



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](#)

석사학위논문

# 가축분뇨 연소과정의 미세먼지 배출계수 개발

-우분을 중심으로-

Development of Particulate Matter Emission Factors of  
Cattle Manure Combustion

2020년 2월

세종대학교 대학원

기후변화협동과정

유재호

# 가축분뇨 연소과정의 미세먼지 배출계수 개발

-우분을 중심으로-

Development of Particulate Matter Emission Factors of  
Cattle Manure Combustion

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2020년 2월

세종대학교 대학원

기후변화협동과정

유 재 호

유재호의 석사학위논문을 인준함

2020년 2월

심사위원장     박 성 규 (인)

심 사 위 원     김 하 나 (인)

심 사 위 원     전 의 찬 (인)

## 국문초록

우리나라의 가축 사육두수는 꾸준히 증가하고 있으며, 가축분뇨 발생량도 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 가축분뇨의 가장 큰 수요처는 퇴비를 사용하는 농가이지만, 국내 농경지 면적은 계속해서 감소하고 있는 실정이다.

가축분뇨의 새로운 사용처로서 가축분뇨의 에너지화 및 활용이 시도되고 있다. 정부에서는 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시」를 제정하여 가축분뇨를 고체연료로 사용하기 위한 제도적 기반을 마련하고 있다. 가축분뇨를 연소하게 될 경우 ‘탄소중립(Carbon Neutral)’ 개념으로 인하여 이산화탄소 배출량을 보고하지 않아도 되지만, 미세먼지 발생 등 대기오염 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 가축분뇨 중 우분 연소과정에서 발생하는 미세먼지와 초미세먼지의 배출농도를 측정하고, 미세먼지 배출계수를 개발하여 정확한 미세먼지 배출량을 산정하고자 한다. 우분 연소과정에서 발생하는 미세먼지 배출계수 산정을 위해 경기도 소재 축사에서 우분 시료를 수집하여 건조하였다. 연소 실험은 농가에서 일반적으로 사용하는 화목난로에서 진행하였다. 미세먼지 농도 측정을 위한 장비로는 Cascade Impactor를 사용했으며, 중량농도법(Gravimetric Measurement Method)으로 미세먼지 농도를 산정하였다.

우분 연소과정에서 발생하는 PM-10 농도는  $138.36\text{mg}/\text{m}^3 \sim 3,213.56\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 PM-2.5 농도는  $133.09\text{mg}/\text{m}^3 \sim 3,153.97\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 분석되었다. 이를 기준으로 PM-10 배출계수는  $2.48\text{g}/\text{kg} \sim 7.72\text{g}/\text{kg}$  사이로 나타났으며, 평균값은  $4.02\text{g}/\text{kg}$ 으로 산정되었다. PM-2.5 배출계수는  $2.16\text{g}/\text{kg} \sim 7.57\text{g}/\text{kg}$ 으로 분석되었으며, 평균값은  $3.72\text{g}/\text{kg}$ 으로 나타났다.

우분 시료의 수분 함유율과 PM-10 및 PM-2.5 배출계수 사이의 상관계수를 분석한 결과, 각각 0.76, 0.80으로 나타나 강한 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 우분 시료의 수분 함유율이 증가할수록 PM-10과 PM-2.5 배출량이 증가함을 의미하는 것이다.

본 연구는 잠재적인 대체 연료로 거론되고 있는 가축분뇨 중 우분 연소과정의 미세먼지 배출계수를 개발하였으며, 우분 연소에 따른 기후·환경영향을 분석하였다.

**주요어** : 가축분뇨, 우분, 미세먼지 배출계수, PM-10, PM-2.5,  
기후·환경영향

# 목 차

## 제1장 서 론

제1절 연구의 배경 및 목적 .....	1
제2절 연구의 내용 및 범위 .....	3

## 제2장 이론적 고찰

제1절 국내 미세먼지 발생 및 관리 대책 .....	5
제2절 가축분뇨의 발생 및 처리 현황 .....	12
제3절 가축분뇨의 에너지화 현황 .....	14
제4절 선행연구 분석 .....	16

## 제3장 연구방법

제1절 성분 및 발열량 분석방법 .....	19
제2절 연소 실험 및 미세먼지 배출계수 산정방법 .....	23

## 제4장 미세먼지 배출계수 개발

제1절 우분의 성분 및 발열량 분석 .....	28
제2절 우분 연소에 따른 미세먼지 농도 .....	31
제3절 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수 .....	34
제4절 우분 연소의 기후·환경 영향 분석 .....	40

제5장 결 론

제1절 연구 요약 .....	42
제2절 연구의 시사점 및 한계 .....	44
참고문헌 .....	45
Abstract .....	49

## 표 목 차

<표 2-1> 수도권 부문별 초미세먼지 발생량 (2015년) .....	8
<표 2-2> 가축분뇨 에너지화 기술 .....	14
<표 2-3> 가축분뇨 바이오가스화시설 현황 (2017년) .....	15
<표 2-4> 가축분뇨 고체연료 분석 관련 선행연구 .....	18
<표 4-1> 우분의 발열량 분석 결과 .....	28
<표 4-2> 우분의 삼성분 조성 .....	29
<표 4-3> 우분의 원소 조성 .....	29
<표 4-4> 원 시료의 수분 함유율 .....	30
<표 4-5> 우분 연소에 따른 먼지 농도 .....	31
<표 4-6> 우분 연소에 따른 PM-10 배출계수 .....	35
<표 4-7> 우분 연소에 따른 PM-2.5 배출계수 .....	37
<표 4-8> 미세먼지 배출계수 비교 .....	39

## 그 립 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도 .....	4
<그림 2-1> 연평균 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 농도 .....	5
<그림 2-2> 국내 부문별 PM-10 배출 비율 (2016년) .....	6
<그림 2-3> 국내 부문별 PM-2.5 1차 배출 비율 (2016년) .....	7
<그림 2-4> 수도권 부문별 초미세먼지 발생량 (2015년) .....	9
<그림 2-5> 월별 PM-10 농도 (2019년) .....	10
<그림 2-6> 연도별 가축 사육두수 및 분뇨발생량 .....	12
<그림 2-7> 가축분뇨 처리현황 .....	13
<그림 3-1> 자동원소분석기 .....	20
<그림 3-2> 공업분석기(ELTRA, THERMOSTEP) .....	21
<그림 3-3> 자동열량분석기(Parr-6400, USA) .....	21
<그림 3-4> 시료 수분 측정 .....	22
<그림 3-5> 경기도 A우사 전경 및 우분 시료 준비 .....	23
<그림 3-6> 우분 연소에 사용된 화목난로 구성도 .....	24
<그림 3-7> 우분 연소에 사용된 화목난로 .....	25
<그림 3-8> 여과지 무게 측정 .....	26
<그림 3-9> Cascade Impactor .....	27
<그림 3-10> Stack Sampler .....	27
<그림 4-1> 우분 연소에 따른 먼지의 입자 크기별 분포 .....	33
<그림 4-2> 수분 함유율에 따른 PM-10 배출계수 분포도 .....	35
<그림 4-3> 수분 함유율에 따른 PM-2.5 배출계수 분포도 .....	37

# 제1장 서론

## 제1절 연구의 배경 및 목적

국내 가축 사육두수는 계속 증가하고 있으며, 가축분뇨 발생량도 꾸준히 증가하고 있다. 발생한 가축분뇨의 72%는 퇴비화 및 액비화를 통하여 자원화 처리되고 있으며, 나머지 28%의 가축분뇨는 위탁처리 및 정화처리 되고 있다(환경부, 2018).

가축분뇨의 가장 큰 수요처는 퇴비와 액비를 활용하는 농가이며, 2018년 기준 논과 밭을 포함한 국내 농경지 면적은 1,596천ha로 1975년부터 지속적으로 감소하고 있는 추세를 보이고 있다. 처리해야 할 가축분뇨는 증가하는데, 가축분뇨를 활용할 수 있는 수요처인 농경지는 감소하고 있어 가축분뇨 공급과 수요의 불균형이 발생하고 있다.

우리나라의 에너지 수입의존도는 2017년 기준 94%로 연료의 대부분을 수입에 의존하고 있는 상황이며, 에너지 자립도를 높이기 위하여 신재생에너지 개발 및 확대에 다양한 노력을 기울이고 있다. 우리나라의 신재생에너지 발전량 46,623,321MWh 중 바이오에너지 및 폐기물에너지의 발전량은 31,333,717MWh로 약 67%를 차지하고 있으며(에너지경제연구원, 2018), 최근에는 가축분뇨를 바이오에너지원으로 활용하기 위한 방법으로 가축분뇨 고체연료화에 대한 관심이 증가되고 있다.

환경부는 2006년 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」을 제정한 이후로 지속적인 개정을 통하여 가축분뇨를 효과적으로 관리하고 효율적으로 이용하기 위한 노력을 하고 있으며, 특히 가축분뇨를 에너지원으로 활용하기 위한 다양한 시도를 하고 있다. 2013년 수행된

가축분뇨 고품질연료 제품의 품질·등급 기준 마련 연구를 바탕으로 2015년 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시」가 제정 및 시행되었고, 축산과학원을 비롯한 다양한 기관에서 가축분뇨를 고체연료로 활용하기 위한 연구를 진행하고 있다.

가축분뇨를 고체연료로 활용하기 위하여 발열량 분석 및 연소에 따른 대기오염물질 발생에 대한 연구는 일부 진행되어 있으나, 최근 이슈가 되고 있는 환경문제인 PM-2.5 및 PM-10 등 미세먼지 배출에 대한 국내 연구는 거의 진행된 바가 없으며, 먼지 배출량 산정 수준의 연구만 진행되어 있는 실정이다.

‘탄소중립(Carbon Neutral)’<sup>1)</sup> 개념으로 인해 이산화탄소 배출량을 보고하지 않는 가축분뇨는 바이오에너지로 활용 할 수 있지만, 적절하게 관리되지 않을 경우 환경을 오염시키는 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 가축분뇨 연소과정의 미세먼지 등 대기오염물질 발생에 대한 연구를 통하여 정확한 대기오염물질 배출량을 산정 할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 가축분뇨 중 우분 연소과정의 미세먼지(PM-10) 및 초미세먼지(PM-2.5) 배출농도를 측정하고, 미세먼지 배출계수를 개발하여 가축분뇨 연소과정에서 발생하는 미세먼지 배출량 산정에 기여하는 것이다.

