



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士學位論文

한우 분뇨의 메탄 배출계수 개발

**Developing methane emission factors for the Korean
cattle (Hanwoo) manure**

亞洲大學校 大學院

環境工學科

金潤河

한우 분뇨의 메탄 배출계수 개발

Developing methane emission factors for the
Korean cattle (Hanwoo) manure

指導教授 李 健 模

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2018年 2月

亞 洲 大 學 校 大 學 院

環 境 工 學 科

金 潤 河

金潤河의 工學博士學位 論文을 認准함.

審查委員長 金 淳 泰 (印)

審查委員 鄭 承 湔 (印)

審查委員 李 貴 浩 (印)

審查委員 朴 弼 柱 (印)

審查委員 李 健 模 (印)

亞 洲 大 學 校 大 學 院

2018年 1月 9日

감사의 글

먼저 제가 배움의 길에 들어설 수 있도록 이정표가 되어주시고, 끊임없는 학문에 대한 열정과 지도로 이끌어주신 이진모 교수님께 감사의 말씀 올립니다. 배풀어주신 가르침과 사랑을 거울삼아 언제나 정진과 노력을 잊지 않고 나아가겠습니다.

심사를 통해 논문의 부족함을 채울 수 있도록 격려와 조언을 아끼지 않으신 김순태 교수님과, 논문의 표현 등에 대해 세심하게 지도해주신 정승호 교수님, 다양한 측면에서 바라볼 수 있도록 아낌없이 조언해주신 이귀호 소장님, 논문의 흐름을 바로잡고 더 깊이 생각할 수 있도록 이끌어주신 박필주 박사님께 깊이 감사드립니다. 제게 많은 가르침을 주신 조순행 교수님, 홍민선 교수님, 신귀암 교수님, 최권영 교수님, 강태선 교수님께도 감사의 말씀 올립니다.

아주대학교 제품환경기술연구실의 선배님들과 후배님들께 감사드립니다.

특히 동고동락한 이민혁 님, 이주영 님, 이종석 님, 허영채 님께 사랑과 감사의 말씀 전합니다. 또한 인턴 때부터 지금에 이르기까지 연구실 생활을 함께 하며 많은 것을 알려주신 백춘열 박사님, 천윤영 박사님, 박유성 박사님, 최용신 님, 이진호 님, 김선욱 님, 김성종 님, 지은숙 님, 이상혁 님, 권영경 님, 노훈 님, 이경림 님, 이주희 님, 김태범 님, 김지혜 님, 정혜련 님, 박준하 님께도 감사의 말씀 드립니다.

힘들고 지쳤을 때, 찾아와 다시 움직일 수 있는 원동력이 되어주신 연성모 대표님, 정인태 박사님, 김진용 대표님, 최병희 님, 최요한 박사님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

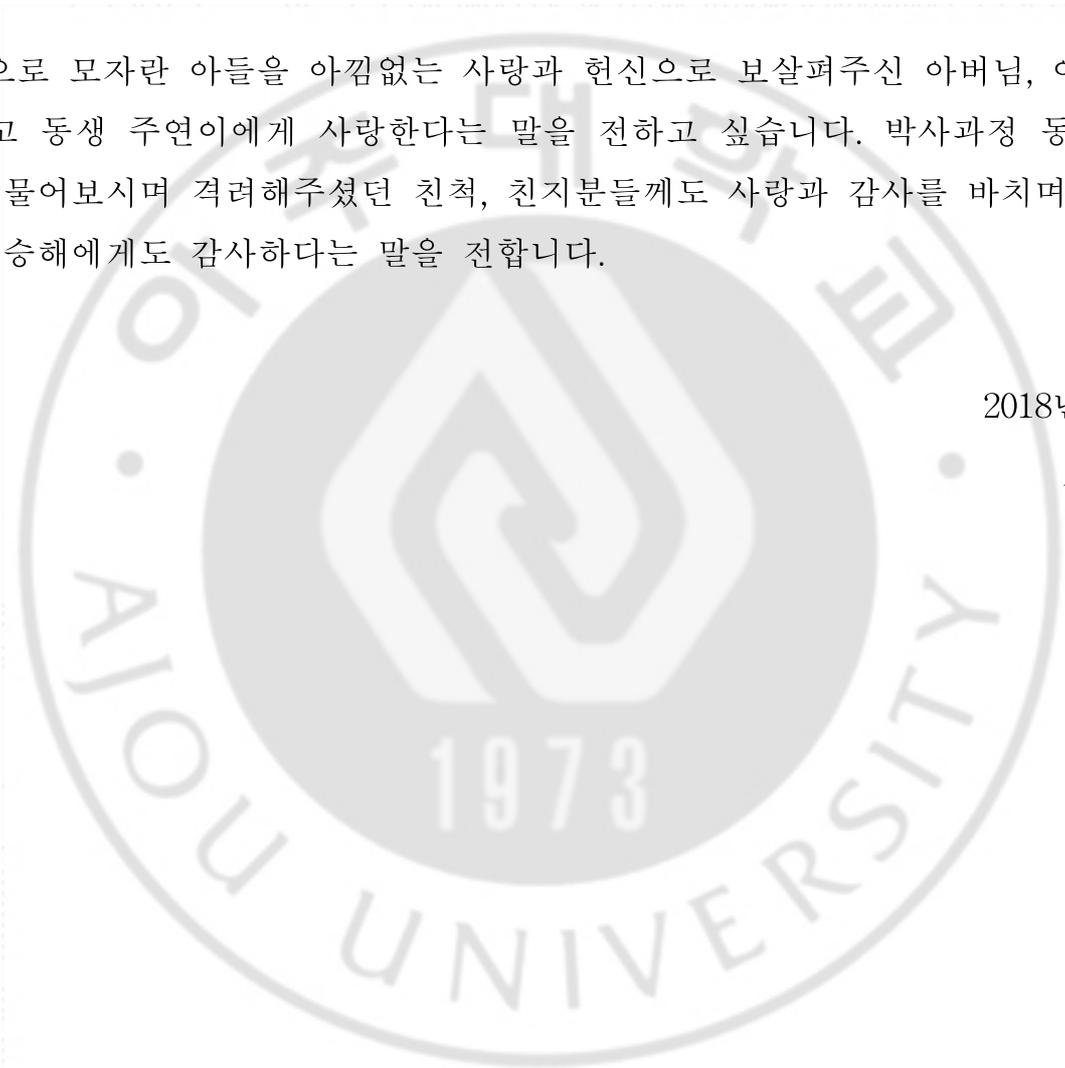
대학원 생활 동안 주변에서 저를 봐주셨던 김범석 님, 박진석 님, 이황 님, 이종민 님, 김은혜 님, 유승희 님께도 감사드립니다.

서울 올라와 고생하며, 서로 위로했던 정희와 규식이, 그리고 대학생활 동안 많은 것을 가르쳐주며, 함께 울고 웃었던 정수, 창한, 윤수 그리고 대학원에서 재회하게 된 천탁이, 그리고 먼거리에서 안부를 교환했던 성길이와 준호, 성주에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

끝으로 모자란 아들을 아낌없는 사랑과 헌신으로 보살펴주신 아버님, 어머님. 그리고 동생 주연이에게 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 박사과정 동안 안부를 물어보시며 격려해주셨던 친척, 친지분들께도 사랑과 감사를 바치며, 사랑하는 승해에게도 감사하다는 말을 전합니다.

2018년 1월,

김윤하



국문 요약

지구온난화와 기후변화의 주된 요인인 온실가스에 대해서는 많은 이들이 인지하고 있으며, 전세계적으로도 배출되는 온실가스를 감축하기 위한 노력이 진행되고 있다. 온실가스 배출량을 감축하고자 하는 흐름에 따라 국가적으로도 온실가스 배출량 산정과 감축을 위해 많은 연구와 노력이 필요한 상황이다.

온실가스 배출량이 산정되는 부문 중 하나인 가축분뇨에 대한 CH₄배출계수 산정에는 분뇨에서 배출되는 휘발성 고형물과 여기서 발생할 수 있는 CH₄의 양, 분뇨처리 시스템의 이용률과 시스템에서의 CH₄ 전환 계수 등과 같은 다양한 변수가 요구된다. 이에 대한 연구들은 대부분 장기간의 시간을 필요로 하기 때문에 CH₄ 배출계수 개발은 어려우며, 이런 개발이 어려운 배출계수에 대해 통계적 접근을 통해 문제점을 해소하고자 하였다.

이 연구의 목적은 시뮬레이션을 통한 통계적 접근을 통해 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발하는 것으로서, 이를 위해 배출계수를 구성하는 변수에 대한 데이터들이 수집되었다. 분뇨에서 배출되는 휘발성 고형물의 양 데이터를 위해 30개 한우 농가가 무작위로 선정되어 분뇨가 수집되어, 실험이 진행되었고, 한우 분뇨에서 배출될 수 있는 최대 CH₄ 발생량, 분뇨처리 시스템별 이용률, 분뇨처리 시스템에서의 CH₄ 전환 계수 데이터를 위해 한우 분뇨 관련 연구들이 조사되었으며, 이에 대한 데이터가 수집되었다. 수집된 데이터인 가축의 체중과 분뇨로부터 배출되는 휘발성 고형물 양에 대한 통계적 분석 결과, 배출계수는 성장 단계가 유사한 3개의 체중에 따른 분류별로 개발되어야 한다고 밝혀졌다. 몬테카를로 시뮬레이션과 Bootstrap 방법이 CH₄ 배출계수의 구간 추정에 적용되었으며, Bootstrap으로 추정된 배출계수가 몬테카를로 시뮬레이션으로 추정된 배출계수보다 이 더 작은 신뢰구간 너비와 불확도 값(U)를 보였다.

결론적으로, 이 연구에서는 시뮬레이션을 통한 통계적 접근을 통해, 체중에 따른 분류별로 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발하였다. 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수는 각각 [0.57, 1.37], [1.43, 3.36], [1.12, 2.72] kg CH₄/head-year이었으며, CH₄ 배출계수를 단일값이 아닌 구간으로 제시하였다.

목차

국문요약	i
List of Tables	v
List of Figures	vi
List of Abbreviations	vii
I. 서론	1
1.1 연구 배경	2
1.2 연구의 필요성	4
1.3 연구 목적	6
1.4 논문 구성	7
II. 문헌 연구	9
2.1 가축분뇨에서의 CH ₄	10
2.1.1 가축분뇨에서의 CH ₄ 발생	10
2.1.2 CH ₄ 생성 원리	10
2.2 IPCC 가이드라인	12
2.2.1 가축분뇨에서 발생하는 온실가스	12
2.2.2 산정 방법론	12
2.2.3 배출계수 선택	14
2.3 국내외 가축 분뇨 CH ₄ 배출계수 산정방법	21
2.3.1 국내 가축 분뇨 CH ₄ 배출계수 산정방법	21
2.3.2 해외 가축 분뇨 CH ₄ 배출계수 산정방법	23
2.4 한우 분뇨의 CH ₄ 배출계수 산정에서의 고려사항	30
2.4.1 기본 배출계수에 대한 이의 제기	30
2.4.2 가축의 체중에 따른 분류	31
2.5 확률밀도함수	33
2.5.1 정규 분포(Normal distribution)	34
2.5.2 로그 정규 분포(Log-normal distribution)	35
2.5.3 삼각형 분포(Triangular distribution)	36
2.5.4 균등 분포(Uniform distribution)	38
2.5.5 와이블 분포(Weibull distribution)	40
2.5.6 지수 분포(Exponential distribution)	42

2.5.7 포아송 분포(Poisson distribution).....	44
2.6 확률밀도함수의 검정	46
2.6.1 콜모고로프 스미르노프 검정(Kolmogorov-Smirnov Test).....	46
2.6.2 K-S Test의 순서.....	46
2.6.3 앤더슨 달링 검정(Anderson-Darling Test).....	47
2.6.4 A-D Test의 순서.....	47
2.6.5 카이 제곱 검정(Chi-squared test).....	48
2.6.6 Chi-squared Test의 순서.....	48
2.7 시뮬레이션 방법	49
2.7.1 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation).....	49
2.7.2 몬테카를로 시뮬레이션 절차.....	49
2.7.3 Bootstrap.....	51
2.7.4 Bootstrap 절차.....	52
2.8 ANOVA(Analysis of variance)	53
2.9 Tukey HSD(Honest Significant Difference)	54
Ⅲ. 연구 방법	55
3.1 한우 분뇨의 CH ₄ 배출계수 산정	56
3.1.1 분뇨에서 발생하는 CH ₄ 배출계수 산정식.....	56
3.1.2 CH ₄ 배출계수 산정시 세분류 기준.....	57
3.2 데이터 수집 및 분석	58
3.2.1 일간 휘발성 고형물 배설량(VS) 데이터.....	58
3.2.2 배설된 분뇨의 최대 CH ₄ 발생량(B ₀) 데이터.....	60
3.2.3 분뇨처리 시스템의 CH ₄ 전환 계수(MCF) 데이터.....	60
3.2.4 분뇨처리 시스템별 이용율(MS) 데이터.....	60
3.2.5 ANOVA 수행.....	61
3.2.6 Tukey HSD 수행.....	62
3.3 시뮬레이션을 통한 CH ₄ 배출계수 산정	63
3.3.1 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation).....	63
3.3.2 Bootstrap.....	65

IV. 연구 결과	67
4.1 한우 분뇨의 CH ₄ 배출계수 산정식의 데이터	68
4.1.1 일간 휘발성 고형물 배설량	68
4.1.2 ANOVA & Tukey	70
4.1.3 배설된 분뇨의 최대 CH ₄ 발생량	73
4.1.4 분뇨처리 시스템	74
4.2 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 산정	77
4.2.1 모수적 몬테카를로 시뮬레이션 결과	77
4.2.2 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션 결과	82
4.3 Bootstrap을 통한 산정	84
4.4 산정된 한우 분뇨의 CH ₄ 배출계수 간 비교	85
4.5 결과에 대한 고찰	92
4.5.1 체중 증가에 비례하지 않는 체중 분류별 CH ₄ 배출계수	92
4.5.2 분뇨처리 시스템 데이터의 분포 가정	93
4.5.3 해외 육우 분뇨 CH ₄ 배출계수와의 비교	95
V. 결론	97
VI. 향후 연구 방향	99
VII. 참고문헌	101
Abstract	110

List of Tables

Table 1. CH ₄ emission factor of cattle manure management by region and temperature (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)	15
Table 2. Other cattle characteristics (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008) ·	16
Table 3. CH ₄ conversion factor of manure management in cool region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)	18
Table 4. CH ₄ conversion factor of manure management in temperate region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)	19
Table 5. Manure management usage by region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)	20
Table 6. Comparison of beef cattle CH ₄ emission factors from IPCC guideline (IPCC, 1997) and Gonzalez-Avalos et al. (2001)	30
Table 7. The three body weight classes for CH ₄ emission factor of manure ·	57
Table 8. Average VS value by class	68
Table 9. Daily excreted VS data by class	69
Table 10. Result of ANOVA	70
Table 11. Result of Tukey HSD	72
Table 12. B ₀ data from the related studies	73
Table 13. Usage for types of manure management (통계청, 2015)	74
Table 14. Rearranged types of manure management	75
Table 15. MCF of the manure management system (IPCC, 2006; 환경부, 2008)	76
Table 16. Distribution of VS data	77
Table 17. CH ₄ emission factors by class (parametric MCS)	81
Table 18. CH ₄ emission factors by class (non-parametric MCS)	83
Table 19. CH ₄ emission factors by class (Bootstrap)	84
Table 20. Comparison of simulation results (class A)	86
Table 21. Comparison of simulation results (class B)	88
Table 22. Comparison of simulation results (class C)	90
Table 23. Comparison of CH ₄ emission factor by setting MCF, MS as constant and uniform distribution (parametric MCS)	94
Table 24. Assumed CH ₄ emission factor of New Zealand cattle manure	95
Table 25. Implied CH ₄ emission factors of United States	96

List of Figures

Figure 1. CH ₄ production in livestock manure management	11
Figure 2. Decision tree for CH ₄ emissions from Manure Management (환경부, 2008)	14
Figure 3. Histogram of Gross Energy data by body weight (Lee et al., under review)	31
Figure 4. The Tukey HSD test result of Gross Energy data in the three body weight classes (Lee et al., under review)	32
Figure 5. One form of probability density function	33
Figure 6. Plotting of normal distributions	34
Figure 7. Plotting of log-normal distribution	35
Figure 8. Plotting of triangular distribution	36
Figure 9. Plotting of uniform distribution	38
Figure 10. Plotting of Weibull distribution	40
Figure 11. Plotting of exponential distribution	42
Figure 12. Plotting of Poisson distribution	44
Figure 13. Process of Monte Carlo simulation	50
Figure 14. Process of Bootstrap	52
Figure 15. Example of Tukey test	54
Figure 16. R code used for bootstrap	66
Figure 17. Result of Tukey HSD	72
Figure 18. Triangular distribution of B ₀ data	78
Figure 19. Distribution of class A CH ₄ emission factor (parametric MCS)	79
Figure 20. Distribution of class B CH ₄ emission factor (parametric MCS)	80
Figure 21. Distribution of class C CH ₄ emission factor (parametric MCS)	80
Figure 22. Histogram of VS	82
Figure 23. CH ₄ emission factors of class A	85
Figure 24. CH ₄ emission factors of class B	87
Figure 25. CH ₄ emission factors of class C	89

List of Abbreviations

B_o : maximum methane producing capacity of the manure

BW : body weight

CH₄ : methane

EF : emission factor

IPCC : Intergovernmental panel on climate change

MCF : methane conversion factor

MS : manure management system

TS : total solids

VS : volatile solids

INDC : Intended Nationally Determined Contributions



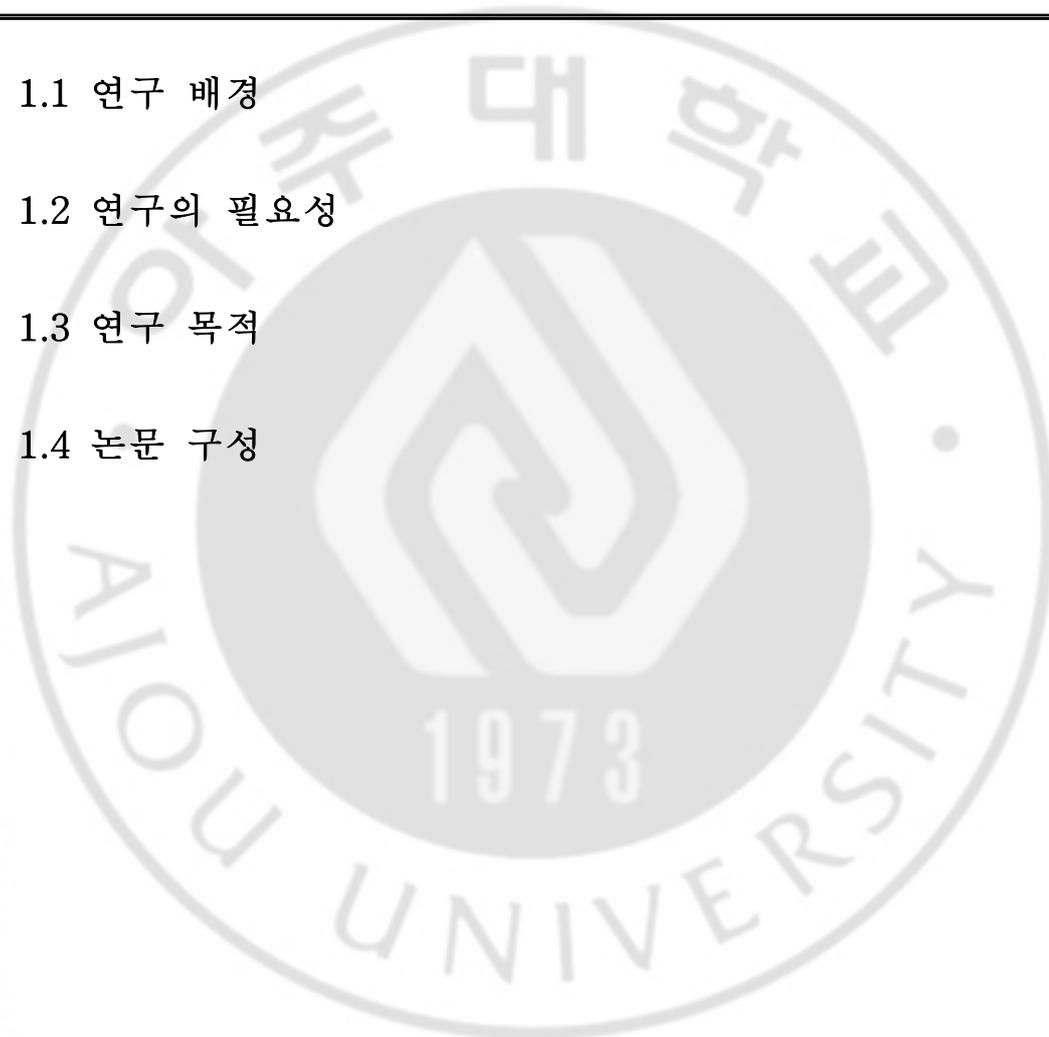
I. 서론

1.1 연구 배경

1.2 연구의 필요성

1.3 연구 목적

1.4 논문 구성



1.1 연구 배경

온실가스로 인한 기후 변화와 지구온난화는 여러 관련 연구와 그 영향에 의해 사람들에게 체감되고 있으며 인간으로 인한 인위적인 활동으로 온실가스는 지속적으로 증가해왔다. 이러한 온실가스에 대응하기 위해 세계적인 움직임이 있어 왔으며, 우리나라에서도 이에 참여하여 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서 제공하는 IPCC 가이드라인을 바탕으로 환경부 주관으로 ‘국가온실가스 통계 산정·보고·검증지침’을 제정하여 에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 등 5개 분야에 대한 국가 온실가스 배출량·흡수량에 대한 산정 및 검증을 시행하고 있으며, 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 작성하고 있다. (온실가스종합정보센터, 2016)

우리나라는 1997년 채택된 교토의정서 상에서는 선진국이 아닌 개발도상국으로 분류되어 온실가스 배출량 감축 의무 부담 대상에서는 제외되었다. 공통의 무인 온실가스에 대한 국가통계 작성 및 보고 의무를 부담했었고, 2008년부터 국가 정책으로 온실가스 배출량 감축을 위한 노력을 해왔다.

