



Research Paper

Characteristics of Soil Heavy Metal Contamination in the Intensive Livestock Farming Watersheds

Un-il Baek^{id} · Deok-Woo Kim^{id} · Eu Gene Chung^{†id} · Eun-Hye Na^{id} · Yongseok Kim^{id}

Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

(Received April 27, 2023; Revised June 13, 2023; Accepted June 14, 2023)

Abstract : Soil contamination of agricultural watersheds can increase to deteriorate water quality, human health, crop production and aquatic ecology. In particular, it is important to understand the impacts of soil heavy metal contamination from livestock excretion because the excretion has been gradually increasing due to the rapid growth of the livestock industry. In this study, to analyze the characteristics of soil heavy metal contamination in intensive livestock farming watersheds, we selected intensive livestock farming watersheds where livestock heads and amount of livestock excretion by species were spatiotemporally surveyed. We also investigated the characteristics of five soil heavy metals (As, Cd, Pb, Cu, Zn) contamination. The Cheongmi Stream watershed in Anseong, Kyungi-do and Gwangcheon Stream watershed in Hongseong, Chungcheongbuk-do, Korea were one of the most intensive livestock rearing regions where there were very large amounts of livestock excretion. It was also found that Cu and Zn among heavy metals exceeded the soil contamination concern standard at two of the sampling points in the Gwangcheon Stream watershed. Compared to the national soil measurement network data, it was showed that the concentrations of Cd, Cu, and Zn in the intensive livestock farming areas such as both Cheongmi Stream and Gwangcheon Stream watersheds were higher than in other areas. Thus, we suggested that the soil in intensive farming watersheds was contaminated by heavy metals compared to other areas. Therefore, it is necessary to manage not only livestock excretion, but also animals' welfare, humans, and the environment to use less heavy metals in their feeds. We also believed that various impacts of livestock excretion on the environment need to be studied soon.

Keywords : Livestock manure, Agricultural watershed management, Intensive livestock rearing, Heavy metals, Soil contamination

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: eg.chung@korea.kr
Tel: 032-560-7384

© 2023, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

가축밀집사육지역 토양 중금속 오염 특성

백운일¹ · 김덕우² · 정유진³ · 나은혜⁴ · 김용석⁵

국립환경과학원 물환경연구부

목적: 농업환경에서 토양오염 증가는 수질 및 농산물에 대한 오염으로 인간건강 및 수생태에도 영향을 미친다. 특히 가축분뇨는 급속한 축산업의 성장으로 점차 늘어나고 있어 토양오염 중 가축분뇨에 의한 중금속 오염 영향 파악은 중요하다. 본 연구에서는 토양오염과 축산업의 상관성을 분석하기 위하여 가축사육과밀지역을 선정하여 그 지역의 축종별, 가축두수 및 가축분뇨 발생량 등을 조사(지역, 기간, 방법)하고, 토양 중금속(As, Cd, Pb, Cu, Zn) 오염을 분석하여 이를 토대로 현황 및 문제점을 검토하였다. 가축분뇨 발생량은 안성시 청미천 유역과 홍성군 광천천 유역이 전국에서 많이 발생하는 유역에 속했으며, 축종은 돼지 축종이 가장 많이 밀집되어 있었다. 홍성군 광천천 유역의 샘플링 지점 중 두 지점에서 Cu와 Zn 항목이 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. 전국 토양측정망 자료와 비교했을 때 가축사육밀도가 높은 지역(청미천 유역, 광천천 유역)이 다른 지역에 비해 토양 중금속 항목 중 Cd, Cu, Zn 세 가지 항목에서 대부분 높은 농도분포를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 이는 가축사육 밀도가 높은 지역이 다른 지역에 비해 토양 중금속 오염에 기인하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 가축사육밀도를 고려한 가축사육 뿐만 아니라 동물과 더불어 인간과 그리고 환경까지 생각하는 관리가 필요하다. 이를 해결하기 위한 향후 다양한 매체별 가축사육밀집과 환경오염 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

주제어: 가축분뇨, 유역관리, 사육밀집지역, 중금속, 토양오염

1. 서론

우리나라의 축산업은 1960~70년대 이후 급속한 산업화에 따른 인구증가와 국민소득의 증대로 식품 소비형태가 변하면서 육류 소비량 증가 및 정부의 장려 축산정책으로 발전하였다. 또한 소규모 축산농가에서 집단지·대형화의 사육형태로 점차적으로 규모가 커지기 시작했다.¹⁾ 연도별 가축사육두수 변화를 살펴보면 2000년부터 점차 증가하다가 조류인플루엔자(Avian Influenza, AI)로 인해 2004년에 감소한 뒤²⁾, 다시 점차 증가 추세였으며, 2019년에 약 29 천만 두로 가장 많은 가축사육두수를 기록하였다. 2020년에도 아프리카돼지열병(African Swine Fever, ASF) 등으로 감소하였으나, 다시 증가 추세이다.⁴⁾ (Fig. 1)

가축사육두수의 증가에 따라 가축분뇨발생량 또한 증가 추세에 있다. 가축사육두수가 가장 많은 2019년에는 하루평균 153,220 m³ 발생하였다. 가장 최근 연도인 2021년에는 하루평균 142,154 m³이 발생하였으며, 이중 약 75 %인 107,035 m³은 자가처리 중 퇴비·액비 형태로 재활용되었으며, 약 20 %인 27,788 m³은 위탁처리 형태로 처리 되었다.⁵⁾ (Fig. 2) 하지만 생산된 모든 퇴비·액비가 농지에서 작물재배에 사용되는 것

이 아니다. 과도하게 살포된 퇴비·액비는 작물에 흡수되지 못한 채 토양에 남아 토양을 오염시킬 뿐 아니라, 하천과 지하수에 스며 들어가 2차 오염까지 발생시키고 있다.⁷⁾ 가축분 퇴비는 유기물이 풍부하여 토양에 환원 시 비옥도를 향상시키는 장점이 있으나 장기적인 연용에 따른 토양 내 중금속의 축적 뿐만 아니라 질소 및 인 등 영양염류의 용탈이나 유출에 의해 지하수 및 지표수의 오염을 가져올 수 있다.^{8,9)}

특히 중금속은 가축 및 사람에게 축적될 수 있기 때문에 안전한 축산물의 생산과 건강을 위하여 반드시 관리와 검사를 필요로 하는 주요 위해 인자 중 하나이다.^{10,11)} 또한 일부 중금속은 먹이사슬에서 생체 축적이 되어 인간의 건강과 환경적인 문제를 야기시킬 수 있다.^{12,13)} 예를 들어, 중금속 중 토양에 집적된 아연(Zn)과 구리(Cu)는 작물의 생산을 저감 시키는 원인이 된다.¹⁴⁾

국내에서는 1963년 처음 시행된 사료관리법과 2002년 시행된 사료공정서(현 “사료 등의 기준 및 규격”) 그리고 사료공정 위해요소중점관리기준(Hazard Analysis and Critical Control Point, HACCP)을 통해 사료의 안전관리를 규제하고 있으며, 국립농산물품질관리원에서 사료의 안정성 검사와 모니터링을 진행하고 있다. 하지만 성장촉진이나 사료효율 개선 등의

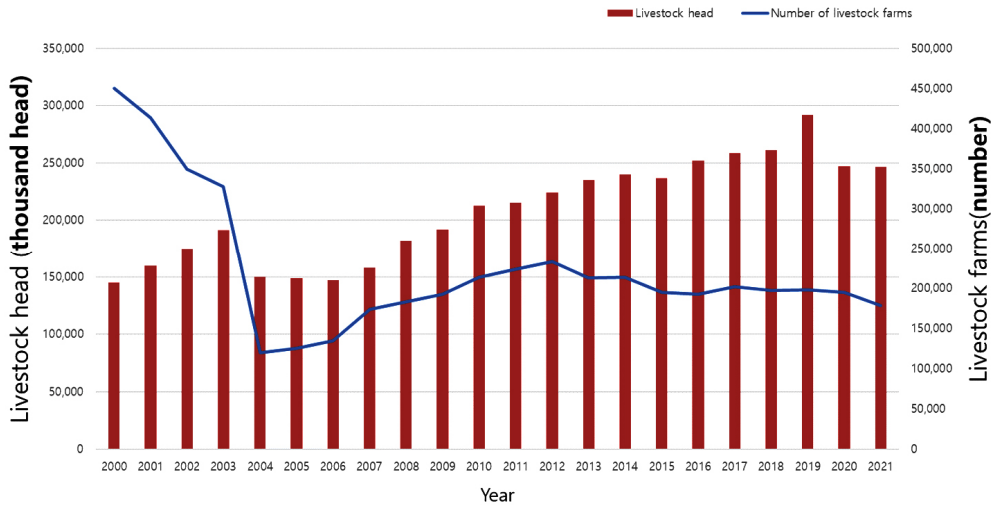


Fig. 1. Annual population (red bars) and number of farms (blue line) of livestock in Korea (Ministry of Environment, 2000~2021).

