EF=EF _{3(S)}
	양(4B3)	1	
	염소(4B4)	1	
	말(4B6)	1	
	돼지(4B8)	1	
	가금류(닭,오리)(4B9)	1	
	기타(사슴)(4B10)	1	

배출원	Tier		배출계수 산정식	
	산정방법	배출계수		
벼재배 (4C)	상시답수 (4C1a)	2	2	$EF_1 = EF_C * SF_W * SF_O$ $CH_4RICE = A * EF_1 * 10^{-6}$ (천톤) 14년이전 $EF_C=2.37\text{KgCH}_4\text{HA}^{-1}\text{DAY}^{-1}$ 14년이후 $EF_C=2.32\text{KgCH}_4\text{HA}^{-1}\text{DAY}^{-1}$ 14년이전 간단관개 $SF_W=0.6$ 14년이후 간단관개 $SF_W=0.66$ 상시답수와 간단관개식은 SF_W 값이외에는 모두 동일
	간단관개 (4C1b)	2	2	
농경지 토양 (4D)	직접배출 (4D1) (논, 밭구분)	1(논)	1	$N_2O(\text{직}) = (F_{AM} * EF_1) + [(F_{SN} + F_{BN} + F_{CR}) * EF_{VFR}] + [(F_{SN} + F_{BN} + F_{CR}) * E$ $EF_{1FR} = \text{논배출계수}, EF_{1FC} = \text{밭배출계수}$ $EF_1 = N_2O \text{ 직접배출계수}$ 14년이전 $EF_{1FC} = 0.0125\text{kg } N_2O\text{-N/kg N}$ 14년이후 $EF_{1FC} = 0.00596\text{kg } N_2O\text{-N/kg N}$
		1(밭)	2	
	간접배출 (4D3) (대기휘산, 수계유출구분)	1(대기)	1	$N_2O(\text{대기}) = \{ [N_{FER} * \text{Frac}_{GASF}] + [\sum T(N_{IT}) * N_{ox(IT)}] * 0.4$ $+ [\sum T(N_{IT}) * N_{ox(IT)}] * 0.6 * \text{Frac}_{GASM} \} * EF_4 * \frac{44}{28}$ $N_2O(\text{수계}) = (F_{SN} + F_{AW} + F_{BN} + F_{CR}) * \text{Frac}_{IBACH} * EF_5 * E$ $EF_4 = \text{대기휘산 배출계수}$ $EF_5 = \text{수계유출 배출계수}$
		1(수계)	1	

2015년 농경지 토양에서 수계유출에 의한 N₂O 간접 배출량에 대한 국가 고유 배출계수가 새롭게 승인됨에 따라 농업 부문에 총 12개의 국가고유배출계수가 등록되어 있다.

표 7. 농업부문 온실가스 배출계수 개발현황

부문	계수 명칭	계수 값	
벼재배(4C)	벼재배 메탄 기본 배출계수(EF _C)	2.32 kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹	
	녹비시용 보정계수(SF _O)	녹비시용량(0Mg/ha)	1.00
		녹비시용량(3Mg/ha)	2.96
		녹비시용량(6Mg/ha)	4.92
		녹비시용량(9Mg/ha)	6.88
		녹비시용량(12Mg/ha)	8.84
	벗짚시용 보정계수(SF _O)	벗짚 건물(1-3Mg/ha)	1.2
		벗짚 건물(3-5Mg/ha)	1.7
		벗짚 건물(5-7Mg/ha)	2.5
		벗짚 건물(7+ Mg/ha)	3.4
	작기 전 물관리 보정계수(SF _p)	비답수 180일 미만	1.00
		비답수 180일 이상	0.80
		작기 전 답수30일 이상	1.09
	작기 중 물관리 보정계수(SF _w)	상시답수	1.00
중간낙수(1주)		0.83	
중간낙수(2주)		0.66	
중간낙수(3주)		0.49	
농경지토양(4D)	아산화질소 통합 배출계수(EF ₁)	0.00596 kg N ₂ O-N/kg N	
	고추 재배에 의한 아산화질소 배출계수(EF _y)	0.00 kg N ₂ O-N/kg N	
	콩 재배에 의한 아산화질소 배출계수(EF _y)	0.0119 kg N ₂ O-N/kg N	

부문	계수 명칭	계수 값
	감자 재배에 의한 아산화질소 배출계수(EF _y)	0.0049 kg N ₂ O-N/kg N
	봄배추 재배에 의한 아산화질소 배출계수(EF _y)	0.0056 kg N ₂ O-N/kg N
	가을배추 재배에 의한 아산화질소 배출계수(EF _y)	0.0058 kg N ₂ O-N/kg N
	수계유출 간접 배출계수(EF5)*	0.0135 kg N ₂ O-N/kg N

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp7; 온실가스종합정보센터 웹페이지 고시. (2015.6.30). 2015년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수
 ※ 주(*) : 2015년 신규 등록된 배출계수임.

(3) 국가배출계수 개발·검증 절차 및 지침

(가) 국가배출계수 개발·검증 절차

국가배출계수 개발·검증 과정은 배출계수 개발계획 수립, 배출계수 개발, 개발결과 검증·승인으로 나뉜다. 온실가스종합정보센터는 전 과정을 총괄하는 기관으로 각 단계별 업무를 주도하거나 지원하는 역할을 한다.

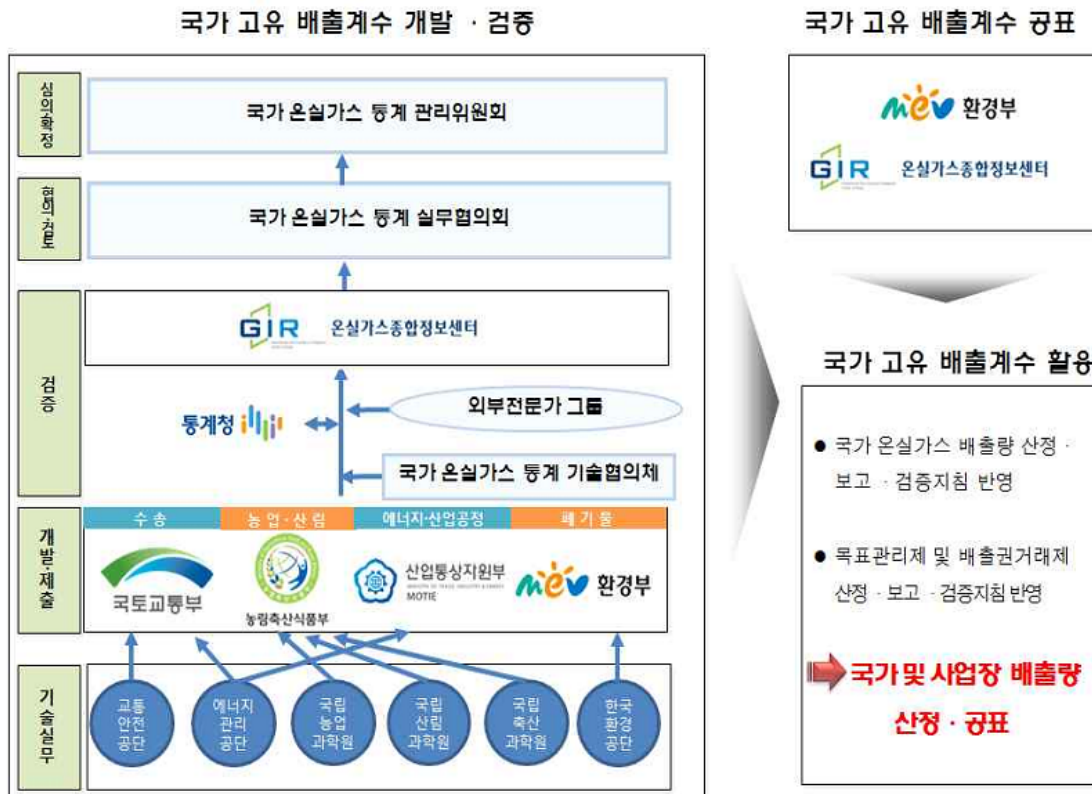
표 8. 국가배출계수 개발·검증 주요 기관과 역할

개발 검증 주요기관	개발 검증 역할
온실가스종합정보센터	<ul style="list-style-type: none"> · 부문별 관장기관의 의견을 반영하여 배출계수 개발검증 계획 수립 · 분야가 불명확한 배출계수 개발 지원 및 수행 · 관장기관의 국가배출계수 개발 지원 · 국가 고유 계수 개발검증 지침 제개정 · 국가 고유 계수 개발 결과 검증
관장기관	<ul style="list-style-type: none"> · 부문별 국가배출계수 개발계획 수립 및 개발
산정기관	<ul style="list-style-type: none"> · 부문별 관장기관에 의해 지정 · 국가배출계수개발 대행
국가온실가스통계실무협의회	<ul style="list-style-type: none"> · 국가배출계수 개발검증 전 단계 실무협의 · 개발검증 결과, 지침 제개정 등
국가온실가스통계관리위원회	<ul style="list-style-type: none"> · 국가배출계수 개발결과, 지침 제·개정 등에 대한 최종 심의확정
국가온실가스통계기술협의체	<ul style="list-style-type: none"> · 국가배출계수 개발·검증관련 기술적 검토

① 국가배출계수 개발계획 수립

국가배출계수 개발계획은 기본적으로 각 부문별 관장기관이 수립하며 온실가스종합정보센터는 각 관장 기관의 계획을 반영하여 매년 3월31일까지 부문별 국가고유 온실가스 배출·흡

수계수 개발·검증 계획을 수립해야 한다(국가 온실가스 통계 총괄 관리에 관한 규정 제 4장 16조). 각 관장기관은 배출계수 개발 우선순위를 평가하여 배출계수 개발계획을 수립하는데 이때 국내 배출원 중 배출 비중, IPCC 기본계수 제공 여부, IPCC 기본계수와 국내조건의 적합성 등을 고려하여 우선순위를 정한다. 또한 활동자료 확보를 고려하여 배출계수 개발시점을 정한다.



[그림 1] 국가배출계수 개발검증 체계

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp53

② 국가배출계수 개발

국가 배출계수 개발 단계는 온실가스종합정보센터와 각 분야별 관장기관이 모두 참여하며 산정기관 또는 전문기관을 통해 배출계수를 개발한다. 단, 부문이 불명확하거나 여건상 배출계수 개발이 어려운 경우 온실가스종합정보센터가 직접 배출계수를 개발하거나 관장기관의 배출계수 개발업무를 지원할 수 있다. 부문별 국가배출계수 개발 업무를 관장하는 관장기관은 산업통상자원부(에너지·산업공정), 국토교통부(건물 및 교통), 농림축산식품부(농업임업어업), 환경부(폐기물)가 각각 지정되어 있다. 배출계수 개발을 대행하는 산정기관은 각 관장기관이 지정한다.

표 9. 부문별 국가배출계수 개발 관장기관과 산정기관

부문	관장기관	(부문) 산정기관
에너지산업공정	산업통상자원부	에너지관리공단
건물·교통	국토교통부	(교통) 교통안전공단
농업·임업·어업	농림축산식품부	(농업) 국립농업과학원 (축산) 국립축산과학원 (임업) 국립산림과학원
폐기물	환경부	한국환경공단

③ 국가배출계수 검증·승인

온실가스종합정보센터는 각 관장기관이 제출한 배출계수 개발결과를 검증하고 검증결과를 각 관장기관과 협의하여 적합여부를 판정한다. 이 과정에서 온실가스종합정보센터는 필요할 경우 기술적 사항을 논의하기 위해 외부전문가 및 센터 담당자들을 포함한 기술협의체를 구성할 수 있다. 검증결과는 국가온실가스 통계실무협의회의 검토와 협의를 거친 뒤 국가 온실가스 통계관리위원회의 심의·확정 후 최종적으로 공표된다.

표 10. 국가배출계수 검증 수행 절차

주요절차	담당기관	내용
검증 준비	온실가스 종합정보센터 관장기관	검증 일정 수립
		검증 지침 개정
		계수 검증위원단 구성 및 사전교육
검증	온실가스 종합정보센터	검증 신청 자료 검토 및 추가 제출 요청
		내·외부 전문가의 1차 검증
		내·외부 전문가 및 계수 개발자 2차 검증
검증 결과 협의	온실가스 종합정보센터 관장기관	관장기관 의견 수렴 및 계수의 적합 여부 판정
검증 결과 확정	온실가스 종합정보센터	검증 결과 적합 판정을 받은 계수 확정

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp7

(나) 국가배출계수 개발·검증 지침

온실가스종합정보센터는 부문별 배출계수의 특성을 고려하여 배출계수 개발·검증 기준을 제시하는 「국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침」(2012.08)을 만들어 관계기관이 활용하도록 하고 있다.

해당 지침은 국가배출계수 개발과정에 있어 고려해야할 항목들을 개발 방법론, 배출계수 대표성, 측정·분석의 정확성, 자료 관리 측면에서 명시하고 있다([표 2-33] 참고). 또한 개발자

로 하여금 배출계수 개발 전 과정에 대해 QA/QC를 수행하고 배출계수에 대한 불확도를 산정할 것을 권고하고 있다. 각 항목에 대한 적합기준은 IPCC 지침과 선진국 기준, 국내외 공인된 연구 결과 및 전문가 판단에 근거한다. 개발자는 부록으로 제시되는 「국가 온실가스 배출·흡수계수 개발자 체크리스트」를 이용하여 주요 사항들이 누락되지 않도록 자체적으로 점검할 수 있다. 이 항목들은 검증 단계에서도 동일하게 적용되어 검증기관이 평가에 활용하는 기준이 된다.

배출계수 개발 결과는 정확성, 적합성, 객관성, 상용성, 투명성의 원칙에 따라 평가된다.

현재까지 개발된 농업부문의 다양한 온실가스 배출계수를 국가고유 배출계수로 등록하기 위해서는 다음의 6단계의 검증과정을 거쳐야 하며, 농업부문 온실가스 고유배출계수 개발을 위해서는 이에 대응한 자료구축이 요구되고 있다(법적근거 : 녹색성장기본법 제 45조 제 1항)

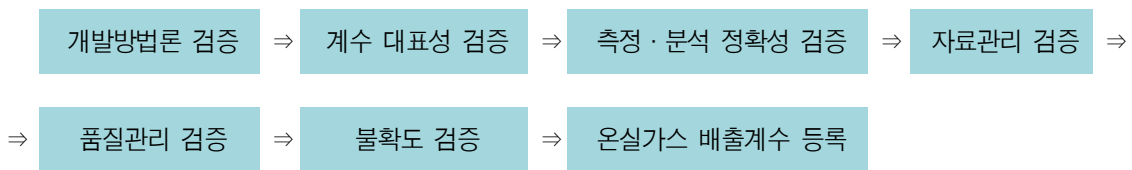


그림 2. 배출계수 검증 절차

※ 출처 : IPET 제안서

표 11. 국가배출계수 개발·검증 기준

구분	개발·검증 요소
개발 방법론	배출흡수량 산정 지침에 적용 가능성
	개발 방법론의 적절성
	배출흡수 활동 관련 특성고려 여부
계수 대표성	배출흡수원에 대한 조사 방법의 적절성
	모집단에 대한 표본 집단 선정 방법의 적절성
	표본 개수 결정 방법론의 적절성
	표본의 시간적 영향 고려 여부
측정·분석 정확성	표본의 공간적 영향 고려 여부
	측정 분석 유형 선정의 적절성
	측정분석 및 샘플링 방법론의 적절성
	측정 분석기관의 신뢰 수준
자료 관리	측정 분석기기의 신뢰수준
	유효 숫자 관리의 적절성
	자료 선별 및 보완의 적절성
	계수 개발에 사용된 자료의 시간 범위 일치성
QA/QC	QA/QC 수행 기준의 적절성, 수행 결과 반영 여부 등
불확도	불확도 산정방법의 적절성
	불확도 결과값의 적절성 등

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp54

표 12. 국가배출계수 평가 원칙

기준	내용
정확성	배출계수 질적 수준에 대해 얼마나 정확하게 평가가 이뤄졌는가에 대한 것으로 정확한 평가를 위한 방법론 개발 적용이 필요
적합성	배출계수평가는 배출원의 특성을 반영하여 이뤄져야함. 특정배출원은 구조적으로평가를 잘 받을 수 있거나 또는 잘 받을 수 없기 때문에 배출원 간의 불균형을 반영할 수 있도록 평가 방법이 개발 적용 되어야 함.
객관성	평가 방법이 주관적이지 않고 명확한 기준에 근거하여 제 3자에 의해서도 인정될 수 있는 객관적 기준에 의한 평가 방법이어야 함
상용성	배출원 간의 배출계수 평가가 동일한 기준에 의해 이루어져 배출원 간의 평가결과가 비교 평가가 가능해야 함
투명성	배출계수 평가 방법을 위해 사용된 가정과 방법이 투명하고 명확하게 기술되어 제 3자에 의해 평가와 재현이 가능해야 함.

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp54

① 농업 부문 배출 활동 관련 특성

「국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침」(2012. 8)은 배출계수 개발 시 고려해야할 항목으로 배출·흡수 활동 관련 특성을 포함하고 있다. 배출원별로 배출흡수 활동 관련 특성이 다르므로 각 부문별로 배출흡수 활동 관련 특성 측면에서 고려해야할 세부 항목을 제시하고 있다. 지침 상에 제시되어 있는 세부항목들은 기본적으로 「IPCC EFDB Guidance on the “Properties“ field」³⁾에 따라 작성되었으며, 필수적으로 검토되어야하는 핵심 고려사항과 필수사항은 아니지만 계수 개발 시 검토될만한 특성인 일반 고려사항으로 구분하여 제시하고 있다. 단, 농업 부문의 경우 국내 실정을 반영하여 IPCC EFDB 내용 중 일부 내용을 변경하였다.

따라서 농업 부문의 국가배출계수 개발 시 아래 표와 같은 배출 활동 관련 특성을 고려해야 한다.

표 13. 농업 부문 배출 활동 관련 특성

배출원	배출계수	평가기준
장내발효(4A)	CH ₄ 배출계수	핵심 고려사항 ① 총 에너지 섭취량(GE) 계산 ② 메탄전변율 일반 고려사항 ① 가축 관리 시스템 ② 생체중, 체중 증가 및 아종 유형 ③ 사료 섭취량, 사료 공급형태 및 사료 품질

3) IPCC EFDB Guidance on the "Properties" field 는 계수 개발 시점의 최신버전을 따른다.

배출원	배출계수	평가기준
		④ 우유 생산량 ⑤ 기후조건 ⑥ 축산물 품질
분뇨관리(4B)	CH ₄ 배출계수	핵심 고려사항 ① 일일 휘발성 고형 분뇨 배출량(VS) 계산 ② 사료에너지량 ③ 회분량(Ash) ④ 분뇨처리시스템 정보(MCF, MS%) ⑤ 기후조건 ⑥ CH ₄ 발생 잠재량 일반 고려사항 ①가축특성 ②사료소실율
	N ₂ O 배출계수	핵심고려사항 ① 분뇨 내 질소량(=분뇨로 배출되는 질소량) ② 분뇨처리시스템 비율(MS%) 일반고려사항 ① 가축특성 ② 사료소실율
벼 재배(4C)	CH ₄ 배출계수	핵심 고려사항 ① 물관리 방법 ② 유기물 관리(종류 및 시용량) 방법 ③ 토성 ④ 재배일수 ⑤ 재식밀도 ⑥ 생태형(조생종, 중생종, 중만생종 등) 일반 고려사항 ① 비료시용 ②기상, 기후조건(온도, 강우량 등) ③ 토양온도 ④ 수온 ⑤ Eh(산화환전위) ⑥ 위도 및 경도
농경지 토양(4D)	N ₂ O 배출계수	핵심 고려사항 ① 비료 종류 ② 비료 시용량 ③ 비료의 질소함량 ④ 작물 ⑤ 토성

배출원	배출계수	평가기준
		⑥ 비료 사용 시기 일반 고려사항 ① 분시율 ② 기상, 기후조건(온도, 강우량 등) ③ 토양온도 ④ 위도 및 경도
작물잔사 소각(4F)	CH ₄ , N ₂ O 배출계수	핵심 고려사항 ① 작물 종류 및 잔사 특성 ② 연소조건 ③ 수분함량(건물물) ④ 잔사/곡실 비율 ⑤ 소각률(소각조건) ⑥ 탄소/질소 비율 일반 고려사항 ① 환원조건 ② 기상, 기후조건(온도, 강우량 등) ③ 연소조건

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2012.08). 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발검증 지침, pp20

나. 감축사업 배출계수 현황 분석

(1) 방법론별 배출계수 적용현황

2016년 현재 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」에 등록된 방법론은 15개가 있다. 아래 [표 14]에 나열된 15개 방법론들은 적용 기준, 온실가스 감축량 산정방법, 산정에 요구되는 배출계수 및 인자 등을 상세히 규정하고 있다.

표 14. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축 방법론

분 야	방법론	등록년도
에너지 이용 효율화	미활용 에너지를 이용한 온실가스 감축 방법론	'12
	순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	'13
	LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	'13
	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	'14
신재생 에너지	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	'12
	신재생에너지(태양광, 태양열, 소수력, 풍력) 방법론	'13

합성비료 절감	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	‘12
	완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	‘14
농축산 부산물 등 바이오메스 활용	목질바이오메스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	‘12
	왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	‘13
	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	‘13
기타	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	‘12
	녹색마을 방법론	‘12
	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	‘13
	메탄저감사료를 급여하여 가축의 장내발효 발생 메탄저감 방법론	‘14
계	-	15 건

방법론들은 각각의 감축 활동 특성에 적합한 배출계수를 적용하여 감축량을 산정하고 있다. 방법론에 적용된 배출계수의 출처는 방법론 규정 문서에 명시되어 있으며 그 내용은 아래 [표 15]와 같다.

표 15. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론 적용 배출계수

번호	방법론명	배출계수	출처
1-1	미활용 에너지를 이용한 온실가스 감축 방법론	화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,EF}, EF_{FF}$)	2006 IPCC GL
		전력사용에 따른 배출계수 (EF_{EL})	국가배출계수 (전력거래소)
1-2	순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_i, EF_{CO_2})	2006 IPCC GL
		전력사용에 따른 배출계수 (EF_{el})	국가배출계수 (전력거래소)
1-3	LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)
1-4	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)
2-1	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	기존 설비 운영을 위해 사용한 화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,FF}$)	2006 IPCC GL
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)

번호	방법론명	배출계수	출처
2-2	신재생에너지(태양광, 태양열, 소수력, 풍력) 방법론	y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)
		화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL
3-1	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	논벼 재배 시 유기물 분해를 통한 메탄 배출에 따른 배출계수 ($EF_{CO_2,CH}$)	녹색농업기술 편람(농업기술실용화재단, 농촌진흥청 2011)
		질소 시비에 의하여 농경지에서 배출되는 N_2O 의 배출계수 ($EF_{N_2O,direct,f}$)	2006 IPCC GL
		농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 ($EF_{CO_2,EN}$)	전과정평가를 이용한 유채재배의 환경영향 평가 (홍승길 외, 2011)
3-2	완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	질소 시비에 의하여 농경지에서 배출되는 N_2O 의 배출계수 ($EF_{N_2O,direct,f}$)	국가고유배출계수
		농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 ($EF_{CO_2,EN}$)	전과정평가를 이용한 유채재배의 환경영향 평가 (홍승길 외, 2011)
4-1	목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	사업 활동이 없었더라면 사용되었을 기존시설에서 사용된 화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,FF}$)	2006 IPCC GL
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)
		y년도에 생산된 목질 바이오매스의 발열량 ($NCV_{biomass,y}$)	목질바이오매스 품질시험성적서 혹은 사업관리자내부자료
4-2	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	축종별 분뇨처리에 따른 메탄 배출계수 (E_{FLT,CH_4})	2006 IPCC GL
		음식물 쓰레기 처리에 따른 메탄 배출계수 ($EF_{CH_4,fw}$)	2006 IPCC GL
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)
		화석 연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL
4-3	왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	베이스라인 화석연료 i의 배출계수 (EF_i, EF_{BL})	2006 IPCC GL
		왕겨의 순발열량 $NCV_{biomass}$	농업시설용 바이오매스 열병합 발전시스템 개발 <한국에너지기술연구원, 2009>
5-2	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	농기계에 사용된 화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL
		특정 토지이용 유형에서 축적원 변화계수 (F_{LU})	2006 IPCC GL
		경운 방법에 따른 축적원 변화계수 (F_{MG})	2006 IPCC GL
		토양분류별 유기탄소 축적량 ($F_{HAC,토양}, F_{LAC,토양}, F_{화산토}$)	2006 IPCC GL

번호	방법론명	배출계수	출처
5-3	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	논벼 1회 재배에 따른 배출계수 (EF _C)	국가배출계수 (2014년 승인)
		물관리 보정계수 (SF _w)	국가배출계수 (2014년 승인)
		유기물 보정계수 (SF _O)	IPCC GPG 2000
5-4	메탄저감사료를 급여하여 가축의 장내발효 발생 메탄저감 방법론	유지정미에너지에서 가스화에너지로 소비되는 비율 (REM)	2006 IPCC GL
		중체정미에너지에서 가스화에너지로 소비되는 비율 (REG)	2006 IPCC GL
		YM(사료의 총에너지 중 메탄으로 전환되는 비율) 기본값 (YM _{default})	2006 IPCC GL
		메탄전환계수: 분뇨처리 시스템에서 고품분 VS 중 메탄으로 전환되는 비율 (MCF _S)	2006 IPCC GL
		가스화에너지 비율 (DE)	2006 IPCC GL
		정미에너지 (NE _i)	2012 한국가축사양표준
		대사에너지 (ME _i)	2012 한국가축사양표준

위 [표 15]에 제시된 감축방법론별 배출계수는 그 출처에 따라 크게 다음의 세 가지로 구분될 수 있다.

하나는 국가고유배출계수이다. 국가고유배출계수는 국가 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해 우리나라 고유의 배출활동 특성을 고려하여 개발된 배출계수로서 엄격한 검증 및 심의 절차를 거쳐 국가고유배출계수로 승인된다.

다른 하나는 IPCC GL에서 제시하는 배출계수이다. IPCC GL은 각 국가별로 온실가스 배출량을 산정함에 있어 가급적 국가별 실정에 적합한 국가고유배출계수를 개발하여 활용하도록 권고하고 있다. 특히 농업 부문의 배출량의 경우 기후, 토양, 경작 방식 등 국가별로 가지고 있는 고유한 특성들이 배출량에 큰 영향을 미치기 때문에 해당 국가의 실정에 맞도록 개발된 국가고유배출계수를 이용하는 것이 중요하다. 그러나 배출계수개발 능력 또는 활용 가능한 자료의 미비 등으로 국가고유배출계수가 없는 국가의 경우 차선책으로 IPCC GL이 제시하고 있는 기본배출계수 값 인벤토리 산정에 대신 적용하도록 하고 있다.

그러나 방법론에 따라 국가배출계수와 IPCC GL의 기본배출계수가 모두 존재하지 않을 수도 있다. 이러한 경우 해당 방법론의 배출 활동 특성과 동일한 또는 가급적 유사한 조건에서 수행된 국내의 타 온실가스 배출량 연구의 결과를 참고하여 해당 연구에서 제시하는 배출계수를 이용하고 있다.

이상의 세 종류의 배출계수는 출처별로 계수 자체의 신뢰도에 차이가 있으며, 국내 실정에 부합하는 정도도 다르다. 가령 IPCC GL에서 제시하고 있는 기본 배출계수의 경우 국제적인 수준의 가이드라인에서 제시하고 있는 값으로 그 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있는 반면 우리나라 실정에 부합하는 정도가 낮을 수 있다.

따라서 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」의 방법론을 적용하여 얻어진 감축량의 정확도와 신뢰도를 높이기 위해서는 각 감축 방법론에서 적용하고 있는 배출계수의 정확도와 신뢰도를 점진적으로 개선하는 것이 필요하다. 따라서 본 장에서는 「농업·농촌 자발적 온실가스

감축사업」의 15개 감축 방법론에서 온실가스 감축량 산정에 적용하고 있는 배출계수를 다시 검토하고 추가적인 개선·개발이 필요한 배출계수를 제언하고자 한다.

다. 감축사업 배출계수 관리 방안

(1) 국가배출계수 개발 계획 및 관리 현황

국가 온실가스 인벤토리의 정확도를 높이고 국제 수준에 부합하기 위해서는 IPCC에서 제시하는 기본 배출계수 대신 국내 상황에 적합한 국가고유배출계수를 개발하고 이를 적용하여 배출량을 산정해야 한다. 본 절에서는 향후 국가배출계수 개발 및 관리 계획을 살펴보고 농업 부문의 주요 이슈사항을 살펴봄으로써 농업 부문 배출계수 개발 계획 수립의 시사점을 찾고자 한다.

(가) 국가배출계수 개발 및 검증 계획 개요

앞서 서술하였듯이 온실가스종합정보센터가 승인한 우리나라 국가배출계수는 2014년 기준 총 163개가 있다.⁴⁾ 국가 온실가스 인벤토리 산정에 필요한 국가배출계수는 총 394개로 온실가스종합정보센터의 승인을 거친 국가배출계수를 기준으로 할 경우 우리나라의 국가배출계수 개발비율은 41.4%이며, 개발은 되었으나 승인이 되지 않은 배출계수를 포함할 경우 54% 수준이다(표 17).

독일, 영국, 호주, 캐나다와 같은 선진국의 국가 고유배출계수 적용 비율은 74% 이상으로 우리나라와 비교하여 매우 높다. 국가배출계수는 전체 배출량 중 배출원의 배출량 비중을 고려하여 우선 개발되므로 배출량 비중이 높은 CO₂에 대한 선진국의 국가 고유배출계수 적용 비율은 57%~100%로 가장 높다⁵⁾.

표 16. 국가배출계수 승인 현황

분야	2012년 (승인/접수)	2013년 (승인/접수)	2014년 (승인/접수)	합계	내용
에너지	20/21	23/24	-	43/45	발열량에 따른 연료별 탄소계수
농업	-	-	11/11	11/11	벼 재배 환경에 따른 보정계수, 작물재배에 의한 N ₂ O 배출계수 등
LULUCF*	-	18/24	27/33	45/57	수종별 목재 기본밀도, 바이오매스 확장계수, 지상부 뿌리 비율 등
폐기물	-	18/23	85/87	103/110	매립 분야 k 상수, 폐수처리, 소각에 따른 폐기물 성상별 메탄발생계수 등
합계	20/21	59/71	123/131	202/223	-

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015~2019). pp55
 ※ 주(*) : 수종별 계수 기준 계수

4) 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015~2019). pp7
 5) 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015~2019). pp3

표 17. 국가배출계수 개발 및 승인 진도표

분야	산정식 요구계수(A)	개발계수(a)	개발율(a/A)	검증신청계수(B)	승인계수(b)	승인율(b/B)
에너지	93*	67	72%	45	43	96%
에너지(수송)	8	-	0%	0	0	0%
농업	23	8	35%	0	0	0%
LULUCF**	112	18	16%	6(57)	6(45)	100%(79%)
폐기물	134	107	80%	110	103	94%
합계	394	212	54%	172	163	95%

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp56
 ※ 주 : 계수 개수(단위 : 개)는 지점의 분야별 최하위 배출원 중 국내 배출원 산정식에 대입되는 계수이며 2014년 승인 예정 개수 포함 참고
 ※ 주(*) : 현재필요계수(2016년 발열량 기준 탄소 계수 제외)
 ※ 주(**) : 임상별 계수이며 수종별 계수는 더 세분화될 수 있음. 괄호 안은 수종별 계수 개수

국가배출계수 개발검증을 총괄하는 온실가스종합정보센터는 상기와 같은 국가배출계수 개발 계획과 더불어 동 기간 동안 국가배출계수 검증의 객관성을 높이고 투명성을 강화하고 개발된 배출계수를 효율적으로 관리하기 위해 국가배출계수 검증·관리 로드맵을 수립하였다.

표 18. 2015~2019년 국가배출계수 검증 및 관리 로드맵

추진내용		계수 검증관리 계획				
		2015	2016	2017	2018	2019
완전성 확보	계수 개발 우선순위 지정	연간 계획 수립 시 분야별 조정 방안 제시				
객관성 제고	국가 계수 개발·검증 지침 개정	공통	에너지 산업공정 폐기물	농업 LULUCF		
투명성 강화	검증 전문성 및 자료 관리 방법 개선	검증위원단 구성 기준 및 평가 방안 마련 자료제출 목록 및 양식 마련				
효율성 증대	국가 계수 관리 시스템 구축		국가 계수 DB 구축	DB 고도화		

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp58

(나) 농업 부문 국가배출계수 개발 계획 및 관리 현황

농업 분야는 축산활동에 따른 장내발효와 가축 분뇨처리, 농작물 재배(경종)와 관련된 벼 재배, 농경지 토양(직접, 간접), 작물 잔사소각 5개 부문에 대해 배출량 산정을 위한 배출계수 개발이 필요하다. 이 중 2014년 벼 재배 및 농경지 토양(직접 배출) 부문의 CH₄ 및 N₂O 국가고유배출계수 11개가 검증 완료되었으며 농경지 토양 부문 수계 간접배출계수 1종은 2015년에

검증되어 국가배출계수로 등록되었다. 이 중 벼 재배 부문의 배출계수는 2006 IPCC GL을 적용하기 위해 해당 지침의 배출계수 개발 방법론에 따라 개발되었다. 작물 잔사소각 부문에 대해 주요 작물에 대한 배출계수 연구가 수행되었으나 배출원의 배출량 비중이 미미하고 작물별 활동자료 확보가 어려워 배출계수 개발이 유예된 상태이다. 이상의 농업 부문 배출계수 개발 현황은 다음 표에 나타나 있다.

표 19. 농업부문 배출계수 개발 상세 현황

부문	필요계수	개발계수	검토요청	승인계수	개발필요
장내발효	5	-	-	-	5
가축분뇨처리	5	-	-	-	5
벼재배	7	-	-	5	2
농경지토양	직접배출	6	-	6	-
	간접배출	1	1	-	-
작물잔사소각	-	-	-	-	-
합계	24	1	-	11	12

※ 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp7

현재 축산 부문은 장내발효, 가축분뇨처리에 대한 국가배출계수가 없어 IPCC 의 기본 배출계수를 이용하고 있다. 우리나라의 축산환경을 반영하여 배출량 산정의 정확도를 높이기 위해서는 국가배출계수를 개발하는 것이 시급하다. 따라서 현 시점에서 필요한 국가 배출계수는 장내발효 부문에서 5개, 가축분뇨처리 부문에서 5개, 벼 재배 부문에서 2개가 있다.

장내발효에 대한 배출계수 연구는 2009~2013년 간 한우 및 중소가축(흑염소, 꽃사슴)에 대한 배출계수 개발을 추진한 바 있다. 국가배출계수로 개발하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하며 2016년 이후 반추가축용 호흡 챔버 정상 가동상황(농진청 전북 전주 이전 후)을 고려하여 개발을 착수할 계획이다.

가축분뇨처리에 대한 배출계수는 현재 「국가 온실가스 데이터 확충용 양돈시설 유래 CH₄과 N₂O배출량 조사」(2014~2016) 연구를 통해 가축분뇨처리시설 특성별 CH₄과 N₂O 배출량 변화 연구를 수행 중이며 간접 배출량 계산에 필요한 기초 활동자료 연구 역시 2009년부터 수행 중이다.

벼 재배에 부문에 대해서는 토성별 보정계수, 벼 작물 종류별 보정계수의 추가 개발이 필요하다. 온실가스종합정보센터의 배출계수 개발계획에 따르면 토성별 보정계수에 대해서는 2015~2019년 기간 동안 개발계획이 있으나 벼 작물 종류별 보정계수에 대해서는 해당 기간 내 개발계획이 없다. 이는 앞서 서술하였듯 작물별 재배면적이 연도별로 크게 다르고 활동자료 확보가 어려워 국가배출계수를 개발한다고 하더라도 이를 활용하기 어렵기 때문인 것으로 보인다. 이상과 같은 농업 부문 배출계수 종류별 개발 현황 및 개발계획은 아래 표에 다시 정리되어 있다.

표 20. 농업부문 배출계수 개발 상세 현황

배출원		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
장내 발효	한우 거세우(육성기)		P	
	한우 거세우(비육후기)		P	
	젖소 육성기		P	
	흑염소		P	
	꽃시슴		P	
	돼지, 말, 양		NP	
가축분뇨처리	양돈(경기, 강원, 충청, 전라, 경상)		P	P
	소, 닭		NP	NP
벼 재배	기본배출계수		A	
	작기전 물관리 보정계수		A	
	작기중 물관리 보정계수		A	
	뱃짚시용 보정계수		A	
	녹비시용 보정계수		A	
	토성별 보정계수		P	
	벼 작물별 보정계수		NP	
농경지 토양	고추			A
	콩			A
	봄배추			A
	가을배추			A
	감자			A
	통합계수			A
	수계 간접배출			A*
작물잔사소각	매개변수 개발 불필요			

※ 출처 : 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015~2019). pp30~31.
 ※ 주: P(중장기 관리기간 내 개발계획 있음), NP(중장기 관리기간 내 개발계획 없음), D(개발된 배출계수), A(승인된 배출계수)
 ※ 주(*): 농경지 토양의 수계 간접배출계수는 2015년 신규등록되었음.

표 21. 국가 온실가스 배출계수 개발 및 검증신청 계획표(농업)

계수명	IPGG 지침 버전	Tier	불확도	검증신청	적용기간
장내발효 부문의 CH ₄ 배출계수	2006	2	O	미정	미정
가축분뇨 처리과정의 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	2006	2	O	2017	2018~2022
농경지 토양 N ₂ O 간접배출계수	2006	2	O	2015	2016~2022

※ 출처 : 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015~2019). pp 32.

표 22. 2015~2019년 국가배출계수 개발 계획(농업 부문)

추진내용		계수 개발 계획				
		2015	2016	2017	2018	2019
농업	축산		장내발효 CH ₄ 분뇨처리(돼지) CH ₄ , N ₂ O			
	경종	농경지 토양 (수계 간접배출)				

※ 출처 : 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp 9.

(다) 비농업 부문 국가배출계수 개발 계획 및 관리 현황

온실가스 종합정보센터의 배출계수 개발계획에 따르면 우리나라는 2019년까지 필요 배출계수 394개 중 301개를 개발하여 개발율 75%를 달성하는 것을 목표로 하고 있다.⁶⁾

표 23. 2015~2019년 국가배출계수 개발 계획(비농업 부문)

추진내용		계수 개발 계획				
		2015	2016	2017	2018	2019
에너지		연료원별(석탄, 석유, 가스 등) 열량환산 기준 및 탄소(CO ₂)				
		전환 및 열생산(CH ₄ , N ₂ O)	제조업(CH ₄ , N ₂ O)		가정, 상업, 공공(CH ₄ , N ₂ O)	전환 및 열생산/탈루(CH ₄ , N ₂ O)
에너지(수송)		연료별 CH ₄ , N ₂ O 배출계수				
산업공정		광물산업	기타제품제조 및 소비	ODS 대체물질	화학산업	전자산업
		기타 제품제조 및 소비	ODS 대체물질	화학산업	금속산업	비에너지 및 용매 사용
LULUCF	지상부/지하부 바이오매스	목재밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리비율, 방치비율, 탄소함량				
	낙엽	탄소함량, 탄소저장량				
	고사목					
	토양				탄소함량, 가비중, 석력함량비, 탄소저장량	
	바이오매스 소각	연소효율, 배출계수				
	농경지 토양	요소사용, 석회사용(CO ₂)				
	목제품				밀도, 반감기, 탄소함량	
폐기물	매립	DOCf, MCF	k(개발)			k(갱신)
		F	OX		DOC(갱신)	
	소각 (CH ₄ , N ₂ O)	사업장배출시설계폐기물		하수슬러지		소각(CO ₂)
		의료폐기물	생활폐기물		의료폐기물(갱신)	
	하·폐수			하수		
		폐수				
기타				혐기성 소화		
	퇴비화					

※ 출처 : 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp 9.

6) 온실가스종합정보센터 및 관계기관 합동 자료. (2014) 국가온실가스 배출흡수계수 개발검증 1차 계획(2015-2019). pp10.

(라) IPCC 2006 GL 적용 계획

IPCC는 2015년부터 선진국(부속서 1 국가)이 온실가스 인벤토리 산정 시 2006 IPCC GL을 따를 것을 의무화하였다. 그 동안 국가 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해 1996 IPCC GL, GPG 2000 등 여러 지침을 활용해왔으나 2006 IPCC GL을 적용함으로써 지침의 통일성을 높이고 몇몇 배출원에 대한 산정의 불합리성을 해결할 수 있다.

우리나라는 2006 IPCC GL을 의무적으로 적용해야 하는 국가는 아니지만 저탄소 녹색성장 기본법 제 45조 제 3항에서 온실가스 관련 정보와 통계를 작성·관리하는데 있어 국제 기준을 최대한 반영하여 전문성과 투명성을 높일 것을 명시하고 있다. 따라서 국제 수준에 부합하는 온실가스 통계를 구축하기 위해 2013년 이후 배출된 온실가스 배출량(2015 국가인벤토리 보고서에 반영)에 대해서 2006 IPCC GL을 적용하여 산정한다.

본 절에서는 2006 IPCC GL의 주요 변경 사항을 농업 부문을 중심으로 살펴봄으로써 자발적 감축사업의 배출계수 개발 계획 수립에 있어 참고할 사항을 도출하고자 한다.

표 24. 우리나라의 IPCC GL 적용 현황

구분	1996 IPCC GL	GPG 2000, GPG 2003	2006 IPCC GL
명칭	국가 온실가스 인벤토리에 관한 1996년 IPCC 지침	국가 온실가스 인벤토리의 우수실행과 불확도 관리에 관한 2000년 IPCC 지침 토지이용, 토지이용 변화 및 임업에 관한 2003	국가 온실가스 인벤토리에 관한 2006년 IPCC 지침
국내 적용 현황	적용	적용	미적용
UNFCCC 협약상 용도	· 의무감축국(의무사용) · 비의무감축국(의무사용)	· 의무감축국(의무사용) · 비의무감축국(의무사용)	· 의무감축국(의무사용) · 비의무감축국(의무사용)

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 「국가 온실가스 인벤토리에 관한 2006년 지침」 국내 적용을 위한 기본 계획. pp1

표 25. 2006 IPCC GL 적용 로드맵

추진내용	일정								
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
단계별 목표	국제기준(2006 IPCC GL)에 부합하는 국가통계 기반기술 확립					실증 및 고도화			2006 IPCC GL 적용 통계 발표
분야부문별 인벤토리 구성요소 개선									
MRV 지침 개정 및 CRF 양식 변경									
2006 IPCC GL 적용 배출량 산정·검증									
2006 IPCC GL 적용 공식 통계(2021년도 배출량) 작성·발표									

※ 출처 : 온실가스종합정보센터. (2014) 「국가 온실가스 인벤토리에 관한 2006년 지침」 국내 적용을 위한 기본 계획

■ 산정분야(Sector) 구성 변경

현재 에너지, 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용·토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change and Forest, LULUCF), 폐기물 등 5개로 나뉜 산정 분야를 에너지, 산업공정 및 제 품이용(Industrial Process and Product Use, IPPU), 농업·임업 및 기타 토지 이용(Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU), 폐기물 등 4개로 변경하였다. 각 분야별로 기존 부문을 통합하거나 신규 부문을 추가하는 등 세부 항목이 변경되었다.

'96지침(GPG2003)	'06지침
코드 및 명칭	코드 및 명칭
4 농업	3A 축산(Livestock)
4A 장내발효 부문	3A1 장내발효
4B 가축분뇨처리 부문	3A2 가축분뇨처리
4C 버재배 부문	3B 토지(Land)
4D 농경지토양 부문	3B1 산림지
4F 작물잔사소각 부문	3B2 농경지
5 LULUCF	3B3 초지
	3B4 습지
	3B5 정주지
	3B6 기타토지
5A 산림지	3C 토지의 Non-Co₂ 및 통합 배출
5B 농경지	3C1 바이오매스 소각
5C 초지	3C2 석회시용(Liming)
5D 습지	3C3 요소시비(Urea application)
5E 정주지	3C4 관리토양 N ₂ O 직접배출
5F 기타토지	3C5 관리토양 N ₂ O 간접배출
5V 석회시용으로 인한 CO ₂ 배출	3C6 가축분뇨처리 N ₂ O 간접배출
	3C7 버재배

그림 3. 2006 IPCC GL 적용에 따른 농업 부문 산정항목 변경

■ 산정에 필요한 활동자료 구체화

신규 배출원이 추가되고 구체화된 산정방법론을 제시하고 있어 보다 상세한 활동자료를 요구하고 있다. 2006 IPCC GL을 적용할 경우 가장 낮은 수준(Tier)의 산정방법론을 적용할 경우에도 현행보다 세분화된 활동자료 또는 신규 활동자료가 필요하다. 축산 부문의 경우 2006 IPCC GL의 Tier1 수준을 적용하게 위해 1996 IPCC GL의 Tier2 수준의 활동자료를 필요로 한다. 또한 배출계수도 세분화 되어 2006 IPCC GL에서 고려하는 세분화된 조건 변수별로 기본배출계수를 제공하고 있으므로 국내 실정에 맞는 계수를 결정하는 것이 필요하다.

■ 공통기준(Cross-cutting Issues) 강화 제시

국가통계의 일관성 및 비교 가능성 확보를 위해 고려되어야 하는 공통기준에 대한 구체적인 지침을 제시하였다. 공통기준이란 주요 배출원 분석, 시계열 일관성, 자료수집, 불확도, 품질보증, 관리 및 검증 등 국가통계작성 과정 전반의 신뢰성을 확보하기 위한 기준이다.

■ 농업부문 적용 계획

현재 개발되어 온실가스종합정보센터의 검증을 거친 농업부문 국가고유계수 11종을 제외한 나머지 계수는 2006 IPCC GL 지침기본배출계수를 적용한다. 2006 IPCC GL을 비롯한 IPCC 가이드라인들은 기후와 토양 등 배출활동에 영향을 미치는 요인들을 고려하여 구분된 기본배출계수를 제공하고 있다. 우리나라는 계수의 지역 구분은 아시아 개도국을 적용하며 일부 개도국 기본값이 없는 경우에 한하여 아시아 선진국의 기본 값을 적용한다. 기후체계는 제주지역(연평균 기온 16℃과 제주 외 지역(연평균 기온 9~15℃)을 구분하여 적용한다. 가축분뇨처리 부문에서 기본 배출계수 값이 섭씨 온도 단위로 제공되는 한육우, 젖소, 돼지의 경우 기상청에서 제공하는 행정구역 단위별 연평균 기온에 따라 적용한다.

다음의 표는 2006 IPCC GL를 도입함으로써 새롭게 개편된 배출원 구분과 그에 따른 국내 배출량 산정현황 및 배출산정 등급 등을 나타내고 있다. 상기하였듯이 2006 IPCC GL의 기본배출계수를 적용하기 위해서는 그에 맞는 활동자료가 추가로 요구됨을 알 수 있다.

표 26. 2006 IPCC GL의 배출량 산정방법 정리표

2006 IPCC GL		산정식 수준	활동자료	배출계수	비고	
코드 및 명칭	산정여부					
3A 축산	3A1 장내발효	산정	Tier 2	가축동향조사	국가고유계수	
	3A2 가축분뇨처리	산정	Tier 2	가축동향조사	국가고유계수	행정구역별 가축분뇨처리방법별 농가수조사품질개선 필요
3C 토지의 Non-CO ₂ 및 통합배출	3C7 비재배	산정	Tier 2	농축산식품부 통계연보	국가고유계수	토성별 논벼 재배면적 자료 필요
	3C4 관리토양20 직접배출	산정	Tier 1	농축산식품부 통계연보, 가축동향조사	국가고유계수	농경지 투입 가축 분뇨량(Fprp)필요
	3C5 관리토양20 간접배출	산정	Tier 1		국가고유계수	
	3C6 가축분뇨처리20 간접배출	산정	Tier 2	농축산식품부 통계연보	국가고유계수	

라. 감축효과 산정을 위한 배출계수 개발 계획 수립

앞서 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」으로 등록된 15개 감축방법론과 감축량 산정에 활용되고 있는 배출계수, 출처를 검토하였다. 본 절에서는 감축방법론에서 활용하고 있는 배출계수 중 추가적인 연구와 개발이 필요한 배출계수를 검토하고 이를 제시하고자 한다. 배출계수의 추가 개발 필요성은 크게 두 가지 기준에서 검토되었다.

첫째는 배출계수의 신뢰도와 적합성에 따라 개발 필요성을 판단하는 것이다. 현재 농림축산식품부가 제도정착과 활성화를 위하여 농가의 감축실적을 임시로 구매하고 있으며 향후 제

도 안착과 함께 시장거래형으로 전환을 유도하고 있는 것을 고려하면 감축실적이 정확하게 평가되고 신뢰도가 보장되어야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 감축량 산정에 활용되는 배출계수의 신뢰도와 적합성이 확보되어야 한다.

두 번째 기준은 감축방법론의 확대가능성이다. 15개 감축 방법론 중 향후 사업이 확대됨에 따라 적용범위가 커질 것이라 판단되는 방법론에 대해 우선적으로 배출계수 개발이 수행되어야 할 것이다.

상기와 같이 두 가지 기준을 통해 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」에 등록된 15개 방법론의 배출계수 개발 필요성을 검토하였다.

(1) (기준 1) 배출계수의 신뢰도와 적합성

「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」을 통해 정부는 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여하고 환경친화적 농업환경을 조성할 수 있으며 농업인은 자발적 온실가스 감축실적 만큼 농가 추가 소득을 획득하고 에너지비용을 절감할 수 있다. 정부는 시범사업 기간 동안 발생한 감축량 14,638 CO₂톤을 제도정착 및 활성화를 위하여 임시적으로 구매하고 있다. 향후 사업이 확대되고 감축실적이 시장거래형으로 전환됨에 따라 농가의 감축실적을 정확하게 평가할 수 있도록 평가방법을 개선하고 평가 결과에 대해 누구나 수용할 수 있을 만큼 높은 신뢰도를 구축해야 한다. 감축실적의 정확도와 신뢰도를 높이기 위한 첫 단계로서, 감축량을 산정하기 위한 배출계수와 인자들의 정확도와 신뢰도를 확보하는 것이 필요하다.

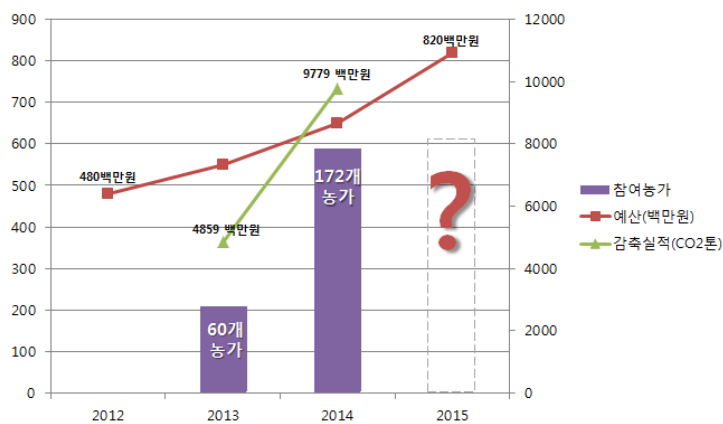


그림 4. 연간 감축사업 예산·감축실적·참여농가수

앞서 감축사업에서 활용하고 있는 배출계수를 출처에 따라 국가 고유배출계수, IPCC GL의 기본배출계수, 그리고 타 국내 연구문헌의 배출계수로 나누었다. 이 중 국가배출계수는 우리나라 전체의 국가온실가스 인벤토리 산정과 관리를 주관하는 온실가스종합정보센터의 엄격한 검증과 외부 전문가로 구성된 통계·심의위원회의 심의를 거쳐 승인되기 때문에 신뢰도가 높다. 또한 국가 특성에 적합한 배출계수를 사용할 것을 권고하는 IPCC GL의 지침에 따라 우리나라 고유의 온실가스 배출 활동특성을 반영할 목적으로 개발되었으므로 적합성 또한 높다. 따라서 국가배출계수를 적용하면 감축실적의 신뢰도와 적합성을 확보할 수 있다.

