

가축분뇨 연소과정의 미세먼지 배출계수 개발 - 우분을 중심으로 -

유재호* · 전의찬**†

*세종대학교 기후에너지융합학과 박사과정 학생, **세종대학교 기후환경융합학과 교수

Development of Particulate Matter Emission Factors of Cattle Manure Combustion

Yoo, Jae-Ho* and Jeon, Eui Chan**†

*Ph.D. Student, Department of Climate and Energy, Sejong Univ, Republic of Korea

**Professor, Department of Climate and Environment, Sejong Univ, Republic of Korea

ABSTRACT

The number of livestock and amount of livestock manure are steadily increasing in Korea. The largest demand for livestock manure is from farms that use it as fertilizer. Approximately 72% of livestock manure is used in farmland through composting and manure. However, as Korea's farmland area has been continuously decreasing, the supply of livestock manure has increased while the demand has decreased.

Livestock manure is not included in greenhouse gas emissions calculations due to carbon neutrality. It can also be used as an energy source. However, if not properly managed, it can cause environmental pollution. Therefore, it is necessary to calculate accurate air pollutant emissions through research on 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 of livestock manure and develop emission factors.

The PM-10 emission factor ranged from 2.48 g/kg to 7.72 g/kg, with an average value of 3.93 g/kg. The PM-2.5 emission factor ranged from 2.18 g/kg to 7.57 g/kg, with an average value of 3.62 g/kg.

The correlation coefficients between the moisture content of cattle manure samples and PM-10 and PM-2.5 emission coefficients were 0.76 and 0.80, respectively; this indicates a strong positive correlation. As the moisture content of the manure sample increases, PM-10 and PM-2.5 emissions increase. This study described the particulate matter emission factors of manure burning processes for cattle manure, which is considered a potential alternative fuel.

Key words : Livestock Manure, Cattle Manure, Particulate Matter Emission Factors, PM-10, PM-2.5

†Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr (Sejong University 1115B ho Gwanggaeto Building, 209 Neundgong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Republic of Korea. Tel. +82 -2-3408-4353)

ORCID 유재호 0000-0001-6340-3710

전의찬 0000-0003-2783-4550

1. 서론

1.1 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(KMOE, 2018).

가축분뇨의 가장 큰 수요처는 퇴비와 액비를 활용하는 농가이며, 2018년 기준 논과 밭을 포함한 국내 농경지 면적은 1,596천 ha로 1975년부터 지속적으로 감소하고 있는 추세를 보이고 있다(KOSTAT, 2018). 처리해야 하는 가축분뇨는 증가하는데 가축분뇨를 활용할 수 있는 수요처인 농경지는 감소하고 있어 가축분뇨 공급과 수요의 불균형이 발생하고 있다(Lee et al., 2016).

가축분뇨는 바이오에너지의 하나로써 연소 시 ‘탄소중립(Carbon Neutral)’ 개념으로 인해 이산화탄소 배출량을 보고하지 않지만, 적절하게 관리되지 않을 경우 환경을 오염시키는 원인으로 작용할 수 있다(IPCC, 2007). 따라서 가축분뇨 연소과정의 미세먼지 등 대기오염물질 발생에 대한 연구를 통하여 정확한 대기오염물질 배출량을 산정할 필요가 있다.

가축분뇨의 연소과정에서 발생하는 대기오염물질에 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.

본 연구에서는 우분의 연소과정에서 발생하는 미세먼지(PM-10) 및 초미세먼지(PM-2.5)의 배출계수를 개발하여 가축분뇨 연소과정에서 발생하는 미세먼지 배출량을 보다 정확히 산정하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 범위

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

구를 진행하였다.

본 연구는 시료의 특성을 분석하기 위해 발열량 분석, 원소 분석, 공업 분석을 실시하였고, 중량농도법을 활용하여 연소 과정에서 발생하는 PM-10 및 PM-2.5 농도를 측정하여 가축분뇨 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 서론에서는 연구의 배경을 살펴보고 그에 따른 목적을 설정하고, 에너지원으로써의 가축분뇨 이용을 위한 선행 연구 사례들을 살펴보았다. 실험방법에서는 본 연구를 진행하기 위한 연소 실험방법, 우분 성분 및 발열량 분석방법, 미세먼지 배출계수 산정방법에 대하여 설명하였고, 결과에서는 우분의 성분 및 발열량 분석 결과를 정리하고 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수를 산정하였다. 결론 및 고찰에서는 본 연구의 시사점 및 한계를 정리하였다.