그러나 현재의 온실가스 배출량 감소를 위한 노력으로는 지구의 평균 온도 유지조차 어렵다는 연구 등에 의해, 기존 교토의정서로는 온실가스 배출량 감축목표를 달성하기에 역부족이라고 판단하고 새로운 기후변화 관련 협약이 2015년 12월 파리에서 이뤄졌다. 이렇게 맺어진 파리 협약은 국제법적으로 구속력 있는 국제 협약으로서, 기존 기후변화협약과 비교했을 때, 참여 국가와 미참여 국가를 구분하여 온실가스 배출량 감축을 시행했던 이전과는 달리 참여한

모든 국가들이 스스로 온실가스 배출량 감축에 대한 기여방식과 수준을 정하는 방식을 취하고 있다.

파리협정에 참여한 국가는 스스로 어떻게 온실가스 배출량 감축에 기여할 것 인지를 작성한 Intended Nationally Determined Contributions (INDC)를 제출해야 하며, 우리나라 또한 INDC를 제출하여 자발적인 온실가스 배출량 감축 의무목표를 설정하였다(Republic of Korea, 2015)

파리 협약이 2016년부터 효력을 지남에 따라 우리나라에서도 이에 대응하여 온실가스 배출량 감축을 수행하기 위하여 ‘제1차 기후변화대응 기본계획’과 함께 ‘2030 국가온실가스감축 기본로드맵’을 확정하였고 확정된 기본로드맵에 따라 발전, 산업, 건물, 에너지 신산업, 수송, 공공·기타, 폐기물, 농축산, 8개 부문에서 대해서 온실가스 배출량을 감축해야 한다.

이러한 온실가스 배출량 감축 외에도 우리나라는 국가별로 산정된 온실가스 배출량 순위에서 상위권에 위치하고 있어(Olivier et al., 2016) 온실가스 배출량 감축 문제에 보다 적극적으로 참여할 것이라 기대되고 있다.(환경부, 2017)

이에 따라 온실가스 배출량 감축과 이를 위한 온실가스 배출량 산정 연구의 중요도가 올라가고 있다.

1.2 연구의 필요성

새로운 기후변화협약인 파리협정에 참여하면서, 국가별 온실가스 배출량 순위에서 상위권을 차지하는 우리나라에 대해서는 보다 적극적인 참여가 요구되고 있으며, 5년 단위로 점차 더 개선된 기여를 요구하는 형태로서, 꾸준한 연구와 활동, 노력이 필요하다.

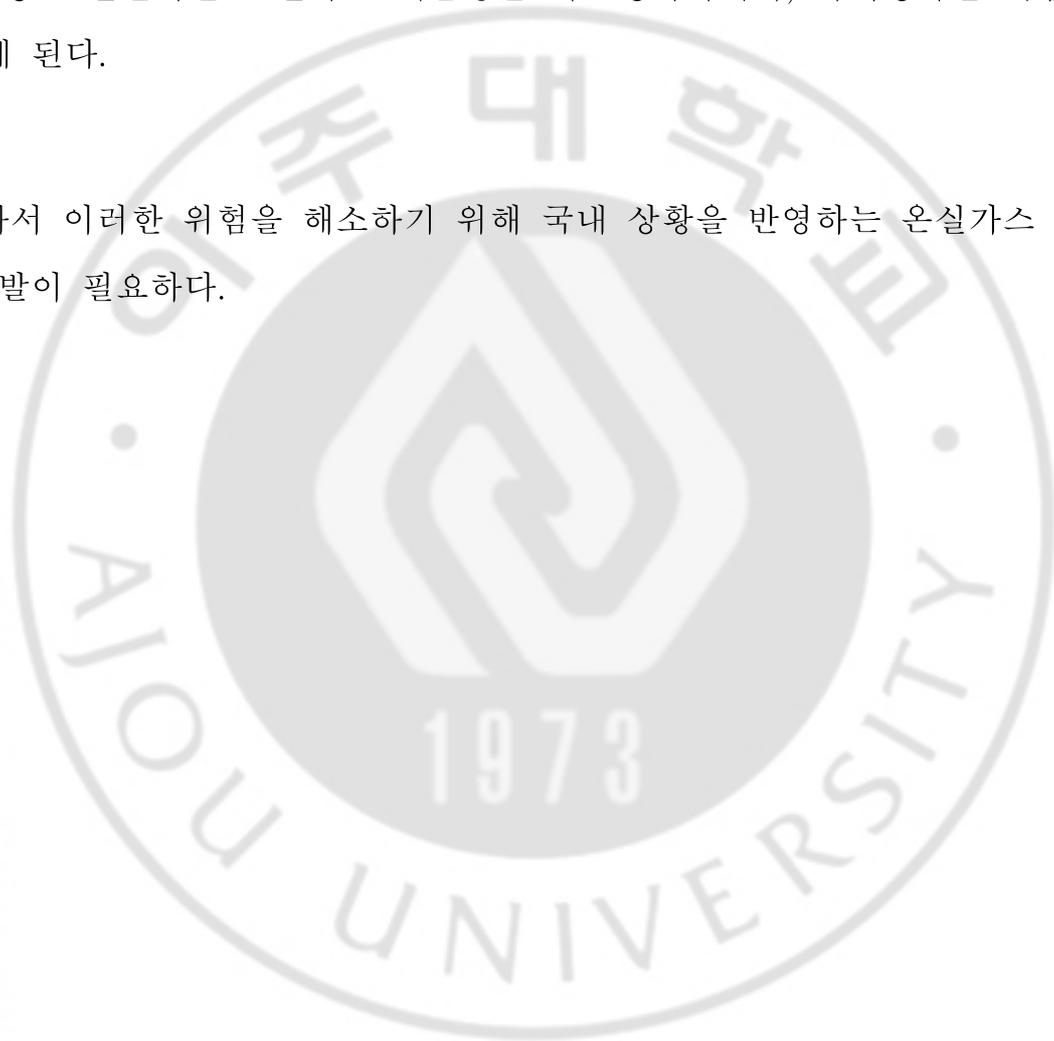
이러한 온실가스 관련 활동의 바탕이 되는 국가 온실가스 인벤토리는 국가 온실가스 통계 산정 보고 검증 지침에 따라 작성되고 있다. 그리고 온실가스 배출량 산정 방법론은 1996 IPCC 가이드라인에 따라 수행되고 있는데, 이 가이드라인의 경우, 파리협정 이전의 기후변화협약에서 개발도상국들에 대해 국가 온실가스 인벤토리 산정에 사용토록 권장되었으며, 가이드라인에서 제시하는 기본 배출계수와 자료를 이용하는 형태로 국가 온실가스 인벤토리 산정에 기여해왔다.

그러나, 우리나라의 달라진 위상과 전세계 온실가스 배출량에 대한 기여로 인해 기존보다 더 많은 기여가 요구될 것으로 예상되기 때문에, 이를 뒷받침하기 위해 더 많은 온실가스 배출량 산정에 대한 연구가 필요하며, 이러한 연구가 필요한 곳 중 하나로 농업 분야의 가축분뇨처리 부문이 있다.

전세계적으로 봤을 때 축산은 산업 활동에 이어 상당량의 온실가스가 발생한다고 보고된 바 있으며, 축산에서 배출되는 온실가스 배출량은 인간으로 인한 온실가스 배출량 중에서 14.5%를 차지하고 있고, 그 중 소로 인한 배출량은 축산업 부문 배출량의 65%에 달한다.(FAO, 2003; Gerber et al 2013)

그리고 현재 농업 분야의 온실가스 배출량 부문 중 하나인 가축분뇨처리 부문은 IPCC 가이드라인의 기본 온실가스 배출계수를 이용하여 배출량이 산정되고 있다. 그러나 이러한 기본값을 사용한 배출량 산정은 국내 상황을 반영하고 있다고 보기 어렵다. 국내 상황을 반영하고 있지 않은 배출계수를 이용한 배출량 산정은 실질적인 온실가스 배출량을 과소평가하거나, 과대평가할 위험을 초래하게 된다.

따라서 이러한 위험을 해소하기 위해 국내 상황을 반영하는 온실가스 배출계수 개발이 필요하다.



1.3 연구 목적

본 연구에서는 가축분뇨에 대한 온실가스 배출계수를 개발하고자 하였으며, 가축분뇨 부문에서 가장 배출량이 큰 축종인 부류인 한·육우, 그 중에서도 사육두수가 더 많은 한우를 대상축종으로 하고 농업 분야에서 배출되는 온실가스 중 과반수의 비중을 차지하는 CH_4 을 대상으로 하였다.

가축분뇨에 대한 CH_4 배출계수 산정에는 마리당 일일 휘발성 고형물 배설량, 배설된 휘발성 고형물의 최대 CH_4 발생량, 분뇨처리 시스템별 CH_4 전환계수, 분뇨처리시스템별 분뇨처리비율과 같은 변수들이 필요하며, 이러한 변수들에 대한 연구는 대부분 장기간의 시간을 필요로 하는 등 기회비용이 크기 때문에 이러한 배출계수를 개발하는 것은 지난한 실정이었다.

그래서 기회비용이 적은 시뮬레이션 방법을 사용하여 수집 데이터를 확장하여 한우 분뇨의 CH_4 배출계수를 개발하고자 하며, CH_4 배출계수 산정식을 구성하는 변수들에 대하여 가능한 경우 실측을 통해, 그렇지 아니하면 문헌 연구를 통해 데이터를 수집하고 시뮬레이션 방법을 적용하여 한우 분뇨의 CH_4 배출계수를 구하고자 한다.

1.4 논문 구성

1장에서는 전세계의 이목이 집중되고 있는 주요 환경 문제인 온실가스 배출량 감축과 현재 우리나라의 온실가스 배출량 감축 문제에 대한 대응 현황을 기술하였고, 본 논문의 목적이 국내 상황을 반영한 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 개발임을 밝혔다.

2장에서는 가축분뇨에서의 CH₄ 생성원리와 온실가스 배출량을 산정하는 데에 방법론으로서 사용되는 IPCC 가이드라인의 내용과 우리나라 및 해외에서 사용되는 가축 분뇨처리의 CH₄ 배출량 산정에 대한 방법론을 소개하였으며, 분뇨처리 CH₄ 배출계수에 대해 기본 배출계수가 특정 나라에서 수행한 CH₄ 배출계수에 대한 연구결과에 비추었을 때, 그 나라의 특성을 반영하지 못했다는 연구와 국내 젓소의 장내발효 배출계수 산정 연구에서 제기되었던 체중에 따른 분류 기준에 대한 연구들을 분석하였다.

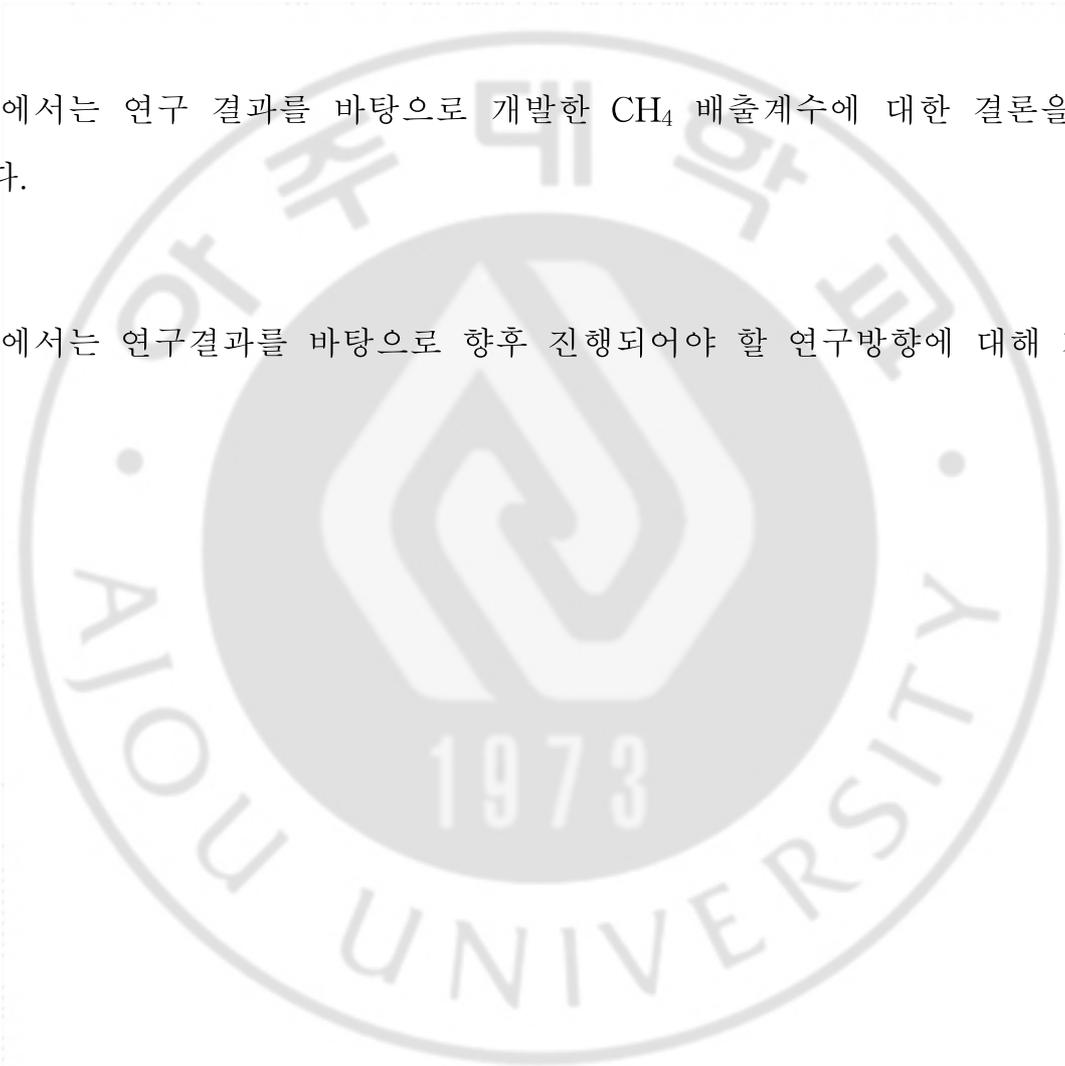
그리고 배출계수 산정에 사용될 시뮬레이션 방법과 그것을 이해하기 위해 필요한 확률밀도함수의 종류와 검정방법을 소개하였다.

3장에서는 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식을 구성하고 있는 일간 휘발성 고형물 배설량, 배설된 분뇨의 최대 CH₄ 발생량 등 산정에 필요한 데이터에 대한 수집 방법과 분석 과정을 기술하였으며, 앞서 2장에서 CH₄ 배출계수 산정에 사용될 몬테카를로 시뮬레이션과 Bootstrap의 절차를 기술하였다.

4장에서는 3장에서 기술했던 데이터의 수집 및 분석 방법과 시뮬레이션 방법을 사용하여 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 산정하였으며, 산정된 결과에 대해서 한우 관련 연구 및 문헌을 바탕으로 이를 해석하고, 해외 배출계수와 비교하는 등 배출계수 연구의 중요성을 고찰하였다.

5장에서는 연구 결과를 바탕으로 개발한 CH₄ 배출계수에 대한 결론을 기술하였다.

6장에서는 연구결과를 바탕으로 향후 진행되어야 할 연구방향에 대해 기술하였다.



II. 문헌 연구

2.1 가축분뇨에서의 CH₄

2.2 IPCC 가이드라인

2.3 국내외 가축 분뇨 CH₄ 배출계수 산정방법

2.4 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정에서의 고려사항

2.5 확률밀도함수

2.6 확률밀도함수의 검정

2.7 시뮬레이션 방법

2.8 ANOVA

2.9 Tukey HSD(Honest Significant Difference)

2.1 가축분뇨에서의 CH₄

2.1.1 가축분뇨에서의 CH₄ 발생

주로 유기물질과 물로 구성되어 있는 가축분뇨에서 CH₄은 산소가 없는 혐기성 상태에서 생성된다. 혐기성 상태에서 활성화된 혐기성 미생물이 고농도의 유기물을 포함하고 있는 가축분뇨를 대사 작용에 이용하여 무기물과 가스(CH₄, CO₂)로 전환시킨다.

2.1.2 CH₄ 생성 원리

혐기성 상태에서의 CH₄ 생성은 고분자 유기물의 가수분해(Hydrolysis), 산 생성(Acidification), CH₄ 생성(Methanogenesis)으로 구분된다(Lawrence and McCarty, 1969).

가수분해에서는 혐기성 미생물이 고분자 유기물(Proteins, cellulose, lignin, lipids 등)을 이용하기 쉽도록 표면에 효소를 분비하여 저분자 유기물(Amino acid, glucose, fatty acid, glycerol)로 전환한다. 산 생성에서는 가수분해가 된 저분자 유기물이 산생성미생물에 의해 흡수 및 분해가 되어 단순 형태의 휘발성지방산(Acetic acid, propionic acid, butyric acid, ethanal)과 CO₂, H₂ 등으로 전환되고 여기서, Propionic acid, butyric acid, ethanol은 최종적으로 Acetic acid로 분해되어 결국 Acetic acid, CO₂, H₂만 존재하게 된다 (McCarty, 1964; McInerney and Bryant, 1981).

CH₄ 생성에서는 최종산물인 Acetic acid와 CO₂를 CH₄ 생성미생물이 이용해 환원하여 가스 상태인 CH₄과 CO₂가 생성된다(김중수 외, 2002; 임선영, 2005). 다음 Figure 1은 가축분뇨와 같은 유기물을 이용한 CH₄ 생성 원리이다.

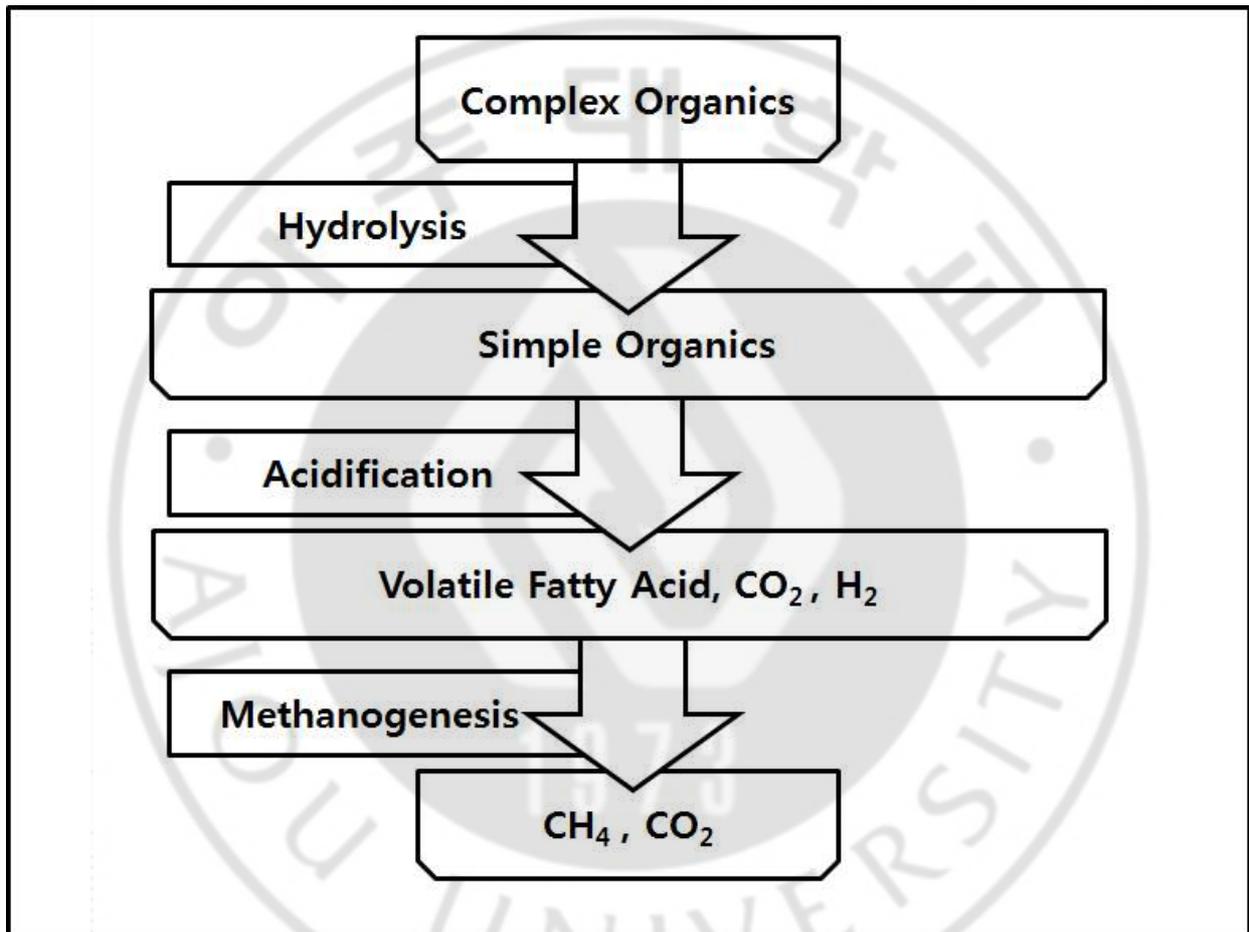


Figure 1. CH₄ production in livestock manure management (McInerney and Bryant, 1981)

2.2 IPCC 가이드라인

IPCC 가이드라인은 산업, 농업 등의 분야별로 정의하고 있는 온실가스들의 종류와 이들의 배출계수, 배출량 산정 방법을 제시하고 있다(IPCC, 1997). 여기서는 가축분뇨 부문에 대해 서술하고 있는 내용을 정리하였다.

2.2.1 가축분뇨에서 발생하는 온실가스

IPCC 가이드라인에서 분뇨란 가축으로부터 발생한 대변과 소변 둘 다를 합쳐서 일컫는다. 이러한 가축의 분뇨처리과정에서 CH_4 과 N_2O 가 온실가스로서 발생하고 있으며, 분뇨를 저장 및 처리하는 동안에 발생하는 CH_4 배출량을 산정하는 방법이 제시되고 있다. CH_4 배출에 가장 큰 영향을 주는 요인은 분뇨발생량과 혐기성으로 분해되는 분뇨의 분율로서 가축사육두수와 분뇨가 어떻게 처리되는지 분뇨처리 시스템의 종류에 따라 다르다.

