



pp. 311-324  
pp. 325-334  
pp. 335-345  
pp. 347-361  
pp. 363-373  
pp. 375-382  
pp. 383-394  
pp. 395-408  
pp. 409-423  
pp. 425-435  
pp. 437-446  
pp. 447-456

# 매몰 사육에 의한 침출수내 오염물질 제거 방법

## Method for contaminant removal from leachate induced by buried livestock carcasses

전해성<sup>1</sup> · 박준규<sup>2</sup> · 김건하<sup>3\*</sup>  
Haeseong Jeon<sup>1</sup> · Joonkyu Park<sup>2</sup> · Geonha Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)다산컨설턴트 환경복원사업단

<sup>2</sup>(주)다산컨설턴트 기술연구소

<sup>3</sup>한남대학교 건설시스템공학과

<sup>1</sup>Department of Environmental Remediation, DASAN CONSULTANTS CO., LTD.

<sup>2</sup>Department of Research & Development, DASAN CONSULTANTS CO., LTD.

<sup>3</sup>Department of Architectural & Civil Engineering, Hannam University

### ABSTRACT

This study presents a novel method for addressing the issue of high-concentration contaminants (ammonium, phosphate, antibiotics) in leachate arising from decomposing livestock carcasses. Antibiotics, developed to eliminate microorganisms, often have low biodegradability and can persist in the ecosystem. This research proposes design elements to prevent contamination spread from carcass burial sites. The adsorbents used were low-grade charcoal (an industrial by-product), Alum-based Adsorbent (ABA), and Zeolite, a natural substance. These effectively removed the main leachate contaminants: low-grade charcoal for antibiotics (initial concentration 1.05 mg/L, removal rate 73.4%), ABA for phosphate (initial concentration 2.53 mg/L, removal rate 99.9%), and zeolite for ammonium (initial concentration 38.92 mg/L, removal rate 100.0%). The optimal mix ratio for purifying leachate is 1:1:10 of low-grade charcoal, ABA, and zeolite. The average adsorbent usage per burial site was 1,800 kg, costing KRW 2,000,000 per ton. The cost for the minimum leachate volume (about 12.4 m<sup>3</sup>) per site is KRW 2,880,000, and for the maximum volume (about 19.7 m<sup>3</sup>) is KRW 4,620,000. These findings contribute to resolving issues related to livestock carcass burial sites and suggest post-management strategies by advocating for the effective use of adsorbents in leachate purification.

Received 16 November 2023, revised 11 December 2023, accepted 11 December 2023.

\*Corresponding author: Geonha Kim (E-mail: [kimgh@hnu.kr](mailto:kimgh@hnu.kr); Fax: 82-42-629-8366, Tel. 82-42-629-7534)

#### 1 전해성 (차장) / Haeseong Jeon (Deputy General Manager)

서울특별시 송파구 송이로30길 15 다산빌딩, 05800  
15, Songji-ro 30-gil, Songpa-gu, Seoul 05800, Republic of Korea

#### 2 박준규 (부사장) / Joonkyu Park (Vice President)

서울특별시 송파구 송이로30길 15 다산빌딩, 05800  
15, Songji-ro 30-gil, Songpa-gu, Seoul 05800, Republic of Korea

#### 3 김건하 (교수) / Geonha Kim (Professor)

대전광역시 대덕구 한남로 70, 34430  
70, Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Key words:** Buried livestock carcasses, Leachate, Antibiotics, Adsorption, Purification

**주제어:** 매몰된 사육, 침출수, 항생제, 흡착, 정화

## 1. 서론

한국의 축산업은 지속적으로 발전하고 있으나, 이 과정에서 품종의 획일화와 대규모 밀집 사육시스템으로 인한 유전적 문제와 면역력이 약화된 가축이 늘어나고 있다. 이러한 상황은 아프리카돼지열병(African swine fever, ASF), 조류인플루엔자(Avian influenza, AI), 구제역(Foot and mouth disease, FMD)과 같은 주요 가축전염병의 지속적인 발생으로 이어지고 있으며, 이에 따른 대량 살처분이 필요하게 되었다 (Park, 2021).

대량 살처분된 사육은 가축전염병 예방법 제24조(매몰한 토지의 발굴 금지 및 관리)에 의거하여 사육을 매몰한 토지는 3년 이내에는 발굴하지 못한다. 이를 근거로 2019년부터의 아프리카돼지열병의 사례를 조사한 결과 2023년 8월 기준 총 37건, 약 1.3만마리가 살처분되어 약 13,017톤의 사육이 발생하였다. 조류인플루엔자의 경우 총 229건, 약 1,876만수가 살처분되어 약 46,921톤의 사육이 발생하였다. 구제역의 경우 총 16건, 1,799마리가 살처분되어 약 900톤의 사육 발생하였다. 이와 같이 발생한 관리대상의 사육량은 약 60,838톤으로 추정된다 (Korea Animal Health Integrated System, 2023).