여러 가지 목적으로 무분별하게 사료에 첨가되는 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 망간(Mn), 철(Fe) 및 셀레늄(Se) 같은 미량원소들이 전량 동물체 내에서 이용되지 않고 일부 분뇨로 배출되고 있다.^{15,16)} 특히, 돼지분뇨의 경우 Zn과 Cu 같은 특정 중금속이 우리나라에서는 퇴비의 원료로 이용할 수 없는 도시 고형폐기물이나 하수오니에 포함된 함량보다 높다는 보고^{17,18)}가 있다.

실제 축산농가에서 개별 배출된 가축분뇨(퇴비)가 많은 부분 노천에 야적되어 있어 환경오염의 원인으로 작용하고, 축산농가 개별처리시설을 개보수하지 않고 방치하여 부적정 처리되거나 무단 방류되는 경우도 많다.¹⁹⁾

본 연구에서 가축밀집지역 내 가축분뇨의 토양에 대한 영향 파악을 위해서 가축사육 현황 및 가축분뇨 발생량의 연도별 변화추이를 분석하고 가축사육 과밀지역을 선정하여 그 지역

을 대상으로 토양 중금속 오염도를 분석하고자 한다. 또한 다른 지역과의 중금속 오염도 비교 분석을 통해 가축사육 밀집도와 토양 중금속 오염도에 대한 상관성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상지역 및 조사지점(배경 토양 및 오염 우려 지점 선정)

가축사육 밀도에 대한 토양오염 현황을 분석하기 위하여 가축사육이 밀집된 지역을 선정하였다. 가축분뇨법 시행령 제4조2항에 명시된 조사대상 지역을 중심으로 우선 조사대상 지역(시·군 단위) 13개 지역을 1차 선별하였다. 13개 지역 중 가축분뇨 발생량이 많은 경기도 안성시와 충청남도 홍성군을 선정하였다. 특히 홍성군은 전국에서 돼지사육두수가 가장 많

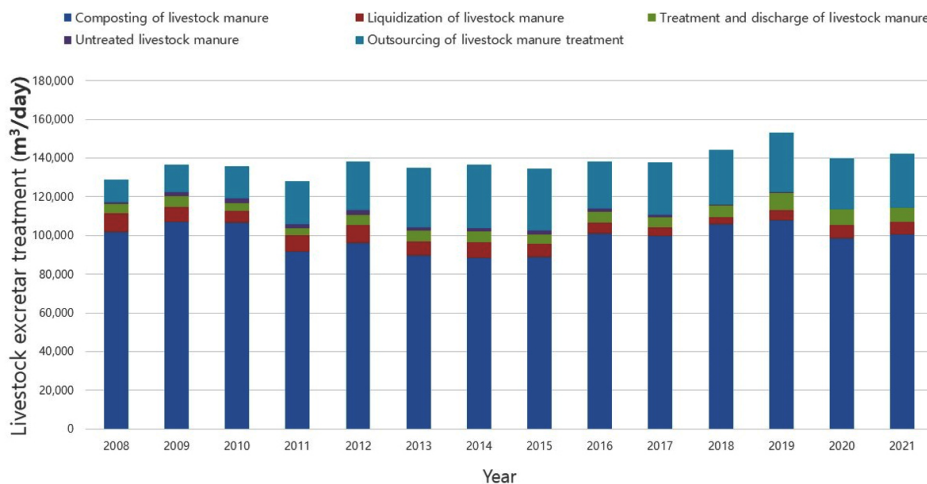


Fig. 2. Annual status of livestock excretion management: blue bars indicate purification; the reds refer consignment; the greens present composed livestock manure resource; the purples show ocean dumping type (Ministry of Environment, 2008~2021).

은 지역이다.²⁴⁾

대상지역(안성시, 홍성군)에서 조사지점을 선정하기 위해 공간정보시스템 Arc Geographic Information System (GIS) version 10.5.1를 통하여 각각의 공간범위를 구분하였다. 국가 공간정보포털(<http://www.nsd.go.kr>)을 통해 행정구역 시군구 경계(시·도, 시·군·구 단위) 및 수자원단위지도(소권역)를 확보하였으며, 세부유역 단위는 Korean Reach File (KRF)을 사용하여 구분하였다.²⁰⁾

대상지역(안성시, 홍성군) 내 소권역 축종별 가축사육(주요 축종: 소+돼지) 현황을 비교해 보면 안성시 소권역 중 청미천 상류가 가장 많았으며 그 다음으로 청미천중류 순으로 나타났다. 홍성군에서는 금리천이 가장 많았고 광천천 유역 순이었다. 가축사육 밀집도를 알아보기 위하여 소권역별 단위면적당 사육두수를 비교한 결과 안성시는 청미천상류 유역에서 가장 높은 밀집도를 보였으며, 홍성군의 역시 사육두수는 가장 많은 금리천에서 높은 밀집도를 나타냈다.

가축사육 현황 및 단위면적당 사육두수를 고려할 때 토양환경오염이 우려되는 소권역은 안성시는 청미천상류 유역이고 홍성군은 금리천 유역이다. 청미천 유역의 경우 유역면적이 넓어 상류부터 하류까지 많은 지자체(안성, 용인, 이천 등)를 포함하고 있다. 이 중 대상지역인 안성시가 차지하는 비율이 가장 큰 곳이 청미천중류로 해당 유역을 대상 유역으로 결정하였다. 그리고 홍성군의 금리천 경우 바다와 밀접해 있는 유역으로 샘플링에 어려움이 있어 두 번째로 높은 밀집도를 나타내는 광천천으로 결정하였다.

지역별 선정된 해당 소권역을 세부유역으로 구분하여, 가축사육현황⁴⁾과 중첩하였다. 오염원(축산계)이 밀집된 지역 중심으로 2016년~2017년까지 대상 유역별로 각각 5회씩 10회에

걸쳐 총 97개(밭 토양: 52개, 논 토양: 36개, 배경 토양: 9개)의 조사지점을 선정하고 시료를 채취하였다. 밭 토양은 각 세부 유역 내에서 가축사육 밀집 지역 주변 토양을 우선 선정하였으며, 논 토양은 가축사육이 밀집된 세부유역 말단의 하천 주변에 있는 지점을 선정하였다. 그 외 배경 토양은 오염 우려 지역에서 최대한 떨어진 곳을 선정하였다(Fig. 3).

2.2. 시료채취 및 시료분석 방법

토양 시료는 토양오염공정시험기준(2017.8.11. 제정) ES 07130.a을 이용하여 채취하였으며, 시료전처리 및 분석은 토양오염공정시험기준 ES 07400.2a에 따라 수행하였다. 분석장비는 ICP-OES (PerkinElmer OPTIMA 8300)기기를 이용하여 중금속 분석을 하였으며, 분석항목은 5가지 항목(As, Cd, Pb, Cu, Zn)을 조사하였다.

연구대상 지역의 가축사육 밀집도와 토양 중금속 오염 상관관계를 분석하기 위하여 공간정보시스템 Arc GIS version 10.5.1를 통하여 샘플링 지점의 중금속 농도와 가축사육 현황 자료를 공간 분석하였다.

2.3. 전국 토양측정망 자료 분석

지역별 가축사육 밀집과 토양오염 관계를 분석하기 위해 전국오염원조사 축산계 자료(2016~2017년)의 전국 가축사육현황 자료 및 토양지하수정보시스템(Soil Groundwater Information System, SGIS)의 토양측정망자료(2016~2017년)를 이용하여 행정구역별로 비교분석하였다. 분석 단위는 시·도별과 시·군·구별로 구분하였으며, 또한 연구대상 지역과의 상관관계 분석을 위해 t-검정을 이용하여 두 집단간의 유의한 차이가 있는지를 분석하였다.