2.2.2 산정 방법론

IPCC 가이드라인에서 가축분뇨에서의 CH_4 배출계수 산정에는 Tier1, Tier2, Tier3로 방법이 구분되어 있으며, Figure 2의 의사결정도를 통해 방법을 선정할 수 있다(IPCC, 2006). Tier1 방법은 IPCC 가이드라인에 지역의 연평균 기온에 따라 축종별, 지역별로 구분하여 제시된 기본 CH_4 배출계수를 이용하는 방

법이다. 하지만 Tier1의 자료들은 미국 등의 선진국을 중심으로 작성되었기 때문에 선진국에 해당되지 않는 국가들에 대해서는 해당 국가의 특성을 반영한다고 보기 어렵다.

Tier2 방법은 제시하는 배출계수 산정식을 바탕으로 국가의 고유 환경에 맞는 배출계수를 개발하여 사용하는 것으로서, 가축의 특성과 가축분뇨처리 방법에 대한 정보를 필요로 한다. Tier3 방법은 국가 고유 방법론 모델 및 측정에 기반하고 있다.

현재, 우리나라로서는 Tier1은 바로 사용이 가능하지만, 정확도가 $\pm 30\%$ 로 낮다는 문제점이 있으며, Tier2의 경우, 부분적 사용이 가능하며, 활동 데이터 등의 보완과 분뇨 및 분뇨처리시설에 대한 상세 데이터가 필요하다. 그리고 Tier3는 국가고유특성에 적합한 배출계수 산출이 필요하기 때문에, 직접적인 배출량 측정과 모델 개발을 위해 많은 자료가 필요하여 사용이 불가능하다고 판단되고 있다(박규현, 2008).

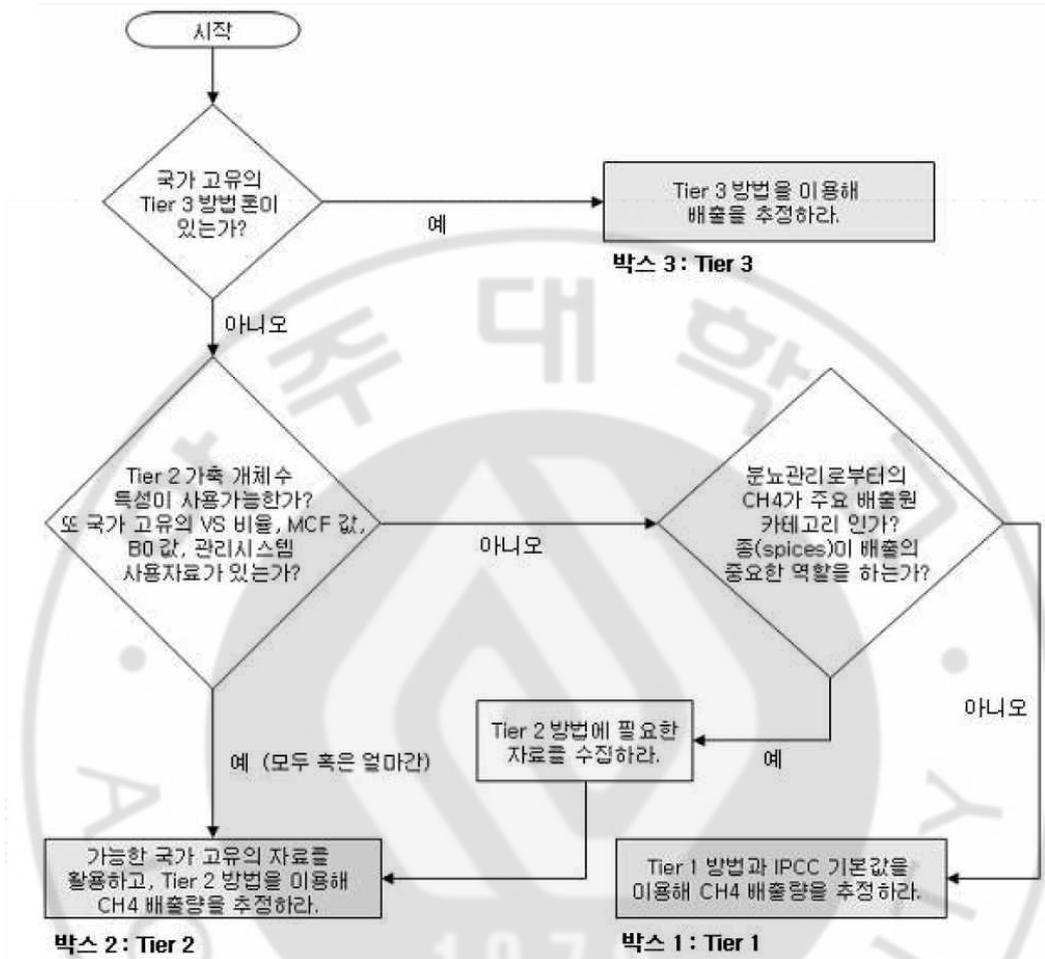


Figure 2. Decision tree for CH₄ emissions from Manure Management (환경부, 2008)

2.2.3 배출계수 선택

선정한 방법론에 맞춰 배출계수를 선택해야 한다. Tier1 방법은 배출계수를 산정해야 하는 국가의 연 평균 기온에 따라 정리되어 있는 배출계수를 사용할 수 있도록 되어 있다(Table 1).

Table 1. CH₄ emission factor of cattle manure management by region and temperature (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Unit : kg CH₄/head-year

Regional characteristics	Methodology	CH ₄ emission factor of cattle manure management by average annual temperature(°C)									
		Cool					Temperate				
		≤10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
North America: Other cattle manure is usually managed as a solid and deposited on pastures or ranges.	1996 IPCC guideline	1					2				
	2006 IPCC guideline	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
Asia: About half of cattle manure is used for fuel with the remainder managed in dry systems.	1996 IPCC guideline	1					1				
	2006 IPCC guideline	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tier2 방법은 IPCC 가이드라인이 제시한 기본값 자료가 국가의 가축 및 분뇨처리 조건과 일치하지 않을 경우 사용되며, 가축의 분뇨 특성과 분뇨처리 시스템의 특성을 고려하여 배출계수를 산정하게 된다. 가축의 분뇨 특성은 분뇨에서 발생하는 휘발성 고형물(VS)의 양과 분뇨로부터 발생될 수 있는 최대 CH₄ 발생량(B₀)으로 구분되며(Table 2) 분뇨처리 시스템의 특성은 Table 3, Table 4, Table 5와 같이 분뇨처리 시스템의 종류와 시스템 고유의 CH₄ 전환계수로 구분된다.

Table 2. Other cattle characteristics (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Region	Methodology	Other cattle characteristics		
		Mass (kg)	B ₀ (m ³ CH ₄ /kg VS)	VS (kg/head-day)
North America	1996 IPCC guideline	357	0.17	2.4
	2006 IPCC guideline	389	0.19	2.4
Asia	1996 IPCC guideline	319	0.1	2.3
	2006 IPCC guideline	319	0.1	2.3
Default estimates for average other cattle mass are ±25%. Default estimates for B ₀ are ±15%. Default estimates for average VS production per head per day are ±35%.				

가축 분뇨에서 발생하는 휘발성 고형물(VS)의 양은 Tier2의 장내발효 배출계수 도출에 사용되기도 하는 변수인 사료 섭취량과 사료 소화성에 근거해 산정되거나 가축분뇨를 실험실에서 분석한 결과에 근거할 수 있다.

분뇨로부터 발생될 수 있는 최대 CH_4 발생량(B_0)은 축종과 사료의 종류에 따라 달라지며, 가축 분뇨에서 발생하는 휘발성 고형물(VS)의 양에 의거한 이론상의 값이다.

가축 분뇨처리 시스템에 대해 주어지고 있는 기본 MCF는 고유 가축분뇨 처리시스템에 대해 결정되고, B_0 가 얻어지는 정도를 나타낸다. 1996 IPCC 가이드라인의 경우 온도 범위를 15°C 미만($<15^\circ\text{C}$), 15°C 이상부터 25°C 미만($15^\circ\text{C}\sim 25^\circ\text{C}$), 25°C 이상($\geq 25^\circ\text{C}$)으로 세 범위로만 지정하였으나, 2006 IPCC 가이드라인의 경우 Table 3, Table 4와 같이 1°C 간격으로 온도 변화에 따른 값을 명시하였다. Lagoon의 기본값은 더 긴 체류시간의 효과가 포함되어 그 결과로 대부분의 다른 환경의 시스템보다 높은 수치를 나타내고 있다.

Table 3. CH₄ conversion factor of manure management in cool region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Unit : %

Region		Cool region					
Methodology		1996 IPCC guideline	2006 IPCC guideline				
Avg. annual temperature (°C)			10	11	12	13	14
CH ₄ conversion factor of manure management system (MCF, %)	Lagoon	90	66	68	70	71	73
	Liquid/Slurry	10	17	19	20	22	25
	Solid storage	1	2	2	2	2	2
	Drylot	1	1	1	1	1	1
	Pasture/Range/Paddock	1	1	1	1	1	1
	Daily spread	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Digester	10	10	10	10	10	10
	Burned for fuel	10	10	10	10	10	10
	Other	1	1	1	1	1	1

Table 4. CH₄ conversion factor of manure management in temperate region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Unit : %

Region		Temperate region					
Methodology		1996 IPCC guideline	2006 IPCC guideline				
Avg. annual temperature (°C)			15	16	17	18	19
CH ₄ conversion factor of manure management system (MCF, %)	Lagoon	90	74	75	76	77	77
	Liquid/Slurry	35	27	29	32	35	39
	Solid storage	1.5	4	4	4	4	4
	Drylot	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Pasture/Range/Paddock	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Daily spread	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Digester	10	10	10	10	10	10
	Burned for fuel	10	10	10	10	10	10
	Other	1	1	1	1	1	1

Table 5. Manure management usage by region (IPCC, 1997; IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Unit : %

Region		North America		Asia	
Methodology		1996 IPCC guideline	2006 IPCC guideline	1996 IPCC guideline	2006 IPCC guideline
Manure management system usage (MS%)	Lagoon	0	0	0	0
	Liquid/Slurry	1	0.2	0	0
	Solid storage	0	0	0	0
	Drylot	14	18.4	46	46
	Pasture/Ran ge/Paddock	84	81.5	50	50
	Daily spread	0	0	2	2
	Digester	0	0	0	0
	Burned for fuel	0	0	2	2
	Other	1	0	0	0

2.3 국내외 가축 분뇨 CH₄ 배출계수 산정방법

2.3.1 국내 가축 분뇨 CH₄ 배출계수 산정방법

국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침은 국가 온실가스 통계에 대해서 국가 온실가스 배출·흡수량을 산정하기 위한 방법론(산정식), 배출계수(배출량 산정관련 인자), 활동자료의 종류, 보고와 관련된 국가 온실가스 배출·흡수량 산정결과와 근거자료의 제출에 필요한 형식 및 내용, 국가 온실가스 배출·흡수량 산정결과와 근거자료가 지침에 따라 제대로 산정되었는지 검토하는 검증으로 구성되어 있다.(온실가스종합정보센터, 2014)

1996 IPCC 가이드라인을 바탕으로 하고 있으며, 국내 온실가스 인벤토리 산정의 근거이다. CH₄ 배출계수와 축종의 사육 두수를 곱하여 CH₄ 배출량을 산정한다.(Equation 1) 가축분뇨 부문의 경우, 가축분뇨 저장과 처리에서 발생하는 CH₄과 N₂O가 주요 배출원으로, 분뇨처리 방식은 액비화, 퇴비화 시설 등으로 구분되며, 시설별 온실가스 배출율이 다르다. CH₄ 배출계수는 1996 IPCC 가이드라인 Tier1의 한대지역에 대한 배출계수를 적용하고 있으며, 한우에 대해서는 북미의 배출계수(1 kg CH₄ /head/year)를 사용하고 있다. 아시아의 소 분뇨에 대해서는 소 분뇨의 절반이 연료로 사용되고, 나머지는 건식시스템으로 관리되고 있다고 서술하고 있으며, 북미의 경우, 고체로 관리되며, 목초지, 방목장에 뿌려진다고 서술하고 있어, 이를 바탕으로 아시아의 지역적 특성에 대해 서술된 내용과 우리나라의 분뇨처리 방식과는 차이가 있어, 아시아의 배출계수를 사용하지 않고 우리나라와 유사하게 지역적 특성이 서술된 북미의 자료를 사용한 것으로 보인다.

$$E = EF \times \text{population} / (10^6 \text{kg} / \text{Gg}) \dots \dots \dots \text{Eq. 1}$$

E= 분뇨처리시 CH₄ 배출량, Gg CH₄ /year

EF= 분뇨처리시 CH₄ 배출계수, kg CH₄ /head/year

population= 축종의 사육 두수 head

온실가스종합정보센터가 제공하는 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침을 이용하여 온실가스 보고대상 부문별 관장기관이 온실가스 통계를 산정하여 온실가스종합정보센터에 제출하면 이를 검증하고 수정 및 보완하여 온실가스 통계가 만들어지며, 국가 온실가스 인벤토리 보고서에는 이렇게 만들어진 온실가스 통계와 해당연도에 산정에 사용한 자료와 이론이 기술되어 있다.

2016년 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2016)의 경우, 2014년 국가 온실가스 배출량을 보고하고 있다. 배출량 산정을 위한 사용한 활동자료 중 가축사육두수 통계는 통계청의 가축동향조사 자료를 바탕으로 해당연보별 분기자료를 이용해, 1분기부터 4분기까지의 평균을 연평균으로 하여 사용하였고, 가축분뇨처리의 CH₄ 배출계수는 1996 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 기본 배출계수 중에서 지역 특성에 따른 분뇨처리방법에 대한 설명을 참조하여 국가 현실에 적합한 배출계수를 선택했다.

2.3.2 해외 가축 분뇨 CH₄ 배출계수 산정방법

2.3.2.1 일본

일본은 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 분뇨에 함유된 유기물에서 배출되는 CH₄의 계수 (g-CH₄ / g-organic matter)와 일본에서 분뇨처리 방법에 따라 처리된 분뇨에 함유된 유기물 양(g-organic matter)의 곱으로 분뇨처리의 CH₄ 배출량을 산정하고 있다.

분뇨처리 방법에 중점을 두고, 축종이 온실가스 배출량에 대해 차지하는 비중을 경중을 두고, 자료로 제공되는 기본 배출계수를 사용하거나, 국가 고유 배출계수를 산정하고 있다.

다음 Equation 2는 일본의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = \sum (B_0 \cdot 0.67 \cdot MCF \cdot Ex \cdot Day \cdot Org \cdot Mix_n \cdot MS_n / 1000) \dots \text{Eq.2}$$

EF _{CH₄}	:	CH ₄ emissions associated with the management of manure excreted by cattle [g CH ₄ /head]
B ₀	:	Maximum CH ₄ producing capacity [m ³ CH ₄ /kg organic matter]
0.67	:	Conversion factor from volume to weight [kg CH ₄ /m ³ CH ₄]
MCF	:	CH ₄ conversion factor [%]
Ex	:	Amount of feces and urine excreted per head per day [kg/head/day]
Org	:	Organic matter content in feces and urine [%]
Day	:	Days in a year [day]
Mix _n	:	Proportion of feces and urine separated [%]
MS _n	:	Share of each management method [%]
n	:	The kinds of manure management system

2.3.2.2 덴마크

덴마크는 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 하고 있으며, 가축의 방목기간과 축사에서 사용되는 짚의 양을 배출량 산정에 중요한 요인으로 보아 이를 반영하고 있다(Nielsen et al., 2017). 이는 덴마크의 지리학적 특성으로 인해 겨울의 심한 기후 변화를 감안한 것으로 보인다.

방목사육기간과 축사 사육기간을 구분하고 있으며, 이를 합쳐서 CH₄ 배출량을 산정하고 있다. 육우의 분뇨처리에 대한 VS 산정과 MCF 산정은 국가 데이터를 기반으로 이뤄지고 있으며, 최대 CH₄ 생산량(B₀)의 경우 IPCC 가이드라인에서 제시하는 기본 값을 사용하고 있다.

다음 Equation 3은 덴마크의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$CH_{4,manure} = CH_{4,housing} + CH_{4,grazing} \dots \dots \dots \text{Eq.3}$$

$$CH_{4,housing} = VS_{housing} \times MCF \times 0.67 \times B_0$$

$$CH_{4,grazing} = VS_{grazing} \times MCF \times 0.67 \times B_0$$

- CH_{4,manure} : CH₄ emissions associated with the management of manure excreted by cattle [kt CH₄]
- CH_{4,housing} : CH₄ emissions during housing days [kt CH₄]
- CH_{4,grazing} : CH₄ emissions during grazing days [kt CH₄]
- VS_{housing} : Volatile solids excreted during housing days [kg-VS/head/year]
- VS_{grazing} : Volatile solids excreted during grazing days [kg-VS/head/year]
- MCF : CH₄ conversion factor
- 0.67 : Conversion factor from volume to weight [kg-CH₄/m³-CH₄]
- B₀ : Maximum CH₄ producing capacity

2.3.2.3 미국

미국은 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정에 대한 연구를 진행했던 나라로서, 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 확실하게 사용하고 있다.

육우의 마리당 휘발성 고형물 생산율과 주(State)마다 구축된 분뇨처리시스템의 분뇨 처리비율, 최대 CH₄ 발생량, 분뇨처리시스템별 CH₄ 전환 계수 등을 바탕으로 배출계수를 산정하고 있다. 분뇨처리 시스템 중 건식 분뇨처리시스템의 CH₄ 전환 계수에는 제공되는 기본값을 사용하고, 그 외 분뇨처리시스템에는 국가 고유 CH₄ 전환 계수를 개발하여 사용하고 있다(US EPA, 2017).

다음 Equation 4는 미국의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = (VS \cdot WMS) \cdot B_0 \cdot MCF \cdot 0.662 \dots \dots \dots \text{Eq.4}$$

- EF_{CH₄} : Emission factor for CH₄ emission [kg CH₄/head/year]
- VS : Volatile solids production rate [kg VS/head/year]
- WMS : Distribution of manure by WMS(waste management system) in a state [%]
- B₀ : Maximum CH₄ producing capacity [m³ CH₄/kg VS]
- MCF : MCF for the animal group, state and WMS [%]
- 0.662 : Density of CH₄ at 25°C [kg CH₄/m³ CH₄]

2.3.2.4 뉴질랜드

뉴질랜드는 주요 축종인 젖소, 육우, 양, 사슴에 대해서는 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 하고 있다.

뉴질랜드의 육우의 경우, 목초지에서 방목되기 때문에 이러한 특성에 따라 배설되는 모든 분뇨는 목초지에 뿌려지게 된다. 건물섭취량과 건물 소화율을 이용하여 배출계수가 산정되며, 육우 분뇨로부터 나오는 CH₄ 배출량에 대해서는 진행된 연구가 없어 젖소 관련 연구(Saggar et al., unpublished; Sherlock et al., unpublished)에서 도출된 0.98 g CH₄/kg FDM이 사용된다(Ministry for the Environment, 2017).

다음 Equation 5는 뉴질랜드 육우의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = 0.00098 \cdot 12 \cdot FDM \dots \dots \dots \text{Eq.5}$$

$$FDM = DMI \cdot (1 - DMD)$$

- EF_{CH₄} : Emission factor for CH₄ emission [kg CH₄/head/year]
- 0.00098 : Quantity of CH₄ produced from FDM [kg CH₄/kg FDM]
- 12 : 12 [month/year]
- FDM : Faecal dry matter [kg/head/month]
- DMI : Dry-matter intake [kg/head/month]
- DMD : Dry-matter digestibility [decimal proportion]

2.3.2.5 독일

독일 또한 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 배출계수를 산정하고 있으며, 젓소, 육우, 돼지, 양, 염소, 말, 가금류에 대해서 분뇨처리의 CH₄ 배출계수를 산정하고 있다(Federal Environment Agency, 2017). 특징으로는 CH₄

배출계수(MCF)에 대해 무단위로 인한 혼란을 방지하기 위해 단위를 유지시키고 있다.

다음 Equation 6는 독일의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = \alpha \cdot 0.67 \cdot VS \cdot B_o \cdot MS \cdot MCF \dots \dots \dots \text{Eq.6}$$

- EF_{CH₄} : CH₄ emission factor for animal category in manure management system [kg CH₄/head/year]
- α : Factor for conversion of time units [365 day/year]
- 0.67 : Density of CH₄ [0.67 kg/m³]
- VS : VS excretions [kg VS/head/day]
- B_o : Maximum CH₄ producing capacity [m³ CH₄/kg VS]
- MS : Relative proportion of housing places, for animal category, whose excrement occurs in manure management system
- MCF : CH₄ conversion factor for manure management system [m³/m³]

2.3.2.6 스웨덴

스웨덴은 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 배출계수를 산정하고 있으며, 육우의 배출계수 산정에 필요한 B₀ 에 대해서는 IPCC 가이드라인의 기본값을 사용하며, VS에 대해서는 자국에서 진행된 연구(Dustan, 2002)를 바탕으로 하고 있다(Swedish Environmental Protection Agency, 2017).

다음 Equation 7은 스웨덴의 분뇨처리 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = VS \cdot B_0 \cdot 0.67 \cdot \sum MCF \cdot MS \dots \dots \dots \text{Eq.7}$$

- EF_{CH₄} : CH₄ emission factor for manure management system
[kg CH₄/head/year]
- 0.67 : Density of CH₄ [0.67 kg/m³]
- VS : Volatile substance excreted per year [kg VS/head/year]
- B₀ : Maximum CH₄ producing capacity [m³ CH₄/kg VS]
- 0.67 : Density of CH₄ [0.67 kg/m³]
- MCF : conversion factor for CH₄ production
- MS : Fraction of animal manure handled using manure system

2.3.2.7 호주

호주에서도 분뇨처리의 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 배출계수를 산정하고 있으며, 주요 축종의 경우, 행정 구역인 주(state), 계절, 연령 분류에 따라 평균 생체중 등 온실가스 배출량 산정에 사용된 정보를 국가 온실가스 보고서에 공개하고 있다(Australian Government, 2017).