---

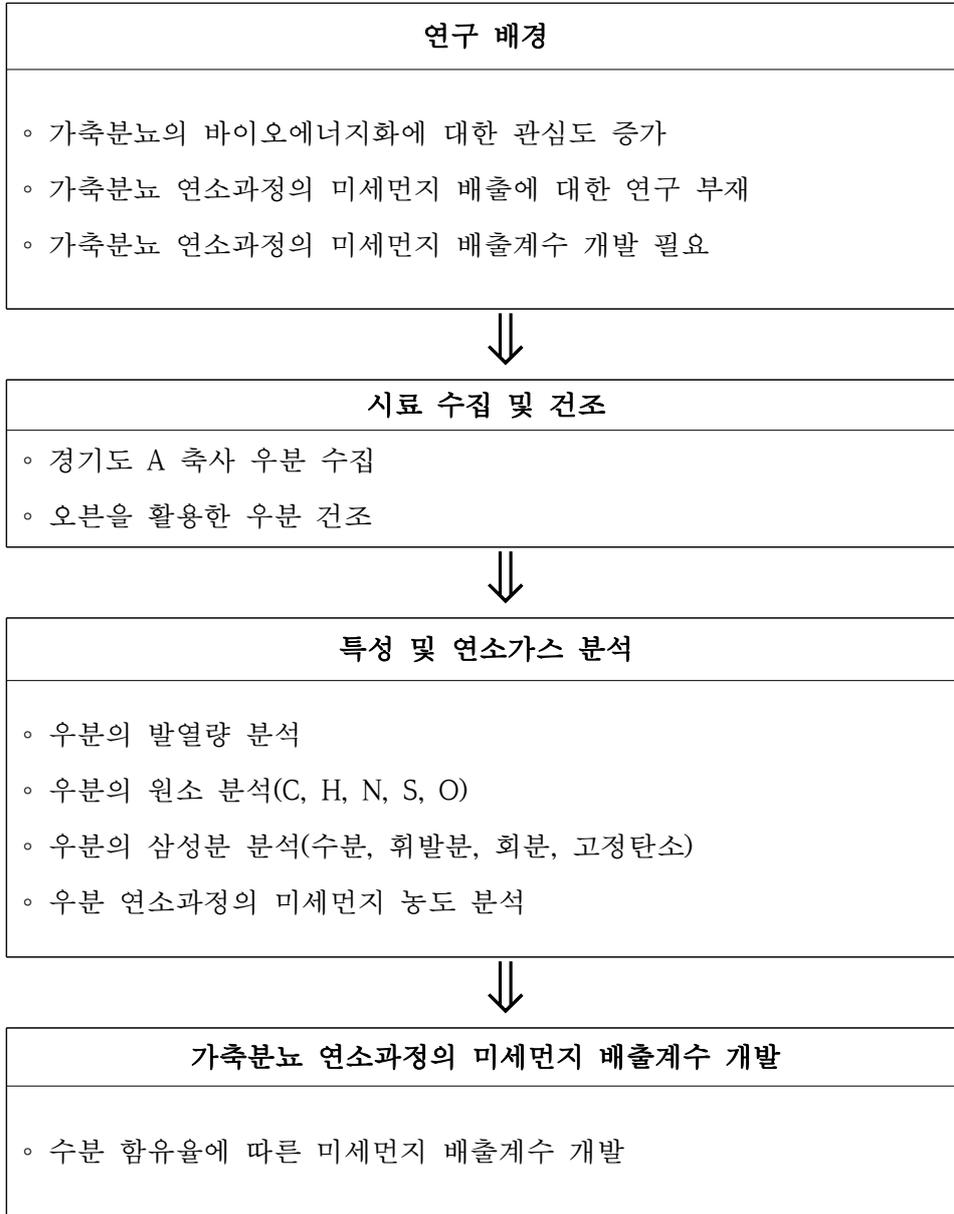
1) 바이오매스 연소 과정에서 방출되는 이산화탄소는 생물의 성장과정에서 광합성 작용에 의해 대기에서 흡수되는 이산화탄소이기에 대기의 이산화탄소 농도를 증가시키지 않는다(박종화, 2008). 따라서, 바이오매스 사용에 따른 이산화탄소 배출량은 산정하지 않는다(환경부, 2016b).

## 제2절 연구의 내용 및 범위

가축분뇨 중 발생량이 가장 많은 돈분은 수분함유량이 높고, 계분은 성형가공상의 문제로 인하여 고체연료화에 어려움을 겪고 있는 것으로 알려져 있다(환경부, 2013). 본 연구는 비교적 수분 함유율이 낮고 발열량이 높아 고체연료화가 용이한 우분을 연구 대상으로 선정하였고, 깔짚을 깔아 분뇨처리에 활용하는 국내 우사의 바닥 특징(최희철, 2008)에 맞추어 경기도 소재 축사에서 발생하는 우분 중 깔짚이 혼합된 혼합분을 시료로 활용하여 연구를 진행하였다.

본 연구의 진행은 <그림 1-1>과 같다. 시료의 특성을 분석하기 위해 발열량 분석, 원소 분석, 삼성분 조성 분석을 실시하였고, 중량농도법을 활용하여 연소 과정에서 발생하는 PM-10 및 PM-2.5 농도를 측정하여 가축분뇨 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 최근 미세먼지 문제에 대한 이론적 고찰과 가축분뇨의 발생 및 처리 현황 및 에너지원으로써의 가축분뇨 이용 현황 및 선행 연구 사례들을 살펴보았다. 3장에서는 본 연구를 진행하기 위한 연소 실험방법, 우분 성분 및 발열량 분석방법, 미세먼지 배출계수 산정방법에 대하여 설명하였고, 4장에서는 우분의 성분 및 발열량 분석 결과를 정리하고 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수를 산정하였다. 또한, 우분 연소가 기후·환경에 미치는 영향을 분석하였다. 5장에서는 본 연구의 결론과 시사점 및 한계를 정리하였다.



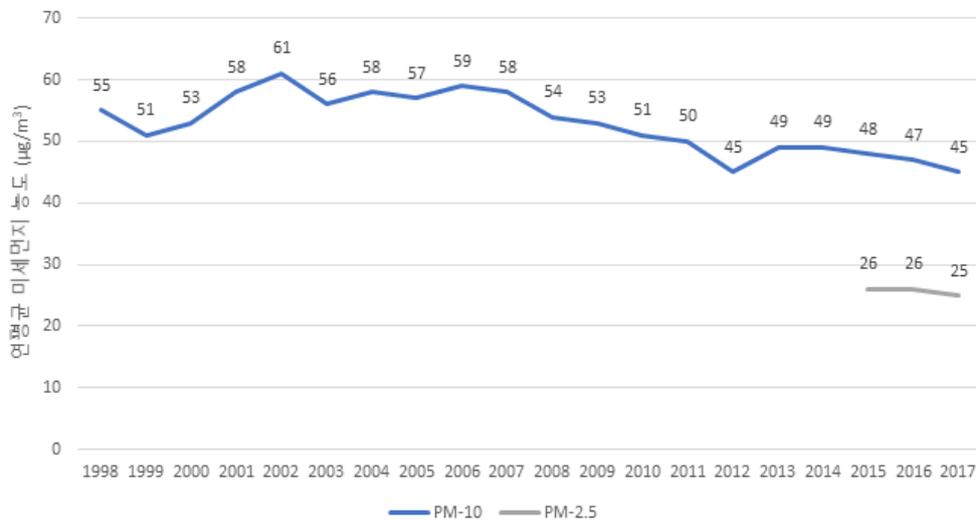
<그림 1-1> 연구 흐름도

## 제2장 이론적 고찰

### 제1절 국내 미세먼지 발생 및 관리 대책

미세먼지는 입자의 크기에 따라 크게 입자의 지름이  $10\mu\text{m}$  이하인 미세먼지(PM-10)와 입자의 지름이  $2.5\mu\text{m}$  이하인 초미세먼지(PM-2.5)로 분류된다.

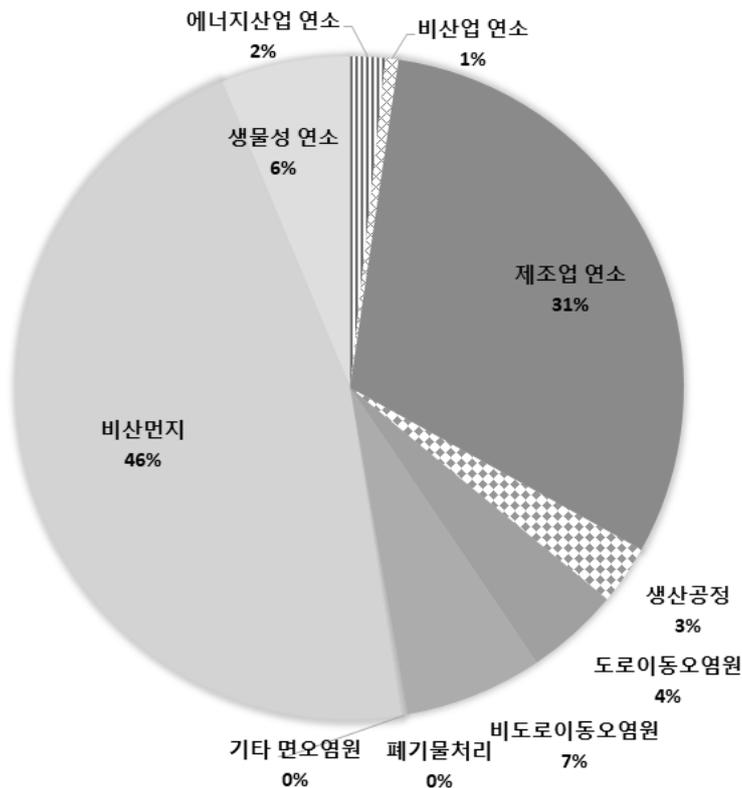
국내 PM-10 연평균 농도는 <그림 2-1>에서 보는 바와 같이, 1998년  $55\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2017년  $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하는 추세를 보였으며, PM-2.5 연평균 농도는 2015년부터 관측이 시작되어 2017년까지 약  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 큰 변화를 보이지 않고 있다(국립환경과학원, 2018).



<그림 2-1> 연평균 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 농도

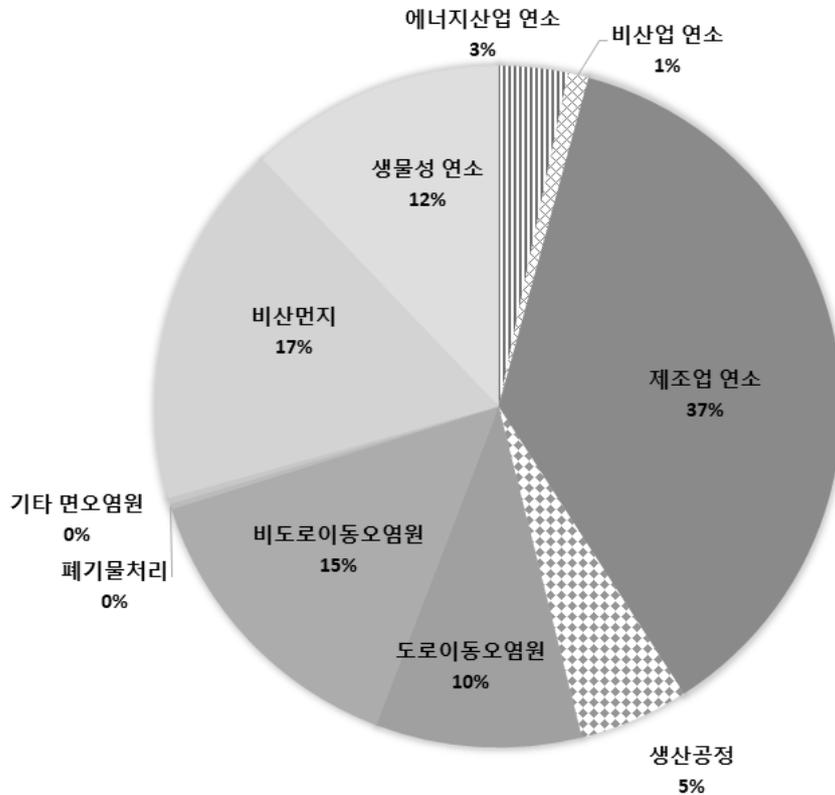
출처: 국립환경과학원(2018), 대기환경연보 2017

대기오염물질 배출량 통계(국립환경과학원)에 따르면 2016년 우리나라의 PM-10 배출량은 총 233,085ton 이며, PM-2.5 배출량은 100,247ton 이다. 부문별 PM-10 배출 비율은 비산먼지가 107,735ton(46%)으로 가장 많았으며, 제조업 연소가 71,794ton(31%)으로 두 번째로 많았다(〈그림 2-2〉 참조). 1차 배출만 고려한 부문별 PM-2.5 배출 비율은 제조업 연소가 36,785ton(37%)으로 가장 많았으며, 비산먼지 17,286ton(17%), 비도로이동오염원 14,354ton(15%), 생물성 연소 12,124ton(12%) 순으로 배출 비율이 높았다(〈그림 2-3〉 참조).



〈그림 2-2〉 국내 부문별 PM-10 배출 비율 (2016년)

출처: 국립환경과학원(2019), 2016 대기오염물질 배출량 통계



<그림 2-3> 국내 부문별 PM-2.5 1차 배출 비율 (2016년)

출처: 국립환경과학원(2019), 2016 대기오염물질 배출량 통계

미세먼지는 크게 발생원으로부터 직접 배출되는 1차 배출과 미세먼지 생성물질이 대기 중에서 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지로 변환되는 2차 생성으로 나뉜다. 수도권 초미세먼지(PM-2.5) 발생 비율은 1차 배출이 28%, 2차 생성이 72%로 나타났으며, 수도권의 배출원별 초미세먼지 배출량은 다음 <표 2-1>와 같다(환경부, 2019).