한국에서는 가축의 질병 치료 및 예방을 위해 항생제가 오·남용되고 있다 (Animal and Plant Quarantine Agency, 2021). 이로 인해 매몰된 가축이 부패할 때 발생하는 침출수가 토양과 지하수를 오염시킬 가능성이 높다고 판단된다 (Cho and Kim, 2012). 매몰된 가축사체에 포함된 항생제는 매몰지와 인근 토양에 축적될 수 있으며, 이러한 항생제가 농경지에 남아 농작물에 의해 흡수되어 인간 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (Ok et al., 2014). 따라서 이에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 또한, 매몰지에서 유출되는 침출수에는 주요 오염물질인 암모늄( $\text{NH}_4^+$ )과 인산염( $\text{PO}_4^{3-}$ )이 존재한다 (Park, 2013).

본 연구는 이러한 상황에서 발생하는 사육의 관리 필요성을 인식하고, 관련 문제를 해결하기 위한 방안을 모색하였다. 사육 매몰지의 피해사례, 주요 오염물

질 조사로 사후관리의 타당성을 확보하고, 오염된 지하수를 정화하기 위하여 제시된 흡착제로 충전된 지중반응조로 오염물질이 지하수 흐름에 의해 지중반응조로 이동되어 흡착제를 통과하면서 정화되는 실규모 유사실험(Korea Forest Service, 2023)을 통해 산업부산물인 저급목탄과 ABA, 천연물질인 제올라이트를 적정 혼합된 흡착제의 실규모 적용 가능성을 평가하였다. 또한 연구결과를 통해 적정 투입량, 투입비용을 사육 매몰지의 사후관리 방안 수립의 기초자료로 사용하고자 하였다.

## 2. 연구방법 혹은 재료 및 실험방법

### 2.1 흡착제

흡착실험 구체적인 절차와 내용은 다음과 같다. 사용된 흡착제는 산업부산물인 목재제품의 규격과 품질 기준에 따라 목탄 중 기준을 만족시키지 못한 등급의 저급목탄, 정수슬러지내 유기물과 수분을 제거하여 재활용하는 ABA와 천연물질인 제올라이트를 사용하였다. 흡착실험은 상대적으로 투여가 쉽고 저가여서 전세계적으로 광범위하게 가축에 사용되고 있는 설파메타진(Sulfamethazine, SMZ)의 항생제와 인산염, 암모늄을 포함하는 매몰지 침출수가 지하수로 유입되는 경우를 가정하였다 (Animal and Plant Quarantine Agency, 2012). 흡착동역학 실험은 저급목탄, ABA, 제올라이트를 각각 0.005 g, 0.005 g, 0.05 g(1:1:10)의 비율로 투입하였다. 오염물질 초기 농도는 SMZ 5 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}$  10 mg/L,  $\text{NH}_4^+$  150 mg/L로 고액비 3 g/L으로 수행하였다. 추가적으로 유기물질을 고려하여 HA(Humic Acid) 560 mg/L가 존재하는 상황에서의 평가도 동시에 수행하였다. 이에 따른 결과로는 HA가 없을 때에는 SMZ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ 은 흡착평형에 도달하기 위해서는 120, 480, 240 min이 각각 필요하였으며, HA가 있는 상황에선 240, 480, 240 min이 필요하였다. 또한, 상관계수( $r^2$ )를 분석한 결과 HA의 유무에도 모두 pseudo-second order 모델을 잘 따르고 있다.



Table 1. Kinetic parameters of mixed adsorbent (Korea Forest Service, 2023)

Contaminants		Pseudo-first order			Pseudo-second order		
		$q_e$ (mg/g)	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$r^2$	$q_e$ (mg/g)	$k_2$ ( $\text{g/mg} \cdot \text{min}$ )	$r^2$
Without HA	SMZ	20.14	0.350	0.99	20.92	0.013	0.99
	$\text{PO}_4^{3-}$	18.96	0.010	0.92	21.05	0.001	0.99
	$\text{NH}_4^+$	22.14	0.047	0.93	23.98	0.003	0.99
With HA	SMZ	8.13	0.177	0.99	8.38	0.044	0.99
	$\text{PO}_4^{3-}$	9.65	0.016	0.92	10.86	0.002	0.99
	$\text{NH}_4^+$	21.30	0.067	0.92	19.86	0.009	0.99