1.3 선행연구 분석

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

Lee et al. (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 3,500 kcal/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.

Sahu et al. (2016)은 closed chamber에서 황소, 물소 등 4종류의 우분을 연소시켜 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 연구 결과, 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수는 11 g/kg으로 나타났다. Park et al.(2013)은 우분을 다양한 온도에서 연소시켜 온도에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 연구 결과, 15 kW/m²에서의 미세먼지 배출계수는 3.476 g/kg으로 나타났으며, 25 kW/m², 50 kW/m²에서의 미세먼지 배출계수는 각각 0.589 g/kg, 0.043 g/kg으로 나타나 연소온도가 높을수록 미세먼지 배출계수가 작아지는

것으로 나타났다. Park et al. (2015)은 화목난로 및 보일러에서 장작을 연소시켜 PM-10 및 PM-2.5 배출계수를 개발하였으며, PM-10 배출계수는 6.53 g/kg, PM-2.5 배출계수는 4.16 g/kg으로 나타났다.

2. 실험방법

2.1 성분 및 발열량 분석방법

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.

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

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

최초 수집한 원 시료의 수분 함유율 측정은 오븐을 활용하여 시료의 무게변화가 없을때까지 가열하여 산정하였다. 연소 실험을 위한 우분 시료는 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출량 차이를 분석하기 위해 가열 시간의 차이를 두어 인위적으로 수분 함유율을 조정하였다. 이때, 연소 실험을 위한 우분 시료의 수분 함유율은 가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시에 따른 가축분뇨 고체연료의 수분 함유율 기준인 20% 이하를 충족하는 수준으로 하였다. 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 실험 인위적으로 수분 함유율을 조정한 우분 시료를 대상으로 초정밀 다용도 수분측정기(Kern, Mrs 120-3)를 사용하여 수분 함유율을 측정하였다. 수분 측정은 연소를 위해 준비한 각 시료의 일부분을 무작위로 확보하여 총 3회 측정하였고, 평균값을 수분 함유율로 활용하였다.

2.2 연소 실험 및 미세먼지 배출계수 산정방법

연소 실험을 위한 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 보관하였다.

본 연구는 우분 연소에 따라 발생하는 미세먼지 배출량을 측정하고 미세먼지 배출계수를 산정하기 위하여, 대기 오염방지시설을 설치하지 않은 화목난로를 연소시설로 설정하였다.

연소 실험에는 농가에서 일반적으로 활용되는 재반이, 연소실, 연료 및 공기주입구로 구성되어 있는 화목난로를 활용하였으며, 연소가스가 배출될 수 있게 덕트를 연소실에 연결하였다(Fig. 1 참조). 화목난로의 연소실은 가로 40 cm, 세로 76 cm, 높이 40 cm이며, 덕트의 길이는 약 3 m이다.

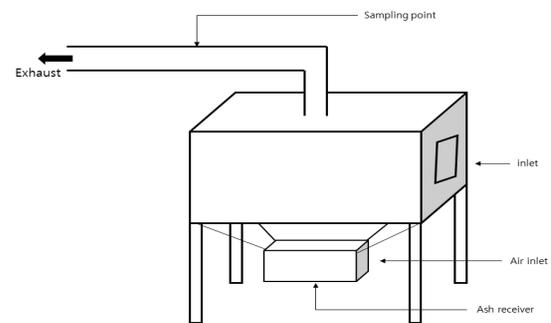


Fig. 1. The composition of the wood stove

미세먼지 농도는 중량농도법(Gravimetric Measurement Method)으로 측정하였다. 중량농도법은 대기환경 중 PM-10 및 PM-2.5 등 미세먼지를 측정하는 방법으로, 본 연구에서는 연소 과정에서 발생하는 먼지를 여과지에 포집하여 포집 전후의 여과지 무게차이를 통해 포집된 미세먼지의 농도를 측정하였다. 여과지의 무게는 미량 저울(Microbalance)을 통하여 측정하였으며, 3회 반복 측정된 무게의 평균값으로 포집된 미세먼지의 농도를 측정하였다.

미세먼지 농도 측정을 위해 연소가스의 온도가 약 40 ℃에 도달한 후 흡인 장치(Stack Sampler, CAE)를 사용하여 배출되는 가스를 등속흡인하였고, Cascade Impactor(PM-10, PM-2.5 Impactor, Johnas, Paul Gothe GmbH)를 활용하여 여과지에 미세먼지를 포집하였다.