2차 생성을 포함한 수도권 부문별 초미세먼지 배출량은 경유차(22.13%), 건설기계(20.29%), 냉난방(11.42%), 사업장(11.37%)순으로 나타났다. PM-2.5 1차 배출은 비산먼지(35.21%), 건설기계(23.37%),

경유차(19.89%)순으로 많이 배출했으며, 2차 생성은 경유차(23.75%), 건설기계(19.11%), 냉난방(14.91%), 사업장(14.03%)순으로 많이 발생하였다.

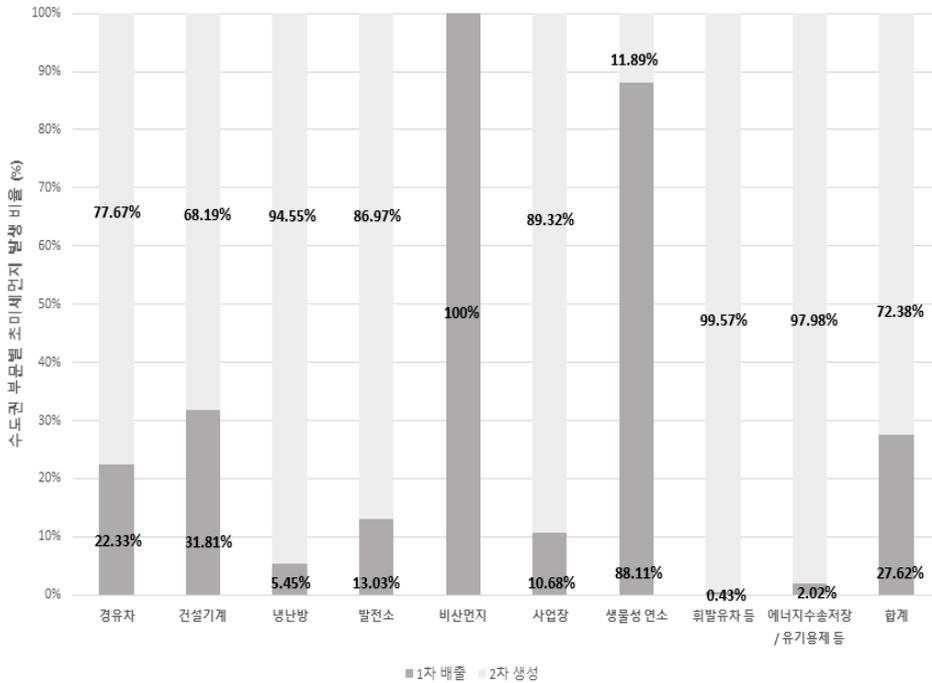
<그림 2-4>에서 보는 바와 같이 수도권에서 발생하는 초미세먼지의 비율은 비산먼지, 생물성 연소 부문은 1차 배출이 높았으며, 이를 제외한 냉난방, 휘발유차, 사업장 등 8개 부문에서는 2차 생성되는 초미세먼지가 높은것으로 나타났다.

<표 2-1> 수도권 부문별 초미세먼지 발생량 (2015년)

단위: ton/year

배출원 대분류	1차 배출	2차 생성	발생량 합계
경유차	2,888 (17.89%)	10,048 (23.75%)	12,936 (22.13%)
건설기계	3,773 (23.37%)	8,088 (19.11%)	11,861 (20.29%)
냉난방	364 (2.25%)	6,311 (14.91%)	6,675 (11.42%)
발전소	674 (4.17%)	4,497 (10.63%)	5,171 (8.85%)
비산먼지	5,685 (35.21%)	0 (0.00%)	5,685 (9.72%)
사업장	710 (4.40%)	5,937 (14.03%)	6,647 (11.37%)
생물성 연소	1,934 (11.98%)	261 (0.62%)	2,195 (3.75%)
휘발유차 등	8 (0.05%)	1,836 (4.34%)	1,844 (3.15%)
에너지수송·저장 / 유기용제 등	110 (0.68%)	5,338 (12.61%)	5,448 (9.32%)
합계	16,146 (100%)	42,316 (100%)	58,462 (100%)

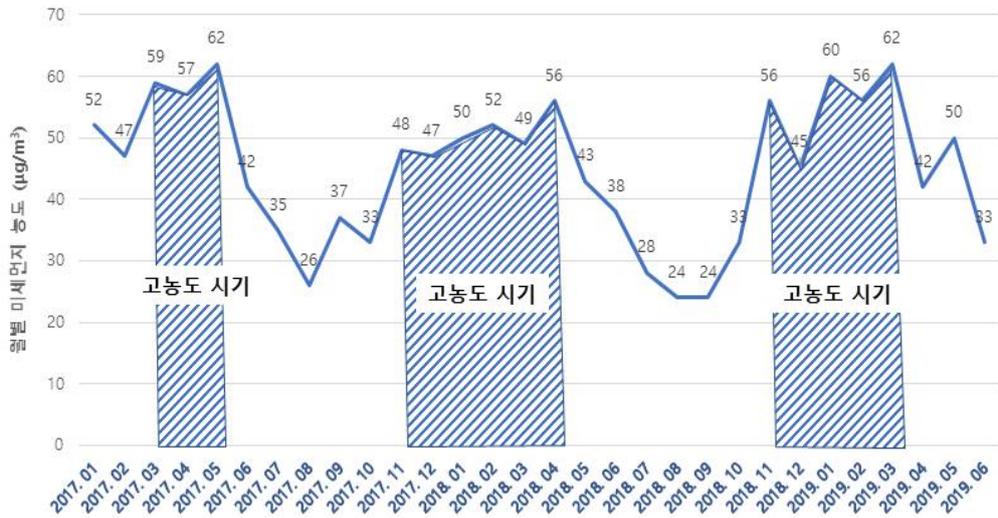
출처: 환경부(2019), 환경백서 2019



<그림 2-4> 수도권 부문별 초미세먼지 발생량 (2015년)

출처: 환경부(2019), 환경백서 2019

<그림 2-5>에서 보는 바와 같이 최근 3년간 우리나라의 PM-10 농도는 7월 ~ 10월 등 여름에는 약 20~30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이지만, 겨울 및 봄철인 11월 ~ 4월에는 약 50~60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 겨울철 및 봄철 고농도 미세먼지 현상이 심각한 것으로 나타났다(국가통계포털, 2019). 연도별로는 2017년 3월~5월(평균 59.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2017년 11월~2018년 4월(평균 50.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2018년 11월~2019년 3월(평균 55.80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 고농도 시기가 발생하였다.



〈그림 2-5〉 월별 PM-10 농도 (2019년)

출처: 국가통계포털(2019), 미세먼지(PM 10) 월별 도시별 대기오염도

2018년 환경부 조사에 따르면 국민의 약 91%가 국내 미세먼지가 심각하다고 하였으며, 78.7%의 국민이 미세먼지로 인하여 건강이 위협되고 있다고 답하였을 정도로 미세먼지로 인한 국민들의 불안감이 높아지고 있다.

정부는 이러한 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 2017년 9월 미세먼지 관리 종합대책을 수립하여 봄철 노후 석탄화력발전소 일시 가동중단 등 단기대책과 발전·산업·수송·생활 등 사회 전 분야를 아우르는 중장기 대책을 세웠으며, 미세먼지 고농도 시기 및 평상시 미세먼지 지속 저감을 위하여 2018년 1월 「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책」을 수립하였다.

2018년 8월 14일 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」을 제정하고 2019년 2월 15일부터 시행하였으며, 2019년 4월 25일 「미세먼지 문제 해결을 위한 국가 기후환경회의의 설치 및 운영에

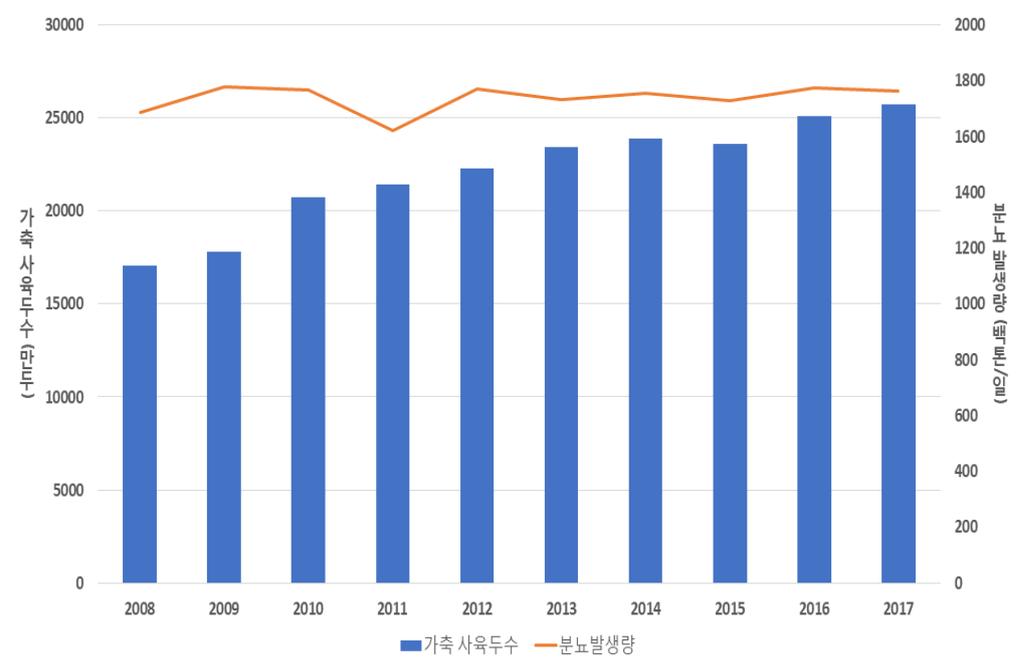
관한 규정」을 제정 및 시행함에 따라 국가기후환경회의를 설립하였다.

국가기후환경회의는 설립 이후 미세먼지 문제 해결을 위하여 산업계·지자체·정부 부처 등과 회의를 진행하였고, 2019년 10월에 『국가기후환경회의 국민정책제안』을 발간하여 미세먼지 고농도 계절(12월~3월)에 전국의 대형사업장(1종)을 중심으로 강화된 배출허용기준 적용, 일부 석탄발전소 가동 중단 등 다양한 미세먼지 관리 대책을 제시하였다.

2019년 11월 정부는 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)을 수립하여 2024년까지 초미세먼지 직접 배출 감축목표량(191백톤/년)을 제시하였으며, 초미세먼지 2차 생성에 기여하는 물질인 SOx(1,513백톤/년), NOx(7,993백톤/년), VOCs(3,276백톤/년), NH<sub>3</sub>(754백톤/년)의 감축목표를 제시하였다. 이와 같은 감축목표 달성을 위하여 미세먼지 다량배출지역에 대한 ‘대기관리권역’ 지정, 일정기준 이상 배출사업장에 대하여 배출허용총량 할당, 노후경유차 조기폐차 및 전환사업 확대 등 미세먼지 관리 대책을 제시하였다.