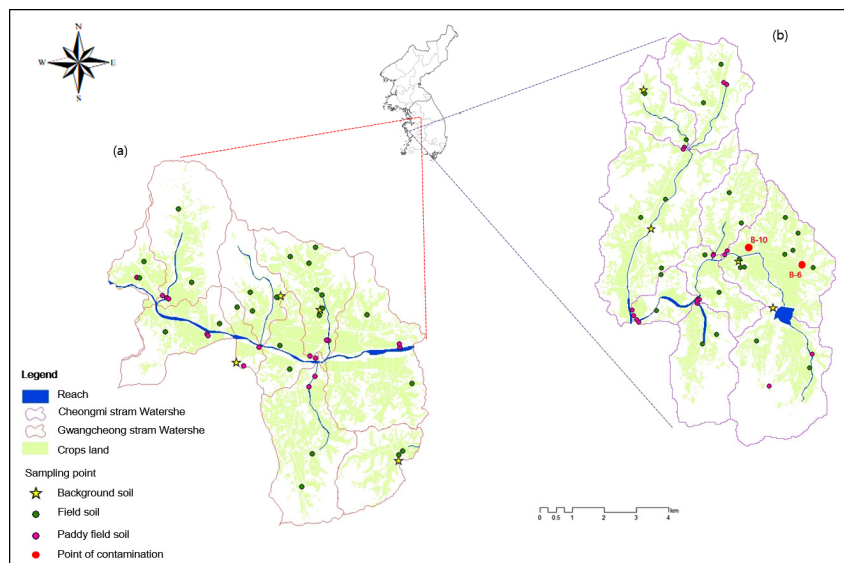


Fig. 3. Map of sample sites: (a) Cheongmi stream watershed in Anseong-si and (b) Gwangcheon stream watershed in Hougseong-gun, Korea: Green dots indicate field soil; the dark reds show paddy field soil; the light reds without border lines refer polluted sites (i.e., soil pollution criteria: Cu 150 mg/kg, Zn 300 mg/kg).

전국토양측정망 자료 분석을 위해서 토양지하수정보시스템(SGIS)에서 9년(2010년~2018년)간 자료를 이용하였다. 토양측정망은 1997년부터 전국망과 지역망으로 구분하여 운영했다.²⁵⁾ 이후 2001년부터 지역망은 토양오염실태조사로 바뀌어 현재까지 운영하고 있으며, 토양측정망은 전국망으로 운영하고 있다. 전국망의 경우 7개의 지방환경관리청(측정분석과)에서 토양측정망에 의한 토양오염도를 토양특성을 고려하여 각 지점에 대해 격년제로 측정 운영하고 있다. 지점별 측정지점의 변화는 측정자료를 관리하기 시작한 1997년에는 949지점에서 2013년 1519지점으로 점차 확대되고 있었으나(환경백서, 1997~2013), 2014년 법개정으로 1,000개 지점으로 고정관리 되고 있다. 전국토양측정망 자료는 토양측정망 설치 및 운영계획(환경부고시 제2021-253호, 2021.12.6.)에 따라 16개(전, 답, 과수원, 목장용지, 대지, 학교용지, 공원, 임야, 하천부지, 체육용지, 유원지, 종교용지, 공장용지, 도로, 철도용지, 잡

종지)의 지목으로 분류하여 분석하였다. 또한 본 연구의 대상 지역의 지목(임야, 전, 답)과 비교하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 축종별 가축분뇨발생량

본 연구에서 축종별 가축사육두수 자료에 발생원단위(환경부, 2008)를 적용하여 대상지역 내 표준구역별로 가축분뇨 발생량을 산정하였다. 안성시 소권역의 축종별 가축분뇨 발생량을 비교해 보면, 2016년 한천 구역에서 569,000 톤으로 가장 많이 가축분뇨 발생량이 산정되었으면 두 번째로는 청미천상류 그 뒤로는 청미천중류 구역에서 각각 470,000 톤, 454,000 톤으로 많이 발생 되었다. 2017년에는 청미천상류 구역에서 508,000 톤으로 가장 많이 발생하였으며, 한천 구역이 490,000 톤으로 두 번째로 많이 발생하였으며, 그 뒤를 438,000 톤으로

Table 1. The estimated livestock excretion produced by the watersheds of Anseong-si, Gyeonggi-do, Korea from 2016 to 2017.

Year	Division (watershed)	Livestock manure generation (thousand tons/year)										
		Cattle		Milk cow			Pig		Chicken	Duck	sum	
		shit	urine	shit	urine	washing water	shit	urine	washing water	shit		shit
2016	Han stream	173	123	16	9	6	24	48	69	87	13	569
	Juksan stream	31	22	7	4	3	16	32	46	9	2	171
	Anseong upstream	67	48	11	6	4	10	21	30	9	9	216
	Cheongmi middlestream	39	28	51	29	20	38	75	107	63	5	454
	Cheongmi upstream	42	30	12	7	5	56	111	159	47	1	470
	Cheonglyong stream	64	46	6	3	2	7	15	21	19	14	198
	Gosam dam	34	25	4	2	2	18	37	53	18	8	200
	Pyeongtaek watermark	37	26	26	15	10	5	11	15	16	1	161
	Miho upstream	45	32	15	9	6	37	73	105	58	15	394
	Jinwi stream confluence	20	14	54	31	21	11	22	31	28	0	232
	Dongyeon bridge watermark	25	17	43	24	17	18	36	52	59	1	291
ldong dam	12	9	0	0	0	3	5	8	40	0	77	
sum	589	420	244	139	97	243	485	694	452	69	3,431	
2017	Han stream	111	79	21	12	8	25	51	72	98	13	490
	Juksan stream	19	13	9	5	3	17	34	49	9	2	158
	Anseong upstream	35	25	19	11	7	10	21	30	10	9	176
	Cheongmi middlestream	30	22	41	24	16	40	81	116	63	5	438
	Cheongmi upstream	27	19	25	14	10	56	112	160	87	0	508
	Cheonglyong stream	38	27	7	4	3	11	22	31	19	14	174
	Gosam dam	24	17	7	4	3	12	24	35	24	1	151
	Pyeongtaek watermark	36	26	38	22	15	5	11	15	26	1	194
	Miho upstream	34	24	17	10	7	33	66	95	74	13	374
	Jinwi stream confluence	18	13	43	25	17	7	14	19	23	0	179
	Dongyeon bridge watermark	19	14	37	21	15	16	31	44	61	1	257
ldong dam	6	4	0	0	0	2	5	6	44	1	69	
sum	394	281	263	149	104	235	470	672	538	60	3,167	

청미천중류 유역에서 많이 발생하였다. 축종별로 구분해서 분석해 보면 2016년에 가장 많은 가축분뇨가 발생한 한천 유역은 전체 가축분뇨발생량의 52% 해당하는 296,000 톤이 한우(소) 축종에서 발생하였으며, 그 다음으로 청미천상류와 청미천중류 유역이 돼지 축종에서 각각 약 69%, 49%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 2017년 역시 청미천상류와 청미천중류 유역에서 돼지 축종이 65%와 54%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 한천 유역에서는 한우(소) 축종이 약 39%로 가장 큰 비중을 차지하였다(**Table 1**).

홍성군의 경우, 2016년에는 금리천 유역에서 902,000 톤으로 가장 많은 가축분뇨 발생량이 산정되었으면 두 번째로는 666,000 톤으로 광천천 유역, 그 뒤로는 간월방조제 유역에서 516,000 톤으로 많이 발생 되었다. 2017년에도 2016년과 동일하게 금리천 유역에서 729,000 톤으로 가장 많이 발생하였으며, 광천천 유역이 621,000 톤으로 두번째, 그 뒤로 삽교천상류 유역이 507,000 톤으로 많이 발생하였다. 축종별로 구분해서 분석해 보면 2016년에 가장 많은 가축분뇨가 발생한 금리천 유역에서 86%, 두 번째로 광천천 유역에서는 70%, 그리고 세 번째로 간월방조제에서는 48%로 세 유역 모두 돼지 축종이 가장 많은 비중을 차지하였다. 2017년에도 금리천, 광천천, 삽교천 상류 모두 87%, 80%, 60%로 돼지 축종이 차지하는 비율이 가장 높게 나타났다(**Table 2**).

가축분뇨 발생량 분석 결과 본 연구의 대상유역인 안성시 청미천중류 유역과 홍성군 광천천유역은 발생량이 많은 유역에 속했으며, 돼지 축종이 가장 많이 밀집되어 있음을 알 수 있었다.