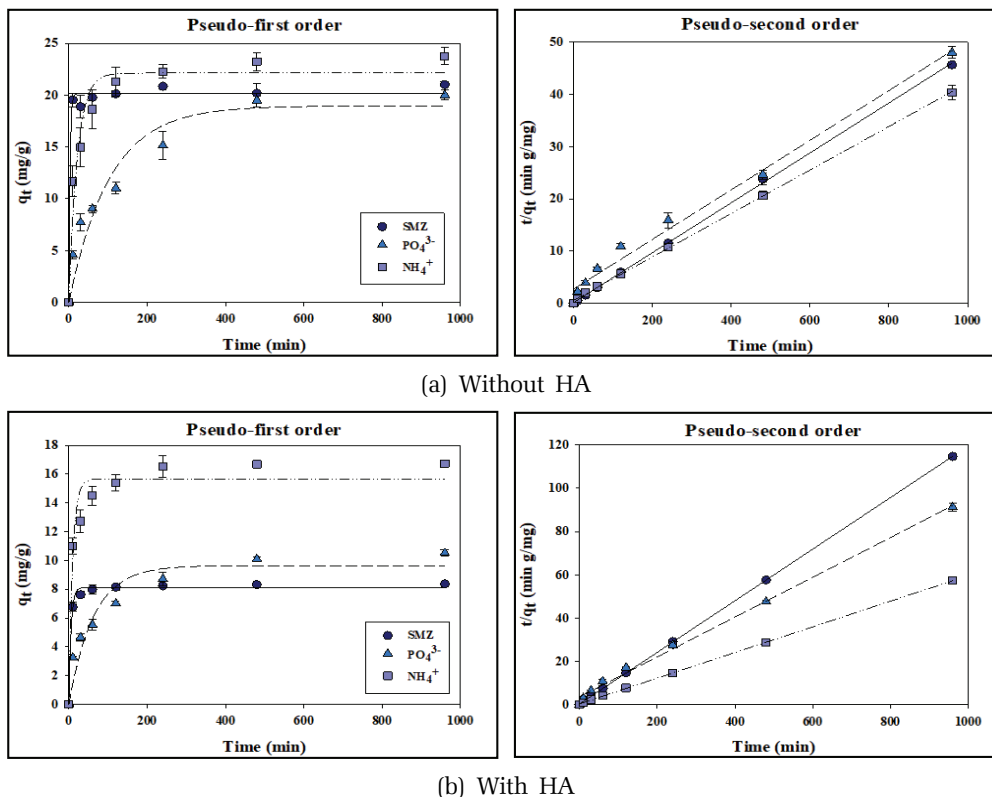


Fig. 1. Kinetic test of mixed adsorbent (Korea Forest Service, 2023).

등온흡착은 일정 온도에서 특정 물질의 흡착량과 농도 간의 관계를 나타내는 개념으로 Langmuir 모델은 단분자층에서의 결합력과 Freundlich 모델은 흡착열이 포면 덮임 정도에 따라 지수적으로 감소하는 것을 고려하였다 (Langmuir, 1918; Na, 2011).

등온흡착 실험에서는 SMZ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  가 각각 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0, 100.0, 200.0 mg/L, HA는 580 mg/L가 사용되었으며 고액비 및 이하 조건들은 흡착

동역학 실험과 동일하게 진행되었다. 등온흡착에서 저급목탄과 ABA의 흡착 능력이 HA의 존재에 의해 감소된 것을 확인하였으며 제올라이트의 흡착 능력은 HA의 존재에도 큰 변화가 없었다. Langmuir 모델의  $q_{\text{max}}$  값을 통해 560 mg/L의 HA가 존재할 경우 저급목탄의 최대흡착용량은 HA가 없을 경우 보다 약 7.35 mg/g 감소하였고, ABA의 최대흡착용량은 약 3.63 mg/g이 감소하였다. 저급 목탄과 ABA의 흡착 메커니

pp. 311-324  
pp. 325-334  
pp. 335-345  
pp. 347-361  
pp. 363-373  
pp. 375-382  
pp. 383-394  
pp. 395-408  
pp. 409-423  
pp. 425-435  
pp. 437-446  
pp. 447-456

Table 2. Isotherm parameters of mixed adsorbent (Korea Forest Service, 2023)

Contaminants		Langmuir			Freundlich		
		$q_{max}$ (mg/g)	$k_L$ (L/mg)	$r^2$	$K_F$	n	$r^2$
Without HA	SMZ	24.23	0.333	0.94	9.12	4.748	0.94
	$PO_4^{3-}$	24.50	0.033	0.98	2.59	2.427	0.95
	$NH_4^+$	21.75	0.098	0.98	4.25	2.901	0.93
With HA	SMZ	16.88	0.200	0.94	5.00	3.905	0.86
	$PO_4^{3-}$	20.87	0.024	0.99	1.71	2.222	0.99
	$NH_4^+$	21.50	0.024	0.98	1.46	1.818	0.92

