Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 28(4), pp.53-68 (2020)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2020.28.4.53

Original Paper

한우분뇨 퇴비화시설에서의 미세 입자상물질 발생 주요인자 분석

정광화[a†], 박회만[a], 이동준[a], 김중곤[a], 이동현[a], 김다혜[b]

Analysis of Major Factors related to the Generation of Fine Particulate Matter in Hanwoo Manure Composting Facilities

Kwang-Hwa Jeong[a†], Hoe-Man Park[a], Dong-Jun Lee[a], Jung-Kon Kim[a], Dong-Hyun Lee[a], Da-Hye Kim[b]

(Received: Dec. 6, 2020 / Revised: Dec. 14, 2020 / Accepted: Dec. 14)

ABSTRACT: The concentrations of ammonia, hydrogen sulfide and fine dust were measured in the compost facility of a full-time Hanwoo breeding farms. The experiments were conducted in stack type composting facility(T1) and mechanical-stirred composting facilities(T2, T3). In the stack type composting facility, the highest temperature of compost pile was 46℃, and in the two mechanical-stirred composting facilities, it rose to 63℃ and 68℃, respectively. The concentrations of $PM_{2.5}$ at T1, T2 were 15 μg/m^3 and 5~10 μg/m^3, respectively. And the concentration of $PM_{2.5}$ at T3 was below 10 μg/m^3. The highest concentration of ammonia generated at T1 was 4 ppm, but no hydrogen sulfide was detected. The ammonia concentrations at T2 and T3 were 3 ppm and 4 ppm, respectively. However, hydrogen sulfide was not detected in both facilities. At T3, the ammonia concentration increased to 65 ppm at the point where the compost was stirred with a mechanical agitator. During composting period, the pH of the compost pile decreased from 9.06 to 8.94 and then increased to 9.14 as the composting period elapsed. The NaCl content of compost was 0.09% after composting process was complete. Moisture content of compost decreased from 65.9% to 62% as composting progressed. As composting proceeded, the content of volatile solids decreased from 65.6% to 64.7% and the content of TKN decreased from 1.327% to 1.095%.

Keywords: Ammonia, Composting facility, Fine dust, Hanwoo manure

초 록: 한우를 전문으로 사육하는 전업농가의 퇴비사에서 암모니아와 황화수소 그리고 미세먼지 발생량을 측정하였다. 시험은 단순퇴적식 퇴비화시설(T1)과 기계교반식 퇴비화시설(T2, T3)로 구분하여 수행하였다. 단순퇴적식 퇴비단(T1)의 경우 최고온도가 46℃를 기록하였고, 2곳의 기계교반식 퇴비화시설들(T2, T3)에서는 각각 63℃와 68℃까지 상승하였다. T1에서의 $PM_{2.5}$ 농도는 15 μg/m^3 수준이었고 T2에서는 $PM_{2.5}$ 농도가 5~10 μg/m^3 내외의 수준을 유지하였다. T3에서는 $PM_{2.5}$의 농도가 10 μg/m^3 이하의 수준이었다. T1에서 발생하는 암모니아의 최고농도는 4 ppm이었으나 황화수소는 검출되지 않았다. T2에서는 암모니아 농도가 최고 3 ppm 수준이었으나 황화수소는 검출되지 않았다. T3의 암모니아 최고농도는 4 ppm을 나타낸 반면에 황화수소는 검출되지 않았다. T3에서는 교반기가 퇴비를 교반하는 지점에서의 암모니아 농도가 65 ppm까지 상승하였다. 퇴비화 기간이 경과함에 따라 초기에 9.06이었던 퇴비단의 pH가 퇴비화기간을 거치면서 8.94로 낮아졌다가 다시 9.14 수준으로 상승하였다. 염분(NaCl)농도는 퇴비화가 진행된 이후에 0.09% 수준이었다. 수분함량은 65.9% 수준에서 62% 수준으로 낮아졌으며, 총고형물 중에서 휘발성고형물(Volatile Solids)이 차지하는 비율은 퇴비화 초기에 65.6%에서 퇴비화후기에는 64.7% 낮아졌다. 퇴비화 초기에 1.327% 수준이었던 TKN 함량도 퇴비화를 거치면서 1.095%로 낮아졌다.

주제어: 미세먼지, 암모니아, 퇴비화시설, 한우분뇨

[a] 농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구직 (Researcher, National Institute of Animal Science))
[b] 제주대학교 동물생명공학과 연구교수(Research professor, Faculty of Biotechnology, Jeju National University)

† Corresponding author(e-mail: gwhaju@korea.kr)

1. 서 론

한우유래 식품에 대한 국민의 선호도가 높은 관계로 최근에 한우 사육두수가 늘어나는 추세이며 2020년 9월말 현재 국내의 한우 사육두수는 323만 6,896두에 이르고 있다[1]. 이 중에서 단일농가 기준으로 한우를 100두 이상 사육하는 전업농가에서 사육되는 두수가 135만 3,473 두로서 전체두수의 41.81%를 차지하고 있다. 한우 축사는 바닥에 톱밥과 같은 깔짚을 5 cm 내외의 두께로 깔고, 그 위에서 소가 사육된다. 따라서 소의 분뇨는 깔짚과 혼합된 상태로 축사외부로 배출되기 때문에 퇴비화처리하기에 적합하다. 이 등(2016)은 우분의 원소비율이 탄소 35.72~45.68%, 수소 4.62~5.58%, 산소 29.48~50.43%, 질소 0.86~2.53%, 황 0.14~1.12%, 염소 0.09~1.76%인 것으로 보고하였는데[2], 이는 2차 미세먼지 발생원으로 알려진 암모니아와 황화수소의 발생원이 존재할 수 있다는 것을 의미한다. 김 등(2020)에 따르면 퇴비화는 비교적 고온에서 이루어지는 미생물에 의한 호기성 분해공정으로서, 교반과정에서 암모니아 발생량이 많아진다고 하였다[3]. 일반적으로 가축분뇨를 원료로 하여 퇴비화가 진행되는 과정에서 퇴비단의 온도가 70℃ 내외까지 상승하는 경우가 많다. 그러므로 부숙과정이 진행되고 있는 가축분뇨 퇴비를 교반하면 퇴비단 내에 축적되어 있던 열이 발산되면서 암모니아와 같은 가스상 물질과 수증기 등이 함께 배출되어진다. 암모니아는 황 산화물(SOx)이나 질소 산화물(NOx)과 함께 반응하여 입자상 무기 암모늄염을 형성함으로써 2차 미세먼지를 생성하는 것으로 알려져 있다[4]. 한국환경정책·평가연구원의 보고서에 따르면 암모니아는 대기 중의 아황산가스 및 황산미스트와 반응하여 황산암모늄을 생성하며 또한 대기 중의 SO_3와 반응하여 입자상의 황산화수소를 생성한다고 하였다. 그리고 암모니아는 질소산화물이나 오존과 반응하여 질산암모늄을 생성하고 이산화탄소와 반응하여 ammonium bicarbonate, ammonium carbonate 등을 생성하기도 한다[5]. Hristov(2011)는 가축분뇨의 퇴비화 과정이나 가축분뇨 퇴비를 농경지에 살포하는 과정에서 암모니아가 발생하여 초미세먼지의 발생원으로 작용할 수 있다고 보고하는 등[6] 가축분 퇴비화와 미세먼지와의 연관성 문제가 지속적으로 제기되어 왔다. 암모니아가 미세먼지와 연관된다는 우려에 따라 농림축산식품부에서도 축산부문에서의 암모니아 저감을 위해 2019년도에 환경부와 관계부처 합동업무협의를 실시하였다. 그 결과로 2019 미세먼지관리 종합계획에 농축산부문의 암모니아 저감에 대한 대책을 포함시키는 등 국가적 차원에서의 미세먼지 저감을 위한 노력이 추진되고 있다. 그러나 국내 축산시설에서 발생하는 미세먼지와 암모니아에 대한 연구는 최 등(2005)과 김 등(2013)에 의해 축사내부에서의 발생특성에 대한 연구가 진행되었을 뿐이고[7,8] 퇴비사에서의 미세먼지와 암모니아의 발생특성에 대한 연구사례는 찾기 어렵다. 그러므로 가축분뇨 퇴비화 시설에서 실제로 대기로 배출되는 1차 또는 2차 미세먼지 발생과 관련된 요소의 실질적인 배출량을 산정할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 한우분뇨 퇴비화분야에서 발생하는 1차와 2차 미세먼지 관련요소의 실제 배출량을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 실험대상은 기계교반식 퇴비화시설을 갖춘 한우 전업농가와 단순 퇴적식 퇴비화시설을 갖춘 한우 전업농가의 퇴비화시설을 대상으로 하였다. 실험수행은 각각의 시설에서 퇴비화가 진행되는 과정별로 PM_{10}과 $PM_{2.5}$와 같은 1차 미세먼지 농도를 측정하였고, 2차 미세먼지 발생원으로 알려진 암모니아와 황화수소의 발생정도를 각각 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험장소 선정 및 측정지점 선정

국내 J시와 Y시 그리고 J군에 소재한 한우를 100두 이상 사육하는 전업농가의 퇴비화시설을 시험장소로 선정하였다. 선정한 시험장소에 설치된 퇴비화시설의 형태는 J시에 위치한 단순퇴적 방식을 이용한 퇴비화시설(T1)과 Y시와 J군에 각각 위치한 기계교반식 퇴비화시설(T2, T3)이었다. T2는 퇴비장을 농장주가 직접 관리하는 시설이었으며, T3는 전문관리인력이 운영하는 방식이다. 퇴비사의 외벽은 약

Stack type composting facility

Installation of measuring equipment

Mechanical-stirred composting facility

Mechanical agitator for composting

Fig. 1. A view of facilities for conducting experiment.