3.2. 대상유역(안성시 청미천중류, 홍성군 광천천) 토양 중금속 분석 결과

중금속에 대한 분석 결과 As(정량한계: 1.50 mg/kg)의 경우 안성시 청미천 유역에서는 논(답) 토양은 불검출~4.5 mg/kg, 밭(전) 토양은 불검출~7.5 mg/kg, 배경 토양의 농도는 불검출~12.0 mg/kg 농도 범위를 나타냈다. 최대값 농도는 논과 밭의 중금속 농도보다 배경 토양에서 가장 높게 나타났으며, 평균값 농도 역시 5.8 mg/kg으로 배경 토양에서 높게 검출되었다. 배경토양에서 중금속 농도는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. As의 경우, 지질 특성상 As가 풍부한 지층으로 이루어져 있거나 산업 활동 및 제련 공정 등 폐기물이나 배출물로 인하여 높을 수 있을 뿐 아니라 농약이나 비료의 사용도 As 농도가 높을 수 있다.²⁸⁾ 홍성군 광천천 유역의 논 토양에서 불검출~5.7 mg/kg, 밭 토양은 불검출~20.7 mg/kg, 배경 토양은 불검출~4.4 mg/kg의 농도 범위를 나타냈다. 청미천 유역과는 다르게 논과 밭의 중금속 농도가 배경 토양의 농도보다 높게 검출되었으며, 최대값 농도는 밭 토양에서 검출되었다. 평균값 역시 밭 토양에서 4.8 mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타냈다(**Fig. 4(a)**).

Cd(정량한계: 0.10 mg/kg)의 지목별 농도 범위는 청미천 유역에서 논 토양은 0.5~1.0 mg/kg, 밭 토양은 불검출~1.3 mg/kg, 배경 토양의 농도는 불검출~1.0 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 밭 토양에서 검출되었지만, 평균 농도는 0.7 mg/kg으로 논 토양에서 가장 높게 나타났다. 광천천 유역에서는 논 토양의 경우 0.9~1.8 mg/kg, 밭 토양은 불검출~1.3 mg/kg를 나타냈으며, 배경 토양의 농도 범위는 불검출~0.8 mg/kg를 나타냈다. 논 토양에서 최대값 농도가 검출되었으며, 평균값 역시

Table 2. The estimated livestock excretion produced by the watersheds of Hongseong-gun, Chungcheongnam-do, Korea from 2016 to 2017.

Year	Division (watershed)	Livestock manure generation (thousand tons/year)										sum
		Cattle		Milk cow			Pig		Chicken		Duck	
		shit	urine	shit	urine	washing water	shit	urine	washing water	shit	shit	
2016	Geumli stream	38	27	20	11	8	132	264	377	22	4	902
	Gwangcheon stream	49	35	33	19	13	79	159	227	51	1	666
	Ganwol seawall	86	62	18	10	7	42	84	121	83	4	516
	Sabgyo upstream	66	47	19	11	8	52	104	149	42	0	498
	Guman watermark	34	25	8	5	3	15	31	44	5	0	169
	Muhan upstream	13	10	1	1	0	3	5	7	3	0	43
	sum	287	205	99	56	39	323	646	925	206	9	2,795
2017	Geumli stream	34	24	7	4	3	108	216	310	19	4	729
	Gwangcheon stream	49	35	10	6	4	84	169	242	21	1	621
	Ganwol seawall	74	52	17	10	7	52	104	149	42	0	507
	Sabgyo upstream	81	58	18	10	7	42	84	120	80	4	502
	Guman watermark	35	25	8	5	3	15	31	44	5	0	169
	Muhan upstream	15	10	1	1	1	3	6	9	33	0	78
	sum	287	205	61	35	24	305	609	872	200	9	2,607

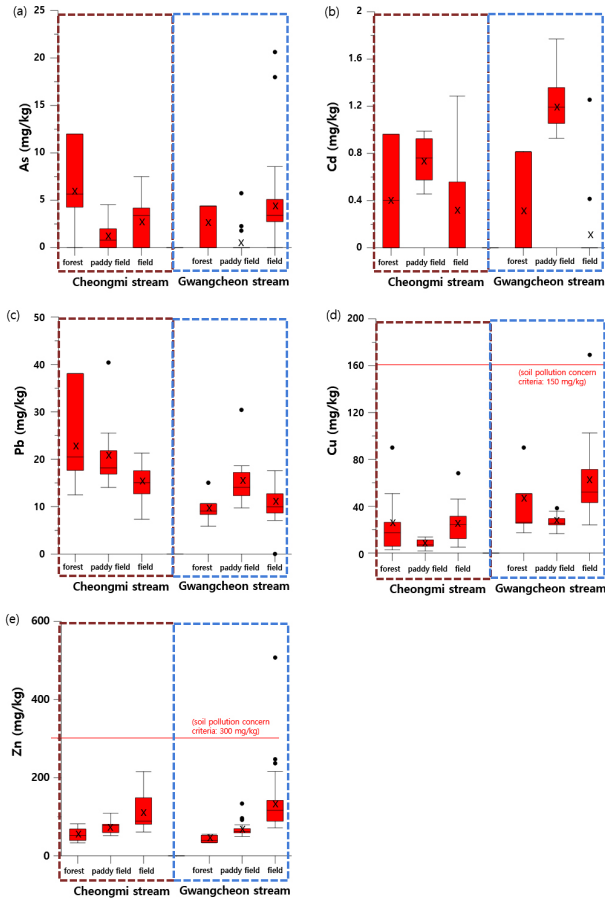


Fig. 4. Comparison of soil heavy metal concentrations measured by land uses in the Cheongmi stream watershed in Anseong-si and the Gwangcheon stream watershed in Hougseong-gun, Korea, from 2016 to 2017: (a) As, (b) Cd, (c) Pb, (d) Cu with soil pollution concern standard (i.e., Cu 150 mg/kg), (e) Zn with soil pollution concern standard (i.e., 300 mg/kg).

1.2 mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타냈다. 청미천과 광천천 유역 모두 Cd 농도는 다른 지목에 비해 논 지목에서 비교적 높은 농도분포를 나타냈다(Fig. 4(b)).

Pb(정량한계: 1.5 mg/kg)의 농도 범위는 청미천 유역 논 토양의 경우 14.1~40.4 mg/kg, 밭 토양은 7.3~21.3 mg/kg 농도 범위를 나타냈으며, 배경 토양의 농도는 12.5~38.1 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 논 토양에서 나타났으며, 평균 농도 값은 22.9 mg/kg으로 배경 토양에서 가장 높게 나타났다. 광천천 유역에서 논 토양은 9.8~30.4 mg/kg, 밭 토양은 불검출~17.6 mg/kg를 나타냈으며, 배경 토양은 5.9~15.0 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 청미천과 마찬가지로 논 토양에서 나타났으며, 평균값 역시 30.4 mg/kg으로 논 토양에서 가장 높은 농도를 나타냈다. 전체적인 농도분포를 보면 모든 지목에서 청미천 유역이 광천천 유역보다 높은 농도분포를 나타냈다(Fig. 4(c)).

Cu(정량한계: 1.0 mg/kg)의 농도 범위는 청미천 유역에서

논 토양은 1.9~13.7 mg/kg, 밭 토양은 5.1~68.3 mg/kg를 나타냈으며, 배경 토양은 2.8~7.1 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 밭 토양에서 나타났으며, 평균 농도는 24.4 mg/kg으로 밭 토양에서 가장 높게 나타났다. 광천천 유역에서 논 토양은 16.6~38.2 mg/kg, 밭 토양은 24.1~169.2 mg/kg를 나타냈으며, 배경 토양의 농도 범위는 17.4~90.2 mg/kg를 나타냈다. 밭 토양에서 Cu 농도의 최대값이 나타났으며, 평균값 농도 역시 24.1 mg/kg로 밭 토양에서 가장 높게 나타났다. 농도분포를 지역별로 보면 광천천 유역이 안성시 청미천 유역보다 높은 농도 분포를 나타냈다(Fig. 4(d)).

마지막으로 Zn(정량한계: 1.0 mg/kg)의 농도 범위는 청미천 유역에서 논 토양은 52.0~109.1 mg/kg, 밭 토양은 60.9~215.7 mg/kg 농도 범위를 나타냈으며, 배경 토양의 농도는 41.9~81.9 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 밭 토양에서 나타났으며, 평균값 농도 역시 111.4 mg/kg으로 밭 토양에서 가장 높게 나타났다. 반대로 최소값 농도는 배경 토양에서 나타났으며, 가장 낮은 평균값 농도 역시 41.9 mg/kg으로 배경 토양에서 나타났다. 광천천 유역에서 Zn 농도 범위는 논 토양은 49.6~133.7 mg/kg, 밭 토양은 71.6~508.2 mg/kg를 나타냈으며, 배경 토양의 농도 범위는 33.1~55.3 mg/kg를 나타냈다. 최대값 농도는 청미천 유역과 똑같이 밭 토양에서 나타났으며, 평균값 농도 역시 71.6 mg/kg으로 밭 토양에서 나타났다. 전체적인 농도분포는 같은 지목끼리 비교했을 때 광천천 유역의 모든 지목에서 오염 농도가 높게 나타났지만, 밭 토양 농도가 가장 높고 다음으로 논 토양, 마지막으로 배경 토양이 순서로 농도가 나타나는 것으로 두 지역 모두 똑같은 경향을 나타냈다(Fig. 4(e)).