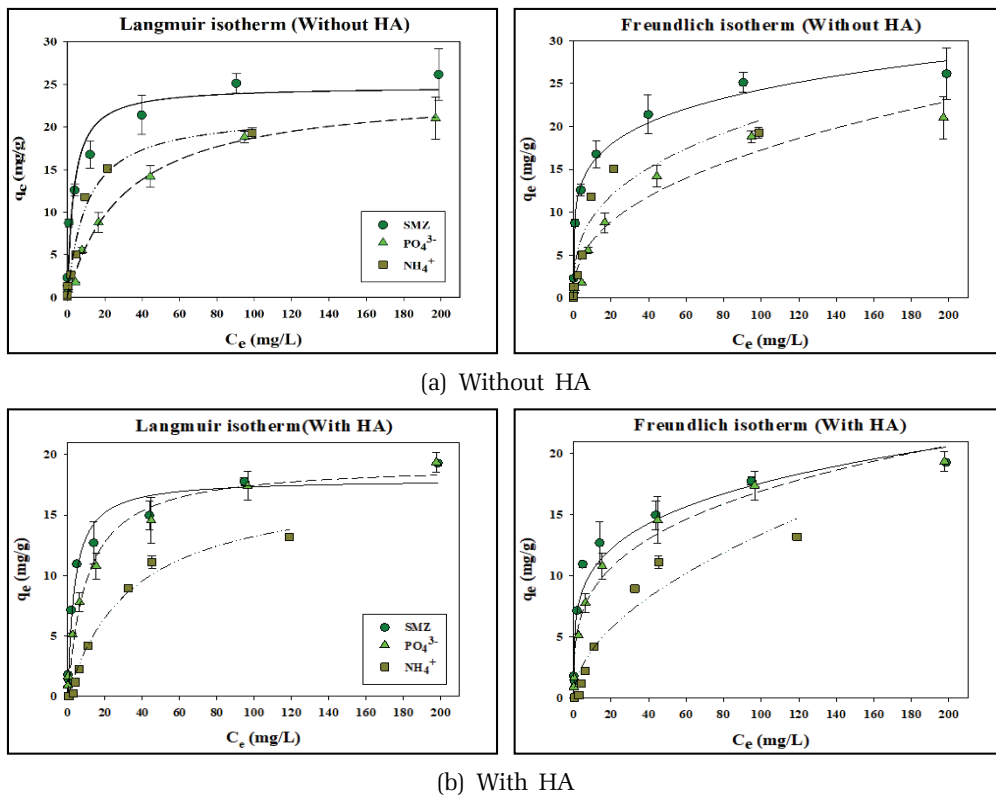


Fig. 2. Isotherm test of mixed adsorbent (Korea Forest Service, 2023).

좁은 흡착제의 표면 특성(표면적, 표면 작용기 등)에 의거하여 오염물질을 흡착하는데 HA의 존재는 흡착제 표면을 덮어 표면 작용들을 저해할 것으로 예상된다. 또한, 다른 흡착제들과 다르게 제올라이트는 표면 특성에 의한 제거가 아닌 물질에 포함되어 있는 결정형 구조에 의거하여 양이온 치환을 통해 제거되므로 HA의 존재에 대한 영향이 적었을 것으로 판단된다.

## 2.2 침출수 정화하는 흡착제 제작방법

### 2.2.1 평균 침출수량 산정

사육분해 및 침출수와 관련된 문헌조사에 따르면 축종별 시간의 경과함에 따라 발생하는 침출수 발생량은 아래 Table 3과 같다.

오리, 닭, 돼지 사육을 이용하여 조건별 모의실험을 통해 2개월이내 발생하는 침출수를 오리 1.5 L, 닭



Table 3. The amount of leachate by livestock species

Livestock	Average number of carcasses per burial (Unit: ea)	Amount of leachate per carcass (Unit: L)	Average leachate per burial site (Unit: L)	References
Duck	14,606	1.50	21,909	Korea Forest Service, 2023
Chicken	52,294	0.35	18,303	
Swine	2,649	5.20	13,775	
Cattle	50	220.00	11,000	National Institute of Animal Science, 2011

0.35 L, 돼지 5.2 L로 측정되었다. 2014~2016년 매몰지 조성현황을 조사한 결과, 매몰지 1개소 당 평균 매몰두수는 오리 14,606마리, 닭 52,294마리, 돼지 2,649마리, 소 50마리가 매몰된 것으로 조사되었다 (Korea Forest Service, 2023). 소 사육을 대상으로 연구용 장치를 제작하여 사육 분해율 및 침출수 발생량을 평가하였다. 연구결과 고온조건(35°C)에서 평균체중 424 kg인 소를 250일간 분해시킨 결과 소 사육의 무게는 평균 230 kg으로 약 52%의 무게감소율을 보였다. 침출수 발생량은 10일만에 167 L가 발생하였으며 최대 220 L가 발생한 것으로 보고되고 있다 (National Institute of Animal Science, 2011).

## 2.2.2 침출수 주요 오염물질 조사

가축매몰지로 인한 가장 대표적인 환경·생태 피해는 침출수 유출에 의한 지하수 오염인 것으로 알려져 있다. 일반적으로 가축의 70%는 수분으로 이루어져 있으며, 매몰된 사육은 혐기성 부패 과정을 거쳐 가스, 암모니아, 지방산, 용존고형물, 침출수를 발생시킨다. 사육이 분해되는 전 과정에 걸쳐 오염물질이 포함된 침출수가 발생되는데, 이를 조기 수거하여 적절하게 처리하지 못 하거나 외부로 유출 및 확산시키면 주변 토양과 지하수 및 하천을 오염시킬 수 있다 (Ryu, 2014).

### 가. 항생제

살처분으로 인해 항생제 안전성이 확보되지 않은 가축들이 매몰됨에 따라 사육으로부터 발생된 침출수에 항생제가 포함될 가능성이 높을 것으로 보고하였다 (Kim and Kim, 2012). 우리나라는 항생제를 가축의 사양과정과 질병예방을 목적으로 다량 사용되어 왔으므로 매몰된 사육이 부패될 때 발생된 침출수가 유출