70% 정도가 벽에 의해 막혀있는 형태이며 통풍을 위해 약 30% 정도가 개방된 반 개방식 형태의 시설이었다. 퇴비사 운영특성을 분석한 결과 T1은 부숙시설에 우분을 2 m 내외의 높이로 퇴적한 상태로 60일 이상 체류시키는 방식으로 운영하고 있었으며 별도의 송풍은 실시하지 않았다. T2와 T3는 퇴적높이 1.5 m 내외의 퇴비단을 에스컬레이터 방식의 교반설비로 뒤집기 작업을 수행하는 방식으로서 부숙조에 체류하는 기간은 약 18일 내외로 운영하고 있었다. T2와 T3는 부숙조 바닥으로 공기를 공급할 수 있는 송풍시설을 구비하였으며 송풍량은 가축분뇨 자원화시설 표준설계도 해설서에서 권장하는 범위 내로 운영하는 것으로 조사되었다. 퇴비화과정에서의 1차 미세먼지 발생과 암모니아 그리고 황화수소의 발생특성을 분석하기 위하여, 1차 미세먼지 포집장치 그리고 암모니아와 황화수소를 측정하는 장치들을 각각 퇴비화시설 도입부(P1)부터 배출부(P5)에 걸쳐 일정 간격으로 설치한 후 6시간 동안 가동하였다. 또한 퇴비화를 거친 우분퇴비를 완숙시키는 후숙시설(P6)에도 동일한 측정장치를 설치하였다. 대조구(Control)로서 퇴비사 외부의 1차 미세먼지, 암모니아 그리고 황화수소 농도를 분석하기 위한 측정장치를 퇴비사 외부 벽으로부터 10 m 이격된 지점(P7)에 설치하고 내부 설치장비와 동일한 조건으로 작동하였다. 본 실험에서 미세먼지 발생요소에 대한 분석을 실시한 두 가지 형태의 시험대상 퇴비사 형태는 Fig. 1과 같다.

상기 시험대상 퇴비화시설에서의 미세먼지와 암모니아와 발생량 측정지점은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 퇴비화 진행단계를 고려하여 선정하였다.

실험항목 측정을 위하여 퇴비사 시설의 각 지점에 먼지 포집장치와 가스센서를 설치하고 6시간 동안 가동하였다. 분석용 퇴비샘플링 작업과 온도측정도 각 측정지점에서 동시에 수행하였다.

2.2. 분석 항목별 측정방법

본 실험에서는 1차 미세먼지 측정을 위해 중량법과 광산란법을 적용하였다. 암모니아와 황화수소는 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 측정하였다.

중량법을 적용하여 퇴비사 내부와 외부에서의 1차 미세먼지($PM_{2.5}$)의 농도를 측정하기 위해 Air sampler set(AirChek Touch, SKC, Inc.)를 이용하여 6시간 동안 퇴비사의 공기를 흡입방식으로 포집하였

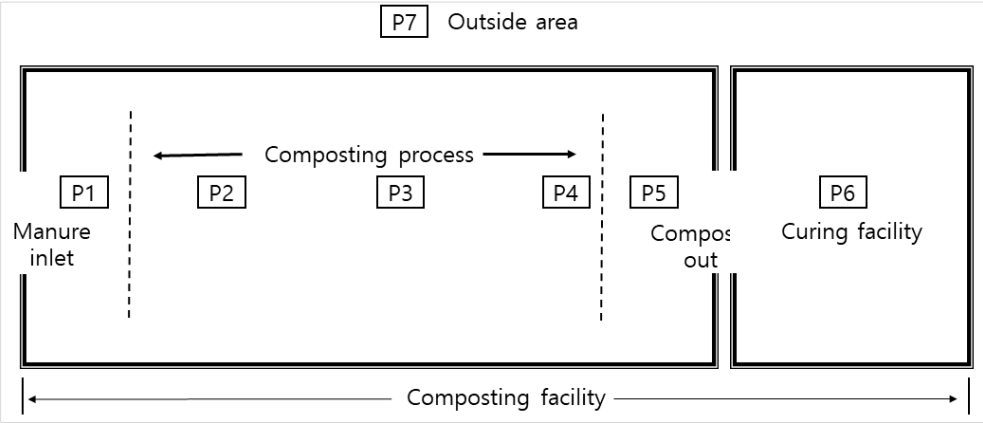

Fig. 2. Measurement points in hanwoo manure composting facility.

다. 공기 흡입용 펌프는 실험 전후에 유량을 각각 3회 이상 측정하여 보정작업을 수행하였다. 흡입 유량은 4 L/min 수준으로 설정하여 시험을 실시하였다. 흡입된 공기는 미세먼지 분석용 임팩터(SKC, Inc.)에 설치된 필터(PTFE filter(37 mm diameter, 2.0 μm pore size, SKC, Inc.)를 통과하도록 하였다. 미세먼지 정량은 실험 전과 후의 필터무게를 기준으로 산정하였으며 무게측정은 0.001 mg의 최소 분해능을 가진 전자저울(Ohaus Discovery balance, Ohaus Co.)을 사용하였다. 미세먼지 측정을 위한 광산란방식 적용을 위하여 직독식 미세먼지 측정장치(OPC, Portable Aerosol Spectrometer, Grimm, Inc.)를 사용하였다.

2.3. 암모니아, 황화수소 측정

퇴비사 내의 암모니아와 황화수소 농도 측정을 위하여 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 6시간 동안 연속 측정하였다. 퇴비사 내의 암모니아와 황화수소 농도는 시험시간 경과에 따른 변이가 연속적으로 일어나기 때문에 전기화학식 센서를 이용하는 실시간 측정방식을 적용하였다. 실험과정에서 채취한 퇴비시료는 실험실로 냉장상태로 운송하여 공정실험기준에서 정하는 방법에 따라 즉시분석을 실시하였다[9,10].

3. 결과 및 고찰

한우농가 퇴비사에서 공기를 6시간 동안 흡입하는 과정에서 수집된 미세먼지 농도를 실험실에서 분석하였다. 중량법과 광산란법을 병행하여 적용하여 미세먼지의 양을 정량하였다. 본 실험결과로 제시된 모든 결과 값은 퇴비화시설 내부에서의 측정치로서 별도의 대기오염 방지시설을 거치지 않은 퇴비단에서의 순수 발생 값이다.

퇴비사 내부에서 발생하는 미세먼지 관련요소 측정값을 분석한 결과, 퇴비사 내에서의 1차 미세먼지 농도는 낮은 수준이었으며 암모니아 농도도 퇴비사 내에서 전반적으로 높지 않은 수준인 것으로 판단된다. 그러나 기계식 교반장치가 작동하는 위치에서는 암모니아 농도가 상대적으로 높아지는 결과를 보였다. 퇴비단의 온도는 퇴적식 퇴비단에서는 측정위치별로 온도차이가 크게 나타나지 않았다. 교반식 퇴비단의 경우에는 축분이 퇴비화시설에 투입된 직후보다는 퇴비화가 개시된 지 2일 이후의 측정 위치부터 온도가 상승하여 퇴비화 중반기에 도달하기 직전의 시점에 최고온도를 보였으며, 이후 퇴비화가 완료되어 갈수록 온도가 낮아지는 결과를 보였다. 퇴비사 외부에서의 미세먼지 농도는 검출되지 않았기 때문에 퇴비사 내부의 환경이 외부환경에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 퇴비사 외부의 암모니아 농도 역시 퇴비사 내부의 환경과는 무관한

Table 1. Characteristics of Hanwoo Manure Collected in Each Experimental Composting Facilities

Items	pH	EC (μs/cm)	NaCl (%)	Moisture (%)	VS/TS (%)	TKN (%)
Cow manure (T1)	9.09	2,176	0.11	72.36	77.66	1.50
Cow manure (T2)	9.01	1,402	0.07	61.46	70.04	0.84
Cow manure (T3)	9.06	2,055	0.1	65.90	65.60	1.33

Table 2. Changes of Temperature of Compost Piles According to Composting Precess (Unit: ℃)

Items	Air Temp.	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Cow manure (T1)	28	32	37	46	42	39	-
Cow manure (T2)	27	33	43	63	56	43	35
Cow manure (T3)	30	42	57	68	64	34	31

것으로 보여진다. 황화수소는 퇴비화 전 기간 동안 퇴비사 내부나 외부에서 검출되지 않는 결과를 나타냈다.