만일 방법론에 알맞은 국가배출계수가 존재하지 않을 경우 IPCC GL에서 제시된 기본배출

계수를 이용할 수 있다. IPCC는 IPCC GL과 선진국의 국가배출계수 등에 대하여 배출계수 데이터베이스 (Emission Factor Database, EFDB)로 구축하여 온라인에서 제공하고 있다. EFDB에 등록된 배출계수는 각 분야 전문가들로 구성된 편집위원회 (Editorial Board)의 심사절차 (Peer review)를 통과한 것으로 그 신뢰도가 매우 높다.

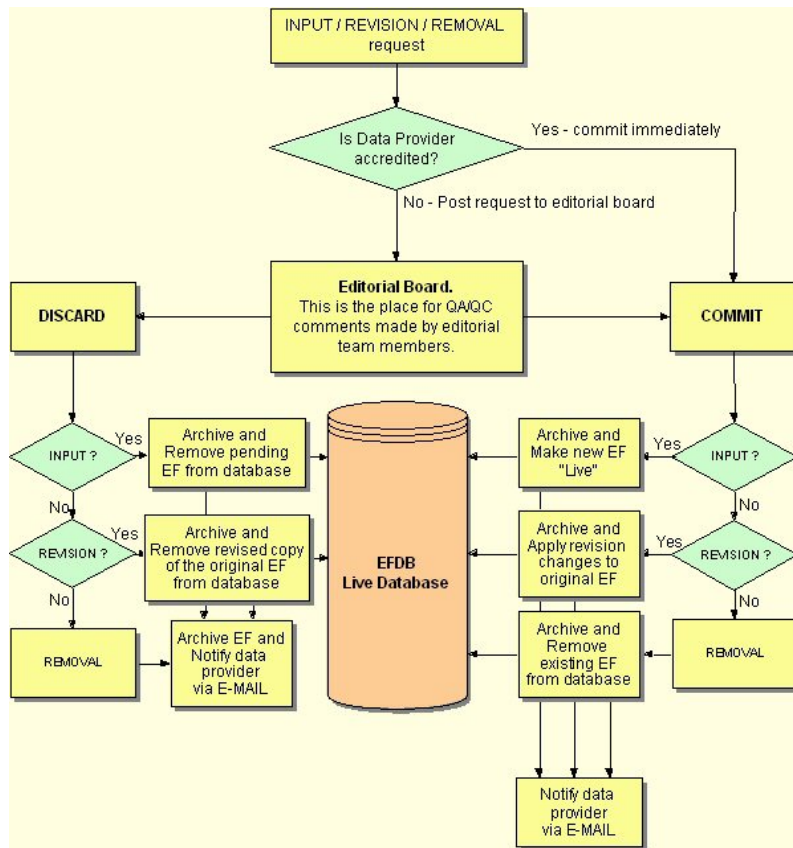


그림 5. IPCC EFDB의 배출계수 등록/수정/삭제 절차

그러나 IPCC의 기본배출계수는 국가별로 고유한 배출활동의 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 비록 IPCC GL이 기후대, 토양형질 등 가급적 해당 국가에 적합한 배출계수를 선택할 수 있도록 비교적 세부적인 기준에 따라 값을 제시하고 있기는 하지만 국가에서 자체적으로 개발한 국가배출계수보다는 적합성이 낮다. 따라서 국가배출계수가 존재하지 않을 경우 그에 대한 차선책으로 IPCC GL의 배출계수를 활용할 수 있다.

마지막으로 국내 타 연구문헌에서 제시하는 배출계수는 국가배출계수와 IPCC GL의 배출계수가 모두 존재하지 않을 경우 활용하고 있는 방법이다. 이는 국내에서 이루어진 온실가스 배출계수 산정 연구이므로 계수 개발 과정에서 우리나라 배출활동 특성을 반영하고 있기 때문에 적합성이 높다. 하지만 국가배출계수나 IPCC GL의 배출계수처럼 제삼자의 검증을 거치지 않은 경우가 많아 계수에 대한 신뢰도가 확보되지 않는 상태이다.

이상과 같이 현재 감축방법론에서 적용하고 있는 배출계수의 출처에 따라 신뢰도와 적합성을 비교·정리한 결과는 다음 표와 같다.

표 27. 감축사업 배출계수의 신뢰도와 적합성

출처별	신뢰도	적합성
국가배출계수	높음	높음
IPCC GL	높음	낮음
국내 연구문헌	확보되지 않음	높음

신뢰도와 적합성이라는 두 가지 기준에 모두 부합하는 배출계수를 적용하는 것이 이상적이지만, 특히 현재 온실가스 감축실적이 제도 정착과 활성화를 위하여 농림축산식품부에 의해서 임시적으로 구매되고 있음을 고려하면 감축실적 산정에 적용되는 배출계수의 신뢰도가 더 중요하다. 또한 향후 온실가스 배출권 거래제 연계를 통한 외부 감축사업 등록 등 감축사업의 확대를 도모하고 있음을 고려하였을 때도 국가배출계수나 IPCC GL 수준의 신뢰도 높은 배출계수를 적용하는 것이 필요하다.

이러한 관점에서 현재 타 연구 문헌에서 제시된 배출계수를 이용하고 있는 방법론이 향후 배출계수 개발의 우선 대상이 되어야 한다.

단, 최신의 신규 개정 감축방법론이 포함하지 못하였으나 온실가스 종합정보센터에서 승인 공표된 신규 국가배출계수가 존재하거나 현재 승인 대기 또는 개발 중인 배출계수가 있을 수 있다. 이러한 경우 추가적인 인력과 시간을 들여 배출계수를 개발하는 것은 신중한 고려가 필요하다. 이와 같은 관점에서 온실가스종합정보센터와 부문별 인벤토리 관장기관에서 제시하고 있는 국가배출계수 신규 승인 및 개발 계획 등을 추가로 검토하여 이러한 부분을 배제하였다. 이에 따라 배출계수의 출처와 신규 개발 필요성을 다시 정리한 내용은 아래 표와 같다(표 3-5] 참고).

표 28. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축 방법론 적용 배출계수

번호	방법론명	배출계수	출처	국가배출계수 적용 현황
1-1	미활용 에너지를 이용한 온실가스 감축 방법론	화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,EF,EF_{FF}}$)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		전력사용에 따른 배출계수 (EF_{EL})	국가배출계수 (전력거래소)	-

- 7) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
- 8) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
- 9) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
- 10) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
- 11) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획

번호	방법론명	배출계수	출처	국가배출계수 적용 현황
1-2	순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_i, EF_{CO_2})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		전력사용에 따른 배출계수 (EF_{el})	국가배출계수 (전력거래소)	-
1-3	LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)	-
1-4	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)	-
2-1	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	기존 설비 운영을 위해 사용한 화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,FF}$)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)	-
2-2	신재생에너지(태양광, 태양열, 소수력, 풍력) 방법론	y년도 전력배출계수 ($EF_{CO_2,grid,y}$)	국가배출계수 (전력거래소)	-
		화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
3-1	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	논벼 재배 시 유기물 분해를 통한 메탄 배출에 따른 배출계수 ($EF_{CO_2,CH}$)	녹색농업기술 편람(농업기술실용화재단, 농촌진흥청 2011)	2014년 승인 국가배출계수 존재 (녹비사용 보정계수 적용)
		질소 시비에 의하여 농경지에서 배출되는 N_2O 의 배출계수 ($EF_{N_2O,direct,f}$)	2006 IPCC GL	2014년 승인 국가배출계수 존재 (농경지 토양 아산화질소 통합 배출계수 적용)
		농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 ($EF_{CO_2,EN}$)	전과정평가를 이용한 유체재배의 환경영향 평가 (홍승길 외, 2011)	계수의 신뢰도 확보되지 않음

번호	방법론명	배출계수	출처	국가배출계수 적용 현황
3-2	완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	질소 시비에 의하여 농경지에서 배출되는 N ₂ O의 배출계수 (EFN ₂ O,direct,f)	국가고유배출계수	-
		농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 (EFCO ₂ ,EN)	전과정평가를 이용한 유채재배의 환경영향 평가 (홍승길 외, 2011)	계수의 신뢰도 확보되지 않음
4-1	목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	화석연료의 배출계수 (EFBL,FF)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		y년도 전력배출계수 (EFCO ₂ ,grid,y)	국가배출계수 (전력거래소)	-
4-2	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	축종별 분뇨처리에 따른 메탄 배출계수 (EFLT,CH ₄)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 ('17 국가배출계수 검증 계획 ⁷⁾)
		음식물 쓰레기 처리에 따른 메탄 배출계수 (EFCH ₄ ,fw)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 ('17~' 18 국가배출계수 개발 계획 ⁸⁾)
		y년도 전력배출계수 (EFCO ₂ ,grid,y)	국가배출계수 (전력거래소)	-
		화석 연료의 배출계수 (EFFF)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
4-3	왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	베이스라인 화석연료 i의 배출계수 (EFi, EFBL)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		왕겨의 순발열량 NCVbiomass	농업시설용 바이오매스 열병합 발전시스템 개발 <한국에너지기술연구원, 2009>	계수의 신뢰도 확보되지 않음

번호	방법론명	배출계수	출처	국가배출계수 적용 현황
5-2	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EFFF)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
		특정 토지이용 유형에서 축적원 변화계수 (FLU)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 없음 ⁹⁾)
		경운 방법에 따른 축적원 변화계수 (FMG)	2006 IPCC GL	
		토양분류별 유기탄소 축적량 (FHAC토양,FLAC토양,F화산토)	2006 IPCC GL	
5-3	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	논벼 1회 재배에 따른 배출계수 (EFC)	국가배출계수 (2014년 승인)	
5-4	메탄저감사료를 급여하여 가축의 장내발효 발생 메탄저감 방법론	물관리 보정계수 (SFW)	국가배출계수 (2014년 승인)	-
		유기물 보정계수 (SFO)	IPCC GPG 2000	2014년 승인 국가배출계수 존재 (벧짚시용 보정계수)
		유지정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율 (REM)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 있음 ¹⁰⁾)
증체정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율 (REG)	2006 IPCC GL			
YM(사료의 총에너지 중 메탄으로 전환되는 비율) 기본값 (YMdefault)	2006 IPCC GL			
메탄전환계수: 분뇨처리 시스템에서 고형분 VS 중 메탄으로 전환되는 비율 (MCFS)	2006 IPCC GL			
가소화에너지 비율 (DE)	2006 IPCC GL			
정미에너지 (NEi)	2012 한국가축사양표준	계수의 신뢰도 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 있음 ¹¹⁾)		
대사에너지 (ME _i)	2012 한국가축사양표준	계수의 신뢰도 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 있음 ¹¹⁾)		

위 표의 내용을 보면, 에너지 부문의 감축 방법론은 주로 화석연료와 전력배출계수를 감축량 산정에 이용하고 있으며 이에 대한 국가배출계수는 현재 개발이 완료되었음을 알 수 있다. 단, 일부 방법론에서 개정 이후 신규 승인된 국가배출계수가 반영되지 않았음이 발견되었다. 따라서 신규국가배출계수를 적용한 방법론 개정이 필요하다.

반면, 비에너지 부문의 감축방법론은 에너지부문에 비해 국가배출계수가 존재하지 않는 경우가 많아 IPCC GL이나 국내 타 연구문헌의 배출계수를 이용하고 있다. 특히 국내 타 연구문헌의 배출계수를 이용하는 경우는 계수의 신뢰도가 확보되지 않았기 때문에 감축실적에 대한 신뢰도에도 영향을 줄 수 있다.

<메탄 저감사료를 급여하여 가축의 장내발효 발생 메탄 저감 방법론>과 같은 경우, 방법론에 적용되는 배출계수를 현재 IPCC 또는 국내 타연구문헌에서 제시된 배출계수를 적용하고 있으나 중단기 기간 내에 국가배출계수 개발계획이 존재하는 경우가 있다. 이 경우 비록 현재 적용하고 있는 배출계수의 신뢰도와 적합성이 확보되지 않았더라도 향후 국가배출계수를 적용할 수 있으므로 추가적인 자원과 시간을 들여 배출계수를 개발할 필요성은 다른 계수에 비하여 낮다.

반면 <보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론>에 적용되는 토양 탄소 축적 관련 계수의 경우 현재 IPCC 기본배출계수를 적용하고 있어 적합성이 확보되지 않았으나 중단기 내 국가배출계수 개발 계획이 존재하지 않는다. 대신 신뢰도가 확보된 배출계수이므로 다른 계수에 비해 개발우선순위는 낮다.

따라서 앞서 서술한 기준에 따라 우선적으로 개발이 필요한 배출계수는 완효성비료와 녹비를 이용한 감축방법론에서 활용되고 있는 “농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수(EFCO₂,EN)” 이다. 이 배출계수에 대한 배출원은 기존 IPCC 지침에서 제시하고 있지 않기 때문에 향후 IPCC와 국가배출계수로서 개발계획은 존재하지 않을 것으로 보인다. 따라서 기준 1에 따르면 신뢰도가 확보되지 않았으며 중단기내 국가배출계수를 적용할 가능성이 낮은 “농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수(EFCO₂,EN)” 의 우선순위가 가장 높다.

<왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론>에서 적용되는 왕겨의 발열량 역시 국가배출계수와 IPCC 배출계수가 모두 존재하지 않아 국내 타 연구문헌에서 제시된 배출계수를 사용하고 있다. 따라서 계수의 신뢰도가 확보되지 않은 상태이며 향후 국가배출계수 개발가능성 역시 낮으므로 우선순위가 높다.

(2) (기준 2) 배출계수의 활용성

감축실적의 신뢰도를 높이고 향후 사업 확대와 타 사업과의 연계를 위하여 모든 감축 방법론의 배출계수가 충분한 수준의 신뢰도와 적합성을 확보할 수 있도록 개발하는 것이 이상적이다. 그러나 고품질의 배출계수를 개발하기 위해서는 적지 않은 시간과 인력, 비용이 소모된다. 특히 농업 부문은 기후라는 예측 불가능한 인자가 배출량에 큰 영향을 미치기 때문에 IPCC는 기후에 큰 영향을 받는 농업 부문 배출활동에 대해 국가고유배출계수를 개발함에 있어 최소 3년 동안 수집된 자료를 이용할 것을 권고하고 있다. 따라서 충분한 연구기간이 투자되어야 하는 만큼 효율성과 효과성을 고려하여 개발 대상 배출계수를 신중하게 검토하는 것이 필요하다. 즉, 개발에 소요되는 비용과 효용가치를 충분히 고려하여 추진되어야 한다. 배출계수 개발에 따른 효용 가치로서 방법론의 사업 확장성이 중요한 기준이 될 수 있다. 이를 판단하기 위하여

현재「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」의 방법론별 감축사업 적용 현황을 검토하였다.

표 29. 감축 방법론 적용 사업 건수 ('12~' 14)

방법론명	감축사업 적용 건수			
	2012	2013	2014	합계
미활용 에너지를 이용한 온실가스 감축 방법론	1	0	0	1
순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	0	1	0	1
LED 조명기기 설치를 통한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	0	0	0	0
고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	0	0	1	1
지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	2	1	1	4
신재생에너지(태양광, 태양열, 소수력, 풍력) 방법론	1	1	0	2
녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	1	1	0	2
완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	0	0	1	1
목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	1	1	1	3
바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	1	2	2	5
왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	0	1	0	1
보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	0	0	0	0
논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	0	1	0	1
메탄저감사료를 급여하여 가축의 장내발효 발생 메탄저감 방법론	0	0	0	0

시범 사업을 시작한 2012년부터 본 사업을 시작한 2015년까지 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」에 등록된 사업은 2012년 5건, 2013년 5건, 2014년 6건으로 점차 증가하는 추세이며, 3년간 총 16건이 등록되었다. 그러나 이들 사업에 적용된 방법론의 종류는 한정적이다. 매년 꾸준히 감축사업으로 적용되고 있는 방법론이 있는 반면, 일부 방법론은 현재까지 단 한 건의 사업에도 적용되어있지 않기도 하다.

따라서 향후 배출계수 개발을 추진하기 위해 우선순위를 매길 때 이러한 사업 적용빈도와 향후 확대가능성을 고려하여 가장 많이 활용될 수 있는 방법론에 적용되는 배출계수의 신뢰도를 우선 확보하는 것이 필요하다.

또한 정부가 추진 중인 다른 온실가스 감축사업과 연계 될 수 있는 감축방법론일 경우 향후 사업 확대가능성이 높다고 볼 수 있다. 특히 2015년 5월 CDM사업으로 등록된 바이오가스 플랜트는 정부가 2010년부터 추진하고 있는 가축분뇨공동자원화시설 구축 사업과 연계하여 2020년까지 전국에 30개소를 설치하여 연간 110만톤의 가축분뇨를 바이오에너지원으로 활용하고, 온실가스 336천tCO₂를 감축할 계획을 세우고 있어 향후 사업의 확대가능성이 매우 크다.

국내 농업부문 정부지원사업 현황은 다음 표에 나타나 있다.

표 30. 국내 농업부문 정부지원사업 현황

		농어업에너지이용 효율화사업	가축분뇨 자원화	친환경 비료 지원사업	저탄소 녹색마을	친환경농산물 인증제도
지원사업		<ul style="list-style-type: none"> 지열 냉·난방 시스템 목재펠릿 난방기 보급 에너지절감시설 보급 	<ul style="list-style-type: none"> 가축분뇨 전용 가축분뇨 + 음식잔재물 가축분뇨 + 농축부산물 	<ul style="list-style-type: none"> 부산물비료 (가축분퇴비·퇴비) 유기질비료 (혼합유박·혼합유기질·유기복합비료) 	<ul style="list-style-type: none"> 농산물 바이오 자원화 경관 및 친환경 농업 태양광, 태양열, 풍력, 지열 등 에너지시설 생태하천정비 산림계 바이오매스 에너지화 시설 	<ul style="list-style-type: none"> 유기농산물 무농약농산물 저농약농산물 유기축산물 무항생제축산물
지원방식		<ul style="list-style-type: none"> 국고지원 60% 지방비 20% 자부담 20% 	<ul style="list-style-type: none"> 국고지원 30% 지방비 30% 융자 20% 자부담 20% 	<ul style="list-style-type: none"> 보조 80% (국고지원+지방비+농협지원금 등) 자부담 20% 	<ul style="list-style-type: none"> 국고지원 30~50% 지방비 40~50% 자부담 10~30% 	<ul style="list-style-type: none"> 지원 없음 신청 사업자수수료 부담 인증신청비 5만원/건 유효기간 연장신청비 5만원/건
사업대상		<ul style="list-style-type: none"> 시설원에 농가 중 겨울철 보온 및 난방을 필요로 하는 농업인(법인) 	<ul style="list-style-type: none"> 개별시설 : 축산농가/단지/계열사업주체, 농업법인, 지역농/축협 공동자원화시설 : 농업법인(영농/농업회사), 지역농축협, 민간기업 	<ul style="list-style-type: none"> 규산 : 유효규산함량이 130ppm미만인 규산 부족 논 및 화산회 토양의 밭 석회 : pH 6.5미만의 산성 밭 및 중금속 오염농경지 	<ul style="list-style-type: none"> 바이오 매스 보급 및 이용, 신재생에너지 시설의 설치 등이 적합한 읍 또는 면단위 이하의 농촌지역(참여가구 30내지 50호마을단위) 	<ul style="list-style-type: none"> 개인사업자
역할 별 참여 기관	총괄 기관	농림수산식품부	농림수산식품부	농림수산식품부	농림수산식품부	농림수산식품부
	시행 기관	한국농어촌공사 농수산물유통공사	축산정책과	농협중앙회	[협력기관] 환경부, 지식경제부, 산림청	국립농산물 품질관리원
	관리· 감독	지방자치단체	지방자치단체	지방자치단체	지방자치단체	-

※ 출처 : 농업기술실용화재단. (2011). 「농림수산식품분야 탄소상쇄(Carbon Offset) 사업 검·인증체계 및 사업화 방법론 구축방안 연구, pp 48.

(3) 기준 1과 2의 종합

앞서 서술한 기준 1과 2를 종합하여 최종적으로 배출계수 개발의 우선순위를 부여하였다. 먼저 <왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론>에서 적용되고 있는 왕겨의 순 발열량은 국내연구문헌에서 제시된 값을 이용하고 있어 신뢰도가 확보되지 않는다. 반면 시범사업 기간 동안 총 1건의 사업에 적용되어 사업 확장 및 활용도는 높지 않다.

다음으로 <녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론>과 <완효성 비료를 이용한 질

소질 비료 사용저감 방법론>에서 모두 적용되고 있는 “농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수”는 현재 국가배출계수와 IPCC 기본 배출계수가 모두 존재하지 않아 국내연구 문헌에서 제시된 계수를 사용하고 있으며 이로 인하여 계수의 신뢰도가 확보되지 않은 상태이다. 반면 두 사업 적용 건수는 각각 2건, 1건으로 해당 계수를 사용하는 사업은 총 3건이다. 따라서 사업의 활용성이 높은 계수로 개발우선순위가 높다.

마지막으로 <보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론>에서 적용되고 있는 토양 축적 관련계수는 국가배출계수는 존재하지 않고 중단기간 내 개발계획 또한 존재하지 않는다. 그러나 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 기본값이 존재하며 시범사업 기간 동안 해당 계수가 적용된 사업이 없으므로 앞서 기술한 계수에 비해 개발 우선순위는 낮다.

이상을 종합하면 “농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 (EFCO₂,EN)”가 사업 적용 건수가 높은 반면 신뢰도가 확보되지 않은 계수를 사용하고 있으므로 가장 개발 우선순위가 높다. 계수의 신뢰도는 낮은 반면 적용할 사업은 많으므로 향후 감축사업 배출계수를 추가적으로 개발할 경우 이를 우선 고려할 수 있다.

표 31. 농업부문 주요 감축사업 방법론의 배출계수 검토

방법론명	배출계수	출처구분	신뢰도/적합성	적용건수
녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 (EFCO ₂ ,EN)	국내 연구문헌	계수의 신뢰도 확보되지 않음	2
완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론	농기계 사용에 의한 단위 면적당 온실가스 배출계수 (EFCO ₂ ,EN)	국내 연구문헌	계수의 신뢰도 확보되지 않음	1
왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	왕겨의 순발열량 NCV _{biomass}	국내 연구문헌	계수의 신뢰도 확보되지 않음	1
보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	특정 토지이용 유형에서 축적원 변화계수 (F _{LU})	IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 없음 ¹²⁾)	0
	경운 방법에 따른 축적원 변화계수 (F _{MG})	IPCC GL		
	토양분류별 유기탄소 축적량 (F _{HAC토양} , F _{LAC토양} , F _{화산토})	IPCC GL		

마. 국가배출계수를 감축사업에서 활용하기 위한 관리방안 제언

앞서 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」에 등록된 감축 방법론에서 감축효과를 산정하기 위해 적용하고 있는 배출계수와 그 출처를 검토하였다. 배출계수의 출처는 크게 국가배출계수, IPCC 기본배출계수, 국내 타 연구문헌의 배출계수로 구분되었으며 향후 감축방법론 배출계수 개발 계획의 우선순위를 부여하기 위한 기준으로 배출계수의 출처에 따라 신뢰도와 적합성을 판단하였는데 이는 다음과 같다.

12) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획

표 32. 감축사업 배출계수의 신뢰도와 적합성

출처별	신뢰도	적합성
국가배출계수	높음	높음
IPCC GL	높음	낮음
국내 연구문헌	확보되지 않음	높음

국가배출계수는 우리나라 전체의 국가온실가스 인벤토리 산정과 관리를 주관하는 온실가스 종합정보센터의 엄격한 검증과 외부 전문가로 구성된 통계·심의위원회의 심의를 거쳐 승인되기 때문에 신뢰도가 높다. 또한 국가 특성에 적합한 배출계수를 사용할 것을 권고하는 IPCC GL의 지침에 따라 우리나라 고유의 온실가스 배출 활동특성을 반영할 목적으로 개발되었으므로 적합성 또한 높다. 따라서 국가배출계수를 적용하면 감축실적의 신뢰도와 적합성을 확보할 수 있다.

만일 방법론에 알맞은 국가배출계수가 존재하지 않을 경우 IPCC GL에서 제시된 기본배출계수를 이용할 수 있다. IPCC GL의 기본배출계수는 각 분야 전문가들로 구성된 편집위원회(Editorial Board)의 심사절차(Peer review)를 통과하여 승인된 것으로 계수의 신뢰도가 매우 높다. 그러나 이 계수가 특정한 국가의 고유한 온실가스 배출활동 특성을 고려하여 개발된 것은 아니다. 비록 IPCC GL이 기후대, 토양형질 등 가급적 해당 국가에 적합한 배출계수를 선택할 수 있도록 비교적 세부적인 기준에 따라 값을 제시하고 있기는 하지만 국가에서 자체적으로 개발한 국가배출계수보다는 적합성이 낮다. 따라서 국가배출계수가 존재하지 않을 경우 그에 대한 차선책으로 IPCC GL의 배출계수를 활용할 수 있다.

국가배출계수와 IPCC GL의 배출계수가 모두 존재하지 않을 경우 국내 타 연구문헌에서 제시하는 배출계수를 감축효과 산정에 활용할 수 있다. 이는 국내에서 이루어진 온실가스 배출계수 산정 연구이므로 계수 개발 과정에서 우리나라 배출활동 특성을 반영하고 있기 때문에 적합성이 높다. 하지만 국가배출계수나 IPCC GL의 배출계수처럼 제삼자의 검증을 거치지 않은 경우가 많아 계수에 대한 신뢰도가 확보되지 않은 상태이다.

현재 감축사업의 정착과 활성화를 위하여 농림축산식품부가 임시적으로 감축실적을 구매하고 있으며 온실가스 배출권 거래제 연계를 통한 외부사업 등록 등 감축실적의 활용도가 증가할 수 있음을 고려할 때 국가배출계수나 IPCC GL 수준의 신뢰도 높은 배출계수를 적용해야 하며, 국가배출계수가 존재한다면 이를 우선 적용해야 한다.

그런데 앞서 방법론에 적용되고 있는 배출계수와 그 출처를 검토한 결과 다음과 같이 국가배출계수가 존재함에도 이를 적용하지 않고 있는 방법론이 존재하였다.

표 33. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축 방법론 적용 배출계수

번호	방법론명	배출계수	출처	비고(열제목 고민)
1-1	미활용 에너지를 이용한 농업시설의 온실가스 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EF _{BL,EF} , EF _{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)

번호	방법론명	배출계수	출처	비고(열제목 고민)
1-2	순환식 수막재배를 이용한 화석연료 사용량 절감 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{CO_2} , EF_{CO_2})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
1-4	고효율 보온자재를 이용한 농업시설의 난방용 에너지 사용량 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
2-1	지열에너지를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	기존 설비 운영을 위해 사용한 화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,FF}$)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
2-2	신재생에너지(태양광, 태양열, 소수력, 풍력) 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
3-1	녹비작물을 이용한 질소질비료 사용 저감 방법론	논벼 재배 시 유기물 분해를 통한 메탄 배출에 따른 배출계수 (EF_{CO_2,CH_4})	녹색농업기술 편람(농업기술실용화재단, 농촌진흥청 2011)	2014년 승인 국가배출계수 존재 (녹비사용 보정계수 적용)
		질소 시비에 의하여 농경지에서 배출되는 N_2O 의 배출계수 ($EF_{N_2O,direct,f}$)	2006 IPCC GL	2014년 승인 국가배출계수 존재 (농경지 토양 아산화질소 통합 배출계수 적용)
4-1	목질바이오매스를 이용한 농업시설의 화석연료 사용량 절감 방법론	화석연료의 배출계수 ($EF_{BL,FF}$)	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
4-2	바이오가스 플랜트를 통한 온실가스 감축 방법론	축종별 분뇨처리에 따른 메탄 배출계수 (EF_{LT,CH_4})	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 ('17 국가배출계수 검증 계획 ¹³⁾)
		음식물 쓰레기 처리에 따른 메탄 배출계수 ($EF_{CH_4,fw}$)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 ('17~'18 국가배출계수 개발 계획 ¹⁴⁾)
		화석 연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
4-3	왕겨를 이용한 RPC 곡물 건조기 열원대체 방법론	베이스라인 화석연료 i의 배출계수 (EF_i , EF_{BL})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
5-2	보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론	화석연료의 배출계수 (EF_{FF})	2006 IPCC GL	2013년 승인 국가배출계수 존재 (연료별 탄소배출계수)
5-3	논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론	유기물 보정계수 (SF_O)	IPCC GPG 2000	2014년 승인 국가배출계수 존재 (벧짚사용 보정계수)
5-4	메탄저감사료	유지정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율 (REM)	2006 IPCC GL	계수의 적합성 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 있음 ¹⁵⁾)
		증체정미에너지에서 가소화에너지로 소비되는 비율 (REG)	2006 IPCC GL	
		YM(사료의 총에너지 중 메탄으로 전환되는 비율) 기본값 ($YM_{default}$)	2006 IPCC GL	

번호	방법론명	배출계수	출처	비고(열제목 고민)
		메탄전환계수: 분뇨처리 시스템에서 고형분 VS 중 메탄으로 전환되는 비율 (MCF ₃)	'2006 IPCC GL	
		가소화에너지 비율 (DE)	2006 IPCC GL	
		정미에너지 (NE _i)	2012 한국가축사양표준	계수의 신뢰도 확보되지 않음 (중장기 국가배출계수 개발계획 있음 ¹⁶⁾)
		대사에너지 (ME _i)	2012 한국가축사양표준	

국가배출계수를 우선 적용하여 감축실적에 대한 신뢰도와 적합성을 확보해야함에도 불구하고 일부 방법론에서 이를 적용하지 않고 있는 이유는 국가배출계수는 「국가 온실가스 통계 총괄 관리에 관한 규정」에 따라 매년 배출계수 개발과 검증, 승인이 이루어지고 있으나 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」의 감축 방법론은 이러한 방법론 개정이 일괄적이고, ‘정기적’인 절차를 통해 이루어지지 않기 때문이다. 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 시범운영 규정」¹⁷⁾에 따르면 방법론 검토 및 승인에 관한 사항은 심의위원회가 의결권을 가지고 있으며 그에 따른 방법론 개정 절차가 규정되어 있다. 그러나 이러한 방법론 개정을 ‘정기적’인 기간을 두고 시행하고 있다는 내용은 별도로 명시되어 있지 않다. 따라서 신규 승인된 국가배출계수를 감축사업의 방법론에 지속적으로 반영하기 위해서는 신규 국가배출계수의 승인 시기에 맞추어 농업부문 감축방법론에 새롭게 적용가능한 국가배출계수가 있는지 지속적으로 모니터링하고, 즉각 반영할 수 있도록 방법론 개정 체계를 검토하는 것이 필요하다.

표 34. 국가배출계수 개발·검증 규정

국가 온실가스 통계 총괄 관리에 관한 규정 (2010.12.31., 제정)	
제4장 국가 온실가스 배출·흡수 계수 및 활동자료 관리	
제16조(국가 온실가스 배출·흡수계수의 개발·검증)	
①	센터장은 연도별 국가고유 온실가스 배출·흡수계수 개발 및 검증 계획을 매년 3월 31일까지 수립하여야 한다. 이 경우 부문별 관장기관의 자체적인 국가고유 배출·흡수계수 개발계획을 반영하여야 한다.
②	센터장은 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증지침을 마련하고, 위원회의 확정을 거쳐 부문별 관장기관 및 관련기관에 제공하여야 한다.
③	부문별 관장기관의 장은 국가 온실가스 배출·흡수계수를 개발 후 그 결과를 센터에 제출하여야 한다.
④	센터장은 부문별 관장기관이 제출한 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발결과를 검증하고, 이를 위원회에 제출한다. 필요시 센터장은 검증에 필요한 일부 사항을 기술협의체를 활용하거나 외부 기관에 위탁할 수 있다.
⑤	위원회는 국가 온실가스 배출·흡수계수를 확정, 공표하여야 한다.

13) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
14) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
15) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
16) 온실가스종합정보센터. (2014.8) 배출계수 개발검증 계획
17) 2013.5.28., 일부개정

표 35. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론 검토 및 승인 규정

농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 시범운영 규정 (2013.5.28., 일부개정)	
제1장 총칙	
제5조(심의위원회의 역할)	심의위원회는 감축사업의 최고 의사결정기구로서 다음 각 호의 사항을 의결한다.
1.	등록신청 사업 타당성평가 결과에 대한 심의
2.	모니터링 계획 변경 평가 결과에 대한 심의
3.	검증기관의 감축실적 검증 결과에 대한 심의
4.	검증기관 및 감축사업자의 이의 신청 및 조치계획에 대한 심의
5.	감축사업 방법론 검토 및 승인에 관한 사항
6.	감축실적 인증 관련 주요 사항에 대한 심의
7.	검증기관의 지정 및 취소
8.	기타 농림축산식품부 장관이 필요하다고 인정하는 사항

2. 불확도 평가방안 현황 및 선행연구

국가배출계수 개발·검증 지침은 배출계수 개발 시 고려해야 할 주요 사항 중 하나로 불확도 평가를 수행할 것을 제시하고 있다. 본 연구에서 개발하고 있는 경종 및 축산 부문의 배출계수를 감축제도 방법론에 적용하기 위해서는 불확도 평가가 수행되어야 하며 이를 위해 앞서 3장에서 불확도에 대한 기본 개념 및 평가 방법 등을 살펴보았다.

국가배출계수를 등록하기 위해서는 배출계수와 함께 불확도를 의무적으로 제시하도록 하고 있으나 우리나라 국가인벤토리 보고서에서는 벼 재배 메탄 배출량에 대해 불확도 값을 제시하지 않고 있음을 확인하였다. 해외 선진국에서는 국가인벤토리 보고서 상에 벼 재배 배출계수에 대한 불확도 값을 제시하고 있으나 불확도 산정 방법에 대해 상세히 기술하고 있지는 않다.

벼재배 및 축산 부문에 적합한 불확도 평가 방법을 적용하기 위하여 벼 재배 국가배출계수 개발 과정을 다룬 국내외 논문을 검토하였으나 관련 논문 역시 불확도 산정에 대한 구체적인 내용은 제시하지 않고 있다.

IPCC 가이드라인 역시 불확도 산정절차에 대해 일반적이고 개론적인 수준에서 서술되어 있어 벼 재배 배출계수에 대한 구체적이고 상세한 불확도 산정 가이드라인은 공식적으로 존재하지 않았다. 또한 농업 부문 온실가스 인벤토리 산정기관인 농업과학원과 축산과학원이 소속된 농촌진흥청에 질의한 결과 현재 공식적인 배출계수 불확도 산정 가이드라인은 존재하지 않음을 확인하였다.

불확도 산정에 관련된 국제표준 및 국내외 국가인벤토리를 검토한 결과 불확도 산정 방법은 크게 두 가지가 이용되고 있었다. 하나는 측정자료의 분포로부터 표준편차를 구하는 방법과 다른 하나는 에너지 부문 사업장 고유 배출계수 개발시 활용되고 있는 것으로 측정기기의 오차를 조합하여 불확도를 산정하는 것이다.

가. 측정기기의 허용오차를 활용한 불확도 산정

현재 산업 부문에서 활용하고 있는 불확도 산정방법은 국제표준화기구(International Organization for Standardization, 이하 ISO)에서 제시한 불확도 평가방법에 기초한다. ISO는 측

정의 불확도를 측정 결과에 대한 불확도로 간주하여 측정기기의 불확도를 이용하여 계량값에 대한 불확도를 추정하고 있다.

이러한 방식의 불확도 산정방법을 채택할 경우 실험에 이용되는 측정기기의 불확도가 주요한 불확도 결정인자이다. 따라서 산업 부문에서는 측정기기 자체의 불확도 값으로 측정의 불확도를 산정하고 있다. 농업 부문의 불확도 산정 방법 역시 산업 부문에서 활용하고 있는 방법을 검토하여 활용할 수 있다.

나. 측정 데이터의 분포를 활용한 불확도 산정

측정 데이터의 분포를 활용한 불확도를 산정방법은 IPCC 가이드라인에서 제시된 오차 전파법 및 몬테카를로 방법이 대표적이다.

또한 최근 해외 학술저널에 우리나라 벼 재배 메탄 배출량 데이터를 활용하여 오차 전파법과 몬테카를로 방법이 아닌 다른 방법을 적용하여 불확도를 평가한 논문이 게재되었다. 해당 논문의 저자들은 표준과학연구원, 국가배출계수 개발 통계 심의위원회, 농업과학원 등 농업 부문 온실가스 통계 인벤토리와 관련이 있는 주요 기관에 소속되어 있어, 국가인벤토리 수준의 불확도 산정방법으로 활용 가능할 것으로 보인다.

앞서 3장에서 IPCC가이드라인 검토를 통해 오차 전파법 및 몬테카를로 방법을 살펴보았으므로 여기서는 앞서 제시된 측정기기의 오차를 이용한 불확도 평가방법과 비교하기 위하여 위 연구논문에서 제시하고 있는 두 가지 불확도 산정 방법을 추가로 검토하여 불확도 산정 가이드라인 개발에 활용하기로 한다.

■ 실험설계

불확도 산정에 이용된 벼 재배 메탄 배출량 측정 데이터는 농업과학원 벼 재배 메탄 측정 실험실에서 얻어진 것으로 총 12개 챔버에 벼 모종을 식재하고 각 세 개 챔버마다 벼 답수 방법을 상시답수, 중간낙수 1주, 2주, 3주의 네 가지로 다르게 처리하여 재배하였다. 12개 챔버에 대하여 2~3일 간격을 두고 메탄 순 배출량 (net flux) 를 측정한 결과와 동일한 3챔버별 평균 및 표준편차는 다음 표와 같다.

이러한 실험 처리의 목적은 다음과 같다.

(i) 동일한 처리를 가하고 동일한 날에 측정한 세 개 챔버의 메탄 배출량의 서로 간의 차이는 측정자료의 공간적 변동 (spatial variability) 을 의미한다.

(ii) 하나의 챔버에 대한 서로다른 측정일 별 메탄 배출량의 차이는 측정자료의 시간적 변동 (temporal variability)을 의미한다.

표 36. 챔버별, 일별 측정된 메탄배출량

Irrigation condition	Replicate chamber ^a	Measurement date ^b				
		6/7	6/10	6/14	6/17	6/21
Continuous flooding	1	0.845	1.986	1.136	3.779	1.784
	2	0.106	0.597	1.174	0.614	1.088
	3	0.204	5.770	1.435	4.073	1.722
Intermittent flooding, 1-week drainage	1	0.160	0.284	1.283	3.943	1.558
	2	-0.047	-0.016	1.363	1.723	1.603
	3	0.000	-0.190	0.730	4.400	1.480
Intermittent flooding, 2-week drainage	1	0.288	1.633	1.372	5.268	2.801
	2	-0.414	0.512	0.471	1.052	0.810
	3	-0.390	-0.047	0.190	0.787	0.440
Intermittent flooding, 3-week drainage	1	-0.016	1.298	3.330	2.331	1.356
	2	-0.309	0.078	0.442	0.399	0.984
	3	-0.333	0.475	0.732	2.849	0.789

표 37. 측정일별(i) 동일 실험 처리된 3개 챔버별 메탄 배출량의 평균과 표준편차

i	Date	Continuous flooding		Intermittent flooding with 1-week drainage		Intermittent flooding with 2-week drainage		Intermittent flooding with 3-week drainage	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD
1	6/7	0.385	0.401	0.037	0.108	-0.172	0.399	-0.219	0.177
2	6/10	2.784	2.677	0.026	0.240	0.699	0.855	0.617	0.622
3	6/14	1.248	0.163	1.125	0.345	0.678	0.618	1.501	1.590
4	6/17	2.822	1.918	3.355	1.432	2.369	2.514	1.860	1.291
5	6/21	1.531	0.385	1.547	0.062	1.351	1.270	1.043	0.288
6	6/24	3.476	1.262	3.079	0.513	3.407	1.863	1.324	0.546
7	6/28	4.688	2.676	3.093	0.541	3.489	2.345	2.854	0.541
8	7/1	3.372	1.465	2.278	0.864	2.977	1.674	2.994	0.978
9	7/5	1.935	0.437	1.691	1.725	0.781	1.591	1.237	0.706
10	7/8	3.234	0.913	1.398	0.864	1.439	0.651	1.896	1.022
11	7/12	3.291	1.026	2.055	0.439	1.745	0.806	2.485	0.736
12	7/15	2.855	0.427	2.515	0.794	2.464	0.486	3.858	1.683
13	7/19	7.386	3.003	5.210	1.278	4.689	1.034	5.811	1.320
14	7/22	3.078	0.755	0.852	0.523	0.878	0.385	1.002	0.443
15	7/24	2.982	0.648	1.463	0.922	0.479	0.124	0.416	0.197
16	7/26	4.415	0.704	1.478	1.469	1.062	0.527	0.787	0.228
17	7/29	6.732	1.177	2.605	2.070	1.303	0.711	0.357	0.044
18	7/31	6.244	0.089	3.772	2.980	3.358	1.234	-0.221	0.083
19	8/2	6.495	1.062	3.656	2.331	2.137	0.038	-0.075	0.369
20	8/5	6.520	1.377	4.793	2.864	3.152	0.707	-0.432	0.401
21	8/9	10.793	1.286	6.499	3.225	5.960	2.427	0.469	0.584
22	8/12	13.043	0.820	9.889	5.063	6.149	4.859	0.870	0.449
23	8/16	11.698	6.370	6.659	1.379	5.252	0.446	0.674	0.305
24	8/26	2.663	3.777	2.973	2.702	2.996	2.114	0.630	1.015
25	8/30	6.441	0.889	5.485	1.833	6.482	1.120	1.410	0.571
26	9/6	7.924	6.300	3.885	1.541	5.862	0.678	1.764	0.677
27	9/9	3.458	1.082	2.748	0.467	3.528	1.341	1.273	0.520
28	9/13	16.015	9.557	15.425	12.606	8.032	1.805	2.212	0.477
29	9/16	13.223	3.106	6.022	0.637	15.413	8.886	2.706	0.433
30	9/20	6.344	4.402	6.754	4.276	-0.723	0.481	1.849	0.395
31	9/27	5.431	1.741	5.119	3.006	2.445	1.362	3.090	0.805
32	9/29	26.001	11.956	11.207	2.288	1.165	1.389	3.317	2.212
33	10/1	3.479	2.265	2.191	1.517	-0.227	0.190	0.299	0.604
34	10/4	0.086	0.224	0.080	0.122	-0.050	0.138	-0.103	0.075
35	10/7	0.225	0.155	0.060	0.123	-0.097	0.090	-0.125	0.096
36	10/11	-0.205	0.050	0.585	0.526	-0.740	0.215	1.231	0.720
37	10/14	-0.177	0.030	-0.227	0.113	-0.205	0.051	-0.098	0.098
\bar{x}	S_p	5.457	3.326	3.553	2.778	1.367	0.792	2.690	2.033

Abbreviations: AM = arithmetic mean; SD = sample standard deviation.

■ 불확도 산정방법

해당 논문은 위와 같이 얻어진 벼 재배 메탄 배출량의 불확도를 산정하기 위해 측정 데이터의 분포를 이용하여 Pooled Standard Deviation (PSD) 과 Standardized t Bootstrap Method (STBM)을 이용하고 있다.

- Pooled Standard Deviation (PSD)

측정자료의 변동이 시간적 (측정일별), 공간적 (챔버별)으로 정규 분포를 따른다고 가정할 수 있을 때 다음과 같이 Pooled Standard Deviation 을 구하여 불확도를 산정하는 방법이 기존의 표준편차를 사용하는 방법보다 적합하다.

$$S_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) S_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \right)^{1/2}$$

단, S_p 는 측정된 데이터의 Pooled Standard Deviation

m 은 총 측정 일수

n_i i 번째 날에 측정에 이용된 동일한 실험조건(treatment)을 가한 챔버의 수

S_i i 번째 날 측정된 메탄 배출량의 표본 표준편차 $S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 / (n_i - 1)}$

Pooled Standard Deviation으로 도출되는 불확도 값은 다음과 같다.

$$U_{p,rel}(\bar{X})(\%) = \frac{Z_{\alpha/2} S_p}{\bar{X} \sqrt{N}} \times 100$$

- Standardized t Bootstrap Method (STBM)

실제 실험에서 측정되는 데이터는 측정 횟수 등의 한계로 정규분포를 가정하기 어렵다. 이 경우 기존에 IPCC 가이드라인에서는 몬테카를로방법을 제시하고 있으나 이는 어떤식으로든 기존에 알려진 확률밀도함수의 형태를 가정해야하므로 측정자료의 표본크기가 너무 작거나 확률 분포를 가정하기 어려울 경우 사용할 수 없다.

이에 대한 대안으로 확률분포에 대한 가정을 하지 않는 비모수적 방법 (nonparametric method)인 Standardized t Bootstrap Method (STBM)이 제시되었다. STBM은 관측된 데이터셋으로부터 무작위로 수많은 리샘플링(Resampling)을 거쳐 얻어진 샘플로부터 통계값을 구하고 이를 바탕으로 원래 데이터 셋의 불확도를 평가하는 방법이다. 표본의 크기가 작아 정규성 가정이 어려울 경우 적용 가능하기 때문에 적용범위가 넓다.

$$t_b^* = \frac{\bar{X}_b^* - \bar{X}}{\hat{\sigma}_b^*}$$

$$U_{rel,B,lower}(\bar{X})(\%) = - \frac{t_{b,(1-\alpha/2)}^* \hat{\sigma} / \sqrt{N}}{\bar{X}} \times 100$$

$$U_{rel,B,upper}(\bar{X})(\%) = \frac{t_{b,(\alpha/2)}^* \hat{\sigma} / \sqrt{N}}{\bar{X}} \times 100$$

단, $U_{rel,B,upper}, U_{rel,B,lower}$ 는 평균 메탄배출량 불확도의 상한과 하한

\overline{X}_b^* 는 b번째 부트스트랩 샘플(resample)의 평균

$\hat{\sigma}_b^*$ 는 b번째 부트스트랩 샘플(resample)의 표준오차

\overline{X} 는 샘플의 평균

N 은 데이터 셋의 크기

앞서의 실험설계에 따른 실험데이터가 정규성을 만족하는지 다음과 같이 측정자료를 히스토그램으로 표현한 결과 정규성 가정이 어렵다고 판단되었다. 이에 따라 PSD 와 STBM 중 후자가 더 불확도 평가에 적합한 방법론이라는 결과를 도출하였다.

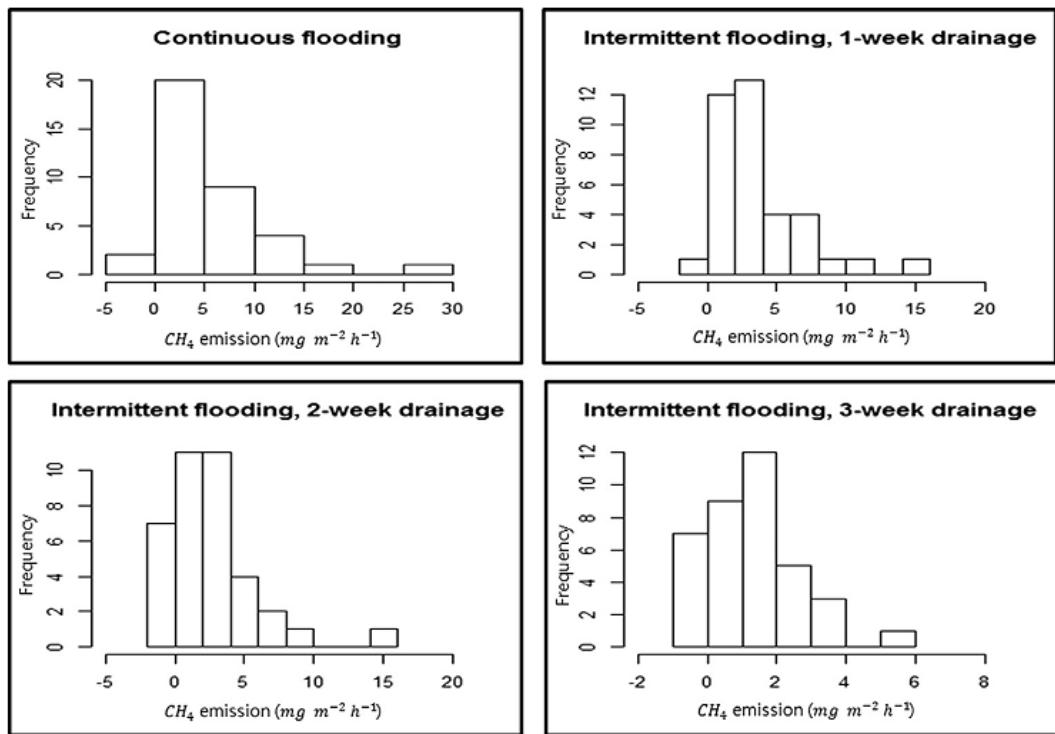


그림 6. 실험처리별로 측정된 메탄 배출량에 대한 히스토그램

■ 불확도 산정 결과 비교

PSD와 STBM을 적용했을 때 불확도 산정 결과를 비교한 결과 PSD의 불확도값이 STBM보다 과소 추정되는 것으로 나타났다. 따라서 실제 측정자료가 정규성에 부합하지 않아 PSD를 사용하기 적합하지 않은 경우 불확도가 과소 추정되는 문제점이 있으므로 이 경우에는 STBM을 적용하는 것이 적합하다는 결론을 도출하였다. 즉, 측정자료의 분포특성에 맞도록 적합한 방법을 선별적으로 사용해야 한다.

표 38. PSD를 적용한 물관리 방법별 평균 메탄 배출량과 불확도

Irrigation method	Average ^a	95% Confidence level		Relative uncertainty (%)	
		Lower limit	Upper limit	Lower	Upper
Continuous flooding	4.026	3.643	4.433	-9.530	10.11
Intermittent flooding with 1-week drainage	2.497	2.249	2.761	-9.927	10.61
Intermittent flooding with 2-week drainage	1.057	0.940	1.180	-11.12	11.62
Intermittent flooding with 3-week drainage	1.848	1.637	2.070	-11.39	12.03

^a Average values were calculated by exponential transformation of the average of log-transformed data.