## 제2절 가축분뇨의 발생 및 처리 현황

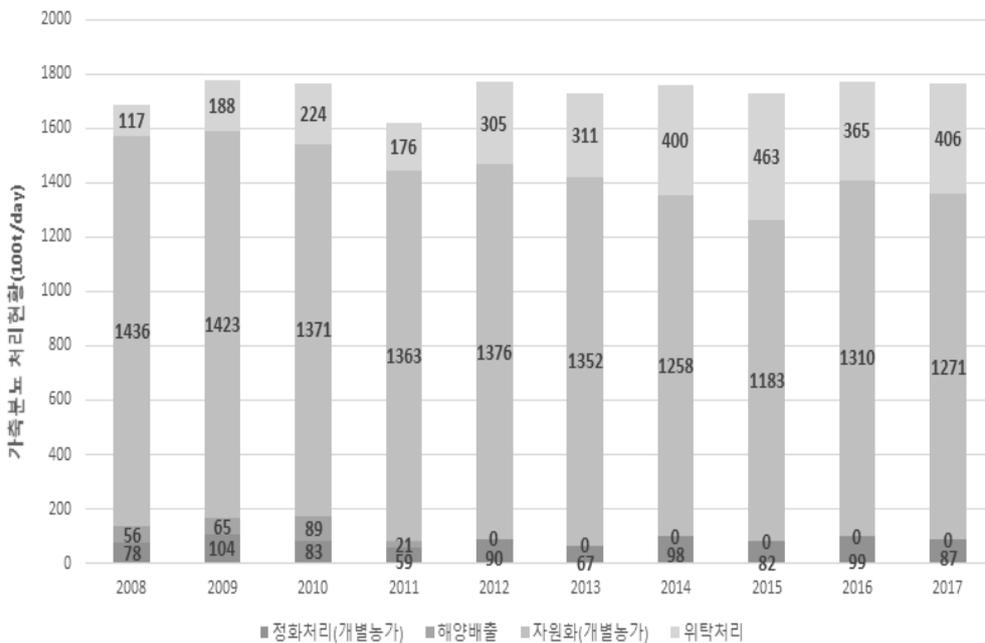
국내 축종별 사육두수는 2017년 기준 한우 2,880천두, 젓소 410천두, 돼지 11,030천두, 가금류 243,030천두로 총 257,350천두의 가축이 사육되고 있으며, 2008년부터 증가하고 있는 추세이다. 가축 사육두수 증가에 따라 가축분뇨 발생량도 2008년 1,719,600t/day에서 2017년 2,584,900t/day로 꾸준히 증가하고 있다(환경부, 2018)(〈그림 2-6〉 참조). 가축분뇨 발생량은 돼지 사육두수에 크게 의존하는 편이며, 구제역으로 인해 돼지 사육두수가 급감한 2011년에는 가축분뇨 발생량도 감소하는 경향을 보였다.



〈그림 2-6〉 연도별 가축 사육두수 및 분뇨발생량

출처: 환경부(2019), 2018년 가축분뇨 발생과 처리 총론

가축분뇨 처리방법은 크게 퇴비화 및 액비화를 통한 자원화, 위탁처리, 정화처리로 나뉜다. <그림 2-7>에서 보는 바와 같이 발생한 가축분뇨의 약 72%는 자원화 처리되고 있으며, 나머지는 위탁처리 및 정화처리되고 있기에 가축분뇨의 가장 큰 수요처는 퇴비와 액비를 활용하는 농가인 것을 알수 있다. 2018년 기준 논과 밭을 포함한 국내 농경지 면적은 1,596천ha로 1975년부터 지속적으로 감소하고 있는 추세를 보이고 있다. 이는 처리해야 할 가축분뇨는 증가하는데, 가축분뇨의 수요처인 농경지는 감소하여 가축분뇨 공급과 수요의 불균형이 발생할 수 있음을 나타낸다.



<그림 2-7> 가축분뇨 처리현황

출처: 환경부(2019), 2018년 가축분뇨 발생과 처리 총론

### 제3절 가축분뇨의 에너지화 현황

가축분뇨 에너지화 기술은 다음 <표 2-2>에서 보는 바와 같이 고형연료화, 수열가스화, 수열액화, 메탄발효, 수소발효 등이 있다. 이 중 현재 실용화 보급되어 있는 방법은 메탄발효 및 고형연료화 기술로 한정되어 있다(환경부, 2013). 메탄발효 기술은 가축분뇨를 미생물로 혐기성 발효시켜 메탄가스를 발생시켜 바이오가스화 하는 방법이며, 고형연료화 기술은 가축분뇨의 고형분을 성형가공하여 고형연료로써 활용하는 기술이다.

<표 2-2> 가축분뇨 에너지화 기술

기술	기술 개요	기술수준
메탄발효 (습식,건식)	가축분뇨를 혐기성 발효시켜 바이오가스화하는 기술	실용화 보급단계
고형연료화	가축분뇨의 고형분을 성형 및 가공하여 고형연료로 제작하는 기술	실용화 보급단계
수열가스화	가축분뇨를 고온고압에서 가수분해반응을 촉진시켜 바이오가스화하는 기술	연구단계
수열액화	가축분뇨를 고온고압의 열수에서 개질하여 액상 연료를 얻는 기술	연구단계
수소발효	가축분뇨를 혐기성 수소발효시켜 메탄과 수소를 동시에 생산하는 기술	연구단계

출처: 환경부(2013), 가축분뇨 고형연료 제품의 품질·등급 기준 마련 연구

국내 유기성 폐자원 바이오가스화시설은 2017년 기준 총 35 곳이 있으며, 가축분뇨를 활용한 바이오가스화 처리시설은 7개이다(환경부,2019). 가축분뇨 바이오가스화 처리시설은 2017년에 152,000ton의 가축분뇨를 처리하였으며, 이를 통하여 1,545,000m<sup>3</sup>의 바이오가스를 생산하였고, 1,456,000m<sup>3</sup>의 바이오가스를 발전 및 자체 이용에 활용한 것으로 나타났다(<표 2-3> 참조).

<표 2-3> 가축분뇨 바이오가스화시설 현황 (2017년)

설치현황 (개)	시설규모 (ton/day)	처리실적 (ton/year)	바이오가스 생산량 (천m <sup>3</sup> /년)
7	619	152,000	1,545

출처: 환경부(2019), 2017년 유기성폐자원 바이오가스화시설 현황

일본에서는 계분을 이용한 발전 시설을 가동하는 중이며, 최근 우분 펠릿을 활용한 농가형 발전 시설을 보급하고 있다. EU에서는 가축분뇨의 액상을 바이오가스화 하고 있으며, 고상은 퇴비화하여 사용하고 있는 중이다(환경부, 2016).

독일의 운데마을은 가축분뇨, 작물 등을 활용하여 바이오가스를 생산하고, 바이오가스 생산과정에서 남은 부산물은 유기질 비료로 제작하여 이용하고 있다. 스웨덴 스톡홀름에서는 3,700ton 규모의 바이오가스 생산시설을 설치하여 가축분뇨와 음식물쓰레기를 이용해 바이오가스를 연간 7.7백만톤 생산하고 있다(충북연구원,2018).

## 제4절 선행연구 분석

가축분뇨를 고체연료로 활용하기 위하여 다양한 선행연구들이 진행되었다. 김민수(2014)는 돈분을 대상으로 생돈분의 발열량 및 성상 분석과 더불어 톱밥과 왕겨 혼합에 따른 발열량 및 성상 분석과 중금속 및 열중량 분석을 진행하였다. 분석 결과 발열량과 회분 등은 고체연료로 활용하기 적절하였으나, 함수율이 높아 고체연료 제조를 위하여 톱밥과 왕겨 등을 혼합하여 함수율을 낮출 필요가 있는 것으로 나타났다.

이성현(2016)은 한우생분, 한우생분 및 톱밥 혼합분, 험기발효 한우분, 우분 퇴비, 젖소 생분 등 다양한 우분을 대상으로 발열량 및 성상 분석을 진행하였고, 우분의 평균 발열량은 약 3,500kcal/kg으로 에너지 이용 가능성이 크다는 점을 밝혔다. 특히, 우분과 톱밥 혼합분, 우분과 왕겨 혼합분 등 깔짚이 섞인 혼합분들이 다른 우분들에 비하여 발열량이 높다는 것을 밝혔다. 이외에 이귀현(2010), 주선이(2015) 등도 우분을 대상으로 발열량 분석을 진행하였으며, 연구 결과 우분의 발열량은 평균적으로 약 3,500kcal/kg으로 나타남에 따라 고품연료로 활용하기에 충분한 열량을 지니고 있는 것으로 확인되었다.

환경부(2013)는 가축분뇨를 이용한 고품연료 제품의 품질 및 등급기준을 확립하기 위하여 가축분뇨 고체연료 제조 사례 조사 및 돈분, 우분의 발열량 및 성상 분석을 진행하였고, 해당 연구를 바탕으로 2015년 가축분뇨 고체연료 시설의 설치 등에 관한 고시가 제정 및 시행되었다. 특히, 해당 연구에서는 가축분뇨 고체연료 원료의 연간 에너지 잠재량을 조사하였으며, 전국적으로 연간 33,865,105Gcal의 에너지 잠재량이 존재하는 것으로 나타났다.

강원연구원(2018)에 따르면 2016년말 기준 강원도에서 발생하는

젓소·한우·돼지 등의 가축분뇨를 고체연료화 시켰을 때 에너지 잠재량은 총 6,584.7Gcal/년으로 나타났다. 또한, 가축분뇨 고체연료화 사업의 경제성 분석을 진행하고자 하였으나 현재까지 경제성 분석을 위한 근거가 부족한 것으로 나타났고, 이에 가축분뇨 고체연료화의 현장 적용 시행사례 및 자료 축적 등이 필요한 것으로 분석되었다.

환경부(2016)에 따르면 가축분뇨 고체연료 사업이 활성화 될 경우 가축분뇨 고체연료가 대체 할 수 있는 유사 고체연료 제품은 무연탄, 유연탄, 우드칩, 성형탄, 목재펠릿 등이 있으며, 해당 고체연료 제품들을 가축분뇨 고체연료로 대체할 경우 2014년 기준 총 246,257천톤의 가축분뇨 고체연료를 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

국립축산과학원(2017)은 가축분뇨 고체연료의 이용성 향상을 위하여 가축분뇨 고체연료의 연료적 특성 및 가공된 연료의 이화학적 특성을 분석하였다. 특히, 가축분뇨를 고체연료로 활용하기 위해 건조하는 과정에서 소요되는 에너지를 분석하였고, 가축분뇨 고체연료가 경제성을 갖기 위해서는 인위적인 건조 방법을 사용하기 전에 퇴비화 과정을 통하여 수분 함유율을 약 40% 수준까지 낮추면 경제성이 있을 것이라고 밝혔다.

Sahu(2016)는 closed chamber에서 황소, 물소 등 4종류의 우분을 연소시켜 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 연구 결과, 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수는 11g/kg으로 나타났다. Park(2013)은 우분을 다양한 온도에서 연소시켜 온도에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 연구 결과, 15kW/m<sup>2</sup>에서의 미세먼지 배출계수는 3.476g/kg으로 나타났으며, 25kW/m<sup>2</sup>, 50kW/m<sup>2</sup>에서의 미세먼지 배출계수는 각각 0.589g/kg, 0.043g/kg으로 나타나 연소온도가 높을수록 미세먼지 배출계수가 작아지는 것으로 나타났다.

<표 2-4> 가축분뇨 고체연료 분석 관련 선행연구

관련 연구	연구 내용
김민수 (2014)	- 돈분의 발열량 및 회분은 고형연료로 활용하기 적절한 것으로 나타남 - 함수율이 높아 톱밥과 왕겨 등을 혼합 할 필요가 있음.
이성현 (2016)	- 연구 결과, 우분의 평균 발열량은 약 3,500kcal/kg으로 에너지원으로써의 가치가 높음. - 특히, 톱밥 및 왕겨 등 깔짚이 섞인 혼합분이 비교적 발열량이 높게 나타남.
환경부 (2013)	- 가축분뇨 고체연료 제품의 품질 및 등급기준을 확립하기 위한 가축분뇨 고형연료화 사례 분석 진행 - 가축분뇨 고체연료 원료의 연간 에너지 잠재량은 연간 33,865,105Gcal 수준임을 밝혔음.
강원 연구원 (2018)	- 강원도에서 발생하는 가축분뇨 고체연료의 에너지 잠재량 및 경제성을 분석 - 현재 가축분뇨 고체연료화의 경제성을 분석하기 위한 기초 자료 및 근거가 부족한 것으로 밝힘.
환경부 (2016)	- 가축분뇨 고체연료 제품이 활성화 될 경우 무연탄, 유연탄, 우드칩 등 유사 고체연료 제품을 대체하여 약 246,257천톤의 가축분뇨 고체연료를 활용할 수 있을것으로 나타남.
국립축산 과학원 (2017)	- 가축분뇨 고체연료의 연료적 특성 및 이화학적 특성 분석 - 가축분뇨 고체연료가 경제성을 확보를 위해 인위적인 자연 건조를 통해 수분 함유율을 약 40% 수준까지 낮춰야 한다고 제언함.
Sahu (2016)	- Human, Goat, Sheep 등 22종류의 분뇨의 발열량 분석, pH농도 분석등을 진행함. - 특히, Cattle, Blue Cattle, Bull, Bufalo 등 우분의 미세먼지 배출계수를 개발하였으며, 연구 결과 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수는 11g/kg으로 나타남.
Park (2013)	- 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하였으며, 연소온도에 따른 미세먼지 배출계수 특성을 분석하였음. - 연구 결과, 연소온도가 높을수록 미세먼지 배출계수가 작아지는 것으로 나타남.