3.1. 한우분 퇴비단의 특성

본 실험을 개시하는 지점에서 채취한 각 시험농가별 우분 퇴비단의 특성을 분석하였다. 각 농가의 퇴비사에서 채취한 한우퇴비단 시료의 특성은 Table 1과 같다.

각 실험농가의 퇴비화시설에 투입되는 한우분의 특성을 분석한 결과, pH는 9.01~9.09 수준으로 시험농가별로 차이가 크지 않았다. 수분함량은 61.46~72.36% 로서 가축분뇨 표준설계도 해설서(2008)에서 추천하는 퇴비화 수분기준[11]에 부합함으로써 전체적으로 퇴비화가 진행되는데 문제가 없는 수준이었다. 최근 들어 우분 퇴비화에 있어 관심이 높아진 염분함량은 각 농가별로 0.07~0.11% 수준인 것으로 분석되어 가축분 퇴비의 규격을 정하는 비료공정규격 설정 및 지정(2020)에 규정된 가축분 퇴비의 염분(NaCl)함량 기준인 2.0 % 이하에 영향을 미치지 않는 수준이었다[12]. 본 시험에 사용된 각 축분의 기타 항목도 Table 1에 기록된 바와 같이 퇴비화에 적합한 것으로 나타났다.

3.2. 한우분 퇴비화에 따른 퇴비단 온도

시험농가별로 가동되고 있는 퇴비화시설에서의 각 시료채취 지점에서의 퇴비단 내의 온도변화를 측정하였다. 퇴비단 표면으로부터 10 cm~100 cm 깊이의 온도를 10 cm 간격으로 측정하여 평균온도를 산출하였다. 퇴비깊이별 온도는 120 cm 길이의 봉온도계를 이용하여 측정하였다. 퇴비화과정을 거치는 동안 퇴비화 초기에는 퇴비단의 온도가 상승하였다가 퇴비회가 진행됨에 따라 온도가 점차 낮아지는 것이 일반적이다. 본 실험과정에서 측정한 각 퇴비단에서의 온도변화는 Table 2에 나타난 바와 같다.

단순퇴적식 퇴비단(T1)의 경우 각 퇴비화지점(P1~P5)별로 퇴비단의 온도차이가 크지 않았다. 퇴비화 개시위치(P1)에서의 온도는 외기온(28℃) 보다 4℃ 정도 높았다. 퇴비화가 진행되는 단계(P2~P4)별로 온도를 측정한 결과, 퇴비화가 가장 활발하게 진행되는 P3 지점에서 온도가 46℃로서 최고치를 기록하였고 퇴비화 후기 단계인 P5지점에서 온도가 낮아지는 결과를 보였다. T1의 경우 기계식 교반장치가 설치된 T2와 T3에 비해서 온도가 상대적으로 낮았는데, 이 결과는 단순퇴적식 퇴비단의 특성상 퇴비단 내부로 공기가 공급되지 않았으며 퇴비단 내부의 공극형성이 덜 되는 현상에 기인한 것으로 판단된다. T2는 농가가 한우를 사육하면서 동시에 퇴비화시설을 관리하는 형태의 농장으로서 퇴비화시설은 기계교반식 부숙시설, 그리고 별도의 후숙장을 운영하는 시설이다. 이 시설은 부숙이 왕성하게 진행되는 P3지점에서 최고온도인 63℃를 기록하였다가 그 이후 부숙이 진행됨에 따라 온도가 낮아졌다. 부숙이 끝난 퇴비를 쌓아두고 더 완숙시키는 과정인 후숙시설에서 온도가 가장 낮은 결과를 보였다. 전문 운영자가 퇴비화시설을 관리하는 T3의 경우도 P3 지점에서 최고온도인 68℃까지 상승하였다

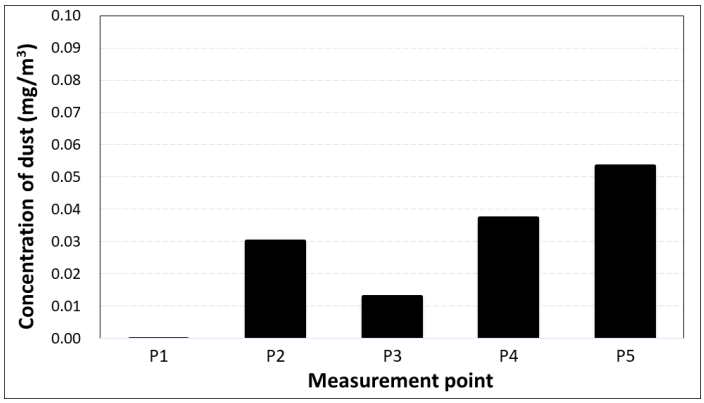

Fig. 3. Primary fine dust ($PM_{2.5}$) in Hanwoo manure composting facility T1.

가 퇴비화가 진행됨에 따라 하강하였으며, 후숙단계에서는 대기온에 가깝게 낮아지는 결과를 보임으로써 퇴비 부숙이 원활하게 잘되는 것으로 판단되었다. 본 실험에서 나타난 각 퇴비화시설에서의 온도변화는 Carl Tibu 등(2019)이 퇴비화단계에서 45~70℃의 온도를 나타냈다고 보고한 내용과 유사한 것이다[13]. 퇴비화방법에 따른 온도변화측면에서는 교반장치를 가동하는 시설에서의 퇴비온도가 더 높게 나타났는데, 이는 교반에 따라 퇴비단에 산소가 공급되고 퇴비단의 혼합이 잘 이루어지며 퇴비입자 사이에 공극 형성률이 단순퇴적식 퇴비단에 비해 상대적으로 더 높아지는데 기인하는 것으로 보여진다. 이 등(2002)은 퇴비화 시에 뒤집기가 퇴비화 진행에 매우 중요한 요인이므로 퇴비화시 반드시 뒤집기가 필요하다고 하였다[14].

3.3. 한우분 퇴비화에 따른 퇴비단으로부터의 미세먼지 발생

퇴비사 내부에서의 미세먼지 농도를 측정하였다. 한우분 퇴비화과정에서 발생할 것으로 예측되는 미세먼지는 퇴비사 바닥이나 퇴비로부터 직접적으로 발생할 수 있는 1차 미세먼지일 것이고, 2차적으로는 한우분뇨 퇴비로부터 발생하는 암모니아나 황화수소에서 비롯되는 2차 미세먼지일 것으로 판단하였다. 그러나 단순퇴적식 퇴비사와 같이 축사와 퇴비사가 연결되어 있는 경우에는 축사에서 사육되고 있는 한우의 활동이 퇴비사에서 측정되는 1차 미세먼지의 농도에 영향을 미칠 수도 있을 것으로 보인다. 1차 미세먼지 측정장소는 퇴비단의 시작점과 끝점 그리고 후숙지점 등으로 세분화하여 설정하였다. 측정점 1(P1)은 퇴비화가 시작되는 지점이고, 측정점 5(P5)는 1차 부숙이 완료된 지점이다 측정점 2와 3 그리고 4는 퇴비화 시점과 종점 사이의 거리를 각각 균등분할한 지점이다. 그리고 측정점 6(P6)은 후숙조에서의 측정장치 설치지점이다.

3.3.1. 중량법을 이용한 1차 미세먼지 발생량 측정결과

중량법을 적용하여 각 농가의 퇴비사에서 1차 미세먼지인 $PM_{2.5}$의 농도를 측정하였다 퇴비사에 미세먼지 측정장치를 설치한 후 6시간 동안 샘플링이 된 필터(PTFE filter(37 mm diameter, 2.0 μm pore size, SKC, Inc.)를 실험실로 운송하여 필터무게를 정량함으로써 미세먼지의 농도를 산출하였다. 측정값을 분석한 결과, 각 샘플링 지점별로 Fig. 3과 같이 미세먼지 $PM_{2.5}$의 농도가 산출되었다.