토양환경보전법에 명시된 토양오염우려기준(토양환경보전법 제4조의 2 [별표3])을 적용했을 때 청미천 유역 모든 지점에서 모든 중금속 항목들이 초과되지 않았지만, 광천천 유역은 B-6 지점의 Cu 항목에서 169.2 mg/kg(토양오염우려기준: 150 mg/kg)으로 초과하였으며, B-10 지점에서는 Zn 항목이 508.2 mg/kg(토양오염우려기준: 300 mg/kg)으로 그 기준을 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 3 참조).

홍성군은 앞서 전국에서 돼지사육두수가 가장 많은 지역으로 그에 따른 영향이 있을 것으로 판단된다. 돈분뇨 내의 Zn와 Cu 농도가 우분이나 계분에 비해 유의적으로 높은 농도를 보이고 있으며 대사 과정(metabolic process)의 차이로 인하여 돈분뇨 내 중금속 농도가 양돈 사료의 중금속 농도보다 3~5배 높다고 보고되었다.²⁹⁾ 또한 국내 사례 중 Cu와 Zn 등 광물질이 포함된 사료 사용으로 인해 돈분에 검출되었을 개연성이 높다고 보고되었다.³⁰⁾ 따라서 돼지사육두수가 월등히 많은 홍성군 광천천 유역에 돼지분뇨 배출량과 관계가 있을 것으로 사료된다.

3.3. 전국 토양 측정망 자료 분석

2010년부터 2018년까지 연도별 중금속 항목들을 살펴보면,

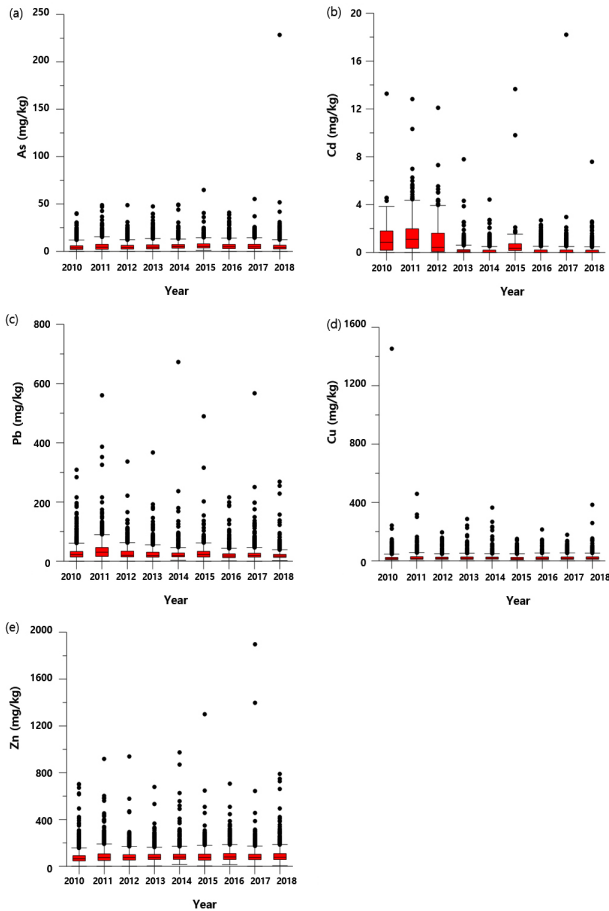


Fig. 5. Comparison of annual averages of heavy metal concentrations of Soil Monitoring Network in Korea from 2010 to 2018: (a) As, (b) Cd, (c) Pb, (d) Cu, (e) Zn.

As, Cu의 경우 9년간 크게 변하지 않은 비슷한 농도 분포를 보였다. 하지만 Cd, Pb는 2010년과 2011년에 가장 높은 농도 분포를 보였으며, 이후 점차 감소하는 추세를 보였다. Zn은 점차 농도가 증가하는 추세를 보였다. 평균 농도값을 살펴보면 Cd, Pb, Cu 항목은 2011년에 가장 높은 농도값을 나타냈으며, As는 2015년에 나타났으며, Zn은 2016년에 가장 높은 평균 농도값을 나타냈다(Fig. 5). 최대값 농도는 특정 몇몇 지점에서 나타났으며 조사지점의 지목을 살펴보면 As는 학교용지에서 최대 농도값을 나타냈으며, As를 제외한 나머지 항목은 공장용지와 산업단지 내 대지에서 최대값 농도를 나타냈다.

농촌진흥청에서 1999년부터 2007년까지 4년 1주기로 전국 논토양의 중금속 함량 조사한 자료와 비교해 보면 평균 함량과 범위는 As 0.87(불검출~7.02), Cd 0.08(불검출~1.25), Pb 4.95(불검출~52.2), Cu 3.33(불검출~25.0), Zn 4.67(불검출~131.2) mg/kg으로 나타났으며, 토양측정망 자료와 비교해 보면 같은 논토양의 중금속 평균 함량과 범위는 As 5.62(불검출~24.29), Cd 0.46(불검출~3.79), Pb 21.59(불검출~199.8), Cu 18.46(불검출~128.8), Zn 72.27(불검출~298.4) mg/kg으로

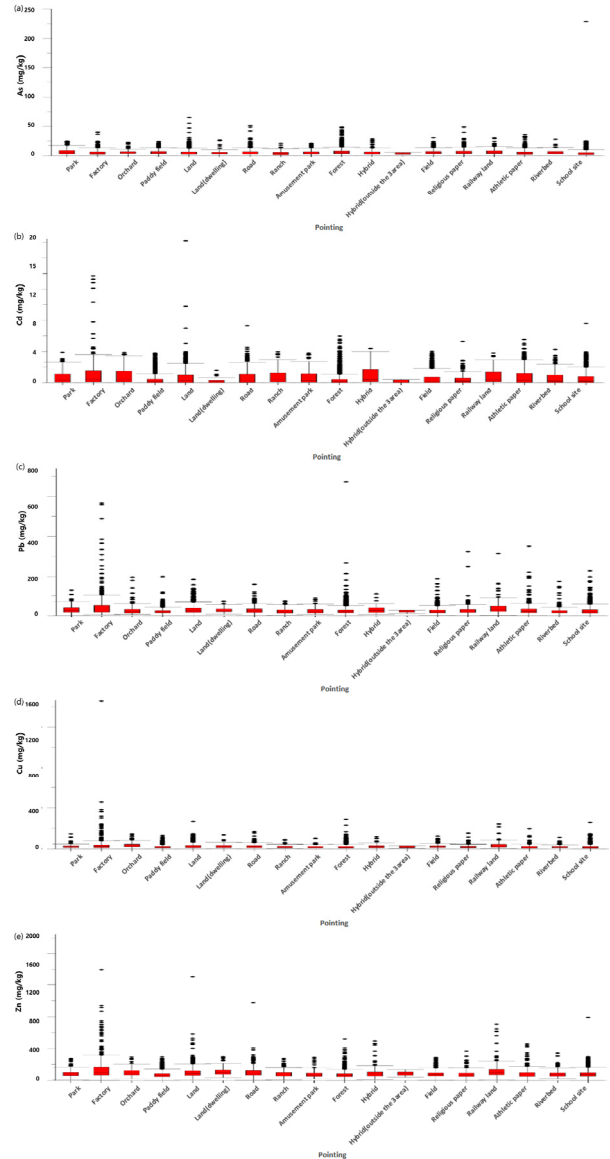


Fig. 6. Comparison of heavy metal concentrations of Soil Monitoring Network in Korea from 2010 to 2018 by land uses: (a) As, (b) Cd, (c) Pb, (d) Cu, (e) Zn.

평균 함량과 최대값 농도 모두 토양측정망 자료가 높은 것으로 나타났다. 그러나 이들 결과는 조사 시기와 조사지점 등의 차이로 인하여 비교·분석 및 평가하기에는 한계가 있다.

각 항목별로 농도 분포는 As의 경우 평균값은 0.54~6.89 mg/kg 범위를 나타냈으며 철도용지, 종교용지, 공원 순으로 높은 농도값을 나타냈다. 최대값 농도는 학교용지에서 228.63 mg/kg으로 나타났는데, 다른 지목의 최대값 농도 범위(21.25~64.82 mg/kg)와의 편차가 너무 크게 나타났다. 토양측정망 16개의 지목 중 임야는 4번째로 높은 5번째 높은 8번째로 평균 농도 값을 나타냈으며, 비교적 높은 농도값에 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6(a)).