## 제3장 연구방법

본 연구의 흐름은 우분 성분 및 발열량 분석방법, 연소 실험 및 미세먼지 배출계수 산정방법 순으로 구성되어 있다. 우분 성분 및 발열량 분석은 크게 삼성분 분석, 원소 분석, 발열량 분석, 수분 함유율 측정을 진행하였고, 우분 연소실험은 화목난로에서의 연소실험을 진행하였다. 미세먼지 배출계수는 우분 연소실험에서 채취한 입자상물질을 중량농도법으로 측정하여 배기가스량과 우분 소각량을 고려하여 산정하였다.

### 제1절 성분 및 발열량 분석방법

#### 1. 원소 분석

원소 분석은 시료에 포함되어 있는 탄소, 수소, 황, 질소 등의 함량을 측정하는 방법으로, 본 연구는 자동원소분석기(Automatic Elemental Analyzer)를 사용하여 우분에 포함되어 있는 탄소, 수소, 황, 질소 등의 함량을 분석하였다(<그림 3-1> 참조).

자동원소분석기는 Dynamic flash combustion method를 사용하였으며, 시료의 원소들을 산화시키고, 컬럼으로 분리하여 TCD 검출기를 통하여 각각 원소들의 함량을 측정하는 방식이다. 본 연구를 위하여 사용된 컬럼은 2m 길이의 ParaQ-X이다. 운반가스 및 산소는 각각 He 99.999%, MSGas Corporation과 O<sub>2</sub> 99.99%, DongMin Specialty Gases를 사용하였고, 운반가스, 산소, reference가스의 유량은 각각 140mL/min, 240mL/min, 100mL/min으로 설정하였다(ASTM D 3176-89, 2002; ASTM D 3178-89, 2002.). 본 연구에 활용된 자동원소분석기의 종류는 Thermo

Finnigan-Flash EA1112,USA 이며, 노내 온도(Furnace temperature)는 950℃, 오븐 온도(Oven temperature)는 70℃로 설정하였다.



<그림 3-1> 자동원소분석기

## 2. 삼성분 분석

삼성분 분석은 건식상태로 건조시킨 시료에 포함되어 있는 고유수분(Inherent Moisture), 회분(Ash), 휘발분(Volatile Matter), 고정탄소(Fixed Carbon) 등을 분석하는 방법으로, 본 연구에서는 우분 시료의 삼성분 분석을 위하여 열중량분석기(TGA-701)를 활용하였다(<그림 3-2> 참조).

휘발분은 고순도 질소(99.9999 %)를 940 ℃에서 주입하여 감량되는 양을 통하여 분석하였으며, 회분(Ash)과 고정탄소는 고순도 산소(99.999 %)를 750 ℃에 주입하여 감량되는 양을 통해 측정하였다. 시료측정 과정에서 각 항목 당 해당 온도에서 3차례 측정한 후 변동 편차가 0.5 mg 이하일 때 까지 분석하였다(ISO 17246, 2010).



<그림 3-2> 공업분석기(ELTRA, THERMOSTEP)

### 3. 발열량 분석

우분 발열량 분석은 고휘연료제품 품질 시험·분석방법에 따라 진행하였고, 자동열량분석기(Parr-6400, USA)를 사용하였다(<그림 3-3> 참조). 자동열량분석기는 시료를 연소시켜 연소 전, 후 증류수의 온도 차이로부터 발열량을 측정한다.

본 연구에서는 25 ℃의 냉각수를 증류수로 활용하였고 Iso-peribolic at 25 ℃ mode로 측정하였다(ISO 1928, 2009; KS E 3707, 2001, ASTM D 2015-91, 1991).



<그림 3-3> 자동열량분석기(Parr-6400, USA)

#### 4. 수분 함유율 측정

최초 우분 시료의 수분 함유율 측정은 오븐을 활용하여 시료의 무게변화가 없을때까지 가열하여 산정하였으며, 수분 함유율 측정을 위한 공식은 식 (1)과 같다.

$$\text{수분 함유율(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

$W_1$ : 건조 전 무게(g)

$W_2$ : 건조 후 무게(g)

우분 연소 실험에 앞서 초정밀 다용도 수분측정기(Kern, Mrs 120-3)를 사용하여 건조된 우분 시료의 수분 함유율을 측정하였다. 수분 측정은 연소를 위해 준비한 각 시료의 일부분을 무작위로 확보하여 총 3회 측정하였고, 평균값을 수분 함유율로 활용하였다(<그림 3-4> 참조).



<그림 3-4> 시료 수분 측정

## 제2절 연소 실험 및 미세먼지 배출계수 산정방법

### 1. 우분 시료 준비

실험에 필요한 우분 시료는 경기도 소재 A우사에서 확보하였다(〈그림 3-5〉 참조). 우분 시료는 왕겨와 톱밥 등 깔짚이 섞여 있는 혼합분을 사용하였고, 효과적인 연소를 위하여 시료를 건조시켰다.

우분 시료의 건조는 오븐을 활용하여 180℃의 온도에서 30분 간격으로 4회 이상 반복하였으며, 시료가 고루 건조될 수 있도록 매 회마다 시료를 뒤섞었다. 건조 과정을 거친 우분 시료는 외부 영향을 받지 않도록 밀봉하여 보관하였으며, 완전 연소까지 걸리는 시간을 고려하여 200g씩 시료를 준비하였다(〈그림 3-5〉 참조).



(a) 우분 원료



(b) 경기도 A우사 전경



(c) 우분 시료 무게 측정



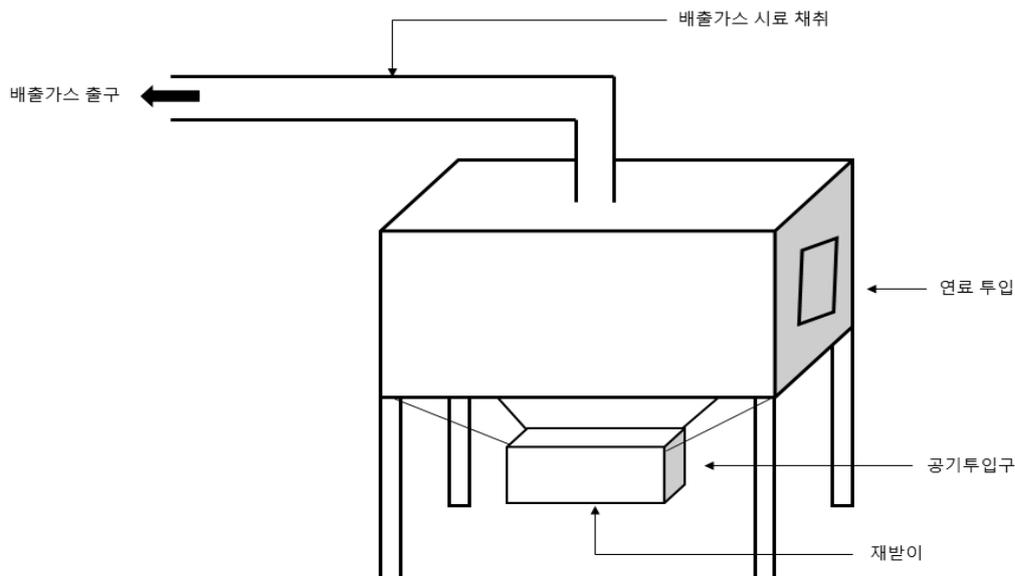
(d) 우분 시료

〈그림 3-5〉 경기도 A우사 전경 및 우분 시료 준비

## 2. 우분 연소용 화목난로

환경부(2013)에서 진행한 가축분뇨 고체연료 수요 조사에 따르면 가축분뇨 고체연료의 수요처는 크게 농가자가소비, 시설원예 하우스, RPS 등록기업, 시멘트 킬른용 등으로 나타난다. 본 연구는 우분 연소에 따라 발생하는 미세먼지 배출량을 측정하고 미세먼지 배출계수를 산정하기 위하여, 대기오염방지시설을 설치하지 않은 화목난로를 연소시설로 설정하였다.

연소 실험에는 농가에서 일반적으로 활용되는 재받이, 연소실, 연료 및 공기주입구로 구성되어 있는 화목난로를 활용하였으며, 연소가스가 배출될 수 있게 덕트를 연소실에 연결하였다(〈그림 3-6〉, 〈그림 3-7〉 참조). 화목난로의 연소실은 가로 40cm, 세로 76cm, 높이 40cm이며, 덕트의 길이는 약 3m이다.



〈그림 3-6〉 우분 연소에 사용된 화목난로 구성도



<그림 3-7> 우분 연소에 사용된 화목난로(유재호, 2019.10.01.)

### 3. 미세먼지 포집 및 농도 측정

미세먼지 농도는 중량농도법(Gravimetric Measurement Method)으로 측정하였다. 중량농도법은 미세먼지를 포집하기 전후의 여과지 무게차이를 통해 포집된 미세먼지의 농도를 측정하는 방법이다. 여과지의 무게는 미량 저울(Microbalance)을 통하여 측정하였으며, 3회 반복 측정한 무게의 평균값으로 포집된 미세먼지의 농도를 측정하였다(〈그림 3-8〉 참조).



〈그림 3-8〉 여과지 무게 측정

중량농도법을 통한 미세먼지 농도 측정을 위해 흡인 장치(Stack Sampler, CAE)를 사용하여 화목난로에서 배출되는 가스를 등속흡인하였고, Cascade Impactor(PM-10, PM-2.5 Impactor, Johnas, Paul Gothe GmbH)를 활용하여 여과지에 미세먼지를 포집하였다. 흡인 장치와 Cascade Impactor는 각각 〈그림 3-9〉 과 〈그림 3-10〉과 같다.

미세먼지 포집을 위한 연소가스는 시료가 연소되기 시작한 후 연소가스의 온도가 약 40℃에 도달한 후 20분동안 채취하였으며, 화목난로에서 배출되는 연소가스의 온도는 약 40-50℃ 이상이다.



<그림 3-9> Cascade Impactor



<그림 3-10> Stack Sampler

우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수는 식 (2)와 같이 미세먼지농도( $mg/m^3$ ), 총 유량( $m^3$ ), 우분 소각량( $kg$ )을 이용하여 산정된다.

$$\text{배출계수}(g/kg) = \frac{\text{미세먼지농도}(mg/m^3) \times \text{유량}(m^3)}{\text{우분 소각량}(kg)} \times 10^{-3} \quad (2)$$

## 제4장 미세먼지 배출계수 개발

### 제1절 우분의 성분 및 발열량 분석

건조를 진행하지 않은 원 시료 및 건조된 시료에 대한 발열량을 분석하였다. 실험 결과, 원 시료의 저위발열량은 847kcal/kg, 고위발열량은 1,339kcal/kg로 분석되었다. 수분 함유율이 0% 수준으로 건조된 우분(dry basis)의 저위발열량은 3,542kcal/kg, 고위발열량은 3,821kcal/kg로 분석되었으며, 수분 함유율이 낮을수록 고위발열량 및 저위발열량이 높은 것으로 나타났다(<표 4-1> 참조).