시험시설 T1에서의 $PM_{2.5}$는 대체적으로 퇴비화 후기단계로 갈수록 그 농도가 더 높아지는 추세를 보였다. 한우분뇨 퇴비화시설의 경우 원료축분의 수분함량이 60~70% 내외로 높고, 퇴비사 바닥이 분뇨로 피복되는 경우가 많아 1차 미세먼지 발생여건이 활발하게 형성되지는 않는 것으로 판단된다. 각 퇴비화 단계별로 1차 미세먼지의 상대적 농도를 분석한 결과, 정량적 측면에서는 최고 0.06 mg/m^3 이하의 수준으로서 그 농도가 매우 낮았다. 시험시설 T1의 외부에서는 1차 미세먼지가 검출되지 않았다.

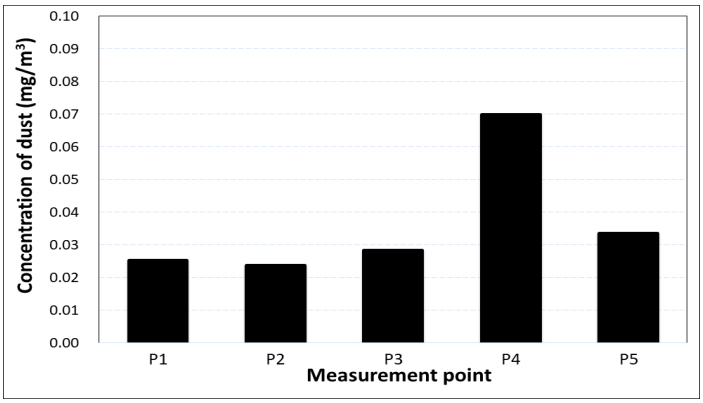

Fig. 4. Primary fine dust ($PM_{2.5}$) in Hanwoo manure composting facility T2.

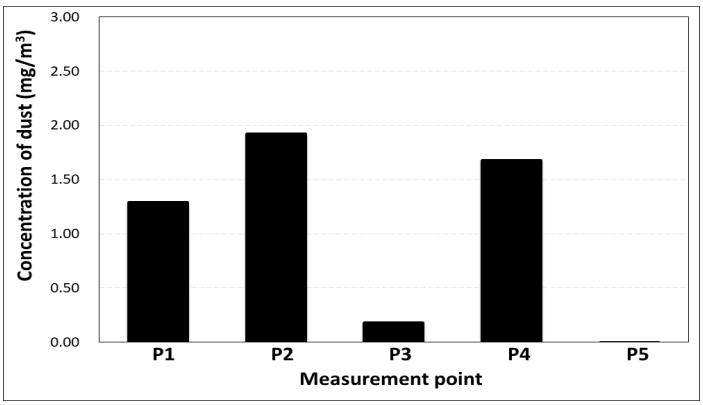

Fig. 5. Primary fine dust ($PM_{2.5}$) in Hanwoo manure composting facility T3.

Fig. 4는 기계교반식 퇴비화설비를 갖춘 시험장소 T2에서 측정된 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다.

시험시설 T2에서는 $PM_{2.5}$의 농도가 퇴비화과정 중기나 후기단계에서 상대적으로 약간 높은 값을 보이는 추세를 나타냈다. 이 결과는 퇴비화 중기나 후기로 갈수록 퇴비의 수분함량이 낮아지고 퇴비입자가 작아짐으로써 교반기 작동에 따른 입자의 비산가능성이 더 높아지는데 기인한 것으로 보여진다. 정량적 측면에서는 최고농도가 0.07 mg/m^3 이하로서 그 농도가 높게 나타나지는 않았다. 시험시설 T2 역시 외부에서는 1차 미세먼지가 검출되지 않았다. Fig. 5는 기계교반식 퇴비화설비를 갖춘 시험장소인 T3에서 측정된 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다.

시험시설 T3에서는 $PM_{2.5}$의 농도가 T1과 T2보다 상대적으로 높게 나타났다. 이 결과는 T3의 경우에는 T1과 T2에 비해 보다 전문적인 운영이 이루어지는 시설로서 퇴비화 후기에 해당되는 지점에서의 대형 로더와 같은 중장비의 운행이 1차 미세먼지 발생에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 시험시설 T3 에서도 퇴비사 외부에서는 1차 미세먼지가 검출되지 않았다. 실험 결과, T3의 경우에도 절대량 측면에서는 1차 미세먼지 발생량이 적은 것으로 판단된다. 따라서 중량법보다 미세먼지 농도에 대한 분해능이 더 높은 광산란방식의 측정장치를 이용하여 1차 미세먼지 농도를 추가로 측정하였다. Fig. 6은 단순퇴적식 퇴비화설비를 갖춘 시험장소 T1에서 광산란방식의 측정장치로 측정한 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다.

광산란방식은 μg/m^3 단위로 측정값을 산출해낼 수 있기 때문에 mg/m^3 단위로 측정하는 중량법에 비해 더 정밀한 측정값을 산출해 낼 수 있다. T1에서 광산란방식 측정장치를 이용하여 1차 미세먼지 농도를 측정한 결과, 단순 퇴적방식의 퇴비화시설을 운영하는 T1에서는 PM_{10}의 농도가 시험시작 초기 2

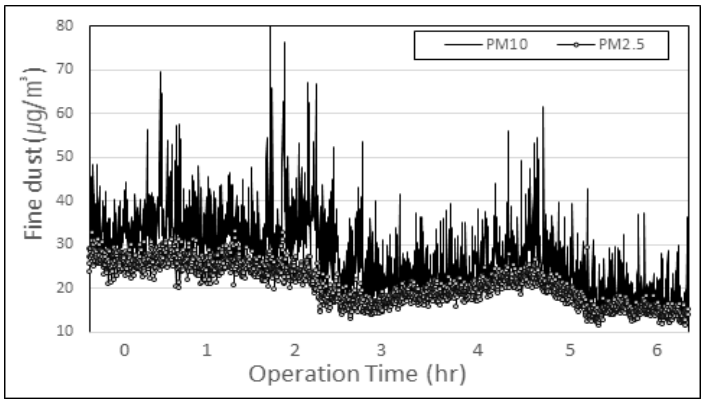

Fig. 6. Primary fine dust (PM_{10}, $PM_{2.5}$) concentration measured using a light scattering measuring device in T1.

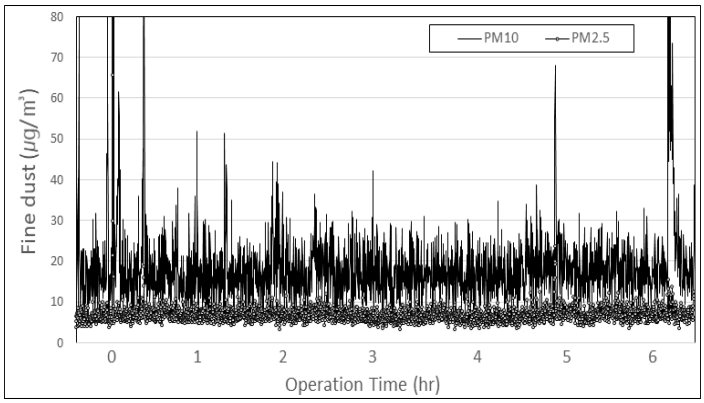

Fig. 7. Primary fine dust (PM_{10}, $PM_{2.5}$) concentration measured using a light scattering measuring device in T2.

시간 동안은 약 35 μg/m^3 내외의 수준을 나타냈다. 시험개시 2시간~4시간 사이에는 약 25 μg/m^3 내외의 수준을 나타내다가 4시간 이후에는 20 μg/m^3 이하까지 낮아졌다. $PM_{2.5}$의 농도도 시험개시 초기 2시간 동안은 약 25 μg/m^3 내외의 수준을 나타냈다. 그리고 시험개시 2시간~4시간 사이에는 약 20 μg/m^3 내외의 수준을 나타냈다가 4시간 이후에는 15 μg/m^3 수준까지 낮아졌다. 이러한 측정값이 산출된 원인을 분석해 본 결과, T1의 경우에는 축사와 퇴비사가 연결되어 있어 연구팀이 미세먼지 장치를 설치하는 과정에서 축사 내 소들이 외부인의 출입을 경계하는 움직임이 많았었기 때문에 미세먼지 비산량이 시험초기에 높게 측정된 것으로 판단된다. 국내에서 단순퇴적식 퇴비사를 운영하는 한우농가의 거의 대부분이 축사와 퇴비사를 연결하여 운영하는 형태를 가지고 있다. Fig. 7은 기계교반식 퇴비화설비를 갖춘 시험장소 T2에서 광산란방식의 측정장치로 측정한 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다.