우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수는 식 (2)와 같이 미세먼지 농도(mg/m³), 총 유량(m³), 우분 소각량(kg)을 이용하여 산정된다.

$$\text{배출계수(g/kg)} = \frac{\text{미세먼지농도 (mg/m}^3\text{)} \times \text{연소가스 유속 (m/sec)} \times \text{배출구 넓이 (m}^2\text{)} \times 10^{-3}}{\text{우분 연소량 (kg/sec)}} \times 10^{-3} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 우분의 성분 및 발열량 분석

건조하지 않은 우분 시료와 건조된 우분 시료에 대한 발열량을 분석하였다. 분석 결과, 원 시료의 저위발열량은 847 kcal/kg, 고위발열량은 1,339 kcal/kg로 분석되었다. 건조된 시료(수분 함유율 0%)의 저위발열량은 3,542 kcal/kg, 고위발열량은 3,821 kcal/kg로 분석되었다(Table 1 참조).

Table 1. Result of calorific value analysis

	Moisture contents	High calorific value	Low calorific value
Original Samples	64.9%	1,339 kcal/kg	847 kcal/kg
Dried Samples	0%	3,821 kcal/kg	3,542 kcal/kg

우분 시료의 휘발분, 회분 등의 조성을 분석하기 위해 공업 분석을 진행하였다. 원 시료를 180℃의 온도에서 1시간 동안 건조한 시료를 사용하여 총 3회 진행하였으며, 고정탄소, 휘발분, 회분을 측정하였다. 우분의 공업 분석 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다. 우분 시료의 고정탄소는 평균 31.32%, 휘발분은 평균 57.50%, 회분은 평균

11.18%로 분석되었다(Table 2 참조).

Table 2. Result of Proximate Analysis analysis

(Unit: %)

	Fixed Carbon	Volatile matter	Ash
Sample_1	31.96	56.58	11.46
Sample_2	31.01	58.21	10.78
Sample_3	30.99	57.70	11.31
Average	31.32	57.50	11.18
Standard Deviation	0.55	0.83	0.36

우분 시료의 질소, 탄소, 수소, 황, 산소 함량을 분석하기 위하여 원소 분석을 실시하였다. 180℃의 온도에서 1시간 동안 건조한 시료를 활용하여 3회에 걸쳐 측정된 결과, 평균 함량은 질소 2.4%, 탄소 41.2%, 수소 5.2%, 황 0.53%, 산소 50.67%로 나타났다(Table 3 참조).

경기도 A우사에서 최초 획득한 원 시료의 수분 함유율은 약 50~75% 사이로 나타났고, 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.

3.2 우분 연소에 따른 미세먼지 농도

우분 연소에 따른 미세먼지 농도 측정은 총 13회 실시하였으며 우분 연소에 따른 미세먼지의 입자 크기별 농도는 Table 4와 같다. 우분 연소 시 발생하는 PM-10 농도는 138.36 mg/m³ ~ 3,213.56 mg/m³ 사이로 나타났다. PM-2.5 농도는 133.09 mg/m³ ~ 3,153.97 mg/m³ 사이로 측정되었

Table 3. Result of elemental analysis

(Unit: %)

	Nitrogen	Carbon	Hydrogen	Sulphur	Oxygen
Sample_1	1.8	40.7	5.4	0.55	51.55
Sample_2	2.7	41.4	5.1	0.54	50.26
Sample_3	2.7	41.5	5.1	0.49	50.21
Average	2.4	41.2	5.2	0.53	50.67
Standard Deviation	0.52	0.44	0.17	0.03	0.76

Table 4. Particulate matter concentration

	Moisture contents (%)	Concentrations (mg/m ³)	
		PM-10	PM-2.5
Sample_1	1.63	293.79(7.13%)	272.85(92.87%)
Sample_2	2.69	418.73(11.96%)	368.64(88.04%)
Sample_3	6.72	2,107.12(10.13%)	1,893.76(89.87%)
Sample_4	8.38	371.58(6.00%)	349.28(94.00%)
Sample_5	8.52	902.27(3.19%)	873.48(96.81%)
Sample_6	9.26	138.36(3.81%)	133.09(96.19%)
Sample_7	9.73	1,371.39(7.98%)	1,261.92(92.02%)
Sample_8	13.42	316.18(2.38%)	308.67(97.62%)
Sample_9	14.24	259.09(2.16%)	253.50(97.84%)
Sample_10	14.71	296.39(4.00%)	284.54(96.00%)
Sample_11	16.24	2,670.67(21.82%)	2,088.06(78.18%)
Sample_12	24.63	2,521.68(2.03%)	2,470.54(97.97%)
Sample_13	25.21	3,213.56(1.85%)	3,153.97(98.15%)