표 39. STPM을 적용한 물관리 방법별 평균 메탄 배출량과 불확도

Irrigation method	Size of each sub-sample	Size of bootstrap samples	Sampling method	Sample average	95% bootstrap confidence level		Relative uncertainty (%)	
					Lower limit	Upper limit	Lower	Upper
Continuous flooding	3	1000	With replacement	5.457	3.957	7.651	-27.48	40.20
Intermittent flooding with 1-week drainage	3	1000	With replacement	3.553	2.673	4.927	-24.76	38.68
Intermittent flooding with 2-week drainage	3	1000	With replacement	2.690	1.839	4.024	-31.64	49.58
Intermittent flooding with 3-week drainage	3	1000	With replacement	1.367	0.966	1.847	-29.33	35.16

■ 1차년도 불확도 평가 계획 수립 방향

따라서 불확도 산정방법은 크게 측정데이터의 분포를 활용하는 방법과 측정기기의 불확도를 활용하는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 측정 데이터의 분포를 이용하여 불확도를 평가할 경우 분포의 형태가 정의되어 있는지 그리고 그것이 정규성을 만족하는지 등의 조건에 따라 적용 가능한 방법이 다르다.

따라서 1차년도 사업에서는 두 가지 종류의 불확도 산정 방법론을 모두 활용하여 불확도를 산정하고 적합한 산정방법론을 선택하도록 한다. 이를 위하여 두 가지 방법을 이용하여 불확도 평가를 수행하고 그 결과를 평가 및 비교하기 위하여 필요한 기초자료를 획득한다.

표 40. 불확도 평가방법 선택을 위한 실험연구팀 요청 자료 목록

산정방법	요청 자료 목록
(방법1) 측정기기의 허용오차를 기준으로 불확도 평가	현재 실험 과정에서 이용되는 모든 측정 장비(온도계, 메탄 농도 측정기 등)의 허용오차 스펙
(방법2) 측정데이터의 분포를 기준으로 불확도 평가	현재 측정기기를 통해 수집되고 있는 모든 로그 데이터

두 가지 산정방법론을 이용하여 불확도 산정을 수행하고 그 과정에서 데이터 이용의 한계점을 파악하고 불확도의 크기를 비교한다. 향후 전문가 자문을 거쳐 최종적으로 개발된 배출계수의 불확도 평가에 적합한 방법을 선택한다.

다. 불확도 분석의 의미

농업 부문 감축사업을 통해 농가가 감축한 온실가스의 양에 대한 신뢰도를 확보하기 위해서는 정확한 불확도 평가가 필요하다. 불확도는 산정된 온실가스 배출량이 얼마나 신뢰할만한

값인지를 정량적으로 나타내는 지표이다. 불확도 평가를 통해 다른 배출량과 불확도 크기를 비교하고, 새로운 방법론이 적용되었을 경우 이전의 방법론과 배출량 산정 정확도를 비교할 수 있다(Monni et al., 2007). 따라서 정확한 불확도 평가는 온실가스 배출량 산정의 신뢰도를 높이기 위한 첫 단계이다.

본 절에서는 향후 개발되는 농업 부문 감축 배출계수에 대한 불확도 평가 계획을 수립하기 위하여 불확도에 대한 기본 이론과 국내외 온실가스 배출량 산정과정에서의 불확도 평가 현황에 대해 검토한다. 이를 바탕으로 농업 부문 감축제도의 배출계수 개발 시 불확도 평가를 위해 고려해야할 사항을 도출할 수 있다.

(1) 불확도의 정의

온실가스 배출량을 산정하는 과정은 측정 (measurement) 을 수반한다. 이 측정은 임의의 배출원에서 대기로 직접 배출되는 온실가스 배출량에 대한 측정일 수도 있고 배출량을 추정 또는 계산하기 위한 매개변수에 대한 측정일 수도 있다. 측정하고자 하는 값을 측정량 (measurand)이라고 하는데 우리가 측정량에 대해 가지고 있는 정보의 양에 한계가 있기 때문에 (ISO/IEC, 2008) 측정량은 결코 단 하나의 값으로 정해질 수 없다. 따라서 측정결과를 보고할 때는 측정된 값과 함께 반드시 측정량에 대한 불확실성을 나타내는 불확도 (uncertainty)를 보고함으로써 이러한 불완전한 기술을 보완한다. 이와 같이 불확도라는 용어는 직관적으로 쉽게 이해할 수 있는 용어이지만 오차 (error), 정확도 (accuracy), 정밀도 (precision) 등 불확도와 혼동될 수 있는 유사한 용어들이 존재하여 실제 사용에 있어서는 그 구분이 모호하다. 이에 대해 불확도 분석이 필요한 여러 분야에서 불확도의 정의를 정립하고 있다.

국가 온실가스 배출량 산정·보고·검증 절차에 대한 국제적 표준을 제시하고 있는 2006 IPCC GL에서 불확도는 “가능한 값들의 범위와 가능성 (likelihood)을 특징짓는 확률밀도함수 (probability density function, 이하 PDF)로서 기술될 수 있는, 변수의 진실한 값에 관한 지식의 결여”로서 정의된다 (IPCC, 2006). 여기서 확률밀도함수 (PDF)는 우리가 모르는 미지의 값에 대해 그 값이 취할 수 있는 범위와 그 범위 내에 그 값이 존재할 확률을 나타내는 함수이다. 즉, 우리가 참값 (true value)에 대한 충분한 지식이 없기 때문에 참값이 존재하는 범위와 그 범위에 참값이 존재할 확률로서 참값을 기술하며 이러한 지식의 부족이 곧 불확도라고 정의하고 있다. 이러한 불확도 정의는 본질적으로 불확실성에 대한 개념을 의미하며 이것이 확률밀도함수로 정량화 가능하다는 의미를 내포하고 있다.

표 41. 2006 IPCC GL에서 불확도의 정의

- (국문) 가능한 값들의 범위와 가능성(likelihood)을 특징짓는 확률밀도함수(PDF)로서 기술될 수 있는, 변수의 진실한 값에 관한 지식의 결여. 불확도는 기본 프로세스 및 추론기법에 관한 지식뿐만 아니라 적용가능한 자료의 질과 양에 좌우되는, 분석자의 지식 상태에 좌우된다.
- (영문) Lack of knowledge of the true value of a variable that can be described as a probability density function (PDF) characterising the range and likelihood of possible values. Uncertainty depends on the analyst's state of knowledge, which in turn depends on the quality and quantity of applicable data as well as knowledge of underlying processes and inference methods.

※ 출처 : IPCC, 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
 [국문번역] 환경부·환경관리공단, 「국가 온실가스인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인」

측정의 결과가 반드시 불확도를 수반하고 있기 때문에 측정학 (metrology) 분야에서 불확도는 매우 중요하게 다루어진다. 측정과 불확도에 대한 국제적인 표준을 제정하기 위해 국제도량형국 (the International Bureau of Weights and Measures, 이하 BIPM), 국제전기기술위원회 (the International Electrotechnical Commission, 이하 IEC), 국제임상화학진단검사의학연합 (the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, IFCC), 국제표준화기구 (the International Organization for Standardization, ISO), 국제순수응용화학연맹 (the International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC), 국제순수응용물리연맹 (the International Union of Pure and Applied Physics, IUPAP), 국제법정계량기구 (International Organization of Legal Metrology (OIML), 국제시험소인정협약체 (the International Laboratory Accreditation Cooperation, ILAC) 등 8개 기관은 측정학지침합동위원회 (the Joint Committee for Guides in Metrology, 이하JCGM)를 구성하여 「측정 불확도 표현 지침」 (Guide to the expression of uncertainty in measurement, 이하 GUM)과 「국제측정학용어집」 (International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms, 이하 VIM)을 발간하였다. GUM과 VIM에서 규정하는 불확도는 측정의 불확도 (uncertainty of measurement)로서 “측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정된 값의 산포 특성을 나타내는 파라미터” (GUM), “측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터” (VIM) 로서 정의된다.

표 42. GUM의 측정불확도 정의 (ISO/IEC Guide 98-3:2008)

- (국문) 측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정된 값의 산포특성을 나타내는 파라미터
- (영문) parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand.

※ 출처 : ISO/IEC, (2008), Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement
 [번역] 한국표준과학연구원, (2010), 「측정불확도 표현지침」

표 43. VIM의 측정불확도 정의 (ISO/IEC Guide 99:2007)

- (국문) 사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터
- (영문) non-negative parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a measurand, based on the information used

※ 출처 : ISO/IEC, (2008), International vocabulary of metrology - concepts and associated terms (VIM)
 [번역] 한국표준과학연구원, 2010, 「국제측정학용어집 - 기본 및 일반개념과 관련 용어 (VIM)」

이러한 정의는 불확도를 측정결과의 산포 (또는 분산) 특성을 나타내는 “값 (parameter)”으로 규정하고 있으며 2006 IPCC GL이 불확도를 “지식의 결여”라는 정성적인 개념으로 정의한 것과 대비되는 것처럼 보인다. 이는 IPCC GL이 불확도를 정의함에 있어 불확도의 원인을 개념에 포함하고 있기 때문이다. 이에 대한 자세한 내용은 후에 “불확도의 원인”에서 다시 기술한다.

■ 오차와 불확도

일반적으로 언급되는 ‘불확도’ 라는 용어는 측정자료의 측정불확도를 의미한다. 이는 제약된 환경에서 측정된 결과가 얼마나 정확히 측정되었는지를 말해주는 지표로서 측정결과의 신뢰성을 수치로 나타낸 것이다. IPCC 2006 가이드라인¹⁸⁾이나 GPG 2000¹⁹⁾에서 제시하는 불확도 산정방법은 주로 ISO규정을 준용하고 있다. 그리고 ISO의 불확도 산정지침²⁰⁾과 국제측량학 용어집²¹⁾은 ‘측정불확도’ 를 전제로 만들어진 것이기 때문에 IPCC가이드라인의 불확도 지침도 상당부분 측정불확도를 전제하고 있는 것도 사실이다.

그러나 IPCC가이드라인에서 설명하는 불확도가 측정불확도만을 전제하고 있는 것은 아니다. 데이터 획득, 관리, 보고과정에서 발생할 수 있는 모든 불확실성을 총체적으로 포함하고 있으며 그 불확실성을 표현하는 방식 중의 하나가 측정불확도이다. IPCC 가이드라인에서 불확도의 개념과 산정방식을 제시하고 있지만 그 범위가 넓고 구분이 모호한 측면이 있다. 그리고 일반적인 불확실성 개념, 통계적인 오차개념, 측정불확도 개념이 혼용되어 사용되고 있다. 따라서 불확도를 산정하거나 가이드라인을 제시하기에 앞서 불확도에 대한 명확한 개념정의와 분석경계 설정이 필요하다.

많은 문서에서 불확도를 다른 유사용어와 혼동하여 사용하고 있다. 특히 불확도와 가장 혼동을 일으키는 용어는 오차 (error)이다. GPG 2000과 VIM은 다음과 같이 오차에 대해 비교적 공통된 정의를 내리고 있다.

표 44. GPG 2000과 VIM에서 오차의 정의

- **(GPG 2000)** a general term referring to the difference between an observed (measured) value of a quantity and its “true“ (but usually unknown) value and does not carry the pejorative sense of a mistake or blunder
- **(VIM)** measured quantity value minus a reference quantity value

※ 출처 : IPCC, 2000, Good Practice Guidance.

※ 출처 : ISO/IEC, (2008), International vocabulary of metrology - concepts and associated terms (VIM)

[번역] 한국표준과학연구원, 2010, 「국제측정학용어집 - 기본 및 일반개념과 관련 용어 (VIM)」

위 두 지침에서 오차를 정의하는데 공통적인 근거가 되는 가정은 “참” 값의 존재이다. 그러나 이 참값은 우리가 알 수 없는 값이기 때문에 참값과 측정값과의 차이로 정의되는 오차 또한 알 수 없다. 따라서 이러한 오차에 기반 하여 불확도에 접근하는 “오차접근법”은 불확도를 분석하는데 있어 비효율적이며 불필요한 접근이다. 때문에 GUM은 “측정결과는 단순히 측정량을 추정한 값이며 그 결과의 불확도는 측정량을 합리적으로 추정한 값의 산포의 척도라는 사용적인 관점 (operational views)을 채택함으로써 불확도와 알 수 없는 양의 “참” 값이나 오차 사이의 자주 혼동 되는 연결고리를 실질적으로 끊어버렸다” (ISO/IEC Guide 98-3:2008 내 E.5.1; 한국표준과학연구원, 2010)

그러나 불확도에 대한 개념으로 “오차접근법”을 택하더라도 이것이 측정결과나 측정결과

18) IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

19) IPCC. (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories(GPG 2000)

20) ISO GUM JCGM 106:2012, 104:2009, 101:2008 (GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)

21) ISO VIM JCGM 200:2012 (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)

의 불확도 수치에 영향을 미치는 것은 아니며 그 계산결과는 동일하다. 그럼에도 불구하고 GUM은 오차와 불확도 사이의 혼동을 지양할 것을 권고하며 “측정값과 그 값의 변동성 (variability)에 초점을 맞추어” 접근법을 채택하여 불확도를 정의하고 평가함에 있어 오차에 대한 어떠한 형태의 언급도 필요하지 않도록 만들었다(ISO/IEC Guide 98-3:2008 내 E.5.3과 E.5.4).

통계학적 분석에서는 미지의 참값과 수집된 자료의 차이를 설명하기 위해 오차라는 개념을 도입한다. 즉 통계적 오차란 사실상 계측기에 의해 계측된 값이 미지의 참값과 같을 수 없는 현실적 한계를 고려한 것이다. 이를 도식화하면 계측을 통해 측정된 값(Y_i)은 미지의 참값(βX_i)과 오차(e_i)의 합으로 표현된다. 즉 계량화된 불확도란 이 오차(e_i)와 관련된 값이다.

$$Y_i = \beta X_i + e_i$$

여기서 통계적 오차(e_i)는 그 속성에 따라 계통오차(systematic error)와 우연오차(random error)로 구분된다. 전자는 일관된 성향이나 방향성이 있어서 오차의 원인을 식별하는 것이 가능한 오차이고, 후자는 일관된 성향이 나타나지 않아 그 원인을 식별하는 것이 어려운 오차이다.

계통오차는 이론이나 모델에 오류가 있거나, 측정기기가 부정확하거나 관측자의 습관적인 버릇 등에서 기인한 오차로서 그 크기와 부호를 추정하고 보정할 수 있는 오차이다. 즉 어느 정도 일관적인 규칙을 따르는 오류로서 노력여하에 따라 원인을 통제하거나 오차범위를 줄이는 것이 가능하다. 예를 들어 이론의 오류는 일종의 보정계수를 구해 수정할 수 있고 측정기기의 경우 교정에 의해 오차를 줄일 수 있다. 그리고 관측자의 오차는 계통적으로 잘못된 습관을 파악해 고치거나 둘 이상인 관측자의 측정값을 비교함으로써 수정이 가능하다.

한편 측정값을 얻을 때에는 계통오차 뿐만 아니라 우연오차도 항상 발생한다. 우연오차는 본질적으로 원인을 알기 힘들고 오차의 분포를 예측하기도 어렵다. 즉 통제된 상황에서 같은 방법으로 관측을 하더라도 일관적이지 않은 임의의 오차가 발생할 수 있는데 이 오차가 우연 오차이다. 우연오차는 관측값의 개수를 늘리는 등 데이터 수가 늘어날수록 오차의 평균이 작아지는 경향이 있다. 그리고 모집단으로부터 임의로 추출한 랜덤샘플의 수가 많으면 중심극한정리²²⁾에 의해 추출된 데이터의 표본평균은 정규분포를 띄게 된다.

즉 오차의 원인을 식별할 수 있으면 이 오차를 수정하거나 감소시킬 가능성이 있고, 오차의 발생이 임의적(random)이어서 그 원인을 파악하기 힘들면 이 오차는 통제하기가 어렵다. 전자가 계통오차, 후자가 우연오차에 해당한다.

우연오차를 식별하거나 통제하는 것이 어려움에도 불구하고 이를 간과할 수는 없다. 오히려 이 오차를 적극적으로 데이터화하고 관리할 필요가 있다. 배출량의 불확실성은 활동자료와 배출계수의 불확실성에 기인한 것이고, 이들 불확실성을 관리하는 것은 결국 에너지사용량 등 배출량을 관리하는 업체의 주요 의사결정과 관련된 것이다. 비교적 체계적 형태를 갖는 계통오차에 비해, 상대적으로 관리가 어려운 우연오차를 함께 관리하는 것은 곧 사업장 데이터의 ‘질’을 적극적으로 관리하는 것을 의미한다.

여기서 계통오차는 주로 측정불확도로 설명할 수 있다. 그리고 우연오차의 일부는 측정불

22) 중심극한정리(Central Limit Theorem): 모집단의 분포가 정규분포가 아니라도, 표본샘플 수가 늘어날수록 표본평균의 분포는 정규분포와 가까워진다는 이론. 이 이론을 이용하여 모집단의 분포를 모르거나 모집단이 정규분포가 아닌 경우에도 그 대안으로 표본평균의 정규분포성을 활용할 수 있음.

확도에 포함되고 그 이외의 우연오차는 측정불확도 이외의 영역에도 존재할 수 있다.

오차 이외에도 불확도를 설명하게 위해 같이 등장하는 유사 용어들에 대해 2006 IPCC GL은 다음과 같이 정의하고 있다. 아래의 용어역시 VIM과 GUM에서 정의하고 있으나 여기서는 비교를 위한 별도의 제시는 없다.

표 45. 정확도와 정밀도

- 정확도 (accuracy)

(영문) Agreement between the true value and the average of repeated measured observations or estimates of a variable. An accurate measurement or prediction lacks bias or, equivalently, systematic error.

(국문) 진실한 값과 반복 측정된 관찰치의 평균 내지 변수의 산정치 간의 일치. 정확한 측정 또는 예측은 편의 내지 체계적 오차가 없다.

- 정밀도 (Precision)

(영문) Agreement among repeated measurements of the same variable. Better precision means less random error. Precision is independent of accuracy.

(국문) 동일한 변수의 반복 측정치들 사이의 일치. 보다 나은 정밀도는 보다 작은 무작위 오차(random error)를 의미한다. 정밀도는 정확도에 독립적이다.

* 출처 : IPCC, 2006

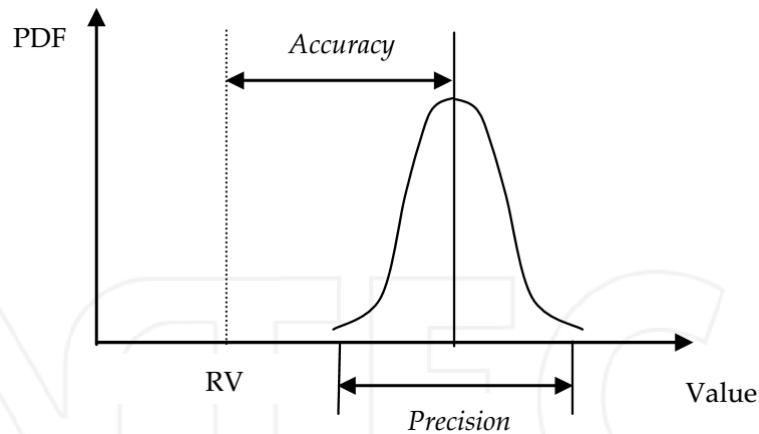


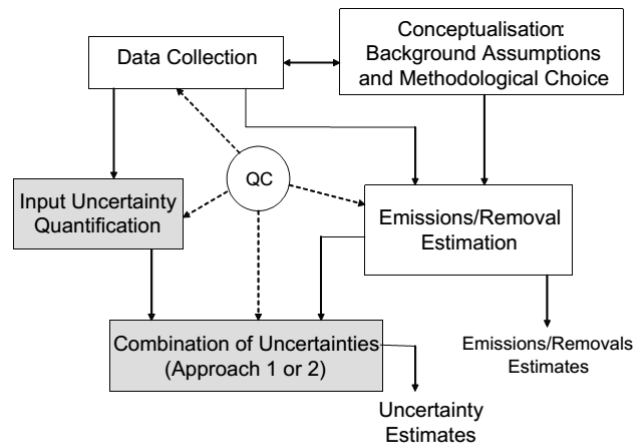
그림 7. 정확도와 정밀도의 개념 비교

Velychko & Gordiyenko (2012) 는 정확도와 정밀도의 개념적 차이를 그림을 통해 표현하였다([그림 1] 참고). 위 정의에 따르면 정밀도는 우연오차 (random error)를 의미하는 개념이고 정확도는 계통오차 (systematic error)와 관련된 개념이다. 이로 인해 “반복측정을 통해 얻어진 값의 분산특성” 으로 정의되는 VIM의 불확도는 우연오차와 동일한 것으로 여겨진다. 2006 IPCC GL은 정밀도가 불확도와 반비례하다고 기술하는 한편, GPG 2000에서는 불확도는 측정의 정확도와 정밀도가 모두 관련된 개념이라고 기술하고 있다.

(2) 불확도의 원인

배출량 산정 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 불확도를 정확하게 평가하고 이를 최소화해야 한다. 본 절에서는 불확도가 발생하는 원인을 살펴보고 각 요인별 대응 전략을 살펴본다.

불확도 요인은 연구별로 구분이 다르지만 크게 모집단 정의, 표본 추출의 대표성, 측정기기의 한계, 시료, 현장 조건 등이 있다. 2006 IPCC GL은 불확도가 발생하는 원인으로 크게 (1) 개념화 (conceptualisation), (2) 모형 (model), (3) 입력데이터와 가정 (input data and assumption, 예를 들어 배출계수와 활동자료)을 제시하고 있다. 개념화는 인벤토리의 구조에 대한 가정들을 의미하며 불확도 평가의 첫 단계이다. 여기에는 배출가스의 종류, 온실가스 배출 과정, 배출원의 경계 (공간적, 시간적) 등에 대한 가정들이 포함되는데 이 개념화 과정 전반은 실제 배출량을 산정하기 위해 필요한 데이터 수집 단계에 영향을 주고 직접 측정이 아닌 배출계수와 활동자료로 추정되는 배출원에 대해 배출량 추정결과에도 일차적인 영향을 준다. 반면 데이터 수집 단계가 개념화에 영향을 줄 수도 있는데 실제로 수집가능한 데이터가 아닌 경우 대리변수들을 사용하는 등의 또 다른 가정이 추가되기 때문에 인벤토리 구조에 대한 개념화에 영향을 주게 된다. 그리고 데이터 수집과정은 배출량 산정에 필요한 인자 (배출계수, 활동자료와 기타 인자)의 불확도에 영향을 주고 배출량 산정단계는 산정과정에 필요한 각 인자들의 불확도가 최종적으로 해당 배출원의 배출량의 불확도를 산정하는데 영향을 미친다. 따라서 온실가스 인벤토리 작성의 품질관리 (Quality Control, QC)는 이러한 모든 절차에 대해 수행하도록 권장된다. 이상의 불확도 평가에 영향을 미치는 각 절차는 아래 그림에 다시 나타나 있다([그림 2] 참고).



Note: Shaded Boxes are the focus of this Chapter.

그림 8. 배출량 산정 절차와 불확도 발생단계

크게 3가지로 구분된 불확도 원인은 2006 IPCC GL에서 보다 자세하게 세분화 되며 각 원인에 대해 대응하는 방법이 제시되어 있다.

표 46. 불확도 요인별 대응전략

불확도 요인		대응 전략			
		산정방법론 및 모델 수정	통계적 기법 활용	전문가 판단	기타
모델	완전성 결여	○			
	모델자체의 오류 및 모델의 우연오차	○	○	○	
자료	데이터 부족			○	
	자료의 대표성 결여	○	○	○	
	임의표본추출의 오차		○		
측정 문제	계통오차		○	○	
	우연오차	○		○	
보고	보고시 오류		○	○	
기타	데이터 누락		○	○	

■ 측정 불확도의 요인

측정불확도는 측정에 영향을 주는 다음의 구성요소들에 의해 정해진다.

- ① 표준기류-상위표준기와의 비교를 통해 측정불확도 값이 교정성적서에 표기된다.
- ② 측정기기-기기자체의 특성(분해능, 검출한계, 진직도, 영점변화 등) 및 기기사용방법에 따라 불확도에 영향을 미친다.
- ③ 보정값-보정을 통해 조정된 값도 불확도에 영향을 미친다.
- ④ 측정자-측정자의 체온, 숙련정도, 눈금판독시의 편의(bias)등이 포함된다.
- ⑤ 환경-시험실의 온도, 습도 등
- ⑥ 시료-대표성이 없는 시료선정에 의해 나타난다.
- ⑦ 이론 및 자료-인용되거나 데이터분석에 사용되는 상수와 파라미터의 부정확한 값으로 인해 영향을 받고 측정방법 및 측정과정에서 사용되는 근사값과 여러 가지 가정에 의해 나타남.
- ⑧ 반복측정-외관상 같은 조건이지만 반복측정시 발생하는 변동이 포함된다.

표 47. 불확도 요인

구분	불확도 요인
정의	모집단 정의
대표성	샘플의 대표성
	시간적 대표성
	공간적 대표성
측정기기	측정기기의 검출한계
시료	시료의 안정성
	시료채취 도구
	시료채취
현장조건	현장측정
문서화	기록 및 문서화

(3) 불확도 평가방법

불확도는 현실에서 수집 가능한 데이터와 미지의 참값 사이의 차이를 수치로 나타낸 값이다. 불확도의 대상이 되는 값(예를 들어 배출계수)을 개발·보고할 때 그 보고대상에 대한 신뢰도를 높이기 위해 불확도를 최소화하는 노력이 필요하다. 불확도를 최소화하고자 하는 노력의 첫 단계는 모든 불확도 요인과 모든 불확도 산정방법을 고려해 정확하게 불확도를 계산하는 것이다.

2006 IPCC GL, VIM, GUM 등 국제적으로 불확도를 평가하는 방법은 크게 2가지로 분류된다. 각각 A형 불확도 평가와 B형 불확도 평가이다([표48] 참고). A형 불확도 평가에서 측정량 값이 특정 범위(range) 내에 일정한 확률로 특정범위(신뢰한계 confidence limit)에 놓이게 될 확률(신뢰수준 confidence level)은 측정값들의 분포형태 및 측정횟수에 따라 t분포 또는 정규분포로부터 구할 수 있는데, 이것이 바로 통계학에서 이용되는 신뢰구간(confidence interval)이 된다.

반복측정이 이뤄지지 않고 이전 측정자료, 문헌, 규격 등을 통해 측정량에 대한 이미 알려진 정보(상한 또는 하한 등)를 이용해 적합한 분포를 가정하고 이로부터 구해진 표준편차를 표준오차에 대신하여 불확도를 정의하는 방법을 B형 불확도 평가라고 한다.

불확도 평가 방법을 A형과 B형으로 나누었지만 이것이 앞서 설명한 불확도 원인과 대응되는 것은 아니다. 또한 앞서 기술한 오차의 성분으로 제시된 계통오차와 우연오차 역시 불확도의 A형 평가와 B형 평가와 일대일로 대응하는 것도 아니다. 간혹 A형 평가는 통계적 방법을 사용하기 때문에 반복측정값의 분포로 표현되는 우연오차를 측정하는 것이며 전문가 판단 등의 비통계적 방법을 사용하는 B형 평가는 계통오차를 평가하기 위한 방법이라고 혼동하는 경우가 있다. 그러나 A형 또는 B형이라는 용어의 구분을 불확도 평가 방법을 나누는 구분일 뿐이고 불확도의 성분이나 원인과 대응하는 것은 아니다. A형과 B형으로 평가방법을 구분한 목적에 대해 GUM은 서로 다른 방법을 거쳐 도출된 불확도 평가 결과를 합성하기 위한 것이라고 기술하였다. 우연오차 또는 계통오차는 각각을 따로 분리해서 측정할수 없으며 이를 합성하는 것도 불가능하다. 그러나 A형 평가와 B형 평가로 분리할 경우 사용자는 원하는 수준의 불확도를 평가하기 위해 A형 평가의 결과와 B형 평가의 결과를 합성할 수 있다. 또한 GUM은 우연오차와 계통오차를 평가하는 과정은 완전히 동일하며 두 성분은 동일하게 다루어진다고 기술하고 있다.

표 48. A형 불확도와 B형 불확도

A형 불확도 (반복측정이 가능한 경우)	B형 불확도 (반복측정이 어려운 경우)
관련 데이터가 존재하거나, 표본이 5개* 이상인 경우	표본이 5개 이하인 경우
①통계적으로 분포도출 불가능한 경우 · 단순 평균한 배출계수 이용 (정규분포를 가정함)	①전문가 판단 · 확률밀도함수 선정
②통계적으로 분포 도출 가능한 경우	②전문가 판단이 불가능한 경우

* 주 : IPCC GPG 2000에서 적절한 표본 수를 5개로 제시하고 있음.

(4) 불확도 합성

어떠한 배출원에 대한 배출량이 배출계수와 활동자료의 곱 또는 다른 매개변수들이 포함된 산정모델로 정의된다면 모델에 포함되는 매개변수들이 가지는 개개의 불확도는 해당 배출량의 불확도를 구하기 위한 자료가 된다. 이에 대해 IPCC는 불확도 합성 (combining uncertainties) 이라는 용어를 사용하여 구체적인 절차를 제시하고 있다.

불확도를 합성하는 방법은 크게 2가지가 있다. 하나는 오차전파법 (error propagation) 또는 오차 전파법 (error propagation) 이며 다른 하나는 몬테카를로방법 (Monte Carlo techniques) 이다. 두 방법 중 어느 것을 사용할 것인지는 순전히 배출량 산정에 요구되는 매개변수의 특성에 의존한다.

(가) 오차 전파법

오차 전파법은 배출량 산정모델을 구성하는 개개의 매개변수의 표준편차로 구해진 표준불확도를 이용하여 배출량의 불확도를 계산하는 방법으로 다음과 같다.

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 \dots}$$

위 식에서 U_{total} 은 매개변수 x_1, x_2, x_3, \dots 을 통해 구해지는 변수 (배출량 또는 배출계수 등)의 불확도이며 U_1, U_2, U_3, \dots 는 매개변수 x_1, x_2, x_3, \dots 의 표준편차로 구해지는 표준불확도 이다.

오차 전파법은 몬테카를로방법에 비해 적용이 간단하지만 다음과 같이 적용에 제약이 따른다.

표 49. 오차 전파법 적용 가정

- (1) 매개변수의 표준불확도를 구하기 위해 확률밀도함수의 형태에 대한 가정이 필요
- (2) 매개변수 간 상관성이 존재하지 않는다고 가정할 수 있는 경우에 사용
- (3) 표준불확도를 매개변수의 평균으로 나눈값이 0.3보다 클 경우 불확도가 과소추정될 우려가 있음.
- (4) 매개변수의 확률밀도함수가 비대칭형태일 경우 별도의 보정이 필요함.

참고로 오차전파법이라는 용어는 VIM 3판에서 불확도 전파법이라는 용어보다 적절하지 않다고 기술하고 있다. 이에 대해 VIM은 “불확도 전파식이 입력 매개변수의 확률분포의 표준편차와 같도록 잡은 입력매개변수의 불확도가 출력량의 불확도를 출력량의 확률분포의 표준편차와 같도록 잡았을 때 출력량의 불확도를 구할 수 있도록 합성하는 방법을 나타내고 있기 때문”임을 그 근거로서 서술하고 있다(VIM, 2007; 한국표준과학연구원 2008). 그러나 오차 전파법이라는 용어가 보다 보편적으로 사용되고 있으므로 본 연구 보고서에서는 불확도 전파법 대

신 오차전과법이라는 용어를 일괄적으로 사용한다.

(나) 몬테카를로방법

몬테카를로 방법은 불확도가 매우 크거나, 확률밀도함수의 분포가 비정규분포일 때 그리고 배출량산정을 위한 입력매개변수 간에 서로 상관관계가 있을 때 적용할 수 있는 방법이다.

수행절차는 다음과 같다. 먼저, 배출량을 구하기 위해 필요한 입력매개변수의 확률분포를 안다고 가정할 때 각 매개변수의 확률분포로부터 무작위 표본 (random sampling) 을 추출한다. 각 매개변수별로 추출된 하나하나의 무작위 수는 배출량 산정식의 입력값으로 사용되어 출력값 (배출량)을 만든다. 이러한 절차를 충분히 많은 수만큼 반복하면 입력매개변수의 임의의 값들로 배출량 값의 분포를 그릴 수 있으며 이를 이용하여 배출량의 확률밀도 함수를 추정할 수 있다. 확률밀도함수가 추정되면 이를 통해 출력량의 표준편차, 평균, 95% 신뢰수준을 도출할 수 있다. 몬테카를로방법은 다분히 수치적인 분석방법이며 무작위 샘플링의 횟수가 많아질수록 정밀도가 증가한다. 따라서 일반적으로 몬테카를로방법을 지원하는 통계 소프트웨어를 이용하여 분석을 수행한다. 이상의 분석 수행절차는 아래에 다시 도식화되어 있다.

그러나 몬테카를로 방법 역시 어느 경우에도 사용가능한 것은 아니다. 기본적으로 출력량에 대한 확률밀도함수를 추정하기 위해 입력량에 대한 확률밀도함수를 이용하고 있으므로 몬테카를로방법을 적용하기 위해서는 입력량 (배출계수, 활동자료 및 기타 매개변수)의 확률밀도함수에 대해 알고 있어야 한다. 이때 입력량의 확률분포는 반드시 정규성을 만족하지 않아도 되며 그 형태가 정의된 분포라면 적용 가능하다.

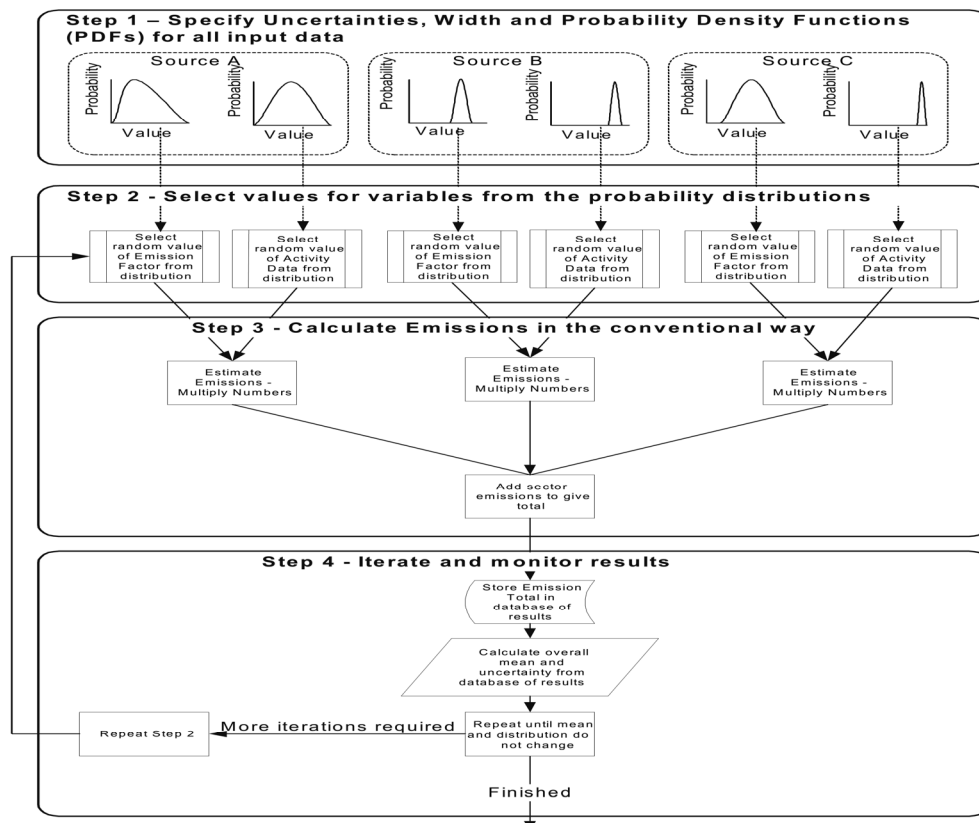


그림 9. 몬테카를로방법의 수행 절차

(5) 표준불확도, 합성불확도, 확장불확도

목표관리지침의 불확도 산정절차(표 2)를 살펴보면 불확도를 모형 불확도와 매개변수 불확도로 구분하여 산정하며 목표관리제의 대상인 사업체의 경우 측정데이터가 주가 되므로 측정 불확도의 산정방법과 동일하다.

측정불확도에서는 표본데이터의 불확도를 표준불확도와 확장불확도로 계산하며 표준불확도는 통계학의 표준오차의 개념을 이용하여, 확장불확도는 오차의 한계를 이용하여 정의한다. 불확도를 산정하기 위해서는 먼저 측정량(예를 들어 배출계수)을 얻기 위해 필요한 변수를 검토하여 불확도요인을 파악한다. 그리고 입력 값 또는 측정 값에 대한 불확도를 우선 산정한다. 이를 표준불확도라고 하며 계산값이 아닌 측정을 통해 얻어지는 1차적인 입력 변수에 대한 불확도를 산정하는 것이다.

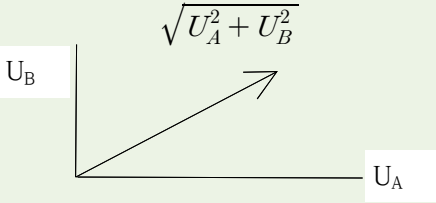
A형 평가의 경우 평균의 표준편차(표준오차)를 표준불확도로 이용한다. 우리가 원하는 값의 전체 불확도는 개개 불확도를 합성하여 구한다. 합성 불확도는 오차 전파법칙에 따라 계산하며 일반적으로 개개의 표준불확도 성분들의 제곱합의 제곱근으로 계산한다. 이렇게 합성한 합성 불확도에 신뢰수준, 유효 자유도에 따른 포함인자를 곱하여 확장불확도를 계산하는데 일반적으로 불확도 평가시 보고하는 불확도 값은 이 확장불확도이다. 불확도 평가 시 불확도 값뿐만 아니라 최종 불확도 값에 영향을 미치는 불확도 요인 간 영향력을 보기 위해 민감도 분석을 함께 수행한다.

표 50. 불확도 계산 단계

불확도 계산 단계	내용
1단계(사전검토)	<ul style="list-style-type: none"> 매개변수분류 및 검토, 불확도 평가대상 파악 불확도 평가 체계 수립
2단계(불확도 산정)	<ul style="list-style-type: none"> 측정횟수에 따른 확률분포값 결정 측정값에 대한 표준편차, 평균, 표준불확도 추정
3단계(합성 불확도 산정)	<ul style="list-style-type: none"> 배출활동의 활동자료, 배출계수, 기타 매개변수에 대한 합성 불확도 계산
4단계(배출량 불확도 계산)	<ul style="list-style-type: none"> 개별시설 배출량의 불확도를 합산하여 사업장 총 배출량 불확도 계산

표 51. 불확도 산정단계별 산정식

산정단계	불확도 산정식	의미
표준불확도	$U_i = \frac{sd_i}{\sqrt{n_i}}$ <p> U_i : 1차 변수(i)의 불확도 sd_i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n_i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수 </p>	표본평균의 표준오차

산정단계	불확도 산정식	의미
확장불확도	$U_i = \frac{1.96 \times sd_i}{\sqrt{n_i}}$ <p> U_i : 1차 변수(i)의 불확도 1.96 : 1차 변수(i)가 95%의 신뢰구간에 존재할 확률분포값 (포함인자에 상수를 부여한 것) sd_i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n_i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수 </p>	오차의 한계 (신뢰구간의 분포 적용)
상대확장 불확도	$U_i = \frac{1.96 \times sd_i}{\sqrt{n_i} \times Avg_i} \times 100$ <p> U_i : 1차 변수(i)의 불확도 1.96 : 1차 변수(i)가 95%의 신뢰구간에 존재할 확률분포값 sd_i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n_i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수 Avg_i : 1차 변수(i)의 표본들의 평균 </p>	비교가능한 값으로 환산하기 위해 표본평균으로 나누어 100을 곱함 ※ 온실가스에너지 목표관리제의 경우 업체가 보고하는 불확도 (목표관리지침 별표19)
합성불확도	$U_{j,non-correl} = \sqrt{\sum U_i^2}$ <p> $U_{j,non-correl}$: 2차 변수(j)의 불확도 U_i : 1차 변수(i)의 불확도 </p> 	배출량의 불확도 각 매개변수의 상대불확도를 합성
민감도 분석	$\frac{\delta U}{\delta U_i} = \frac{\delta \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2}}{\delta u_a}$	하위변수 각각의 불확도가 상위변수 불확도에 미치는 영향

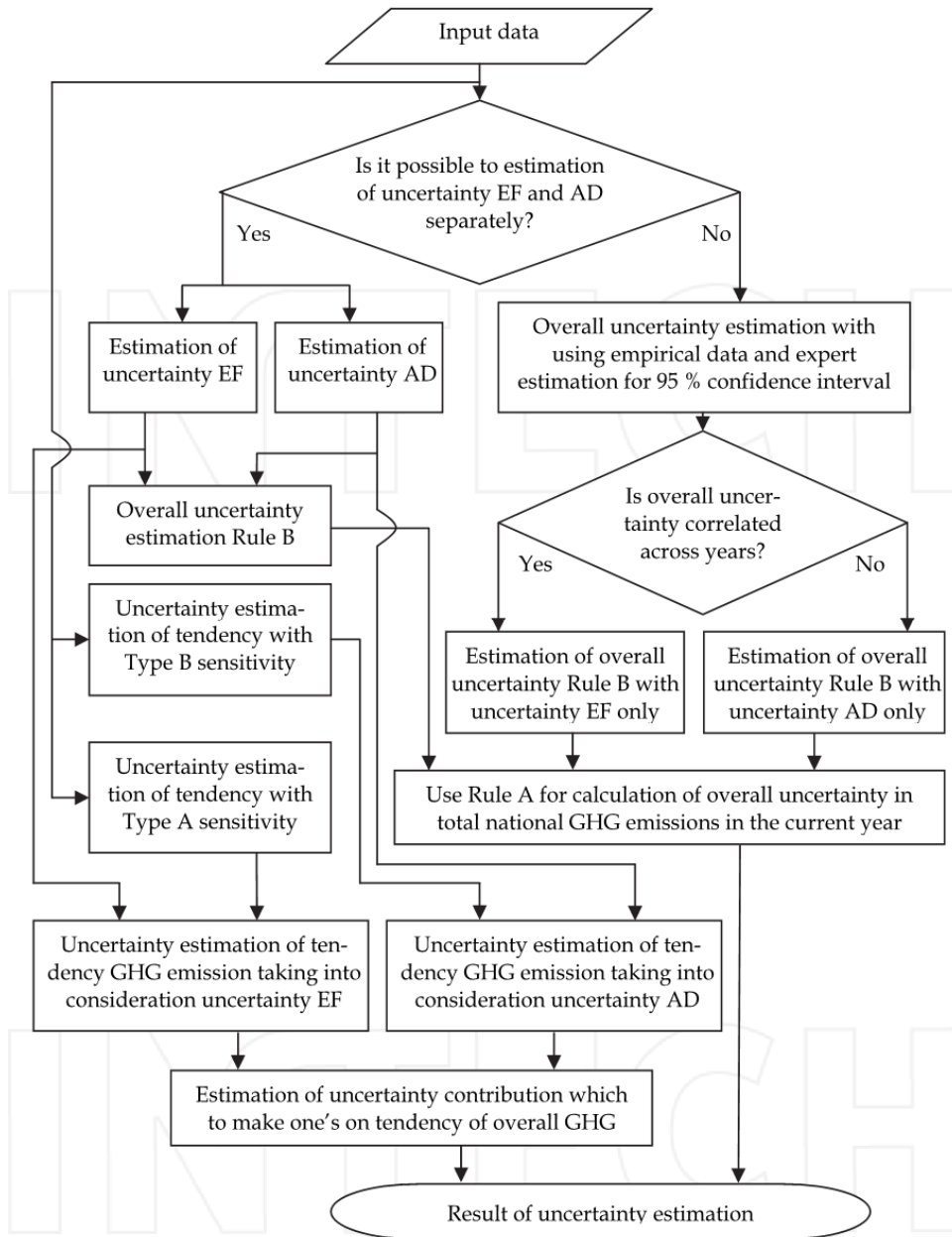


그림 10. 2006 IPCC GL과 GPG 2000에서 제시된 불확도 평가 절차도

(6) 국내외 농업 부문 불확도 평가 현황

농업 부문에 대해 선진화된 온실가스 통계분석체계를 갖춘 국가는 핀란드와 일본이 있다. 본 절에서는 핀란드와 일본의 농업 부문 불확도 산정 현황과 불확도 값 범위를 검토하고 국내 불확도 산정 현황을 비교한다.

(가) 국내 농업부문 배출계수 불확도 산정 현황

농업 부문에서 벼재배(4C)에 대한 불확도는 국가고유배출계수 개발 연구보고서에서 배출계수와 함께 오차범위(상한, 하한)는 제시하고 있지만 NIR에서 불확도 값은 아직 제시되지 않았다. IPCC GL에서도 오차범위(상한, 하한)는 제시하고 있지만 불확도는 제시되지 않았다.

현재 축산 부문 중 장내 발효에 대한 배출량 불확도는 활동자료의 불확도가 제시되지 않아 따로 산정되지 않으며 배출계수는 IPCC 기본배출계수를 사용하고 있어 가이드라인에서 제시된 불확도를 차용하고 있다. 가축분뇨처리 역시 활동자료의 불확도는 제시되지 않으며 메탄과 아산화질소 불확도는 IPCC 지침상 제시된 불확도와 가축분뇨 처리시설 통계의 불확도 기준을 차용하고 있다. 불확도 평가 측면에서 제시된 개선사항은 향후 국가배출계수 개발 및 가축분뇨처리시설 통계자료의 전체 시계열 변화를 반영할 수 있는 방안을 연구하고 있다.

경종 부문은 벼 재배, 농경지 토양, 작물 잔사소각 등 하위 배출원 모두 별도의 불확도 평가를 하지 않고 있으며 향후 작물잔사소각 부문을 제외한 다른 분야에 대해서는 모델링 방법 등을 통해 불확도를 개선할 계획을 수립하고 있다. 작물잔사소각 부문은 별도의 불확도 평가 방식 개선 계획이 존재하지 않는다. 아래 표는 농업 부문 배출원에 대한 불확도 평가 현황에 대한 개요를 다시 나타내고 있다.

표 52. 2014 국가인벤토리보고서 농업 부문 불확도 산정 현황

배출원	배출원	불확도	개선 계획
축산	장내발효	활동자료 불확도 별도 제시안됨 배출계수 불확도 +_50%(1996 IPCC GL)	장내발효 부문 CH ₄ 배출량에 대해 Tier2 수준의 방법론 개발 계획
	가축분뇨처리	활동자료 불확도 별도 제시안됨 CH ₄ 배출계수 불확도 +_20%(IPCC GL 1996) N ₂ O 배출계수 불확도 -75-50%(가축분뇨처리시설 통계의 불확도 기준)	가축분뇨 처리시설 이용비율 자료에 대해 현 통계자료 외에 전체 시계열 변화를 반영할 수 있는 방안 연구
경종	벼재배	불확도 평가를 하지 않음,	2014~2017 까지 모델링 방법을 이용한 Tier 3 수준의 CH ₄ 배출량 평가 연구 진행 중
	농경지토양 직접배출	불확도 평가를 하지 않음	2014~2017 까지 모델링 방법을 이용한 Tier 3 수준의 N ₂ O 배출량 평가 연구 진행 중
	농경지토양 간접배출	불확도 평가를 하지 않음	2015년 신규 등록된 수계유출에 의한 간접배출량에 대한 불확도 평가 필요
	작물잔사소각	불확도 평가를 하지 않음	별도의 불확도 산정관련 계획 없음.

상기 내용에 대해 축산 및 경종 부문 각 배출계수에 대해 불확도 평가 현황 및 불확도 값을 다시 정리한 내용은 아래 표와 같다([표 13] 참고). 국가배출계수를 개발하여 사용하고 있는 경우에도 배출계수에 대한 불확도 값은 따로 제시하지 않고 있음을 알 수 있다.

단, 개발된 국가배출계수를 검증하기 위해서는 불확도 평가가 반드시 수행되어야 하므로 국가인벤토리상에 불확도 값이 제시되지 않는 국가배출계수여도 계수에 대한 불확도 평가가

이루어지지 않았음을 의미하는 것은 아니다.

국가인벤토리 상에서 배출계수와 활동자료의 불확도가 구분되어 제시되지 않고 있음에도 전체 농업부문 배출량에 대한 불확도 평가가 이루어지고 있으며 그 내용은 표 14와 같다.

표 53. 2014 국가인벤토리보고서 농업 부문 배출계수 및 불확도 현황 세부

구분		2014 NIR			비고 IPCC 기본값	
		배출계수	출처	불확도		
장내발효 (4A)	젖소	118 (kg CH ₄ /head/yr)	IPCC 기본값(복미)	±50%	-	
	한·육우	47 (kg CH ₄ /head/yr)	IPCC 기본값(복미)	±50%		
가축분뇨처리 (4B)	젖소	36 (kg CH ₄ /head/yr)	IPCC 기본값(복미)	±20%		
	한·육우	1 (kg CH ₄ /head/yr)	IPCC 기본값(복미)	±20%		
벼재배 (4C)	기본 배출계수	2.32 (kg CH ₄ /head/yr)	국가고유계수	-		1.30
	물관리 보정계수	상시담수 1.00 간단관개 0.66 (물떼기1회)	국가고유계수	-		상시담수 1.00 간단관개 0.60 (물떼기1회)
	유기물 시용량 보정계수	건중량 기준 2.5 (4-8t/ha)	국가고유계수	-	건중량 기준 2.5 (4-8t/ha)	
근거자료		자료:1996 IPCC GL			자료:2006 IPCC GL	

표 54. 농업부문 배출량의 불확도(배출량 단위: Gg CO₂eq/yr, 불확도 단위: %)

연도	장내 발효				가축 분뇨				벼재배			
	평균	상한*	하한*	불확도	평균	상한	하한	불확도	평균	상한	하한	불확도
1990	3022	2625	3415	13	3052	2347	3831	24	8178	5739	11154	33
1995	4218	3642	4792	14	4303	3260	5484	26	6659	4691	8986	32
2000	3242	2831	3648	13	4019	3183	4920	22	6378	4532	8564	32
2005	3340	2917	3761	13	4254	3361	5229	22	5563	3933	7523	32
2006	3508	3055	3961	13	4463	3500	5530	23	5384	3785	7323	33
2007	3657	3173	4146	13	4559	3529	5679	24	5326	3727	7255	33
2008	3834	3314	4345	13	4565	3495	5752	25	5203	3600	7148	34
2009	4049	3493	4604	14	4887	3738	6170	25	5077	3529	7006	34
2010	4303	3475	5206	20	5150	3908	6553	26	4852	3325	6748	35

※ 출처 : 농촌계획 제19권 제4호(2013) 농업분야 온실가스 배출량 산정의 불확도 추정 및 평가
 ※ 주(*) : 상한, 하한은 95% 신뢰구간의 상하 임계값 임.