기계교반식 퇴비화시설을 운영하는 T2에서 광산란방식 측정장치를 이용하여 1차 미세먼지 농도를 측정한 결과, PM_{10}의 경우에는 측정시간 동안 15 μg/m^3 내외의 수준을 나타냈다. 한편 $PM_{2.5}$의 농도는 측정시간 동안 5~10 μg/m^3 내외의 수준을 유지하였다. T1과는 달리 T2에서는 측정시간 동안 미세먼지의 농도변화가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 8은 기계교반식 퇴비화설비를 갖춘 T2 시험장소의 후숙시설에서 광산란방식의 측정장치로 측정한 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다. 후숙시설은 퇴비화시설에서 1차 부숙이 끝난 퇴비를 따로 저장하여 완숙시키는 시설로서 퇴비화시설과는 별개로 독립된 건축물인 경우가 대부분이다.

기계교반식 퇴비화 시설을 운영하는 T2의 후숙시설에 광산란방식의 측정장치를 설치하여 1차 미세먼지 농도를 측정하였다. PM_{10}의 농도는 측정시간

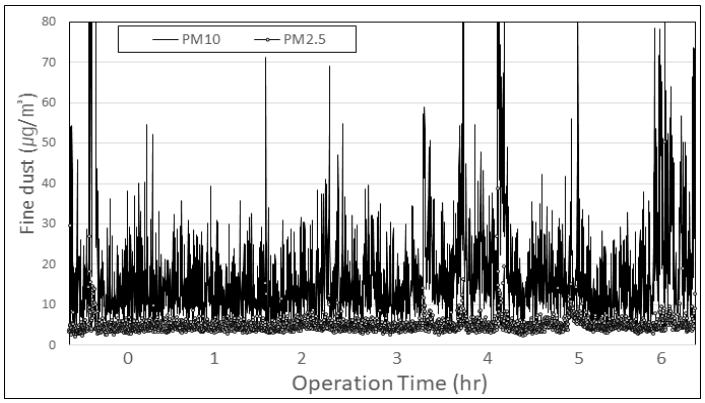

Fig. 8. Primary fine dust (PM_{10}, $PM_{2.5}$) concentration measured using a light scattering measuring device in curing facility of T2.

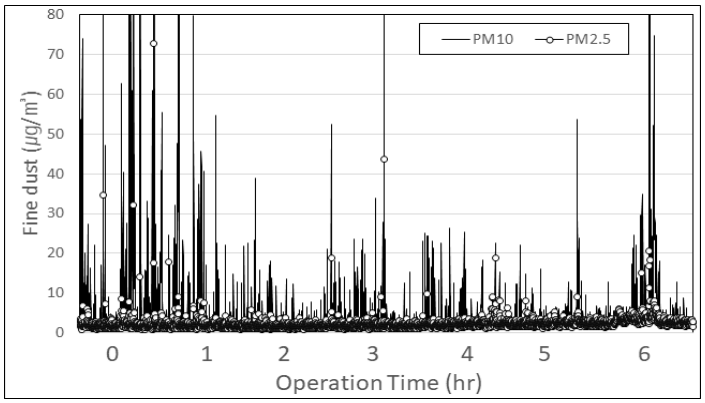

Fig. 9. Primary fine dust (PM_{10}, $PM_{2.5}$) concentration measured using a light scattering measuring device in T3.

동안 10~15 μg/m^3 내외의 수준을 나타냈고, $PM_{2.5}$의 농도는 측정시간 동안 5 μg/m^3 내외의 수준을 유지하였다. 이 수치는 현재 미세먼지 환경기준을 고려해 볼 때, 매우 낮은 수준인 것으로 볼 수 있다. Fig. 9는 기계교반식 퇴비화설비를 갖춘 시험장소 T3에서 광산란방식의 측정장치로 측정한 1차 미세먼지 농도를 도시한 것이다.

전문인력이 기계교반식 퇴비화시설을 운영하는 전문 퇴비화시설인 T3에서 광산란방식 측정장치를 이용하여 1차 미세먼지 농도를 측정한 결과, PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 농도가 측정시간 동안 전반적으로 10 μg/m^3 이하의 수준을 유지하였기 때문에 한우분 퇴비화과정에서 발생되는 1차 먼지의 농도가 높지 않은 것으로 판단할 수 있다. 광산란방식으로 측정한 1차 미세먼지의 농도 값이 시험장소 T1, T2 그리고 T3 간에 약간씩의 차이를 보이고 있다. 특히 $PM_{2.5}$의 경우에는 T3에서 T1과 T2에 비해 약간 더 높게 나타났다. 그러나 측정값 차이가 100만분의 10~20 g 정도인 것을 고려해보면, 평균값과의 최대 편차가 측정개시 30분경에 한 번 기록된 100만분의 70 g 정도의 수준이었기 때문에 전체적으로는 각 농가별로 거의 대동소이하게 나타났다. Fig. 6에서 9까지의 결과를 종합적으로 분석해 보면 $PM_{2.5}$ 농도가 PM_{10}에 비해 더 낮게 나타나고 있으며 시험시간 경과에 따른 측정값의 변이폭도 더 작게 나타났다. 시험장소 3(T3)에서의 측정값을 도시한 Fig. 9의 경우에는 $PM_{2.5}$의 변이 폭이 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 T3에서의 장비의 이동 등 퇴비사 현장의 작업여건에 영향을 받은 것으로 보여진다. PM_{10}의 경우에는 각 시험장소에서 공히 평균적인 분포범위를 상회하는 피크 점들이 나타나는데, 이 결과는 간혹 존재하는 입자상 물질들이 순간적으로 측정되는 값으로서 전체적인 평균분포 수준에는 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 볼 수 있다.