다. 우분 연소에 따라 발생하는 먼지의 입자 크기별 분포는 2.5 μm 이하의 먼지 비율은 78.18% ~ 98.15% 사이로 나타났으며, 2.5 μm ~ 10 μm 사이의 먼지는 1.85% ~ 21.82%를 차지하였다. 우분 연소과정에서 발생하는 먼지의 대부분이 입자 크기가 2.5 μm 보다 작은 초미세먼지 (PM-2.5)인 것으로 나타났다.

3.3 수분 함유율에 따른 미세먼지 배출계수

3.3.1 미세먼지(PM-10) 배출계수

우분 연소에 따른 PM-10 배출계수는 2.48 g/kg ~ 7.72 g/kg 사이로 산정되었으며, 평균값은 3.93 g/kg으로 나타났다(Table 5 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 1부터 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(Fig. 2 참조). 수분 함유율에 따른 PM-10 배출계수 분포도에 따르면 우분 시

료의 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.

3.3.2 초미세먼지(PM-2.5) 배출계수

우분 연소에 따른 PM-2.5 배출계수는 2.18 g/kg ~ 7.57 g/kg 사이로 산정되었으며, 평균값은 3.62 g/kg으로 나타났다(Table 6 참조). PM-2.5 배출계수의 평균값은 PM-10 배출계수의 평균값과 마찬가지로 시료 1부터 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(Fig. 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.

Table 5. PM-10 emission factor

	Moisture contents (%)	Concentrations (mg/Sm ³)	Gas volume (Sm ³)	Cattle Manure amount (kg)	Emission factor (g/kg)
Sample_1	1.63	293.79	2.36	0.200	3.47
Sample_2	2.69	418.73	1.18	0.200	2.48
Sample_3	6.72	2,107.12	0.49	0.200	5.16
Sample_4	8.38	371.58	1.64	0.200	3.05
Sample_5	8.52	902.27	0.94	0.200	4.25
Sample_6	9.26	138.36	4.76	0.200	3.29
Sample_7	9.73	1,371.39	0.48	0.200	3.27
Sample_8	13.42	316.18	2.12	0.200	3.36
Sample_9	14.24	259.09	4.09	0.200	5.30
Sample_10	14.71	296.39	2.36	0.200	3.50
Sample_11	16.24	2,670.67	0.82	0.200	6.14
Sample_12	24.63	2,521.68	0.46	0.200	5.80
Sample_13	25.21	3,213.56	0.48	0.200	7.72

Table 6. PM-2.5 emission factor

	Moisture contents (%)	Concentrations (mg/Sm ³)	Gas volume (Sm ³)	Cattle Manure amount (kg)	Emission factor (g/kg)
Sample_1	1.63	272.85	2.36	0.20	3.22
Sample_2	2.69	368.64	1.18	0.20	2.18
Sample_3	6.72	1,893.76	0.49	0.20	4.64
Sample_4	8.38	349.28	1.64	0.20	2.87
Sample_5	8.52	873.48	0.94	0.20	4.11
Sample_6	9.26	133.09	4.76	0.20	3.17
Sample_7	9.73	1,261.92	0.48	0.20	3.01
Sample_8	13.42	308.67	2.12	0.20	3.28
Sample_9	14.24	253.50	4.09	0.20	5.19
Sample_10	14.71	284.54	2.36	0.20	3.36
Sample_11	16.24	2,088.06	0.82	0.20	4.80
Sample_12	24.63	2,470.54	0.46	0.20	5.68
Sample_13	25.21	3,153.97	0.48	0.20	7.57