<표 4-1> 우분의 발열량 분석 결과

구분	수분 함유율	고위발열량	저위발열량	비고
원 시료	64.9%	1,339 kcal/kg	847 kcal/kg	
건조 시료 (dry basis)	0%	3,821 kcal/kg	3,542 kcal/kg	

우분 시료의 삼성분 조성 분석은 원 시료를 180℃의 온도에서 1시간 동안 건조한 시료를 사용하여 총 3회 진행하였으며, 고정탄소, 휘발분, 회분을 측정하였다. 우분의 삼성분 조성은 <표 4-2>에서 보는 바와 같다. 우분 시료의 고정탄소는 평균 31.32%, 휘발분은 평균 57.50%, 회분은 평균 11.18%로 분석되었다.

<표 4-2> 우분의 삼성분 조성

(단위: %)

구분	고정탄소	휘발분	회분	비고
실험_1	31.96	56.58	11.46	
실험_2	31.01	58.21	10.78	
실험_3	30.99	57.70	11.31	
평균(%)	31.32	57.50	11.18	
표준편차(%)	0.55	0.83	0.36	

우분 시료의 질소, 탄소, 수소, 황, 산소 함량을 분석하기 위하여 원소 분석을 실시하였으며, 180℃의 온도에서 1시간 동안 건조한 시료를 활용하여 3회에 걸쳐 측정하였다. 우분의 성분 평균 함량은 질소 2.4%, 탄소 41.2%, 수소 5.2%, 황 0.53%, 산소 함량 50.67%로 나타났다(<표 4-3> 참조).

<표 4-3> 우분의 원소 조성

(단위: %)

구분	질소	탄소	수소	황	산소
실험_1	1.8	40.7	5.4	0.55	51.55
실험_2	2.7	41.4	5.1	0.54	50.26
실험_3	2.7	41.5	5.1	0.49	50.21
평균(%)	2.4	41.2	5.2	0.53	50.67
표준편차(%)	0.52	0.44	0.17	0.03	0.76

경기도 A우사에서 최초 획득한 원 시료의 수분 함유율은 약 50~75% 사이로 나타났고(<표 4-4> 참조), 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출 특성을 확인하기 위하여 오븐을 활용하여 인위적인 건조를 진행하였다. 건조 과정을 거친 13개 우분 시료의 수분 함유율은 1~25% 사이로 측정되었다.

<표 4-4> 원 시료의 수분 함유율

(단위: %)

구분	수분 함유율	비고
원 시료_1	49.43	
원 시료_2	53.52	
원 시료_3	71.95	
원 시료_4	48.21	
원 시료_5	49.15	
원 시료_6	51.85	
원 시료_7	60.87	
원 시료_8	73.33	
원 시료_9	68.19	

## 제2절 우분 연소에 따른 미세먼지 농도

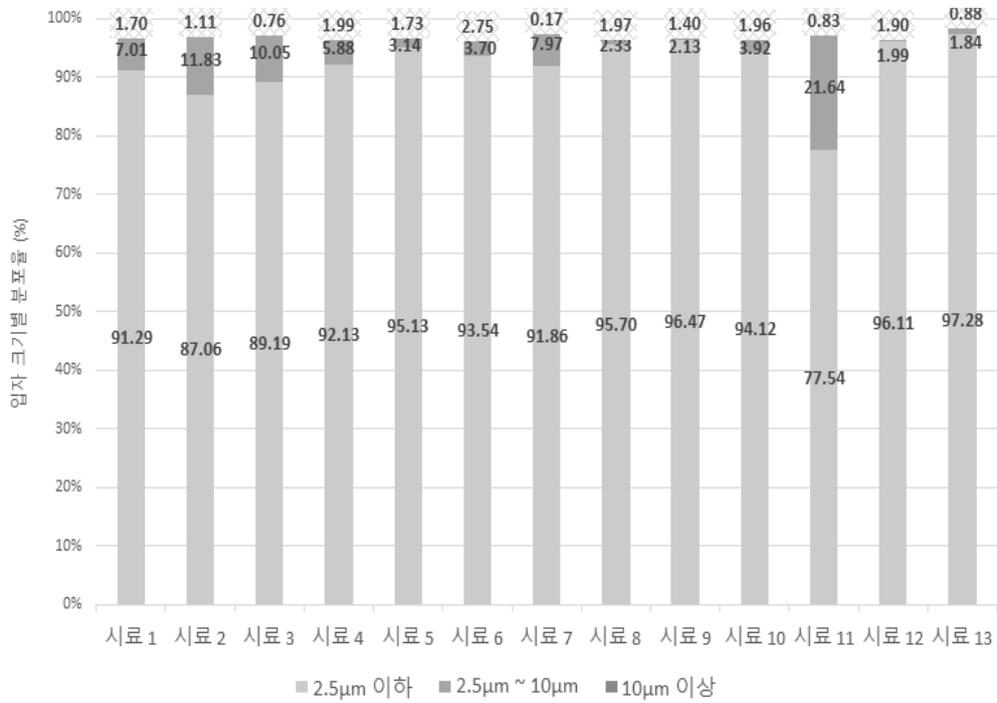
우분 연소에 따른 미세먼지 농도 측정은 총 13회 실시하였으며 우분 연소에 따른 미세먼지의 입자 크기별 농도는 <표 4-5>과 같다. 우분의 PM-10 농도는 138.36mg/m<sup>3</sup> ~ 3,213.56mg/m<sup>3</sup> 사이로 나타났다. PM-2.5 농도는 133.09mg/m<sup>3</sup> ~ 3,153.97mg/m<sup>3</sup> 사이로 측정되었다.

<표 4-5> 우분 연소에 따른 먼지 농도

구분	수분 함유율	입자 크기	농도(mg/m <sup>3</sup> )	비고
시료_1	1.63%	PM-10	293.79	
		PM-2.5	272.85	
시료_2	2.69%	PM-10	418.73	
		PM-2.5	368.64	
시료_3	6.72%	PM-10	2,107.12	
		PM-2.5	1,893.76	
시료_4	8.38%	PM-10	371.58	
		PM-2.5	349.28	
시료_5	8.52%	PM-10	902.27	
		PM-2.5	873.48	
시료_6	9.26%	PM-10	138.36	
		PM-2.5	133.09	
시료_7	9.73%	PM-10	1,371.39	
		PM-2.5	1,261.92	

시료_8	13.42%	PM-10	316.18	
		PM-2.5	308.67	
시료_9	14.24%	PM-10	259.09	
		PM-2.5	253.50	
시료_10	14.71%	PM-10	296.39	
		PM-2.5	284.54	
시료_11	16.24%	PM-10	2,670.67	
		PM-2.5	2,088.06	
시료_12	24.63%	PM-10	2,521.68	
		PM-2.5	2,470.54	
시료_13	25.21%	PM-10	3,213.56	
		PM-2.5	3,153.97	

우분 연소에 따라 발생하는 먼지의 입자 크기별 분포는 2.5 $\mu$ m 이하의 먼지 비율은 77.54% ~ 97.28% 사이로 나타났으며, 2.5 $\mu$ m ~ 10 $\mu$ m 사이의 먼지는 1.84% ~ 21.64%를 차지하였다. 10 $\mu$ m 이상의 먼지 비율은 0.17% ~ 2.75% 사이로 측정되었다(<그림 4-1> 참조). 우분 연소에 따라 발생하는 먼지의 대부분이 입자 크기가 2.5 $\mu$ m 보다 작은 초미세먼지(PM-2.5)인 것으로 나타났다.



<그림 4-1> 우분 연소에 따른 먼지의 입자 크기별 분포

### 제3절 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수

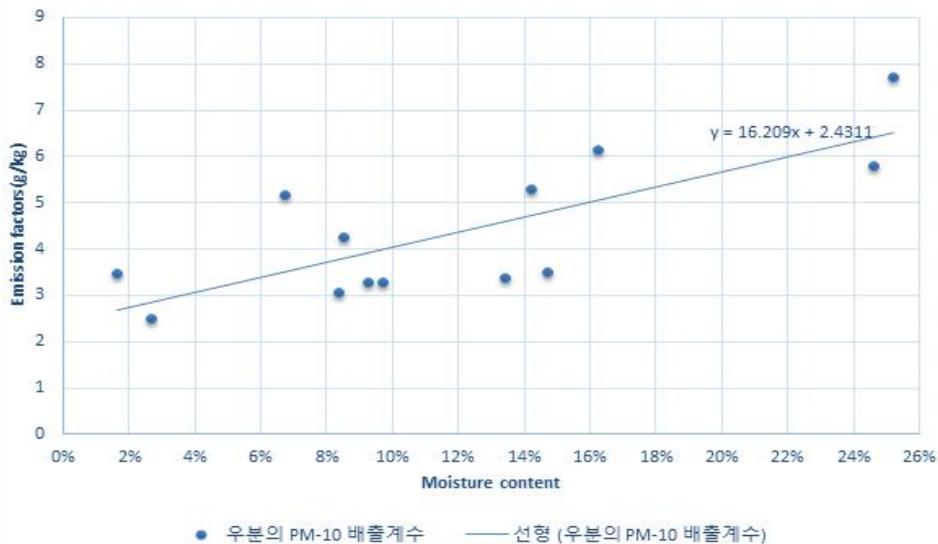
#### 1. 미세먼지(PM-10) 배출계수

우분 연소에 따른 PM-10 배출계수는 2.48g/kg ~ 7.72g/kg 사이로 산정되었으며, 평균값은 4.02g/kg으로 나타났다(〈표 4-6〉 참조). PM-10 배출계수의 평균값은 수분율이 매우 낮은 시료 1 ~ 시료 3을 제외하고, 『가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시』에 따른 가축분뇨 고체연료 기준 수분율(20% 미만)을 고려하여 시료 4부터 시료 11까지의 8개 시료의 평균값으로 산정하였다.

수분 함유율이 우분 연소에 따른 PM-10 배출계수에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수분 함유율과 PM-10 배출계수를 축으로 하는 분포도를 작성하였다(〈그림 4-2〉 참조). 수분 함유율에 따른 PM-10 배출계수 분포도에 따르면 우분 시료의 수분 함유율이 많을수록 연소에 따라 발생하는 PM-10 배출계수가 증가하는 것으로 나타났다. 우분 시료의 수분 함유율과 PM-10 배출계수 사이의 상관계수는 0.76으로 강한 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, 수분 함유율 증가에 따른 불완전 연소로 인해 먼지 발생이 증가한 것으로 예상된다.

<표 4-6> 우분 연소에 따른 PM-10 배출계수

구분	수분 함유율 (%)	농도 (mg/Nm <sup>3</sup> )	총 유량 (Nm <sup>3</sup> )	우분 소각량 (kg)	배출계수 (g/kg)
시료_1	1.63	293.79	2.36	0.200	3.47
시료_2	2.69	418.73	1.18	0.200	2.48
시료_3	6.72	2,107.12	0.49	0.200	5.16
시료_4	8.38	371.58	1.64	0.200	3.05
시료_5	8.52	902.27	0.94	0.200	4.25
시료_6	9.26	138.36	4.76	0.200	3.29
시료_7	9.73	1,371.39	0.48	0.200	3.27
시료_8	13.42	316.18	2.12	0.200	3.36
시료_9	14.24	259.09	4.09	0.200	5.30
시료_10	14.71	296.39	2.36	0.200	3.50
시료_11	16.24	2,670.67	0.82	0.200	6.14
시료_12	24.63	2,521.68	0.46	0.200	5.80
시료_13	25.21	3,213.56	0.48	0.200	7.72



<그림 4-2> 수분 함유율에 따른 PM-10 배출계수 분포도

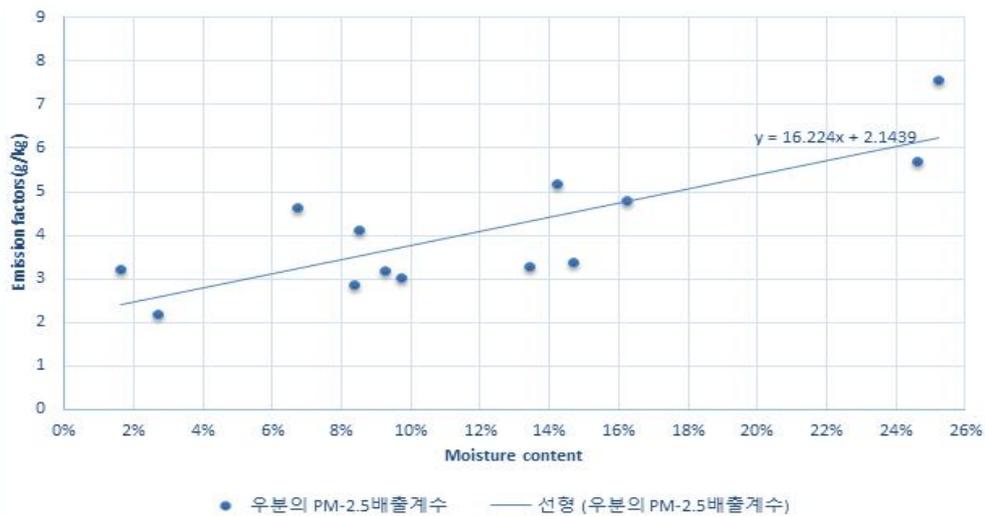
## 2. 초미세먼지(PM-2.5) 배출계수

우분 연소에 따른 PM-2.5 배출계수는 2.16g/kg ~ 7.57g/kg 사이로 산정되었으며, 평균값은 3.72g/kg으로 나타났다(<표 4-7> 참조). PM-2.5 배출계수의 평균값은 PM-10 배출계수의 평균값과 마찬가지로 시료 4부터 시료 11의 평균값으로 계산하였다.