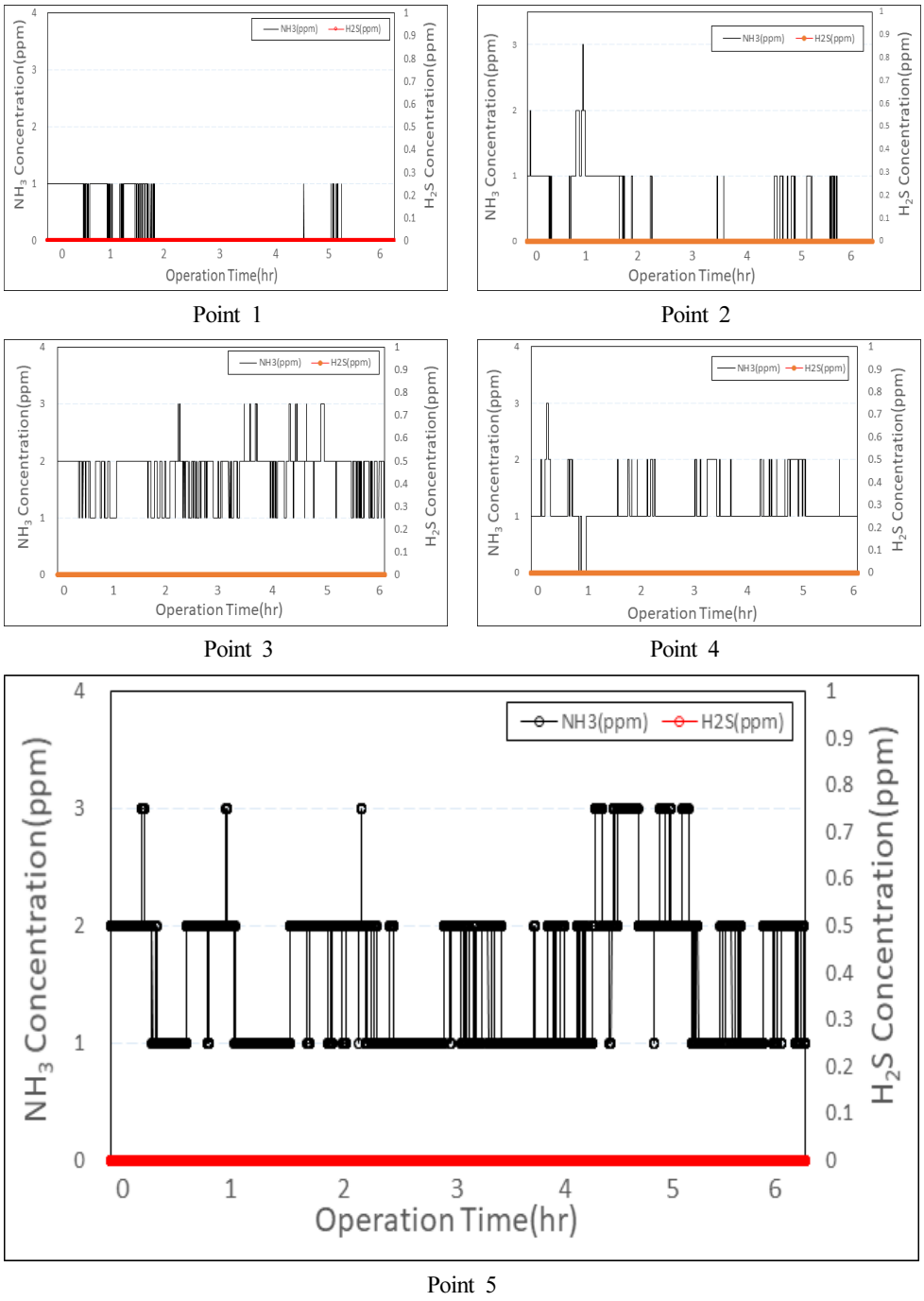

Fig. 10. Concentrations of NH_3 and H_2S measured at each point in T1.

3.4. 한우분 퇴비화에 따른 암모니아와 황화수소 발생

한우분에는 질소와 황성분이 함유되어 있어서 퇴비화과정 중에 암모니아와 황화수소가 발생할 가능성이 있다. 퇴비화가 진행되는 동안 암모니아와 황성분이 함유된 가스가 발생한다면 2차 미세먼지가 발생할 수 있는 우려가 있다. Fig. 10은 단순퇴적식 퇴비화시설을 갖춘 시험장소 T1에서 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 측정한 암모니아와 황화수소 농도 값을 나타낸 것이다.

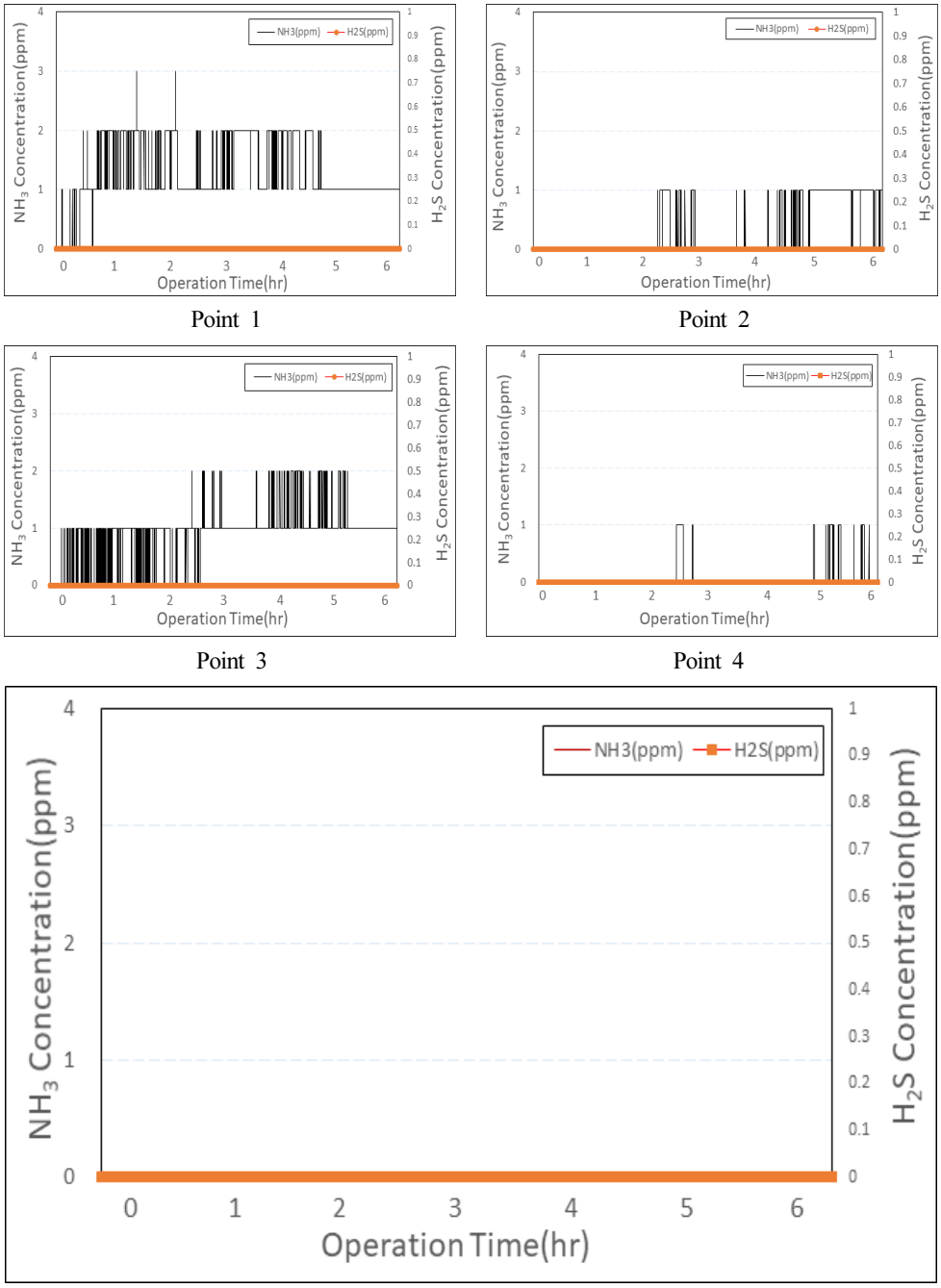

Fig. 11. Concentrations of NH_3 and H_2S measured at each point in T2.

시험시설 T1에서 발생하는 암모니아와 황화수소 농도를 지상 1 m 높이의 지점에서 6시간 동안 측정한 결과 암모니아는 모든 측정지점에서 1~2 ppm 수준을 나타냈으며, 최고농도는 P2 측정지점에서 측정 개시 후 1시간 경에 측정된 4 ppm이었다. 황화수소는 본 실험에서 사용한 ppm 수준의 측정기로는 검출되지 않았다. 황화수소의 분자량을 고려하여 퇴비단 표면과 인접한 지점에서 별도로 측정하였지만 역시 검출되지 않았다. 퇴비화시설 외부의 측정지점에서는 암모니아와 황화수소가 검출되지 않았다. Fig. 11은 기계교반식 퇴비화시설인 T2에서 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용

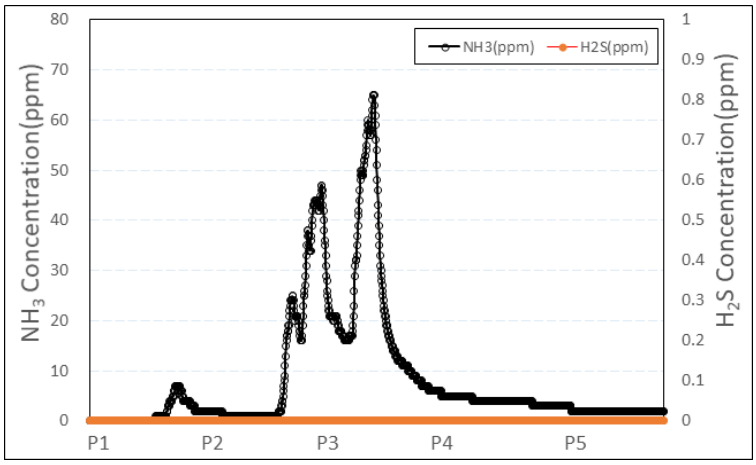

Fig. 12. Changes in ammonia concentration according to movement of agitator on the compost pile in T3.

하여 측정한 암모니아와 황화수소 농도 값을 도시한 것이다.