시 토양과 지하수를 오염시킬 수 있는 가능성이 높을 것으로 판단된다 (Cho and Kim, 2012). 매몰된 가축의 부패 과정에서 발생하는 침출수는 항생제와 같은 다양한 오염물질들을 함유하고 있어 주변 토양 및 수계로 유입되는 경우 환경에 악영향이 있다. 연구결과를 통해 매몰된 가축사체에 함유된 항생제가 매몰지 및 인근 토양에 축적될 수 있고 개연성이 있는 것으로 판단되며 농경지에 잔류하는 항생제는 농작물에 의해 흡수되어 인간 건강에 악영향을 미치므로 이에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다 (Ok et al., 2014). 매몰지에서 발생하는 잠재적인 위험 중 하나는 동물 치료에 사용된 항생제이다 (Ministry of Environment, 2017). 2023년 농림축산식품부와 식품의약품안전처에서 발간한 보고서에 따르면, 2013년 765톤의 항생제 판매량은 2021년 1,036톤으로 약 35% 증가하였다. 축종별로는 전반적으로 소에 비해 돼지와 닭에서 항생제 내성률이 높게 나타났다 (Animal and Plant Quarantine Agency, 2021). 세계보건기구는 항생제 내성이 인류의 생존을 위협하는 10가지 위험 중 하나로 경고하고 조용한 팬데믹(Silent Pandemic)으로 여길 만큼 시급한 보건 문제로 여기고 있다. 가축 사육이나 어류 양식에 활용되는 항생제는 인체에 사용하는 것과 동일한 항생제도 사용되고 있으며, 전체 항생제 사용량의 70~80%가 식품생산에 활용되고 있다. 우리나라는 연간 약 4천여명이 항생제 내성과 관련하여 사망한다는 연구결과가 있다 (Ministry of Culture, Sports and Tourism, 2023). 유엔환경계획 ‘항생제 내성보고서’에 따르면 매년 약 500만명이 항생제 내성균으로 인하여 사망하고 있고, 30여년 후에는 교통사고나 암보다도 사망자 수가 더 많을 것으로 경고하고 있다 (Bracing for Superbugs, 2023). 항생제는 미생물을 제거하기 위한 목적으로 개발된 이유로 대부분의 항생제는 생분

Table 4. The status of main contaminants in leachate generated from livestock burial sites

Category	Unit	Poultry	Swine	Cattle	References
pH	-	6.5	6.7	6.9	Pratt, 2009
Ammonia nitrogen	mg/L	10,400	13,300	14,100	
Phosphate	mg/L	4,300			
*SMZ	μg/L	Burial site	17.72 ~ 44.94		Ok et al., 2014
		Farmland	6.48 ~ 8.85		

\*SMZ : Sulfamethazine

Table 5. Method of producing experimental leachate

Category	Humic acid	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SMZ
Maker	FUJIFLIM WAKO PURE	SAMJIN CHEMICAL	JUNSEI	SIGMA ALDRICH
Cas No. (Purity)	1415-93-6 (100.0%)	12125-02-09 (98.5%)	7778-77-0 (100.0%)	57-68-1 (99.0%)
Target Concentration	400 mg/L	120 mg/L	8 mg/L	4 mg/L
The amount of material input	2,800 g	931 g	72 g	10 g
The amount of water input	2,000 L	2,000 L	2,000 L	2,000 L

해성이 낮아 수중에 쉽게 잔류할 수 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020).

#### 나. 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

가축매몰지내 사육의 분해로부터 발생하는 침출수는 고농도의 암모니아성 질소, 질산성 질소 등의 유기물질을 포함하고 있으며 다양한 중금속을 내포하고 있다 (Yuan et al., 2013). 이와 같이 다양한 오염원이 포함된 침출수가 유출될 경우 지하수 오염뿐만 아니라 주변 생태계에 유해한 영향을 유발하는 등 잠재적 환경오염원으로 작용될 수 있다 (Lee, 2011). 가축매몰지에서 발생한 침출수의 pH는 평균 6.7로 조사된다. 이는 pH의 농도에 따른 상관관계를 고려시 침출수내 암모니아성 질소는 암모늄 형태로 존재한다 (Vohra et al., 2010).

#### 다. 인산염(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)

매물지로부터 유출되는 침출수의 주 오염원인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>가 있다 (Park, 2013). 인산염인은 지하수 수질 측정항목 및 기준에 포함되어 있지 않으나 그대로 지표수로 유출된다면, 지표수에 충분한 영향을 미

칠 수 있다 (Ministry of Environment, 2017).

#### 2.2.3 침출수 형태에 따른 흡착재 투입량 산정

앞서 조사된 침출수내 주요 오염물질을 제거하기 위한 연구 결과를 도출하였다. 연구에 사용한 흡착재는 앞서 소개된 열처리, 분쇄, 선별 가공하여 생산된 흡착재를 일정 비율로 혼합하여 연구를 진행하였다.

#### 2.2.4 실험용 침출수 제작

본 연구를 위해 실험용 침출수를 제작하여 연구를 수행하였다. 침출수내 주요오염물질과 방해요소인 TOC를 고려하여 humic acid을 포함한 실험용 침출수를 제작하였다. 본 연구에서 가축매몰지로부터 발생된 침출수가 포함한 물질과 그에 농도를 유사하게 제작하여 결과 도출해야지만 현장 실험환경의 안전과 물리적인 문제(가열, 교반 등)로 재현하기 어려워 실험용 침출수의 농도는 2,000 L 기준 Humic Acid를 2,800 g을 투입하여 400 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 931 g을 투입하여 120 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 72 g을 투입하여 8 mg/L, SMZ 10 g을 투입하여 4 mg/L로 각각 농도를 목표하여 제작하였다.