시료의 수분 함유율이 PM-2.5 배출계수에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수분 함유율에 따른 PM-2.5 배출계수 분포도를 작성한 결과(<그림 4-3> 참조), 시료의 수분 함유율이 증가할수록 PM-2.5 배출계수도 증가하는 경향을 보였다. 이는 PM-10 배출계수와 마찬가지로 시료의 수분 함유율 증가에 따른 불완전 연소로 인한 것으로 판단된다. 시료의 수분 함유율과 PM-2.5 배출계수의 상관계수는 0.80으로 나타나 강한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

<표 4-7> 우분 연소에 따른 PM-2.5 배출계수

구분	수분 함유율 (%)	농도 (mg/Nm <sup>3</sup> )	총 유량 (Nm <sup>3</sup> )	우분 소각량 (kg)	배출계수 (g/kg)
시료_1	1.63	272.85	2.36	0.20	3.22
시료_2	2.69	368.64	1.18	0.20	2.18
시료_3	6.72	1,893.76	0.49	0.20	4.64
시료_4	8.38	349.28	1.64	0.20	2.87
시료_5	8.52	873.48	0.94	0.20	4.11
시료_6	9.26	133.09	4.76	0.20	3.17
시료_7	9.73	1,261.92	0.48	0.20	3.01
시료_8	13.42	308.67	2.12	0.20	3.28
시료_9	14.24	253.50	4.09	0.20	5.19
시료_10	14.71	284.54	2.36	0.20	3.36
시료_11	16.24	2,088.06	0.82	0.20	4.80
시료_12	24.63	2,470.54	0.46	0.20	5.68
시료_13	25.21	3,153.97	0.48	0.20	7.57



<그림 4-3> 수분 함유율에 따른 PM-2.5 배출계수 분포도

### 3. 미세먼지 배출계수 평가

본 연구에서 개발된 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 선행연구에서 개발된 축분의 연소에 따른 미세먼지 배출계수 및 장작을 활용한 화목난로의 미세먼지 배출계수와 비교하였다(〈표 4-8〉 참조).

Sahu(2016)는 Cattle, Blue Cattle, Buffalo, Bull 등 4종류의 가축분뇨를 Closed chamber에서 연소시켜 미세먼지 배출계수를 개발하였고, 우분의 PM-10 배출계수는 본 연구의 배출계수보다 약 273% 수준인 11g/kg으로 나타났다. 이러한 차이는 깔짚이 혼합되어 있는 유무 등 우분 시료 조건 차이에 의한 것으로 판단된다.

Park(2013)는 우분을 다양한 온도에서 연소시켜, 연소 온도에 따른 PM-10 배출계수를 개발하였다. 각각 459℃, 560℃, 735℃에서 우분을 연소시켰으며, PM-10 배출계수는 각각  $3.476 \pm 1.594 \text{g/kg}$ ,  $0.589 \pm 0.169 \text{g/kg}$ ,  $0.043 \pm 0.012 \text{g/kg}$ 으로 개발되어 연소 온도가 증가할수록 PM-10 배출계수가 작아지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 PM-10 배출계수의 46% ~ 126% 차이를 보였으며, 이는 연소 온도의 차이로 인한 것으로 판단된다.

화목난로에서 사용되는 연료에 따른 미세먼지 배출계수 차이를 비교하였다. 박성규(2015)는 화목난로 및 보일러에서 장작을 연소시켜 PM-10 및 PM-2.5 배출계수를 개발하였으며, PM-10 배출계수는 6.53g/kg, PM-2.5 배출계수는 4.16g/kg으로 나타났다. 본 실험에서 개발된 우분의 PM-10 배출계수보다 약 162%, PM-2.5 배출계수의 약 111% 수준으로 높은 값을 보였으며, 이는 연소에 사용된 연료의 차이에 의한 것으로 판단된다.

<표 4-8> 미세먼지 배출계수 비교

연구	연료	PM-10 (g/kg)	PM-2.5 (g/kg)	비고
본 연구	우분	4.02	3.72	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 깔짚이 혼합된 혼합분을 사용</li> <li>- 화목난로를 연소장치로 사용</li> <li>- PM-10 배출계수 및 PM-2.5 배출계수는 각각 2.48g/kg ~ 7.72g/kg, 2.16g/kg ~ 7.57g/kg 사이로 나타남</li> </ul>
Sahu (2016)	우분	11	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cattle, Buffalo 등 4종류의 우분을 사용</li> <li>- Closed chamber를 연소장치로 사용</li> <li>- PM-10 배출계수가 11g/kg으로 나타났으며, 본 연구에서 개발된 배출계수보다 273% 높음</li> <li>- 실험에 사용된 시료 차이로 인해 배출계수가 차이나는 것으로 판단됨.</li> </ul>
Park (2013)	우분	3.48±1.60	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 459°C, 560°C, 735°C 등 다양한 온도 조건에서 우분을 연소</li> <li>- 각각의 온도에서 PM-10 배출계수가 3.476g/kg, 0.589g/kg, 0.043g/kg 수준으로 나타났음 이는 본 연구에서 개발된 배출계수에 비하여 작은 수준임.</li> <li>- 본 연구와 대비하여 고온에서 연소를 진행함에 따라 배출계수가 차이나는 것으로 판단됨.</li> </ul>
박성규 (2015)	장작	6.53	4.16	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 화목난로에서 장작을 연소</li> <li>- PM-10 및 PM-2.5 배출계수는 6.53g/kg, 4.16g/kg으로 산정되었음.</li> <li>- 본 연구와 대비하여 PM-10 배출계수는 약 162%, PM-2.5 배출계수는 약 111% 수준으로 높음.</li> </ul>

## 제4절 우분 연소의 기후·환경 영향 분석

바이오에너지원으로써 우분을 연소시켜 활용할 경우 석탄 발전소에서 혼소용으로 활용함에 따라 탄소중립에 의한 국내 온실가스 배출량이 저감될 것으로 판단된다. 또한, 우분을 연소시키는 과정에서 암모니아( $\text{NH}_3$ )가 분해되어 축산 및 농업부문의 암모니아 배출량이 줄어들 것으로 예상된다.

우리나라의 젓소와 한우는 2017년 기준 각각 41만 두, 288만 두로 총 329만 두가 사육되고 있으며, 가축분뇨 발생량은 각각 188.2백톤/일, 419.8백톤/일로 나타났다(환경부, 2017). 환경부는 가축분뇨 발생량에 따른 가축분뇨 고체연료 에너지 공급 잠재량을 산출하였고, 산출 결과 총 1,911,118TOE의 바이오에너지 잠재량이 있는것으로 나타났다(환경부, 2016).

환경부(2016)는 유사 고형연료를 사용하는 석탄 화력발전소에서 가축분뇨 고체연료를 혼소용으로 활용할 수 있을 것으로 판단하였고, 그에 따른 석탄 소요량 저감분을 예상하였다. 환경부에 따르면 가축분뇨 고체연료를 활용에 따라 2013년 기준 2% 혼소 시 1,194천톤/년, 10% 혼소 시 5,597천톤/년의 석탄을 대체 할 수 있을것으로 나타났다. 환경부(2016)에서 제시한 가축분뇨 고체연료의 석탄 대체량을 토대로 이산화탄소 저감량을 계산하였을 때, 혼소율(2%, 10%)에 따라 각각 2,810천톤/년, 13,174천톤/년의 이산화탄소를 감축 할 수 있는 수준이다<sup>2)</sup>.

우리나라의 암모니아 총 배출량은 2016년 기준 301,301톤이며, 그 중 72%에 해당하는 217,464톤이 분뇨관리 과정에서 발생하는 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2019). 김기연(2006)은 축분 퇴비화 과정에서의

2) 「에너지법 시행규칙」(2019) 별표 에너지열량 환산기준에 따라 유연탄(연료용)의 순발열량 24.7MJ/kg, 이산화탄소 배출계수 95,300kgCO<sub>2</sub>/TJ으로 계산한 값임.

암모니아 배출량을 통계적 모델을 활용하여 예측하였는데, 퇴비화 과정에서 최소 10ppm부터 최대 50ppm 수준의 암모니아가 발생하는 것으로 밝혔다. 반면에 환경부(2013)의 연구에 따르면 가축분뇨 고형연료 제품의 연소 시 발생하는 암모니아 배출량은 8.9ppm으로 나타났다(국립환경과학원, 2019).

가축분뇨를 퇴비화 하는 과정에서 나오는 암모니아 배출량과 연소과정에서 발생하는 암모니아 배출량을 비교하기 위해서는 여러 가정과 실험이 수반되어야 하기에 본 연구에서 수행할 수는 없었지만, 위와 같은 선행연구 사례를 통하여 가축분뇨를 연소 할 경우 퇴비화 과정에 비하여 암모니아 배출량이 상대적으로 줄어들 것을 예상할 수 있다.

## 제5장 결 론

### 제1절 연구 요약

최근 가축분뇨 발생량은 증가하는 반면에 수요처인 농경지는 감소하고 있어 가축분뇨 공급과 수요의 불균형이 발생하고 있다. 가축분뇨는 ‘탄소중립’으로 인하여 온실가스 배출량을 산정하지 않으며, 비교적 발열량이 높아 새로운 에너지원으로써 주목받고 있지만, 적절하게 관리되지 않을 경우 대기오염의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 가축분뇨 연소에 따른 미세먼지 등 대기오염물질 발생에 대한 연구를 진행 할 필요가 있다.

본 연구는 가축분뇨 중 우분을 연소 대상으로 선정하였고, 대기오염방지시설이 설치되지 않은 화목난로에서 연소시켜 발생하는 미세먼지 농도를 분석하고, 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 연소 실험에 앞서 시료의 특성을 파악하기 위하여 발열량 분석, 삼성분 분석, 원소 분석을 진행하였다.

발열량 분석 결과, 수분 함유율이 약 64.9%인 원 시료 기준 저위발열량 및 고위발열량은 각각 847kcal, 1,339kcal로 나타났으며, 건조 시료의 저위발열량 및 고위발열량은 각각은 3,542kcal, 3,821kcal로 나타났다. 우분의 삼성분 조성은 고정탄소 31.32%, 휘발분 57.50%, 회분 11.18%로 나타났다. 원소 분석 결과 우분의 질소 함량은 2.4%, 탄소 함량은 41.2%, 수소 함량은 5.2%, 황분 함량은 0.53%로 나타났다.