시험시설 T2에서 발생하는 암모니아와 황화수소 농도를 측정한 결과 암모니아는 우분이 반입된 후 퇴비화가 시작되는 지점인 P1과 퇴비화가 가장 활발하게 진행되는 지점인 P3에서 1~2 ppm 수준을 나타냈으며, 최고농도는 P1 측정지점에서 2차례에 걸쳐 검출된 3 ppm 수준이었다. 황화수소는 T1과 마찬가지로 T2에서도 ppm 수준의 측정기로는 검출되지 않았다. T2에서는 퇴비화 후기지점인 P5 측정지점과 후숙시설인 P6 측정지점 그리고 외부 측정지점인 P7에서는 암모니아와 황화수소가 검출되지 않았다. Fig. 12는 기계교반식 퇴비화시설을 갖추고 전문적으로 퇴비화시설을 운영하는 퇴비화시설 T3에서 교반기가 이동하는 레일 상에서 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 측정한 암모니아와 황화수소 농도 값을 나타낸 것이다. 교반기가 접근하여 통과하는 시점에서는 측정장치를 교반기의 프로파일에 따라 상하로 이동해가면서 교반기의 상부곡선에 최대로 인접하여 측정하였고 교반기가 통과한 이후에는 다시 퇴비단 상부로 측정기를 고정하고 측정을 계속하였다.

시험시설 T3의 기계식 퇴비화시설의 구조는 전체 길이가 80 m인 퇴비화반응조의 양벽 위에 설치된 2개의 레일을 타고 교반기가 정해진 속도로 왕복이동하면서 교반기에 설치된 회전식 무한궤도(에스컬레이터 형태)로 퇴비를 교반하는 방식이다. P1지점으로 투입된 우분은 교반기에 의해 길이방향으로 조금씩 이동해 가면서 부숙과정을 거치게 된다. 퇴비화기간은 교반기 운행횟수에 따라 다르지만 대략 15~20일 내외의 기간 동안 총 80 m의 거리를 이동하면서 P5 지점까지 도달하게 된다. Fig. 12는 퇴비화가 시작되는 P1 지점에서 퇴비화 후기 지점인 P5까지 측정장치를 이동해가면서 각 위치별로 암모니아와 황화수소의 발생농도를 측정한 결과이다. Fig. 12에 나타난 농도곡선은 가장 활발한 퇴비화진행 지점인 P3 지역을 기계식 교반기가 통과할 수 있는 시점에 맞춰서 농도측정을 수행한 결과 값이다. 실험결과, 퇴비화가 개시된 후 2~3일 정도 경과한 지점에서 암모니아가 6 ppm 내외로 검지되었다. 교반기가 P3 지점에 막 도달하였을 때 암모니아 발생농도가 약 46 ppm 내외로 급격히 높아졌으며, 교반기가 퇴비를 교반하고 지나는 시점에는 암모니아 검지농도가 65 ppm까지 상승하였다. Dewse 등(1995)은 퇴비단 온도가 상승할수록 암모니아 발생량이 높아진다고 하였는데 본 연구에서 암모니아가 가장 높게 발생한 지점이 퇴비단의 온도가 가장 높은 지점이었다[15]. 또한 이 등(2016)에 따르면 암모니아 발생량은 퇴비화 개시 초기에 높게 나타나며 퇴비단의 온도에 비례 한다[16]고 하였다. 교반기가 통과한 후에 퇴비단 표면으로부터 휘산되는 암모니아 농도는 감소하기 시작하였으며 P5지점에서는 2 ppm 내외까지 낮아졌다. 황화수소는 전 구간에서 검출되지 않았으며 교반기가 퇴비단을 뒤집고 있는 시점에서도

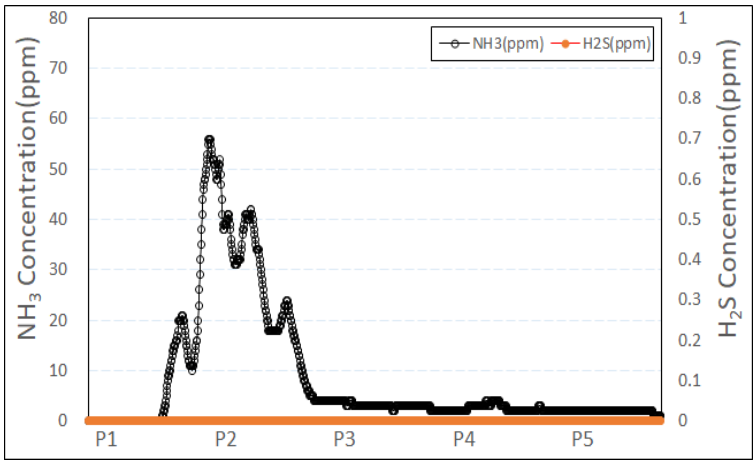

Fig. 13. Changes in ammonia concentration according to movement of agitator at the side of the compost pile in T3.

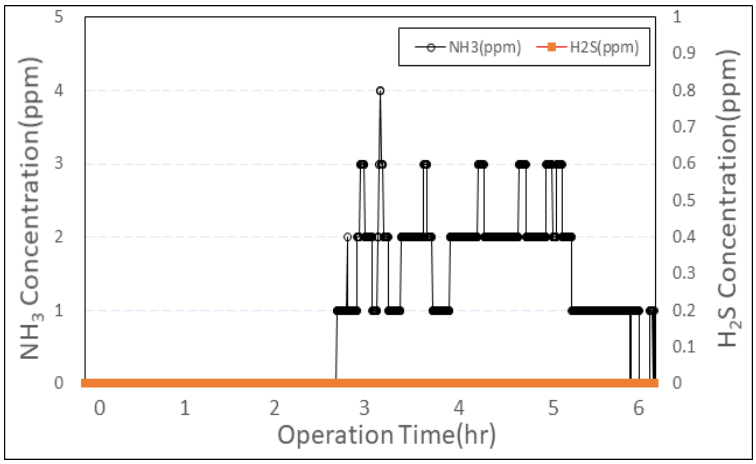

Fig. 14. Concentrations of NH_3 and H_2S measured at P3 in T3.

ppm 수준의 측정기로는 검출되지 않았다. Fig. 13은 퇴비화시설 T3에서 교반기가 이동하는 레일의 측면에서 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 측정한 암모니아와 황화수소 농도 값을 나타낸 것이다.

T3 시설에서 교반기가 P2 지점을 통과하는 시점에 맞춰서 퇴비화시설의 측면에서 측정장치를 퇴비화개시 시점인 P1 지점에서부터 퇴비화 후기 지점인 P5 까지 이동해가면서 암모니아와 황화수소의 발생농도를 측정하였다. 교반기가 P2 지점을 지나는 시점에서 암모니아 최고농도가 56 ppm 내외로서 Fig. 12에 나타난 결과보다는 더 낮았다. 이 결과는 교반기가 지나는 위치와 측정장치의 위치에 따른 것으로 여겨진다. 이 경우에도 황화수소는 역시 검지되지 않았다. T3에서의 암모니아 측정결과를 종합해보면 퇴비사로부터의 암모니아 발생은 교반기가 작동하는 지점에서 높아진다는 것을 측정결과로서 확실하게 알 수 있다. Fig. 14는 시험시설 T3의 P3 위치에서 전기화학식 센서(MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 사용하여 측정한 암모니아와 황화수소 농도 값을 나타낸 것이다.

시험시설 T3의 P3위치에서 발생하는 암모니아와 황화수소 농도를 지상 1 m 높이의 지점에서 6시간 동안 측정하였다. 시험개시 후 초기에는 암모니아가 검지되지 않았으나 교반기가 P3 지점을 통과하는 시점부터 암모니아가 1~3 ppm 수준으로 검출되었으며 최고 농도는 4 ppm을 나타냈다. 반면 황화수소는 검출되지 않았다. 이 결과는 Fig. 12에 도시한 시

Table 3. Changes of Properties of Hanwoo Manure Compost During Composting Period

Items	pH	EC (μs/cm)	NaCl (%)	Moisture (%)	VS/TS (%)	TKN (%)
Stage 1	9.06	2,055	0.1	65.90	65.60	1.327
Stage 2	9.14	1,848	0.09	64.91	66.44	1.34
Stage 3	9.1	1,598	0.08	65.37	64.27	0.941
Stage 4	9.09	1,389	0.07	66.07	66.49	0.856
Stage 5	9.05	1,336	0.07	65.07	64.16	0.797
Stage 6	8.97	1,808	0.09	63.36	67.46	1.027
Stage 7	8.94	2,026	0.1	63.84	62.68	1.096
Stage 8	9.06	1,912	0.1	61.94	64.72	1.037
Stage 9	9.14	1,881	0.09	61.64	64.42	1.299
Stage 10	9.14	1,830	0.09	61.97	64.73	1.095

험시설 T3에서의 암모니아 농도와는 큰 차이가 있는데, 이는 암모니아의 분자량이 공기보다 적은 관계로 측면으로의 확산이 크지 않은데 기인한 것으로 보여진다.