호주는 육우의 분뇨처리에 대해 사육 방식에 따라 목초지와 축사로 구분하고 있으며, 이를 반영해, 목초지에서 사육되는 육우와 축사에서 사육되는 육우로 구분하여 배출량을 산정 시 다른 식을 사용하고 있다.

다음 Equation 8은 호주의 축사(feedlot)에서 사육되는 육우에 대한 CH₄ 배출계수 모델식이다.

$$EF_{CH_4} = 365 \cdot VS \cdot B_o \cdot iMCF \cdot \rho \dots \dots \dots \text{Eq.8}$$

- EF_{CH₄} : CH₄ emission factor from the manure management [kg CH₄/head/year]
- 365 : 365 [day/year]
- VS : Volatile solid production for beef cattle in feedlots [kg VS/head/day]
- B_o : Emissions potential [0.19 m³ CH₄/kg VS]
- ρ : Density of CH₄ [0.6784 kg/m³]
- iMCF : integrated MCF for feedlot cattle in each state

2.4 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정에서의 고려사항

2.4.1 기본 배출계수에 대한 이의 제기

Gonzalez-Avalos et al. (2001)은 멕시코에서 젓소와 육우를 대상으로 하여 사료의 종류를 구분하여 분뇨를 수집하였고 여기서 배출되는 CH₄을 포집하여 분석해 CH₄ 배출계수를 산정했다. Table 6와 같이, 실험을 통해 산정된 CH₄ 배출계수는 기존의 라틴아메리카에 대해서 IPCC 가이드라인(IPCC, 1997)이 제시하고 있는 가축분뇨처리 부문의 CH₄ 배출계수보다 작았다.

Table 6. Comparison of beef cattle CH₄ emission factors from IPCC guideline(IPCC, 1997) and Gonzalez-Avalos et al. (2001)

Unit : kg CH₄/head-year

Climate	IPCC guideline	Gonzalez-Avalos et al.(2001)
Cool	1	8.96×10^{-4}
Temperate	1	3.96×10^{-1}
Warm	1	1.17×10^{-2}

CH₄ 발생량에 가장 영향을 주는 것은 사료 비율이었으며, 또한 사료의 종류가 동일할 경우, 온도가 가장 중요한 요인이라는 결론을 내렸다. 또한 사료가 주로 곡물로 구성되어 있고, 건초 등의 초지류의 비율이 낮다면 CH₄ 발생량이 감소하며, 초지류의 비율이 높다면 CH₄ 발생량이 높다는 결론을 얻었다.

2.4.2 가축의 체중에 따른 분류

최근 한 연구에서는 한국에서 사육되고 있는 젖소들을 대상으로 젖소의 장내 발효에 의한 CH₄ 배출계수를 개발하고자 하였다(Lee et al., under review). 이를 위해 젖소의 장내발효 배출계수 산정식을 분석하여 장내발효 배출계수에 필요한 데이터를 구분하고 이에 관한 데이터를 수집하였다.

젖소의 장내발효 배출계수와 관련된 변수인 총 에너지(Gross Energy, GE)과 장내발효에서의 CH₄ 전환 계수(Methane conversion factor, Y_m) 등에 대한 데이터를 수집하였는데, 배출계수의 불확실성 분석을 수행하기 앞서, 변수 간 관계 분석과 변수 데이터가 이루는 확률분포 확인할 목적으로 체중(Body weight)과 총 에너지(GE)에 대해 히스토그램을 그렸을 때, Figure 3와 같이 체중의 함수로서, 3개의 뚜렷한 데이터 그룹(Class A: <300kg, Class B: 300-500kg, Class C: >500kg)을 보여주었다.

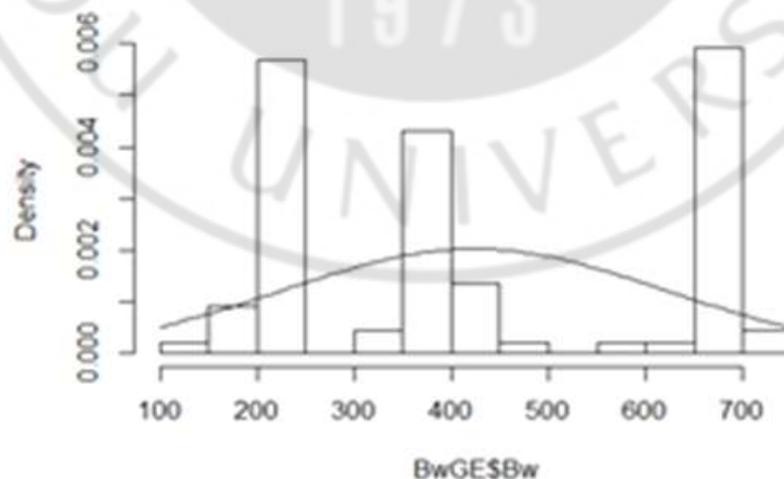


Figure 3. Histogram of Gross Energy data by body weight (Lee et al., under review)

그리고 검증을 위해 Tukey Honest Significant Difference(HSD) test를 수행하였으며, Figure 4와 같이 3개의 체중 분류에 따른 class들이 서로 다름을 확인하였다.

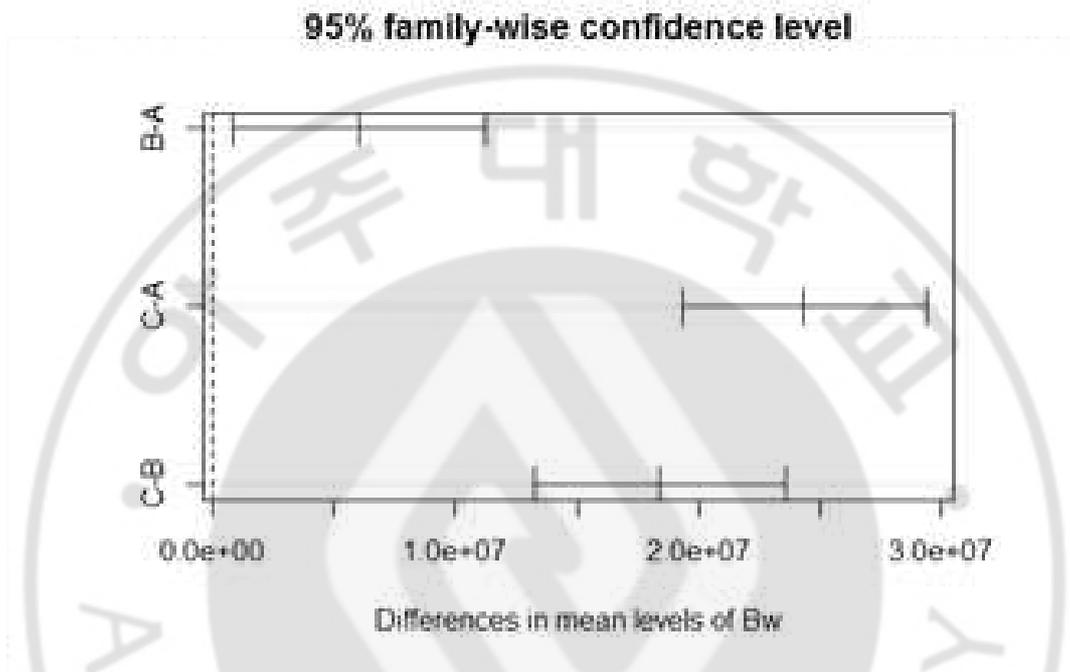


Figure 4. The Tukey HSD test result of Gross Energy data in the three body weight classes (Lee et al., under review)

이 연구에서 도출된 체중에 따른 분류 방식을 한우 분뇨처리의 CH₄ 배출계수를 산정하는 본 연구에서도 도입하여 적용해보았다.

2.5 확률밀도함수

확률밀도함수(Probability density function, PDF)는 연속확률변수를 정의하는 함수로서, 연속 확률 변수는 자연수처럼 비연속적인 것이 아니라, 실수(real number)와 끊임없이 연속적인 것을 의미한다. 확률변수의 모든 실수값들에 확률밀도함수는 0 이상이며, $-\infty$ 에서 ∞ 까지의 확률밀도함수를 적분하면 1이 된다. Figure 5는 확률밀도함수의 한 형태이다.

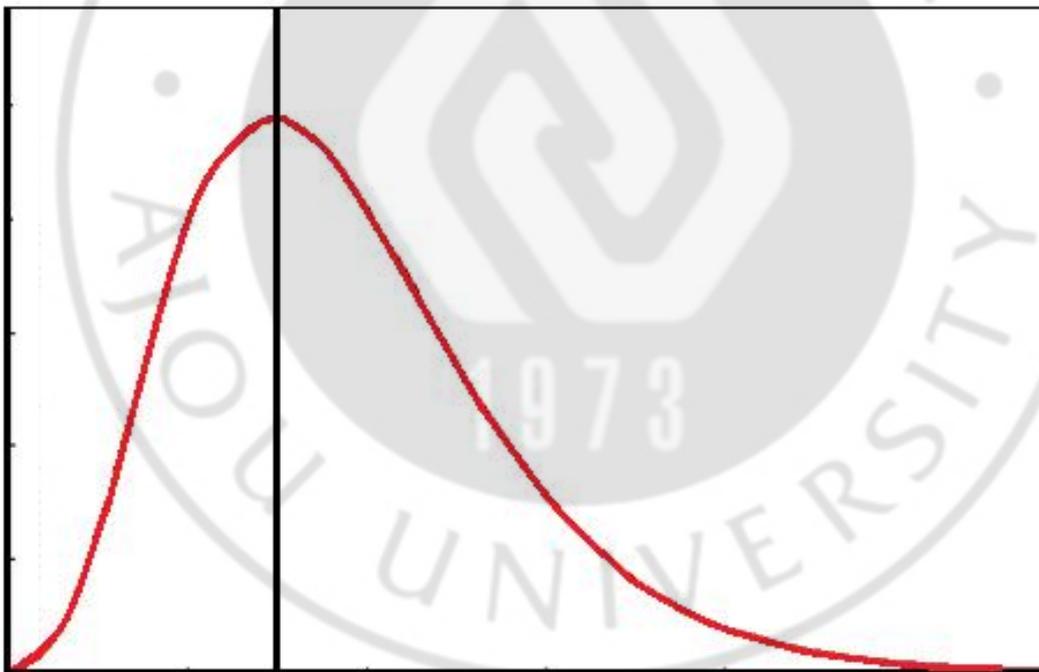


Figure 5. One form of probability density function

2.5.1 정규 분포(Normal distribution)

정규 분포는 통계를 이용하거나 응용할 때 가장 널리 사용된다. Figure 6와 같이 확률변수 중 특정 부분에서 가장 높은 빈도수가 발생하며, 그 부분을 기준으로 하여 대칭으로 점차 멀어질수록 빈도수가 줄어드는 형태를 가진다.

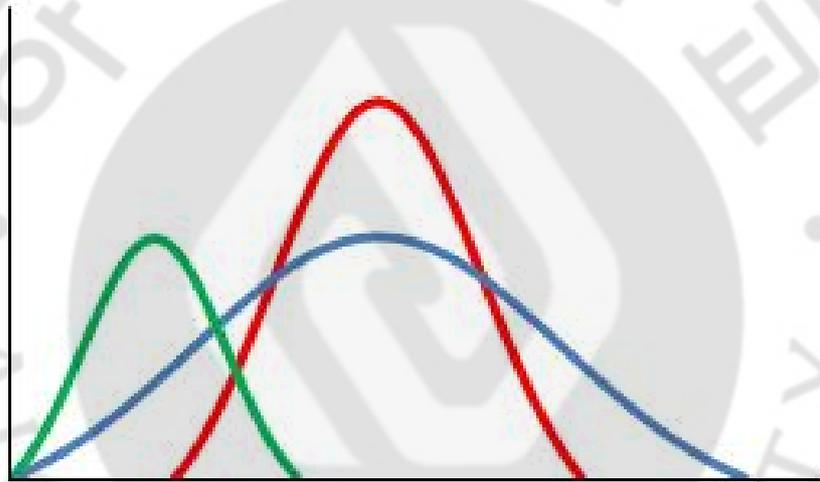


Figure 6. Plotting of normal distributions

이러한 정규 분포의 확률밀도함수식은 Equation 9와 같다.

여기서 μ 는 확률변수 값의 평균이고, σ^2 는 확률변수 값의 분산이다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (-\infty \leq x \leq \infty) \dots \dots \text{Eq. 9}$$

2.5.2 로그 정규 분포(Log-normal distribution)

어떤 확률변수에 자연로그를 취했을 때 그 값들의 분포가 정규 분포이면, 이를 로그 정규 분포라고 한다. 가까운 곳에서 찾자면, 모발이나, 손발톱 등과 같은 생체조직의 크기 등에 대한 확률변수가 로그 정규 분포를 띄며, Figure 7과 같은 형태이다.



Figure 7. Plotting of log-normal distribution

로그 정규 분포의 확률밀도함수식은 Equation 10와 같으며 확률변수 값의 평균은 $\mu e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} + \lambda$ 이고, 확률변수의 분산은 $(e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)}$ 이다. 로그 정규 분포에 자연로그를 취했을 때, 정규분포가 되는 확률변수의 평균이 μ 이고, 분산은 σ^2 이다. 확률밀도함수에서 x 가 0보다 작을 경우에 $f(x)$ 는 0으로 정의된다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(x - \lambda) \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{(\ln(x - \lambda) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (x > \lambda, \sigma > 0) \dots \dots \text{Eq. 10}$$

2.5.3 삼각형 분포(Triangular distribution)

삼각형 분포(Triangular distribution)는 x축과 y축을 가정했을 때, 가장 값이 작은 최소값(minimum), 가장 많은 빈도로 발생하는 최빈값(most likely), 가장 값이 큰 최대값(maximum)으로 구성되는 분포이다(장대홍 외, 2010). 삼각형 분포의 형태는 Figure 8과 같다.

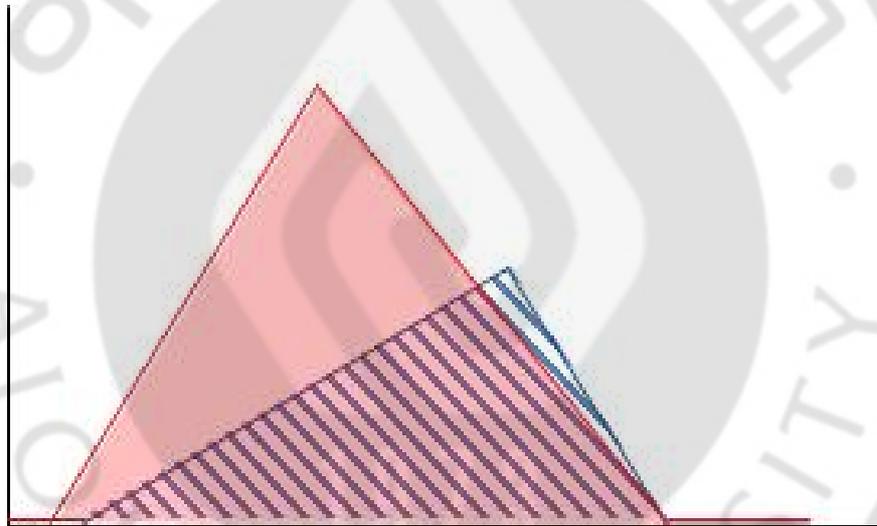


Figure 8. Plotting of triangular distribution

삼각형 분포의 확률밀도함수식은 Equation 11와 같으며 여기서 a 와 b 는 분포의 매개변수이다(Morgan et al., 1992).

$$f(x) = \frac{b - |x - a|}{b^2}, \quad (a - b \leq x \leq a + b) \dots \dots \text{Eq. 11}$$

Equation 11의 확률밀도함수에서 정의한 최소값은 $a-b$ 이며, 최대값은 $a+b$ 이다. 확률밀도함수의 평균은 a 이며, 분산은 $\frac{b^2}{6}$ 이다.

삼각형 분포는 모집단에 대해서 표본 데이터를 부분적으로만 사용 가능한 경우에 사용될 수 있으며, 예를 들어 새로운 건물을 짓거나 특정한 규모의 행사를 주최하거나 할 때 드는 비용에 대해 최소 비용과 최대 비용, 그리고 일반적인 비용을 추정할 수 있을 때 삼각형 분포를 사용할 수 있다.



2.5.4 균등 분포(Uniform distribution)

균등 분포는 특정한 구간에서 임의의 값을 나올 확률이 모두 같거나, 확률에 대한 정보가 없을 때 사용하는 분포이며, 확률변수 값들이 나오는 구간의 최소값과 최대값에 대한 정보로 구성될 수 있으며(장대홍 외, 2010), Figure 9과 같은 형태를 갖고 있다.



Figure 9. Plotting of uniform distribution

균등 분포의 확률밀도함수는 Equation 12와 같으며, a 에서 b 까지의 구간 외에서는 확률변수 값들이 나올 수 없다.

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad (a \leq x \leq b) \dots \dots \text{Eq. 12}$$

Equation 12와 같은 확률밀도함수에서 a 는 구간에서 가장 작은 하한값이고, b 는 구간에서 가장 큰 상한값으로서, 확률밀도함수에서의 평균은 $\frac{a+b}{2}$ 이고, 분산은 $\frac{(b-a)^2}{12}$ 이다. 균등분포의 경우, 연속형으로서 정확하게 측정을 할 수 없기 때문에 구간으로 접근하게 되며, 서울과 부산을 왕복하는 기차의 소요시간, 서울 지하철 2호선의 내선순환의 1회 순환시 소요되는 시간 등의 예들이 균등분포를 따른다.



2.5.5 와이블 분포(Weibull distribution)

와이블 분포는 공사나 산업현장 등에서 사용되는 장비나 기기의 부품의 수명을 추정하는데 사용되는 분포이다(Morgan et al., 1992).

Figure 10과 같은 형태를 포함해서 다양하게 그려질 수 있다.

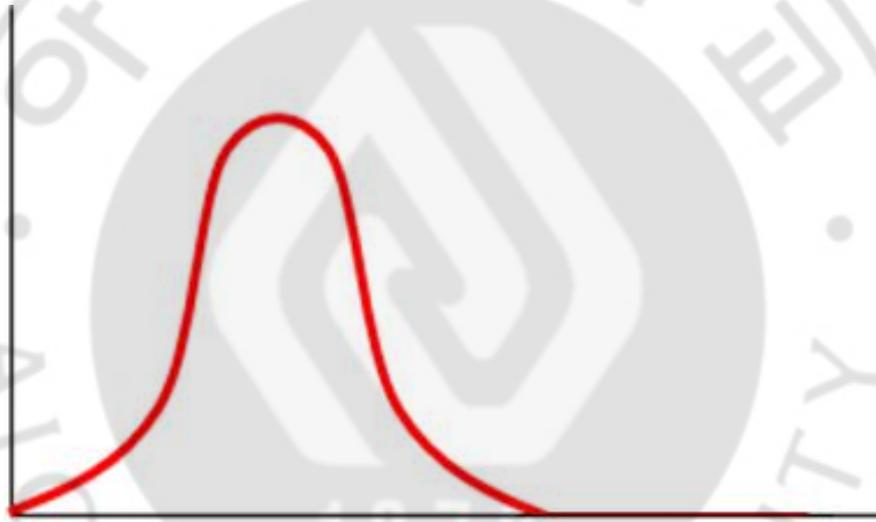


Figure 10. Plotting of Weibull distribution

와이블 분포의 확률밀도함수는 Equation 13와 같으며, a 에서 b 까지의 구간 외에서는 확률변수 값들이 나올 수 없다.

$$f(x) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}, \quad (0 \leq x < \infty) \dots \dots \text{Eq. 13}$$

Equation 13의 확률밀도함수식에서 c 는 척도 모수(scale parameter)이고, k 는 형상 모수(shape parameter)이다. 이러한 와이블 분포의 평균은 $c\Gamma(1+\frac{1}{k})$ 이며, 분산은 $c^2(\Gamma(1+\frac{2}{k})+\Gamma^2(1+\frac{1}{k}))$ 으로 나타난다.

장비나 기기의 부품, 예를 들어 전기기기의 퓨즈가 초기 고장 시간 동안 몇 퍼센트나 고장되는지, 또는 차량의 타이어가 기대 사용 수명인 30,000km 동안 몇 번의 보증 클레임을 겪게 될 것이냐 같은 문제에 대해 활용될 수 있다.



2.5.6 지수 분포(Exponential distribution)

지수 분포는 사고 등과 같은 이벤트가 무작위로 발생한다고 할 때, 사고가 발생한 후, 다음 사고가 발생할 때까지의 시간이 지수 분포로 표현될 수 있으며(Morgan et al., 1992), Figure 11과 같은 형태로 그려질 수 있다.



Figure 11. Plotting of exponential distribution

지수 분포의 확률밀도함수는 Equation 14와 같으며, 확률밀도함수식의 λ 는 빈도를 나타내는 모수로서, λ 값이 커질수록 분포가 그리는 경사가 급해지게 된다.

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, \quad (0 \leq x < \infty) \dots \dots \dots \text{Eq. 14}$$

Equation 14의 확률밀도함수식에서 기댓값은 $\frac{1}{\lambda}$ 이고, 분산은 $\frac{1}{\lambda^2}$ 이다. 빈도는 사건과 사건 간의 평균 시간으로 나뉘는 것으로서, 사건이 서로 독립적으로 발생할 때, 일정 시간동안 발생하는 사고의 수가 후술될 푸아송 분포를 따른다고 한다면, 다음 사고가 발생할 때까지의 대기시간은 지수 분포를 따르게 된다 (Doane & Seward, 2009).

예를 들어 컴퓨터 부품 제조회사에서 생산하는 컴퓨터 부품의 평균수명이 5년일 때, 이 부품이 고장 나지 않고 7년 이상 수명이 지속될 확률을 구한다는 문제 등에 대해 적용될 수 있다.