연소 실험에 앞서 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출 특성을 확인하기 위하여 우분 시료에 대한 인위적인 건조를 실행하였으며, 1~25% 사이의 수분 함유율을 가진 시료를 제작하였다. 제작된 시료는 농가에서

일반적으로 사용하고 있는 대기오염 방지시설이 설치되지 않은 화목난로에서 연소하였다. 미세먼지 배출계수는 중량농도법으로 분석한 미세먼지 농도 및 배기가스량과 우분 소각량을 고려하여 산정하였다.

우분 연소에 따른 PM-10 배출계수는 2.48g/kg ~ 7.72g/kg 사이로 나타났으며 평균값은 4.02g/kg으로 산정되었다. PM-2.5 배출계수는 2.16g/kg ~ 7.57g/kg 사이로 나타났으며, 평균값은 3.72g/kg으로 산정되었다.

수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수를 분포도로 나타내었을 때, 시료의 수분 함유율이 증가할수록 미세먼지 배출계수도 크게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 미세먼지 배출계수와 시료의 수분 함유율을 대상으로 상관관계 분석을 진행한 결과, 각각 0.76, 0.80으로 나타나 각 변수끼리 강한 상관성을 지니고 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 개발된 미세먼지 배출계수와 선행연구에서 개발된 미세먼지 배출계수를 비교하였을 때, Pravin(2016)의 미세먼지 배출계수는 본 연구에 비해 약 273% 수준으로 산정되었으며, Park(2013)의 미세먼지 배출계수는 본 연구에 비해 약 46% ~ 126% 이상으로 산정되었다.

## 제2절 연구의 시사점 및 한계

연구결과에 따르면 우분 연소 시 발생하는 입자상 물질의 약 91%를 PM-2.5가 차지할 정도로 초미세먼지 배출량이 대부분인 것으로 나타났다. 우분을 고체연료로 사용할 경우 미세먼지를 효율적으로 집진할 수 있는 대기오염 방지시설이 설치되어 있는 발전소에서 활용하는 것이 타당하다고 판단된다.

바이오에너지원으로써 우분을 고체연료로 사용함에 따라 석탄 사용량의 일부를 대체할 수 있을 것으로 보이며, ‘탄소중립’으로 인한 국내 온실가스 감축 효과가 기대된다. 또한, 퇴비화 하는 과정에서 발생하는 암모니아에 비하여 상대적으로 적은 양이 배출될 것으로 예상되어 초미세먼지 저감 효과도 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 시사점은 다음과 같다.

첫째, 국내에서 연구가 거의 진행되어 있지 않은 가축분뇨 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하여 국가 미세먼지 인벤토리 신뢰도 개선에 기여 할 것이다.

둘째, 우분을 바이오에너지원으로써 활용할 경우 예상되는 기후변화 및 대기 환경 관련 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 깔짚이 혼합된 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발함에 있어 우분에 혼합되어 있는 깔짚의 종류 및 비율을 고려하지 못하였으며, 우분 시료를 성형화 하지 못하였다는 한계점이 있다. 깔짚의 종류 및 혼합비율을 고려한 미세먼지 배출계수를 개발하면 보다 정확한 미세먼지 배출량을 산정할 수 있을 것이다. 추가적으로 가축분뇨 연소 과정에서 발생하는 암모니아 배출량을 파악하여 퇴비화 과정에서 발생하는 암모니아 배출량과 비교하면, 가축분뇨를 고체연료로 활용 시 예상되는 암모니아 저감량을 파악 할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

### [국내 문헌]

- 관계부처 합동, 2017, 『미세먼지 관리 종합대책』, 세종: 환경부.
- 국립축산과학원, 2017, 『가축분뇨 고품연료 열량증대를 위한 가공조건 및 이용기술 개발』, 전주: 농촌진흥청.
- 국립환경과학원, 2014, 『가축분뇨 자원화 시설 처리 및 배출실태 조사 연구』, 인천: 국립환경과학원.
- 국립환경과학원, 2018, 『대기환경연보 2017』, 인천: 국립환경과학원.
- 국립환경과학원, 2019, 『2016 국가 대기오염물질 배출량』, 인천: 국립환경과학원.
- 김기연·최홍림·고한중·김치년, 2006, “축분 퇴비화 과정 중 퇴비 부숙도를 고려한 암모니아 발생량 산정”, 『한국동물자원과학회지』, 48(1), pp.123-130.
- 김도희, 2016, “바이오매스 가축분뇨 폐기물을 이용한 퇴비자원화 및 고체연료 에너지화의 관한 연구” 박사학위 논문, 한세대학교, 군포.
- 김민수, 2014, “가축분뇨의 고품성형화 방안 및 고품연료의 특성연구” 석사학위 논문, 전북대학교, 전주.
- 김종현·허선화·김형천·조명란·임승영·이상보 등, 2017, 『한국대기환경학회지』, 33(2), pp.77-86.
- 박성규·최상진·김대근·김동영·장영기·전의찬, 2015, “화목 난로와 보일러 사용에 의한 대기오염물질과 블랙카본의 배출 특성”, 『한국기후변화학회지』, 6(1), pp. 49-54.
- 박중화, 2008, “탄소중립”, 『한국관개배수 논문집』, 15(2), pp. 86-89.

- 박지훈 · 석지원 · 이상아 · 권오훈 · 이경숙 · 허용 등, 2015, “계사 및 우사 내 암모니아 및 황화수소 노출농도 평가”, 『한국환경보건학회지』, 41(5), pp.277-288.
- 에너지경제연구원, 2018, 『에너지통계연보 2018』, 울산: 에너지경제연구원.
- 이귀현, 2010, “우분 성형 고품연료의 열 및 물리화학적 특성”, 『바이오시스템공학』, 35(1), pp.64-68.
- 이성현, 2016, “우분의 고품 연료화를 위한 특성 분석”, 『신재생에너지』, 12(4), pp.64-69.
- 이성현 · 유병기 · 정광화 · 주선이, 2017, “우분 고품연료의 이용성 향상을 위한 제언”, 『한국신 · 재생에너지학회 춘계학술대회 초록집』.
- 정광화 · 김중곤 · 이동준 · 조원모 · B. Ravindran, 곽정훈, 2016, “건조방법 형태에 따른 우분 고체연료 수분 감소효과”, 『유기성자원화』, 24(4), pp.105-112.
- 주선이 · 이성현 · 유병기 · 김혁주 · 정광화, 2015, “가축분뇨 고품분의 고품연료화를 위한 타당성 분석”, 『한국신 · 재생에너지학회 춘계학술대회 초록집』.
- 최선화, 2007, “축산분뇨 처리현황과 효율적 관리방안”, 『한국관개배수학회지』, 14(1), pp.110-120.
- 최희철 · 감동환 · 송준익 · 전병수 · 전중환 · 유용희 등, 2008, “한우농가의 사육규모별, 지역별 축사시설 현황 분석”, 『축사시설환경』, 14(3), pp.167-174.
- 충북연구원, 2018, 『국내외 가축분뇨 처리 · 이용 및 악취저감 실천기술 적용과제 연구용역』, 청주: 충북연구원.
- 통계청, 2019, 『2018년 경지면적조사 결과』, 대전: 통계청.

- 한영한, 2018, 『강원도 가축분뇨 고품질연료화 사업 추진방안 연구』, 춘천: 강원연구원.
- 환경부, 2013, 『가축분뇨 고품질연료 제품의 품질·등급 기준 마련 연구』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2015, 『가축분뇨 바이오에너지화 시설의 운영관리 지침 마련을 위한 기초 연구』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2016a, 『가축분뇨 바이오에너지화 확대를 위한 타당성 조사』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2016b, 『온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2018a, 『가축분뇨 처리 통계』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2018b, “국민 78.7% “미세먼지는 건강위협”, 72.4% “시민실천운동 참여” 시민 참여 의지 높아” 보도자료, 세종: 환경부.
- 환경부, 2019a, 『2017년도 유기성폐자원 바이오가스화시설 현황』, 세종: 환경부.
- 환경부, 2019b, 『환경백서 2019』, 세종: 환경부.

## [국외 문헌]

- C. Muller, H. Yan, 2018, Household fuel use in developing countries: Review of theory and evidence, Energy Economics, 70, pp.429-439.
- D.S. Park, M.L. Barabad, G.J. Lee, S.B. Kwon, Y.M. Cho and D.H. Lee et al., 2013, Environ. Sci. Technol, 47, pp.12952-12957.
- K. Oshita, S. Toda, M. Takaoka, H. Kanda, T. Fujimori and K. Matsukawa et al., 2015, Fuel, 159, pp.7-14.

P.K Sahu, S. Chakradhari, S Dewangan, K.S. Patel, 2016, Combustion Characteristics of Animal Manures, Journal of Environmental Protection, 7, pp.951-960.

[법규]

가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시, 2018, 환경부고시 제2018-114호.

가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률, 2018, 법률 제 15829호.

에너지법 시행규칙, 2019, 산업통상자원부령 제335호.

[인터넷 사이트]

<http://kosis.kr/index/index.do>

## **Abstract**

### Development of Particulate Matter Emission Factors of Cattle Manure Combustion

JaeHo Yoo

Cooperative Course for Climate Change

The Graduate School

Sejong University

The number of livestock heads and livestock manure is steadily increasing in Korea. The largest demand for livestock manure is farms using compost and manure. About 72% of livestock manure is used in farmland through composting and manure. However, Korea's farmland area has been continuously decreasing, so the livestock manure to be treated increases, but the demand source is decreasing.

Livestock manure does not calculate greenhouse gas emissions due to carbon neutrality. It also can be used as an energy source, but if not properly managed, it can cause environmental pollution. Therefore, it is necessary to calculate accurate air pollutant emissions through research on the generation of air pollutants such as particulate matter caused by livestock manure combustion.

This study utilizes the weight concentration method, which is a method of measuring particulate matter according to air pollution process test criteria. The purpose of this study is to analyze the concentration of fine particulate matter (PM-10) and ultra-fine particulate matter (PM-2.5) from combustion in livestock manure and develop emission factors.

PM-10 emission factor ranged from 2.48g/kg to 7.72g/kg, with an average value of 4.02g/kg. PM-2.5 emission factor was analyzed from 2.16g/kg to 7.57g/kg, with an average value of 3.72g/kg.

As a result of the study, the correlation coefficient between the moisture content of cattle manure samples and the PM-10 and PM-2.5 emission coefficients was 0.76 and 0.80 respectively, indicating a strong positive correlation. In other words, as the moisture content of the manure sample increases, PM-10 and PM-2.5 emissions increase.

This study developed the particulate matter emission factors of manure burning process of cattle manure, which is considered as a potential alternative fuel, and analyzed the climate and environmental effects of cattle manure combustion.

**Keywords : Livestock Manure, Cattle Manure, Particulate Matter Emission Factors, PM-10, PM-2.5, Climate and Environmental effects**

## 감사의 글

석사학위논문을 작성하면서 많은 분들의 도움과 격려를 받았습니다. 석사학위과정이라는 2년간의 길다면 길고, 짧다면 짧은 기간을 마무리하면서 도움을 주신 분들께 감사의 인사를 드리고자 합니다.

석사학위과정 동안 논문을 포함한 학문적인 지도만이 아니라 ‘隨處爲主’의 태도를 지도해주시고, 격려해주신 전의찬 교수님께 감사드립니다. 석사학위논문 심사과정에서 진정성 있는 지도로 더 나은 논문을 작성할 수 있게 이끌어 주신 박성규 박사님께 감사드립니다. 학위과정 동안 항상 응원해주고 챙겨주신 김하나 교수님께 감사드립니다.

논문을 작성하는 과정에 많은 도움과 힘을 준 연구실 인원들 감사드립니다. 조성흠 박사님, 조창상 박사님, 홍윤정 박사님, 강성민 박사님, 김민욱 박사님, 승현이형, 준영이, 지윤이, 성동이, 진영이, 세근이 모두 감사드립니다. 덕분에 연구실 생활을 즐겁게 할 수 있었습니다.

항상 뒤에서 묵묵히 응원해주고 힘이 되어준 우리 가족, 부모님과 누나에게 감사드립니다. 제가 하는 일은 늘 믿고 기다려주어 좋은 결실을 맺었다고 생각합니다.