(나) 핀란드 국가 인벤토리 농업부문 배출계수 불확도 산정 현황

핀란드는 국가온실가스 인벤토리에서 144개 카테고리에 대해 9개의 불확도를 산출하여 총 1,296여 개의 불확도를 보고서에 제시하고 있다. 9개의 불확도 유형은 활동도 불확도(1), 배출계수(2), 조합(3), 총 국가 배출 분야로서 조합 불확도(4), A민감도(5), B민감도(6), 배출계수 시계열 불확도(7), 활동도의 시계열 불확도(8), 시계열 불확도 조합(9) 이다. 농업의 경우 7개의 하위 카테고리별로 9개 유형에 대해 불확도 통계를 산출하고 있으며 농업 부문의 배출계수의 최소 불확도는 14%로 폐기물 부문(32%)에 비해 두 번째로 크다. 핀란드 국가인벤토리 보고서에서는 9개 불확도에 대한 산정 과정을 상세히 나타내고 있지 않아 이에 대한 추가적인 자료를 얻을 수 없었다.

표 55. 핀란드 국가 인벤토리 농업 및 폐기물 부문 불확도 최대값/최소값 현황

구분	카테고리		활동자료 UC	배출계수 UC	조합 UC	총 국가 배출 조합 UC	A 민감도	B 민감도	배출계수 시계열 UC	활동도 시계열 UC	시계열 조합 UC
농업	7	최대	15%	248%	248%	6.09%	0.0166	0.0550	1.18%	0.00%	1.18%
		최소	0%	14%	16%	0.00%	0.0000	0.0000	0.00%	0.00%	0.00%
폐기물	10	최대	30%	380%	380%	2.29%	0.0008	0.0341	0.05%	0.05%	0.37%
		최소	0%	32%	35%	0.03%	-0.0086	0.0001	-0.37%	0.00%	0.00%

※ 출처 : 통계청, (2010). 하반기 연구보고서 제11권 제8장 국가온실가스배출통계 불확도 산출방법론 기초연구, pp 369.
 ※ 주 : UC 는 불확도(Uncertainty)를 의미함.

(다) 일본 국가 인벤토리 농업부문 배출계수 불확도 산정 현황

일본은 국가 온실가스 인벤토리에서 불확도를 배출계수 불확도(1), 활동자료 불확도(2), 조합 불확도(3), 총 국가배출 분야로서 조합 불확도(4) 등 4개 분야로 제시하고 있다. 일본의 농업 부문 배출계수의 최소 불확도는 50%로 산림 부문(-50%)과 함께 가장 큰 최소 불확도를 보고하고 있다. 이는 에너지 부문이 0.3%, 산업공정이 2%인 것에 비해 불확도가 크다.

표 56. 일본 국가 인벤토리 농업 및 에너지 부문 불확도 최대값/최소값 현황

구분		배출계수 UC	활동자료 UC	조합 UC	총 국가 배출 조합 UC
농업	최대	481.0%	100%	712%	0.15%
	최소	50.0%	0.3%	15%	0.00%
산업공정	최대	163%	50%	163%	0.44%
	최소	2.0%	2.0%	5%	0.00%
에너지	최대	10000.0%	104.4%	10000%	0.86%
	최소	0.03%	0.3%	0%	0.00%
산림	최대	75.6%	85.3%	114%	0.42%
	최소	-50.0%	9.0%	6%	0.00%

※ 출처 : 통계청, (2010). 하반기 연구보고서 제11권 제8장 국가온실가스배출통계 불확도 산출방법론 기초연구, pp 370.
 ※ 주 : UC 는 불확도(Uncertainty)를 의미함.

일본은 배출계수 불확도 평가를 위한 의사결정도를 제시하고 있다. 만일 적절한 평가가 의사결정도를 통해 도출되지 않을 경우 적절하다고 판단되는 다른 방법을 이용할 수 있으며 이 경우 왜 의사결정도 대신 다른 평가를 이용하였는지 명확한 설명을 제시하여야 한다.

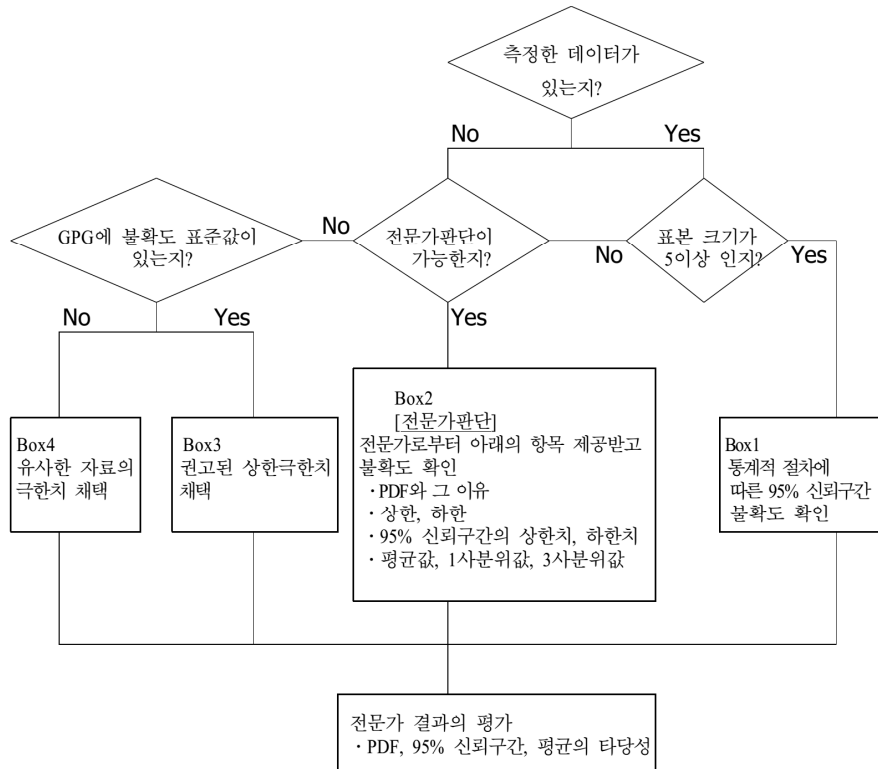


그림 11. 배출계수의 불확도 산정 흐름도

출처 : 통계청. (2010). 하반기 연구보고서 제11권 제8장 국가온실가스배출통계 불확도 산출방법론 기초연구, pp 374.

(라) 소결

농업 부문에 대해 선진화된 불확도 산정 체계를 갖춘 일본과 핀란드의 사례에서도 농업 부문의 불확도는 다른 부문에 비해 크게 산출되었다. 이는 농업부문의 배출량 산정, 배출계수 개발, 불확도 산정이 다른 부문에 비해 어려움을 시사한다. 따라서 농업 부문에 대해 체계적인 배출계수, 배출량, 불확도 산정 시스템을 구축하는 것이 필요하다. 국내에서는 농업 부문에 대해 인벤토리 기반의 배출량 불확도에 대한 연구는 있지만 개별 배출계수의 불확도에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 이에 대한 주된 이유는 에너지 및 산업 부문에 비해 농업 부문의 통계자료 획득이 어렵기 때문이다. 또한 농업의 특성 상 활동자료 및 배출량의 측정·계산이 어렵고, 설명변수가 많이 필요하기 때문에 배출계수 산정이 어려우며 대부분 농가의 규모가 작아 불확도 산정 시 고려해야할 변수가 매우 많다.

라. 불확도 평가

(1) 농업부문 불확도 평가 현황 개요

국가배출계수를 등록하기 위해서는 배출계수와 함께 불확도를 의무적으로 제시하도록 하고 있으나 우리나라 국가인벤토리 보고서에서는 벼 재배 메탄 배출량에 대해 불확도 값을 제시하지 않고 있다. 해외 선진국에서는 국가인벤토리 보고서 상에 벼 재배 배출계수에 대한 불확도 값을 제시하고 있으나 불확도 산정 방법에 대해 상세히 기술하고 있지는 않다. 벼재배 및 축산 부문에 적합한 불확도 평가 방법을 적용하기 위하여 벼 재배 국가배출계수 개발 과정을 다른 국내의 논문을 검토하였으나 관련 논문 역시 불확도 산정에 대한 구체적인 내용은 제시하지 않고 있다.

IPCC 가이드라인 역시 불확도 산정절차에 대해 일반적이고 개론적인 수준에서 서술되어 있어 벼 재배 배출계수에 대한 구체적이고 상세한 불확도 산정 가이드라인은 공식적으로 존재하지 않으며 또한 농업 부문 온실가스 인벤토리 산정기관인 농업과학원과 축산과학원이 소속된 농촌진흥청에 질의한 결과 현재 공식적인 배출계수 불확도 산정 가이드라인은 존재하지 않음을 확인하였다. 불확도 산정에 관련된 국제표준 및 국내외 국가인벤토리를 검토한 결과 불확도 산정 방법은 크게 두 가지가 이용되고 있다. 하나는 측정자료의 분포로부터 표준편차를 구하는 방법과 다른 하나는 에너지 부문 사업장 고유 배출계수 개발시 활용되고 있는 것으로 측정기기의 오차를 조합하여 불확도를 산정하는 방식이다.

(측정기기의 허용오차를 활용한 불확도 산정) 현재 산업 부문에서 활용하고 있는 불확도 산정방법은 국제표준화기구(International Organization for Standardization, 이하 ISO)에서 제시한 불확도 평가방법에 기초하고 ISO는 측정의 불확도를 측정 결과에 대한 불확도로 간주하여 측정기기의 불확도를 이용하여 계량값에 대한 불확도를 추정한다. 이러한 방식의 불확도 산정 방법을 채택할 경우 실험에 이용되는 측정기기의 불확도가 주요한 불확도 결정인자이다. 농업 부문의 불확도 산정 방법 역시 배출계수 개발과정에서 사용하는 측정장비의 허용오차를 이용하여 불확도 산정이 가능하다.

(측정 데이터의 분포를 활용한 불확도 산정) 측정 데이터의 분포를 활용한 불확도를 산정 방법은 IPCC 가이드라인에서 제시된 오차 전파법 및 몬테카를로 방법이 대표적이다. 최근 해외 학술저널에 우리나라 벼 재배 메탄 배출량 데이터를 활용하여 오차 전파법과 몬테카를로 방법이 아닌 Pooled Standard Deviation (PSD) 과 Standardized t Bootstrap Method (STBM)을 이용하여 불확도를 평가한 논문이 게재되어 이를 검토하였다.

(불확도 평가방법 검토) 측정 데이터의 분포가 정규분포인지, 대칭인지, 시공간적 변동(Temporal & Spatial Variability) 이 있는지 등에 따라 적용가능한 방법이 다르므로 실제 불확도 평가방법은 실험데이터 및 측정기기의 허용오차 등 관련 정보 수집 후 데이터 특성에 따라 적합한 방법론을 선택하여 불확도 평가계획을 수립하여야 한다.

(2) 자문회의 결과 반영

본 연구진의 농업부문 배출계수 불확도 산정 계획의 타당성을 검토하기 위해, 국가배출계수 등록심사에서 심사위원으로 참여한 전문가, 농업부문 국가배출계수 개발 경험이 있는 연구진, 국내 농업부문 국가 인벤토리 작성 전문가, 농업부문 이외 산업·산림·폐기물·교통부문

국가 인벤토리 작성 전문가와의 자문회의 및 연구세미나를 수차례 실시하였다. 그중 본 연구의 불확도 평가 산정계획과 직접 관련된 이슈만을 도출한 결과는 아래와 같다.

표 57. 농업부문 감축사업 배출계수 불확도 평가방법 자문회의 결과

불확도 평가계획 관련 이슈	자문회의 결과
불확도 관점에서 계측기 오차의 특성	<p>Q) 계측기의 오차가 측정값의 분산특성에 포함된다고 볼 수 있는지, 아니면 별도로 합성하는 방안이 타당한지?</p> <p>A) 활동자료에서도 계측기의 오차가 들어가고, 배출계수를 계산할때도 계측기의 오차가 들어감. 그런데 배출량 산정 시 활동자료와 배출계수의 불확도를 서로 합성하는데 각각의 계측기 오차를 두 번 계산해야하는 것인지에 대해서는 가치판단이 필요함. 불확도 값을 낮추는 것이 목적이라면 한 번만 계산하겠지만, 불확도의 본래적 의미를 반영하기 위해서는 두 번 계산할 수 있음. (활동자료 관점에서 반영된 것과 배출계수 관점에서 반영된 것이 다르기 때문임)</p>
반복성과 재현성	<p>Q) 불확도 관련하여 농업부문 데이터의 가장 중요한 특성은?</p> <p>A) 농업 부문은 데이터 특성상 <u>반복성과 재현성</u>이 가장 큰 이슈임. 벼의 메탄 배출량 실험의 경우 동일한 날 여러번 챔버를 씌워 측정하는 것은 반복성이고, 다음날에 다시 측정하는 것은 재현성으로 봄.</p>
배출계수 도출방식이 산업부문과 농업부문이 다름. 이를 반영한 산정방식 필요성	<p>Q) 농업 부문의 배출계수는 산업 부문과 다른 방식으로 계산됨. 산업부문은 배출계수를 산정하기 위해 필요한 입력변수들을 측정하고 이것으로 배출계수를 구하는 반면 농업 부문은 배출량 자체를 바로 측정하고 이것을 다시 활동자료를 보정하여 배출계수를 구함. 그래서 배출계수를 개발하는데 있어 산업부문과 다른 접근이 필요함. 어떤 방안을 고려해야 할지?</p> <p>A) 배출계수에 대한 불확도를 구하려는 목적이 무엇인가? 결국 <u>최종적으로</u> 관심있는 변수는 배출량임. <u>농업부문 데이터 특성을 고려하고, 배출량의 불확도를 구하는 방식을 준용하면, 표준편차를 이용하는 방식으로 구하면 됨.</u></p>
활동자료의 불확도 (배출계수의 불확도와는 구분됨)	<p>Q) 금번 연구에서 배출계수를 구하는 목적은 농업부문의 감축사업에 활용하기 위함임. 배출계수를 이용하여 감축량을 산정하려고 함. 불확도 개념 자체와 관련하여 본질적으로 중요한 이슈는 무엇인지?</p> <p>A) 사실 배출계수의 불확도는 실험실에서 개발할 수 있는 것임. 여러번 측정하고 그것을 바탕으로 표준편차를 구해서 불확도를 산정할 수 있음. 그런데 활동자료의 불확도가 어려움. 실제 현장에서 계측기의 불확도가 5%라고 하면 실제 5%에 맞도록 데이터가 나오지 않을 것이라고 봄. 그런데 현장에서는 계측기 불확도가 5%니까 5%가 넘으면 관례상 쉽게 값을 내려버림. 결과적으로 관심있는 값은 배출량인데 다들 배출계수의 불확도에 집중하고 활동자료의 불확도는 관심이 없음. <u>활동자료의 불확도를 개선하려면 현장에서 관리를 해야하는데 그것이 쉽지않음.</u></p>
농업부문 데이터 및 배출계수의 특성을 고려한 불확도 산정방법	<p>Q) 농업 부문은 산업 부문과 달리 일별 배출계수를 개발할 수 있는데, 그렇게 되면 하루에 반복측정하는 횟수 3회가 전체 표본 크기가 되는 것이 아닌가? 그러면 표본 크기가 너무 작아서 모수를 가정하는 통계방법대신 비모수 접근법을 사용해야할 수도 있음. 그런데 IPCC가이드라인에서 불확도를</p>

	<p>합성하기 위한 오차전파법이나 몬테카를로방법 모두 기본적으로 모수에 대한 가정이 필요한 방법이다. 농업부문 특성을 반영하면 어떤 방법이 더 타당한지?</p> <p>A) 일별 반복측정하는 횟수가 3회고 이를 예를 들어 100일동안 측정하면 표본 크기가 300이라고 할 수 있는데, 농업 부문에서는 반복성과 재현성이 이슈임. 재현성의 측면에서 보면 일별 3회씩 측정되는 것은 서로 구분되어야 하는 것이기 때문에 표본크기가 3이라고 볼 수 있음. 이를 개선하기 위해서 pooled standard deviation을 사용하여 불확도를 산정한 연구가 있음. IPCC가이드라인에도 간략하게나마 resampling에 대한 개념이 나와 있음. 그것이 부트스트랩의 개념이라고 봄. 그러나 통계 관점에서 전문가적 견해로는 재현성을 고려하지 않고 표본크기가 300이라고 가정하고 일반 불확도 계산법을 사용해도 무방함. 어제와 오늘의 배출량이 다르다고 볼 수 있나?</p>
Temporal Variability	<p>Q) IPCC가이드라인에서 spatial variability와 temporal variability가 나와 있는데 이게 재현성과 관계된 개념 아닌지?</p> <p>A) 개념상 혼동할 여지가 있는데, temporal variability는 연별 배출량에 대한 것으로 올해의 배출량이 내년의 배출량과 상관이 있는지 보는 것임. 재현성과는 다름.</p>
PSD(pooled standard deviation)	<p>Q) PSD(pooled standard deviation)을 사용한 논문에서, 서로 다른 모집단 추출의 의미는?</p> <p>A) 서로 다른 모집단에서 추출된 표본이라고 서술하고 있는데 이 서로 다른 모집단에서 추출되었다는 말은 서로 다른 날에 측정한 것이라는 의미임.</p>
매개변수간 상관관계의 처리	<p>Q) 오차전파법을 사용할 때 입력매개변수간에 서로 상관이 있을 경우 통계적 처리방법은? 예를들어 석탄배출계수를 계산할 때 입력매개변수에 회분, 수분비중이 들어가는데 이게 서로 상관이 없을 수 없는 변수임. 그런데 현재는 서로 상관관계가 없다고 가정하고 오차전파법을 사용하고 있는 것으로 예상됨.</p> <p>A) 서로 상관관계가 있을 경우는 몬테카를로 방법이 대안이 될 수 있음. 단 분포가 정규분포이고 상관관계가 없을 때 오차전파법을 쓸 수 있음. 대부분 정규분포를 가정하기 어려운 경우가 많은데 일단 서로 상관관계가 있다면 몬테카를로 방법을 쓰는 것이 보다 안전함. 그리고 몬테카를로 방법을 쓸 경우 분포를 모른다면 정규분포로 가정함. 분포를 알 경우 그 분포를 쓰는 것이 이상적이기는 함.</p>
부트스트랩 기법	<p>Q) 몬테카를로 방법과 부트스트랩은 서로 다른 방법으로 알고 있는데 적용상 차이점은?</p> <p>A) 몬테카를로 방법은 분포를 가정해야하는데 부트스트랩은 분포를 몰라도 사용할 수 있다. 대신에 분포를 모르고, 표본 수가 작기 때문에 resampling이 필요하다. 몬테카를로방법은 분포를 가정할 수 있기 때문에 resampling의 개념과는 다르다.</p>

(3) 경종 및 축산부문 감축사업 배출계수 불확도 평가절차

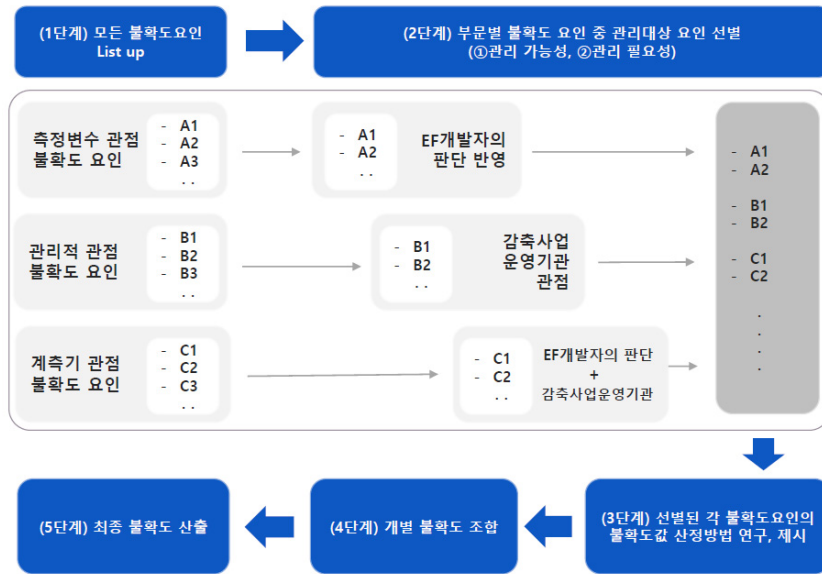
(가) 불확도 평가절차 개요

배출량 및 감축량의 신뢰성을 검토하기 위해서는 배출량 또는 배출량 산정의 기준이 되는 배출계수 및 활동자료에 대한 신뢰도를 평가할 수 있는 지표가 필요하며 이 관점에서 불확도 산정이 필요하다. 따라서 불확도 평가의 대상은 배출량 불확도, 배출계수 불확도, 활동자료 불확도가 될 수 있다. 이 중 본 연구에서는 농업부문 감축사업 방법론의 신뢰도 제고 차원에서 배출량 산정의 기초가 되는 배출계수를 대상으로 불확도 평가를 실시한다. 그리고 기존 배출계수의 불확도 평가와, 연구개발과정에 있는 배출계수의 불확도 평가는 다음과 같은 이유로 구분될 수 있다. 기존 배출계수의 불확도 평가는 배출계수 산정에 활용된 데이터만을 활용할 수 있다. 이와 달리 연구개발과정에 있는 배출계수의 불확도 평가는 연구 과정에서 발생하는 데이터를 활용한 불확도 산정뿐만 아니라 이와는 별도로 연구과정에서 연구자의 연구관리 계획 수립, 연구 수행, 데이터 관리 과정을 점검하는 차원에서의 불확도 산정을 포함한다. 그리고 앞서 여러 차례 논의한 바와 같이 본 연구에서의 불확도 평가는 전자인 정량적 관점에서의 불확도 평가 보다 후자인 정성적 관점에서의 불확도 평가에 초점을 맞추고 있다. 즉 배출계수 개발 과정에서 제3자의 객관적인 검토·제언·피드백 과정을 지속적으로 수행함으로써 결과적으로 산출되는 배출계수의 품질 향상을 유도하고자 하는 목적이 있다. 더불어 본 연구에서의 배출계수 개발 뿐만 아니라 향후 배출계수 개발 연구의 품질향상에 기여할 수 있도록, 배출계수 연구자가 참고할 수 있는 가이드라인을 작성하였다.

따라서 본 연구에서는 불확도 산정 결과 도출된 값의 크기를 비교분석하는 것 보다는 앞서 작성된 배출계수 개발 가이드라인 그리고 다음에 기술될 농업부문 배출계수 불확도 평가 절차에 더 의미를 부여할 수 있다. 즉 불확도 평가의 정성적인 평가는 앞선 가이드라인의 절차를 지침화 하는 것 그리고 다음의 농업부문 불확도 평가절차를 반영하는 방식으로 제시하며, 불확도 평가의 정량적인 평가는 다음의 농업부문 불확도 평가절차를 기술한 이후, 본 연구에서 도출된 경종 및 축산 부문 배출계수 산정에 활용된 측정자료(Flux)를 활용해 산정하도록 한다. 그리고 불확도 산정 과정 및 가이드라인에 초점을 맞춘 점은, 비교대상으로서 배출량의 불확도 산정에 초점이 맞춰지는 국가인벤토리에서의 불확도 산정방식과는 구분되어야 한다는 점을 미리 밝혀둔다.

본 연구에서의 농업부문 배출계수 불확도 산정절차를 요약하면 아래와 같다. 우선 불확도 산정에 앞서 불확도 산정의 목적을 분명히 설정해야 한다. 즉 결과물인 불확도 값의 산출 자체 또는 다른 불확도 값과 비교분석 평가가 주목적인 경우, 불확도 산정에 반영할 불확도 요인을 적절히 선별하는 과정이 중요하다. 이와 달리 불확도 값 산출과정에 대한 관리, 나아가 배출계수 산정연구의 품질관리가 주목적인 경우에는 가능한 많은 요인, 고려할 수 있는 모든 요인을 도출하고 체계화함으로써 지침화 하는 과정이 중요하다. 본 연구의 불확도 평가는 후자에 초점이 맞추어져 있다. 본 연구의 불확도 산정 목적이 배출계수의 품질관리에 있기 때문에, 아래 그림에서 보는 바와 같이 1단계에서 모든 고려가능한 불확도 요인을 목록화 한다. 이를 위해서 배출계수 개발연구의 실험계획, 현장조사, 데이터 도출과정에 대한 면밀한 분석을 실시하였다. 모든 불확도 요인을 목록화한 이후에는 2단계로 리스트업된 불확도 요인들을 범주화해

서 구분하였다. 우선 불확도 발생요인별로 구분하여 측정변수 관점의 불확도 요인, 관리적 관점의 불확도 요인, 계측기 관점의 불확도 요인으로 범주화가 가능하다. 이와 다른 관점에서는 ‘관리가 가능한’ 불확도 요인인지 관리하기가 어렵지만 ‘관리가 필요한’ 불확도 요인인지로 구분할 수 있다.



※ 참고: 위 절차는 감축사업 EF 불확도 산정절차로서, 농업부문 인벤토리 불확도 산정절차와는 관점이 다름.

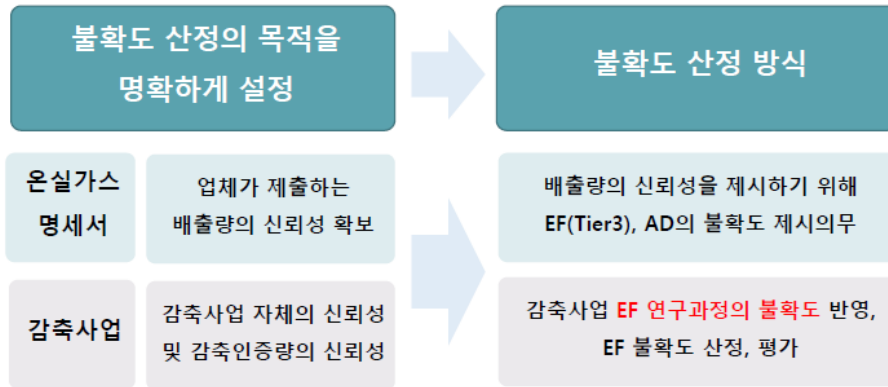
그림 12. 농업부문 감축사업 배출계수 불확도 산정절차 개요

이렇게 범주화된 불확도 요인군을 대상으로 3단계에서는 불확도 요인별로 어떻게 불확도를 산정할 것인지 산정방법에 대한 구분이 필요하다. 여기서 정량적 산출이 가능한 요인과 정성적인 분석으로 가능한 요인으로 나누어진다. 예를 들어 배출량 데이터(Flux) 또는 기기의 설비오차·운영오차는 정량적인 불확도 값 산출에 활용된다. 이와 달리 실험계획의 적정성, 실험실 환경 제어방식의 절적성 등은 배출계수 결과값에 영향을 미치지만 정량화 된 수치로 표현하기는 어려운 요인이다. 한편 가스 샘플 채취에 활용되는 주사기와 같은 소규모 실험기기의 경우 오차범위를 특정할 수 있다면 정량적인 분석에 반영할 수 있으나 사실상 오차범위 및 분해능 산정이 불가능한 경우가 많다. 이 경우 정량분석에 오차를 반영할 수는 없으나 가이드라인에 불확도 요인으로 기재함으로써 향후 배출계수 연구자가 관리지침 상 참고할 수 있도록 하였다. 이후 4단계에서는 3단계에서 도출되는 개별 불확도 값들을 합성해서 하나의 불확도 값으로 도출하게 된다.

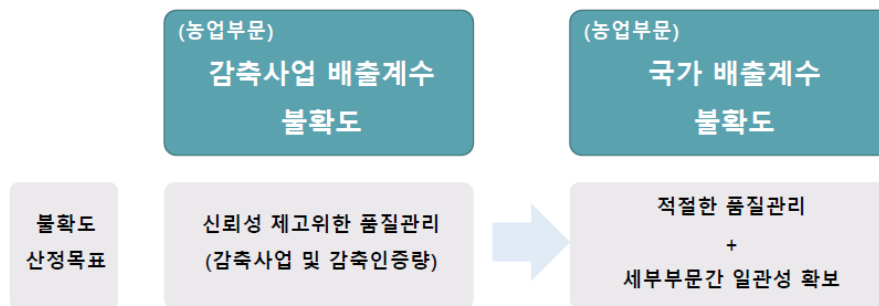
(나) 불확도 평가 목적 설정

불확도 산정에 앞서 불확도 산정의 목적을 분명히 설정할 필요가 있다. 불확도를 산정 또는 평가하는 목적에 따라 산정방식의 주안점이 달라지기 때문이다. 예를들어 결과물인 불확도 값의 산출 자체 또는 다른 불확도 값과 비교분석 평가가 주목적인 경우, 불확도 산정에 반영할 불확도 요인을 적절히 선별하는 과정이 중요하다. 이와 달리 불확도 값 산출과정에 대한 관리, 나아가 배출계수 산정연구의 품질관리가 주목적인 경우에는 가능한 많은 요인, 고려할 수 있는 모든 요인을 도출하고 체계화함으로써 지침화 하는 과정이 중요하다. 본 연구의 불확도 평

가는 후자에 초점이 맞추어져 있다.



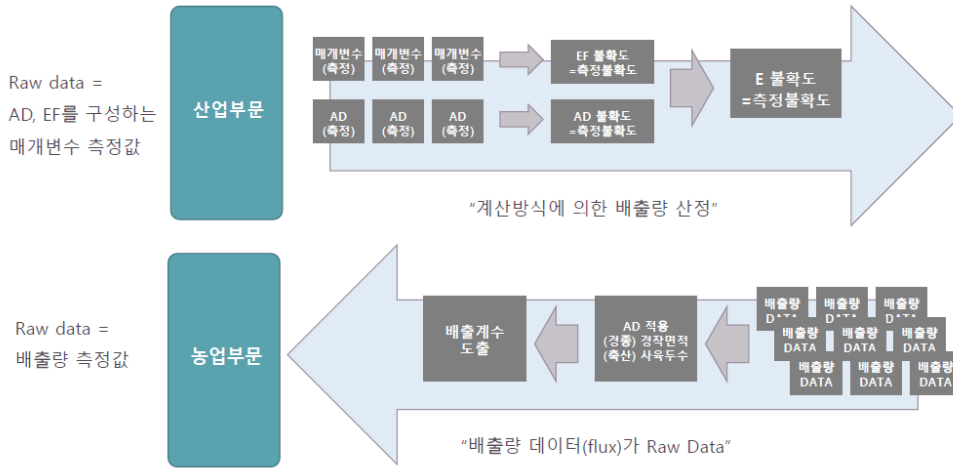
감측사업에서 활용되는 배출계수와 국가인벤토리에 적용되는 국가배출계수의 경우에도 불확도 산정 목적을 상대적으로 비교할 수 있다. 아래 그림에서와 같이 국가배출계수의 경우 ‘적절한 품질관리’라 함은 배출계수 개발 및 관리 수준이 낮다는 의미가 아니다. 오히려 국가배출계수 등록 심사 등 관리절차가 엄격하지만 국가단위의 수치인 만큼 결과값이 다른 국가인벤토리와 비교될 수 있어 그 값의 적정 수준을 고려할 필요가 있다. 이같은 국가간 비교 뿐만 아니라 국내 부문간 배출계수의 불확도 비교시 합리적인 판단이 가능해야 한다.



예를 들어 에너지 소비량, 에너지원의 특성 등 비교적 객관적인 활동자료 데이터로부터 도출된 산업부문 배출계수의 불확도에 비해 농업부문 배출계수의 불확도 수준이 더 낮다면 이를 납득하기가 쉽지 않을 것이다.

(다) 농업부문 불확도 특성 식별

앞서 기술한 바와 같이, 불확도 산정의 목적을 특정하면 이로부터 불확도 산정시 주안점이 달라진다. 이와 다른 관점에서 중요한 이슈는 농업부문의 특성을 고려해야 한다는 점이다. 농업부문의 불확도 특성과 산업부문의 불확도 특성을 간략히 비교하면 아래와 같다. 산업부문의 불확도는 통상적으로 언급되는 측정불확도라고 볼 수 있다. 이는 측정기기의 설계오차, 운영오차 등 기기오차로부터 불확도를 산정함을 의미한다. 이와 달리 농업부문 배출계수 연구의 원자료(raw data)는 챔버의 메탄 flux이고 이 자료의 분포를 통계분석하여 정량적 불확도를 산출한다.



이같이 농업부문의 배출계수 산출방식은 산업부문과 달라서, 기기의 오차를 중심으로 인식되는 측정불확도를 포함하여 더 넓은 범위의 불확도 개념으로 인식해야 한다. 즉 농업부문 배출계수 개발연구에서 사용되는 기기(가스성분분석기 등)의 오차는 측정불확도에 해당하지만, 이와 달리 메탄 flux 데이터의 분포로부터 계산된 불확도는 구분되어야 한다. 그리고 농업부문은 배출계수 연구 특성상 이 두 가지 불확도를 모두 포함해야 한다. 이는 농업부문의 경우 불확도 값 자체의 크기 보다는 불확도 산정절차에 주목해야 한다는 기존의 연구목적과도 관련된다. 즉 산업부문에 비해 훨씬 다양한 불확도 요인이 존재하고, 이를 얼마나 반영하는지에 따라 불확도 값의 차이는 큰 변동성을 보인다. 따라서 불확도는 값의 크기가 높고 낮음에 따라 불확도 값이 좋고나쁨을 이야기할 수 없고, 어떤 산정과정을 거쳤고, 산정과정에서 얼마나 많은 요인이 고려됐는지가 더 중요하다. 그리고 이 같은 불확도 평가방식은, ‘불확도 값이 낮은 것’이 좋은 것이라기보다는 ‘불확도 값을 낮추기 위한 노력’이 중요한 것이라는 불확도 평가의 본래 취지에도 부합한다.

산정방법 고도화 VS. 현장 적용가능성

- IPCC GL은 가능한 모든 불확도 요인을 고려하는 것이 이상적이라고 권고(데이터 획득, 관리, 보고 등 전 과정)
- (불확도 근본적인 의미를 고려하면) 불확도값이 낮으면 좋고 높으면 나쁜것이라기 보다는 특정 불확도를 산출하는데 얼마나 많은 요인을 고려했는지가 관건
- 단, 명세서 등 보고를 위한 의무사항인 경우, 현실적인 적용한계를 고려할 필요가 있음
※ 산정방법론의 고도화와, 현장에서 그 방법론을 손쉽게 적용할 수 있는지는 별도의 고려가 필요

(농업) 불확도 VS. 측정불확도

- 산업부문(에너지 연소) 배출량 산정 방식 VS. 농업부문(비에너지) 배출량 산정 방식 **(농업) 불확도 > 측정불확도**
- 농업부문 배출량 측정(챔버- 메탄 등의 flux 측정, 사료급여기, 가스성분분석기) **(농업) 측정불확도**
- 농업부문(비에너지) 배출량 및 배출계수 불확도 산정방식 고도화 **(농업) 측정불확도 + 기타불확도**

(라) 불확도 요인 목록화 및 범주화

앞서 논의한 바와 같이 본 연구의 불확도 산정은 불확도 값의 크기 보다는 산출절차 및 산출과정에서 고려해야한 요인을 목록화 하고 가이드라인에 지침화 하는데 목적이 있다. 모든 고려가능한 불확도 요인을 목록화하고 이를 범주화하여 관리방안을 제시한다. 이를 위해서 배출계수 개발연구의 실험계획, 현장조사, 데이터 도출과정에 대한 면밀한 분석을 실시하였다. 모든 불확도 요인을 목록화한 이후에는 리스트업된 불확도 요인들을 범주화해서 구분하였다. 우선 불확도 발생요인별로 구분하여 측정변수 관점의 불확도 요인, 관리적 관점의 불확도 요인, 계측기 관점의 불확도 요인으로 범주화가 가능하다. 이와 다른 관점에서는 ‘관리가 가능한’ 불확도 요인인지 관리하기가 어렵지만 ‘관리가 필요한’ 불확도 요인인지로 구분할 수 있다.

불확도 요인을 범주화하기 위해서는 우선 모형 불확도와 매개변수 불확도의 구분이 필요하다. 모형불확도는 배출량을 산정하기 위한 산정방법론 즉 모형이 복잡다단한 현실 시스템을 정확하게 반영하지 못하여 발생하는 오류이다. 여기서 모형이란 배출량 산출을 위한 계산식을 의미하며, 모형은 현실시스템을 단순화시킨 것으로서 단순화과정에서 불확도 요인을 내포하고 있다. 이 경우 부적절한 배출량 산정식이 사용되었거나 산정식의 입력변수가 부적절하게 정의된 경우 모형 불확도가 발생된다. 이와 구분하여 매개변수 불확도는 배출량을 산정하기 위한 활동자료, 배출계수 등 매개변수의 측정 및 정량화와 관련된 불확도이다. 자료가 대표성이 없거나 통계적인 표본추출 오차가 발생한 경우, 측정기기의 오차, 이용가능한 자료가 없는 경우에 발생하는 불확도 요인이다. 매개변수 불확도는 배출계수 개발 연구자가 관리할 수 있는 불확도로서 배출계수 연구의 품질관리에 더 직접적인 영향을 주는 불확도 요인이다.

모형 불확도 (Model Uncertainty)

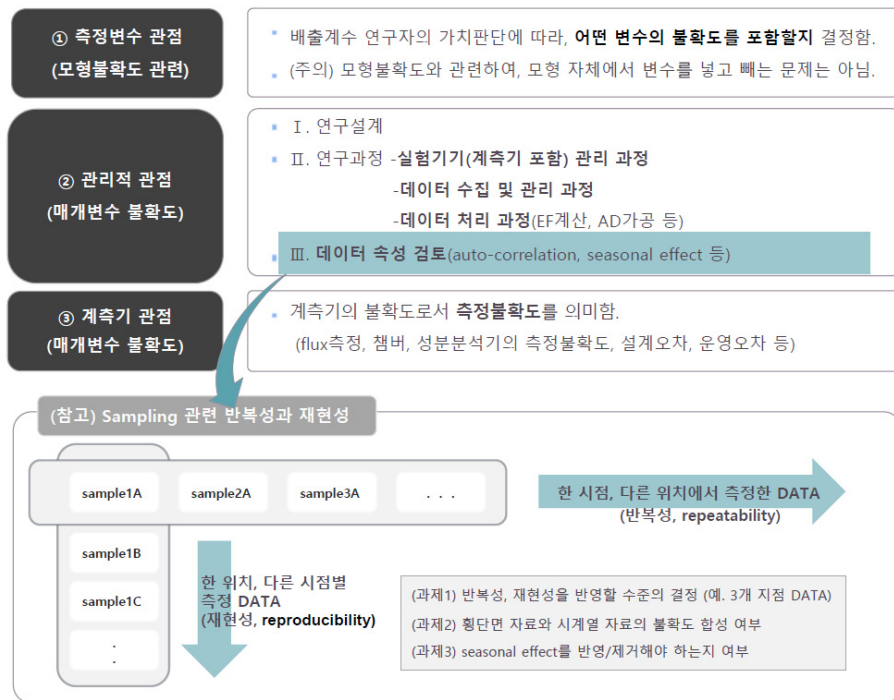
- 배출량을 산정하기 위한 산정방법론(모형)이 복잡성이 큰 현실 시스템을 정확하게 반영하지 못하여 발생하는 오류(모형은 현실시스템의 단순화이므로 일반적으로 불확도를 내포)
- 이 경우 부적절한 배출량 산정식이 활용되었거나 산정식의 입력변수가 부적절하게 정의된 경우에 발생
- 일반적으로 모형불확도를 감소시키기 위한 활동은 **사업자의 관리범위를 넘어서**

매개변수 불확도 (Parameter Uncertainty)

- 배출량을 산정하기 위한 활동자료, 배출계수 등 **매개변수의 측정 및 정량화와 관련한 불확도**
- 자료가 대표성이 없거나 통계적인 표본추출 오차가 발생한 경우, 측정기기의 오차, 이용가능한 자료가 없는 경우 등
- 매개변수 불확도는 사업자의 인벤토리 품질관리 활동에 주요 대상이 되는 부분

본 연구에서는 불확도 발생요인별 범주를 측정변수 관점의 불확도 요인, 관리적 관점의 불확도 요인, 계측기 관점의 불확도 요인으로 구분하였다. 여기서 측정변수 관련 불확도는 모형 불확도와 관련되며, 관리적 관점의 불확도와 계측기 관점의 불확도는 매개변수 불확도와 관련된다. 그리고 관리적 관점의 불확도는 연구설계, 연구과정, 데이터 속성 관련 요인으로 다시 구분할 수 있고 연구과정의 불확도 요인은 다시 실험기기 관리과정, 데이터 수집 및 관리과정, 데이터 처리과정으로 구분할 수 있다. 계측기 관점의 불확도 요인은 앞서 언급한 측정불확도를

의미하며 챔버, 가스성분분석기의 오차 및 분해능과 관련된다.



① 경증부문 불확도 요인 (완효성 비료 배출계수 개발)

완효성 비료 투입에 따른 아산화질소(N₂O) 배출계수 개발 실험에서 발생할 수 있는 단계별 불확도 요인을 나열하고 각각에 대하여 측정가능성, 관리가능성, 중요성 등을 검토하였다.

(측정가능 요인) 측정가능하고 본 연구에서 정량화 가능한 요인 중 유의미한 것은 측정/분석 기기의 오차로서 가스성분분석기, 챔버 등이 이에 해당한다. 그러나 정량화 가능한 요인이라고 해서 기기 오차값을 모두 획득할 수 있는 것은 아니다. 예를 들어 챔버의 경우에는 별도의 시방서가 없고 비교적 간소한 기기이기 때문에 별도의 설계오차 및 운영오차를 파악하기 어렵다.

(배출계수에 영향을 주는 주요 요인) 측정 불가능하나 배출량에 큰 영향을 미치는 요인은 비료의 시비량 및 토양 관리 방법으로 향후 유사 연구 시 이를 엄밀하게 관리하는 것이 필요하다.

표 54. 경증부문 배출계수 개발연구의 불확도 요인

불확도 발생단계	가능한 불확도 요인	세부내용
모형 설정	배출량에 영향을 미치는 독립변수, 통제변수의 누락	본 연구의 범위에 해당하지 않음.
파라미터 설정	변수의 조작적 정의	본 연구의 범위에 해당하지 않음.

불확도 발생단계		가능한 불확도 요인	세부내용
		모니터링 인자 설정	본 연구의 범위에 해당하지 않음.
자료 수집	실험 운영 (재배)	작물특성	<ul style="list-style-type: none"> • N₂O배출은 작물에서 배출되는 것이 아닌 토양에 잔류한 질소량에 크게 의존하기 때문에 작물특성은 중요하지 않을 것으로 보임. • N₂O, CO₂ 배출량은 식물이 없는 토양에 측정함.
		토성	<ul style="list-style-type: none"> • 토양의 배수특성, 유기물 함량, 밀도 등 토양의 특성은 N₂O배출에 큰 영향을 미치나 측정/관리 불가능한 요인
		토양관리 (관개, 잡초 제거, 피복(멀칭) 등 관리 수준)	<ul style="list-style-type: none"> • 재배/관리 수준이 분석보다 측정값에 더 큰 영향을 미침. • 자동측정장치는 이러한 기타요인(잡초 등)을 충분히 관리하기 어려움.
		비료 시비 시기	<ul style="list-style-type: none"> • 질소질 비료는 총 3번, 인산 1번 칼리는 2번 시비 • 질소질비료는 이앙 하루 전, 이앙 후 14일(분얼기), 이앙후 42일 후 정도로 나누어 시비 • 비료 시비 직후 배출량이 급격히 올라가고 이후 낮아지는 패턴을 보임. 비료시비에 따라 배출량값의 차이를 보이는 것이 표준편차를 크게 나타나게 하는 대표적 요인
		비료 시비량	<ul style="list-style-type: none"> • N₂O는 식물체가 아닌 토양 위에 챔버를 씌워 측정 • 질소질 비료를 시비할 때 균일하게 시비하기 어렵기 때문에 챔버를 씌울 처리구를 덮어두고 주변부에 우선 시비한 후, 처리구 위에 비료시비량을 측정하여 측정량 만큼만 시비 → 비료시비량 측정 시 불확도 발생할 수 있음.
		비료의 질소함량 차이	<ul style="list-style-type: none"> • 사용된 비료별로 질소함량에 차이가 있을 수 있음. • 그러나 매번 시비 때 마다 질소함량을 측정하기는 현실적으로 어렵기 때문에 측정/관리가 불가능한 요인임.
		토양온도	<ul style="list-style-type: none"> • 토양온도는 미생물활성도, 식물생육에 영향을 미치므로 배출량에 영향을 줄 수 있음. • 그러나 정량화하거나 관리할 수 없는 요인임.
	기상 및 기후조건 (온도, 강수 등)	<ul style="list-style-type: none"> • 중요한 요인이나 측정/관리 불가능 	
	측정/분석	챔버 밀폐도	<ul style="list-style-type: none"> • 베이스챔버와 closing챔버가 서로 맞물리도록 제작되었으며 가스 sampling 시 틈을 완전히 밀폐하기 위해 베이스챔버와 closing챔버가 맞물리는 부분에 물을 채워 공기흐름을 차단하고 있음.

불확도 발생단계	가능한 불확도 요인	세부내용
	가스 sampling 시간대 선정 (대표시간 선정)	<ul style="list-style-type: none"> · 매일 오전 11시부터 30분 간 측정하고 이 결과를 24시간으로 환산 · 일반적으로 측정시간대는 24시간을 연소 측정하여 하루 배출량의 평균을 대표한다고 가정할 수 있는 시간대를 선정 · 단 이번 실험의 경우 대표시간을 선정하기 위한 실험을 별도로 수행하지 않았으며 유사연구에서 일반적으로 적용하는 대표시간대로 선정
	챔버 내 가스 농도의 균질성	<ul style="list-style-type: none"> · 챔버 크기가 클 경우 내부 가스가 불균질할 수 있어 가스 sampling 시 측정결과에 불확도 야기 · 이를 예방하기 위해 메탄 측정 실험의 경우 챔버에 팬을 달아 가스를 mixing · 단, N₂O 측정실험의 경우는 챔버가 작아서 챔버 내부 가스를 전부 sampling한다고 가정할 수 있기 때문에 미미한 요인일 것
	가스 sampling 시간의 불확도	<ul style="list-style-type: none"> · 이번 연구에서는 처리구에 챔버를 30분 동안 덮어 (closing) 가스 sampling · 그러나 30분이라는 시간이 항상 정확하지 않을 수 있음. · closing시간이 길면 측정되는 농도가 높아짐. · 추후 closing시간과 농도 간의 관계를 실험을 통해 계산해볼 수 있을 것. · 둘은 선형비례할 것으로 가정되므로 실험을 통해 회귀선이 나오면 이후부터 closing시간을 매번 측정하고 30분보다 많거나 적은 만큼 농도를 보정할 수 있음.
	sampling 가스 보관	<ul style="list-style-type: none"> · (중요성 낮음) · 주사기를 이용하여 sampling하는데 바로 분석을 하는 것이 아니라 1시간~일주일 쯤 그냥 두었다가 분석하기도 함. 이로 인해 내부 가스의 농도가 미세하게 바뀔 가능성 존재하나 큰 차이는 없을 것으로 보임.
	가스분석기기 오차	<ul style="list-style-type: none"> · 분석기기(GC)의 불확도는 시방서에 제시된 측정불확도 값을 이용하여 정량화 가능
	표준가스	<ul style="list-style-type: none"> · (중요성 낮음) · 가스분석을 위한 표준가스를 구입해 오는데 표준가스의 N₂O농도의 불확도가 있을 수 있음. · 그러나 표준가스는 측정 소급성 개념에서 최상위에 해당하므로 표준가스의 불확도를 포함하는 것이 불필요하다는 의견도 존재

② 축산부문 불확도 요인 (사료급여양태에 따른 배출계수 개발)

축산부문에서는 사료급여양태에 따른 장내발효 메탄 배출계수 개발 실험에서 발생할 수 있는 단계별 불확도 요인을 나열하고 각각에 대하여 측정가능성, 관리가능성, 중요도 등을 검토하였다.

(배출계수에 영향을 주는 주요 요인) 경종과 달리 장내발효에 따른 메탄 배출계수 실험은 환경, 가축 개체 특성 등 실험운영 요인이 모두 사료 섭취량 변화로 귀결된다고 가정할 수 있다. 즉, 메탄배출은 전적으로 사료섭취량에 의존하므로 경종부문과 비교할 때 상대적으로 불확도 요인관리가 용이하다. 단 불확도 관리의 용이성이 실험설계 및 배출계수 도출의 용이성을 의미하는 것은 아니므로 이와 구분할 필요가 있다. 한편, 경종부문과 비교하여 상대적으로 메탄 측정 챔버의 크기가 큰 만큼 챔버 내부 특성과 가스 샘플링 과정의 불확도가 보다 중요한 요인이 된다.