2.5.7 포아송 분포(Poisson distribution)

포아송 분포는 사고 등의 이벤트 발생이 단위 시간 안에 몇 번 발생할 것인지를 표현하는 확률분포이다(Morgan et al., 1992). Figure 12와 같은 형태로 그려질 수 있다.



Figure 12. Plotting of Poisson distribution

포아송 분포의 확률질량함수는 Equation 15과 같다.

$$p(x) = \frac{\alpha^x \cdot e^{(-\alpha)}}{x!}, \quad (x = 0, 1, 2, 3, \dots) \dots \dots \text{Eq. 15}$$

Equation 15의 확률질량함수식은 정해진 시간 동안에 이벤트가 발생할 횟수에 대한 기댓값을 α 라고 했을 때, 그 사건이 x 번 일어날 확률을 나타내고 있으며, 여기서 e 는 자연상수이다. 기댓값과 동일한 α 가 분산이다.

포아송 분포에서는 예를 들어 1일이라는 단위 시간을 보다 짧은 1시간, 1분으로 나눌 수 있으며, 더 짧은 단위 시간에서 이벤트가 발생할 확률은 전체 척도(scale) 중에서 항상 일정해야 한다.

확률질량함수식에서 포아송 분포는 이산 확률 분포로서, 특정 시간동안 고속도로 요금소를 통과하는 차량 대수, 1일 동안의 태어난 신생아 수 또는 사망자 수 등과 같은 확률적인 문제를 해결하는 데에 사용된다.

2.6 확률밀도함수의 검정

2.6.1 콜모고로프 스미르노프 검정(Kolmogorov-Smirnov Test)

콜모고로프 스미르노프 검정(Kolmogorov-Smirnov Test, K-S Test)는 수집된 표본의 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function, CDF)를 활용하여 입력 변수의 적합한 확률분포를 정의하기 위한 분포추정 방법이다.

데이터의 누적분포함수와 비교하고자 하는 분포의 누적분포함수 간의 최대 거리를 통계량으로 사용한다.

2.6.2 K-S Test의 순서

K-S Test을 진행하기 위해서는 먼저 표본 데이터에 대해 특정 확률분포를 가정한다. 확률분포에 적합한 파라미터 값을 구한다. 그리고 표본 데이터가 ‘데이터가 가정한 분포를 따른다’는 귀무가설과 ‘데이터가 가정한 분포를 따르지 않는다’는 대립가설을 설정한다. 수집한 데이터 정보를 적용하여 가정한 분포 테스트를 수행한다. 그리고 추정한 분포의 유의 수준의 KS 검정통계량을 바탕으로 가장 적합한 분포를 정의한다.

2.6.3 앤더슨 달링 검정(Anderson-Darling Test)

앤더슨 달링 검정(Anderson-Darling Test, A-D Test)도 K-S Test와 마찬가지로 확률분포의 검정 방법 중 하나이다.

하지만, 이 검정방법은 분포가 없는 방법으로서, 임계값이 특정 분포에 영향을 받지 않기 때문에, K-S test 보다 민감한 결과를 나타낼 수 있다.

2.6.4 A-D Test의 순서

A-D test를 수행하기 위해서는 먼저, 1) 데이터에 지정할 분포를 가정하고, 확률 분포에 적합한 파라미터 값을 구한다. 그리고나서, 데이터가 ‘가정한 분포를 따른다’는 귀무가설과 ‘가정한 분포를 따르지 않는다’는 대립가설을 설정한다. 그리고 데이터 정보를 적용하여 가정한 분포 테스트를 수행하고, 추정된 분포의 p-값 등을 바탕으로 입력 변수의 적합한 분포를 정의한다.

2.6.5 카이 제곱 검정(Chi-squared test)

카이 제곱 검정(Chi-squared test)은 두 표본의 동질성 또는 독립성을 검정할 때 주로 사용되는 검정 방법으로서, 모집단의 분포 추정에 사용될 수 있으며, 표본 데이터의 도수와 가정한 확률 분포로부터 얻은 기대도수를 비교하여 적합한 확률분포를 추정한다.

2.6.6 Chi-squared Test의 순서

Chi-squared test를 수행하기 위해서는 입력 변수가 ‘가정한 분포를 따른다’는 귀무가설과 ‘가정된 분포를 따르지 않는다’는 대립가설을 설정한다. 그리고 앞서 수집되었던 관측도수와 기대도수를 위한 도수분포에 사용될 도수분포표를 작성한 후에, 카이 제곱 검정 통계치를 산정한 후, 카이 제곱 분포표에서 제시된 임계값과 카이 제곱 검정 통계치를 비교하여, 카이 제곱 검정 통계치가 임계값 안에 존재하면 귀무가설을 따른다.

2.7 시뮬레이션 방법

2.7.1 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)

몬테카를로 시뮬레이션은 모델의 결과값의 불확실성을 추산하는 확률론적 방법이다. 확률적이거나 우연한 결과를 발생시켜주는 프로그램 등의 도구를 이용하여 수행하며, 독립 변수들의 확률밀도함수에 따라서 무작위한 표본 추출을 통해 우연한 결과를 발생시킨다. 일반적으로 데이터에 대한 정보가 있다면 그에 따른 분포를 선택하며, 경험에 따른 삼각분포나 균등분포를 적용하기도 한다.

2.7.2 몬테카를로 시뮬레이션 절차

Figure 13은 몬테카를로 시뮬레이션의 과정을 도식화한 것이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 산정하고자 하는 모델에 영향을 미치는 독립변수들을 선정하고, 그리고 이러한 독립변수들의 확률밀도함수를 바탕으로 난수를 생성한다. 그리고 모든 독립변수에 대해서 생성된 난수를 사용하여 산정 모델을 계산하고, 이렇게 계산된 값들을 이용하여 산정 모델의 평균값 등을 구할 수 있다.

Figure 13에서는 모델을 구성하고 있는 독립변수 x_1 , x_2 , x_3 의 확률밀도함수를 바탕으로 하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하게 되며, 이를 바탕으로 산정 모델 y_1 의 평균값을 구할 수 있다.

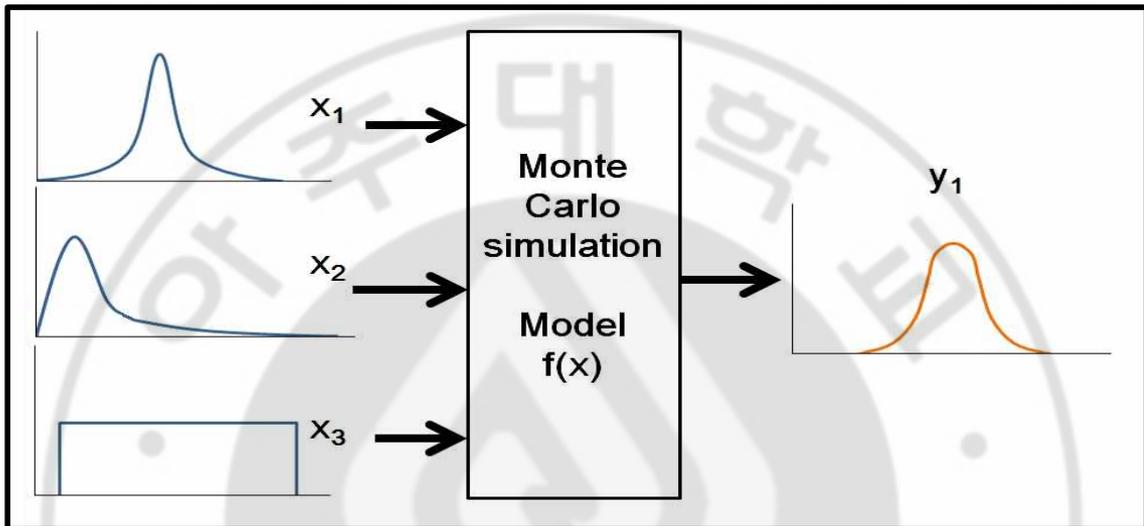


Figure 13. Process of Monte Carlo simulation

2.7.3 Bootstrap

Bootstrap은 비모수통계기법이다. Efron이 1981년에 처음 소개한 이래로 표본 크기에 따른 한계점을 극복하고 모수통계기법의 비현실성을 극복하기 위한 대안으로서 다양한 분야에서 이용되고 있다. Bootstrap의 요지는 하나의 표본을 통계적으로 이용하여 표본이 속한 모집단의 속성을 추론하는 것이다. Efron은 경험적 연구에서 Bootstrap을 통해 얻어진 모수 추정치들의 시뮬레이션 분포(simulated distribution)가 실제 모수의 분포에 가까운 근사치를 제공한다는 것을 발견하였다(Efron & Tibshirani, 1993; Efron, 1981).

Bootstrap은 반복표본추출(resampling) 기법의 하나로서 n 개의 관측치를 포함하는 표본을 가상의 모집단(virtual population)으로 활용하는 기법이다. 구체적으로, 이 기법은 모집단으로부터 추출된 표본을 (표본 속 관측치의 갯수 = n) 가상의 모집단으로 취급하고, 이 가상의 모집단으로부터 복구(replacement)의 과정을 거치면서, 원표본의 크기와 동일한 n 개의 관측치들을 포함하는 표본을 추출해 낸다. 이것이 하나의 Bootstrap 표본이 된다. 주요한 것은, 표본추출에 있어 복구의 과정을 거치므로 동일한 관측치들이 하나의 Bootstrap 표본 속으로 여러 번 추출될 수도 있으며, 극단적인 경우 모든 관측치들이 모두 동일한 관측치일 수 있다. 이 Bootstrap 표본을 이용하여 통계치를 계산한다. 이상의 과정을 매우 많이 반복함으로써 통계치들이 시뮬레이션 분포를 이루게 된다. 그 결과, 평균과 표준오차, 신뢰구간 등을 실제로 분포 상에서 계산할 수 있게 된다.

2.7.4 Bootstrap 절차

Figure 14은 Bootstrap 의 과정을 도식화한 것이다. Bootstrap은 n 개의 관측치를 포함하고 있는 원표본을 마치 모집단처럼 취급하고, 이 모집단으로부터 복구(replacement)의 과정을 거치면서, n 개의 표본을 포함하는 Bootstrap 표본을 K 만큼 반복해서 추출해 낸다. Bootstrap 표본의 크기(K)는 클수록 안정적인 결과를 산출한다. Figure 14에서 제시된 것처럼 복구의 활용으로 인해 하나의 Bootstrap 표본 속에 동일한 관측치들이 동시에 포함될 수 있다.

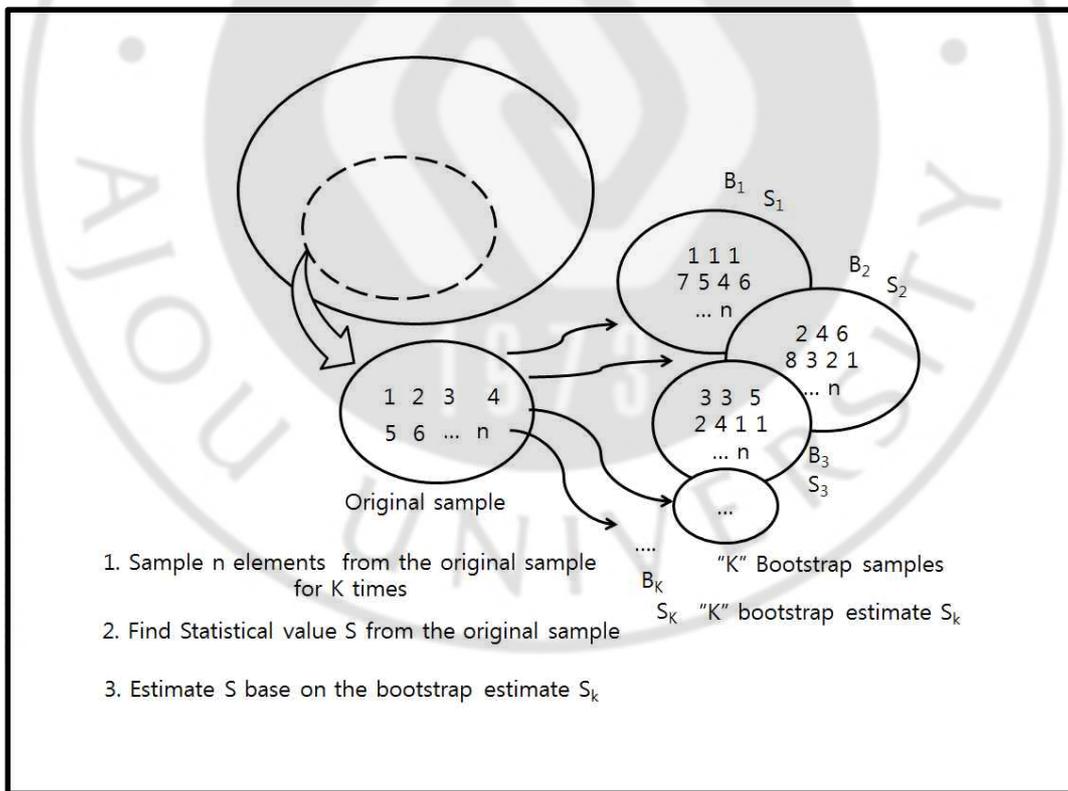


Figure 14. Process of Bootstrap

2.8 ANOVA(Analysis of variance)

ANOVA(Analysis of variance)는 3개 이상의 집단을 비교하는 분석방법으로서, 모집단의 분산이나 표준편차를 알지 못할 때 사용되기도 하며 모집단을 대표하는 표본으로부터 추정된 분산이나 표준편차를 갖고 실험하는 방법이다 (Choi et al, 2008)

독립변수가 1개 일 때 One-way ANOVA, 2개일 때 Two-way ANOVA, 3개 이상인 경우 Multi-way ANOVA, 종속변수가 2개 이상인 경우 MANOVA라고 불린다.

ANOVA를 수행하게 되면, 제곱 평균, F비, F기각치, P값이 제시되게 된다. 제시된 값 중 제곱 평균은 귀무가설이 옳다면 제곱합이 0이 되어야 하며, 0에 가까워질수록 귀무가설이 옳다. F비의 경우, F값이 클수록 집단 간 평균 차이가 없음을 뜻한다. P값은 신뢰구간95%에 대해서 5%를 유의수준으로 사용했을 때, $P < 0.05$ 라면 귀무가설을 기각하게 되며, 집단 간 평균에 통계적 차이가 있음을 뜻하며, P값이 작으면 작을수록 차이가 크다.

F 기각치는 5% 기각역에 해당하는 값으로서 F비가 F기각치보다 크면 P값은 0.05보다 작아지게 되어 유의해진다.

또한 ANOVA에서의 귀무가설은 일반적으로는 셋 이상의 집단의 평균에 차이가 없을 것이다. 만약 귀무가설이 기각되었다면 집단들의 평균이 차이가 있다고 해석할 수 있으나, 집단 간의 차이가 어디에 있는지는 알려주지 않기 때문에, 추후 각 집단 간의 차이를 검토할 필요가 있다.

2.9 Tukey HSD(Honest Significant Difference)

Tukey HSD(Honest Significant Difference)는 일대일 쌍을 비교하고자 할 때 사용되는 사후 검정방법으로서, 비교 대상들의 유의한 차이를 확인해야 하는 경우 사용한다. Figure 15에서와 같이 비교 대상들의 차이를 확인하는 과정에서 신뢰구간이 '0'을 포함하면 아무런 차이도 없음을 나타내며, '0'을 포함하지 않을 경우 유의한 차이를 갖는 것을 의미한다(Minitab 17 Statistical Software, 2010).

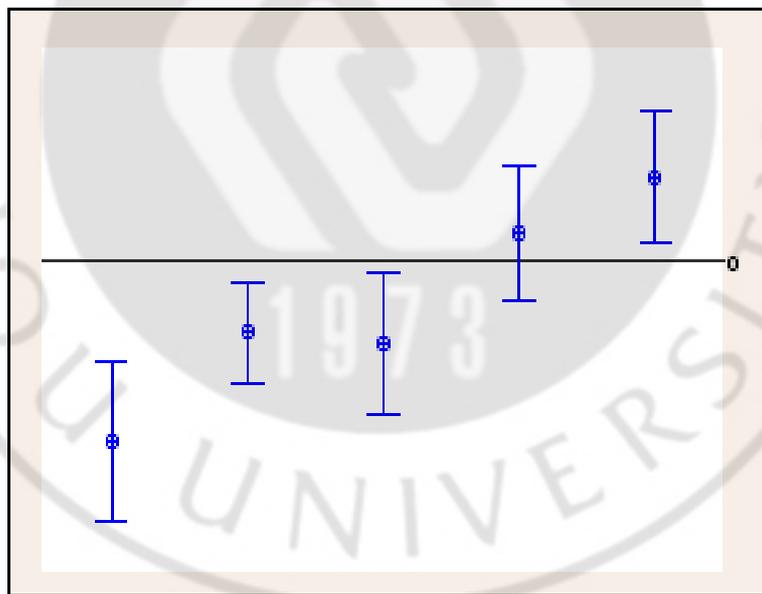


Figure 15. Example of Tukey test

Ⅲ. 연구 방법

- 3.1 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정
- 3.2 데이터 수집 및 분석
- 3.3 시뮬레이션을 통한 CH₄ 배출계수 산정

3.1 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정

3.1.1 분뇨에서 발생하는 CH₄ 배출계수 산정식

국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 IPCC 가이드라인(환경부, 2008)에서는 분뇨처리 시 발생하는 CH₄에 대해서, Tier 수준에 따른 방법론을 정의하고 있다. 낮게는 최소한의 자료를 요구하여 국가의 연간 가축 사육두수 데이터를 바탕으로 국가 온실가스 배출량을 산정하고, 높게는 국가의 가축 사육 환경 등을 연구하여 온실가스 배출량을 산정할 수 있는 국가 고유 방법론을 만들도록 하고 있다. Tier1은 미리 산정된 CH₄의 배출계수를 이용하는 방법이며, Tier2는 자료를 사용하여 CH₄ 배출계수를 직접 산정하는 방법으로서, Equation 16와 같으며, 본 연구에서 활용되었다.

$$EF = (VS \times 365 \text{ day/yr}) \times [Bo \times 0.67 \text{ kg/m}^3 \times \sum (MCF_S \times MS_S)] \dots \text{Eq. 16}$$

EF= CH₄ 배출계수, kg CH₄ /head/year

VS= 일간 휘발성 고형물 배설량, kg VS / head / day

1B₀= 배설된 분뇨의 최대 CH₄ 발생량, m³ CH₄ / kg VS

MCF_S= 분뇨처리 시스템 S의 대한 CH₄ 전환 계수, %

MS_S = 분뇨처리 시스템 S를 이용하는 비율

3.1.2 CH₄ 배출계수 산정시 세분류 기준

IPCC 가이드라인에서는 축종에 대해서, 연령, 무게, 암수 등의 세부 범주를 두어 관리하도록 권장하고 있다(IPCC, 2006). 온실가스 인벤토리 보고에서는 Tier1을 사용하기 때문에, 통계청에서 작성되는 가축사육두수 통계자료를 바탕으로 산정한 사육두수에 IPCC 가이드라인에서 제시하는 배출계수를 곱하는 형태로 온실가스 배출량이 산정되기 때문에, 한우에 대해서는 이러한 구분이 이뤄지지 않고 있다(온실가스종합정보센터, 2014)

이러한 상황 하에서, 본 연구에서는 문헌연구에서 다루었던 연구(Lee et al., under review)에서 제시하였던 가축의 체중에 따른 class 구분 형식이 이번 분뇨처리 CH₄ 배출계수 연구에 대해서도 사용될 수 있는지 적용해보았다. 해당 연구에서 제시한 체중별 분류 방법을 참조하여 본 연구에서는 CH₄ 배출계수 산정에 대해, Table 7과 같이, 체중을 기준으로 300kg 미만인 A, 300~500kg 인 B, 500kg 이상인 C, 3개의 class로 나누어서 배출계수 산정을 진행하였다.

Table 7. The three body weight classes for CH₄ emission factor of manure

Class	A	B	C
Body Weight	<300 kg	300 ~ 500 kg	>500 kg

3.2 데이터 수집 및 분석

3.2.1 일간 휘발성 고형물 배설량(VS) 데이터

3.2.1.1 데이터 수집 농가 선정

데이터 수집을 위한 농가 선정에는 가축의 사육규모별 가구수 등과 같은 정보를 확인할 수 있는 국내 통계자료를 활용하였다(통계청, 2016)

한우의 사육규모별 가구 수 및 마리 수 자료를 바탕으로 국내 한우 사육두수에 대해 과반수를 차지하는 20마리 이상 사육 농가를 분석데이터 수집대상으로 하였으며, 분뇨에 대한 자료를 수집하기 위해, 한우 관련 사육 단체 등을 통해 300곳의 농가 정보를 수집하고, 무작위 표본 추출을 통해, 30개 농가를 선정하였다.

3.2.1.2 샘플 채취 및 분석

농가를 방문하여, 분뇨 발설량에 대한 정보를 수집하였고 한우 분뇨 샘플을 채취하였다. 분석을 통해 체중별 분류에 따라 분뇨의 총 고형물에 대한 휘발성 고형물의 비율(VS/TS) 데이터를 수집하였다. 분뇨 샘플은 당일 채취 후, 아이스박스에 보관하여 이송 후, 복귀 즉시 실험을 원칙으로 하되, 여의치 않은 경우, 4°C 이하의 냉장고에 보관 후, 분석에 사용하였다.

분석내용은 Total Solids(TS) 와 Volatile solids(VS)이었으며, 분석 방법은 Standard Method(APHA: American Public Health Association, 1998)에 준하여 시행하였다.

분석과정은 다음과 같다.

- 1) 도자기로 만들어진 깨끗한 증발접시를 준비하여 muffle furnace에서 550°C 에서 1시간 동안 태운다.
- 2) 태운 증발접시를 데시케이터에 넣어 식힌 후, 무게(X)를 측정하고 사용 전 까지 데시케이터에 보관한다.
- 3) 분석할 시료의 성분이 균일하도록 25~50g을 취하여 증발접시에 담고 103~105°C 오븐에서 24시간 이상 물기를 증발시킨 후, 더 이상 무게 변화가 없을 때의 무게(Y)를 측정한다.
- 4) 2번 과 3번에서의 무게 차(Y-X)를 통해 TS 값을 구한다.
- 5) 3번의 무게 측정이 끝난 증발접시를 550°C muffle furnace에서 3시간동안 태우고 방냉한 후에 desiccator에서 수 시간 항량한 후 무게(Z)를 측정한다.
- 6) 3번과 5번에서의 무게 차(Y-Z)를 이용하여 VS값을 구한다.