## 2.3 실험방법

### 2.3.1 지중정화 모의실험

투수성반응벽체는 반응물질로 채워진 지중벽체가 지하수면 구배 내에 배치하여 상류구배에 존재하는 오염지하수가 반응물질에 유입되어 오염물질이 제거되고 처리된 지하수가 하류구배로 유출된다 (US Environmental Protection Agency, 1998). 이를 모의한 유사실험을 통해 적용 가능성 판단을 위해 본 실험을 수행하였다. 앞서 설명된 2.2.4.과 같이 제작된 실험용 침출수는 10톤 혼합탱크 투입 후 펌프를 사용하여 실험용 침출수를 혼합하였다. 이때 pH 변화로 인해 형성된 Floc을 MF(Micro Filter)를 사용하여 제거하였다. 실험용 침출수의 투입량은 가축매몰지로부터 초기 침출수 발생량이 많은 것을 고려하여 1일 1.44 m<sup>3</sup>을 약 17일 동안 투입 후 50%를 저장하여 약 3일 동안 1일 0.72 m<sup>3</sup>으로 지하 1~2 m에 유공관이 삽입된 지중으로 투입하였다. 투입된 실험용 침출수는 흡착재 카트리지에서 흡착반응 후 일정 수위가 도달시 자동수위계의 신호로 자흡식 펌프를 가동시켜 임시 저장탱크로 집수된다. 이때 체적이 0.55 m<sup>3</sup>(1,800 mm(L) × 280 mm(W) × 1,100 mm(H))인 흡착재 카트리는 Bag Filter를 이용하여 제작된 흡착재를 충전하여 제작하였

다. 흡착재 카트리지를 총 4개로 투입하여 흡착재 충전 부피가 약 2.22 m<sup>3</sup>인 투수성반응벽체를 구성하였다. 임시 저장탱크에 양수된 처리수는 8시간 간격으로 1일 총 3회를 샘플링하였다. 임시 저장탱크에 처리수가 일정 수위에 도달시 양수펌프를 이용하여 적산유량계를 통과 후 20톤을 저장할 수 있는 저장탱크에 보관하였다. 이러한 연구방법을 계통도와 개략도로 도식화하면 Fig. 3과 같다.

## 2.4 시료채취 및 분석방법

### 2.4.1 실험용 침출수

본 연구 실험 현장에서 실험용 침출수 제작하여 1 L를 무균채수병에 샘플 후 아이스박스에 담아 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SMZ를 2회 분석하여 정도관리 하였다.

### 2.4.2 처리수

임시저장탱크에 보관되는 처리수를 8시간 간격으로 1일 총 3회에 걸쳐 자동채수장치(AS950 Refrigerated Sampler)가 1 L씩 총 3 L의 시료를 샘플하여 4°C의 상태로 보관하였다. 주 1회 실험장소에 방문하여 1일 3회 채취된 시료를 각각 분취하여 먹는물 수질검사기관을 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>을 분석의뢰하였다. 분취 후 남은 시료는

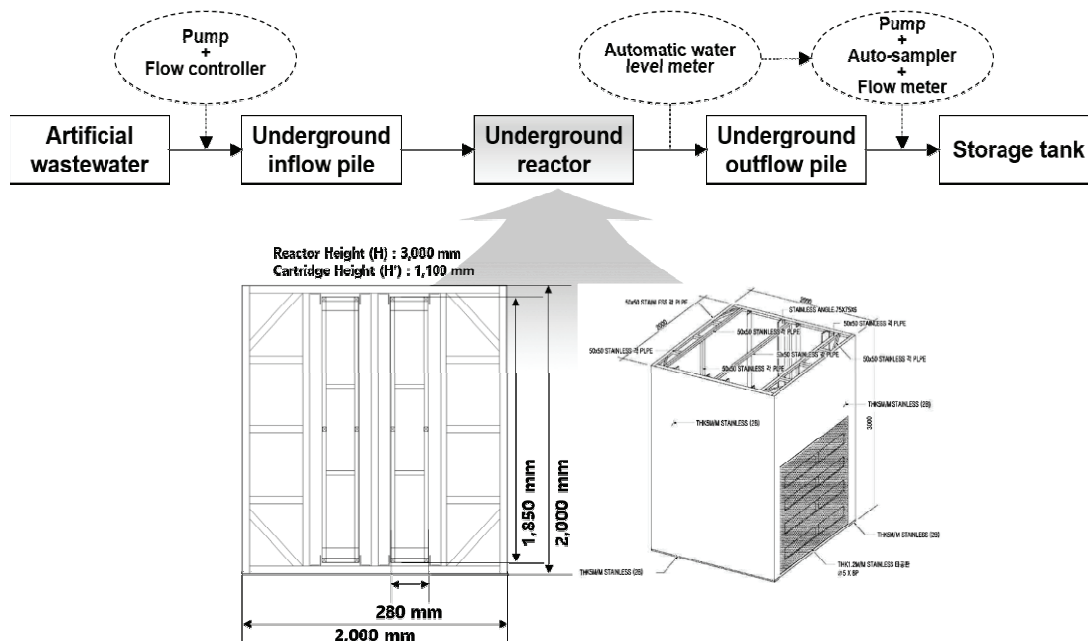


Fig. 3. Flow chart of underground purification test.

SMZ를 분석외뢰하였다.