3.5. 한우분 퇴비화과정별 성분 변화

기계교반식 한우분 퇴비화시설에서 부숙조 전 구간을 10 등분한 각각의 지점(Stage 1~10)에서 샘플을 채취하여 그 성분을 분석하였다. 교반식 부숙조 내에 체류하는 기간을 18일로 하면 각 시료의 부숙기간 경과일수 차이는 약 1.8일이 된다. Table 3은 각 우분 퇴비시료의 성분을 분석한 결과를 나타낸 것이다.

퇴비화기간이 경과함에 따라 퇴비단의 pH는 낮아졌다가 다시 높아지면서 안정화되는 것이 일반적인 현상이다. 본 실험에서도 퇴비화 초기에 9.06이었던 pH가 퇴비화기간을 거치면서 8.94로 낮아졌다가 다시 9.14 수준을 유지하였다. 이 결과는 Lee 등(2004)이 퇴비화 초기에 발생하는 유기산이 퇴비의 pH를 낮춘다고 한 결과와 유사한 것이다[17]. 퇴비화에서 큰 관심요소인 염분(NaCl)농도도 퇴비화 시작 시에 0.1%였다가 퇴비화가 진행된 이후에 0.09% 수준으로 낮아졌다. 이 결과는 가축분 퇴비의 규격을 정하는 비료공정규격 설정 및 지정(2020)에 규정된 가축분 퇴비의 염분(NaCl)함량 기준이 2.0 % 이하인 것을 고려하면 안전한 수준인 것으로 나타냈다. 수분함량은 65.9% 수준에서 62% 수준으로 낮아졌으나 후숙기간을 거치면서 더 낮아질 것으로 판단된다. 총고형물 중에서 휘발성고형물(Volatile Solids)이 차지하는 비율도 퇴비화 초기에 65.6%에서 퇴비화 후기에 64.7%로 낮아지는 결과를 보였다. VS는 생물학적으로 분해되는 물질인 관계로 VS 감소는 퇴비화와 부숙정도를 판단하는 지표가 된다[18]. 퇴비화 초기에 1.327%이던 TKN 함량도 퇴비화를 거치면서 1.095%로 낮아지는 등 각각의 퇴비화 지표들이 본 실험이 이루어진 시설에서 퇴비화가 원활하게 진행되고 있음을 나타내 주고 있다.

4. 결 론

한우를 전문으로 사육하는 전업축산농가의 한우분뇨 퇴비화과정에서 미세먼지 발생과 관련된 요인을 분석한 실험결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 단순퇴적식 한우분뇨 퇴비화시설(T1)에서는 $PM_{2.5}$ 농도가 15 μg/m^3 수준이었으며, 기계교반식 한우분뇨 퇴비화시설(T2)에서는 $PM_{2.5}$가 5~10 μg/m^3 내외의 농도수준을 유지하였다. 또한 한우분뇨 퇴비화시설 T3에서의 $PM_{2.5}$의 농도가 10 μg/m^3 이하의 수준을 보임으로써 1차 미세먼지는 단순퇴적식과 기계교반식 한우분뇨 퇴비화시설 간에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

2. 한우분뇨 퇴비단에서 발생하는 암모니아의 농도도 T1과 T2 그리고 T3 간에 큰 차이를 보이지 않았지만, 퇴비단을 교반하는 지점에서의 암모니아 발생농도가 높게 나타난 것으로 보아 퇴비 교반지점에서의 암모니아 관리대책이 필요한 것으로 보여진다. 또한 암모니아의 농도가 교반시설의 측면보다는 상부 측에서 더 크게 나타났으므로, 기계교반식 퇴비화시설에서는 교반기 상부에서 암모니아를 포집, 처리하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
3. 각각의 한우분뇨 퇴비화시설 형태나 교반여부에 관계없이 황화수소가 검출되지 않은 결과로 미루어볼 때, 한우분뇨 퇴비화시설에서의 황산염 등으로 인한 2차 미세먼지 생성가능성이 높지 않은 것으로 판단된다.
4. 단순퇴적식 한우분뇨 퇴비단(T1)의 경우 최고온도가 46℃를 기록하였고, 2곳의 기계교반식 한우분뇨 퇴비화시설들(T2, T3)에서는 각각 63℃와 68℃까지 상승함으로써 교반식 퇴비화가 단순퇴적식 퇴비화에 비해 퇴비부숙에 더 유리한 것으로 판단된다.
5. 전체 실험결과를 종합하여 보면 우분 퇴비화시설에서의 1차 미세먼지 농도는 매우 낮은 편이었으며 2차 미세먼지 발생원으로 알려진 황화수소는 검출되지 않았다 따라서 한우분뇨 퇴비화 시에 미세먼지 발생원관리 최적화를 위해서는 암모니아 위주의 관리기술 적용이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구과제인 가축분뇨퇴비화과정에서 암모니아와 미세먼지 발생원단위 설정 및 감소기술 개발 연구(PJ01429703)과정에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Korean statistical information service, “Statistic information in the field of agriculture, forestry and fisheries”. (2020).
2. Lee, S. H., Yu, B. K., Ju, S. Y., Kang, Y. G. and Jung, G. H., “Characteristics of Solid Fuel from Cattle Manure”, New & Renewable Energy, 12(4), pp. 64~69. (2016).
3. Kim, M. S., Kool, N. and Kim, J. G., “A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study”, Korean J. Environ. Biol., 38(1), pp. 71~81. (2020).
4. Hodan, W. M. and Banard, W. R., “Evaluating the contribution of $PM_{2.5}$ precursor gases and re-entrained road emissions to mobile source $PM_{2.5}$ particulate matter emissions”. MACTEC Federal Programs, Research Triangle Park. (2004).
5. Shin, D. W., Joo, H. S., Seo, E. J. and Kim, C. Y., “Management strategy to reduce PM-2,5 emission : Emphasis ammonia”. Korea Environment Institute. (2017).
6. Hristov, A. N., “Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in the United States”. J. Dairy Sci., 94(31), pp. 3130~3136. (2011).
7. Choi, H. C., Yeon, G. Y., Song, J. I., Kang, H. S., Kwon, D. J. and Yoo, Y. H., “Seasonal Dust Concentration and Characteristics of Windowless Broiler Building”. Journal of Livestock Housing and Environment, 11(3), pp. 197~206. (2006).
8. Kim, H. A., Kim, J. Y., Shin, K. M., Jo, J. H., Roque, K., Jo, G. H. and Heo, Y., “Relationship between Endotoxin level of in swine farm dust and cellular immunity of husbandry workers”. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 23(4), pp. 393~401. (2013).
9. APHA., “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 21th Edition, (2005).

10. AOAC., “Official Methods of Analysis”. AOAC INTERNATIONAL. (2007).
11. Korean Ministry of Agriculture., Agricultural cooperative federation(NongHyup of Korea)., “Guidebook of standard design drawings for construction of livestock manure recycling facilities” (2008).
12. Rural Development Adminstration, “Establishment and designation of fertilizer standards”. (2020).
13. Tibu, C., Annang, T. Y., Solomon, N. and D, Yirenya-Tawiah, “Effect of the composting process on physicochemical properties and concentration of heavy metals in market waste with additive materials in the Ga West Municipality, Ghana”, International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 8, pp. 393~403. (2019).
14. Lee, S. B., Kim, J. G., Lee, D. B., Lee, K. B., Han, S. S., Kim, J. D. and Baek, S. H., “Changes of Physico-chemical Properties and Microflora of Pig Manure due to Composting with Turning Times and Depth”, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, 35(2), pp. 127~135. (2002).
15. Dewes, Th., “Nitrogen Losses from Manure Heaps:,” Biological Agriculture & Horticulture, 11(1), pp. 309-317. (2012) .
16. Lee, D. J., Kim, J. K., Jeong, K. H., Cho, W. M. and Ravindran, B., “Characteristic Changes of Swine Manure by Air Suction Composting System”. Jornal of Korea Organic Resource Recycling Association, 24(3), pp. 63~74. (2016).
17. Lee, Y. S., Choi, H. K., Kim, J. K., Lee, Y. H., Chung, K. T., Roh, J. S. and Suh, M. G., “Optimum mixing ratio of sewage sludge during composting of food wastes”. Korean journal of environmental health science, 30(5), pp. 366~373. (2004).
18. Dastpak, H., Pasalari, H., Jafari, A. J., Gholami, M. and Farzadkia, M., “Improvement of Co-Composting by a combined pretreatment Ozonation/Ultrasonic process in stabilization of raw activated sludge”. Scientific Reports Open access (https://doi.org/10.1038/s41598-020-58054-y) 10, pp. 1070. (2020).