3.2.2 배설된 분뇨의 최대 CH₄ 발생량(B₀) 데이터

배설된 분뇨의 최대 CH₄ 발생량(B₀)에 대해서는 기본 CH₄ 배출계수 산정에 사용되었던 데이터가 가이드라인에 제시되어 있으나(IPCC, 2006), 한우 분뇨를 이용했던 연구들을 바탕으로 산정한다.

3.2.3 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수(MCF) 데이터

분뇨처리 시스템에 대한 CH₄ 전환 계수(MCF)는 IPCC 가이드라인에서 연평균기온별로 분류하여 제공하고 있는 분뇨처리 시스템별 CH₄ 전환 계수 자료를 참고하며, 우리나라의 연평균기온인 13.6°C에 부합하도록 연평균기온 13°C에 해당되는 데이터를 수집한다.

3.2.4 분뇨처리 시스템별 이용율(MS) 데이터

분뇨처리 시스템을 이용하는 비율(MS)에는 2016년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 가축분뇨처리 부분의 N₂O 산정에 사용한 활동자료로서 보여주는 축종별 분뇨처리시설 이용비율 데이터, 가축 분뇨 처리방법별 농가수를 조사한 통계청의 통계자료와 2006 IPCC가이드라인에서 제시하는 분뇨처리 시스템의 정의를 이용하였다.

3.2.5 ANOVA 수행

ANOVA는 3개 이상의 집단을 분석하는 방법으로서, 본 연구에서는 체중을 기준으로 구분된 3개 class에 대해서 수행한다.

ANOVA 수행시, 가설을 준비하게 되며 귀무가설은 ‘모든 평균이 동일하다’이고 대립가설은 ‘평균이 모두 같지 않음’이다. 신뢰구간 95%에 대해서 5%를 유의수준으로 사용한다. ANOVA 결과에서 제시되는 P-값은 신뢰구간95%에 대해서 5%를 유의수준으로 사용했을 때, $P\text{-값} < 0.05$ 라면 귀무가설을 기각하게 되며, 집단 간 평균에 통계적 차이가 있음을 뜻하며, P-값이 작으면 작을수록 차이가 크다.

본 연구에서는 체중에 대한 VS의 ANOVA 결과에서 P-값이 0.05보다 작으면, 귀무가설을 기각하게 되어, 체중에 따른 class 구분에 유의한 차이가 있음을 의미한다. P-값이 0.05보다 크면, 귀무가설을 채택하게 되어 체중에 따른 분류에 대해서 유의한 차이가 없음을 의미한다.

3.2.6 Tukey HSD 수행

Tukey 비교를 통해서는 그룹 쌍 간의 차이가 통계적으로 유의한지를 검정하게 된다(Minitab 17 Statistical Software, 2010). 체중을 기준으로 분류된 class A, B, C에 대해서 A&B, A&C, B&C로 VS에 대한 평균 차이를 보여주게 되며, 각 구간에 대해 0이 포함되어 있다면, 해당하는 평균이 서로 같다는 의미이며, 0이 포함되어 있지 않다면, 해당하는 평균이 서로 유의하게 다를 수 있음을 의미하며, 그룹화될 수 있음을 의미한다.

ANOVA와 Tukey HSD 수행에는 Minitab 17 소프트웨어를 사용하였다.

3.3 시뮬레이션을 통한 CH₄ 배출계수 산정

3.3.1 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)

몬테카를로 시뮬레이션은 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식을 구성하는 변수들을 활용하게 되며, 산정식에 영향을 미치는 독립변수를 선정하여 이들의 확률밀도 함수를 바탕으로 모수를 생성하고 이렇게 생성된 변수들의 무작위값으로 CH₄ 배출계수를 산정한다. 몬테카를로 시뮬레이션에 대해서는 모수적인 방법과 비모수적인 방법 두 가지 방식에 대해 진행하게 된다.

모수적 및 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션은 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4 소프트웨어를 사용하여 구현되었으며, Monte Carlo 난수 샘플링 기술(10,000회 반복)로 평가되었다(Crystal Ball, 2014).

3.3.1.1 모수적 몬테카를로 시뮬레이션

모수적 몬테카를로 시뮬레이션의 특징은 모델 산정식의 독립변수들에 대해 확률밀도 함수를 추정하는 것이다. 이러한 모수적 몬테카를로 시뮬레이션의 수행순서는 다음과 같다.

- 1) 분뇨의 CH₄ 배출계수에 영향을 주는 입력 변수를 CH₄ 배출계수 산정식을 바탕으로 정의한다.
- 2) 입력 변수로 정의된 변수들의 확률밀도 함수와 이러한 확률밀도 함수에 적합한 파라미터 값을 추정한다.

- 3) 그 후, Transformation 방법을 통해 입력 변수의 확률밀도함수에서로부터 난수를 생성한다.
- 4) 생성된 난수값($n=10,000$)을 바탕으로 분뇨의 CH_4 배출계수를 산정한다.
- 5) 산정된 결과들을 바탕으로 CH_4 배출계수의 통계적 파라미터를 계산한다.

특정 입력 변수에 대해 적합하다는 확률밀도함수의 종류가 여러 가지의 경우에는 보통 제시되는 p-value가 0.05보다 큰 확률밀도함수들 중에서 가장 작은 AD statistic을 보이는 확률밀도함수를 특정 입력 변수에 적합한 확률밀도함수로 정의하게 된다(Crystal ball, 2014).

3.3.1.2 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션

비모수적 몬테카를로 시뮬레이션의 특징은 모수적 몬테카를로 시뮬레이션과 달리 확률밀도함수를 추정하지 않고, 변수 데이터를 활용한다는 점이다.

비모수적 몬테카를로 시뮬레이션의 수행순서는 다음과 같다.

- 1) 입력 변수로 정의된 변수들의 실제 데이터를 바탕으로 히스토그램을 그리게 된다.
- 2) 히스토그램에 맞는 임의의 변수 값을 생성한다.
- 3) 이를 바탕으로 분뇨의 CH_4 배출계수를 산정한다.
- 4) 산정된 결과들을 바탕으로 CH_4 배출계수의 통계적 파라미터를 계산한다.

3.3.2 Bootstrap

Bootstrap은 하나의 표본을 활용하여 모집단을 추정하는 방법이다.

모집단에서 추출된 표본을 가상의 모집단으로 취급하고, 이 가상의 모집단으로부터 무작위 복원추출을 통해 원표본의 크기와 동일한 포함하는 Bootstrap 표본을 작성하고 통계치를 계산한다. 이 과정을 매우 많이 반복하면 통계치들이 시뮬레이션 분포를 이루게 되며, 이를 바탕으로 평균과 표준오차, 신뢰구간 등을 실제로 분포 상에서 계산할 수 있게 된다.

Bootstrap의 순서는 다음과 같다.

- 1) Bootstrap에 사용될 입력변수들을 설정한다.
- 2) 이 입력변수는 여러 개의 데이터가 수집된 CH_4 배출계수 산정식의 변수인 VS, B_0 이며, 배출계수 산정에 이용되는 상수와, 1개의 단일 데이터만 수집된 변수들은 연산하여, VS 데이터 또는 B_0 데이터에 결합시킨다.
- 3) 2개의 변수를 바탕으로, Bootstrap에서는 2개의 입력변수들의 데이터 표본으로부터 무작위 복원 추출을 수행한다.
- 4) n개의 표본을 포함하는 Bootstrap 표본을 1000회 반복해서 추출해 낸다.
- 5) 생성된 1000개의 Bootstrap 표본으로 파라미터의 근사치를 산정한다.

Bootstrap은 R i386 version 3.0.1 소프트웨어를 사용하여 진행되었으며, Bootstrap을 수행하기 위해 작성한 R 소프트웨어의 code는 Figure 16와 같다.

```

## Bootstrap R code

x1<-c(VSA$VSAA)
# ---- Bootstrap을 위한 VS 입력변수에 데이터 포인트를 할당함
n<-length(x1)
x1bar<-mean(x1)
nboot<-1000
# ----1000회의 반복횟수
tmpdata1=sample(x1,n*nboot, replace=TRUE)
bootstrap_sample1<-matrix(tmpdata1, nrow=n, ncol=nboot)
bsmeans1<-colMeans(bootstrap_sample1)

x2<-c(Bo$Bo)
# ---- Bootstrap을 위한 Bo 입력변수에 데이터 포인트를 할당함
n<-length(x2)
x2bar<-mean(x2)
nboot<-1000
# ----1000회의 반복횟수
tmpdata2=sample(x2,n*nboot, replace=TRUE)
bootstrap_sample2<-matrix(tmpdata2, nrow=n, ncol=nboot)
bsmeans2<-colMeans(bootstrap_sample2)

bsEFA<-bsmeans1*bsmeans2
EFAbar<-x1bar*x2bar

deltastar<-bsEFA-EFAbar
sorteddeltastar<-sort(deltastar)
d975=sorteddeltastar[25]
d25=sorteddeltastar[975]
CI<-EFAbar-c(d25,d975)
print(CI)
mean(bsEFA)
sd(bsEFA)
CI[2]-CI[1]/2/mean(bsEFA)
EFAbar

```

Figure 16. R code used for bootstrap

IV. 연구 결과

- 4.1 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식의 데이터
- 4.2 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 산정
- 4.3 Bootstrap을 통한 산정
- 4.4 산정된 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 간 비교
- 4.5 결과에 대한 고찰

4.1 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식의 데이터

4.1.1 일간 휘발성 고형물 배설량

한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식에서 가축 1마리의 일간 휘발성 고형물 배설량(VS)에 대한 데이터는 농장에서 채취한 한우 분뇨 샘플을 사용한 실험을 바탕으로 도출되었다. Table 8과 같이 class 별 VS 평균값은 각각 1.03, 2.46, 2.02 kg VS/head-day으로, 기본 배출계수 산정에 사용되었던 북미 지역의 VS 값인 2.4 kg VS/head-day, 아시아 지역에 대한 VS값인 2.3 kg VS/head-day에 대해 class B의 VS 평균값이 유사하였다(IPCC, 2006). class C는 2.02 kg VS/head-day로 어느 정도 차이를 보였으며, class A가 1.03 kg VS/head-day로 가장 큰 차이를 보였다. VS에 대한 전체적인 데이터는 Table 9에 제시하였다.

Table 8. Average VS value by class

Unit : kg VS/head-day

Class	A (<300 kg)	B (300~500 kg)	C (>500 kg)
Manure	1.03	2.46	2.02

Table 9. Daily excreted VS data by class

Unit : kg VS/head-day

A (<300 kg)	B (300~500 kg)	C (>500 kg)
0.990	2.116	2.474
1.032	1.957	2.524
1.059	2.661	2.505
0.951	2.423	2.073
0.810	2.165	2.461
0.965	2.116	1.995
0.725	2.009	1.910
1.057	2.145	1.789
1.106	2.140	1.878
1.305	1.748	2.597
0.746	2.064	1.444
0.993	3.472	1.540
1.070	2.873	1.910
1.131	2.281	1.442
1.348	2.271	1.460
0.982	2.709	2.520
1.161	2.987	1.724
1.182	2.537	2.492
0.794	1.801	2.336
1.011	2.716	2.169
1.093	3.093	2.821
1.193	2.920	1.635
0.827	2.071	1.417
0.949	2.917	1.394
1.087	2.868	1.064
1.081	2.725	1.225
0.931	1.853	2.950
0.938	2.615	3.358
1.054	2.794	1.529
1.319	2.791	1.994

4.1.2 ANOVA & Tukey

수집된 일간 휘발성 고형물 배설량(VS) 데이터를 활용하여, 체중에 따른 class 구분이 이 연구에서도 적용가능한지 확인하기 위해 Minitab 소프트웨어를 사용하여 ANOVA와 Tukey HSD를 실시하였다.

Table 10. Result of ANOVA

Factor	DF (Degree of Freedom)	Adj SS (Sum of Squares)	Adj MS (Mean Square)	F-값	P-값
Body weight	2	32.21	16.1055	90.00	0.000
Error	87	15.57	0.1790		
Total	89	47.78			

ANOVA의 결과는 Table 10와 같았으며, 체중(Body weight)를 요인으로 하여 3가지 수준인 class A, B, C를 적용하였다.

여기서 자유도(Degree of Freedom, DF)는 통계적 추정을 할 때, 표본자료 가운데 모집단에 대한 정보를 주는 독립적인 자료의 수를 의미한다.

ANOVA 대상의 총 관측치 수를 n_T , 요인 수준의 수를 r 이라고 할 때, 요인의 자유도는 $r-1$ 으로서, $3-1=2$ 이다. 오차(Error)의 자유도는 n_T-r 로서, $3 \times 30 - 3 = 87$ 이며, 이를 합쳐서 n_T-1 로 $90-1=89$ 가 된다.

제곱합(Sum of Squares, SS)은 거리 제곱의 합으로서, \bar{y}_i 를 i 번째 요인 수준에서의 관측치의 평균이라고 하고, \bar{y}' 를 모든 관측치의 평균, y_{ij} 를 i 번째 요인 수준에서 j 번째 관측치의 값이라고 했을 때, 요인의 제곱합은 추정된 요인 수준 평균의 전체 평균으로부터의 편차로서, $\sum n_i(\bar{y}_i - \bar{y}')^2$ 로 계산될 수 있으며, 체중 요인의 제곱합은 32.21이다.

오차의 제곱합은 관측치의 해당 요인 수준 평균으로부터의 편차로서, $\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ 로 계산될 수 있으며, 여기서 계산된 오차의 제곱합은 15.57이다.

전체의 제곱합은 데이터의 전체적으로 발생한 분산된 정도인 변동의 크기를 보여주고, $\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}')^2$ 로 계산될 수 있으며, 여기서 계산된 전체의 제곱합은 47.78이다.

평균 제곱(Mean Square, MS)은 제곱합을 자유도로 나눈 값으로서, 요인의 평균 제곱은 16.1055이고, 오차의 평균 제곱은 0.1790이다. F-값은 요인의 평균 제곱을 오차의 평균 제곱으로 나눈 값으로서 $\frac{16.1055}{0.1790} = 90.00$ 이다.

P-값은 귀무가설이 참일 때, 최소한 실제로 계산된 값만큼의 검정 통계량을 얻을 확률로서, P-값이 0.05보다 작으면 귀무가설을 기각하게 된다.

Table 10의 ANOVA 결과에서 P-값은 0.000으로 $p < 0.05$ 으로서, ‘모든 평균이 동일하다’는 귀무가설을 기각하여 class 간 구분에 유의한 차이가 있음이 ANOVA를 통해 확인되었다.

Tukey HSD을 통해서는 Table 11과 같이 class A, B, C에 대해서 A&B, A&C, B&C로 VS에 대한 평균 차이를 확인하였다. 각 요인 수준에 대한 표본 평균을 구하여, $B - A$, $C - A$, $C - B$ 로 평균의 차이를 구한다. 모든 요인 수준

간 표본 평균의 차이들의 구간들이 0을 포함하고 있지 않으면, 해당하는 평균이 서로 유의하게 다르다는 의미를 갖고 있으며, Figure 17과 같이 모든 구간에 대해서 0이 포함되어 있지 않았고, 모든 평균이 서로 유의하게 달랐다.

그 결과, 소의 체중에 따른 구분인 class A, B, C가 이 연구의 CH₄ 배출계수에 대해서도 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 11. Result of Tukey HSD

Body Weight	Number of sample	Average	Group		
A	30	2.4614	D		
B	30	2.0169		E	
C	30	1.0296			F

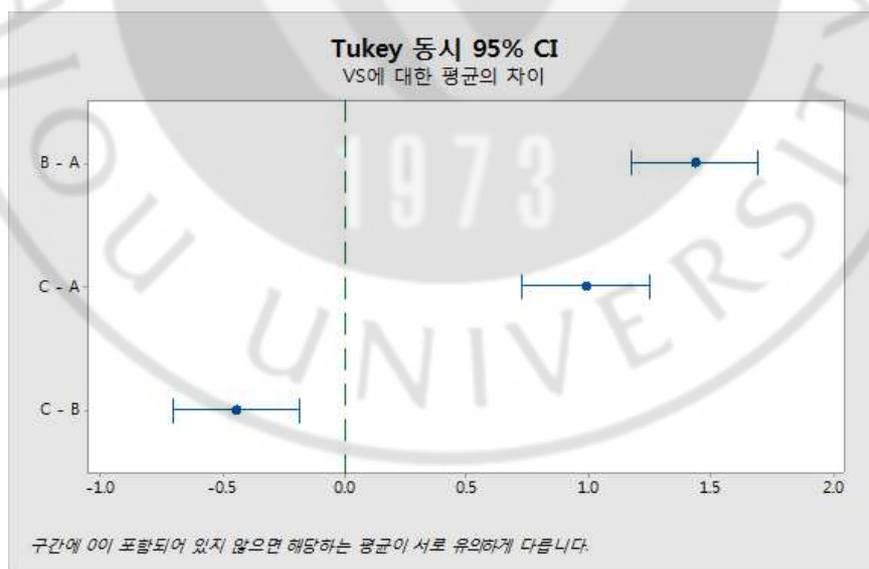


Figure 17. Result of Tukey HSD

4.1.3 배설된 분뇨의 최대 CH₄ 발생량

가축에게서 배설된 분뇨로부터 배출될 수 있는 CH₄의 최대 발생량(B₀)에 대한 데이터는 한우 분뇨를 취급하였던 관련 연구들을 통하여 수집하였으며 단위를 m³ CH₄ / kg VS로 통합하여 Table 12와 같이 0.083 (Won et al., 2014), 0.169 (허남효 외, 2008), 0.247(허남효 외, 2008), 0.306 (허남효 외, 2009) 의 결과를 얻었다. 2006 IPCC 가이드라인에서 이용되었던 B₀ 데이터는 북미와 아시아에 대해 각각 0.19, 0.1 m³ CH₄ / kg VS이었으며(IPCC, 2006), 수집된 데이터들의 사이에 위치해있었다.

Table 12. B₀ data from the related studies

	B ₀ data	Reference
Collected B ₀ data from the related studies	0.083 m ³ CH ₄ / kg VS	Won et al., 2014
	0.169 m ³ CH ₄ / kg VS	허남효 외, 2008
	0.247 m ³ CH ₄ / kg VS	허남효 외, 2008
	0.306 m ³ CH ₄ / kg VS	허남효 외, 2009
B ₀ data of North America	0.19 m ³ CH ₄ / kg VS	IPCC, 2006
B ₀ data of Asia	0.1 m ³ CH ₄ / kg VS	IPCC, 2006

4.1.4 분뇨처리 시스템

분뇨처리 시스템 관련 데이터는 분뇨처리시스템의 이용비율(MS)와 분뇨처리 시스템에서의 CH₄ 전환 계수(MCF)이다.

분뇨처리시스템의 이용비율(MS)와 관련된 국내 통계 자료의 경우, Table 13 과 같이 크게 자체처리(Self management)와 위탁처리(Consigned management)로 구분되어 있으며, 자체처리는 세부적으로는 퇴비화(Composting), 액비화(Liquefy), 정화(Purification), 기타(Other)로 분류되어 있다(통계청, 2015).

Table 13. Usage for types of manure management (통계청, 2015)

Types	Usage rate
Self management-Composting	94.36%
Self management-Liquefy	0.37%
Self management-Purification	0.35%
Self management-Other	2.86%
Consigned management	2.06%
Total	100.00%

한우 농가의 분뇨처리 방법 이용비율은 가구 기준으로 했을 때, Table 13의 우측에 기술된 바와 같이 퇴비화(Self-Composting)가 94.36%이었고, 액비화(Self-Liquefy)가 0.37%, 정화(Self-Purification)가 0.35%, 기타 처리(Self-Other)가 2.86%, 그리고 위탁처리(Consigned management)가 2.06%였다.

하지만, 국내 통계 자료에서 사용되고 있는 이러한 분류방식은 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 분뇨처리방법의 분류방식과 차이를 보이고 있어 분뇨처리 방법의 분류를 IPCC 가이드라인에 맞춰 새롭게 구분하였다. 한우 분뇨처리방법에 대해 분뇨처리 방식이 명확한 퇴비화를 제외한 액비화, 정화, 기타, 위탁처리로 이뤄진 방법들을 기타로 구분하여 Table 14과 같이 재정립하였다.

Table 14. Rearranged types of manure management

Types	Rearranged types	Rate
Self management-Composting	Solid storage	94.36%
Self management-Liquefy	Other	5.64%
Self management-Purification		
Self management-Other		
Consigned management		
Total	Total	100.00%

분뇨처리 시스템에서의 CH₄ 전환 계수(MCF)의 경우, 국내에서 진행된 참고할만한 연구가 없어 Table 15의 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 분뇨처리 시스템별 CH₄ 전환 계수(MCF) 데이터를 활용하였다.

분뇨처리방법에 대해서는 새로이 분류한 처리방법에 따라 고체저장(Solid storage)의 MCF 2%를 적용하고, 기타(Other)의 MCF 1%를 적용하였다.