Cd의 평균 농도값은 0.10~1.18 mg/kg 범위를 나타냈으며

공장용지, 잡종지, 과수원 순으로 높게 나타났다. 최대값 농도는 18.2 mg/kg으로 대지 지목에 포함하고 있었다. 토양측정망 16개의 지목 중 밭은 13번째 논은 14번째 임야는 15번째로 평균 농도값을 나타냈으며, As 항목과 다르게 비교적 낮은 농도값에 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6(b)).

Pb의 평균 농도는 20.25~46.64 mg/kg 범위를 나타냈으며 공장용지, 철도용지, 공원 순으로 높게 나타났다. 최대값 농도는 673.1 mg/kg으로 임야 지목에 포함하고 있었다. 토양측정망 16개의 지목 중 임야는 10번째 밭은 13번째 논은 16번째로 평균 농도값을 나타냈으며, 비교적 낮은 농도값에 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6(c)).

Cu의 평균 농도는 16.39~38.47 mg/kg 범위를 나타냈다. 공장용지에서 가장 높은 평균 농도를 나타냈으며, 과수원, 철도용지 순으로 높게 나타났다. 최대값 농도 역시 평균 농도값이 가장높은 공장용지 지목에서 1455.3 mg/kg으로 나타났다. 토양측정망 16개의 지목 중 밭은 8번째 논은 12번째 임야는 13번째로 비교적 낮은 농도값에 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6(d)).

마지막으로 Zn의 평균 농도는 72.27~147.71 mg/kg 범위를

나타냈으며 공장용지, 철도용지, 대지(주거) 순으로 높게 나타났다. 최대값 농도는 대지에서 1898.4 mg/kg으로 검출되었다. 토양측정망 16개의 지목 중 밭은 13번째 임야는 15번째 논은 16번째로 평균 농도 값을 나타냈으며, 비교적 낮은 농도값에 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 6(e)).

다른 국가의 논토양 중금속 함량에 대한 비교는 대부분 국가들의 토양의 중금속 함량을 전함량 개념으로 분석하고 있어 비교가 곤란하다.³¹⁾

지목별 중금속 항목들을 종합적으로 살펴보면, As를 제외한 모든 항목에서 공장용지 지목에서 가장 높은 평균 농도값을 나타냈다. 임야, 밭, 논은 As에서 비교적 높은 농도분포를 보였으며, 그 외 4가지(Cd, Pb, Cu, Zn) 항목에서는 비교적 낮은 농도분포를 나타냈다.

3.4. 대상 유역과 전국 토양 측정망 중금속 농도 비교 분석

토양 측정망 자료를 지역별로 구분하여 대상 유역이 포함된 지역과 실태조사 대상 유역의 농도값을 지목별로 비교분석을

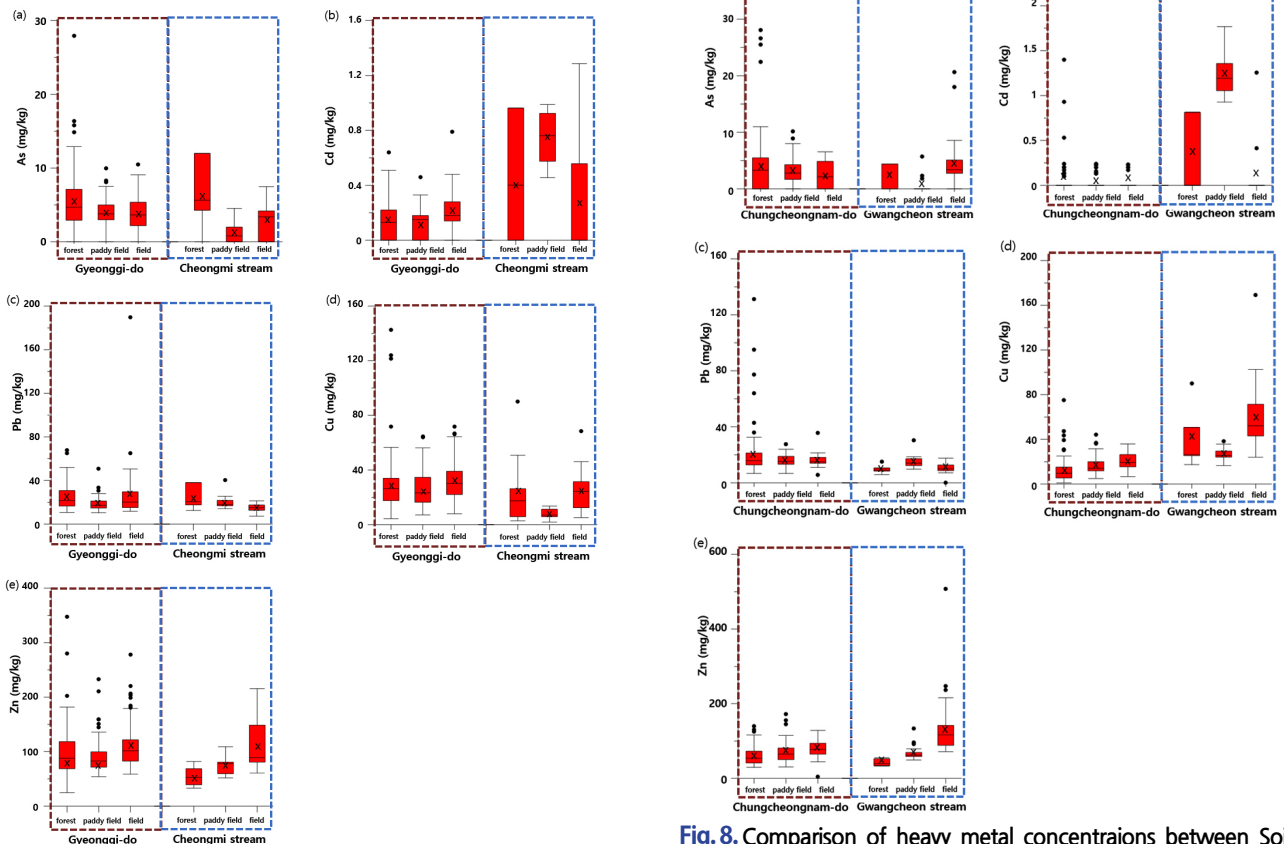


Fig. 7. Comparison of heavy metal concentrations between Soil Monitoring Network in Gyeonggi-do and the Cheongmi stream watershed in Ansong-si, Gyeonggi-do by land uses such as forest, paddy field, and field: (a) As, (b) Cd, (c) Pb, (d) Cu, (e) Zn.

Fig. 8. Comparison of heavy metal concentrations between Soil Monitoring Network in Chungcheongnam-do and the Gwangcheong stream watershed in Hongseong-gun, Chungcheongnam-do by land uses including forest, paddy field, field: (a) As, (b) Cd, (c) Pb, (d) Cu, (e) Zn.

하였다. 먼저 청미천 유역과 청미천 유역이 포함된 토양측정 망에서 경기도 지역의 농도값을 비교했을 때, As의 평균 농도 값은 임야 지목에서 경기도 보다 청미천 유역의 농도가 약간 높게 검출되었으며, 밭과 논 지목에서는 경기도가 각각 3.80 mg/kg, 3.93 mg/kg으로 청미천 유역 밭과 논 2.79 mg/kg, 1.15 mg/kg 농도보다 높은 농도값을 나타냈다. 최대값 농도는 모든 지목에서 경기도가 높게 나타났다(Fig. 7(a)).

Cd은 모든 지목에서의 최대값과 평균값 농도 둘다 청미천 유역이 경기도 보다 높은 농도값을 나타냈다. 그중 가장 높은 평균값을 나타낸 지목은 청미천 논 토양에서 0.73 mg/kg으로 나타났으며, 최대값 농도는 청미천 유역 밭 토양에서 1.29 mg/kg으로 나타났다(Fig. 7(b)).

Pb의 최대값 농도는 모든 지목에서 청미천 유역보다 경기도 가 더 높게 나타났으며, 가장 높은 농도값은 경기도 밭 지목에서 나타났다. 평균값 농도는 논 지목에서 경기도 보다 청미천 유역의 농도가 약간 높게 검출되었으며, 임야와 밭에서는 경 기도 농도가 각각 25.62 mg/kg, 27.39 mg/kg으로 청미천 유역 의 임야와 밭 22.89 mg/kg, 15.30 mg/kg보다 높은 농도값을

나타냈다(Fig. 7(c)).