표 55. 축산부문 배출계수 개발연구의 불확도 요인

불확도 발생단계		가능한 불확도 요인	세부 내용
모형 설정		배출량에 영향을 미치는 독립변수, 통제변수의 누락	본 연구의 범위에 해당하지 않음.
		파라미터 설정	변수의 조작적 정의 모니터링 인자 설정
실험군/샘플링 설정		표본의 대표성	· 몸무게, 나이가 유사한 소를 비교군으로 활용
자료 수집	실험 운영 (사료)	사료 변경에 따른 일시적인 장내발효 영향	· 사료에 적용할 수 있는 기간(10~12일)을 두고 측정을 진행
		사료급여량 측정 오차	· 정확한 사료섭취량을 측정하기 위해 급여량과 먹고 남은 양의 무게를 측정 · 장내발효의 경우 사료섭취량이 가장 큰 요인이므로 무게 측정기의 측정오차 역시 고려해야할 불확도 요인 · 시방서에 표기된 측정오차 확인 필요
		사료조성	· 같은 시기에 구매한 사료는 서로 유사하다고 간주할 수 있으나 구매시기가 다를 경우 조성에 차이가 있을 수 있음. · 그러나 측정실험을 수행하기에는 미미한 요인임.
	실험 운영 (환경)	온도, 습도 등 환경요인	· (경종과 다르게) 환경요인의 차이는 사료의 섭취량 차이로 나타남. · 환경요인을 따로 측정/관리하기는 어려우나 실험 기간 동안 대상 실험축의 환경요인을 가급적 동일하게 유지하기 위해 노력함.
	측정	챔버 투입(환경변화)에 따른 일시적인 장내발효 영향	· 타 연구결과를 보면 챔버에 투입된 시간이 길어질수록 메탄 배출량이 감소함. · 따라서 챔버 투입에 따른 일시적인 영향은 없는

불확도 발생단계	가능한 불확도 요인	세부 내용
		<p>것으로 보이며 오히려 본 연구는 챔버 투입시간이 짧아 환경변화로 인한 배출량 영향은 낮을 것으로 보임.</p>
	챔버 내 가스 농도의 균질성	<ul style="list-style-type: none"> • 메탄 챔버는 크기가 커 공기를 mixing하는 팬이 부착되어 있음.
	챔버에 부착된 온도조절기	<ul style="list-style-type: none"> • 온도조절기가 챔버 내 공기를 흡입, 배출하면서 챔버 내부의 온도를 조절함. • 이 과정에서 챔버 내부의 메탄에 변화가 생길 수 있음.
	챔버 밀폐도	<ul style="list-style-type: none"> • 챔버의 밀폐도를 측정하기 위해 flow meter를 이용하여 회수율 테스트를 하고 있음. • 회수율은 약 70-80%이며, 이는 챔버 내부 메탄의 70-80%만 검출가능하다는 의미임. • 실제 메탄의 양을 구할 때는 70-80%로 측정된 값을 100%로 환산하여 구함.
	flow meter 불확도	<ul style="list-style-type: none"> • 측정과정에서 flow meter를 이용하여 외부 공기를 유입/배출 시키는데 이 유입속도에 따라 메탄 측정량에 차이가 나타남. • 이는 기기의 오차 때문은 아니며 연구자 입장에서도 고민할 필요가 있는 부분임. • 기기 자체의 오차는 최근 교정받은 결과(성적서)를 이용하여 오차 정량화 예정 • 없을 경우 시방서 기재 값 이용
	가스 sampling 시간	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 한 챔버 당 약 10분 마다 가스를 sampling하고 있음. (총 4챔버) • 외국의 연구를 보면 가스 sampling시간을 짧게 하는 것이 측정결과에 영향을 준다고 함. • 현재 10분 단위로 측정하는 이유는 하나의 디텍터가 각각의 챔버를 모두 측정하기 때문이며, 각 챔버를 측정하고 난 뒤 디텍터의 column을 cleaning하는 과정을 거치기 때문 • sampling시간을 단축하는 것을 검토 중임.
	가스분석기 오차	<ul style="list-style-type: none"> • 교정받은 결과(성적서)를 이용하여 오차 정량화 가능 • 없을 경우 시방서 기재 값 이용
	표준가스 오차	<ul style="list-style-type: none"> • (중요성 낮음) • 가스분석을 위한 표준가스를 구입해 오는데 표준가스의 N₂O농도의 불확도가 있을 수 있음. • 그러나 표준가스는 측정 소급성 개념에서 최상위에 해당하므로 표준가스의 불확도를 포함하는 것이 불필요하다는 의견도 존재

(4) 경종 및 축산부문 감축사업 배출계수 불확도

본 연구에서 농업부문 배출계수 불확도 산정에서 가장 중요하게 고려한 점은 첫째 농업부문 배출계수의 특성을 반영해야한다는 점과 둘째 배출계수 연구자가 비교적 쉽게 불확도를 산정할 수 있는 방안을 제시하는데 있다. 요약하면 농업부문 배출계수 개발연구의 가장 중요한 점은 원자료(raw data)가 측정데이터이고 실험특성상 데이터의 반복성과 재현성을 고려해야 한다는 점이다. 특히 농업부문 데이터는 분포의 정규성을 가정하기가 어렵고 반복성·재현성을 동시에 갖고 있기 때문에 이를 보완하기 위한 방법으로 부트스트랩 리샘플링 기법을 활용한 STBM(Standardized t Bootstrap)에 대해 앞서 선행연구로 검토하였다. 이 방법을 통해 분포의 비정규성을 가정할 수 있고, 또한 반복성·재현성도 반영할 수 있다. 그러나 엄밀성이 더욱 요구되는 국가배출계수와는 접근법이 달라서, 향후 다양한 분야의 감축사업 배출계수 연구자들이 비교적 쉽게 불확도를 산정하고 제시할 수 있는 틀을 제시할 필요가 있다. 따라서 아래의 불확도 산정에서는, 온전히 정규성 가정을 극복하거나, 반복성·재현성 문제를 통계적으로 정교하게 처리하지는 못하지만, 최대한 이 두 문제를 고려하면서 쉽게 불확도를 산정할 수 있는 방안을 제시하였다.

요약하면 각 배출계수의 최종 불확도는, 측정데이터의 분석에서 산출되는 불확도와 실험에 사용되는 측정기기 및 실험기기의 불확도를 합성하여 도출된다.

① 경종부문 배출계수 불확도 산정 (완효성 비료 배출계수 개발)

반복성 고려

특정일에 측정값으로서 3반복을 고려했을 경우, 해당 특정일의 데이터를 대상으로 상대확장불확도를 구한다. 표준불확도 산정→확장불확도 산정→상대확장불확도 산정을 과정을 거치며 여기서 주의할 점은 표준불확도와 확장불확도는 데이터의 속성단위별로 다르게 나타나기 때문에 상대적인 비교가 어렵고, 상대확장불확도는 단위가 퍼센트(%) 이기 때문에 불확도간 상대적인 비교가 가능하다. 각 표준불확도, 확장불확도, 상대확장불확도를 산출하는 계산식과 방법은 앞에서 기술하였기 때문에 여기서는 생략한다.

아래 표는 2015년 기준 논에서의 완효성 비료 배출계수 연구의 일별 측정데이터에 대한 일별 불확도를 나타낸다.

		반복성 → → →			불확도			비고
재 현 성 ↓ ↓	측정일	1반복 (예: 챔버1)	2반복 (예: 챔버2)	3반복 (예: 챔버3)	표준불확도	확장불확도	상대확장불확도 (%)	표준 불확도/표 본평균
	측정일1	측정값1-1	측정값1-2	측정값1-3	50.22	98.42	40.71	0.21
	측정일2				63.08	123.63	67.80	0.35
	측정일3				26.55	52.03	35.24	0.18
	측정일4				58.62	114.90	58.14	0.30
	측정일5				18.80	36.85	5.13	0.03

↓	측정일6			
	측정일7			
	측정일8			
	측정일9			
	측정일10			
	측정일11			
	측정일12			
	측정일13			
	측정일14			
	측정일15			
	측정일16			
	측정일17			
	측정일18			

77.50	151.90	22.75	0.12
63.57	124.59	22.97	0.12
108.07	211.81	31.85	0.16
97.37	190.84	28.26	0.14
72.50	142.09	15.22	0.08
50.49	98.97	10.92	0.06
67.35	132.01	21.98	0.11
58.74	115.14	16.05	0.08
49.05	96.15	18.87	0.10
58.85	115.35	22.71	0.12
140.37	275.13	94.07	0.48
21.27	41.69	19.75	0.10
24.09	47.22	17.69	0.09

총 18 측정일의 일별 불확도는 위와 같으며, 일별 상대확장불확도는 최소 5.13%에서 최대 94.07%로 나타난다. 이는 특정일의 불확실성이 불확도로 나타내진 것이다.

재현성 고려

대략적인 불확도 산정방식을 제시하고 있는 IPCC 가이드라인이나 GPG2000에서는 불확도 간 합성시, 불확도 매개변수 간 상관관계가 없어야 하고, 표준불확도를 표준평균으로 나눈 값이 0.3을 넘지 않아야 한다고 제시하고 있다. 표준불확도를 표준평균으로 나눈 값이 클수록 표준평균을 기준으로 데이터들이 멀리 분포하고 있음을 의미한다. 즉 표본의 산포가 커서 그 값이 0.3을 초과할 경우 이 불확도들을 합성하면, 합성된 불확도 값이 낮아지는 결과로 귀결된다.

우선 상관관계 유무 조건의 경우, 위 실험에서는 측정일 간 측정행위를 독립시행으로 불 경우 상관관계가 없는 것으로 가정한다. 표준불확도를 표준평균으로 나눈 값의 경우, 위 표의 비교에서 보는 바와 같이 측정일2, 측정일16일 경우만 0.3을 약간 초과하고 나머지 모든 측정일에서 0.3 이하의 값을 보이고 있다.

위 가정에 근거하여, 재현성을 반영하고자 하는 취지로 일별 상대확장불확도를 합성하도록 한다. 합성불확도 계산 방식 역시 앞에서 기술하였으므로 여기서는 생략하고 결과값은 아래에서 제시하였다.

배출계수 불확도 산정결과 비교

위의 과정으로 불확도를 산정하고, 반복성·재현성을 고려하지 않고 산정한 불확도와 비교하고자 한다. 위 표에서 일별 불확도를 합성한 결과는 아래 표의 b 와 같다. 즉 2015년 논을 대상으로 한 완효성비료의 배출계수 연구에서 측정일별 불확도를 합성한 결과는 158.98%로 나타난다. 그리고 2015년~2016년을 통합한 2년치 측정데이터의 합성불확도는 175.44%로 나타난

다.

그리고 반복성·재현성을 전혀 고려하지 않은 결과와 비교하고자 하였다. 위 표에서 반복성과 재현성을 고려하지 않을 경우, 총 18측정일에 각 측정일별 3반복 데이터의 총 개수는 54개이다. 이 데이터를 일자별 구분없이 그리고 반복별 구분없이 전체 표준편차로부터 상대확장불확도를 구한 결과는 2015년 논의 경우 14.37%로 나타난다. 아래 표에서 보는 바와 같이 반복성·재현성 고려없이 산출된 불확도는 10%대에 위치하고 있으나, 이와 달리 측정일별 불확도를 산정하여 이들을 합성한 불확도는 100% 이상으로 나타난다. 앞서 본문에서 수차례 논의한 바와 같이 불확도 값은 단순히 그 크기의 높고 낮음으로 판단하기 보다는 어떤 방법론으로 산정했는지, 어떤 요인들을 고려했는지에 대한 분석과 함께 그 값을 논의하는 것이 바람직하다. 그리고 본 연구에서는 농업부문 측정데이터의 가장 큰 특성인 반복성과 재현성을 반영하면서도 비교적 쉽게 불확도를 산정하는 방안을 제시하기 위해 이와같이 산정절차를 구성하였다.

표 경종부문 배출계수의 불확도(flux 데이터의 불확도)

	구분	2015년(논)	2016년(논)	2015~2016년 통합(논)
a	반복성·재현성 고려없이 일괄 불확도 산출	14.37 %	10.45 %	9.39 %
b	측정일별 불확도 산출 ⇨ 불확도 합성	158.98 %	74.20 %	175.44 %

	구분	2015년(밭)	2016년(밭)	2015~2016년 통합(밭)
a	반복성·재현성 고려없이 일괄 불확도 산출	12.72 %	18.25 %	10.91 %
b	측정일별 불확도 산출 ⇨ 불확도 합성	152.74 %	108.22 %	187.20 %

위에서 보는바와 같이 반복성·재현성 고려없이 개별 데이터를 구분하지 않고 일괄적으로 상대확장불확도 산출시 2015년, 2016년 각각의 불확도 보다 2개년의 통합 데이터를 대상으로 산출할 경우 불확도값은 낮아진다. 그 이유는 데이터 간 속성을 구별하지 않을 경우, 데이터의 개수가 많을수록 분포에서 표본들의 편차는 작아지기 때문이다.

반면에 측정일별 불확도를 산출한 후 불확도를 합성한 경우, 측정일자별 불확도를 합성하기 때문에, 측정일별 불확도 값의 숫자가 많을수록 합성불확도의 값은 높아지게 된다.

② 축산부문 배출계수 불확도 산정 (사료급여양태에 따른 배출계수 개발)

축산 부문 배출계수 불확도 산정 방식은 경종 부문과 동일하다. 축산 부문 배출계수 측정 실험은 총 8두의 공시축을 대상으로 각 2일(48시간)씩 사료 급여 양태 변화에 따른 배출량을 측정하였다. 매 14~15분 마다 메탄 측정을 수행했기에 한 두 당 약 200여 개의 측정값이 존재한다. 경종 부문의 반복성 기준이 개별 처리구라면, 축산 부문의 반복성 기준은 개별 가축 개체에 해당한다. 재현성의 기준은 다소 상이한데 경종 부문의 경우 일별 배출량의 차이를 재현성으로 보는 방식과, 각 연도별 (또는 작기별) 배출량 차이를 보는 방식이 존재하는 것과 같이 축산 부문의 경우 시간별 배출량 차이를 재현성으로 보는 방식과 각 일자별 배출량 차이를 보

는 방식이 존재할 수 있다. 경종 부문의 배출량에 영향을 주는 활동자료 인자 중 하나가 비료 시비이며, 이는 작기마다 반복된다. 마찬가지로 축산 부문의 배출량 (장내발효)에 영향을 주는 활동자료 인자 중 하나는 사료 급여 (총 영양 섭취량) 이며 이것이 매일 반복되기 때문이다.

따라서 반복성과 재현성을 고려하여 불확도를 산정할 때 재현성의 기준을 무엇으로 택할 것인가에 따라 값이 달라진다. 본 연구에서는 두 기준 모두에 대해 불확도를 산정하여 이를 비교할 수 있도록 하였다. 더불어 경종부문과 마찬가지로 각 재현성 기준별로 전체 데이터에 대한 불확도 값을 계산하였다.

표 혼합급여 실험 배출계수의 불확도(flux 데이터의 불확도)

	구 분	2015년 (습식TMR)
a	반복성 · 재현성 고려없이 일괄 불확도 산출	2.60 %
b	측정일별 불확도 산출 ⇨ 불확도 합성	36.43 %

	구 분	2016년 (건식TMR)
a	반복성 · 재현성 고려없이 일괄 불확도 산출	1.13 %
b	측정일별 불확도 산출 ⇨ 불확도 합성	118.93 %

표. 린시드 실험 배출계수의 불확도(flux 데이터의 불확도)

	구 분	린시드
a	반복성 · 재현성 고려없이 일괄 불확도 산출	3.68 %
b	측정일별 불확도 산출 ⇨ 불확도 합성	26.93 %

③ 기존 농업부문 배출계수 불확도와 비교

앞에서 산정한 경종 및 축산부문 배출계수의 불확도 값의 크기가 기존 다른 배출계수 불확도에 비하여 상대적으로 어떤 위치에 있는지를 검토하였다. 선행연구에서 기술한 바와 같이, 농업부문 감축사업 배출계수에 대해 불확도를 산정한 사례는 없으며, 국가배출계수의 경우에도 일부 국가 인벤토리에만 배출계수 불확도가 제시되어 있다.

아래 표와 같이 우리나라 국가인벤토리보고서에서 장내발효와 가축분뇨처리 부문의 배출계수 불확도를 제시하고 있으나 이는 국가고유배출계수는 아니며, IPCC 기본값을 차용하였다. 따라서 불확도 값도 역시 배출계수와 함께 IPCC 기본값을 참고하였다. 장내발효의 경우 배출계수 불확도는 ±50 % 수준이며 가축분뇨처리의 경우 ±20 % 수준이다. 한편 핀란드 국가인벤토리 보고서에 기재된 농업부문 배출계수의 불확도는 최소 14%에서 최대 248%에 이른다. 그리고 일본의 국가인벤토리 보고서에 기재된 농업부문 배출계수 불확도는 최소 2%에서 최대 163%에

이른다.

본 연구에서 산정한 경종부문 감축사업 배출계수의 불확도는 반복성·재현성 고려없이 측정데이터를 일괄적으로 처리한 경우 9.39% ~ 10.91% 수준이며, 측정일별 불확도를 산정해 합성한 경우에는 175.44% ~ 187.20% 수준이다. 그리고 축산부문의 경우 일괄적으로 산출한 불확도는 1.13% ~ 3.68%, 측정일별 불확도를 산정해 합성한 경우에는 26.93% ~ 118.93% 수준이다. 핀란드와 일본의 농업부문 국가배출계수 불확도가 최소 2%에서 최대 481% 수준인 점을 고려하면, 본 연구의 감축사업 배출계수 불확도는 주요 선진국 농업부문 배출계수의 최소 최대 범위 이내에 있는 것으로 나타난다.

표. 주요 국가인벤토리보고서 상 농업부문 배출계수 불확도 비교

국가	부문		배출계수 불확도		비고	
한국 (국가인벤토리보고서 2014년, 2015년)	장내발효 (4A)	젖소	±50 %		IPCC 기본값 (출처:1996 IPCC GL)	
		한·육우	±50 %			
	가축분뇨 처리 (4B)	젖소	±20 %			
		한·육우	±20 %			
핀란드 (국가인벤토리보고서)	농업 부문	최소	14 %	최대	248 %	-
	폐기물 부문	최소	32 %	최대	380 %	-
일본 (국가인벤토리보고서)	농업 부문	최소	50 %	최대	481 %	-
	산업공정 부문	최소	2 %	최대	163 %	-

마. 정량적 불확도 평가결과 요약

정량적 불확도 평가에서는 데이터에 기반하여 정량화 가능한 요인으로 두가지를 고려하였다. 첫째 챔버에서 발생한 메탄 및 아산화질소 양을 측정한 flux 원데이터(가스분석기를 거친 결과값)의 통계적 불확도와 둘째 측정기기로서 가스분석기의 측정 불확도이다. 그리고 가스분석기의 측정 불확도는 산업 부문에서 일반적으로 적용하는 방식과 같이 기기의 스펙과 관련된 오차범위를 사용한다. 그리고 최종적으로 위 두 불확도를 합성하여 최종 불확도를 산출한다.

본 보고서에 포함된 가이드라인에서는 위와 같은 불확도 요인 이외에도 정성적인 불확도 요인들이 기재되어 있다. 이같은 정성적 요인은 정량화가 불가능하기 때문에 가이드라인 상에서 연구자가 연구지침으로서 활용해야 하며, 정량적 불확도 산출에는 포함되지 않는다.

(1) 경종부문 배출계수 및 불확도 평가결과

경종부문에서는 완효성 비료 시비로 인한 아산화질소(N₂O) 배출계수가 도출되었다. 완효성 비료 시비 실험은 논에서 벼를 대상으로 한 실험과, 밭에서 고추를 대상으로 한 실험으로 구분된다. 논 실험과 밭 실험에서 모두 완효성 비료 시비(실험군)시 기존 속효성 비료 시

비(대조군) 보다 아산화질소 배출이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 완효성 비료가 아산화질소 감축효과가 있음을 의미한다. 이를 위한 전제로서 속효성 비료와 완효성 비료의 시비량이 달라도 동일한 수준의 작물 생산량을 얻을 수 있어야 한다. 이를 위해 논의 경우 속효성 요소 90 kg/ha 시비와 동일한 비 생산량을 얻기 위해 완효성 요소 57 kg/ha을 시비하였다. 밭의 경우 속효성 요소 190 kg/ha 시비와 동일한 비 생산량을 얻기 위해 완효성 요소 126 kg/ha을 시비하였다.

① flux 데이터의 불확도

챔버 내부에서 발생하여 가스분석기를 거쳐 산출된 아산화질소 flux 원데이터의 불확도를 산정하였다. 이때 반복성 및 재현성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 산정한 결과는 아래표와 같다.

② 측정기기의 불확도

가스분석에 사용하는 가스크로마토그래피(GC: Gas Chromatography, 보통 ‘가스크로’로 불림)는 일본 shimadzu사의 GC에 전자포획검출기(ECD: Electron Capture Detector) 및 가스검지기(FID: Flame Ionization Detector)를 장착하여 사용하였으며 GC의 기기오차 범위는 ±15%이다. 가스크로마토그래피란 gas와 같은 물질의 분리기술 중 하나로 기화하기 쉬운 화합물의 정량분석에 사용되는 분석장치이다. 본 경종 실험에서는 챔버에서 발생하는 아산화질소의 양을 정량적으로 분석·측정하는 데 사용되었다.

표. 경종부문 배출계수 및 불확도 요약

배출계수 설명	배출계수 (단위)	불확도			
		불확도1 (flux데이터 불확도)		불확도2 (측정기기 불확도)	최종불확도 (합성불확도)
완효성비료 시비로 인한 N ₂ O 배출계수 (논 비)	0.0018 (kg N ₂ O-N / N kg)	반복성·재현성 고려 없음	9.39 %	± 15 %	17.70 %
		반복성·재현성 고려	175.44 %	± 15 %	176.08 %
완효성비료 시비로 인한 N ₂ O 배출계수 (밭 고추)	0.0134 (kg N ₂ O-N / N kg)	반복성·재현성 고려 없음	10.91 %	± 15 %	18.55 %
		반복성·재현성 고려	187.20 %	± 15 %	187.80 %

* 배출계수 단위(kg N₂O-N / N kg) 설명: 완효성 비료(질소비료) 1 kg을 시비했을 경우, N₂O 배출량

** 단위변환 참고: 1 kg N₂O-N = (44/28) × 1 kg N₂O = 1.57 kg N₂O

한편, 경종과 아래 축산 부문의 가스분석기 오차의 크기에 차이가 나는 이유는 각 가스 분석기의 스펙이 다르기 때문인데 즉 가스분석 원리 및 기술이 다르고 측정범위(range)도 다르기 때문이다.

③ 최종불확도

앞서 산정한 두 불확도 즉 아산화질소 flux데이터의 불확도와 측정기기의 불확도를 합

성해 최종불확도를 산정하였다. 이 과정에서 IPCC 가이드라인에서 불확도의 합성방법으로 제시된 오차전파법을 사용하여 불확도를 합성하였다.

(2) 축산부문 배출계수 및 불확도 평가결과

축산부문에서는 린시드 첨가 실험, 사료의 혼합급여(TMR) 실험, 양질조사료 급여 실험을 실시하여 이로부터 발생하는 메탄의 비율로서 메탄전변율이 도출되었다. 사료급여로 인한 메탄발생량은 시험축이 호흡시 발생하는 메탄이 챔버로 회수되는 배출량과 이와 별도로 분뇨에서 배출되는 배출량으로 구분되며 당해 축산부문 연구에서는 호흡챔버 배출량을 대상으로 하였다.

실험1(린시드) : 사료에 린시드를 첨가한 실험에서는 두 번의 실험을 진행하였다. 사료에 린시드를 첨가한 경우의 메탄전변율은 각각 4.3 % CH₄-E/I-E 와 3.6 % CH₄-E/I-E로 나타났다. 따라서 총 메탄전변율은 두 결과값의 평균인 3.95 % CH₄-E/I-E로 나타난다. 여기서 메탄전변율은 축산부문에서 사료급여로 인한 배출량 산정시 활용되는 인자 중 하나이다. 메탄전변율이란 1마리의 시험축이 1단위의 사료를 섭취(Intake Energy: 섭취한 에너지량)했을 경우, 섭취한 에너지가 메탄으로 전환되는 비율(%)로 표현할 수 있다. 이 실험에서 건물섭취량은 시험축 체중의 2.4%를 급여하였고 린시드는 사료급여량의 2.3%를 첨가하였다. 한편, 린시드를 첨가하지 않은 경우(대조군)에 비해 오히려 린시드를 첨가한 경우(실험군) 메탄 배출량이 더 많이 나오는 것으로 나타났기 때문에 본 실험에서 린시드 첨가는 감축효과를 유발하는 요인으로 보기 어렵다.

실험2(혼합급여TMR) : 조사료와 농후사료를 혼합해 급여한 경우의 메탄전변율이 도출되었다. 여기서는 습식 혼합급여와 건식 혼합급여로 구분하여 실험이 실시되었다. 습식 혼합급여 실험은 다시 세 가지 급여방식으로 구분되었다. 사료 급여량에 따라 시험축 체중의 1.8%, 2%, 2.4%를 각각 급여하였다. 그 결과 메탄전변율은 각각 7.2 % CH₄-E/I-E, 4.1 % CH₄-E/I-E, 4.2 % CH₄-E/I-E로 나타났다. 실험결과 평균 메탄전변율은 5.17 % CH₄-E/I-E로 나타난다. 그리고 건식 혼합급여 실험의 경우 메탄전변율이 3.7 % CH₄-E/I-E, 2.4 % CH₄-E/I-E로서 평균 메탄전변율은 3.05 % CH₄-E/I-E로 나타난다. 한편, 분리급여한 경우(대조군)에 비해 오히려 혼합급여한 경우(실험군) 메탄 배출량이 더 많이 나오는 것으로 나타났기 때문에 본 실험에서 혼합급여는 감축효과를 유발하는 요인으로 보기 어렵다.

① flux 데이터의 불확도

챔버 내부에서 발생하여 가스분석기를 거쳐 산출된 메탄 flux 원데이터의 불확도를 산정하였다. 이때 반복성 및 재현성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 산정한 결과는 아래표와 같다.

② 측정기기의 불확도

본 실험에서 메탄분석은 레이저흡수분광법(TDLAS: Tunable Diode Laser Absorption Spectrometric) 기반 가스분석기를 사용하였으며 제품에 기재된 기기오차의 범위는 ±2%이

다. 본 축산부문 실험에서는 우방의 챔버에서 발생하는 메탄의 양을 정량적으로 측정하는데 이 분석기가 사용되었다.

표. 축산부문 배출계수 및 불확도 요약

구분	배출계수 설명	배출계수 (단위)	불확도			
			불확도1 (flux데이터 불확도)		불확도2 (측정기기 불확도)	최종불확도 (합성불확도)
실험 1 (린시드)	사료에 린시드 첨가시 메탄전변율	3.95 % (CH ₄ -E/I-E)	반복성-재현성 고려 않함	3.68 %	± 2 %	4.19 %
			반복성-재현성 고려	26.93 %	± 2 %	27.00 %
실험 2 (TMR)	사료의 습식 혼합급여(TMR)시 메탄전변율	5.17 % (CH ₄ -E/I-E)	반복성-재현성 고려 않함	2.60 %	± 2 %	3.28 %
			반복성-재현성 고려	36.43 %	± 2 %	36.48 %
	사료의 건식 혼합급여(TMR)시 메탄전변율	3.05 % (CH ₄ -E/I-E)	반복성-재현성 고려 않함	1.13 %	± 2 %	2.30 %
			반복성-재현성 고려	118.93 %	± 2 %	118.95 %

* 배출계수 단위(% CH₄-E/I-E) 설명: 1마리의 시험축이 1단위의 사료를 섭취(Intake Energy: 섭취한 에너지량)했을 경우, 섭취한 에너지가 메탄으로 전환되는 비율(%)

③ 최종불확도

앞서 산정한 두 불확도 즉 메탄 flux데이터의 불확도와 측정기기의 불확도를 합성해 최종불확도를 산정하였다. 이 과정에서 IPCC 가이드라인에서 불확도의 합성방법으로 제시된 오차전파법을 사용하여 불확도를 합성하였다.

3. 감축제도 배출계수 개발 · 검증 가이드라인 개발

가. 개발 간 주요 이슈

본 연구는 완효성 비료 시비와 메탄저감사료 이용을 통한 경종 및 축산부문 감축사업의 배출계수를 개발하기 위하여 수행되고 있다. 본 연구의 배출계수 개발 계획 과정에서 제기된 주요 이슈사항을 검토함으로써 향후 감축사업에서 추가적으로 필요한 배출계수를 개발하는데 참고해야할 이슈사항을 도출하고자 한다.

배출계수 개발계획 상에서 제시된 주요 이슈 중 하나는 국가배출계수와의 중복성이다. 국가배출계수를 개발 중인 배출계수에 대해 추가로 배출계수를 개발하여 재원과 시간이 낭비되지 않도록 하여야 한다. 한편으로는 본 연구에서 개발되는 배출계수의 신뢰도와 적합성을 확보하여 향후 국가배출계수 개발 연구로 확장될 수 있도록 연구 활용성을 높일 수 있다. 따라서 국가배출계수 개발계획을 고려하여 배출계수 개발 계획을 수립하는 것이 효율적이다.

또한 농업 부문 배출계수이므로 방법론의 적용이 생산성에 영향을 미치는 것에 대한 우려가 있었다. 따라서 방법론과 감축계수를 개발함에 있어 생산성에 영향을 미치지 않는지에 대한

폭넓은 검토가 필요하다. 한편 개발 감축계수의 활용성을 높이기 위해서는 국내외 공인된 기준에 따라 실험이 수행되고 결과의 신뢰성을 위한 불확도 평가가 반드시 수행되어야 다른 계수와 비교 등 객관성을 확보할 수 있다.

계수 개발을 위한 실험기간은 IPCC 가이드라인과 국가배출계수 개발연구와 같이 3년이 타당하다는 의견이 있었다. IPCC 가이드라인은 배출량을 산정하는데 적용되는 매개변수들을 측정할 때 이 변수가 시간적 변동성 (time variability)이 있는지 고려할 것을 권고하고 있다. 특히 계절적 영향이 중요시되는 농업부문의 경우 어느 한 해의 계절 특성이 배출계수 산정에 과도한 영향을 미칠 수 있다. IPCC 가이드라인은 이를 농업부문의 경우 최소 3년 간 측정된 실험 데이터를 이용할 것을 권장하고 있다. 온실가스종합정보센터 역시 농업 부문 국가배출계수를 개발할 때 최소 3년 간 측정한 데이터를 이용할 것을 지침에 명시하고 있다.

감축사업 역시 이러한 특성을 고려하였을 때 장기간 실험을 거쳐 배출계수를 개발하는 것이 필요하다. 그러나 현재 국가배출계수 개발연구와 감축사업 배출계수 개발 연구 여건의 상대적인 차이를 고려하여, 본 연구는 우선 2년의 기간 동안 최대한 실효성 있는 감축계수 개발을 도모하고 향후 추가적으로 경종 및 축산 부문 감축사업 배출계수를 개발할 때 고려되어야 하는 특성들을 도출하는데 그 의의가 있다. [표 56]은 위와 같이 감축계수 개발간에 제시된 주요 이슈사항들을 정리하였다.

표 56. 감축계수 개발간 주요 이슈

구분	논의 사항	날짜
연구 타당성 국가 인벤토리 배출계수 연구와의 중복성	<ul style="list-style-type: none"> · (본 연구에서 개발중인 배출계수가 국가 배출계수인지 여부) 국가 배출계수는 정부 차원에서 주도하고 있는데 이 연구에서 국가배출계수를 염두에 두고 계수개발을 진행하는 것 또는 배출계수 타당성을 평가하는 것이 적절한지 여부 · (과제 간 중복성 검토 필요) 국가 배출계수는 현재 관장기관, 산정기관이 수행하고 있음 - 계수 개발 실험연구는 국가배출계수가 아닌 감축사업 방법론에 적용할 계수 개발연구임. - 또한 감축계수나 방법론 개발은 장기간이 소요되므로 개발 타당성을 검토하는 계획이 우선 수립되어야 함. - 따라서 계수 개발의 타당성을 실용화재단과 협의. 이는 계수의 타당성이 아님. 이는 국가배출계수개발계획을 고려하여 수립되는 것이 효율적임. 	2015/4/15
연구 타당성	· 적은 방법론 수 대비 신규 계수 개발의 필요성	2015/4/15
연구 활용성 국가 인벤토리 배출계수 연계 절차	· 국가배출계수로 연계하기 위해 거쳐야하는 검증과정은 통계학 전문가와 관련 심사위원이 참여하여 장시간이 소요되며 승인이 되지 않는 비율이 높음.	2015/4/15
연구 활용성 국가 인벤토리 배출계수 연계 제안	· 개발될 계수의 국가배출계수로의 적용가능성 논의	2015/4/15

구분	논의 사항	날짜
연구 활용성	· 감축사업 뿐 아니라 개발된 계수의 활용성 확장 요구. 이를 위해 관계기관의 협조가 요구됨.	2015/4/15
방법론 타당성 분석 기간	· 경종 축산분야의 배출활동 특성은 계절적 영향이 중요. 계절로 인한 영향을 제거하기 위해 최소 3년간의 반복 실험 요구	2015/4/15
방법론 타당성 축산 생산성 저하	· 축산분야는 탄소저감보다 생산성이 더 중요시됨. 따라서 생산성 저하가 없는 방법론이 사업 확대 가능성이 높음.	2015/4/15
연구 방향	· 개발되는 계수가 배출원 산정식의 어떤 변수인지 구체적 설명 및 기대 결과물 제시 · 이 경우 연구결과로 특정 디폴트값이 구해졌을 경우, 해외 연구결과와 비교하여 연구결과값이 어느정도 범위에 위치해 있는지 등을 검토할 수 있어 연구의 객관성 확보가능	2015/5/27

(1) 경종 부문 배출계수 개발연구 주요 이슈

경종 부문 배출계수 개발 연구 과정에서 제기된 주요 논의 사항들은 크게 사업경계 정의, 실험처리내용, 연구결과의 활용도, 모니터링, 불확도 평가로 구분된다.

사업 경계 정의에 대해서는 완효성 비료를 시비하기 위하여 완효성 비료를 생산하는 사업장과 생산설비를 사업경계에 포함해야하느냐에 대한 논의가 있었다. 또한 완효성비료를 시비함으로써 농경지에서 발생하는 N₂O에 대한 직접배출 뿐만 아니라 간접배출 또한 배출량 경계에 포함할 것인가에 대해 논의가 제기되었다. 주요한 실험처리로서 완효성 비료를 이용하는 것에 대해서는 기존에 이루어진 연구 중 완효성비료 적용이 질소시비량을 감축하는 효과가 있었음이 논의되었다. 그러나 실제 사업화를 위해서는 완효성 비료의 단가가 중요한 이슈가 되며 이것이 연구의 활용도를 결정지을 수 있다. 실제 사업수행과정에 대한 고려로서 명확한 모니터링 시점을 규정하는 것이 불확도 평가를 위해 필요하다는 내용이 제기되었으며 실제로 베이스라인 및 모니터링 인자에 따라 불확도 평가방법을 적용해야하는 가에 대한 논의가 있었다.

표 57. 경종 부문 배출계수 개발 연구 관련 논의 및 주요 이슈

구분	논의 사항	날짜
사업경계/온실가스배출원	· 사업경계를 비료 생산사업장/설비 + 농경지로 고려하는 문제 · 벼재배(4C)자료는 어느 정도 있지만 농경지도양(4D)는 자료가 없음. 더욱이 간접배출은 방법론(접근법)이 완전히 다름.	2015/2/3
실험 처리 완효성 비료	· (완효성비료 배출계수 개발 연구의 타당성) 완효성비료는 시비량을 줄이기 위해서 개발한 것으로 질소시비량을 약 30%줄이는 것으로 밝혀져 있음.	2015/2/3
연구 활용도	· 완효성 비료의 경우 감축효과와는 별개로 비료 단가가 상대적으로 높아 차후 정책화, 실용화 측면에서는 이에 대해서도 고려할 수 있음	2015/5/28

구 분	논의 사항	날짜
모니터링	· 완효성비료, 저탄소비료 지표값을 사용하여 모니터링 체계 구축 가능	2015/4/15
모니터링	· 다겹 보온커튼, 축산, 경종 부문 모두 모니터링 시점이 명시되어야 타당성 평가와 불확도 평가가 가능함.	2015/4/15
불확도	· 배출계수의 신뢰성을 확보하기 위해 불확도를 제시할 수 있음. 따라서 불확도 평가계획을 수립하는 것이 본 과업의 중요한 부분임.	2015/4/15
불확도 산정	<ul style="list-style-type: none"> · 불확도 산정과 관련하여 IPCC GL이나 GPG 2000에서는 크게 두 단계로 배출계수 불확도를 산정할 수 있다고 제시됨. - 첫 번째 방법론은 Error Propagation(오차전파법)으로서 컴퓨터의 기술적인 도움 없이 수행 가능하며 비교적 간단한 모델식에도 적용가능하므로 보편적으로 사용됨. 단, 측정값의 분포가 정규분포가 아니거나, 모델식의 비선형성이 큰 경우, 데이터의 표준불확도가 데이터값에 비해 매우 큰 경우, 특히 변수간에 상관관계가 있는 경우에는 적용이 어려움. - 이러한 경우 몬카를로 시뮬레이션을 이용할 수 있음. 	2015/5/28
불확도 산정 : 농업 부문	<ul style="list-style-type: none"> · 농업부문 국가배출계수 등록단계에서 “불확도”는 산정 방법 및 평가과정 - 기존 경종부문 국가배출계수 등록단계에서는 측정값의 평균과 표준편차를 이용하여 산정되었으며 시뮬레이션방법은 적용되지 않음. - 또한 기존의 프로세스를 전제로 했을 때, 국가배출계수 등록단계에서 불확도 부분을 매우 엄밀하게 체크한다고 판단하기는 어려움. · 불확도 산정 시 고려된 변수, 또는 고려할 수 있는 변수 <ul style="list-style-type: none"> - 국가배출계수 등록 시 고려된 불확도 산정 변수 - ① 시간(채취시간, 1일내 하루간의 시간 중) - ② 계절(연간 중 편차) - ③ 지역(연구대상지역 3~4개 지역의 대푯값 선정) - 온실가스 배출계수 모델에 직접 관련된 변수는 ① total N₂O ② N(시비량) ③ ‘토양’ 수분함량 등이 고려됨. 이중 다시 ‘토양’에 영향을 미치는 요인은 ① 산소양 ② 온도(미생물 생육 관련) ③ 유기물 양 등이 있음. · 불확실성의 범위를 어디까지 보느냐에 따라 불확도 범위도 달라질 수 있음. · 이 맥락에서 농업부문 배출계수 불확도 산정시 시뮬레이션의 의미가 크지 않을 수도 있기 때문에 아직 논의되지 않았을 가능성이 있음. · 농업부문 배출계수 불확도 산정시 시뮬레이션의 의미가 크지 않을 가능성을 염두에 두고 연구범위를 적정하게 조절할 필요가 있음. · 통계적 개념인 표본편차 개념에서 비롯된 표준불확도, 확장불확도, 상대확장불확도, 합성불확도 산정을 기본으로 한 오차전파법으로 불확도 산정을 계획하고 불확도 연구의 적정범위를 검토 	2015/5/28

(2) 축산 부문 배출계수 개발연구 주요 이슈

축산 부문 배출계수 개발 연구과정에서 제기된 주요 논의 사항은 연구활용도, 감축효과, 실험처리, 표본선택 시간적 영향, 가축 생산성 저하 문제 등이 있었다. 특히 사업 자체의 활용도와 효과 측면에서 수입사료가 주로 이용됨에 따라 운송과정을 온실가스 감축효과가 상쇄될 수 있다는 지적과 저탄소 비료를 사용함으로써 가축 생산성이 저하될 경우 사업이 확장되기 어렵다는 지적이 있어 이에 대한 추가 연구가 필요하다는 합의가 있었다.

또한 실험 표본 설정과 관련된 이슈사항은 크게 두 가지로 표본 크기(실험 대상 가축 수)와 실험 대상 축종에 대한 것이 있었으며 실험 처리는 오일급여, 양질 조사료, 첨가제, TMR 이용에 대해 연구개발과정의 이슈사항이 있었다. 특히 가축의 메탄배출량에 대한 계절적 영향에 대한 고려가 충분한가에 대한 논의가 있었다. 이는 IPCC 가이드라인에서 벼 재배와 같이 배출활동 특성에 시간적 영향이 고려될 경우 배출계수를 개발하기 위한 실험연구를 최소 3년간 수행할 것을 권고하고 있기 때문이다. 캐나다 등의 경우 계절별 배출계수 개발 연구를 수행하고 있긴 하지만 이는 국가배출계수 관점에서 3년이 언급된 것이므로, 본 연구는 감축제도 베이스의 연구로서 2년간의 배출량 측정데이터를 이용하여 배출계수를 개발하는 것으로 제시되었다.

표 58. 축산 부문 관련 논의 및 주요 이슈

구분	논의 사항	날짜
연구 활용도	<ul style="list-style-type: none"> 본 과업의 목표는 축산 부문의 배출계수를 만드는 것으로 특히 식물성 지방과 TMR 등 감축효과가 있는 방법론 적용에 따른 배출계수를 개발. 기존에 적합한 계수가 없어 IPCC 가이드라인 등 기본값 (디폴트값)으로 감축효과를 산정하였으나 이를 대체할 수 있는 적합한 계수를 만드는 것이 목적 	2015/2/3
감축 효과 상쇄문제	<ul style="list-style-type: none"> 사료의 대부분이 수입이므로 수입과정을 고려하면 감축효과가 상쇄될 수 있음. 저탄소 사료에 대한 감축효과는 기존 저탄소 사료개발업체 측에서 25% 감축효과가 있음을 제시하였으나 실제로 증명된 연구 결과는 없음. 방법론에 사용되도록 감축제도까지 접근한 것은 고무적인 결과임. 	2015/2/3
실험 표본 크기 대상 가축 수	<ul style="list-style-type: none"> 현재 표본 크기인 소 6두가 연구의 일반화를 위해 충분한 표본 크기인가에 대한 의견이 제기됨. 이에 대해 실험에 쓰일 소의 가격이 비싸 표본크기를 늘리는데 제약이 있으며(한우200만원 -> 육우50만원) 다른 국가에서 이루어진 축산부문의 배출량 측정 연구 역시 유사한 표본 크기를 설정하고 있음이 확인됨. 	2015/2/3
해외 연구 비교	<ul style="list-style-type: none"> Ym값(메탄전환계수, Methane conversion rate)에 대해 알버타 방법론은 실제적인 감축량 값을 제시하고 있음 이에 대해 우리나라의 현황을 검토하는 것이 필요함. 	2015/2/3
실험 처리	<ul style="list-style-type: none"> 실험처리가 단순히 저탄소 사료는 먹이는 소와 그렇지 않은 소로 구분되는지에 대한 질의가 제기됨. 단순히 먹이는 것과 안먹이는 것으로 구분하는 것보다 사료의 양을 달리하는 등 실험처리를 다양화하는 것에 대한 의견이 제기됨. 	2015/2/3

구분	논의 사항	날짜
활동자료 연계 사료구매량 기준 문제	· 활동자료로서 사료의 양을 측정해야 함. 이를 단순히 판매량으로 계산하는 것은 부정확함(판매량≤구매량≤실제 먹는 양).	2015/2/3
실험 처리 : TMR	· 농후사료가 많이 들어가면 분명히 배출량은 감소함. 그러나 확인을 위해 실험이 필요 - * treatment: 원료 같게, 다르게(영양소는 동일), 8주 2회 16주 4~5개월 소요	2015/2/3
실험 처리 : 오일급여	· 선진국 소들은 목초를 먹고 자라서 오일을 주면 “첨가제”로 인식됨. 그러나 우리는 기존에 어느정도 첨가가 되어 추가성이 낮을 수 있음.	2015/2/3
연구 활용도	· 저탄소사료 회사가 이 연구를 바탕으로 제품화도 가능할 것으로 판단됨. 이 관점에서 저탄소 사료에 대한 분명한 정의도 필요함. 기업의 활용가능성도 염두에 둬야함	2015/5/27
실험 처리 : 해외연구	· 실험 treatment와 관련하여 해외참고 및 국내 적용가능성을 고려해야 함 · CDM의 경우(영국, 캐나다 → 우간다 전체에 사료를 보급)에도 MRV가 명확하지 않다(원료 등의 급여)는 사유로 reject된 사례가 있음. MRV관점을 체크할 필요가 있음 · 알버타 방법론(2011) beef cattle의 경우 finish diets(육우를 출하하기 직전 살을 많이 찌움) · 알버타 방법론(2010) dairy의 경우 실험처리의 예는 - ① monensin(항생제 일종)→국내 사용 금지 - ② feeding fat - ③ 옥수수에서 지방을 빼고 만든 잔사→국내 사료회사에서 10% 사용 - (그 이상은 가격문제로 어려움)	2015/5/27
가축 생산성	· 축산부문 사업의 경우 적절한 투입기술을 찾기가 매우 어려움. edible oil의 경우만 해도 오일급여가 사료섭취율, 소화율에도 영향을 줌. · 사료(농후) 먹인 젖소와 풀을 먹인 젖소의 발육이 차이에 대한 질의 - 먹이도 중요하지만 사육환경 자체도 중요. 반추가축은 풀을 먹어야 컨디션이 좋는데 단기에 큰 효과를 내기위해 농후사료 등을 급여. 우리나라의 경우 농후사료 비중이 높아 평균 약 2.5산 정도인데 비해, 낙농선진국의 경우 양질의 조사료를 사용하기 때문에 8산 까지 출산이 가능함. 국내 당국도 조사료 대 농후사료 비율을 6:4 정도까지 가져가는 것을 목표로 하고 있음.	2015/5/27
분석 시간 범위	· IPCC GL에 농업부문과 관련해 3년 기간이 언급되어 있음. 캐나다 등의 경우 계절별 연구를 수행. 국가배출계수 관점에서 3년이 언급된 것이고, 본 연구는 감축제도 베이스의 연구이기 때문에 2년 과제로 제시된 것임.	2015/5/27
실험 대상 육우 변경	· 공시축 한우12두(실험 각 연차 중 5~6개월) → 육우로 변경 고려	2015/5/27
실험 처리	· 실험설계 관련하여, 5개월간 교대로 주기적으로 챔버에 입실시킬 예정이며 (4두 분리급여/TMR, 4두 분리급여/혼합급여)실시	2015/5/27
실험 설계	· 영양소나 건물 베이스로 할 경우 사료의 영양소 농도에 대한 확인 필요	2015/5/27

구분	논의 사항	날짜
사료 판매량 기준	<ul style="list-style-type: none"> · 사료의 경우 “판매량” 기준으로 접근하는 것이 문제가 있을 수 있음. 목재펠릿의 경우 판매량으로 데이터를 잡는데, 사료의 경우 접근법이 다를 수 있음. 	2015/5/27
실험 처리 : 소 연령 요인 통제	<ul style="list-style-type: none"> · 실험군 대조군 분리시 두수도 중요하지만, 소의 연령도 고려할 수 있음. 예를 들어 1두 기준으로 분리급여/혼합급여의 차이보다, 연령차이가 많이 나는 2두의 배출량 차이가 클 수도 있다고 판단됨 - - 축산과학원의 성장단계별 연구가 있음 	2015/5/27
실험 처리	<ul style="list-style-type: none"> · 기존에 예정된 실험 treatment인 <ul style="list-style-type: none"> - ① 식물성 지방 첨가 - ② 볏짚 → 양질 조사료로 전환 - 을 변경하여 다음의 실험 treatment를 고려하고 있음 - ① 섬유질 배합사료 - ② 양질 조사료 대체 - ③ 발효개선 첨가제(지방 성분인면서 첨가제임) · 우리나라는 monensin을 사용할 수 없음. 실험처리 treatment로 사용할 수 있는 해외 기술을 찾고 있음 	2015/5/27
실험처리 : TMR	<ul style="list-style-type: none"> · 실험처리로서 “섬유질 배합사료”를 넣으려는 근거는 <ul style="list-style-type: none"> - “조농분리 급여와 혼합급여(TMR)” - Hristov외(2013) → (very little research is available) - 젖소는 전부 혼합급여 - 육우는 혼합급여를 늘려가는 추세임(아직 보급률이 높지 않음) - 그리고 혼합급여가 메탄발생을 줄이는지에 관한 연구가 많지 않음 - (TMR→메탄발생) 관련 두 개의 연구가 있는데 두 연구결과가 서로 다르게 나왔었음. 이번 연구에서 합리적인 결과가 나오길 기대함 	2015/5/27
실험 처리 : 양질조사료	<ul style="list-style-type: none"> · 사료를 먹으면 메탄이 더 많이 나옴. 우리는 농후사료(또는 TMR)을 먹이기 때문에 Ym이 더 작을 것. 단 “양질조사료”를 먹이면 Ym이 작아짐 - 실험 treatment로 사용될 경우, 양질조사료의 경계 및 정의가 필요 	2015/5/27
실험처리 : 오일급여	<ul style="list-style-type: none"> · 사료회사에 문의해보니 사료에 지방이 약 5% 정도는 들어감. 배합사료 평균 5% (약3-6%) 지방 첨가. 따라서 지방을 더 첨가할 여지가 없음. 알버타 방법론의 경우에도 (2010년) Dairy cattle not to exceed 6% on DM basis. · “사료자체에 지방이 포함”되어있는데 여기에 “추가로 지방 급여” 할 경우 베이스라인을 설정하기가 어려운 문제도 있음 - 경종부문 간단관계의 예를 들면, 간단관계 보급률은 이미 80%에 근접하여 추가적인 여지가 없음 	2015/5/27
실험처리 : 양질조사료	<ul style="list-style-type: none"> · “양질조사료”의 개념정의도 쉽지 않음. - 양질조사료의 경우, 절대량은 아니지만 에너지투입량 대비 메탄발생이 줄어드는 것은 확실함 	2015/5/27
실험 처리 : 섬유질 배합사료	<ul style="list-style-type: none"> · 섬유질 배합사료 공급과 관련하여 특정업체만 관련되는 방법론이 되면 형평성의 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 사전검토 필요 	2015/5/27

(3) 다겹보온커튼 보온율산정 주요 이슈

다겹보온커튼의 보온율 산정 연구과정에서 제기된 주요 논의 사항은 다겹보온커튼의 수명에 따른 보온율 저하, 보온율 측정 방식, 경제성, 생산성 문제 등이 있었다. 특히 다겹보온커튼은 공급업체 측에서 평균 8년을 수명으로 보고 있어 시간이 지남에 따른 보온율이 저하된다. 또한 보온율 측정시 야간 천공 복사냉각을 고려하는 방법이 제기되었으며 이에 대해 상세한 보온율 측정 계획은 추가 논의가 필요하다고 합의되었다.

표 59. 다겹보온 커튼 보온율 산정 연구 관련 논의 및 주요 이슈

구분	논의 사항	날짜
연구 진행 관련	· 다겹보온커튼 공급과 관련하여 협력기관 모색 필요	2015/2/3
다겹보온 커튼 수명	· 다겹보온커튼의 수명에 대한 기존 관련 연구가 없으므로 감가상각율을 임의적으로 5% 적용하는 방안 제기 · 대안으로 샘플을 이용해서 보온율을 측정하는 방안 제기	2015/2/3
다겹보온 커튼 수명	· 다겹보온커튼 관련 업체는 8년 정도를 수명 간주 · 다겹보온커튼 감축연구는 많으나 7년 이상 수명이 연장된 경우는 없음. 또한 2년, 3년이 지난 후에도 50%인지에 대한 연구내용이 없음. 감가상각율 적용을 고려해 볼 수 있음. · 다겹보온커튼 방법론에는 보온율 40%이상을 유지하도록 규정하고 있음. 년차별로 샘플을 뜯어내어 시험분석을 통해 40%이상이 유지되고 있는지 확인할 수 있을 것.	2015/4/15
보온율 측정	· 보온커튼 내 외부 온도변화를 통한 보온율 테스트가 필요 · 보온율 측정은 알루미늄 야간복사냉각 측정방법 (기존 방법론은 부정확할 가능성이 있음). · 야간 천공 복사냉각 고려한 측정방법 (사용년수, 향후 실험계획 필요)이 사용될 수 있음.	2015/4/15
연구활용도 : 설치 경제성, 작물 생산성	· 설치에 따른 경제성 고려 필요 · 커튼으로 인한 그림자가 작물 품질에 미치는 영향에 대한 추가 검토가 필요함.	2015/4/15

나. 국가배출계수 개발 과정 검토

농업 부문의 인벤토리를 Tier 2수준으로 산정하기 위해서는 24개의 국가배출계수(보정계수) 개발이 필요하다.²³⁾ 이 중 경종 분야에 대한 12개의 국가배출계수가 현재 등록되어 있다. 본 절에서는 그동안 수행된 농업 부문의 국가배출계수 개발 연구인 「국가 고유 온실가스 배출계수의 품질관리 연구」(농촌진흥청, 2014)²⁴⁾의 내용을 검토함으로써 국가배출계수 개발 및 품질

23) 온실가스종합정보센터. (2014.08). 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 1차 계획(2015~2019)

관리를 위한 시사점을 도출하고자 한다. 해당 연구는 2014년 등록된 11개의 경종 부문 온실가스 배출계수 개발 연구를 담고 있다.

(1) 벼재배(4C)

2006 IPCC GL에서 규정하는 Tier 2 수준으로 벼논의 메탄 배출량을 산정하기 위해서는 우리나라 벼논에서의 고유 메탄 배출계수를 우선적으로 산정하고 메탄 배출량에 영향을 줄 수 있는 물 관리 방법, 유기물 시용량, 토성이나 벼의 품종 등에 대한 보정계수를 곱하여 배출량을 산정하여야 한다.

2014년 벼 재배 배출량 산정에 필요한 배출계수와 보정계수 5개가 국가고유배출계수로 등록되어 2006 IPCC GL 기준에 맞춘 Tier2 수준의 산정방법론을 적용하여 배출량을 산정할 수 있게 되었다.