Table 15. MCF of the manure management system (IPCC, 2006; 환경부, 2008)

Unit : %

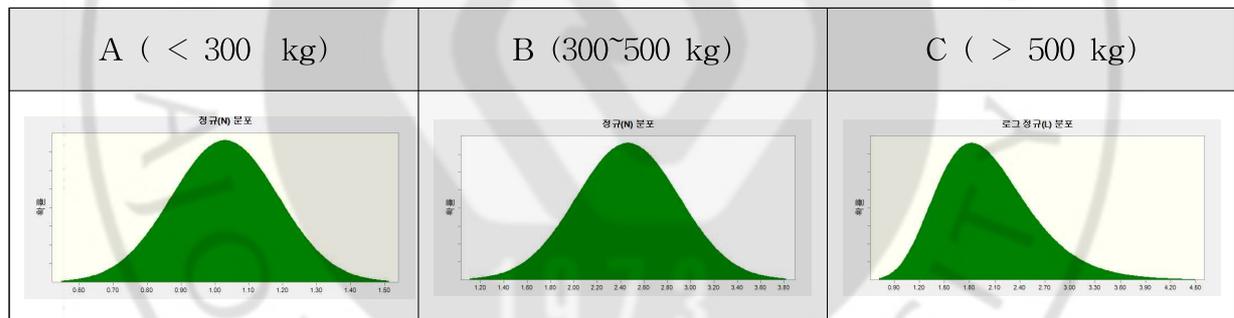
Types	MCF
Lagoon	71
Liquid/Slurry	22
Solid storage	2
Drylot	1
Pasture/Range/Paddock	1
Daily spread	0.1
Digester	10
Burned for fuel	10
Other	1

4.2 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 산정

4.2.1 모수적 몬테카를로 시뮬레이션 결과

모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 산정하였다. CH₄ 배출계수의 변수 중 하나인 VS에 대해서 확률밀도함수를 추정하였으며, Table 16과 같이 class A의 VS는 정규 분포, class B의 VS는 정규 분포 그리고 class C의 VS는 로그 정규 분포를 따르는 것으로 나타났다.

Table 16. Distribution of VS data



class A VS 데이터의 정규 분포의 평균은 1.03이고, 표준편차는 0.16이었다. class B VS 데이터의 경우, 정규 분포의 평균은 2.46, 표준편차는 0.44으로 나타났다. class C VS 데이터의 로그 정규 분포의 평균은 2.02, 표준편차는 0.58이었다.

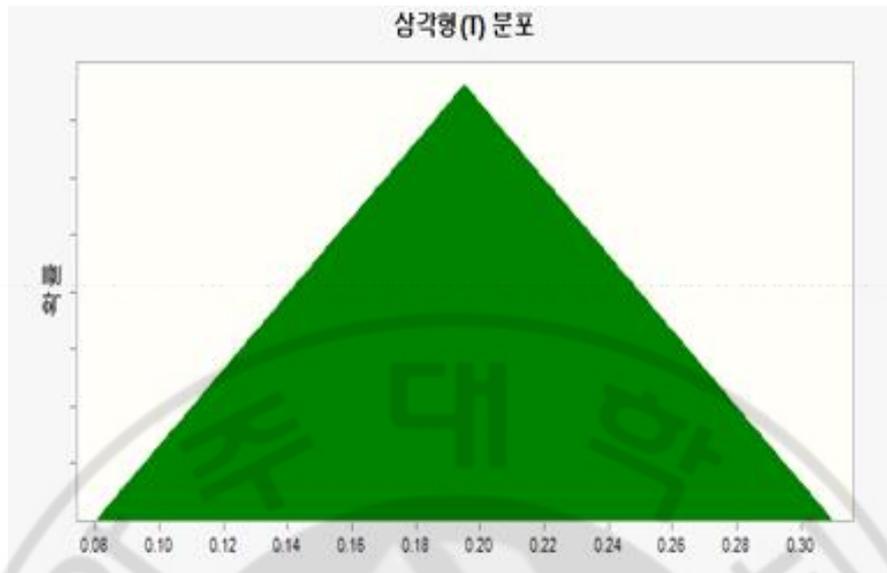


Figure 18. Triangular distribution of B_0 data

B_0 의 경우, 관련 연구 등을 통해 수집한 데이터가 제한적이었기에 문헌연구에서 표본 데이터를 부분적으로만 사용 가능한 경우에 적용할 수 있는 삼각형 분포로 추정하였다. Figure 18과 같은 형태를 띄게 되며, 데이터를 바탕으로 최소값은 0.083, 최대값은 0.306으로, 이들의 중간값인 0.1945를 최빈값으로 하였다.

MS와 MCF에 대해서는 고체 저장(Solid storage)와 기타(Other)에 대한 분노 처리 시스템 별 이용률과 CH_4 전환 계수를 적용하여 확률밀도함수를 추정하지 않고 해당 데이터를 바로 사용하였다.

확률밀도함수를 추정한 VS, B₀ 데이터와 MS, MCF 데이터를 가지고 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용하여 CH₄ 배출계수를 산정하였다.

class A의 CH₄ 배출계수의 분포는 Figure 19와 같이 도출되었다. 평균 CH₄ 배출계수는 0.95 kg CH₄/head-year이었으며, 표준편차는 0.27이었다. 95% 신뢰 구간은 [0.48, 1.52] kg CH₄/head-year이었으며, U 값은 55%였다.

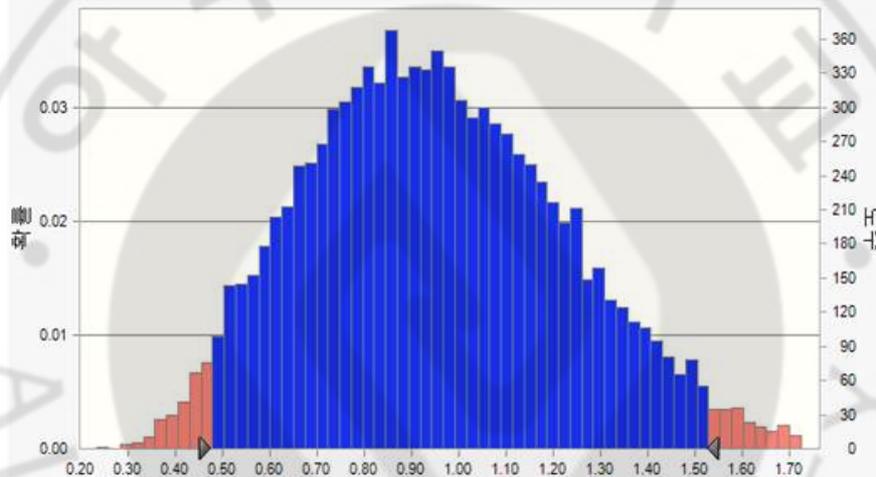


Figure 19. Distribution of class A CH₄ emission factor (parametric MCS)

class B의 CH₄ 배출계수의 분포는 Figure 20와 같이 도출되었다. 평균 CH₄ 배출계수는 2.28 kg CH₄/head-year이었으며, 표준편차는 0.69이었다. 95% 신뢰 구간은 [1.11, 3.75] kg CH₄/head-year이었다. U 값은 58%였다.

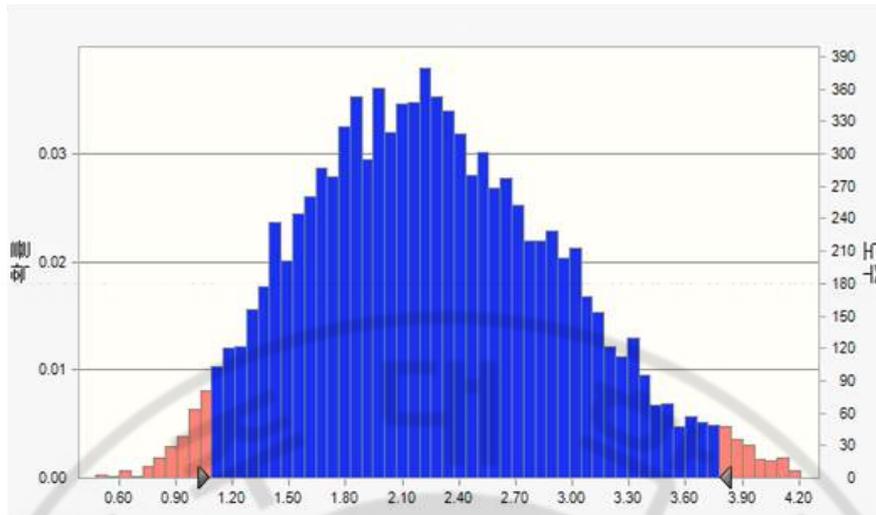


Figure 20. Distribution of class B CH₄ emission factor (parametric MCS)

class C의 CH₄ 배출계수의 분포는 Figure 21와 같이 도출되었다. 평균 CH₄ 배출계수는 1.88 kg CH₄/head-year이었으며, 표준편차는 0.72이었다. 95% 신뢰 구간은 [0.81, 3.60] kg CH₄/head-year이었다. U 값은 74%였다.

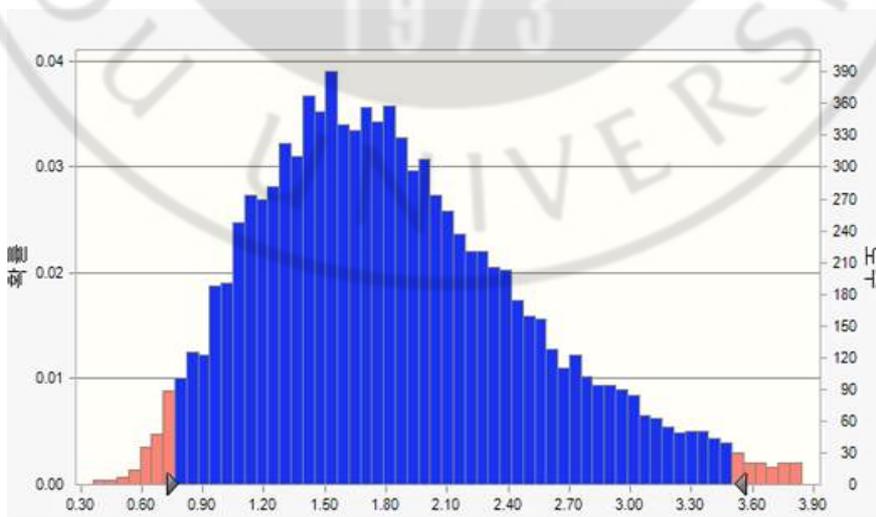


Figure 21. Distribution of class C CH₄ emission factor (parametric MCS)

Table 17과 같이 모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 도출된 CH₄ 배출계수를 각 class 별로 정리하였다.

Table 17. CH₄ emission factors by class (parametric MCS)

Unit : kg CH₄/head-year

	A (< 300 kg)	B (300~500 kg)	C (> 500 kg)
Avg. EF	0.95	2.28	1.88
Std	0.27	0.69	0.72
95% C.I.	[0.48, 1.52]	[1.11, 3.75]	[0.81, 3.60]
U (%)	55	58	74

4.2.2 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션 결과

비모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 한우 분뇨의 CH_4 배출계수를 산정하였다. 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 하기 위해서는 히스토그램 분포를 작성해야 하며 이를 위해서는 데이터를 분석하여 데이터들을 분류할 수 있는 구간을 산정해야 하고, 각 구간에 대해 해당되는 데이터를 포함시키게 된다. VS와 B_0 에 대해서 Figure 22과 같은 히스토그램 분포를 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 시행하였다. B_0 의 경우, 4개의 데이터에 대해 4개의 구간으로 나뉘어 히스토그램이 작성되었다..

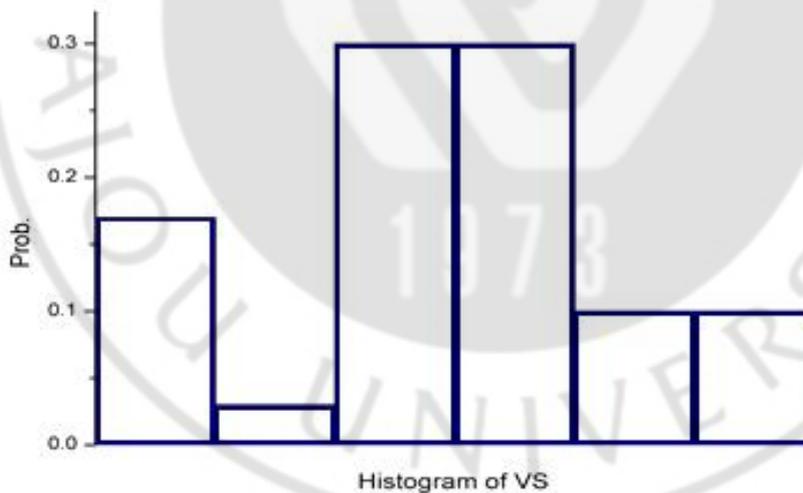


Figure 22. Histogram of VS

산정된 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 값의 평균과 표준편차, 95% 신뢰구간을 Table 18와 같이 정리하였다. class 별 평균 CH₄ 배출계수 값은 각각 0.96, 2.28 그리고 1.87 kg CH₄/head-year 값을 갖는 것으로 나타났다. 신뢰구간은 class A, B, C에 대해 각각 [0.4, 1.63], [0.94, 4.07], [0.68, 3.68] kg CH₄/head-year이었다. U 값은 각각 64%, 69%, 80%으로 나타났다.

Table 18. CH₄ emission factors by class (non-parametric)

Unit: kg CH₄/head-year

	A(<300kg)	B(300~500 kg)	C(> 500 kg)
Avg. EF	0.96	2.28	1.87
Std	0.35	0.86	0.81
95% C.I.	[0.4, 1.63]	[0.94, 4.07]	[0.68, 3.68]
U (%)	64	69	80

4.3 Bootstrap을 통한 산정

한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 산정식의 VS와 B₀를 가지고 Bootstrap을 수행하여 CH₄ 배출계수를 산정하였다. Table 19와 같이 class A, B, C의 평균 CH₄ 배출계수는 각각 0.99, 2.36 그리고 1.91 kg CH₄/head-year으로 나타났으며, 95% 신뢰구간은 각각 [0.57, 1.37], [1.43, 3.36], [1.12, 2.72] kg CH₄/head-year 이었다. Class별 U값은 각각 40%, 41%, 42% 이었다.

Table 19. CH₄ emission factors by class (Bootstrap)

	kg CH ₄ /head-year		
	A(< 300 kg)	B(300~500 kg)	C(> 500 kg)
Avg. EF	0.99	2.36	1.91
Std	0.21	0.48	0.42
95% C.I.	[0.57, 1.37]	[1.43, 3.36]	[1.12, 2.72]
U (%)	40	41	42

4.4 산정된 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수 간 비교

각 시뮬레이션 방법을 사용하여 산정된 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수들을 class 별로 모아서 비교하였다.

Figure 23는 시뮬레이션 방법별로 도출된 class A의 CH₄ 배출계수이다. 평균 배출계수는 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap에 대해 각각 0.95, 0.96, 0.99 kg CH₄/head-year로 Bootstrap의 평균 배출계수가 가장 컸다.

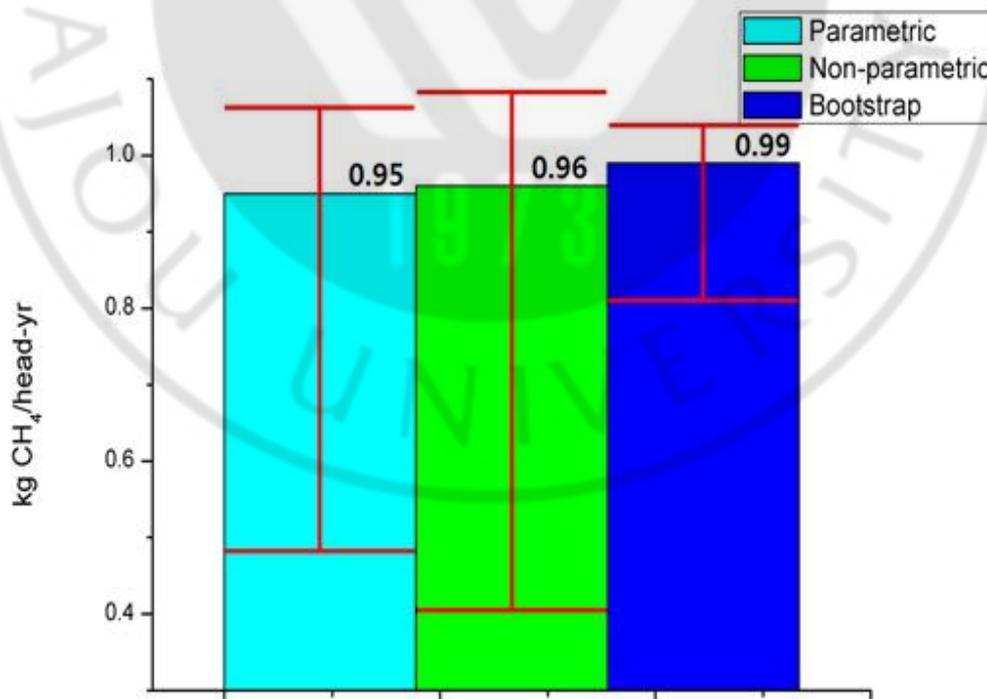


Figure 23. CH₄ emission factors of class A

Table 20과 같이 시뮬레이션 방법별로 도출된 class A의 배출계수들을 비교하였다. 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap 별로 95% 신뢰구간은 각각 [0.48, 1.52], [0.4, 1.63], [0.57, 1.37] kg CH₄/head-year 로 Bootstrap의 신뢰구간 너비가 가장 작게 나타났으며, U값 또한 Bootstrap에서 40%로 가장 작았다.

Table 20. Comparison of simulation results (class A)

Unit : kg CH₄/head-year

A (< 300 kg)	Parametric MCS	Non-parametric MCS	Bootstrap
Avg. EF	0.95	0.96	0.99
Std	0.27	0.35	0.21
95% C.I.	[0.48, 1.52]	[0.4, 1.63]	[0.57, 1.37]
U (%)	55	64	40

Figure 24는 시뮬레이션 방법별로 도출된 class B의 CH₄ 배출계수이다. 평균 배출계수는 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap에 대해 각각 2.28, 2.27, 2.36 kg CH₄/head-year로 Bootstrap의 평균 배출계수가 가장 컸다.

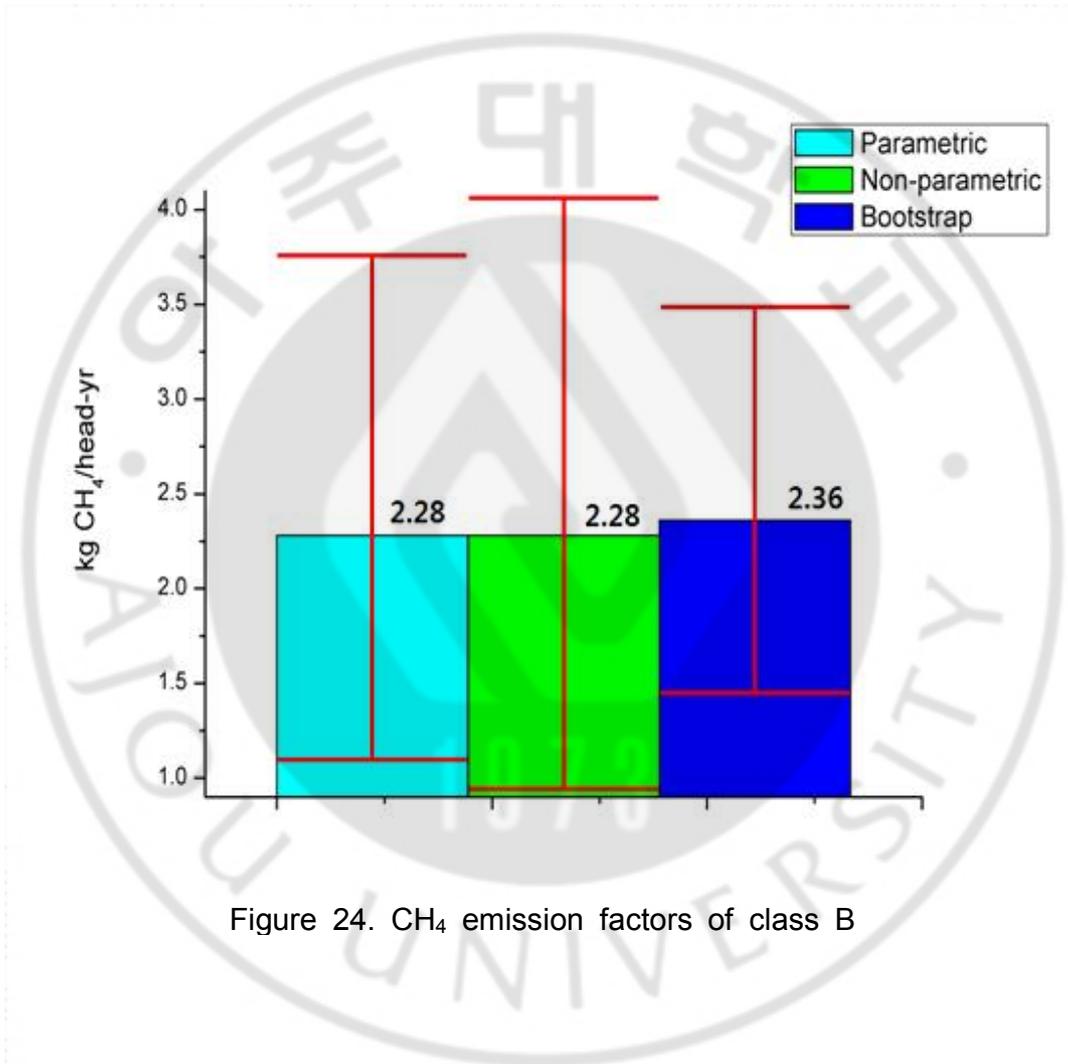


Figure 24. CH₄ emission factors of class B

Table 21과 같이 시뮬레이션 방법별로 도출된 class B의 배출계수들을 비교하였다. 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap 별로 95% 신뢰구간은 각각 [1.11, 3.75], [0.94, 4.07], [1.43, 3.36] kg CH₄/head-year로 Bootstrap의 신뢰구간 너비가 가장 작게 나타났으며, U값 또한 Bootstrap에서 41%로 가장 작았다.

Table 21. Comparison of simulation results (class B)

Unit : kg CH₄/head-year

B(300~500 kg)	Parametric MCS	Non-parametric MCS	Bootstrap
Avg. EF	2.28	2.28	2.36
Std	0.69	0.86	0.48
95% C.I.	[1.11, 3.75]	[0.94, 4.07]	[1.43, 3.36]
U (%)	58	69	41

Figure 25는 시뮬레이션 방법별로 도출된 class C의 CH₄ 배출계수이다. 평균 배출계수는 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap에 대해 각각 1.88, 1.87, 1.91 kg CH₄/head-year로 Bootstrap의 평균 배출계수가 가장 컸다.