### 2.5 흡착제 비용 분석

축종별 사육 두수에 따라 발생하는 침출수량과 오염농도로 인해 산출된 처리오염량을 제거하는데 투입되는 흡착제량을 산정하였다. 흡착제의 판매 비용은 노무비, 재료비, 경비(장비대, 전력비, 운반비, 포장, 시설감가 등), 기업 이윤을 포함한 금액의 결과 1톤당 약 2,000천원(부가세 미포함)으로 산출되었다(Korea Forest Service, 2023). 축종별 사육 두수에 따른 침출수와 흡착제 비용의 상관관계를 제시하였다.

### 2.6 실험환경조성

사육에 관련된 연구를 수행함에 따라 철저한 차단 방역과 실규모 실증시험이 가능한 국내 유일한 SAFE 연구단이 보유한 Test-bed에서 연구를 수행하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 흡착제 투입량 산정

#### 3.1.1 흡착제 최적혼합비율

본 실험내용의 출처는 Korea Forest Service (2023) 보고서의 내용을 인용하였다. 인용 결과로는 침출수내 주요 오염물질인 SMZ(초기농도 1.26 mg/L, 제거율 100.00%)는 저급목탄(C), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>(초기농도 53.79 mg/L, 제거율 100.00%)은 ABA(A), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(초기농도 947.80 mg/L, 최대 제거율 83.60%)은 제올라이트(Z)가 해당 오염물질을 제거하는 특성을 보였다. SMZ와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>을 제거하는 흡착재인 저급목탄, ABA 흡착제는 높은 제거효율이 보이며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>을 제거하는 제올라이트는 투입대비 제거율이 상승하는 추세이다. 흡착성능을 상승시키기 위해 혼합 흡착제 중 제올라이트를 높은 비율로 사용하는 것은 경제성이 떨어져 실제 적용시 불합리적이다.

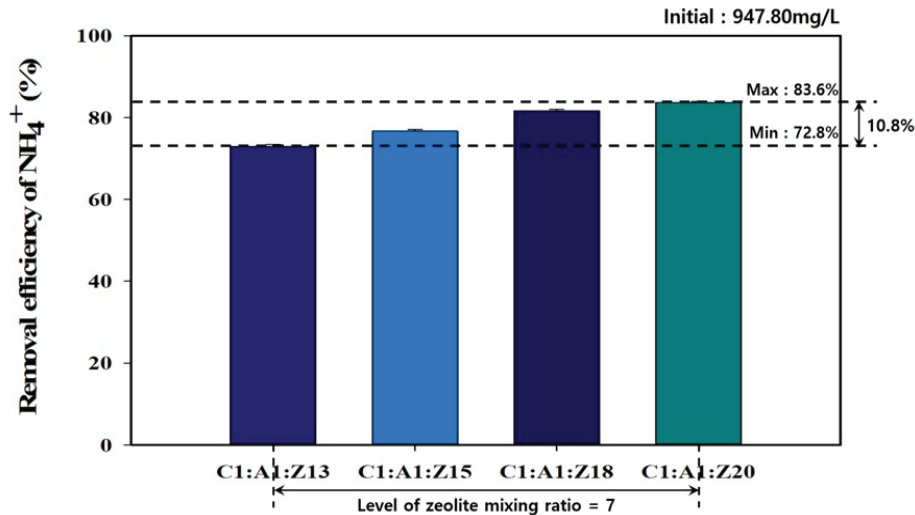


Fig. 4. Removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> according to mixing ratio (Korea Forest Service, 2023).

Table 6. Removal ratio of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> according to zeolite mixing ratio (Unit: %)

Ratio	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Theoretical (A)	41.8	46.0	50.2	54.3	58.5	62.7	66.9	71.1	75.2	79.4	83.6
Logical (B)	68.8	-	-	72.8	-	76.6	-	-	81.6	-	83.6

Ref. : Korea Forest Service, 2023

- : No data.

Logical removal ratio eq = 1.5618 × zeolite mixing ratio + 52.881





기존 데이터 분석을 통해 얻어진 수식을 적용시 투입비 10일 경우 제거효율은 68.5%로 산출된다. 이에 따라 비율 단순화로 현장 제작 난이도를 낮추고 흡착재 중 가장 고가의 ABA 적정 사용하여 접촉면 확보로 흡착재의 사용성, 경제성, 제거효율을 고려하여 1:1:10이 가장 적합하다고 판단된다.

### 3.1.2 흡착재 투입량 산정

흡착재가 오염물질의 제거하는 특성으로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 제거효율이 SMZ와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 제거효율 보다 다소 낮다. 이로 인하여 흡착재량을 산정시 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 제거하는 제올라이트의 투입량을 산정 후 최적비율에 따라 최종 흡착재를 제조하는데 사용하였다. 축종별 예상 침출수량과 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 Table 7과 같다.