Cu는 전체 지목에서의 최대값 농도는 청미천 유역 보다 경 기도에서 더 높게 나타났으며, 가장 높은 농도값은 경기도 임 야에서 나타났다. 평균값 역시 모든 지목에서 청미천 유역의 농도 범위 7.78~25.75 mg/kg 보다 경기도의 농도 범위가 26.37~33.72 mg/kg으로 높게 검출되었으며, 가장 높은 평균 농도값은 경기도 밭 지목에서 나타났다(Fig. 7(d)).

Zn은 전체 지목에서의 최대값 농도는 경기도가 청미천 유 역보다 더 높게 나타났으며, 경기도 임야에서 가장 높은 농도 값을 나타냈다. 평균값 역시 전체 지목에서 청미천 유역 농도 보다 경기도 농도가 높게 검출되었으며, 가장 높은 농도의 평 균값은 33.72 mg/kg으로 경기도 밭 지목에서 나타났다(Fig. 7(e)).

광천천 유역과 광천천 유역이 포함된 토양 측정망 자료의 충청남도 농도값을 비교 분석해보면, 임야 지목에서는 As, Cd, Pb, Zn 항목이 광천천 유역보다 충청남도에서 평균값과 최대값 모두 높게 나왔으며, 밭 지목에서는 As, Cd, Cu, Zn 항목이 평균값과 최대값 모두 광천천 유역에서 높게 나타났

Table 3. A t-test between Soil Monitoring Network in Gyeonggi-do and the Cheongmi stream watershed in Ansong-si, Gyeonggi-do by land uses such as forest, paddy field, and field.

	Field		Forest		Paddy field	
	Gyeonggi-do	Cheongmi stream	Gyeonggi-do	Cheongmi stream	Gyeonggi-do	Cheongmi stream
sample size	92	4	57	18	46	25
mean	5.56	5.82	3.93	1.15	3.80	2.79
standard deviation	18.36	25.28	4.94	1.77	6.79	4.58
As	degree of freedom	94.00	73.00	69.00	69.00	
t-value	-0.12		5.03		1.65	
p-value	0.91		0.00		0.10	
mean	0.14	0.44	0.13	0.73	0.21	0.28
standard deviation	0.02	0.26	0.01	0.03	0.02	0.20
Cd	degree of freedom	94.00	73.00	69.00	69.00	
t-value	-3.83		-17.75		-0.99	
p-value	0.00		0.00		0.33	
mean	25.62	22.89	18.73	20.08	27.39	15.30
standard deviation	149.69	122.22	42.23	34.74	727.32	11.56
Pb	degree of freedom	94.00	73.00	69.00	69.00	
t-value	0.44		-0.78		2.22	
p-value	0.66		0.44		0.03	
mean	29.67	5.38	26.37	7.78	33.72	24.45
standard deviation	513.31	3.40	171.83	13.01	260.33	237.26
Cu	degree of freedom	94.00	73.00	69.00	69.00	
t-value	2.13		5.92		2.35	
p-value	0.04		0.00		0.02	
mean	98.24	67.80	92.78	74.64	115.02	111.44
standard deviation	2345.05	329.96	1243.05	250.91	2311.60	2078.98
Zn	degree of freedom	94.00	73.00	69.00	69.00	
t-value	1.25		2.11		0.30	
p-value	0.22		0.04		0.76	

Table 4. A t-test between Soil Monitoring Network in Chungcheongnam-do and the Gwangcheong stream watershed in Hongseong-gun, Chungcheongnam-do by land uses including forest, paddy field, field.

	Field		Forest		Paddy field	
	Chungcheongnam-do	Gwancheon stream	Chungcheongnam-do	Gwancheon stream	Chungcheongnam-do	Gwancheon stream
sample size	90	5	71	18	24	27
mean	4.83	2.64	2.97	0.55	2.27	4.78
standard deviation	51.98	5.80	5.61	2.12	5.49	21.68
As degree of freedom	93.00		87.00		49.00	
t-value	0.68		4.13		-2.38	
p-value	0.50		0.00		0.02	
mean	0.08	0.33	0.03	1.23	0.04	0.06
standard deviation	0.09	0.20	0.00	0.06	0.01	0.06
Cd degree of freedom	93.00		87.00		49.00	
t-value	-1.78		-37.47		-0.35	
p-value	0.08		0.00		0.73	
mean	20.14	9.81	16.14	15.11	16.08	10.69
standard deviation	313.08	11.52	14.92	21.34	28.82	12.36
Pb degree of freedom	93.00		87.00		49.00	
t-value	1.30		0.97		4.29	
p-value	0.20		0.34		0.00	
mean	12.25	42.04	16.69	26.93	19.84	60.79
standard deviation	126.33	881.90	61.44	26.06	75.31	862.46
Cu degree of freedom	93.00		87.00		49.00	
t-value	-5.14		-5.26		-6.57	
p-value	0.00		0.00		0.00	
mean	59.36	42.84	69.35	69.70	78.59	139.31
standard deviation	555.46	110.33	721.86	405.26	777.44	7738.75
Zn degree of freedom	93.00		87.00		49.00	
t-value	1.55		-0.05		-3.24	
p-value	0.12		0.96		0.00	

다. 마지막으로 논 지목에서는 평균 농도값은 As, Cd, Cu, Zn 항목에서 광천천 유역보다 충청남도에서 높은 농도를 나타냈으며, 최대 농도값은 임야 지목과 같이 As, Cd, Pb, Zn 항목에서 광천천 유역보다 충청남도에서 높게 나타났다(Fig. 8).

대상유역과 전국 토양 측정망 자료의 해당 지역 중금속 농도 비교를 종합적으로 살펴보면 대상 유역인 청미천 유역과 광천천 유역의 중금속 항목중 Cd, Cu, Zn 세 가지 항목에서 대부분 지목(논, 밭, 임야)에서 해당 지역인 경기도와 충청도 농도보다 대부분 높은 농도분포를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그 외 항목에서 비교토양인 토양측정망 자료가 대상 유역보다 높은 농도를 나타내는 이유는 먼저 관측수가 서로 다르며, 최대값과 최소값 차이 또한 크게 나타나는 이유로 볼 수 있다.

두 집단간의 평균값을 비교하기 위하여 통계분석 기법인 t-test를 시행하였으며, 대상 유역과 토양측정망 자료 간 평균 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하였다. 먼저 경기도와 청미천 유역과의 분석 결과 밭 지목에서는 Cd와 Cu항목에서 (p-value<0.05)로 유의미한 차이가 있었으며, 배경토양에서는

Pb을 제외한 모든 중금속 항목에서 그리고 논 지목에서는 Pb와 Cu항목에서 유의미한 차이를 보였다(Table 3). 다음으로 충청남도과 광천천 유역과의 분석 결과 밭 지목에서는 Cu항목에서 (p-value<0.05)로 유의미한 차이가 있었으며, 배경토양에서는 Pb과 Zn 항목을 제외한 모든 중금속 항목에서 유의미한 차이를 나타냈다. 그리고 논 지목에서는 Cd 항목을 제외한 모든 중금속 항목에서 유의미한 차이를 보였다(Table 4). 이는 앞서 분석한 내용에서 알 수 있듯이 경기도와 충청남도 지역 내에서도 안성시 청미천 유역과 홍성군 광천천 유역은 가축분뇨 발생량이 많은 유역이며, 그로 인한 토양 중금속 오염이 더 클 것으로 판단된다.

모든 지목에서 유의미한 차이를 나타내는 Cu 항목의 평균과 분산 값을 보면 충청남도과 광천천 유역의 경우 모든 지목에서 광천천 유역이 높게 나타났음을 확인할 수 있었다. 이는 가축사육 밀집 따른 Cu 오염의 영향으로 사료된다. 하지만 경기도와 청미천의 Cu 분석 결과 모든 지목에서 경기도의 평균과 분산 값이 컸고 밭과 임야 지목에서는 평균과 분산 값

모두 큰 차이를 보였지만, 논 지목에서 차이가 크지 않았다. 이 결과에서는 밭과 입야 보다 논에서 Cu 중금속 오염 영향이 컸음을 확인할 수 있었고 이는 가축사육밀집에 따른 영향으로 보여진다.

가축밀집사육 해소하기 위해 지역별로 일정한 수준의 축사 농가 유지 및 중금속 오염원 잠재적인 원인인 가축 분뇨 및 가축 분뇨의 퇴·액비, 그리고 사료³²⁾ 등의 적극적인 관리가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

토지의 고밀도 이용으로 인한 도시화, 산업화는 오염물질을 대량으로 발생시켰으며, 자연환경을 오염시키고 더 나아가 인간의 건강까지 위협하고 있는 상황이다. 토양환경오염은 다른 오염과 다르게 바로 오염이 나타나는 것이 아니라 오랜 기간에 걸쳐 점진적으로 오염된다는 특성이 있다. 토양오염을 시키는 많은 오염 요인 중 가축분뇨 및 퇴비·액비의 영향이 중금속 오염에 많은 부분을 차지하고 있다.