(가) 벼 재배 기본 배출계수 개발 연구

■ 개발 방법

우리나라 논토양에서 벼 재배 기간 동안 메탄 기본배출계수를 산정하기 위해 전국 4개 지역의 논 토양에서 3년간 메탄배출량을 조사하였다. 벼 품종은 지역별로 대표적인 품종을 선정하였으며 최종적으로 연도별 지역별 메탄 배출계수를 평균한 값을 우리나라 벼 재배 메탄 기본배출계수로 산정하였다.

실험조건은 2006 IPCC GL에 제시된 내용을 기본적으로 준수하였다. 먼저 벼 재배 기본 메탄배출계수를 산정하기 위해 최근 5년 동안 유기물 또는 유기개량제를 투입하지 않은 논에서 뿌리나 그루터기를 제외하고는 다른 유기물을 투입하지 않고 이앙전 180일 이내에는 담수하지 않는 조건(겨울철 비담수)과 이앙후부터 성숙기까지 지속적으로 담수상태를 유지하는 조건에서 3년 연속 측정된 메탄 배출량을 평균한 값을 사용하였다(농업진흥청, 2014, pp20). 또한 하루 24시간 동안의 메탄배출량 변화를 조사하여 하루 평균 메탄배출계수를 우선적으로 산정한 후 일 평균 메탄배출계수와 유사한 배출계수를 보이는 시간대를 설정하고 이후 지속적으로 이 시간대에 가스시료를 채취하였다.

표 60. 벼 재배 기본 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

실험 대상지 및 벼 품종		공통사항
경기도 화성	삼광벼	<ul style="list-style-type: none"> · 기본적으로 2006 IPCC GL에서 규정하는 물관리 방법 및 시료 채취 시간대 선정 방법 등을 준용 · 물관리 : 작기 중 상시담수 유지 · 화학비료 : N-P2O5-K2O=90-45-57 kg/ha · 메탄 포집 및 시료 채취 <ul style="list-style-type: none"> - 아크릴 챔버로 포집. 챔버 총 8개의 벼 포기 이앙. 챔버 하단 사방에 4개의 구멍을 통해 물 왕래 가능. 챔버에 부착된 소형 Fan으로 시료채취 기간 중 공기 혼합 유도
대구	칠보벼	

24) 본 연구는 농촌진흥청에서 「국책기술개발사업」으로 시행한 연구 결과임.

		시료채취 시간 외에 전 기간 동안 챔버 뚜껑 개방 상태 유지 - 하루 평균 메탄배출계수 값과 유사한 메탄배출계수가 측정되는 시간대를 우선 선정하여 해당 시간(11:00-12:00)대 마다 주 2회 채취(2006 IPCC GL 기준 준용)
광주	호품벼	• 토양 분석 - 가스 시료 채취시기 마다 대기, 토양온도, 산화환전위 기록 • 메탄 분석 - GC-FID(Agilent GC6890) 이용하여 분석 - column : porapak NQ column 이용. column은 80° C, injector는 100° C, detector는 110° C 유지
경남 진주	동진벼, 추청벼, 일미벼, 남평벼, 주남벼, 삼광벼	• 기타 - 벼 재배 기간 중 총 메탄 배출량은 Singh et al.(1999)에서 제시된 식으로 환산 $Seasonal CH_4 flux = \sum_i^n (R_i \times D_i)$ - 단, Ri, Di는 각각 i번째 시료 채취 시기에 메탄 배출률(CH ₄ flux, mg CH ₄ /m/day), 시료채취 간격(day)

■ 개발결과

메탄 배출계수는 조사지역간 다소 차이가 있었으며 조사기간 동안 대기과 토양온도가 가장 높았던 대구에서 측정된 메탄배출계수가 타 지역보다 크게 높았다. 연도별 지역별 메탄배출계수를 평균하여 도출된 우리나라 벼 재배 기본 배출계수 2.32 kg CH₄/ha/day 는 2006 IPCC GL에서 제시된 배출계수 1.30 kg CH₄/ha/day에 비해 1.8배 이상 높게 나타났다. 이는 2006 IPCC GL의 벼 재배 메탄배출계수 산정과정에서는 토양 유기물 함량이 낮은 남중국, 태국, 베트남 등의 지역이 상당 수 포함되었기 때문이라고 판단된다.

표 61. 벼 재배 기본 배출계수 개발 연구 결과

	실험 대상지역					
	화성	대구	광주	진주	평균	신뢰구간(Error range)
Mean	2.04	3.32	1.49	2.42	2.32	-
신뢰구간 (Error range)*	1.63-2.46	2.98-3.66	0.00-2.99	2.13-2.72	-	1.82-2.82

※ 주 : (*) 신뢰구간은 95% 신뢰 수준 이내

■ 불확도 평가

3년간 전국 4개 지역에서 조사된 평균 1일 메탄배출계수의 정규분포 95% 신뢰구간(erro

range)를 산정하고 이 error range의 절대 값을 평균 배출계수로 나누어 자료의 불확도(%)를 평가하였다. 평가결과 95% 신뢰구간 유효 오차범위 1.82-2.82 kg CH₄/ha/day에서 불확도는 21.7%로 나타났다.

(나) 볏짚 시용에 따른 보정계수 개발 연구

■ 개발 방법

2010년부터 2012년까지 3년 동안 볏짚 시용량을 달리한 벼 재배지(처리구)를 대상으로 처리구별 일일 메탄 배출량(메탄 배출계수)을 측정하는 실험을 수행하였다. 회귀식을 통해 볏짚 시용량 차이에 따른 메탄 배출량의 변화량을 도출하여 볏짚 시용량에 따른 보정계수를 개발하였다.

표 62. 벼 재배 기본 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 볏짚 시용량	공통 사항
생볏짚 0Mg/ha (범위 1-3)	<ul style="list-style-type: none"> · 실험 전 토양 특성 : pH 6.5, 유기물 함량 20 g/kg, 식양토(Clay Loam), 배수상태 다소 불량 · 화학비료 : N-P2O5-K2O=90-45-57 kg/ha 공통 시용 · 볏짚성분 : 전질소 0.7%, 전탄소 47.7% (탄소:질소=68.1:1) · 볏짚시용 : 시험년도 전년도 수확한 생볏짚을 11월에 시용 후 경운(추경) · 벼 품종 및 이앙 방식 : 삼광 벼를 30cmX14cm 이앙거리로 기계이앙 · 물관리 : 수확 2주 전까지 상시담수 유지 · 메탄 포집 및 시료 채취 <ul style="list-style-type: none"> - Mininert valve가 장착된 60ml polypropylene syringe 이용. 챔버 윗 뚜껑을 닫자마자 1차 채취. 30분 후 2차 채취(오전 10시 30분-11시). 채취시 마다 눈물로부터 챔버 상단까지 유효높이와 온도 측정. 주 2회 실험 · 메탄 분석 : GC-FID(450GC, Varian) 이용. <ul style="list-style-type: none"> - column : 스테인리스스틸 tubing column(porapak N(80/100 mesh) 충전) - carrier gas : N₂, 분당 30mL 유속 조절 · 토양 분석 : 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000) 준용 <ul style="list-style-type: none"> - Eh 측정 : 백금전극 Eh미터 - pH/EC 측정 : 초자전극법 이용. ph meter(Orion 370, ATI), EC meter(Orion 170, ATI) - 유기물 Tyurin법, 유효인산 Lancaster법 이용 - 치환성양이온 1 N-NH₄OAc(pH 7.0) 완충용액으로 침출. 유도결합플라즈마 발광광도계로 정량. - 유효규산 : 1 N-NaOAc(pH 4.0) 완충용액으로 침출. 비색계로 분석. · 벼 생육 및 수량조사 : 농사시험연구 조사기준(RDA, 2003) 준용
생볏짚 3Mg/ha (범위 3-5)	
생볏짚 5Mg/ha (범위 5-7)	
생볏짚 7Mg/ha (범위 7+)	

■ 개발 결과

처리구간 벼 생육과 수량에 현저한 차이는 발견되지 않았으며 볏짚을 5 Mg/ha 사용한 처리구에서 수량이 가장 많았다.

CH₄ 배출량은 볏짚 시용량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 3년 평균 메탄 배출량과 볏짚 시용량 간의 회귀분석식은 결정계수(R²) 0.999로 신뢰수준 95% 이내에서 유의하게 나타났다.

$$E_{CH_4} = 0.0650*(\text{볏짚 시용량})^2 + 0.0947*(\text{볏짚 시용량}) + 2.0613, R^2=0.999^{**}$$

본 연구를 통해 도출된 볏짚 시용에 따른 보정계수는 GPG 2000에서 제시한 보정계수의 범위 내에 속한다.

표 63. 볏짚 시용에 따른 보정계수 개발 연구 결과

구분	볏짚 시용량(범위)	보정계수(SFo)	Range
GPG 2000	1-2	1.5	1-2
	2-4	1.8	1.5-2.5
	4-8	2.5	1.5-3.5
	8-15	3.5	2-4.5
	15+	4	3-5
국가배출계수	1-3	1.2	1-1.4
	3-5	1.7	1.4-2.0
	5-7	2.5	2.0-2.9
	7+	3.4	2.9-4.0

■ 불확도 평가

회귀모형은 신뢰수준 95% 이내에서 유의하며 불확도 평가에 대한 상세한 내용 및 불확도 값은 별도로 제시되지 않았다.

(다) 녹비 시용에 따른 보정계수 개발 연구

■ 개발방법

녹비 종류를 다르게 처리한 벼 재배지(처리구)에 대해 2009~2012 평균 메탄 배출량을 측정하였다. 이 중 시험 준비기간인 2009년 자료를 제외한 3년치 측정자료를 이용하여 녹비 작물 종류별 메탄 배출량의 차이를 분석하여 녹비작물 종류별 메탄 배출량 보정계수를 개발하였다.

표 64. 녹비 시용에 따른 보정계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 녹비 시용량		공통 사항
일반 재배	화학비료(NPK)만 시용	<ul style="list-style-type: none"> • 화학비료 : N-P2O5-K2O=90-45-57 kg/ha 시용 • 녹비작물 : 벼 이앙 20일 전에 토양 환원 • 물관리 : 작기 중 상시 담수 • 메탄 포집 및 시료 채취 <ul style="list-style-type: none"> - 비 작기(수확 직후 11월 초~익년 5월 말), 작기(벼 이앙 직후 6월 초부터 수확 직전 10월 말) 동안 주 2회 조사. 삼방실린지 이용 오전 10시 채취. • 메탄 분석 : GC-FID(cp-3800, Varian) 이용. • 토양 분석 <ul style="list-style-type: none"> - pH는 처리구별 5.9-6.1, 유기물 함유량 30~33 g/kg - Eh는 작기 중 -200 ~ -400 mv(환원상태)
	NPK+벼짚(준경, 5 ton/ha) 시용	
	NPK+보릿짚(5 ton/ha) 시용	
유기 재배	헤어리베치(20 ton/ha) 시용	<ul style="list-style-type: none"> • 메탄 분석 : GC-FID(cp-3800, Varian) 이용. • 토양 분석 <ul style="list-style-type: none"> - pH는 처리구별 5.9-6.1, 유기물 함유량 30~33 g/kg - Eh는 작기 중 -200 ~ -400 mv(환원상태)
	자운영(20 ton/ha) 시용	
	보리(20 ton/ha) 시용	
	호밀+헤어리베치(20 ton/ha) 시용	

■ 품질관리

개발 방법론, 배출량, 배출계수의 대표성, 메탄 측정·분석의 정확성, 조사된 자료관리 검증 등을 거쳐 메탄 표준가스 및 분석 측정값에 대하여 품질관리(QC)를 수행하였다.

■ 불확도 평가

불확도 평가를 수행하였으나 보고서에 별도의 불확도 값이 제시되어 있지 않다.

■ 개발결과

표 65. 녹비 시용에 따른 보정계수 개발 연구 결과

녹비 시용량 (Mg ha ⁻¹)	녹비 환원율 (Biomass 수량의 %)	메탄 배출계수 (kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹)	오차범위 (kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹)	보정계수 (SF ₀)
0	0	1.36	0.00-2.73	1.00
3	25	4.02	1.74-4.19	2.96
6	50	6.69	3.92-5.92	4.92
9	75	9.36	5.66-8.11	6.88
12	100	12.02	7.11-10.58	8.84

(라) 작기 중 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구

■ 개발방법

2010년부터 2012년까지 3년 동안 작기 중 낙수기간을 달리한 벼 재배지(처리구)를 대상으로 처리구별 일일 메탄 배출량(메탄 배출계수)을 측정하는 실험을 수행하였다. 낙수 기간과 측정된 일일 메탄 배출계수의 평균값을 이용하여 회귀식을 도출하고 산정된 상시담수의 메탄 배출계수를 기준으로 하여 처리구별 메탄 배출계수를 비교함으로써 보정계수를 구하였다.

표 66. 작기 중 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 작기 중 낙수기간	낙수기간(단위: 주)
상시담수(낙수기간 0주)	0
중간낙수 1주	1
중간낙수 2주	2
중간낙수 3주	3

■ 개발결과

낙수기간이 증가함에 따라 메탄 배출계수는 유의적으로 감소하여 낙수가 벼논의 메탄 배출량 감소에 효과적인 것으로 나타났다. 낙수기간과 메탄 배출계수간 회귀식은 아래와 같으며 결정계수(R²)는 0.974이며 모형은 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다.

$$EF_{CH_4} = 1.676 - 0.288 * (\text{낙수기간 : 주}), R^2 = 0.974^{**}$$

표 67. 작기 중 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구 결과

실험처리 : 작기 중 낙수기간	낙수기간(단위: 주)	CH ₄ 배출계수 (단위 : kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹)	보정계수
상시담수(낙수기간 0주)	0	1.68	1
중간낙수 1주	1	1.39	0.83
중간낙수 2주	2	1.10	0.66
중간낙수 3주	3	0.81	0.49

※ 국립농업과학원. (2014). 국가 고유 온실가스 배출계수의 품질관리 연구. pp7

IPCC GL은 벼논 메탄배출량 산정 방법론에 대해 상시담수 외 간단관계 처리 횟수에 따른 물관리 보정계수만을 제시하고 있으나 국내 벼논의 경우 간단관계 처리 횟수를 달리 하기보다 낙수기간을 다르게 하는 물관리가 일반적이다. 따라서 새롭게 개발된 보정계수로 국내 실정에 적합한 메탄배출량 산정이 가능하다. 또한 벼 재배시 국가 정책 수행을 일환으로 낙수 3주 권

고를 통해 메탄배출량을 산정할 경우 IPCC GL에서 제시하는 물 관리 보정 계수(간단관계 다회 처리 시 0.52)보다 더 낮은 값을 적용할 수 있어 벼는 부문의 온실가스 배출 부하량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

■ 불확도 평가

회귀분석 결과의 95% 신뢰구간은 1.47~1.88 kg CH₄ ha⁻¹day⁻¹이며 신뢰구간을 통해 불확도를 산정한 결과 12.07%의 불확도를 보였다.

(마) 작기 전 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구

■ 개발 방법

작기(이양) 전 물관리 방법을 작기 전 담수기간 30일 이상, 비 담수기간 180일 이상, 비담수기간 180일 미만으로 다르게 처리한 벼 재배지(처리구)에 대하여 메탄배출량을 3년간 측정하고 이 자료를 이용하였다.

표 68. 작기 전 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 작기 전 물관리	공통사항
담수 30일 이상	<ul style="list-style-type: none"> · 시험토양 : pH 6.7, 유기물 24.8 g/kg, 미사질양토(Silt Loam), 배수 약간 불량, 현재까지 벼를 재배한 논 토양 · 벼 품종 및 이양방법 : 칠보벼를 주당 4-5본씩 재식거리 30X14cm로 이양 · 화학비료 : N-P-K=90-45-57 kg ha⁻¹ 사용 · 물관리 : (작기 중) 상시담수 유지 · 토양분석 : 토양 및 식물체 분석법(NIATST, 2000) 준용 <ul style="list-style-type: none"> - pH 초자전극법, 유기물함량 Tyurin법, 유효인산 Lancaster법으로 분석 - 치환성 양이온 함량은 1M NH₄OAc 용액(pH 7.0)으로 추출하여 원자흡광분석기로 분석 - 토성은 비중계법으로 측정 - Eh측정은 Rowell(1994) 방법 이용 · 메탄 포집 및 시료 채취 <ul style="list-style-type: none"> - 밀폐식 챔버를 이용 오전 10시 경부터 30분간 포집. 삼방밸브가 장착된 주사기로 채취 · 메탄 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 채취 당일 GC-FID(Agilent GC6890)를 이용하여 분석 - column : porapak Q column(스테인리스 스틸 소재) 이용, oven 40° C, injector 50° C, detector 250° C
비 담수 180일 미만	
비 담수 180일 이상	

■ 개발 결과

개발된 메탄 배출계수는 담수 30일 이상 > 비담수 180일 미만 > 비담수 180일 이상 순이다.

이는 IPCC 가이드라인에서 제시한 배출계수 보다 높은 것으로 나타났다. 우리나라 벼논의 작기 전 물관리 방법은 비담수 180일 이상의 조건으로만 관리되고 있으나 2006 IPCC GL은 작기 전 담수일수에 대한 보정계수를 포함하고 있으므로 향후 다른 작기 전 물관리 방법에 대한 활동자료가 생성될 경우 해당 보정계수를 활용할 수 있을 것으로 보인다. 작기 중 상시담수 유지로 벼 수량의 큰 차이는 없다.

표 69. 작기 전 물관리 방법에 따른 보정계수 개발 연구 결과

실험처리 : 작기 전 물관리	메탄 배출계수 (kg CH ₄ ha-1 day-1)	보정계수 (SFP)	오차범위
비담수 180일 미만	5.06	1.00	0.89-1.11
비담수 180일 이상	4.04	0.80	0.58-1.02
작기전 담수 30일 이상	5.50	1.09	0.99-1.19

■ 불확도 평가

3년 간 조사된 평균 일일 메탄 배출계수의 정규분포 95% 신뢰구간(Error Range)을 산정하고 이 구간의 절대 값을 평균 배출계수로 나누어 자료의 불확도(%)를 평가하였다.

(바) 벼 품종에 따른 보정 계수 개발 연구

■ 개발방법

2010~2012년 동안 경남 사천에서 벼 품종별 메탄 배출량을 측정하여 보정계수를 산정하였다. 실험 대상 벼 품종은 2010년 당시 재배면적이 가장 많은 6개 품종으로 선정하였다.

표 70. 벼 품종에 따른 보정 계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 벼 품종	공통사항
남평	<ul style="list-style-type: none"> · 시험토양 : 미사질 식양토(Silty Clay Loam), pH 6.6, 유기물 16.9 g/kg, 유효인산 130 mg P2O5/kg · 화학비료 : N-P2O5-K2O=90-45-57 kg/ha 사용 · 물관리 : 작기 중 상시담수, 수확 2주전 완전배수 · 메탄 포집 및 시료채취 · 챔버를 이용하여 포집. 챔버 설치전 공기시료와 설치 후 30분 쯤 시료를 채취하여 농도차이로 메탄 발생량 평가. 주 2회 오전 10:00-11:30 사이 포집.
동진	
삼광	
일미	
주남	
추청	

■ 개발결과

벼 품종별 배출계수의 차이가 나타났으며 특히 남평벼의 경우 메탄배출계수가 동진벼에 비해 2배 가량 크게 나타났다. 보정계수는 2010년 재배면적이 가장 많았던 추청벼를 기준으로 산정하였으나 이후 재배여건이 변화함에 따라 보정계수를 재산정 해야하는 한계가 있다. 또한 국내의 벼 품종별 재배면적은 매년 일정한 경향 없이 크게 변화되고 있고 각 품종별 정확한 재배면적에 대한 통계자료 확보가 불가능하므로 현 시점에서 벼 품종에 대한 메탄 배출계수의 보정계수 산정이 무의미하다고 판단되어 국가배출계수등록을 유예하였다.

표 71. 벼 품종에 따른 보정 계수 개발 연구 결과 요약

실험처리 : 벼 품종	메탄 배출계수 (kg CH ₄ ha-1 day-1)	보정계수(SFr)	오차범위
남평	3.34	1.43	3.19-3.49
동진	1.70	0.73	0.94-2.46
삼광	2.49	1.06	1.91-3.07
일미	2.50	1.06	1.48-3.52
주남	2.17	0.93	1.66-2.67
추청	2.34	1	1.23-3.45
평균	2.42	-	2.13-2.72

■ 불확도

벼 품종 별로 3년간 조사한 평균 메탄배출계수 값에 대해 정규분포 95% 신뢰구간(Error range)를 구하고 이 신뢰구간의 절대값을 평균 배출계수로 나누어 불확도(%)를 평가하였다. 불확도는 품종별로 4~47%로 산정되었으며 범위가 크게 나타난 이유는 연차별 기후적 요인의 차이에 의한 것으로 해석되었다.

(2) 농경지토양(4D)

2006 IPCC 신규 가이드라인은 논과 밭에서 배출되는 아산화질소에 대해 기본배출계수로 0.003과 0.0125를 제시하고 있다. 이러한 기본계수는 우리나라 고유의 농업환경 시스템(작물 종류, 영농방법, 기후조건 등)을 반영하지 못하기 때문에 불확도가 클 뿐만 아니라 신뢰성도 크게 떨어진다. 2014년 농경지 토양의 아산화질소 배출계수와 작물별 배출계수 6건이 국가배출계수로 등록되었고 2015년 수계유출로 인한 배출계수가 추가적으로 등록되어 농경지 토양에 대해 7건의 국가배출계수가 존재한다.

(가) 고추 재배 아산화질소 배출계수 개발

■ 개발 방법

2010년부터 2012년까지 고추밭에 대한 아산화질소 배출계수 평가를 위해 질소시비량을 달리하여 아산화질소를 측정하고 통계 분석하여 배출계수를 도출하였다.

표 72. 고추 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 질소 시비량	공통 사항
무시비(표준시비에서 질소질 제외)	<ul style="list-style-type: none"> · 토양분석 : 농촌진흥청 토양화학분석법(NIAST, 1988) 준용 <ul style="list-style-type: none"> - pH 초자전극법, 유기물함량 Tyurin법, 유효인산 Lancaster법으로 분석 - 치환성 양이온 함량은 1N NH4OAc 용액(pH 7.0)으로 추출하여 원자흡광분석기로 분석 - 예산토 양토(Loam), pH 6.8, 유기물 18g/kg · 재배품종 : 독자청청 · 아산화질소 채취 <ul style="list-style-type: none"> - 순환형 상자법을 이용 외부 공기유출 없도록 포집 - 주 2회 10:00~11:00 사이 30분간 60ml 주사기로 채취 · 아산화질소 분석방법 <ul style="list-style-type: none"> - GC-FID(CP 3800, Varian) 이용 - column : Porapak N(80/100) - carrier gas: N₂ - column-Injector-Detector는 70-80-320도 유지
반량시비(표준시비에서 질소질 반량 시비)	
표준시비(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=190-112-149 kg/ha)	
배량시비(표준시비에서 질소질 배량 시비)	

■ 개발 결과

연구 결과 질소 시비량이 증가할수록 아산화질소 배출량이 증가하였다. 질소 시비량에 증가함에 따라 고추의 수량은 증가하였으나 시비량 2배 이상부터는 감소하였다. 따라서 최대 수량 한계점과 아산화질소 배출량 조절을 고려하였을 때 시비량을 최적범위 내로 활용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 73. 고추 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 결과

질소 시용량 (kg ha ⁻¹)	배출량 (N kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	배출계수 (kg N ₂ O-N/N kg)	비고
95 (0.5배)	0.707	0.0086	<0.0125 (IPCC 임의값)
190 (표준시비)	1.450		
380 (2배)	2.937		

■ 불확도 평가

유의수준 5%이내에서 불확도를 평가한 결과 배출계수는 오차범위 (error range) $0.0086 \pm 0.00043 \text{ kg N}_2\text{O-N/ N kg}$ 내에 해당하고 불확도는 5.00%로 나타났다.

(나) 콩 재배 아산화질소 배출계수 개발

■ 개발 방법

질소질 비료 사용량을 다르게 처리한 콩 재배지(처리구) 별로 아산화질소 발생량을 3년 간 측정하고 회귀분석을 통해 질소질 비료 사용량에 따른 아산화질소 배출량 간의 관계식을 도출하였다.

표 74. 콩 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 질소 사용량	질소 사용량 (kg ha-1)
표준시비	32
2배	64

■ 개발 결과

질소질 비료 사용량이 증가함에 따라 아산화질소 배출량이 유의적으로 증가하였다. 질소질 비료 사용량과 아산화질소 배출계수 간 회귀식은 아래와 같다. 회귀모형의 결정계수 R^2 는 0.999이며 신뢰수준 95% 이내에서 유의한 것으로 나타났다.

$$\text{아산화질소배출계수} = 0.0119 * (\text{질소사용량}) - 0.0117, R^2 = 0.999^{***}$$

결과로 도출된 아산화질소 배출계수 $0.012 \text{ kg N}_2\text{O-N/ N kg}$ 은 IPCC GL에서 제시되는 기본배출계수(Tier 1 수준) $0.125 \text{ kg N}_2\text{O-N/ N kg}$ 보다 낮은 값으로 온실가스 배출 부하량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

표 75. 콩 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 결과

실험처리 : 질소 사용량	질소 사용량 (kg ha-1)	배출량 (N kg ha-1 yr-1)	배출계수 (kg N ₂ O-N/N kg)	비고
표준시비	32	0.335	0.0119	<0.0125 (IPCC GL 배출계수)
2배	64	0.681		

■ 불확도 평가

분석결과 회귀모형은 매우 유의(결정계수 : 0.999)하였으나 실험대상 표본 수가 적어 불확도는 64%로 높게 나타났다. 불확도 평가는 표준 시비량에 해당하는 아산화질소 발생량 ($kg N_2O-N ha^{-1} yr^{-1}$)에 대한 95% 신뢰구간(Error range)의 절대값을 아산화질소 발생량으로 나누어 자료의 불확도(%)를 평가한 결과 오차범위 (error range) $0.012 \pm 0.0076 kg N_2O-N / N kg$ 이내에서 불확도 64%로 평가되었다.

(다) 감자, 배추 재배 아산화질소 배출계수 개발

■ 개발 방법

경기 수원, 강원 춘천, 충청 예산, 제주 지역에서 감자와 배추를 2010~2012년까지 재배하면서 포장에서 온실가스 시료를 채취하여 분석하였다.

표 76. 감자, 배추 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

대상작물 (지역)	실험처리	공통 사항
봄 배추 (수원, 춘천)	<ul style="list-style-type: none"> 비료사용량을 무비, 반량시비, 표준시비, 배량시비로 구분하여 처리 무비: 질소질 비료 제외 반량시비: 표준시비에서 질소를 절반 사용 표준시비: $N-P_2O_5-K_2O=32-7.8-19.8 kg/10a$ 배량시비: 표준시비에서 질소를 두 배 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 아산화질소 채취 : <ul style="list-style-type: none"> 챔버법을 이용 주 2회 채취 아산화질소 분석 방법 : <ul style="list-style-type: none"> GC-FID(GC 450, Varian) 이용 아산화질소 배출량 계산식 : $F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1}$ <ul style="list-style-type: none"> F는 아산화질소 배출량 ($mg m^{-2} h^{-1}$) ρ는 아산화질소의 밀도인 $1.96 mg m^{-3}$ V와 A는 각각 챔버의 체적 (m^3)과 면적 (m^2) $\Delta c \cdot \Delta t^{-1}$는 챔버 내에서의 시간당 아산화질소 농도의 평균 증가량 T는 챔버내 평균 온도 ($^{\circ}C$)에 273을 더한 값 배출계수 계산식 : $\frac{\text{아산화질소 누적발생량} - \text{무비구 아산화질소 발생량}}{\text{질소시용량}}$
가을 배추 (수원, 춘천, 예산)	<ul style="list-style-type: none"> 질소의 52% 밀거름, 나머지는 2회 나누어 웃거름 	
감자 (춘천, 제주)	<ul style="list-style-type: none"> 비료사용량을 무비, 표준시비, 배량시비로 구분하여 처리 무비: 표준시비에서 질소질 비료 제외 표준시비: $N-P_2O_5-K_2O=32-7.8-19.8 kg/10a$ 배량시비: 표준시비에서 질소를 두 배 사용 전량 밀거름 	

■ 개발 결과

질소 시용량, 아산화질소 누적 발생량, 무비구에서 아산화질소 발생량 등을 고려하여 배출

계수를 산정한 결과 모두 IPCC 기본배출계수보다 낮게 나타났다.

표 77. 감자, 배추 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 결과

구분	질소 사용량 (kg ha-1)	배출량 (N kg ha-1 yr-1)	배출계수 (kg N ₂ O-N/N kg)	비고
봄배추	320 (표준시비)	1.590	0.0056	<0.0125 (IPCC 임의값)
	640 (2배)	3.220		
가을배추	160 (0.5배)	0.692	0.0058	
	320 (표준시비)	1.537		
	640 (2배)	3.226		
감자	137 (표준시비)	0.611	0.0049	

■ 불확도 평가

질소 시비량에 따른 아산화질소 배출량의 변화로부터 회귀식을 산출하여 95% 신뢰구간을 통하여 평가한 결과 봄배추는 45.4%, 가을배추는 29.7%의 불확도를 보였다.

(라) 당근 재배 아산화질소 배출계수 개발

■ 개발 방법

당근 밭에 대한 아산화질소 배출계수를 구축하기 위해 2010~2012년 간 질소사용량을 달리 하여 아산화질소 발생량 및 배출계수를 통계적으로 추정하였다.

표 78. 당근 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 실험설계 요약

실험처리 : 질소사용량	공통 사항
무시비(질소질 비료 제외)	· 토양 : 제주 화산회 토양
표준시비	
배량시비(질소질 비료 400 kg/ha)	

■ 개발 결과

새롭게 개발된 배출계수는 IPCC 기본 계수 보다 낮은 값으로 이를 배출량 산정에 적용 시 약 42.4%의 배출량 감소 효과를 얻을 수 있다.

표 79. 당근 재배 아산화질소 배출계수 개발 연구 결과

질소 사용량 (kg ha-1)	배출량 (N kg ha-1 yr-1)	배출계수 (kg N ₂ O-N/N kg)	비고
200 (표준시비)	1.193	0.0071	<0.0125 (IPCC 임의값)
400 (2배)	2.483		

■ 불확도 평가

별도의 불확도 평가내용은 제시되지 않았다.

(마) 작물잔사소각

■ 개발 방법

작물 잔사 소각에 따른 온실가스 배출계수 및 연소효율을 식량작물, 원예작물, 사료작물, 유지작물 등 19종의 작물에 대해 측정하였다.

■ 개발 결과

측정 결과 IPCC에서 잔사 소각 시 배출되는 온실가스로 규정하는 CH₄와 N₂O는 콩, 참깨, 들깨의 잔사소각 시 가장 많이 배출되는 것으로 나타났다.

표 80. 작물잔사 소각 온실가스 배출계수 개발 연구 결과

작물	배출계수 (g kg-1)				연소효율(%)	
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO		
식량작물 ('09)	벼짚	1,015	2.03	0.08	63.4	0.94
	보릿짚	1,247	2.48	0.08	57.4	0.95
	겉보리	1,269	2.85	0.07	66.1	0.95
	맥주보리	1,240	2.24	0.07	66.3	0.95
	밀	1,249	3.53	0.07	64.1	0.95
	콩	1,361	4.16	0.18	76.6	0.94
원예작물 ('10)	오이	1,096	3.62	0.13	58.2	0.95
	참취	1,192	4.08	0.12	66.6	0.94
	수박	1,136	3.68	0.11	59.8	0.95
	가지	1,046	3.27	0.10	57.6	0.95
	딸기	1,268	3.42	0.17	72.0	0.94
	토마토	1,374	3.81	0.06	78.7	0.94
	고추	1,296	3.79	0.19	74.4	0.94

작물		배출계수 (g kg-1)				연소효율(%)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	
사료작물 ('11)	옥수수	1,231	3.49	0.11	59.7	0.95
	수수	1,214	3.23	0.10	64.1	0.95
	조	1,187	3.44	0.10	70.6	0.94
	기장	1,252	3.60	0.10	69.7	0.95
유지작물 ('11)	참깨	1,273	4.17	0.11	73.5	0.94
	들깨	1,282	4.02	0.12	69.7	0.95
평균		1,223	3.64	0.11	67.7	0.94

활동자료를 구할 수 있는 벼, 보리, 콩, 고추 참깨 등 5종의 작물에 대하여 잔사소각 시 발생하는 온실가스 배출량을 산정한 결과 배출가스 중 대부분이 온실가스 산정에 포함되지 않는 CO₂ 형태였으며 다른 온실가스 배출량은 미비한 것으로 나타났다. 이상의 5종외에 다른 작물은 정확한 활동자료가 갖추어져 있지 않아 작물잔사 소각에 따른 온실가스 배출량 산정은 단기간 내에 불가능한 것으로 판단되었다. 따라서 작물 잔사소각에 대해서는 별도의 국가배출계수를 등록하지 않았다.

표 81. 작물잔사 소각 온실가스 배출계수를 이용한 배출량 분석

작물	재배 면적 (ha)	잔사 소각율 (%)	작물생산량 (t ha-1)	잔사 소각량 (t ha-1)	배출량 (ton)*			
					CO ₂	CH ₄	CO	N ₂ O
벼	850,798	0.41	6.6	6.0	19,404	39	1,212	1.5
보리	17,469	17.2	3.7	3.5	13,139	30	684	0.7
콩	77,849	37.5	1.7	1.7	63,547	194	3,577	8.4
고추	47,388	62.9	5.5	1.2	37,700	111	2,164	5.5
참깨	25,649	58.6	0.4	1.7	30,754	101	1,775	2.7

■ 불확도 평가

별도의 불확도 평가내용은 제시되지 않았다.

다. 비농업 부문 불확도 평가 현황

(1) 비농업(에너지) 부문 불확도 평가 방법론

본 절에서는 농업이 아닌 다른 부문의 불확도 산정 현황을 검토함으로써 농업 부문 불확도 평가를 위한 시사점을 얻고자 한다. 이를 위한 2014년 기준 국가온실가스 인벤토리에서 국내 배출량의 90%이상을 차지하는 에너지 부문에 대해 불확도 평가방법을 살펴보았다.

국가인벤토리에서 에너지 부문의 불확도는 Tier 1 방식으로 평가되었는데 Tier 1 방식이란 Rule A(확률변수의 합)과 Rule B(확률변수의 곱)를 이용하는 것이다. 개별배출원(예를 들어 수송부문에서 휘발유 승용차의 온실가스 배출량)의 온실가스 배출량과 관련된 불확도를 산출할 경우에는 Rule B를 이용하며, 개별 배출원별 배출량을 합산하는 경우(예를 들어 수송 부문 총 배출량 또는 국가 온실가스배출총량)에는 Rule A를 사용한다. 또한 기준 연도 대비 배출량의 변화량과 관련된 불확도는 민감도 분석 (Type A, B sensitives)후에 Rule A 방식으로 산출 한다.²⁵⁾ 배출량 변화 경향과 관련된 불확도를 분석하기 위해서는 배출원과 온실가스별로 Type A 와 Type B 로 구분된 민감도 분석을 실시해야 한다. Type A 민감도는 기준연도와 해당연도의 특정 부문(예를 들어 발전 부문) 온실가스 배출량을 동시에 1%씩 증가 시켰을 때 특정 부문으로 인해 기준연도대비 해당연도의 총 국가 온실가스 배출량이 변화된 상대적인 정도(%)를 나타낸다. 반면 Type B 민감도는 Type A 와 유사하지만 특정부문의 해당연도 배출량만을 증가 시켰을 때 기준연도 대비 해당연도의 총 국가 온실가스배출량이 특정부문으로 인해 기준연도 대비 변화된 정도(%)를 나타낸다. 개별 부문별로 산출된 민감도값을 Rule A방식으로 합산하여 배출량 변화 경향의 불확도를 산출한다.

(2) 가스별, 부문별 불확도 평가

우리나라에서는 배출량을 산정하기 위한 활동자료와 배출계수에 대한 기초 통계자료가 부족하여 다음과 같은 IPCC의 기본값을 적용하여 Tier 1수준에서의 인벤토리 불확도 평가를 실시하고 있다. 구체적으로 우리나라의 2011년 에너지분야 온실가스인벤토리에 적용된 활동자료와 배출계수의 불확도 값은 아래 표와 같다. 합성불확도는 온실가스정보센터의 2013년 보고서에 제시된 활동자료 불확도와 배출계수 불확도 값을 바탕으로 Rule B 방식을 적용해 새롭게 산출한 것이다. 에너지 분야의 총 불확도를 산출하기 위해서는 모든 부문의 불확도 평가정보가 필요한데 우리나라의 「국가 온실가스 통계 산정·보고·검증」 지침과 가이드라인에는 철도, 수송, 해운, 수송, 기타수송 부문에 대한 불확도 평가정보가 없다. IPCC가 권고 하는 것처럼 개별 부문에 대한 국가 고유의 불확도 값을 산정하는 것이 바람직하지만 잠정적인 대안으로서 관련 문헌과 해외사례를 참고하여 추정된 불확도 정보를 사용하고 있다(황인창, 진상현, 2014).

25) Rule A와 Rule B에 관한 구체적 산식 등은 GPG 2000 또는 에너지 경제연구원 「산업 에너지 분야 온실가스 인벤토리 작성 및 품질관리」, 산업통상자원부 기후변화 협약 대응 출연사업 보고서를참고할것

표 82. 국가 인벤토리 에너지 부문 불확도

구분	내용	불확도(%)			
		활동도	배출계수	합성	
연료연소	고정연소	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1000	1,000
	제조업 및 건설업	CO ₂	3	5	5.8
		CH ₄	3	150	150
		N ₂ O	3	1000	1,000
	항공수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	<5	200	200
		N ₂ O	<5	10000	10000
	도로수송	CO ₂			5
		CH ₄			40
		N ₂ O			50
	철도수송	CO ₂	5	3	5.8
		CH ₄	5	75	75
		N ₂ O	5	165	165
	해운수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	5	200	200
		N ₂ O	5	1000	1000
	기타수송	CO ₂	5	5	7
		CH ₄	5	55	55
		N ₂ O	5	190	190
기타부문	CO ₂	3	5	5.8	
	CH ₄	3	150	150	
	N ₂ O	3	1000	1000	
탈루성 배출	석탄 지하채굴	CH ₄	14	200	200.5
	석탄 후처리	CH ₄	14	300	300.3
	석유(운송)	CH ₄	10	25	26.9
	석유(정제/저장)	CH ₄	3	150	150
	천연가스(프로세싱)	CH ₄	3	150	150
	기타 누출	CH ₄	3	150	150

라. 감축제도 배출계수 개발·검증 가이드라인

(1) 가이드라인 범위 및 개발절차

본 연구의 과업 중 불확도 산정연구와 배출계수 개발·검증 가이드라인 개발연구와 관련하여 본 보고서와 같이 연구범위를 구성하게 된 배경을 요약하면 다음과 같다.

(산업부문과 농업부문의 불확도 특성 차이) 우선 산업부문에서 ‘불확도’라 함은 ‘측정불확도’를 의미한다. 측정불확도라함은 각종 계량기의 오차(설계오차, 운영오차 등 제품 시방서나 교정성적서에 기재된 오차)값들을 이용해 상대확장불확도를 산출하는 방식의 결과값이다. 그러나 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구의 경우 산업부문과 가장 큰 차이는 원데이터(raw data)가 계량기의 오차가 아니라 챔버를 통해 측정된 가스의 농도 데이터(flux)라는 점이다. 둘의 가장 큰 차이는 산업부문에서 배출계수 불확도 산정시 활용되는 데이터(기기오차)의 개수는 5개 내외로 매우 적은 반면, 농업부문의 flux데이터는 수 백 개 내외이다. 따라서 산업부문과 달리 통계적인 오차 산출을 통해 불확도를 산정하며, 이 과정에서 반복성과 재현성의 고려여부가 중요하다.

(배출계수 도출과정의 품질관리를 위한 불확도 요인 도출) 또한 본 연구의 가장 큰 차별화는 본 연구에서는 여러번의 현장조사 및 자문회의를 통해, 경종 및 축산부문 배출계수 연구과정의 가능한 모든 불확도 요인을 도출했다는 점이다. 그리고 불확도 관련 전문가, 기타 학계 전문가가 참석한 워크숍 및 포럼에서 이와 같은 농업부문과 산업부문 불확도 특성에 대해 자세히 논의하였다.(151쪽) 그 결과를 반영하여, 본 연구의 불확도 산정방식은 두 가지 방안으로 진행하였다. 첫째, 향후 경종 및 축산부문 배출계수 개발 연구자가 참고할 수 있는 ‘불확도 발생요인 목록’을 만들기 위해, 가능한 모든 요인을 목록화하는 것이다. 이것이 보고서 157~163쪽에 해당하는 내용으로서 실험현장의 연구진 및 자문회 의견을 반영하여 보완되었다. 단 이 목록의 불확도 요인 중 정량적으로 계량화가 가능한 요인은 매우 적지만, 이같은 목록도출 자체가 큰 의미가 있고 이것이 가이드의 한 양식이 될 수 있다. 이 목록을 체크리스트처럼 가공하지 않은 이유는 배출계수 개발연구의 경우 이 목록의 모든 요인이 다른 배출계수 개발연구에 모두 해당하는 것이 아니고, 각 연구의 실험설계에 따라 적용요인이나 방식이 매우 다를 수 있기 때문이다. 따라서 향후 후속 연구자가 활용할 수 있도록, 기존 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구에서는 어떤 불확도 요인들을 도출해서 품질관리에 사용하였는지 가이드를 제시하기 위한 것이다. 그리고 이와는 별도로 일반적인 사항들에 관한 체크리스트는 별도로 작성해 보고서에 기재하였다.(198~209쪽) 둘째, 위와 같이 정성적인 형태의 가이드와 별도로, 앞서 논의한 경종 및 축산부문 배출계수 개발연구의 원데이터인 flux데이터를 통계적으로 처리한 정량적인 불확도 값을 산출하였다. 여기서는 반복성과 재현성의 고려가 중요하기때문에 이를 반영하여 값을 산출하였다.(164~168쪽)

요컨대 가이드라인은 보통 적용성 확대 측면에서는 정제되고 간결한 가이드가 선호되고, 구체성 측면에서는 자세한 항목으로 구성되는 가이드가 선호되기 때문에, 양단의 균형을 찾는 것이 중요하다. 이 같은 고민아래 본 연구에서는 구체적이고 정성적인 목록을 제시함과 동시에, 정제된 가이드 및 체크리스트를 별도로 작성해서 보고서에 모두 포함시켰다. 선행연구 또는 문헌조사시 많은 시간을 할애했음에도, 현재 농업부문 불확도 산정방식에 관한 가이드는 없는 것으로 판단된다. 단 IPCC 가이드라인2006이나 불확도 관련 세부 가이드인 GPG2000에서 권고하는 바는, 불확도 산정방안은 연구자의 판단에 따라 산정항목 및 산정방식을 결정할 수 있으며, 불확도값의 높고 낮음에 따라 관련 불확도의 가치가 좋고 나쁨을 논하기는 어렵고, 대신 불확도 산정 본래의 취지를 고려하면 불확도값이 커지더라도 가능한 많은 불확도 요인을 고려하는 것이 바람직하다고 권고하고 있다. 농업 부문 불확도 산정 사례를 조사한 결과, 우리나라를 포함한 대부분의 국가인벤토리에서도 농업부문 배출계수 불확도는 제시되어 있지 않고, 일본 핀란드 등 일부 국가만 산출결과를 기재하고 있

다. 그러나 이 경우에도, 그 불확도 값의 산출방식 및 과정은 제시되지 않고 있다.

이같은 제한적 여건을 고려할 때, 일본 핀란드의 농업 불확도 산정방식을 알 수 없는 상황에서 우리 연구의 불확도 도출결과가 일본 핀란드의 산출결과에 상응하는지 여부를 논할 수는 없는 상황이다. 그럼에도 불구하고, 각 국가의 농업부문 불확도 산정방식이 동일할 필요는 없으며, 단 해당 산정방식으로 정량적 불확도값을 산정한 근거에 대한 연구자의 논거가 필요하다. 이는 국내 불확도 관련 전문가 모임인 ‘국가인벤토리 산정기관 전문가’ 워크샵에서도 수차례 논의되고 공감대를 얻은 사항이다. 따라서 정량적 불확도의 산정방식이 논리적이려면 그 불확도값을 제시할 수 있으며, 외국사례의 최소 최대값에 상응한다고 판단할 수 있다.

경종 및 축산 부문 배출계수 개발실험의 ‘정량적’ 불확도평가 결과는 보고서 164~168쪽에 제시되어 있다. 축산부문 TMR실험의 경우 불확도 산정시에는 하나의 데이터 세트로 판단하여 불확도를 산정한 것이다. 그 이유는 데이터의 반복성 및 재현성 구분과 관련된다. 보고서에서 농업부문 실험데이터의 가장 중요한 특성인 반복성과 재현성을 비중있게 언급하였다.(151~152, 158, 164~168쪽) 그리고 본 보고서 불확도 산정에서는 이같이 중요한 반복성과 재현성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 불확도결과를 비교한 것이 중요한 의미가 있다. 반복성이란 동일하게 실험처리가 된 실험구를 여럿 두는 것을 의미하며, 재현성이란 한 세트의 실험을 다른 기간(시점)에 여러번 시행하는 것을 의미한다. 예를 들어, 경종 부문에서 동일한 완효성 비료를 시비한 실험구에 4개의 챔버를 설치한 경우 반복성을 4회 고려한 것이고, 이와 같이 4개의 챔버를 설치한 실험을 1세트로 보았을 때, 서로 다른 시기에 3회 실험을 수행한 경우 재현성을 3회로 보는 것이다. 따라서 TMR 실험1(습식), TMR 실험2(건식), 그리고 린시드 실험의 경우 본 보고서 정량적 불확도 산정에서는 재현성과 반복성을 함께 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 불확도 값을 산출하고 이 두 값을 비교분석하였다. 단 실험의 불확도 요인을 모두 목록화한 정성적인 가이드는 TMR, 린시드, 양질조사료 실험에 모두 적용된다.

한편 경종부문 및 축산부문 연구에서 도출된 배출계수와 각 배출계수별 불확도값을 정리·요약하여 별도로 보고서에 수록하였다.(169~171쪽) 그리고 「농업 부문 감축사업을 위한 경종 및 축산 부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인」은 201쪽에 별첨하였다.

(2) 배출계수 개발·검증 가이드라인 구성 항목 표준화

현재 배출계수 개발 및 검증에 대한 전반적인 내용을 담고 있으며 신뢰수준이 높은 가이드라인은 IPCC가이드라인과 국가배출계수 개발검증 가이드라인이 있다. IPCC 가이드라인은 모든 국가인벤토리 작성의 기본 지침이 되고 있지만 배출량 산정·보고·검증 전반을 다루고 있기 때문에 배출계수 개발과 검증에 있어 개발자가 직접 활용할 수 있도록 실제적이고 구체적인 내용을 다루고 있지는 않다. 온실가스종합정보센터에서 개발한 「국가인벤토리 배출계수 개발검증 가이드라인」은 국가온실가스 인벤토리 산정 및 배출계수 개발 체계 전반에 대한 설명과 더불어 배출계수 개발자가 개발과정에서 고려해야할 사항과 배출계수를 검증하는 검증위원회가 고려해야할 사항들을 상세히 제시하고 있다. 따라서 감축제도 배출계수 개발검증 가이드라인을 개발함에 있어 온실가스종합정보센터에서 개발한 「국가인벤토리 배출·계수 개발검증 가이드

라인」의 구성 항목을 참고하였다.

「국가인벤토리 배출계수 개발검증 가이드라인」은 크게 개발지침과 검증지침으로 구성되어 있다. 개발지침은 개발과정에서 고려해야할 사항들을 개발 방법론, 계수대표성, 측정·분석 정확성, 자료관리 등 네 가지 항목에 대해서 제시하고 있으며 계수 개발 전 과정에 대해 품질보증 및 관리 (Quality Assurance and Quality Control, QA/QC)를 수행하도록 일련의 지침을 제공하고 있다. 또한 개발된 계수에 대해 불확도를 산정하도록 명시하고 있으며 개발자를 위한 체크리스트를 부록으로 제공하여 개발과정에서 고려해야할 사항들이 누락되지 않도록 하고 있다.

여기서 제시한 개발자 체크리스트는 본 보고서의 부록으로 제시되어 있다. 개발 방법론은 기본적으로 IPCC의 가이드라인과 목표관리 지침 등 신뢰도가 높은 문헌에 제시된 방법론을 사용하도록 권고하고 있다. 모든 고려사항에 대해 IPCC 가이드라인과 국내외 공인된 문헌에 제시된 사항을 따를 것을 규정하고 있으며 단 농업 부문의 배출활동 특성에 대한 내용은 IPCC 배출계수 가이드라인 중 국내 실정에 맞도록 일부 수정되었다. 다음은 「국가인벤토리 배출·계수 개발검증 가이드라인」중 계수 개발 지침의 구성항목이다. 이외에 개발자를 위한 체크리스트와 검증지침은 아래 제시된 항목과 동일한 구조로 이루어져 있다.

향후 사업의 확대를 고려할 때 감축제도의 배출계수 개발은 국내외 공인된 방법론을 적용하여 이루어져야 하므로 국가인벤토리 배출계수 개발 지침의 기준에 부합하는 것이 필요하다. 단 모니터링이 어려운 비에너지 부문의 방법론의 경우 이를 계수 개발과정에서 고려하는 것이 필요할 것이다.

QA/QC는 배출계수 개발 전과정에 걸쳐서 수행하도록 하며 이때 QA/QC를 적용하는 기준 역시 IPCC 가이드라인과 국내 목표관리 지침이 가장 우선시 되며 해당 지침에서 제시되지 않는 배출원 및 배출활동 특성을 고려하는 계수 일 경우 기타 자체 기준 등을 사용할 수 있다.

불확도 평가는 계수의 신뢰도를 확보할 수 있는 중요한 단계로 국가배출계수 개발검증 가이드라인에서도 이를 수행할 것을 명시하고 있다. 그러나 구체적인 불확도 평가 방법을 제시하지는 않고 있으며 ‘국내외 공인된 불확도 평가 방법’을 적용할 것을 권고하고 있다. 여기서 ‘국내외 공인된 불확도 평가 방법’은 IPCC 가이드라인과 국내 목표관리 지침 상에서 제시된 불확도 평가 방법 등이 있다. 4장에서 살펴보았듯 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 불확도 평가 방법은 오차전파법과 몬테카를로 시뮬레이션 두가지가 있다. 그러나 이 두 방법이 모든 경우에 서로 대체하여 적용가능한 것은 아니며 측정데이터의 특성에 따라 적합한 방법이 존재한다. 국내 배출계수 개발검증 가이드라인 및 IPCC 가이드라인, 목표관리 지침에서 제시하고 있는 불확도 평가방법은 이를 모두 포괄하고 있지 않다. 본 연구의 배출계수 개발과정에서 적용할 불확도 평가계획은 앞장에서 보다 상세히 다루었다.