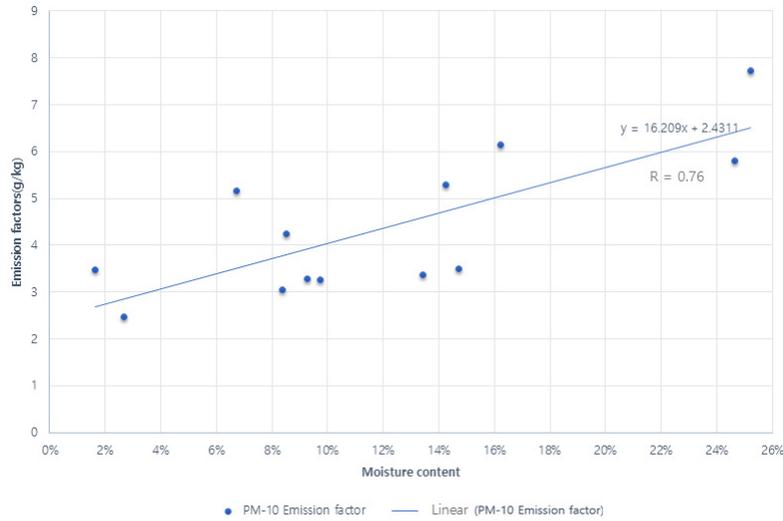


Fig. 2. PM-10 emission factor according to moisture content

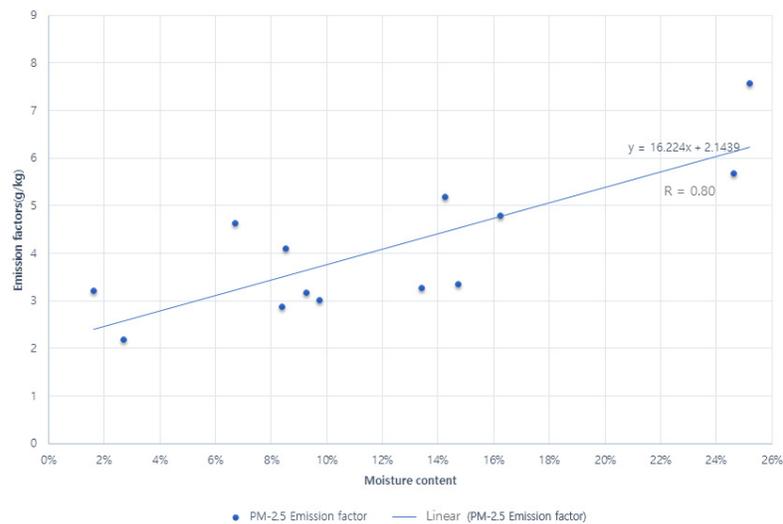


Fig. 3. PM-2.5 emission factor according to moisture content

3.4 미세먼지 배출계수 평가

본 연구에서 개발된 우분 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 선행연구에서 개발된 축분의 연소에 따른 미세먼지 배출계수와 비교하였다(Table 7 참조).

Sahu et al. (2016)은 Cattle, Blue Cattle, Buffalo, Bull 등 4종류의 가축분뇨를 Closed chamber에서 연소시켜 미세먼지 배출계수를 개발하였고, 우분의 PM-10 배출계수

는 본 연구의 배출계수보다 약 280% 수준인 11 g/kg으로 나타났다. 개발된 배출계수가 큰 차이가 나는 이유는 여러 가지로 추정되는데, 첫 번째는 연소장치의 차이로 본 연구는 화목난로에서 우분을 연소시켰으며, Sahu의 연구는 Closed Chamber에서 연소시켰다는 차이가 있다. 두 번째는 바닥에 깔짚을 까는 국내 우사의 특성에 따라 시료에 혼합되어 있는 깔짚 등 우분 시료 조건의 차이도 있을 것으로 판단된다.

Park et al. (2013)은 우분을 다양한 온도에서 연소시켜, 연소 온도에 따른 PM-10 배출계수를 개발하였다. 각각 459 °C, 560 °C, 735 °C에서 우분을 연소시켰으며, PM-10 배출계수는 각각 3.476 ± 1.594 g/kg, 0.589 ± 0.169 g/kg, 0.043 ± 0.012 g/kg으로 개발되어 연소 온도가 증가할수록 PM-10 배출계수가 작아지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 PM-10 배출계수와 비교하였을 때, 459 °C로 연소했을 때를 기준으로 48% ~ 130% 차이를 보였다. Park은 연소를 위하여 “The radiating electric heater of the cone calorimeter” 기기를 활용하여 연소 온도를 조절하여 우분 시료를 연소시켰으며, 본 연구의 경우 우분 시료에 직접 열을 가하여 연소가 시작된 이후부터는 자연 연소를 통해 연소를 진행하였다. 이렇듯, 우분 시료를 연소하는 방법 및 연소 온도의 차이로 인하여 배출계수의 차이가 나는 것으로 판단된다.