본 연구에서는 토양 중금속 오염과 가축사육두수 밀집과의 관계를 분석하였으며, 이를 위하여 가축사육밀도가 높은 지역(안성, 홍성)을 선정하고 토양중금속 농도를 분석하였다. 분석 결과 가축사육두수가 밀집된 안성시의 청미천 유역, 홍성군의 광천천 유역에서 비교적 높은 중금속 농도값이 나타났다. 토양환경보전법에 명시된 토양오염우려기준을 적용했을 때 안성시 청미천 유역에서는 모든 지점에서 모든 항목들이 기준치 이하의 농도로 검출되었지만, 홍성군 광천천 유역에서는 Cu와 Zn 2가지 항목에서 그 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과 가축사육밀도가 높은 지역이 다른 지역에 비해 토양 중금속 오염에 기인하고 있음을 알 수 있으며, 이는 가축사육두수를 관리하면 토양오염을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 환경을 고려하는 지속가능한 축산업 육성과 적극적인 가축분뇨 관리가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 예산(공공수역 녹조발생 대응: NIER-2018-03-03-003)으로 수행되었습니다. 논문 준비를 위해 시료 채취와 시료분석을 도와주신 임도영 박사, 김선정 연구원 모두에게 감사를 드립니다.

Reference

1. J. S. Jung, J. S. Cho, S. W. Yeon, J. P. Kim, I. J. Yeon, E. J. Hwang, Present status and analysis of livestock husbandry using gis(geographic information system) and forecasting methods, *Journal of Korea Society Of Waste Management* 2016, 133-133(2016).
2. Ministry of Agriculture and Forestry, Academic Papers on Highly Pathogenic Avian Influenza Epidemiological Investigation Report(2003~2004).
3. Ministry of Environment (ME), <http://sgis.nier.go.kr> (2010~2018).
4. Ministry of Environment (ME), Livestock manure treatment statistics(2008~2021).
5. Statistics Korea, Livestock trend survey(2000~2021).
6. Ministry of Environment (ME), Soil measurement network detailsd operation plan(2020).
7. K. H. Ahn, H. D. Ryu, Y. S. Kim, Systematic review on management of livestock wastes for improving water quality, *Journal of Korean Society on Water Environment* 2015, 31(5), 576-582(2015).
8. L. D. King, J. C. Burns, P. W. Westerman, Long-term swine lagoon effluent applications on 'Coastal' bermudagrass: I. Effect on nutrient accumulation in soil. *J Environ Qual* 1990, 756-760(1990).
9. P. Tiwari, A. Mishra, Impacts of excessive use of fertilizers on soil, water and plant health: A review, *International Journal of Chemical Studies*, 7(6), 345-348(2019).
10. A. Mantovani, K. Marangon, G. Gallina, Heavy metals can be accumulated by livestock and poultry, *Ital J Food Sci*, 18(2), 207-214(2006).
11. M. F. H. Carneiro, T. B. Mesquita, C. R. Santos, Heavy metals in livestock and their potential risks to human health, *Journal of Food Science and Engineering*, 11(2), 1-9(2021).
12. G. S. Toor, B. E. Haggard, A. M. Donoghue, Water extractable trace elements in poultry litters and granulated products, *Journal of Applied Poultry Research*, 16(3), 351-360(2007).
13. P. B. Tchounwou, C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, D. J. Sutton, Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133-164(2012).
14. E. H. Brock, Q. M. Kettering, M. McBride, Copper and zincaccumulation in poultry and dairy manure-amendedfields. *Soil Science* 2006, 171(5), 388-399(2006).
15. J. T. Sims, D. C. Wolf, Poultry manure management: Agricultural and environmental issues, *Adv Agron*, 52, 1-83(1994).
16. H. Wang, Y. Dong, Y. Yang, G. S. Toor, X. Zhang, Changes inheavy metal contents in animal feeds and manures in anintensive animal production region of china, *Journal of Environmental Sciences* 2013, 25(12), 2435-2442(2013).
17. G. L. Mullins, Heavy metals in pig manure, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(6), 1218-1220(1982).
18. S. H. Lee, G. H. Jeong, D. J. Lee, D. H. Lee, J. H. Kwag, Properties of fertilizer ingredient, heavy metal and fiber content of composting process for swine manure with varying aeration, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 36(6), 524-533(2019).
19. D. H. Jeong, J. S. Shin, C. G. Lee, S. J. Yu, Y. S. Kim, A study on the improvement measures of livestock manure management and organic fertilizer use in Nonsan area. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(4), 345-359(2013).
20. National Institute of Environmental Research (NIER), Korean Reach File V3(2017).

21. H. D. Ryu, B. K. Park, E. G. Chung, K. H. Ahn, W. S. Choi, Y. S. Kim, D. H. Rhew, Determination of prior areas for livestock excreta pollutant survey, *J. Environ. Sci. Int.*, 24(8), 1085-1099 (2015).
22. C. S. Kim, H. D. Ryu, E. G. Chung, Y. S. Kim, J. K. Lee, A review of analytical procedures for the simultaneous determination of medically important veterinary antibiotics in environmental water: Sample preparation, liquid chromatography, and mass spectrometry, *J. Environ. Manage.*, 217, 629-645(2018).
23. D. W. Kim, H. D. Ryu, D. Y. Lim, E. G. Chung, Y. S. Kim, Development of a nutrient budget model for livestock excreta survey, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(6), 767-779(2017).
24. National Institute of Environmental Research (NIER), <http://wems.nier.go.kr>(2018).
25. Ministry of Environment (ME), Soil measurement network installation and operation plan(2000).
26. National Institute of Environmental Research (NIER), The study on the status of resource recovery system of livestock manure, NIER-RP2014-320, Ministry of Environment(2014).
27. National Institute of Environmental Research (NIER), Example field-study of rural non-point source pollution caused by livestock excretions, NIER-RP2015-367, Ministry of Environment(2015).
28. J. K. Yoon, D. H. Kim, T. S. Kim, J. G. Park, I. R. Chung, J. H. Kim, H. Kim, Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea, *Korean Society for Groundwater and Soil Environment*, 14(3), 32-39(2009).
29. J. P. Wang, M. X. Li, Y. Bai, J. K. Luo, H. L. Gao, J. X. Liu, X. F. Huang, Comparison of heavy metal concentrations in edible tissues of chickens and ducks from different farming systems in the Pearl River Delta, China. *Environmental monitoring and assessment*, 185(4), 3121-3132(2013).
30. T. U. Ahn, S. J. Kang, D. M. Kim, D. H. Son, H. S. Lee, J. K. Oh, H. D. Ryu, E. G. Chung, G. H. Kim, (2020). Nutrient composition and heavy metal contents of matured livestock organic fertilizer, National Institute of Environmental Research, no. 0, 1-1(2020).
31. W. I. Kim, M. S. Kim, K. A. Roh, J. S. Lee, S. G. Yun, B. J. Park, G. B. Jung, C. S. Kang, K. R. Cho, M. S. Ahn, S. C. Choi, H. J. Kim, Y. S. Kim, Y. K. Nam, M. T. Choi, Y. H. Moon, B. K. Ahn, H. K. Kim, H. W. Kim, Y. J. Seo, J. S. Kim, Y. J. Choi, Y. H. Lee, S. C. Lee, and J. J. Hwang, Long-term monitoring of heavy metal contents in paddy soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 41(3), 190-198(2008).
32. W. W. Park, I. H. Kim, T. U. Ahn, D. M. Kim, H. S. Lee, H. S. Shin, E. G. Chung, A study on the nutrient composition and heavy metal contents in livestock manure compost-Liquefied fertilizer. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(4), 306-314(2021).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Un-il Baek

Watershed and Total Load Management Research Division, Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Researcher, ORCID[®] 0009-0009-2309-8059: Data curation, Data analysis, Writing - original draft.

Deok-Woo Kim

Watershed and Total Load Management Research Division, Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Researcher, ORCID[®] 0000-0003-2828-9363: Visualization.

Eu Gene Chung

Watershed and Total Load Management Research Division, Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Senior Researcher, ORCID[®] 0000-0002-4053-4790: Conceptualization, Supervision, Validation, Writing - review and editing.

Eun-Hye Na

Watershed and Total Load Management Research Division, Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Director, ORCID[®] 0000-0002-8985-6133: Funding acquisition, Writing - review and editing.

Yongseok Kim

Watershed and Total Load Management Research Division, Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Department Head, ORCID[®] 0000-0002-9029-1344: Funding acquisition, Writing - review and editing.