표 83. 국가배출흡수계수 개발·검증 가이드라인 중 개발지침 구성 항목

구성 항목		내용
개발 방법론	배출흡수량 산정지침에의 적용 가능성	개발된 계수가 국가인벤토리/목표관리 지침과 부합하는지를 고려
	개발 방법론	IPCC GL 및 국내외 공인 방법론 적용
	배출흡수활동 관련 특성	배출활동에 영향을 미치는 인자를 부문별로 제시하고 있으며 기본적으로 IPCC GL을 준용하되 농업부문은 국내 배출활동특성을 고려하여 수정
계수 대표성	배출흡수원에 대한 조사방법	전수조사 및 표본조사 중 적절한 방법 택
	모집단에 대한 표본 집단 선정 방법	표본조사를 실시할 경우 표본의 대표성을 확보할 수 있도록 표본추출
	표본개수 결정 방법론	모집단의 특성을 고려하여 적절한 방법을 통해 표본 개수 결정
	표본의 시공간적 영향	배출활동이 지역과 계절, 주야간 등 시공간적 특성에 영향을 받을 경우 이를 고려한 표본 추출 필요
측정·분 석 정확성	측정·분석 유형 선정	측정기기가 주기마다 지속적으로 측정하는 연속측정과 임의의 시점마다 측정하는 간헐측정 등 구분
	측정·분석 및 샘플링 방법론	국가공인 (KS, ANSI 등) 또는 국제공인 (ISO 등) 측정·분석 방법론 이용
	측정·분석기관의 신뢰수준	국가 또는 국제적으로 공인된 측정·분석기관이 수행
	측정·분석기기의 신뢰수준	기기의 측정·분석 범위, Zero·Span 드리프트 기준 등 측정유형에 따른 기준 부합
자료관리	유효숫자 관리	측정결과에 대해 IPCC, 목표관리 지침 및 유효숫자계산법칙 등을 적용하여 유효숫자의 영향을 관리
	자료 선별 및 보완	측정 원시자료의 선별 및 보완에 대한 국가 또는 국제 공인 기준 적용
	계수 개발에 사용된 자료의 시간 범위	원시 자료 간 시간범위가 서로 영향을 줄 경우 범위를 일치하는 것이 필요
QA/QC 수행		개발자의 품질관리 및 제3자의 검토 요구
불확도 산정		IPCC 및 국내외 공인된 방법을 통한 계수의 불확도 산정 수행

(3) 감축제도 배출계수 개발·검증 가이드라인

※ 가이드라인의 양식 유지를 위해 본문에 기재하지 않고 별첨함.

- 별첨. 감축제도 배출계수 개발·검증 가이드라인

[별첨]

**농업 부문 감축사업을 위한
경종 및 축산 부문 배출계수 개발 및 검증
가이드라인**

목 차

1. 목적	183
2. 용어 정의	183
3. 감축사업 배출계수	184
4. 적용 범위 및 타 가이드라인과의 관계	185
5. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 가이드라인	186
5.1 배출계수 개발 타당성 검토	186
5.2 배출계수 개발 실험 설계	187
5.2.1 배출량 산정 모델 및 배출계수 정의	187
5.2.2 측정 대상 정의	189
5.2.3 배출계수 개발 방법론 구축	189
5.2.4 베이스라인 부합성 검토	189
5.2.5 방법론 적용 조건 부합성 검토	191
5.2.6 표본의 대표성	191
5.2.6.1 표본 추출방식	192
5.2.6.2 표본 크기 결정 방식	192
5.3 실험 및 자료 수집	192
5.4 자료 관리	193
5.5 불확도 관리 및 평가	193
5.5.1 불확도 요인 목록화 및 범주화	194
5.5.1.1 불확도 발생 요인별 범주화	195
5.5.1.2 불확도 산정 가능성별 범주화	196
5.5.2 실험 특성별 불확도 요인 목록화 및 범주화	196
5.5.3 불확도 평가	200
6. 경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인	201
6.1 배출계수 개발 타당성	201
6.2 배출계수 개발 실험 설계	202
6.2.1 배출량 산정 모델 및 배출계수 정의	202
6.2.2 측정 대상 정의	202
6.2.3 배출계수 개발 방법론 구축	202
6.2.4 베이스라인 부합성 검토	203
6.2.5 방법론 적용 조건 부합성 검토	203
6.2.6 계수 대표성	204
6.2.6.1 표본 추출방식	204
6.2.6.2 표본 크기 결정 방식	205
6.3 실험 및 자료 수집	205
6.4 자료 관리	206
6.5 불확도 관리 및 평가	206

농업 부문 감축사업을 위한 경종 및 축산 부문 배출계수 개발 및 검증 가이드라인

1. 목적

본 가이드라인은 농업 부문의 온실가스 감축사업에 적용하기 위한 경종 및 축산 부문 배출계수를 개발하고 이를 검증하는데 있어 고려하여야 할 사항들을 제시한다.

감축사업 적용을 위한 배출계수 개발이란 배출계수 개발이 새로운 온실가스 감축사업 방법론 개발 또는 기존 온실가스 감축사업 방법론 개정을 목적으로 추진됨을 의미한다. 따라서 본 가이드라인의 목적은 배출계수 개발 과정 및 검증 단계에서 다음과 같이 감축사업 적용성이 충분히 검토될 수 있도록 세부 지침을 제시하는 것이다.

- 감축사업 특성을 반영한 실험계획 수립
- 실험 절차와 방법의 적절성 검토
- 실험결과의 추적가능성, 재현성 확보
- 불확도 요인 추정 및 정량화 확인
- 실험결과의 품질 관리 및 품질 보증

2. 용어 정의

다음은 본 가이드라인에서 사용되는 용어에 대한 정의이다.

- 온실가스: 지구의 표면, 대기 및 구름에 의해 복사되는 적외선 스펙트럼 중 특정 파장에서 복사열을 흡수하고 방출하는 대기 중의 자연적인 또는 인위적인 가스 성분 (ISO 14064-2)
- 온실가스 배출원: 온실가스를 대기로 배출하는 물리적 단위 또는 프로세스 (ISO 14064-2)
- 온실가스 배출량: 지정된 기간 동안 대기로 배출된 온실가스의 총량 (ISO 14064-2)
- 온실가스 배출 감축량: 베이스라인 시나리오와 프로젝트 사이에 산출된 온실가스 배출 감소량 (ISO 14064-2)
- 불확도: 측정결과와 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 산포특성을 나타내는 파라미터 (ISO/IEC Guide 98-3:2008, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)
- 감축사업: 온실가스 배출량을 감축하거나 온실가스 제거량을 증가시키기 위해 특별히

설계된 온실가스 프로젝트 또는 프로젝트 기반의 활동 (ISO 14064-2)

- 온실가스 프로젝트: 온실가스 배출 감축량 또는 온실가스 제거량을 유도하기 위하여 베이스라인 시나리오에서 식별된 조건을 변화시키는 활동 또는 활동들의 집합 (ISO 14064-2)
- 베이스라인 시나리오: 제안된 온실가스 프로젝트의 부재로 발생하기 쉬운 조건을 가장 잘 반영하는 가설적 참조 사례 (ISO 14064-2)
- 베이스라인 배출량: 베이스라인 시나리오에서의 온실가스 배출량
- 사업 시나리오: 감축사업을 수행하는 상황에서 온실가스 배출을 기술하는 시나리오
- 사업 배출량: 감축사업을 수행함으로써 발생하는 온실가스 배출량
- 배출계수: 온실가스 배출 활동의 한 단위 당 발생하는 온실가스 배출량
- 활동자료: 온실가스 배출 활동의 양
- 검증: 협의된 검증기준에 따라 온실가스 배출계수 개발 결과를 평가하기 위한 체계적이고 독립적이며 문서화된 프로세스

3. 감축사업 배출계수

감축사업 적용을 위한 배출계수는 그 개발 결과를 통해 신규 온실가스 감축사업 방법론 개발 또는 기존의 온실가스 감축사업 방법론 개정이 이루어짐을 전제로 한다. 이는 배출계수가 감축사업의 온실가스 감축량 산정 방법론을 고려하여 개발되어야 한다는 것을 의미한다.

여기서 감축사업이란 온실가스 산정에 관한 국제 표준 ISO 14064-2의 정의에 따라 “온실가스 배출량을 감축하거나 온실가스 제거량을 증가시키기 위해 특별히 설계된 온실가스 프로젝트 또는 프로젝트 기반의 활동”이다. 동 표준에 따라 감축사업은 “프로젝트 베이스라인 시나리오 결정 및 베이스라인 시나리오와 관련된 프로젝트 성과의 모니터링, 정량화 및 보고를 위한 원칙과 요구사항”을 준수하여 이루어진다.

베이스라인 시나리오란 감축사업이 없다고 가정하였을 경우 가장 일어나기 쉬운 배출활동을 의미하며, 동 표준에 따라 “제안된 온실가스 프로젝트의 부재로 발생하기 쉬운 조건을 가장 잘 반영하는 가설적 참조 사례”로 정의된다. 농업 부문의 경우 베이스라인은 새로운 감축기술 또는 감축활동을 도입하지 않은 상황에서 일반적이고 보편적으로 이루어지고 있는 관행 농법을 의미한다. 농업기술이 진보함에 따라 일반적이고 보편적인 ‘관행농법’의 기준이 달라지므로 베이스라인 시나리오는 항상 현재 시점에서 고려되어야 한다. 베이스라인 시나리오에 대한 사항은 4장에서 자세히 다룬다.

한편 감축사업이 이행되고 있는 상황을 기술하는 것을 사업 시나리오라고 한다. 베이스라인 시나리오에서 발생하는 배출량을 베이스라인 배출량이라고 하며 사업 시나리오에서 발생하는 배출량을 사업 배출량이라고 한다. 감축사업으로부터 발생하는 온실가스 배출 감축량은 베이스라인 배출량과 실제 감축사업 이행으로 발생하는 사업 배출량의 차이²⁶⁾로 정의된다.

26) 실제 감축사업에서는 감축활동을 이행하는 감축사업자가 관리할 수 있는 사업경계를 규정하여, 사업 경계 내부에서 발생하는 배출을 사업 배출량, 사업 경계 외부에서 발생하는 배출을 누출량이라고 구분하여 명명하며 온실가스 감축량은 베이스라인 배출량에서 사업배출량과 누출량을 제외한 값으로 결정된다.

감축사업의 배출 감축량은 **가상적인 베이스라인 시나리오 수립과 베이스라인 시나리오에 따른 베이스라인 배출량**을 기준으로 산정된다는 점에서 일반적인 배출량 통계와 상이하다. 여기서 일반적인 배출량 통계란 조직 (예. 국가, 기업 등) 단위에서 어떠한 기간 동안 발생하는 모든 온실가스 배출원 (emission source)을 규명하고 각각의 배출원에 대한 배출량을 집계한 인벤토리 (inventory) 배출량을 의미한다.

농업 부문 감축사업은 에너지, 산업 등 타 부문에 비해 온실가스 감축 규모가 크지 않기 때문에 측정기기를 이용한 감축량 산정 보다 배출계수와 활동자료의 곱으로 감축량 산정을 간소화하는 것이 사업을 확대하기 용이하다. 즉, 배출계수를 개발함으로써 감축사업의 감축량 산정을 간소화하고 감축사업을 확대할 수 있다..

따라서 감축사업 배출계수는 개발 과정 전 단계에 걸쳐 감축사업 적용을 염두에 두고 감축사업의 특성을 고려하여 개발이 이루어져야 하며, 검증 단계에서도 개발 과정에서 이러한 사항들을 고려하였는지를 확인하여야 한다.

4. 적용 범위 및 타 가이드라인과의 관계

본 가이드라인은 농업 활동인 경종과 축산으로 인하여 발생하는 온실가스 배출량을 감축하기 위해 이루어지는 감축사업의 배출계수 개발 및 검증 단계에서 고려하여야 할 사항들을 제안하기 위해 개발되었다.

본 가이드라인의 온실가스 배출 부문은 2006 IPCC에서 정의한 다음 배출 부문을 대상으로 한다 (IPCC 2006, 2006).

- 농업, 임업 및 기타 토지이용 (Agriculture, Forestry and Other Land Use)
 - 농경지 (Crop Land)
 - 가축 및 분뇨 관리 배출 (Emissions from Livestock and Manure Management)
 - 관리되는 토양에서의 N₂O 배출과 석회 및 요소 시용에 따른 CO₂ 배출 (N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application)

본 가이드라인은 상기 배출 부문을 대상으로 하는 감축사업 배출계수를 개발하고자 하는 주체(이하 ‘개발자’)와 개발결과를 검증하고자 하는 주체 (이하 ‘검증기관’)가 배출계수 개발 목적을 달성하기 위하여 검토하여야 할 세부 사항을 제시한다.

감축사업 배출계수 개발은 조직 또는 국가를 대상으로 전체 배출원을 식별하고 각각에 대한 배출량을 산정하는 인벤토리 (inventory) 배출계수의 개발과 접근법과 상이하다.

인벤토리 배출계수 개발은 조직의 현재 배출 상황을 가장 잘 반영할 수 있는 배출량 산정 모델 개발을 구성하는 배출량 산정인자를 개발하는 것이 목적이다. 이와 다르게 감축사업 배출계수는 감축사업의 배출 감축량을 가장 잘 반영하는 것이 목적이다. 감축사업의 배출 감축량은 **가상적인 베이스라인 시나리오 수립과 베이스라인 시나리오에 따른 베이스라인 배출량**을 기준으로 산정된다. 감축사업 배출계수가 실제로 감축사업에 활용되기 위해서는 감축사업의 베이스라인 배출량을 계산할 수 있는 배출계수와 감축사업의 사업 배출량을

계산할 수 있는 산정 방법론이 필요하다. 배출계수 개발이 방법론 개발 과정을 포함하여야 하는 것은 아니지만 배출계수 개발자는 개발 단계에서 방법론 개발 또는 기존에 개발된 방법론 개정을 전제로 연구를 수행하여야 한다. 이를 위해서는 개발 단계에서 감축사업과 그에 필요한 방법론에 대한 이해가 전제되어야 한다. 이러한 측면에서 본 가이드라인은 인벤토리 배출계수를 대상으로 하는 다음의 배출계수 개발·검증 가이드라인과 그 목적에 있어 차별화된다.

- 온실가스종합정보센터. (2012.08) 국가 온실가스 배출흡수계수 개발 검증 지침.
- 환경부, 온실가스종합정보센터. (2014.10). 사업장 고유배출계수개발 가이드라인.

5. 경종 및 축산부문 배출계수 개발 가이드라인

본 장은 경종 및 축산 부문 온실가스 감축기술에 대한 감축사업 배출계수를 개발하고자 하는 자(이하 ‘개발자’)가 배출계수를 개발하는 전 과정에서 고려하여야 할 사항을 다룬다. 이는 배출계수 개발 계획의 타당성을 검토하고, 적절한 실험계획을 수립하여 자료를 수집하고, 수집된 자료의 품질 관리가 이루어질 수 있도록 하는 일련의 절차를 포함한다.

5.1 배출계수 개발 타당성 검토

경종 및 축산 부문 온실가스 감축기술에 대한 감축사업 배출계수를 개발하고자 하는 자(이하 개발자)는 배출계수 개발 실험에 착수하기에 앞서 다음 사항을 고려하여 배출계수 개발 타당성을 검토하여야 한다.

- 배출계수를 개발하고자 하는 감축기술의 감축효과가 기존에 실증되었는가?
- 감축기술에 대한 방법론이 기존에 없을 경우 해당 기술은 감축사업으로서 확대성이 있는가? 정책적인 기술보급이 이루어지고 있는가?
- 감축기술이 특정 회사, 개인의 소유로 감축사업 확대에 제약이 있는가?
- 감축기술을 감축사업에 적용함으로써 다른 부문의 배출이 증가할 우려는 없는가?
- 감축기술을 적용한 감축사업들이 모두 일관성을 가질 수 있도록 감축기술을 정의할 수 있는가?

해당 기술의 감축효과가 기존에 실증되었는지 조사함으로써 개발자는 실험을 통해 감축효과를 실증하지 못할 경우에 대한 시간과 비용 소모를 방지할 수 있다. 그러나 무엇보다 이 단계를 거치는 이유는 감축사업 배출계수는 감축사업 방법론 개발 또는 개정을 전제로 하기 때문에 배출계수 개발 과정에서 감축효과를 뒷받침할 수 있는 충분한 근거를 수집하여 이에 대한 타당성을 확보하기 위함이다. 배출계수 개발자는 국내외 감축사업 방법론, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문, 전문가 인터뷰 등을 검토하여 배출계수 개발의 타당성을 설명할 수 있어야 한다.

또한 기존에 해당 감축기술을 적용한 방법론이 없는 경우 배출계수 개발 계획은 방법론 개발 가능성과 함께 검토되어야 한다. 이 과정에서 해당 기술의 감축사업 확대성을 고려하여야 한다. 해당 기술의 시장성이 높거나 정부가 주도적으로 보급을 추진하는 기술이라면 감축사업으로 확대성이 있다고 볼 수 있다. 반면 도입 비용이 높거나 기술적 장벽이 높아 농가에 보급되기 어려운 기술이라면 감축사업으로 확대되기 어려울 것이다.

또한 해당 기술을 특정 회사 또는 개인이 소유하고 있다면 향후 감축사업 확대에 제약에 있을 수 있다.

한편으로 해당 기술을 적용함으로써 다른 부문의 배출량이 증가하지 않는지 검토하여야 한다. 예를 들어 사료 특성을 변경하여 가축 장내발효로 인한 메탄 배출량을 저감하는 기술의 경우, 해당 사료로 대체함으로써 장내발효로 인한 메탄 배출량을 줄어듦과 동시에 가축 분뇨에서의 메탄 배출량이 증가할 수 있다. 경종 부문에서 녹비 (green manure)를 투입함으로써 화학비료로 인한 아산화질소 배출량을 감축하는 기술을 도입하는 경우, 녹비를 재배 과정에서 화학비료가 사용한다면 녹비 대체에 따른 전체적인 감축효과는 미미할 것이다. 만일 이러한 추가 배출이 감축기술을 적용함으로써 발생하는 감축효과보다 크거나 비슷하다면 이를 감축사업으로 추진하기 어려울 것이다. 이와 같이 감축사업 배출계수는 감축기술의 감축효과 뿐만 아니라 감축기술을 도입함으로써 추가적인 배출이 발생하지 않는지 검토하여야 한다.

또한 감축사업 적용을 고려하여 해당 감축기술은 감축사업자가 시행할 수 있는 일관되고 규격화된 활동이어야 한다. 여기서 ‘일관되고 규격화된 활동’이란 동일한 감축사업 방법론을 적용하는 감축사업자들은 모두 동일한 감축기술을 적용하고 있음을 전제할 수 있어야 한다는 것이다. 예를 들어, 장내발효로 인한 메탄을 저감하기 위해 양질 조사료를 급이하는 감축기술의 배출계수를 개발하는 경우 개발자는 양질 조사료가 어떤 것을 의미하는지, 특히 개발된 계수로 감축사업을 시행할 경우 사업자들이 어떠한 형태의 양질 조사료를 이용할 것을 전제로 하는 것인지를 염두에 두고 실험에 사용된 양질 조사료를 규격화된 형태로 정의하여야 한다. 이러한 검토가 선행되지 않을 경우, 개발된 배출계수를 이용하여 감축사업 방법론을 개발 또는 개정하고자 할 때 방법론에 어떠한 형태의 양질 조사료로 한정할 것인지 정의하기 어렵다. 이는 다양한 종류와 형태의 양질 조사료가 모두 실험과 동일한 감축효과가 있을 것이라고 가정할 수 있을지 확신하기 어렵기 때문이다. 따라서 감축기술을 적용한 감축사업들이 모두 일관성을 가질 수 있도록 감축기술을 정의할 수 있는지 검토하여야 한다.

개발자는 이상의 배출계수 개발 타당성 검토 결과를 기록으로 관리하여야 한다.

5.2 배출계수 개발 실험 설계

5.2.1 배출량 산정 모델 및 배출계수 정의

배출량을 산정하는 방법은 배출량을 직접 측정하는 방법과 배출계수를 바탕으로 계산하는 방법이 있으며, 주로 후자가 이용된다. 가장 단순한 형태의 온실가스 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$E = A \times EF$$

단, E는 온실가스 배출량 (Emission)
 A는 온실가스 배출 활동자료 (Activity Data)
 EF는 온실가스 배출계수 (Emission Factor)

온실가스 배출 활동자료란 온실가스 배출을 야기하는 활동의 정도를 정량화한 값이다. 예를 들어 경종 부문의 경우 논에서 벼를 재배함으로써 담수 상태의 논에서 배출되는 메탄 배출량을 산정할 경우 활동자료는 벼 재배 면적으로 정의할 수 있다. 온실가스 배출계수 EF는 활동량에서 정의된 활동의 단위 당 배출되는 온실가스의 양을 나타내는 원단위에 해당 한다.

$$EF = EF \left[\frac{tGHG}{A-unit} \right]$$

배출활동의 특성에 따라 배출계수는 여러 배출량 산정인자의 결합으로 나타낼 수 있다. 예를 들어 벼 재배 논에서 배출되는 메탄의 배출계수는 다음과 같이 계산된다.

$$EF = EF_C \times S_W \times S_O$$

단, EF는 벼 재배 논에 대한 메탄 배출계수
 S_W 는 벼 재배 기간 중 물관리 보정계수
 S_O 는 벼 재배 기간 중 유기물 시용에 따른 보정계수

배출계수 개발자는 배출계수 개발 실험을 통해 배출량 산정식의 어떤 배출계수를 측정할 것인지 정의하고 그에 맞는 실험계획을 수립하여야 한다. 배출계수의 단위를 결정하기 위해 IPCC 가이드라인, 국내외 감축사업 방법론, 기타 공인된 기관에서 발행된 문헌을 이용할 수 있다.

배출계수 단위를 결정할 수 있는 복수의 대안이 존재하는 경우 개발자는 다음을 고려하여 배출계수 단위를 결정하여야 한다.

- 온실가스 감축량 산정의 정확성
- 온실가스 감축량 산정의 보수성
- 활동자료 수집 가능성

농업 부문 감축사업은 감축량 규모가 크지 않고, 활동자료 수집을 위한 측정기기를 설치하거나 관리하기 어렵다. 따라서 배출계수를 정의할 수 있는 여러 대안이 존재하는 경우 개발자는 감축사업에서 활동자료 수집 가능성을 고려하여 배출계수를 정의하여야 한다.

배출계수 결정 방식에 따라 감축효과가 다르게 나타날 경우 개발자는 서로 다른 배출계수 대안 간의 감축효과의 차이를 기술하고, 배출계수를 결정하는 과정에서 검토한 결과를 기록으로 관리하여야 한다.

배출계수의 시간적 범위는 경종 및 축산 부문의 특성을 고려하여 연 단위 보다는 일

단위가 적절하며, 연 단위로 설정하였을 경우 실험기간 동안 실제 경작 또는 사육이 이루어진 기간을 일 단위로 명시하여 감축사업 수행 시 사업자의 경작, 사육 여건에 맞추어 배출계수를 변경 적용할 수 있도록 하여야 한다.

5.2.2 측정 대상 정의

실험을 통해 측정하고자 하는 온실가스의 종류는 배출계수 개발 타당성 검토단계에서 고려된 배출원과 동일하여야 한다. 이는 해당 기술을 적용함으로써 온실가스 배출이 감축될 것이라고 예상되는 배출원을 측정하여야 한다는 의미이다. 즉, 개발자는 다음을 고려하여 개발대상 배출계수를 정의하여야 한다.

- 대조군과 실험군의 실험 처리 (treatment) 차이로 인한 온실가스 배출원의 배출량 변화가 실험에서 측정하고자 하는 배출원과 같은가?

5.2.3 배출계수 개발 방법론 구축

개발자는 배출계수 개발 방법론을 구축함에 있어 IPCC가이드라인, 공인된 기관에서 발표된 지침서 및 보고서, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문 등을 참고할 수 있다. 여기서 배출계수 개발 방법론이란 배출계수 개발 실험에서 고려되어야 할 온실가스 배출 특성을 의미한다. 이는 실험에서 주어진 모든 환경 조건, 개체 조건 중 배출계수에 영향을 미치는 요인을 도출하는 것이다. 특히 경종 부문의 경우 다음과 같은 배출·흡수 특성을 고려할 수 있다.

- 노지를 대상으로 한 감축기술의 경우 기상 조건의 변동을 고려하여 3년 이상 수행한 실험 결과를 바탕으로 한 배출계수 산정을 권고한다. 단 배출계수의 활용용도에 따라 실험필요 기간은 1년 이상 또는 2년 이상으로 설정할 수 있다.
- 토양의 탄소축적을 변화시키는 감축기술 (예. 보존 경운)의 경우 토양의 탄소축적이 평형을 이루는 기간인 20년을 실험 조건에 고려하여야 한다.

* 온실가스 종합정보센터. 2012. 국가온실가스 배출·흡수계수 개발검증 지침

5.2.4 베이스라인 부합성 검토

실험설계 시 대조군은 베이스라인으로 합당하도록 설정하여야 한다. 이 경우 기존에 관련 방법론이 존재하는 경우 방법론의 베이스라인 시나리오와 부합하도록 대조군을 설정하여야 한다. 특히 개발 대상 배출계수가 베이스라인 배출량 대비 감축률²⁷⁾일 경우 대조군은 베이스라인 시나리오를 충분히 반영하여야 한다. 만일 관련 방법론이 존재하지 않는 경우 대조군은 다음을 고려하여 베이스라인으로 합당해야 한다.

27) 예를 들어 논에서의 물관리 방식 차이에 따른 보정계수, 유기물 사용에 따른 보정계수 등

<참고. 경종 및 축산부문 배출·흡수 특성>

<p>장내발효(4A)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 핵심 고려사항 1. 총 에너지 섭취량(GE) 계산 2. 메탄전변율 <ul style="list-style-type: none"> - 일반 고려사항 1. 가축 관리 시스템 2. 생체중, 체중 증가 3. 사료 섭취량, 사료 공급형태 및 사료 품질, 우유 생산량 4. 기후조건 5. 축산물 품질
<p>분뇨관리(4B)</p>	<p>○ CH₄ 배출계수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 핵심 고려사항 1. 일일 휘발성 고형 분뇨 배출량(VS) 계산 2. 사료에너지량 3. 회분량(Ash) 4. 분뇨처리시스템 정보(MCF, MS%) 5. 기후조건 6. CH₄ 발생 잠재량 <ul style="list-style-type: none"> - 일반 고려사항 1. 가축특성 2. 사료소실율 <hr/> <p>○ N₂, O 배출계수</p> <ul style="list-style-type: none"> - 핵심 고려사항 1. 분뇨 내 질소량 (분뇨로 배출되는 질소량) 2. 분뇨처리시스템 비율(MS%) <ul style="list-style-type: none"> - 일반 고려사항 1. 가축특성 2. 사료소실율
<p>논벼 경작(4C)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 핵심 고려사항 1. 물관리 방법 2. 유기물 관리(종류 및 시용량) 방법 3. 토성 4. 재배일수 5. 재식밀도 6. 생태형(조생종, 중생종, 중만생종 등) <ul style="list-style-type: none"> - 일반 고려사항 1. 비료시용 2. 기상, 기후조건(온도, 강우량 등) 3. 토양온도 4. 수온 5. Eh(산화환원전위) 6. 위도 및 경도

- 관련 기술의 감축사업 방법론이 존재하는가? 그렇다면 대조군이 방법론의 베이스라인 시나리오와 부합하는가?
- 관련 기술의 감축사업 방법론이 없다면 대조군의 실험 조건이 국내 경종 및 축산업 여건에서 보편적인가? 이를 공인된 기관의 통계 또는 농업 부문 국가기관에서 발행한 문헌으로 입증할 수 있는가?
- 대조군에 대한 기본 배출계수가 존재하는가? 이 경우 대조군에 대한 기본 배출계수는 국가고유 배출계수, IPCC 가이드라인 등 국내외 공인된 기관이 제시한 배출계수여야 하며, 개발자는 대조군에서 산정된 배출계수와 기본배출계수를 비교하여야 한다.
- 만일 여러 베이스라인을 고려하여 대조군을 설정하는 경우 이에 대한 검토사항을 모두 기술하여야 한다.

만일 실험 여건 상 대조군을 보편적인 시나리오로 보기 어렵다면 이에 대한 검토결과를 기술하고, 향후 감축사업 방법론 개발 시 이를 베이스라인 시나리오로 제한하여야 한다.

5.2.5 방법론 적용 조건 부합성 검토

방법론 적용조건이란 베이스라인 시나리오, 배출량 산정식 등으로 구성된 방법론을 적용할 수 있는 조건을 기술한 것이다. 예를 들어 경종 부문에서 담수 상태의 논에서 배출되는 메탄을 저감하기 위한 목적으로 개발된 방법론의 경우 밭을 대상으로 동일한 방법론을 적용하는 것은 적절하지 않을 것이다. 만일 개발 대상 배출계수를 적용할 감축사업 방법론이 존재하는 경우, 개발자는 해당 방법론의 적용조건과 배출계수 개발 실험의 조건이 부합하도록 실험을 설계해야 한다. 개발 대상 배출계수를 적용할 감축사업 방법론이 존재하지 않는 경우, 또는 개정을 하고자하는 경우 실험 조건 중 배출량에 영향을 미칠 수 있는 조건들은 감축사업 적용 조건으로 규정되어야 한다.

특히 농업 부문의 감축사업은 다음 적용조건을 실험을 통해 확인하여야 한다.

- 감축기술 미적용 대조군 간의 생산량이 감축기술 적용 실험군의 생산량 보다 적지 않아야 한다.
- 실험군과 대조군의 실험 처리 (treatment) 방식 변화에 따른 안정화 기간이 요구되는 경우 (예. 사료 급여 방식 변경), 그리고 이 안정화 기간 동안의 데이터가 배출계수 산정결과에서 제외되는 경우, 감축사업 역시 해당 기간을 감축량 산정에서 제외하여야 하는지 검토하여야 한다.

5.2.6 표본의 대표성

계수 대표성을 위해 개발자는 개발 대상 배출계수의 특성에 맞게 표본 추출 방식 및 표본 크기를 결정하여야 하며, 이 과정을 투명하게 제시하여야 한다.

5.2.6.1 표본 추출방식

계수의 대표성을 확보하기 위해 실험개체는 무작위 표본 추출 (random sampling) 을 원칙으로 한다.

또한 필요한 경우 배출에 영향을 미치는 특성을 고려한 층화추출 방식 (stratified sampling)을 적용하여야 한다. 이를 위해 개발 대상 배출계수와 관련된 방법론이 기존에 존재하는 경우 감축사업 방법론에서 정의한 분류 기준을 검토하여 샘플링에 층화추출 방식 (stratified sampling)이 필요한지 검토하여야 한다. 해당 분류 기준이 개발 대상 배출계수와 관련이 있다고 판단될 경우 층화추출을 시행하여야 한다.

예를 들어 장내발효로 인한 메탄 배출량을 대상으로 배출계수 개발 실험을 계획할 경우 개발자는 실험 대상이 되는 가축의 축종 (예. 소)을 정하고, 실험 대상을 선택함에 있어 축종의 세분화된 분류 (예. 홀스타인)가 배출 특성에 영향을 미치는지 검토하여야 한다. 만일 축종의 세분화된 분류가 영향을 미친다고 판단될 경우 개발자는 각 축종별로 실험을 수행하거나 특정한 축종에 한정하여 실험을 수행할 것인지 결정하여야 한다. 만일 특정한 축종에 한정하여 실험을 수행할 경우 개발자는 해당 배출계수가 특정 축종에만 적용됨을 기술하여야 한다.

개발자는 적절한 표본 추출 방식을 선택하는데 있어 IPCC가이드라인, 공인된 기관에서 발표된 지침서 및 보고서, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문 등을 검토하여야 한다.

이상의 모든 검토 결과는 상세히 기술되어야 한다.

5.2.6.2 표본 크기 결정 방식

개발자는 배출 특성에 따라 분류된 실험그룹별로 적정 표본의 크기를 결정하여야 한다. 일반적인 경우 표본 크기는 신뢰수준에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2}\sigma}{E} \right)^2$$

단, n 는 표본의 크기

$Z_{\alpha/2}$ 는 신뢰수준 95% 1.96, 신뢰수준 90%일 때 1.64

σ 는 모평균의 표준편차로 알려져 있지 않은 경우 사전 샘플조사에 따른 표준편차 이용

E 는 허용 가능한 오차의 크기

단, 경종 및 축산 부문 실험의 특성 상 상기와 같은 표본 크기 결정 방식을 적용하는 것이 적절하지 않거나 어려울 수 있다. 이 경우 개발자는 적정 표본의 크기를 설정함에 있어 IPCC가이드라인, 공인된 기관에서 발표된 지침서 및 보고서, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문 등을 참고할 수 있다.

5.3 실험 및 자료 수집

개발자는 배출계수 개발 실험과정에서 이루어지는 의사결정을 정당화할 수 있어야 한다.

여기서 실험 과정의 의사결정 대상으로는 측정 주기, 측정 방법론, 측정에 샘플링이 활용될 경우 샘플링 방법론, 측정기기 설정 등을 포함한다.

측정방식의 근거는 다음 중 하나로 기술한다.

- 국내외 공인 측정 분석 및 샘플링 방법론
- 전문가 판단

실험에 사용되는 측정기기와 분석기기는 측정값의 신뢰도를 보증할 수 있도록 적합한기기를 선택, 관리하여야 한다. 만일 측정·분석을 외부에 의뢰하는 경우 국내외 공인된 측정기관에서 수행하여야 한다.

5.4 자료 관리

개발자는 유효숫자가 배출계수 개발 결과에 미치는 영향을 고려하여 유효숫자를 관리하여야 한다. 유효숫자를 관리하는 기준은 IPCC 가이드라인을 비롯한 온실가스 감축량 산정과 관련된 국내외 지침에 따른다.

개발자는 계수 개발결과에 대한 추적가능성, 재현성을 확보하고, 제3자가 이를 이해할 수 있도록 원시자료를 포함하여 개발 절차에 대한 충분한 정보를 제시하여야 한다. 또한 개발자는 개발 과정에서 검토한 모든 참고문헌을 제시하여야 한다. 관련 정보에는 실험과정에서 사용한 측정기기의 모델명, 오차 및 분해능 등 사양, 교정 일시를 포함한다.

5.5 불확도 관리 및 평가

개발자는 실험을 통해 도출한 배출계수가 어느 정도로 신뢰할 수 있는 값인지를 나타내기 위하여 불확도를 제시하여야 한다. 여기서 불확도란 “측정결과와 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정된 값의 산포특성을 나타내는 파라미터” (ISO/IEC Guide 98-3:2008, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)이다. 실험을 통해 얻어지는 측정결과는 측정량을 추정한 값이기 때문에 측정결과의 불확도는 불가피한 것이다. 대신 개발자는 배출계수와 함께 불확도를 명기함으로써 개발된 배출계수가 어느 정도로 신뢰할 수 있는 값인지를 나타낼 수 있다.

불확도는 모형 불확도와 매개변수 불확도로 구분된다. 모형불확도는 배출량을 산정하기 위한 산정방법론이 복잡한 현실 시스템을 정확하게 반영하지 못하여 발생하는 것이다. 즉, 실험에서 가정하고 있는 배출량 산정 모형이 실제 배출량 요인을 모두 반영하고 있지 않거나 배출계수에 대한 조작적 정의가 올바르지 않기 때문에 발생하는 불확도이다.

이와 구분하여 매개변수 불확도는 배출량을 산정하기 위한 활동자료, 배출계수 등 매개변수의 측정 및 정량화와 관련된 불확도이다. 자료가 대표성이 없거나 통계적인 표본추출 오차가 발생한 경우, 측정기기의 오차, 이용 가능한 자료가 없는 경우에 발생하는 불확도 요인이다.

모형 불확도 (Model Uncertainty)

- 배출량을 산정하기 위한 산정방법론(모형)이 복잡성이 큰 현실 시스템을 정확하게 반영하지 못하여 발생하는 오류(모형은 현실시스템의 단순화이므로 일반적으로 불확도를 내포)
- 이 경우 부적절한 배출량 산정식이 활용되었거나 산정식의 입력변수가 부적절하게 정의된 경우에 발생
- 일반적으로 모형불확도를 감소시키기 위한 활동은 **사업자의 관리범위를 넘어섬**

매개변수 불확도 (Parameter Uncertainty)

- 배출량을 산정하기 위한 활동자료, 배출계수 등 **매개변수의 측정 및 정량화와 관련한 불확도**
- 자료가 대표성이 없거나 통계적인 표본추출 오차가 발생한 경우, 측정기기의 오차, 이용가능한 자료가 없는 경우 등
- 매개변수 불확도는 사업자의 인벤토리 품질관리 활동에 주요 대상이 되는 부분

본 가이드라인에서는 실험 단계에서 고려될 수 있는 매개변수 불확도를 대상으로 한다.

한편으로 개발자는 측정결과에 영향을 미침으로써 불확도의 크기를 증가시킬 수 있는 모든 요인을 인식하고, 이를 관리하여야 한다. 본 가이드라인에서 불확도를 평가하는 목적은 배출계수 개발 연구의 품질을 관리하기 위함이다. 이를 위해서 개발자는 가능한 모든 불확도 요인을 검토하고 평가하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서의 불확도 평가는 계산을 통해 불확도 값을 도출하는 것이 1차적 목적이며, 불확도에 영향을 미치는 모든 요인을 고려함으로써 연구 결과의 품질을 관리하는 것이 궁극적인 목적이다.

5.5.1 불확도 요인 목록화 및 범주화

개발자는 실험을 수행하기에 앞서 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인을 목록화하여야 한다. 여기서 불확도 요인을 목록화하는 것은 실험단계에서 실험 결과에 영향을 미치는 불확도 요인들을 관리하기 위함이다.

불확도 요인을 목록화하기 위해 개발자는 연구 단계를 고찰하여 각 단계에서 발생할 수 있는 모든 불확도 요인을 나열하여야 한다. 목록화된 불확도 요인은 개발자가 관리할 수 있는 불확도 요인과 관리할 수 없는 불확도 요인으로 구분할 수 있다. 개발자는 불확도를 최소화할 수 있도록 관리할 수 있는 모든 불확도 요인을 관리하여야 한다. 예를 들어 메탄, 아산화질소 등 챔버를 이용한 배출계수 실험의 경우 챔버의 크기가 클수록 챔버 내 가스 농도가 균질하다고 가정하기 어려워진다. 챔버 내 가스 농도가 균질하지 않을 경우 가스 분석 시료를 채취하는 지점이 어디냐에 따라 농도 측정결과가 달라질 것이다. 따라서 개발자는 이러한 불확도 요인을 최소화하기 위해 챔버 내에 팬을 부착하는 등 가스의 균질성을 관리 하여야 한다.

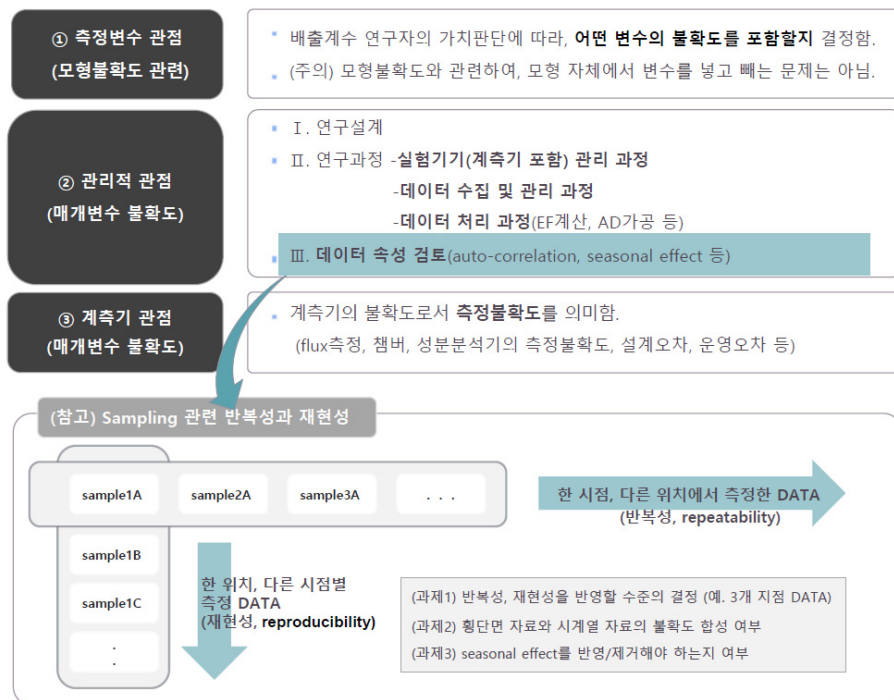
관리할 수 없는 불확도 요인은 그 중요도를 평가하고, 측정결과에 크게 영향을 미친다고 판단되는 불확도 요인에 대해 실험기간 동안 이에 대한 데이터를 수집하여야 한다. 예를 들어 농경지에서 배출되는 아산화질소 배출계수 측정실험의 경우 토양의 특성이 매우 중요한

불확도 요인이다. 그러나 연구자는 토양의 특성을 실험기간 동안 관리 (제어)할 수 없다. 대신 실험기간 동안 토양의 특성을 나타낼 수 있는 데이터를 측정하고 수집함으로써 실험결과와 불확도를 평가할 수 있다.

5.5.1.1 불확도 발생 요인별 범주화

아래의 기준을 참고하여 불확도 발생 요인별로 범주화한다.

- (모형 불확도) 배출계수 모형 설정 : 배출량 및 배출계수에 영향을 미치는 통제변수의 누락 등
- (모형 불확도) 파라미터 설정 : 변수의 조작적 정의, 모니터링 인자 설정
- (매개변수 불확도-연구관리) 실험설계의 오류 가능성
- (매개변수 불확도-연구관리) 연구과정 : 실험기기의 성능유지를 위한 적절한 관리
- (매개변수 불확도-연구관리) 연구과정 : 실험환경(온습도 등) 관리가 필요한 경우, 관리여부
- (매개변수 불확도-연구관리) 연구과정 : 데이터 수집 및 처리 과정(데이터 가공 및 계산 과정)
- (매개변수 불확도-연구관리) 연구과정 : 데이터 속성에 따른 적절한 처리여부(변수 상관관계 등)
- (매개변수 불확도-실험기기) 측정불확도 : 실험기기의 설계오차, 운영오차, 분해능
- (데이터 자체의 불확도) 배출계수 산정을 위해 사용된 측정데이터(flux 등)의 상대확장불확도



5.5.1.2 불확도 산정 가능성별 범주화

목록화된 불확도 요인은 정량화 가능한 요인과 정량화 불가능한 요인으로 구분할 수 있다. 정량화 가능한 요인 중 불확도에 크게 영향을 미치는 요인은 실험기간 동안 측정이 이루어져야 한다. 정량화 가능한 요인 중 일부는 불확도 평가 단계에서 실제 배출계수 실험결과에 대한 불확도를 제시할 때 사용된다. 특히 측정기기/분석기기의 기기 오차는 정량화 가능한 요인 중 불확도 평가에 반영되는 대표적인 수치에 해당한다.

- 정량화 가능한 불확도 요인
 - 예1) 측정데이터(flux 등)의 표준편차, 표본 개수를 적용한 상대확장불확도
 - 예2) 측정기기(가스성분분석기, 사료급여기, 호흡챔버 등)의 설계오차 및 운영오차

정량화 불가능한 불확도 요인의 경우 중요성을 평가하여 불확도에 큰 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 요인에 대하여 실험기간 동안 이에 대한 관리를 수행하여야 한다.

- 정량화 불가능한 불확도 요인
 - 예1) 실험 수행자의 측정기기 조작 미숙
 - 예2) 농경지 아산화질소 배출 실험의 경우 실험구 내 식재된 작물의 특성

5.5.2 실험 특성별 불확도 요인 목록화 및 범주화

5.5.2.1 농경지 아산화질소 배출계수

농경지 아산화질소 배출계수 실험의 불확도 요인은 다음과 같이 목록화할 수 있다. 아산화질소 배출계수 실험에서 측정 불가능하나 배출량에 큰 영향을 미치는 요인은 비료의 시비량 및 토양 관리 방법으로 향후 유사 연구 시 이를 관리하는 것이 필요하다.

불확도 발생 단계		가능한 불확도 요인	세부내용
배출량 산정 모델 설정		배출량에 영향을 미치는 독립변수, 통제변수의 누락	본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음.
배출계수 정의		변수의 조작적 정의	본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음.
		모니터링 인자 설정	본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음.
자료 수집	실험 운영 (재배)	작물특성	<ul style="list-style-type: none"> • N₂O배출은 작물에서 배출되는 것이 아닌 토양에 잔류한 질소량에 크게 의존하기 때문에 작물특성은 중요하지 않을 것으로 보임. • N₂O, CO₂ 배출량은 식물이 없는 토양에 측정함.
		토성	<ul style="list-style-type: none"> • 토양의 배수특성, 유기물 함량, 밀도 등 토양의 특성은 N₂O배출에 큰 영향을 미치나 측정/관리 불가능한 요인
		토양관리 (관개, 잡초 제거, 피복(멀칭) 등 관리 수준)	<ul style="list-style-type: none"> • 재배/관리 수준이 분석보다 측정값에 더 큰 영향을 미침. • 자동측정장치는 이러한 기타요인(잡초 등)을 충분히 관리하기 어려움.

불확도 발생 단계	가능한 불확도 요인	세부내용
	비료 시비 시기	<ul style="list-style-type: none"> · 질소질 비료는 총 3번, 인산 1번 칼리는 2번 시비 · 질소질비료는 이앙 하루 전, 이앙 후 14일(분얼기), 이앙후 42일 후 정도로 나누어 시비 · 비료 시비 직후 배출량이 급격히 올라가고 이후 낮아지는 패턴을 보임. 비료시비에 따라 배출량값의 차이를 보이는 것이 표준편차를 크게 나타나게 하는 대표적 요인
	비료 시비량	<ul style="list-style-type: none"> · N₂O는 식물체가 아닌 토양 위에 챔버를 씌워 측정 · 질소질 비료를 시비할 때 균일하게 시비하기 어렵기 때문에 챔버를 씌울 처리구를 덮어두고 주변부에 우선 시비한 후, 처리구 위에 비료시비량을 측정하여 측정량 만큼만 시비 -> 비료시비량 측정 시 불확도 발생할 수 있음.
	비료의 질소함량 차이	<ul style="list-style-type: none"> · 사용된 비료별로 질소함량에 차이가 있을 수 있음. · 그러나 매번 시비 때 마다 질소함량을 측정하기는 현실적으로 어렵기 때문에 측정/관리가 불가능한 요인임.
	토양온도	<ul style="list-style-type: none"> · 토양온도는 미생물활성도, 식물생육에 영향을 미치므로 배출량에 영향을 줄 수 있음. · 그러나 정량화하거나 관리할 수 없는 요인임.
	기상,기후조건(온도, 강수 등)	<ul style="list-style-type: none"> · 중요한 요인이나 측정/관리 불가능
측정/분석	챔버 밀폐도	<ul style="list-style-type: none"> · 베이스챔버와 closing챔버가 서로 맞물리도록 제작되었으며 가스 sampling 시 틈을 완전히 밀폐하기 위해 베이스챔버와 closing 챔버가 맞물리는 부분에 물을 채워 공기흐름을 차단하고 있음.
	가스 sampling 시간대 선정 (대표시간 선정)	<ul style="list-style-type: none"> · 현재 매일 오전 11시부터 30분 간 측정하고 이 결과를 24시간으로 환산 · 일반적으로 측정시간대는 24시간을 연소 측정하여 하루 배출량의 평균을 대표한다고 가정할 수 있는 시간대를 선정 · 단 이번 실험의 경우 대표시간을 선정하기 위한 실험을 별도로 수행하지 않았으며 유사연구에서 일반적으로 적용하는 대표시간대로 선정
	챔버 내 가스 농도의 균질성	<ul style="list-style-type: none"> · 챔버 크기가 클 경우 내부 가스가 불균질할 수 있어 가스 sampling 시 측정결과에 불확도 야기 · 이를 예방하기 위해 메탄 측정 실험의 경우 경우 챔버에 팬을 달아 가스를 mixing · 단, N₂O 측정실험의 경우는 챔버가 작아서 챔버 내부 가스를 전부 sampling한다고 가정할 수 있기 때문에 미미한 요인일 것
	가스 sampling 시간의 불확도	<ul style="list-style-type: none"> · 현재 처리구에 챔버를 30분 동안 덮어 (closing) 가스 sampling · 그러나 30분이라는 시간이 항상 정확하지 않을 수 있음. · closing시간이 길면 측정되는 농도가 높아짐. · 추후 closing시간과 농도 간의 관계를 실험을 통해 계산해볼 수 있을 것. · 둘은 선형비례할 것으로 가정되므로 실험을 통해 회귀선이 나오면 이후부터 closing시간을 매번

불확도 발생 단계		가능한 불확도 요인	세부내용
			측정하고 30분보다 많거나 적은 만큼 농도를 보정할 수 있음.
		sampling 가스 보관	<ul style="list-style-type: none"> · (중요성 낮음) · 주사기를 이용하여 sampling하는데 바로 분석을 하는 것이 아니라 1시간, 일주일 씩 그냥 두었다가 분석하기도 함. 이로 인해 내부 가스의 농도가 미세하게 바뀔 가능성 존재하나 큰 차이는 없을 것으로 보임.
		가스분석기기 오차	<ul style="list-style-type: none"> · 분석기기(GC)의 불확도는 시방서에 제시된 측정불확도 값을 이용하여 정량화할 예정 · 현재 시방서 등 관련 자료 요청 중
		표준가스	<ul style="list-style-type: none"> · (중요성 낮음) · 가스분석을 위한 표준가스를 구입해 오는데 표준가스의 N2O농도의 불확도가 있을 수 있음. · 그러나 표준가스는 측정 소급성 개념에서 최상위에 해당하므로 표준가스의 불확도를 포함하는 것이 불필요하다는 의견도 존재

5.5.2.2 가축 장내발효 메탄 배출계수

가축을 대상으로 이루어지는 장내발효에 따른 메탄 배출계수 실험은 환경, 가축 개체 특성 등 실험운영 요인보다 가축의 사료 섭취량이 큰 영향을 미친다. 단, 경종 부문과 달리 가축이 들어갈 수 있는 크기로 설계된 메탄 측정 챔버의 크기는 챔버 내부 가스의 불균질성으로 인한 불확도 요인이 크다. 따라서 가스 순환 장치 등을 통해 챔버 가스의 균질성을 유지하는 것이 중요하다.

불확도 발생 단계		가능한 불확도 요인	세부 내용
배출량 산정 모델 설정		배출량에 영향을 미치는 독립변수, 통제변수의 누락	본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음.
배출계수 정의		변수의 조작적 정의 모니터링 인자 설정	본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음. 본 가이드라인의 범위에 해당하지 않음.
실험군/샘플링 설정		표본의 대표성	· 몸무게, 나이가 유사한 소를 비교군으로 활용
자료 수집	실험 운영 (사료)	사료 변경에 따른 일시적인 장내발효 영향	· 사료에 적용할 수 있는 기간(10~12일)을 두고 측정을 진행
		사료급여량 측정 오차	<ul style="list-style-type: none"> · 정확한 사료섭취량을 측정하기 위해 급여량과 먹고 남은 양의 무게를 측정 · 장내발효의 경우 사료섭취량이 가장 큰 요인이므로 무게 측정기의 측정오차 역시 고려해야할 불확도 요인 · 시방서에 표기된 측정오차 확인 요청 중
		사료조성	· 같은 시기에 구매한 사료는 서로 유사하다고 간주할 수 있으나 구매시기가 다를 경우 조성에 차이가 있을 수 있음.