Table 7. Comparison of previous studies on particulate matter emission factors

Studies	Fuel	(Unit: g/kg)	
		PM-10	PM-2.5
This study	Cattle Manure	3.93	3.62
Sahu et al. (2016)	Cattle Manure	11	-
Park et al. (2013)	Cattle Manure	3.48 ± 1.60	-

4. 결론

우분 연소과정에서 발생하는 PM-10 농도는 138.36 mg/m³ ~ $3,213.56$ mg/m³으로 PM-2.5 농도는 133.09 mg/m³ ~ $3,153.97$ mg/m³으로 분석되었다. 이를 기준으로 PM-10 배출계수는 2.48 g/kg ~ 7.72 g/kg 사이로 나타났으며, 평균값은 3.93 g/kg으로 산정되었다. PM-2.5 배출계수는 2.18 g/kg ~ 7.57 g/kg으로 분석되었으며, 평균값은 3.62 g/kg으로 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.

본 연구결과에 따르면 우분 연소 시 발생하는 입자상 물질의 약 91%를 PM-2.5가 차지할 정도로 초미세먼지 배

출량이 대부분인 것으로 나타났다. 우분을 고체연료로 사용할 경우 발전소 등과 같이 고효율의 집진시설이 설치되어 있는 곳에서 활용하는 것이 타당하다고 판단된다.

본 연구는 국내에서 연구가 거의 진행되어 있지 않은 가축분뇨 연소에 따른 미세먼지 배출계수를 개발하여 가축분뇨 고형연료 제품의 개발 및 상용화를 위한 의사결정에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 우분 시료의 수분 함유율과 미세먼지 배출계수 사이의 상관관계를 분석하여 가축분뇨를 연소시켜 에너지원으로 활용하기 위해서는 충분한 건조가 필요하다는 시사점을 도출하였다.

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. 또한, 『가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시』에서 명시한 가축분뇨 고체연료의 공급대상 시설인 화력발전시설, 지역난방시설에서 연소를 하지 못했다는 한계점이 있다. 이에 깔짚의 종류 및 혼합비율을 고려하고, 법정 공급대상 시설인 화력발전시설 등에서 우분 연소를 통하여 미세먼지 배출계수를 개발하면 보다 정확한 미세먼지 배출량을 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 환경부 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2007. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Swiss; Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Korea Ministry of Environment(KMOE). 2013. Research on the quality and grade standards for livestock manure solid fuel products. Sejong, Korea; Korea Ministry of Environment.
- Korea Ministry of Environment(KMOE). 2018. Livestock manure processing statistics. Sejong. Korea; Korea Ministry of Environment.
- Statistics Korea(KOSTAT). 2018. Farmland area survey in

2018. Daejeon, Korea; Statistics Korea.
- Amaral SS, de Carvalho JA, Costa MAM, Pinheiro C. 2016. Particulate matter emission factors for biomass combustion. *Atmosphere*. 7(11).
- Choi HC, Kham DH, Song JI, Jeon BS, Jeon JH, Yoo YH, Na JC, Yu DJ, Bang HT, Suh OS et al., 2008. Survey on housing types of Korean native cattle and beef cattle by farm scale and region(in Korean with English abstract). *J Lives Hous & Env*. 14(3):167~174.
- Choi S-H. 2007. Treatment and management of the livestock manure. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*. 14(1):110-120.
- Kim MS. 2014. A study on the methodology of piggy waste pellet and the characteristics of the solid fuel(in Korean with English abstract).
- Lee S, Yu B, Ju S, Kang Y, Jung G. 2016. Characteristics of solid fuel from cattle manure(in Korean with English abstract). *New & Renewable Energy*. 12(4).
- Park D, Barabad ML, Lee G, Kwon SB, Cho Y, Lee D, Cho K, Lee K. 2013. Emission characteristics of particulate matter and volatile organic compounds in cow dung combustion. *Environ Sci Technol*. 47(22):12952-12957.
- Park SK, Choi SJ, Kim DK, Kim DY, Jang YK, Jeon EC. 2015. Emission Characteristics of Air Pollutants and Black Carbon from Wood Stove and Boiler, *Journal of Climate Change Research*. 6(1): 49-54.
- Sahu PK, Chakradhari S, Dewangan S, Patel KS. 2016. Combustion characteristics of animal manures. *Journal of Environmental Protection*. 07(06):951-960.