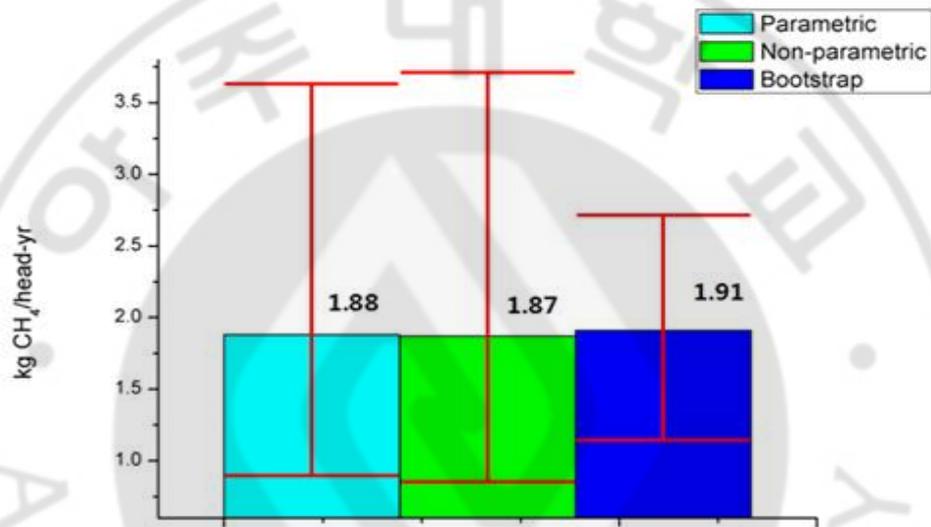


Figure 25. CH₄ emission factors of class C

Table 22과 같이 시뮬레이션 방법별로 도출된 class C의 배출계수들을 비교하였다. 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap 별로 95% 신뢰구간은 각각 [0.81, 3.60], [0.68, 3.68], [1.12, 2.72] kg CH₄/head-year 로 Bootstrap의 신뢰구간 너비가 가장 작게 나타났으며, U값 또한 Bootstrap에서 42%로 가장 작았다.

Table 22. Comparison of simulation results (class C)

Unit : kg CH₄/head-year

C(> 500 kg)	Parametric MCS	Non-parametric MCS	Bootstrap
Avg. EF	1.88	1.87	1.91
Std	0.72	0.81	0.42
95% C.I.	[0.81, 3.60]	[0.68, 3.68]	[1.12, 2.72]
U (%)	74	80	42

모든 class에서 Bootstrap을 적용한 산정 결과가 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 산정 결과보다 더 작은 신뢰구간 너비를 보였으며, U값 또한 가장 작았다.

이러한 점에 비추었을 때, 이 연구의 CH₄ 배출계수 산정에서 Bootstrap이 가장 유효한 시뮬레이션 방법이라고 볼 수 있다.

기본 분뇨 CH₄ 배출계수(1 kg CH₄/head-year)에 대해서, class A에서는 모든 시뮬레이션이 95% 신뢰구간에 대해 기본 배출계수를 포함하고 있었으나, class B에서는 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션에서만 95% 신뢰구간에 대해 기본 배출계수를 포함하고 있었고, class C에서는 모수적/비모수적 시뮬레이션이 95% 신뢰구간에 대해 기본 배출계수를 포함하고 있었다.

이는 곧 기본 분뇨 CH₄ 배출계수로는 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 대표할 수 없으며, 이 연구의 체중에 따른 분류에 의해 분뇨의 CH₄ 배출계수가 개발되어야 한다고 볼 수 있다.

4.5 결과에 대한 고찰

4.5.1 체중 증가에 비례하지 않는 체중 분류별 CH₄ 배출계수

현재, 체중에 따른 분류인 class A, B, C에 대해 도출된 배출계수들은 체중 증가에 비례하지 않고, A, C, B 순으로 높았다.

이러한 특성은 적용된 체중 분류가 성장 단계와 유사하기 때문으로 추측된다. 체중 분류를 거세한우의 사육단계별로 변환했을 때, A, B, C는 육성기, 비육전기, 비육후기와 유사하며, 이러한 사육단계별로 사료급여 기준은 차이를 보인다. 급여되는 사료 중 배합사료는 체중이 증가함에 따라 꾸준히 증가하나, 조사료는 사육단계별로 차이를 보인다. 육성기의 경우, 평균 2.98kg/day, 비육전기의 경우, 3.03kg/day, 비육후기는 0.96kg/day로 육성기, 비육전기에 걸쳐 증가했다가 비육후기에는 감소하게 된다. 또한 조사료의 종류도, 육성기에서는 건초만을 급여하고, 비육전기에서는 건초의 양이 줄고, 볏짚을 급여하게 되며, 비육후기에서는 볏짚만을 급여하다가 점차 급여량을 줄이게 된다(권웅기, 2009).

국내 한우에 대해 진행된 연구(설용주 외 2011; 설용주 외 2012; 오영균 외 2014)에 따르면, 한우 장내발효로 인한 CH₄ 배출계수도 성장단계별로 차이를 보였다. 이에 미뤄봤을 때, 체중 증가에 비례하지 않는 체중 분류별 CH₄ 배출계수는 사육 단계에 따른 사료 급여 차이로 인한 결과로 보인다.

4.5.2 분뇨처리 시스템 데이터의 분포 가정

이 연구에서는 분뇨처리 시스템 이용율(MS)과 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수(MCF) 데이터에 대해서 국내 통계 자료와, IPCC 가이드라인의 기본 데이터를 활용하였다. 이들은 단일 데이터로서, 다른 VS, B₀와 같이 분포가 추정되지 못했다. 그래서 이들에 대해서, 분포를 가정해보았다. IPCC 가이드라인에서는 단일한 분뇨처리 시스템에만 거의 의존하는 국가일 경우, 분뇨처리 시스템 이용율 데이터의 불확실성은 10%이하일 것으로 기술하고 있으며, 우리나라 또한 한우 분뇨의 경우 퇴비화에 대부분 의존하고 있어, 이를 적용해보았다. 분뇨처리 시스템 이용율과 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수 데이터에 대해 10% 불확실성을 가정하고, 균등분포로 추정하였다.

Table 23과 같이 균등분포로 추정한 데이터들을 바탕으로 모수적 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 결과와 기존 결과와 비교해보았다.

데이터들을 균등분포로 추정했을 때, class A, B, C의 95% 신뢰구간은 각각 [0.48, 1.52]에서 [0.47, 1.56]으로, [1.11, 3.75]에서 [1.08, 3.81]으로, [0.81, 3.60]에서 [0.79, 3.60]으로 더 길어졌으며, class A, B의 U값도 증가하였다.

이로 미뤄보았을 때, 분뇨처리 시스템에 대한 데이터도 분뇨의 CH₄ 배출계수 모델에 있어, 중요하다고 볼 수 있으며, 국내 분뇨처리 시스템에 대해서 연구가 진행되어야 함을 알 수 있다.

Table 23. Comparison of CH₄ emission factor by setting MCF, MS as constant and uniform distribution (parametric MCS)

Unit : kg CH₄/head-year

		A (< 300 kg)	B (300~500 kg)	C (> 500 kg)
MCF, MS as constant	Avg. EF	0.95	2.28	1.88
	Std	0.27	0.69	0.72
	95% C.I.	[0.48, 1.52]	[1.11, 3.75]	[0.81, 3.60]
	U (%)	55	58	74
		A (< 300 kg)	B (300~500 kg)	C (> 500 kg)
MCF, MS as uniform distribution	Avg. EF	0.96	2.28	1.89
	Std	0.28	0.71	0.73
	95% C.I.	[0.47, 1.56]	[1.08, 3.81]	[0.79, 3.60]
	U (%)	57	60	74

4.5.3 해외 육우 분뇨 CH₄ 배출계수와의 비교

4.5.3.1 뉴질랜드

뉴질랜드는 앞서 2장에서 논의되었던 것처럼 국가 온실가스 보고서(National Inventory Report, NIR)를 통해 육우의 분뇨에 대한 CH₄ 배출계수 모델식을 공개하고 있다(Ministry for the Environment, 2017).

하지만, 배출계수 산정을 위해서는 육우 1마리가 1개월동안 배설하는 분뇨의 건조 질량(Faecal dry matter, FDM; kg/head/month)에 대한 자료가 필요하다. 이에 대한 자료는 수집할 수 없었기 때문에, 이번 연구에서의 한우 분뇨에 대한 체중 분류별 평균 TS 데이터(A: 1.187 kg/day, B: 2.856 kg/day, C: 2.781 kg/day)를 대입해보았다. 또한 뉴질랜드 육우 분뇨 CH₄ 배출계수 모델식에 사용되는 0.00098 kg CH₄/kg FDM은 뉴질랜드 젖소에 대한 연구 결과로부터 얻어진 [0.00092, 0.00104] kg CH₄/kg FDM을 기초로 하고 있어, 각 체중 분류별 데이터에 대해 적용해보았다(Saggar et al., unpublished; Sherlock et al., unpublished).

Table 24. Assumed methane emission factor of New Zealand cattle manure

Unit : kg CH₄/head-year

FDM	A (< 300 kg)	B (300~500 kg)	C (> 500 kg)
[0.00092 kg CH ₄ /kg FDM]	0.39	0.95	0.92
[0.00098 kg CH ₄ /kg FDM]	0.42	1.01	0.98
[0.00104 kg CH ₄ /kg FDM]	0.44	1.07	1.04

대입한 결과, 뉴질랜드 육우가 배설하는 분뇨의 건조 질량이 한우의 체중별 분류에 따른 분뇨의 건조 질량과 동일할 경우, class A, B, C에 대해서 평균 CH₄ 배출계수는 0.42, 1.01, 0.98 kg CH₄/head-year인 것으로 나타났으며, 이는 한우 분뇨의 평균 CH₄ 배출계수와 비교했을 때, 44.1~52.2% 수준이었다.

이러한 결과는 뉴질랜드 육우가 배설하는 분뇨의 건조 질량이 우리나라보다 많은 경우나, 국내 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수에 의해 영향 받기 때문에 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수 연구의 중요성을 확인할 수 있다.

4.5.3.1 미국

미국의 경우, 국가 온실가스 보고서(National Inventory Report, NIR)를 통해 육우의 분뇨에 대한 CH₄ 배출계수 모델식 뿐만 아니라, 함축적인(implied) CH₄ 배출계수를 공개하고 있다(US EPA, 2017).

Table 25. Implied methane emission factors of United States

Unit : kg CH₄/head-year

	2011	2012	2013	2014	2015
Beef Cattle	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7

Table 25에서 제시하고 있는 미국의 육우 분뇨에 대한 함축적인 CH₄ 배출계수와 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 비교했을 때, class A의 95% 신뢰구간에 포함되지는 않았지만, class B와 class C의 95% 신뢰구간에는 포함되어 있었으며, class C의 평균 CH₄ 배출계수(1.88 kg CH₄/head-year)에 가장 가까웠다.

V. 결론



이 연구에서는 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발하고자 하였으며, 이를 위해 체중에 따른 분류를 적용하였고, CH₄ 배출계수 산정식을 분석해 산정식을 구성하는 변수들에 필요한 데이터를 수집하고 분석하였다. 수집 및 분석된 데이터를 바탕으로 모수적 몬테카를로 시뮬레이션, 비모수적 몬테카를로 시뮬레이션, Bootstrap 등의 통계적 시뮬레이션 방법을 사용하여 체중을 기준으로 분류한 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발하였다.

이 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수는 체중별 class A, B, C에 대해 각각 0.99, 2.36, 1.91 kg CH₄/head-year였다.
- 2) 체중별 class A, B, C에 대한 위 배출계수의 신뢰구간은 각각 [0.57, 1.37], [1.43, 3.36] 그리고 [1.12, 2.72] kg CH₄/head-year였다.
- 3) 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발하고자 할 때, 성장 단계와 유사한 소의 체중을 고려해야 한다.
- 4) Bootstrap 방법을 사용했을 때의 신뢰구간 너비와 불확실성이 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용했을 때의 신뢰구간 너비와 불확실성보다 더 작았으며, 이 연구의 CH₄ 배출계수 모델에 있어 Bootstrap 방법이 다른 방법보다 더 유효하였다.
- 5) 한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 단일한 값이 아닌 구간으로서 제시하였다.

VI. 향후 연구 방향



한우 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발한 본 연구 결과를 토대로 향후 수행되어야 할 연구방향은 다음과 같다.

1) 배출계수 산정시 축종 분류의 구체화

본 연구에서는 체중을 기준으로 3개 분류에 따라 분뇨의 CH₄ 배출계수를 개발했다. 그러나 이러한 분류방법은 이 연구의 CH₄ 배출계수 모델에서는 적합한 결과를 보여주었으나, 다른 연구에서는 적용되지 않을 수 있다. 축종에 대한 분류를 구체화하면 더욱 정확한 배출계수와 배출량을 추정할 수 있기 때문에 축종에 대한 연구를 진행할 필요가 있다.

2) 분뇨처리 시스템 분류에 대한 국내 통계와 국제 지침 일치

국내 분뇨처리 시스템 이용률에 대해 통계청의 자료를 이용하고자 하였으나, 국내 통계에서 분뇨처리 시스템에 대해 가진 분류방법과 국제 지침 상의 분류방법이 맞지 않는 부분이 있었다. 이러한 차이를 해소하기 위해 통계 상 분뇨처리방법 분류에 대한 개편과 분뇨처리 시스템에 대해 더 세부적인 분류를 할 수 있도록 뒷받침할 수 있는 연구가 필요하다.

3) 국내 분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수 구축

분뇨처리 시스템의 CH₄ 전환 계수의 경우, 장기간에 걸친 측정과 실험을 요구한다. 국내 분뇨처리 시스템의 경우, 축산농가에서 직접 처리하는 비율이 높은 편이며, 이에 따라 다양한 분뇨처리 시스템 관련 연구들이 진행되고 있다. 이러한 상황에서, 온실가스 배출량 감축에 대한 중요성이 증대되는 만큼 국내 분뇨처리 시스템에 대한 CH₄ 전환 계수 개발이 필요하다.

VII. 참고문헌



관계부처합동. (2016). 제1차 기후변화 대응 기본계획, 보도자료.

관계부처합동. (2016). 2030 국가온실가스감축 기본로드맵, 보도자료.

권응기. (2009). 한우농장 자가생산 비육밀소 이용 고급육 생산기술. 월간한우 2009년 5월호.

김종수, 김성일. (2002). 유기성폐기물 혐기소화 기술동향 및 향후전망. 유기성 자원학회 학술발표대회논문집, 217-223.

농림부. (2000). 가축분뇨 자원화 및 이용기술 개발, 농촌진흥청 축산기술연구소, 최종연구보고서.

농촌진흥청. (2016). 국내적용 온실가스 배출량 산정 모델식 개발 및 구축 DB 활용 연구 1차년도 평가보고서.

농촌진흥청 국립축산과학원. (2014). 스마트한 축산 통계 30.

박규현, 유용희, 정종원, 최동윤, 허미영. (2008). 기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구. 에너지경제연구원 연구보고서, 1-93.

설용주, 김경훈, 백열창, 이상철, 옥지운, 이강연, 홍성구, 박규현, 최창원, 이성실, 오영균. (2011). 곡류 사료원별 육성기 한우 장내발효에 의한 메탄가스 배출량 비교. 한국동물자원과학회지, 53(2), 161-169.

설용주, 김경훈, 백열창, 이상철, 옥지운, 이강연, 최창원, 이성실, 오영균. (2012). 한우 거세우의 반추위 메탄가스 생성량에 대한 곡류 사료원의 영향. 한국동물자원과학회지, 54(1), 15-22.

오영균, 김도형, 문상호, 박재현, 남인식, & 김경훈. (2014). 다양한 조사료 급여 조건에서 한우 암소 경산우의 에너지분배 및 메탄배출량. 한국초지조사료학회지, 34(4), 283-287.

온실가스종합정보센터. (2014). 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침.

온실가스종합정보센터. (2016). 2016년 국가 온실가스 인벤토리 보고서.

이진의. (2012). 가축분뇨로부터의 온실가스(CH₄, N₂O) 발생량 조사. 강원대학교 석사학위논문.

임선영. (2005). 축산폐수 처리를 위한 UASB 공정에서 C/Nitrate 비에 따른 메탄화 및 탈질화 특성. 강원대학교 석사학위논문, pp.3-16.

장대홍, 김영일, 이태림, 강명희. (2010). 통계 마인드 : 비전공자를 위한 통계학 이야기. 통계교육원, 1-511.

정경화, 조준행, 김찬규, 이경학, 윤여창, 노기안, 박규현, 왕광익, 진병복. (2008). 기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구. 에너지경제연구원 연구보고서, 1-138.

통계청. (2015). 2014년 농림어업조사보고서.

통계청. (2016). 가축동향조사.

허남효, 이승현, 김병기. (2008). 가축분뇨와 간척지 사료작물의 메탄발생량과 생분해도. 신재생에너지, 4(4), 56-64.

허남효, 강호, 정지현, 이승현. (2009). 농축산바이오매스의 고온 혐기성 생분해도 평가. 한국신재생에너지학회 학술대회논문집, 514-517.

환경부. (2008). 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인.

환경부. (2017). NDC 및 적응 커뮤니케이션 세부 지침 마련을 위한 대응방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, 최종보고서

American Public Health Association. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater, WPCF.

Australian Government, Department of the Environment and Energy. (2017). National Inventory Report 2015 Voume 1, Commonwealth of Australia 2017.

Choi, Dong-Gi, et al. (2008). Subacute Oral Toxicity of Ephedrae Herba Extract in SD Rats. The Korea Journal of Herbology, 23(4), 1-7.

Crystal Ball, Classroom Edition 11.1.4100.0; Oracle, Cor.: Redwood Shores, CA, USA, 2014.

Doane, D. P., & Seward, L. E. (2009). 경영경제 통계학 (최필선 & 민인식, 역). 서울: 한국맥그로힐. (원서출판 2006).

Dustan, A. (2002). Review of methane and nitrous oxide emission factors for manure management in cold climates. JTI - Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Uppsala. Report 299.

Efron, B. (1981). Nonparametric estimates of standard error: the jackknife, the bootstrap and other methods. Biometrika, 68(3), 589-599.

Federal Environment Agency. (2017). National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2015 (UNFCCC-Submission).

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A. & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Lim, B., Treanton, K., & Mamaty, I. (1997). Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. v. 1: Greenhouse gas inventory reporting instructions.-v. 2: Greenhouse gas inventory workbook.-v. 3: Greenhouse gas inventory reference manual.

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Houghton J.T.,Meira Filho L.G., Lim B., Tréanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J. Callander B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France.

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Lee, J. Y., Lee, M. H., Lee, J. S., Chun, Y. Y., Kim, K. H., Kim, M. S., & Lee, K. M. (under review). Developing emission factors for dairy cow enteric fermentation in Korea.

Lawrence, A. W., & McCarty, P. L. (1969). Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, R1-R17.

McCarty, P. L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public works*, 95(9), 107-112.

McInerney M.J., Bryant M.P. (1981) Basic Principles of Bioconversions in Anaerobic Digestion and Methanogenesis. In: Sofer S.S., Zaborsky O.R. (eds) *Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels*. Springer, Boston, MA

Ministry for the Environment. (2016). New Zealand's greenhouse gas inventory 1990-2014. Ministry for the Environment. ISSN 1179-223X. Publication number ME 1239. p. 519.

Minitab 17 Statistical Software (2010). [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. (www.minitab.com)

Morgan, M. G., Henrion, M., & Small, M. (1992). *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge university press.

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L. & Hansen, M.G. (2017). *Denmark's National Inventory Report 2017. Emission Inventories 1990-2015 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy 884 pp. Scientific Report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. 231

Olivier, J. G., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J. A. H. W. (2016). *Trends in global CO₂ emissions; 2016 Report*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Institute for Environment and Sustainability of the European Commission's Joint Research Centre.

Republic of Korea. (2015) *Intended Nationally Determined Contribution (INDC) - Republic of Korea, UNFCCC*.

Saggar, S., Clark, H., Hedley, C., Tate, K., Carran, A., Cosgrove, G. (Unpublished). Methane Emissions from Animal Dung and Waste Management Systems, and its Contribution to National Budget. Landcare Research Contract Report: LC0301/02. Prepared for the Ministry of Agriculture and Forestry by Landcare Research in 2003.

Sherlock, R. R., de Klein, C., Li, Z. (Unpublished). Determination of N₂O and CH₄ Emission Factors from Animal Excreta, following a Summer Application in Three Regions of New Zealand. A final report of an N₂O net study prepared for the Ministry of Agriculture and Forestry by Landcare Research, AgResearch and Lincoln University in 2003.

Strogies, M., & Gniffke, P. (2017). National Inventory Report For the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2015. Federal Environment Agency (Umweltbundesamt), Dessau.

Swedish Environmental Protection Agency. (2017) National Inventory Report Sweden 2017.

US EPA. (2017). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2015. Environmental Protection Agency.

Abstract

Various input variables are necessary to calculate a CH₄ emission factor from the livestock sector, part of the greenhouse gas (GHG) emission. Typical input variables include volatile solids (VS) excreted from the livestock manure, total CH₄ production from the volatile solids, fraction of manure management system types handling the livestock manure and the methane conversion factors for each manure management system. The objective of this research is to develop CH₄ emission factor of the Korean cattle using the statistical simulation approach. Cattle manures were analyzed from the randomly chosen 30 Korean cattle farms in Korea for the analysis of its VS content. Data for the maximum methane production, fractional utilization rate of the manure treatment system, and methane conversion factor were collected from the literatures. The statistical analyses results of the VS contents and the cattle's body weight showed that the methane emission factors should be developed for three different body weight classes of the cattle. Each body weight class reflects the growth phase of cattle. The Monte Carlo Simulation (MCS) and bootstrap method were applied to obtain interval estimates of the methane emission factor, and the emission factor from the bootstrap method resulted in smaller interval width and relative percentage uncertainty compared to that from the MCS method.

The methane emission factors of the Korean cattle manure in three different body weight classes of the cattle were [0.57, 1.37], [1.43, 3.36] and [1.12, 2.72] kg CH₄/head-year. A salient feature of this emission factor is that it is an interval estimate, not a point estimate, in the area of the cattle's manure.