불확도 발생 단계	가능한 불확도 요인	세부 내용
실험 운영 (환경)	온도, 습도 등 환경요인	<ul style="list-style-type: none"> · 그러나 측정실험을 수행하기에는 미미한 요인임. · (경종과 다르게) 환경요인의 차이는 사료의 섭취량 차이로 나타남. · 환경요인을 따로 측정/관리하기는 어려우나 실험 기간 동안 대상 실험축의 환경요인을 가급적 동일하게 유지하기 위해 노력함.
	측정	챔버 투입(환경변화)에 따른 일시적인 장내발효 영향
챔버 내 가스 농도의 균질성		<ul style="list-style-type: none"> · 메탄 챔버는 크기가 커 공기를 mixing하는 팬이 부착되어 있음.
챔버에 부착된 온도조절기		<ul style="list-style-type: none"> · 온도조절기가 챔버 내 공기를 흡입, 배출하면서 챔버 내부의 온도를 조절함. · 이 과정에서 챔버 내부의 메탄에 변화가 생길 수 있음.
챔버 밀폐도		<ul style="list-style-type: none"> · 챔버의 밀폐도를 측정하기 위해 flow meter를 이용하여 회수율 테스트를 하고 있음. · 회수율은 약 7-80%이며, 이는 챔버 내부 메탄의 7-80%만 검출가능하다는 의미임. · 실제 메탄의 양을 구할 때는 7-80%로 측정된 값을 100%로 환산하여 구함.
flow meter 불확도		<ul style="list-style-type: none"> · 측정과정에서 flow meter를 이용하여 외부 공기를 유입/배출 시키는데 이 유입속도에 따라 메탄 측정량에 차이가 나타남. · 이는 기기의 오차 때문은 아니며 현재 실험을 맡고 있는 서울대학교에서도 고민하고 있는 부분임. · 기기 자체의 오차는 최근 교정받은 결과(성적서)를 이용하여 오차 정량화 예정 · 없을 경우 시방서 기재 값 이용
가스 sampling 시간		<ul style="list-style-type: none"> · 현재 한 챔버 당 약 10분 마다 가스를 sampling하고 있음. (총 4챔버) · 외국의 연구를 보면 가스 sampling시간을 짧게 하는 것이 측정결과에 영향을 준다고 함. · 현재 10분 단위로 측정하는 이유는 하나의 디텍터가 각각의 챔버를 모두 측정하기 때문이며, 각 챔버를 측정하고 난 뒤 디텍터의 column을 cleaning하는 과정을 거치기 때문 · sampling시간을 단축하는 것을 검토 중임.
가스분석기 오차		<ul style="list-style-type: none"> · 최근 교정받은 결과(성적서)를 이용하여 오차 정량화 예정 · 없을 경우 시방서 기재 값 이용
표준가스 오차	<ul style="list-style-type: none"> · (중요성 낮음) · 가스분석을 위한 표준가스를 구입해 오는데 표준가스의 N₂O농도의 불확도가 있을 수 있음. · 그러나 표준가스는 측정 소급성 개념에서 최상위에 해당하므로 표준가스의 불확도를 포함하는 것이 불필요하다는 의견도 존재 	

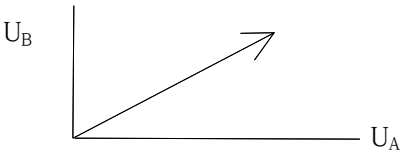
5.5.3 불확도 평가

측정불확도에서는 표본데이터의 불확도를 표준불확도와 확장불확도로 계산하며 표준불확도는 통계학의 표준오차의 개념을 이용하여, 확장불확도는 오차의 한계를 이용하여 정의한다. 불확도를 산정하기 위해서는 먼저 측정량(예를 들어 배출계수)을 얻기 위해 필요한 변수를 검토하여 불확도요인을 파악한다. 그리고 입력 값 또는 측정 값에 대한 불확도를 우선 산정한다. 이를 표준불확도라고 하며 계산값이 아닌 측정을 통해 얻어지는 1차적인 입력 변수에 대한 불확도를 산정하는 것이다.

불확도 계산 단계	내용
1단계 (사전검토)	매개변수 분류 및 검토, 불확도 평가 대상 파악 불확도 평가 체계 수립
2단계 (불확도 산정)	측정횟수에 따른 확률분포값 결정 측정값에 대한 표준편차, 평균, 표준불확도 추정
3단계 (합성 불확도 산정)	배출활동의 활동자료, 배출계수, 기타 매개변수에 대한 합성 불확도 계산

A형 평가의 경우 평균의 표준편차(표준오차)를 표준불확도로 이용한다. 우리가 원하는 값의 전체 불확도는 개개 불확도를 합성하여 구한다. 합성 불확도는 오차 전과법칙에 따라 계산하며 일반적으로 개개의 표준불확도 성분들의 제곱합의 제곱근으로 계산한다. 이렇게 합성한 합성 불확도에 신뢰수준, 유효 자유도에 따른 포함인자를 곱하여 확장불확도를 계산하는데 일반적으로 불확도 평가시 보고하는 불확도 값은 이 확장불확도이다. 불확도 평가시 불확도 값 뿐만 아니라 최종 불확도 값에 영향을 미치는 불확도 요인 간 영향력을 보기 위해 민감도 분석을 함께 수행할 수 있다. 정량화 가능한 각 불확도 요인의 상대확장불확도를 조합하여 산출된 합성불확도를 배출계수의 최종 불확도로 제시하여야 한다.

산정단계	불확도 산정식	의미
표준 불확도	$U_i = \frac{sd_i}{\sqrt{n_i}}$ U _i : 1차 변수(i)의 불확도 sd _i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n _i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수	표본평균의 표준오차
확장 불확도	$U_i = \frac{1.96 \times sd_i}{\sqrt{n_i}}$ U _i : 1차 변수(i)의 불확도 1.96 : 1차 변수(i)가 95%의 신뢰구간에 존재할 확률분포값 (포함인자에 상수를 부여한 것) sd _i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n _i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수	오차의 한계 (신뢰구간의 분포 적용)

산정단계	불확도 산정식	의미
상대 확장 불확도	$U_i = \frac{1.96 \times sd_i}{\sqrt{n_i} \times Avg_i} \times 100$ <p> U_i : 1차 변수(i)의 불확도 1.96 : 1차 변수(i)가 95%의 신뢰구간에 존재할 확률분포값 sd_i : 1차 변수(i)의 표본들의 표준편차 n_i : 1차 변수(i)의 표본들의 개수 Avg_i : 1차 변수(i)의 표본들의 평균 </p>	<p>비교가능한 값으로 환산하기 위해 표본평균으로 나누어 100을 곱함</p> <p>※ 온실가스에너지 목표관리제의 경우 업체가 보고하는 불확도 (목표관리지침 별표19)</p>
합성 불확도	$U_{j, non-correl} = \sqrt{\sum U_i^2}$ <p> $U_{j, non-correl}$: 2차 변수(j)의 불확도 U_i : 1차 변수(i)의 불확도 </p> $\sqrt{U_A^2 + U_B^2}$ 	<p>배출량의 불확도</p> <p>각 매개변수의 상대불확도를 합성</p>
민감도 분석	$\frac{\delta U}{\delta U_i} = \frac{\delta \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2}}{\delta u_a}$	<p>하위변수 각각의 불확도가 상위변수 불확도에 미치는 영향</p>

6. 경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인

6.1 배출계수 개발 타당성

○ 해당 감축기술 적용이 관련된 다른 배출원에 영향을 미치는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 임의의 감축사업자가 시행할 수 있는 일관되고 규격화된 감축기술인가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 해당 기술의 감축효과가 기존에 실증되었는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 해당 기술에 대한 기존 방법론이 없을 경우,		
- 해당 기술은 감축사업으로서 확대성이 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 정책적인 기술보급이 이루어지고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 해당 기술이 특정 회사, 개인의 소유로 감축사업 확대에 제약이 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.2 배출계수 개발 실험 설계

6.2.1 배출량 산정 모델 및 배출계수 정의

○ 배출계수의 단위를 결정하기 위해 IPCC 가이드라인, 국내의 감축사업 방법론, 기타 공인된 기관에서 발행된 문헌을 이용하였는가? 그 근거를 제시하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 배출계수 단위를 결정할 수 있는 복수의 대안이 존재하는 경우 개발자는 온실가스 감축량 산정의 정확성, 보수성, 활동자료 수집 가능성을 고려하여 결정하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 배출계수 결정 방식에 따라 감축효과가 다르게 나타날 경우 개발자는 서로 다른 배출계수 대안 간의 감축효과의 차이를 기술하고, 배출계수를 결정하는 과정에서 검토한 결과를 기록으로 관리하여야 한다.	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 배출계수의 시간적 범위는 경종 및 축산 부문의 특성을 고려하여 연 단위, 일 단위 등 적절한 단위를 설정하였는가? 그에 대한 근거를 기술하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 배출계수 결정과정에서 검토한 결과를 기록으로 관리하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.2.2 측정 대상 정의

○ 대조군과 실험군의 실험 처리(treatment) 차이로 인한 온실가스 배출원의 배출량 변화가 실험에서 측정하고자 하는 배출원과 같은가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
---	-------	--

6.2.3 배출계수 개발 방법론 구축

○ IPCC가이드라인, 공인된 기관에서 발표된 지침서 및 보고서, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문 등을 참고하여 실험을 설계하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 노지를 대상으로 한 감축기술의 경우, 기상 조건의 변동을 반영할 수 있는 실험기간을 고려하여 실험계획을 수립하고 그 결과를 바탕으로 배출계수를 산정하였는가? ※국가배출계수의 경우, 3년 이상의 기간을 고려함. 단, 감축사업 배출계수의 경우 실험여건 및 계수의 활용성을 고려해 1~2년의 실험기간을 고려할 수 있음.	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 토양의 탄소축적을 변화시키는 감축기술(예. 보존 경운)의 경우 토양의 탄소축적이 평형을 이루는 기간(20년)을 실험 조건에 고려하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 기타 배출 특성에 따라 고려되어야 할 항목을 고려하여 방법론을 구축하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.2.4 베이스라인 부합성 검토

○ 관련 기술의 감축사업 방법론이 존재하는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- (존재한다면) 대조군이 방법론의 베이스라인 시나리오와 부합하는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- (존재하지 않는다면) 대조군의 실험 조건이 국내 경종 및 축산업 여건에서 보편적인가? 이를 통계적인 수치 또는 농업 부문 국가기관에서 발행한 문헌으로 입증할 수 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 만일 대조군의 조건이 보편적인 것이 아니라면, 방법론 개발 시 이를 베이스라인 시나리오로 기술하여 감축사업자가 이를 입증하도록 하여야 한다.		
○ 대조군에 대한 배출계수가 존재하는가? (이 경우, 대조군에 대한 기본 배출계수는 국가 고유 배출계수, IPCC 가이드라인 등 국내외 공인된 기간이 제시한 배출계수여야 한다.)	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 대조군에 대한 기본 배출계수가 존재하는 경우 대조군의 배출량과 기본배출계수를 비교하여야 한다.		
- 만일 대조군으로 여러 베이스라인이 고려되는 경우, 이는 모두 베이스라인 시나리오로 기술하여야 한다.		

6.2.5 방법론 적용 조건 부합성 검토

○ 개발 대상 배출계수를 적용할 감축사업 방법론이 존재하는 경우,		
- 해당 방법론의 적용조건과 배출계수 개발 실험 조건이 부합하도록 실험을 설정하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 개발 대상 배출계수를 적용할 감축사업이 존재하지 않는 경우,		
- 배출량에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 감축사업 적용 조건으로 규정할 필요성이 있는 요인이 도출되었는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 감축기술 미적용 대조군 간의 생산량이 감축기술 실험군의 생산량보다 더 많은가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 실험군과 대조군의 실험 처리(treatment) 방식 변화에 따른 안정화 기간이 요구되는 경우(예, 사료 급여 방식 변경), 그리고 이 안정화 기간 동안의 데이터가 배출계수 산정결과에서 제외되는 경우,		
- 감축사업에서도 해당 기간을 감축량 산정에서 제외하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.2.6 계수 대표성

6.2.6.1 표본 추출방식

○ 배출·흡수원에 대한 조사 방법을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 조사 방법에 대한 적절성을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 모집단 구성에 대한 정보를 자세히 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 국내 배출·흡수원에 대한 정보를 자세히 기술했는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 표본집단 및 표본 선정 적절성에 대하여,		
- 표본집단 선정 배경 및 기준에 대해 기술했는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 표본 개수의 적정성에 대한 정보를 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 표본의 시·공간적 영향에 대한 정보를 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 실험개체는 무작위 표본 추출(random sampling)을 원칙으로 하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 개발 대상 배출계수와 관련된 방법론이 기존에 존재하는 경우,		
- 감측사업 방법론에서 정의한 분류 기준을 검토하여 샘플링에 층화추출 방식(stratified sampling)이 필요한지 검토하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 해당 분류 기준이 개발 대상 배출계수와 관련이 있다고 판단되는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- (관련이 있다고 판단될 경우) 층화추출을 시행하였는가? 시행하지 않았을 경우 그에 대한 사유를 기술하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- (관련이 없다고 판단될 경우) 이에 대한 검토결과를 기술하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 개발 대상 배출계수와 관련된 방법론이 기존에 존재하지 않는 경우,		
- 개발 대상 배출계수와 관련된 실험개체의 분류 기준을 검토하여 배출계수에 영향을 미칠 것이라 판단되는 분류 기준에 대하여 층화표본추출을 시행하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 배출계수에 영향이 없는 분류기준이라고 판단될 경우 이에 대한 사항을 기술하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.2.6.2 표본 크기 결정 방식

○ 실험그룹별 적정 표본의 크기는 신뢰수준을 90% 또는 95%로 설정할 경우 측정 대상 값의 표준편차, 허용오차에 근거하여 도출하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 경종 및 축산 부문의 특성으로 인하여 표본 크기가 위 기준 보다 적게 결정되었을 경우, 그에 대한 타당성을 IPCC가이드라인, 공인된 기관에서 발표된 지침서 및 보고서, 논문 심사 (peer review)를 거쳐 출판된 논문 등을 통해 입증하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.3 실험 및 자료 수집

○ 측정·분석을 통하여 배출계수를 개발했을 경우,		
- 측정·분석 유형 선정에 대한 적절성을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 사용된 측정·분석 방법론을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 사용된 측정·분석 방법론에 대한 적절성을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 측정·분석 시 샘플링이 이루어졌을 경우,		
- 샘플링 방법론을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 샘플링 방법론에 대한 적절성을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 통계·연구·문헌 자료의 변수값을 사용한 경우,		
- 사용된 자료의 출처를 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 사용된 자료의 적절성을 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 시험분석 기관의 신뢰수준에 관하여,		
- 측정 및 시험분석 기관에 대한 정보를 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 측정·분석기기 운영·관리 수준(측정 범위, 오차율 및 직선성의 적정성 등)에 대하여,		
- 측정시 사용된 측정기기 사양(측정범위 등)에 대해 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 측정기기 교정에 사용된 가스의 정보 및 제로오차율, 스펠오차율, 직선성의 오차를 제시하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 측정기기 교정 수행여부를 입증하는 측정기 운영일지를 첨부 하였나? (측정기기 정도검사 결과 내용 포함)	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 측정시 사용된 측정기기에 대한 신뢰도를 입증할 수 있는 근거(예 : 환경 측정기기 형식승인서 및 정도검사 결과)를 제시했는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.4 자료 관리

○ 배출계수 개발 결과에 미치는 영향을 고려하여 유효숫자를 관리하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 유효숫자를 관리하는 기준이 IPCC 가이드라인을 비롯한 온실가스 감축량 산정과 관련된 국내외 지침을 따르고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 계수 개발결과에 대한 추적가능성, 재현성을 확보하기 위한 원시자료를 포함하여 개발 절차에 대한 충분한 정보를 제시하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 개발과정에서 검토한 모든 참고문헌을 제시하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 실험과정에서 사용한 측정기기의 모델명, 오차 및 분해능 등 사양, 교정일시를 포함하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 시간범위의 일치성에 대하여,		
- 사용 자료들의 시간범위에 따른 상호연관성을 서술하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
- 사용 자료들에 대한 시간범위의 일치성을 서술하였나?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

6.5 불확도 관리 및 평가

○ 배출계수의 불확도를 제시하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 배출계수 개발 결과에 영향을 미치는 모든 불확도 요인을 제시하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 불확도 요인의 중요성을 평가하고 이를 관리하기 위한 노력을 수행하였는가? 이에 대해 기술하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오
○ 적절한 방식에 따라 불확도를 정량화하였는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오

제4장. 목표달성도 및 관련분야 기여도

제1절. 목표 달성도

구분 (년도)	세부과제명	연구개발의 목표	달성도 (%)	연구개발의 내용
1차 년도 (2015)	(1 세부) 농업부문 온실가스감 축효과 산 정을 위한 경종 및 축 산부문 배 출계수와 증 가이드라인 개발	○ 지방 또는 지방산 첨가사료의 반 추가축 장내발효에 따른 메탄발생 감축량 산정 및 유지 기간 설정	100%	○ 농후사료와 조사료를 혼합급여하는 TMR과 분리급여 방식 차이에 따른 메 탄발생량 산정 및 유지기간 설정
		○ 장내발효로 인한 메탄발생량과 가 축 분뇨 메탄발생량의 상관성 분석		○ 장내발효로 인한 메탄발생량과 가축 분뇨 메탄발생량의 상관성 분석
	○ 장내발효 메탄발생량 측정 방법 ① 호흡챔버(indirect respiratory chamber) 이용	100%	○ 장내발효 메탄발생량 측정 방법 ① 호흡챔버(indirect respiratory chamber) 이용	
	○ 다겹 보온커튼 유형 분류 및 유 형별 커튼의 설치 후 5, 7, 10년 보 온율 변화 산정		○ 다겹 보온커튼 유형 분류 및 유 형별 커튼의 설치 후 5, 7, 10년 보온율 변화 산정	
	(1 세부: 용역) 경종부 및 축산부 문의 배출 계수 현황 분석과 개 발 및 검증 가이드 라 인 개발	○ 배출원별 국가 인벤토리에서의 배 출계수 적용 현황 파악	100%	○ 배출원별 국가 인벤토리에서의 배 출계수 적용 현황 파악
		○ 감축제도에서 국가 배출계수 이용 실태 분석		○ 감축제도에서 국가 배출계수 이용 실태 분석
(위탁) 온실가스 감축사업 활용을 위 한 경종부 문에서의 배출계수 개발 및 감 축량 산정	○ 감축제도에서 국가 인벤토리 배 출계수를 일관성있게 활용할 수 있도 록 지속적인 현황관리 방안 제안	100%	○ 감축제도에서 국가 인벤토리 배 출계수를 일관성있게 활용할 수 있도록 지속적인 현황관리 방안 제안	
	○본 연구 각 연구진의 배출계수 개 발계획의 타당성평가, 개발방향 자 문		○본 연구 각 연구진의 배출계수 개발 계획의 타당성평가, 개발방향 자문	
(위탁) 온실가스 감축사업 활용을 위 한 경종부 문에서의 배출계수 개발 및 감 축량 산정	○.본 연구를 통해 개발되는 배출계 수 개발 접근방식 분석을 통한 개발, 검증가이드라인 표준화	100%	○.본 연구를 통해 개발되는 배출계 수 개발 접근방식 분석을 통한 개발, 검 증가이드라인 표준화	
	○. 개발 배출계수에 대한 불확도 평 가 계획 수립		○. 개발 배출계수에 대한 불확도 평 가 계획 수립	
(위탁) 온실가스 감축사업 활용을 위 한 경종부 문에서의 배출계수 개발 및 감 축량 산정	○ 저탄소비료 생산 공정에서 온실가 스 배출계수 개발	100%	○ 저탄소비료 생산 공정에서 온실가스 배출계수 개발	
	- 저탄소비료'의 상기 각 접근법에 대한 적절성 평가 및 적용가능한 정 의 도출		- 저탄소비료'의 상기 각 접근법에 대한 적절성 평가 및 적용가능한 정 의 도출	
(위탁) 온실가스 감축사업 활용을 위 한 경종부 문에서의 배출계수 개발 및 감 축량 산정	- 저탄소비료의 정의에 따른 국내의 적용 가능한 저탄소비료의 유형 확 인	100%	- 저탄소비료의 정의에 따른 국내의 적용 가능한 저탄소비료의 유형 확인	
	- 저탄소비료의 유형 별, 대표군 선 정		- 저탄소비료의 유형 별, 대표군 선 정	
(위탁) 온실가스 감축사업 활용을 위 한 경종부 문에서의 배출계수 개발 및 감 축량 산정	○ 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출 감축량 산정	100%	○ 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출 감축량 산정	

구분	연구개발의 목표	달성도	연구개발의 내용
2차년도 (2016)	감축제도의 배출계수 현황 분석 및 배출계수 개발계획 수립	100%	<ul style="list-style-type: none"> ○ 감축제도에서 직접적으로 개발 관리할 수 있는 감축계수에 대한 개발계획 수립 ○ 개발 필요 계수, 개발 시급성을 고려한 개발기한, 개발계수 관리방안(개정년한, 관리불확도 등) ○ 감축제도 운영기관인 농업실용화재단의 의견조회를 통해 개발계획의 타당성 확인
	온실가스 감축사업 활용을 위한 경종 부문에서의 배출계수개발 및 감축량 산정	100%	<ul style="list-style-type: none"> ○ 논과 밭에서 저탄소비료 시용에 따른 시비량 저감효과 및 온실가스 배출 감축량 산정 ○ 저탄소비료의 온실가스 배출계수 개발 및 국가고유배출계수로 등록
	다겹 보온커튼의 보온율(설치 후 5, 7, 10년)산정	50%	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다겹 보온커튼의 내구연수 기준 마련
	축산부문 감축사업 활용을 위한 배출계수 개발 및 검증가이드라인 개발	100%	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양질조사료 급여 반추가축 장내발효 메탄발생 감축량 산정 및 유지 기간 설정 ○ 장내발효로 인한 메탄발생량과 가축 분뇨 메탄발생량의 상관성 분석 ○ 장내발효 메탄발생량 측정 방법 <ul style="list-style-type: none"> ① 호흡챔버(indirect respiratory chamber) 이용 ② Lazer methane detector
	경종, 축산부문 배출계수 개발, 검증가이드라인 개발 (불확도 평가 포함)	100%	<ul style="list-style-type: none"> ○ 개발 배출계수에 대한 불확도 평가 ○ 경종, 축산부문 배출계수의 개발 특성 분석(샘플링계획, 시험분석 등) ○ 경종, 축산부문 배출계수 개발·검증 가이드라인 개발

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
논문(SCI) 건수	20	50	10
논문(비 SCI) 건수	20	33	6.6
학술발표 건수	20	100	20
정책활용, 홍보 건수	5	100	5
인력양성 : 석사학위 배출 인원, 활용인원수	5	100	5
경중(저탄소비료) 및 축산(장내발효 과정)분야의 온실가스 국가고유배출계수 개발 여부	10	100	10
경중(저탄소비료 생산 및 살포) 및 축산(장내발효)분야의 온실가스 배출량에 대한 국내외 데이터 정리 여부	10	100	10
배출계수 개발 및 검증 가이드라인 개발 여부	10	100	10
합계	100점		76.6 점

제2절. 관련분야 기여도

국내의 대표적인 자발적 감축제도 중 하나인 「농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업」을 통해 정부는 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여함과 동시에 환경친화적 농업환경을 조성하고, 한편 농업인은 온실가스 감축실적 만큼 추가 소득을 획득하고 에너지비용을 절감할 수 있다. 더욱이 산업부문 감축사업과 비교할 때, 농업부문 특성상 사업자 입장에서는 모니터링 등 사업 관리가 쉽지 않고 감축제도 운영기관 입장에서도 타당성 평가 등에 있어 예상치 못하게 발생하는 농업부문 이슈를 해결해나가면서도 이 제도를 안정적으로 안착시킨 데에 큰 의미가 있다. 주요 농업 선진국인 미국, 캐나다 등을 제외하면 농업부문 감축제도를 이 정도 수준으로 정착시킨 국가는 거의 없다. 한편 농업부문 감축사업을 추진하는데 있어 농업에너지이용효율화 사업 등 정부지원사업에 연계한 사업들이 있고 농업인의 자부담 만으로는 사업 운영이 쉽지 않다는 지적도 있다. 그러나 이 같은 지원사업은 농업부문 감축사업 지원을 위해 별도로 신설된 지원사업이 아니고, 농업·농촌의 금융적 취약성을 고려하여 원래 수행되어온 지원사업인 만큼 오히려 신규 재원이 아닌 기존 정부 재원을 활용해 온실가스 감축사업을 활성화되도록 유도한 것은 탁월한 정책적 결정이었다고 판단된다. 더욱이 이같은 농업·농촌의 금융적 취약성과 비에너지부문 등 농업부문의 어려운 여건을 전제함에도 불구하고, 2016년 부터는 자발적 감축사업을 시장거래형 즉 외부감축사업으로 전환하기 위한 과정이 진행되고 있다.

이 시점에서 산업부문 등 타 부문의 감축사업과 비교하여, 농업부문 감축사업의 객관성 및 신뢰성은 더욱 중요한 의미가 있다. 감축제도의 신뢰성은 두가지 측면 첫째 거버넌스 즉 운영기관의 운영체제 및 운영방식에 대한 신뢰성과 둘째 감축사업 방법론에 대한 신뢰성으로 요

약된다. 이 중 감축사업 방법론의 신뢰성이란 주로 감축량 산정방식의 신뢰성에서 비롯된다. 따라서 국내 특성이 반영되지 않은 IPCC 배출계수에 비해 상대적으로 국내 여건을 반영한 배출계수의 개발이 지속되어야 한다. 본 연구의 감축사업 배출계수 개발과 이를 위한 불확도 평가 및 가이드라인 개발은 이 관점에서 국내 농업부문 감축제도의 신뢰성 제고를 위한 토대를 마련한 것이다. 이로부터 향후 추가적인 농업부문 감축사업 배출계수, 나아가 국가 배출계수 개발연구가 지속되어야 하며 추가적인 연구를 수행함에 있어 본 연구가 중요한 토대가 되기를 기대한다.

제5장. 연구결과의 활용계획

제1절. 경종과 축산부문의 연구결과

(축산부문) 축산부문의 경우, 당초 감축효과가 있을 것으로 예상했던, TMR, 린시드, 양질조 사료 모두 감축효과가 없는 것으로 실험결과가 도출된 만큼 이 결과를 감축사업에 활용하기는 어려울것으로 판단됨. 또한 TMR(혼합급여) 대비 분리급여가 오히려 감축효과가 있는 것으로 나왔지만 TMR을 권장하고있는 농정책 흐름상 분리급여를 감축기술로 보고 신규방법론을 고려하는 것도 어려울 것으로 보임.

- 그러나 (향후 활용방안 관점에서) 이 연구결과를 향후 다른 연구자가 활용하도록 토대를 마련할 필요는 있음. 예를 들어, <본 연구의 시사점 및 향후 관련 연구를 위한 제언>의 형식으로 본 연구에서 예상과 결과가 다르게 나온 이유에 대한 검토 및 추정, 그리고 향후 다른 연구자가 유사 연구를 수행할시 주의해야할 점 또는 실험계획시 고려해야할 점 등을, 먼저 연구를 수행한 선행연구자의 관점에서 제시한다면, 이로부터 본 연구의 활용가능성을 높일 수 있을 것으로 판단됨.

(경종부문) 본 연구에서 도출된 완효성비료 배출계수의 경우, 향후 완효성비료 방법론 개정시 심의위원회에 상정할 수 있음.

- 기존 완효성비료 방법론에서, 베이스라인 배출량 산정시 논부문국가배출계수를 사용함. 그러나 사업 배출량 산정시에는 완효성비료 시비로 인한 배출계수가 없었기 때문에, 비료시비량에 질소함유율을 곱한 값과 베이스라인 배출량 산정에 활용된 국가배출계수 값을 활용해 사업 배출량을 산정했음. 본 연구결과에서 완효성비료 시비로 인한 배출량을 직접 나타내는 배출계수가 개발됨에 따라, 방법론 개정시 적용 가능할 것으로 판단됨. 단 방법론심의위원회에 상정하여 심의회의 검토 및 승인을 득해야 함.

제2절. 추가로 개발이 필요한 감축사업 배출계수의 선정

본 연구에서 배출계수의 추가 개발 필요성은 크게 두 가지 기준에서 검토되었다. 첫째는 배출계수의 신뢰도와 적합성에 따라 개발 필요성을 판단하는 것이다. 현재 농림축산식품부가 제도정착과 활성화를 위하여 농가의 감축실적을 임시로 구매하고 있으며 최근 제도 안착과 함께 향후 시장거래형으로 전환을 유도하고 있는 것을 고려하면 감축실적이 정확하게 평가되고 신뢰도가 보장되어야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 감축량 산정에 활용되는 배출계수의 신뢰도와 적합성이 확보되어야 한다. 두 번째 기준은 감축방법론의 확대가능성이다. 향후 농업부문 감축사업이 확대됨에 따라 적용범위는 두 가지 관점에서 확대될 것이다. 우선 기존 방법론 중 사업이 확대되는 경우와 신규 방법론 개발을 통해 신규사업을 발굴하는 경우가 그것이다. 두 경우 모두 방법론 상에서 배출계수를 필요로 하며, 사업 확대 가능성이 높은 사업의 배출계수 개발을 우선 고려할 수 있다. 이와 함께 사업 확대 가능성이 상대적으로 높지 않더라도, 배

출계수가 없어서 신규로 방법론화 하지 못하는 경우에는 우선 개발대상이 될 수 있다. 이같은 우선순위에 대한 판단이 필요하며, 본 연구에서 수행된 기존 감축사업 배출계수 현황 분석 및 개발계획을 참고하여, 추가로 개발이 필요한 감축사업 배출계수를 선정하는 데 본 연구 결과를 활용할 수 있다.

제3절. 개발된 배출계수의 적용가능성 검토 후 감축사업에서 활용

본 연구를 통해 경종 및 축산 부문의 배출계수가 도출되었으나 연구결과 산출된 배출계수가 감축사업에서 바로 활용될 수 있는 것은 아니다. 기존 감축사업의 방법론에서 적용되던 배출계수 또는 디폴트값을 활용한 경우와 비교하여 신규개발된 배출계수의 적절성 여부가 검토되어야 한다. 기존에 개발된 방법론에 새로 도출된 배출계수를 활용하기 위해서는 방법론 개정 심의위원회에 상정해 위원회의 승인을 득하는 과정도 필요하다. 한편 기존에 사용되던 배출계수 또는 IPCC 배출계수와 비교하여 신규 개발된 배출계수의 값 차이가 지나치게 크다면, 이는 감축량 산정시 감축량의 과대 또는 과소 산정으로 귀결될 우려가 있다. 반면 허용할 수 있는 범위 내에 신규 배출계수가 위치하고 있다면, 우리 농업여건을 직접 반영한 데이터로부터 도출된 만큼 IPCC 배출계수에 비해 신규 배출계수의 가치는 더 높아질 것이다. 한편, 연구결과 도출된 배출계수의 값이 감축사업 방법론에 적용하기에 적절치 않은 수준이라 하더라도 그 연구결과가 무의미한 것은 아니다. 향후 유사 연구를 진행하는 연구자에게 중요한 선행연구로 고려될 것이기 때문이다. 이같은 경우 선행연구로서의 가치가 더 높아지기 위해서는, 도출된 배출계수의 값이 너무 높거나 낮은 경우 그 이유에 대한 검토 및 고찰이 필요하다.

제4절. 추가적인 감축사업 배출계수 또는 국가배출계수 개발의 토대

본 연구에서는 감축사업 배출계수 개발을 전제하여 약 2년의 기간 동안 경종 및 축산부문의 배출계수 개발 연구가 수행되었다. 이와 비교하여 국가배출계수의 경우 상대적으로 더 엄밀한 연구결과 도출을 위해 3년 이상의 데이터 확보를 요구하고 있다. 따라서 본 연구결과 도출된 배출계수를 직접 국가배출계수 등록을 위해 제안할 수는 없지만, 향후 동일하거나 유사한 분야의 경종, 축산부문 국가배출계수 연구 수행시 본 연구에서 축적된 2년간의 데이터는 중요한 선행연구 가치를 갖게 될 것으로 예상된다.

제5절. 배출계수 개발 연구시 가이드라인 활용

농업 부문 감축사업을 통해 농가가 감축한 온실가스의 양에 대한 신뢰도를 확보하기 위해서는 정확한 불확도 평가가 필요하다. 불확도는 산정된 온실가스 배출량이 얼마나 신뢰할만한 값인지를 정량적으로 나타내는 지표이다. 이같은 관점에서 불확도 평가를 통해 다른 배출량과 불확도 크기를 비교하고, 새로운 방법론이 적용되었을 경우 이전의 방법론과 배출량 산정의 정

확도를 비교할 수 있다. 따라서 불확도 평가는 온실가스 배출량 산정의 신뢰도를 높이기 위한 첫 단계이다.

그런데 불확도를 보는 관점은 두 가지로 구분할 수 있다. 요약하면 첫째 불확도 산정 과정 자체에 가치부여를 하는 관점과 둘째 불확도 평가 결과 도출된 불확도 값의 크기에 주목하는 관점이 그것이다. 이 관점의 차이로 인해 본 연구에서도 불확도 산정의 방향을 설정하기 위해 많은 관련 연구자와의 회의 및 세미나를 실시하였다. 그 결과로부터 전자의 관점에 더 무게를 두었다. 그 이유는 주로 화석연료를 사용하는 산업부문의 배출계수의 경우에는, 활동자료를 계측하는 단위 및 기준이 비교적 표준화되어있고, 에너지부문의 특성 상 사용된 연료의 양 등 계측이 용이하다. 그러나 농업 부문의 경우, 경종이나 축산부문 모두 날씨 및 기후, 기타 요인의 변화에 매우 민감하다. 예를 들어 농작물의 경우 강우량이나 기온변화에 작물의 생장이 영향받고 이와 함께 비료의 흡수량 및 유출량에 큰 변동성이 발생한다. 축산부문의 경우에도, 날씨나 기온에 따라 가축의 사료섭취량, 대사량이 큰 영향을 받는다. 이같은 특성상 농업부문의 활동자료 뿐만아니라 배출계수 산정에 활용되는 데이터 자체가 높은 변동성을 띄고 있다. 그리고 이는 농업부문 배출계수의 불확도 값이 매우 커지는 것으로 반영된다.

따라서, 배출계수 불확도의 크기를 상호 비교하는 분석은 사실상 별다른 시사점을 제시해 주지 못한다. 대신 배출계수 개발 연구과정에 주목하여, 데이터 생성, 산출, 계산 등 전 과정에 있어서 관리상 불확도를 높이거나 낮출 수 있는 요인들을 식별하여 향후 배출계수 개발 연구자에게 연구관리지침을 제공하는 것이 훨씬 더 본 연구결과의 활용성이 높을 것으로 판단하였다. 이같은 맥락에서 본 연구의 배출계수 개발 가이드라인은 향후 농업부문 배출계수 개발을 수행하는 연구자들에게, 연구 과정의 관리를 통해 배출계수의 불확도를 낮추고 결과적으로 배출계수의 품질을 높일 것으로 기대한다.

제6장. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

- AEA, 2010, UK Greenhouse Gas Inventory; Annual Report for submission under the Framework Convention on Climate Change.
- Antal, M.J., Croiset, E., Dai, X., DeAlmeida, C., Mok, W.S.L., Norberg, N., Richard, J.-R., Al Majthoub, M., 1996. High-yield biomass charcoal. *Energy Fuels* 10, 652-658.
- Australian Greenhouse Office. 2006. National Inventory Report 2004. Vol. 1. Australian Greenhouse Office. Canberra.
- Badr, O. and S. D. Probert. 1992. Nitrous oxide in the earth's atmosphere. *Appl. Energy*. 41:177-200.
- Bob Rees, Bruce Ball, Kairsty Topp, Paul Hallett and Valentini Pappa, 2011, Measurement and modelling of greenhouse gas emissions in agricultural systems, Agriculture & Climate Change workshop. Honolulu.
- Bouwman, A.F. 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. p. 61-127. In; A.F. Bouwman (ed.) *Soils and the greenhouse affect*. John Wiley and Sons. New York.
- Bouwman, A.F. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *nutrient Cycling in Agroecosystems*. 46(1):53-70.
- Brussaard, L., de Ruiter, P.C., Brown, G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 233-244.
- Cai, Z.C., H. Tsuruta and K. Minami, 2000, Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors. *J. of Geo. Res.* 105(D13), 17231-17242.
- Denmead, O.T. 1979. Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Soc. of America J.* 43:89-95.
- Dobbie, K.E. and K.A. Smith. 2003. Nitro oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain : the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology*. 9:204-218.
- Dowdell, R.J., J.R. Buford, and R. Cress. 1979. Loss of nitrous oxide dissolved in drainage water from agricultural land, *Nature*, 278, 342-343.
- Hiscock, K.M., A.S. Bateman, I.H. Muhlherr, T. Fukada, and P.F. Dennis. 2003. Indirect emissions of nitrous oxide from regional aquifers in the United Kingdom. *Environ. Sci. Technol.* 15: 37(16): 3507-12.
- Hua, X., X. Guangxi, Z.C. Cai, H. Tsuruta. 1997. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 49(1-3):23-28.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1996., Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. Revised guidelines for national greenhouses gas inventories; Reference manual (volume 3) pp 4. 109.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000, Emissions Scenarios 2000, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001, Climate Change 2001: The Scientific Basis, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 IPCC Guidelines(GL) for National Greenhouse Gas, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use. Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds.) Hayama, Japan, 682p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Jeong H.C., G.Y. Kim, S.B. Lee, J.S. IEE, J.H. Lee, and K.H. So. 2012. Evaluation of Greenhouse Gas Emissions in Cropland Sector on Local Government Levels based on 2006 IPCC Guideline. Kor. J. Soil Sci. Fer. 45(5): 842-847.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, S.B. Lee and K.K. Kang. 2011. Assessment on Nitrous oxide (N₂O) Emissions of Korea Agricultural Soils in 2009. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(6):1207-1213.
- Klein, C.A.M., R.R. Sherlock, K.C. Cameron and T.J. Weerden .2001. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand - a review of current knowledge and directions for future research. J. of The Royal Soc. of New Zealand 31:543-574.
- K. Suh, S. Suh, 2010, Economic and Environmental Implications of Corn Stover Densification Options for Biofuel in Minesota, Transactions of the ASABE, 54(1): 229-238.
- K. Suh, S. Suh, B. Walseth, J. Bae, R. Barker, 2011, Optimal Corn Stover Logistic for Biofuel Production: A Case in Minnesota A, Transaction of the ASABE, 54(1): 229-238.
- Measurement, Reporting, and Verification 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- Ministry of the Environment, Japan Greenhouse Gas Inventory Office of Japan(GIO), CGER, NIES, 2010, National greenhouse Gas Inventory Report of Japan.
- Moiser, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger, and O. van Cleemput. 1998. Closing the global N₂O budget: nitro oxide emissionf through the agricultural nitrogen cycle. Nutrient

Cycling in Agroecosystems 52:225–248.

- Mosier, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzingerand, and O. Van Cleemput. 1998b. Closing the global N₂O budget: Nitrous Oxide emissions through the agricultural Nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225–248.
- Nakajima, Y. 2005. Elucidation of the mechanism of indirect emission of greenhouse gases associated with runoff of nutrient solute. The meeting of Japan–Korea cooperative research project on water quality conservation in gro–ecosystem and assessment of risk to the environment., 52.
- Netherlands Environmental Assessment Agency. 2006. Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990–2004: National Inventory Report 2006. Netherlands Environmental Assessment Agency. Bilthoven.
- Parton, W.J., A.R. Mosier, D.O. Ojima, D.W. Valentine, D.S. Schimel, K. Weier, and A.E. Kulmala. 1996. Generalized model for N^f and N^o production from nitrification and denitrification. *Global Biochem. Cycles*. 10:401–412.
- Roh, K.A., M.K. Kim, B.M. Lee, N.J. Lee, M.C. Seo, and M.H. Koh. 2005. Assessment of nitrogen impact on watershed by rice cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 24(3):270–279.
- Smith, K.A., I.P. McTaggart and H. Tsuruta. 1997. Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use and Management*. 13:296–304.
- Swedish Environmental Protection Agency. 2006. Sweden’s National Inventory Report 2006. Swedish Environmental Protection Agency. Bromma.
- Tsuruta, H., K. Kanda and T. Hirose. 1997. Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 49:51–58.
- United States Department of Agriculture, U.S. Agriculture and Forestry Greenhouse Gas Inventory, 27 August 2008
(http://www.usda.gov/oce/global_change/inventory_1990_2001/USDA%20GHG%20Inventory%20Chapter%201.pdf), Accessed 12, July 2012.
- United States Department of Agriculture, 2010, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks; 1990–2008.
- Yun, S.G. 2004. Monitoring project on agri–environment quality in Korea. (In Korea)

제7장. 연구개발결과의 보안등급

해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적

해당사항 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국 가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/인 용횟수 등)
1	논문	Global warming as affected by incorporation of variably aged biomass of hairy vetch for rice cultivation	경상대학교 농업과학연구원	교신 저자	Soil Research	1.611	2016.04.14	단독	SCIE
2	논문	TMR과 조사료 농후사료 분리급여 방식의 홀스타인 거세우 메탄배출량 비교	서울대 국제농업 기술대학원	교신 저자	한국초지조 사료학회지		2016.06.01	단독	국내저널
3	구두 발표	Effects of Forage or Concentrate Feeding, Separately or as a TMR, on Ruminal Methane Emission, Fermentation Characteristics, and Total Tract Digestibi	서울대 국제농업 기술대학원	교신 저자	2016 Joint Annual Meeting (ASAS-ADS A-CSAS-W SASAS) 미국축산학회		2016.07.20	단독	국제학회
4	시책 건의	경종 및 축산 부문 배출계수 개발 가이드라인 활용성 검토 요청	한국 품질재단		농업기술실 용화재단		2017.03.30	단독	정부 출연기관
5	시책 건의	농업농촌 자발적 온실가스 감축사업- 논벼 비료 시용에 따른 아산화질소 배출계수 자료 구축	한국 품질재단		농업기술실 용화재단		2017.03.30	단독	정부 출연기관

제11장. 기타사항

해당사항 없음

제12장. 참고문헌

<축산 장내발효 부문 저탄소 사료>

1. 다양한 조사료 급여조건에서 한우 암소 경산우의 에너지분배 및 메탄배출량. 2014. 오영균, 김도형, 문상호, 박재현, 남인식, Arokiyaraj Selvaraj, 김경훈. 한국초지조사료학회. 34:283-287.
2. Aguerre, M.J., Wattiaux, M.A., Powell, J.M, Broderick, G.A. and Arndt, C. 2011. Effect of forage-to-concentrate ratio in dairy cow diets on emission of methane, carbon dioxide, and ammonia, lactation performance, and manure excretion. *Journal of Dairy Science*. 94:3081-3093.
3. Caplis, J., Keane, M.G., Moloney, A. P. and O' Mara, F.P. 2005. Effects of supplementary concentrate level with grass silage, and separate or total mixed ration feeding, on performance and carcass traits of finishing steers. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*. 44:27-43.
4. Cho, Y.M., Kwon, E.G., Chang S.S., Kim, T.I., Park, B.K., Kang S.W. and Paek, B.H. 2008. Effects of total mixed rations on growth performance and carcass characteristics of Hanwoo steers. *Journal of animal Science and Technology (Kor.)*. 50:363-372.
5. IPCC (Intergovernmental panel on climate change). 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Workbook. Module 4 Agriculture.
6. IPCC (Intergovernmental panel on climate change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. vol. 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use.
7. Gordon F.J., Patterson D.C., Uan T., Porter M.G., Mayne C.S. and Unsworth E.F. 1995. The enfluence of genetic index for milk production on the response to complete diet feeding an the utilization of energy and nitrogen. *Animal Science* 61: 199-210.
8. Government of Alberta, 2010. Quantification protocol for emission reductions from dairy cattle. <http://aep.alberta.ca/climate-change/guidelines-legislation/specified-gas-emitters-regulation/documents/ProtocolEmissionReductionCattle-Jan2010.pdf>
9. Hales, K.E., Cole, N.A. and MacDonald, J.C. 2012. Effects of corn processing method and dietary inclusion of wet distillers grains with solubles on energy metabolism, carbon nitrogen balance, and methane emissions of cattle. *Journal of Animal Science*. 90:3174-3185.
10. Holter, J.B., Urban, W.E., Hayes, H.H. and Davis, J.A. 1977. Utilization of diet components fed blended or separately to lactating cows. *Journal of Animal Science*. 60:1288-1293.
11. Hristove, A.N., Oh, J., Firkins, L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, A.T., Yang. W., Lee, C., Gerber, P.J., Henderson, B. and Tricarico, J.M. 2013. Special Topics-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*.

91:5045-5069.

12. Johnson, K.A. and Johnson, D.E. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 73:2483-2492.
13. Knapp, J.R., Laur, G.L., Vadas, P.A., Weiss, W.P. and Tricarico, J. M. 2014. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*. 97:3231-3261.
14. Kurihara, M., Magner, T., Hunter, R.A. and McCrabb, G.J. 1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*. 81:227-234.
15. RDA, 2012. Korean feeding standard for Hanwoo. pp 26-27.
16. RDA, 2013. Final Report on determination of methane emission factor from enteric fermentation of large ruminant animal.
17. Seol, Y.J. Kim, K.H., Baek, Y.C., Lee, S.C., Ok, J.W., Lee, K.Y., Hong, S.K., Park, K.H., Choi, C.W., Lee, S.S. and Oh, Y.K. 2011. Comparison of methane production in Korean native cattle (Hanwoo) fed different grain sources. *Journal of Animal Science & Technology*. 53:161-169.
18. Seol, Y.J. Kim, K.H., Baek, Y.C., Lee, S.C., Ok, J.W., Lee, K.Y., Choi, C.W., Lee, S.S. and Oh, Y.K. 2012. Effect of grain sources on the ruminal methane production on Hanwoo steers. *Journal of Animal Science & Technology*. 54:15-22.
19. Sutton, J.D., Knight, R., McAllan, A.B., Smith, R.H., 1983. Digestion and synthesis in the rumen of sheep given diets supplemented with free and protected oils. *Br. J. Nutr.* 49:419-432
20. Thak, T.Y., Kang, T.H. and Kim, K.S. 1983. Studies on maintenance requirements of energy and protein for Korean native cows by metabolism trials. *Korean Journal of Animal Nutrition & Feedstuffs*. 25:117-137.
21. The Republic of Korea, 2011. Korea's Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. pp. 34-35, 66
22. 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(제3차년도). 2006. 에너지경제연구원

<경종부문 저탄소 사료>

1. Ali, M.A., Lee, C.H., Kim, P.J., 2008. Effects of silicate fertilizer on reducing methane emission during rice cultivation. *Biol. Fertil. Soils* 44, 597-604.
2. Curran, Mary Ann. 2006. LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE.
3. European Parliament Council, 2000. Directive 98/69/EC Relating to Measures to be Taken Against Air Pollution by Emissions from Motor Vehicles and Amending Council Directive 70/220/EEC. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:EN:PDF>.
4. Garcia, J.L., Patel, B.K.C., Ollivier. O. 2000. Taxonomic, phylogenetic and ecological

- diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe* 6, 205-226.
5. Guinée, J.B., 2002. In: Tukker, A., et al. (Eds.), *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers, New York.
 6. Haque, M. M., Kim, S. Y., Pramanik, P., Kim, G. Y., Kim, P. J. 2013. Optimum application level of winter cover crop biomass as green manure under considering methane emission and rice productivity in paddy soil. *Biol. Fertil. Soils* 49(4), 487-493.
 7. Institute of Environmental Sciences, 2010. CML-IA Characterisation Factors. Leiden, U (Dutch) <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html#getting-and-using-the-database>.
 8. IPCC Climate Change, 2007. *Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2007.
 9. LBP-GaBi, 2010. Process data set: Truck; diesel drive, Euro4, cargo; technology mix; more than 32t gross weight/24,7t payload capacity. http://gabi-dataset-documentation.gabi-software.com/xml_data/processes/80437d02-bdf8-4968-8f69-539e5490ac80_05.00.000.xml
 10. Minami, K., S. Fukushi, 1984. Methods for measuring n₂O flux from water surface and n₂O dissolved in water from agricultural land. *Soil Science and Plant Nutrition* 30(4), 495-502.
 11. Robertson, G. P., Paul, E. A., Harwood, R. R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289(5486), 1922-1925.
 12. Rolston D.E., 1986. Gas flux, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Second ed.* ASA and SSSA, Dadison, WI. 1103-1119 (agron Monogr. 9).
 13. SAS Institute, 2003. *System for Windows Release 9.1*. SAS Institute, Cary, NC.
 14. Singh, A., Singh, R.M., Upadhyay, S.N., Joshi, C.G., Tripathi, A.K., Dubey. S.K., 2012. Community structure of methanogenic archaea and methane production associated with compost-treated tropical rice-paddy soil. *FEMS Microbiol Ecol* 82, 118-134.
 15. Takai, Y., 1961. Reduction and microbial metabolism in paddy soils (3). *Nogyo Gijutsu* 19, 122-126
 16. West, T.O. and Marland, G., 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1), pp.217-232. Vancouver.

<경종 및 축산부문 배출계수 검증 가이드라인 개발>

1. 농촌진흥청. (2014). 농업 부문 국가배출계수 품질관리 연구
2. 농업기술실용화재단. (2011). 농림수산물분야 탄소상쇄 (Carbon Offset) 사업 검·인증체계 및 사업화 방법론 구축방안 연구.

3. 온실가스종합정보센터. (2012). 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침.
4. 온실가스종합정보센터 외. (2014). 국가 배출·흡수계수 개발·검증 1차 계획(2015-2019).
5. 온실가스종합정보센터 외. (2014). 2006 IPCC GL 국내적용을 위한 계획
6. 온실가스종합정보센터. (2014). 국가온실가스인벤토리보고서
7. 2015년 승인 국가배출계수 목록(2015)
8. 이동근. (2015). 농경지 부문 탄소 축적량 산정 개선방안 연구
9. 진병복. (2011). 국가 온실가스 인벤토리의 2006 IPCC 지침 적용에 대한 小考. 기후변화와 녹색성장, 2:9-14.
10. IPCC. (1996). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
11. IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
12. IPCC. (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (GPG 2000).
13. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)[측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원] JCGM 106:2012
14. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) JCGM 104:2009
15. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) JCGM 101:2008 Propagation of distributions using a Monte Carlo method
16. ISO VIM JCGM 200:2012 (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)
17. Verburg, P. H., van Bodegom, P. M., van der Gon, H. A. D., Bergsma, A., & van Breemen, N. (2006). Upscaling regional emissions of greenhouse gases from rice cultivation: methods and sources of uncertainty. In *Plants and Climate Change* (pp. 89-108). Springer Netherlands.
18. Stehfest, E., & Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(3), 207-228.
19. Monni, S., Perälä, P., & Regina, K. (2007). Uncertainty in agricultural CH₄ and N₂O emissions from Finland—possibilities to increase accuracy in emission estimates. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(4), 545-571.