제올라이트의 유효필요량을 산정하기 위해 설계한 인자는 매몰지 1개소에서 생성되는 총 침출수 용량은 약 90%가 초기 3개월에 발생하고 매몰지내 침출수가 지하수계로 유출시 희석되는 점을 고려하여 희석배수는 15배를 가정하였다. 이때, SOP 기준 재래식 매몰지

의 경우 1개소 당 규모가 500 m<sup>3</sup>(5 m × 5 m × 20 m)이며, 최하단에서 지하수위가 1 m 이상 이격된 것을 고려하여 Table 8과 같이 희석배수를 산정하였다. 또한, 제올라이트의 흡착량은 1 kg 당 12,000 mg의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>을 흡착가능하며 처리기준은 지하수 수질기준에 제시되지 않아 먹는 물 수질기준인 0.5 mg/L까지 처리하는 것으로 목표하였다.

축종별 매몰지에 따른 흡착재의 유효투입량을 Table 9와 같이 제시하였으며, 매몰지 1개소당 평균 투입량 제올라이트의 경우 1,504.16 kg, 저급목탄의 경우 150.42 kg, ABA의 경우 150.42 kg으로 산정되었으며 총 1,804.99 kg이다.

### 3.2 실험용 침출수

본 연구에서 사육으로부터 발생된 침출수가 포함된 물질과 그에 농도를 유사하게 제작하여 결과 도출해야지만 현장 실험환경의 안전과 물리적인 문제(가열, 교반 등)로 재현하기 어려워 실험용 침출수의 농도는 2,000 L 기준 Humic acid를 2,800 g을 투입하여 400 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 931 g을 투입하여 120 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 72 g을 투입하여 8 mg/L, SMZ 10 g을 투입하여 4 mg/L을 목표하였다. 각각 제작하여 10톤 저장탱크에서 실험용 침출수를 혼합 후 샘플하여 분석한 결과이다. 오염농도를 총 2회 분석한 결과의 평균값으로는 Humic acid 120.12 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 37.78 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 2.66 mg/L, SMZ 0.94 mg/L이다. 이론적인 농도와 비교시 최대 33.0%, 최소 6.0%의 차이가 있었다. 이는 현장에서 대량으로 제작시 용매 정량의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 이론적 농도보다 본 연구에서 사용되는 오염농도가 대부분 높아 흡착실험 결과 도출에 있어 보수적으로 판단할 수 있다.

Table 7. Leachate volume and ammonium concentration by livestock species

Category		Leachate volume	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ***
Unit		L	mg/L
Poultry	Chicken	18,303*	10,400
	Duck	21,909*	
Swine		13,775*	13,300
Cattle		14,250**	14,100

\*Korea Forest Service, 2023

\*\*National Institute of Animal Science, 2011

\*\*\*Pratt, 2009

Table 8. Calculation of dilution rate according to leachate outflow

Dilution rate according to groundwater level						Dilution rate of average
Livestock	Duck	Chicken	Swine	Cattle	Amount of leachate outflow per unit length (m <sup>3</sup> , 90%)	
	0.99	0.83	0.62	0.50		
Ground water level	2 m	11.15	13.12	17.13	21.20	15.65
	3 m	21.30	25.24	33.26	41.40	30.30
	4 m	31.46	37.36	49.39	61.61	44.95
	5 m	41.61	49.48	65.52	81.81	59.60

Table 9. The calculation of adsorbent capacity

Category	Unit	Duck	Chicken	Swine	Cattle	Average
		Total leachate per burial site	L (90%)	19,718	16,473	12,398
Ammonia nitrogen	mg/L	10,400	10,400	13,300	14,100	12,050
Amount of leachate produced per day	m <sup>3</sup> /day	0.2191	0.1830	0.1378	0.1425	0.1706
Diluted ammonia nitrogen	mg/L	693.33	693.33	886.67	940.00	803.33
Throughput per day	g/day	151.80	126.88	122.18	133.95	133.70
Total amount of contamination	g (90days)	13,661.98	11,419.20	10,996.44	12,055.50	12,033.28
Adsorption capacity	mg-NH <sub>4</sub> -N/kg-Z*	12,000 (Kim, 2016)				
Minimum amount of zeolite	kg	1,138.50	951.60	916.37	1,004.63	1,002.77
Effective amount of zeolite	kg (FoS**=1.5)	1,707.75	1,427.40	1,374.56	1,506.94	1,504.16
Charcoal	kg	170.77	142.74	137.46	150.69	150.42
ABA	kg	170.77	142.74	137.46	150.69	150.42
Tatal adsorbent	kg	2,049.30	1,712.88	1,649.47	1,808.33	1,804.99

\*Z : Zeolite \*\*FoS : Factor of safety

### 3.3 지중정화 모의실험

본 연구 흡착 실험을 위해 실험용 침출수를 1회 8 m<sup>3</sup>씩 총 4번을 제작하여 실험의 연속성을 유지하였다. 사육으로부터 초기 침출수 발생량을 고려하여 1일 1.44 m<sup>3</sup> 약 17일 동안 투입 후 50%를 저장하여 약 3 일 동안 1일 0.72 m<sup>3</sup>으로 20일 동안 총 26.6 m<sup>3</sup>의 실험용 침출수를 지하 1~2 m에 유공관이 삽입된 지중으로 투입하였다. 투입된 실험용 침출수는 흡착재가 담겨져 있는 카트리지에서 흡착반응 후 일정 수위가 도달시 자동수위계의 신호로 자흡식 펌프를 가동시켜 임시 저장탱크로 집수된다. 집수된 처리수는 8시간 간격으로 1일 총 3회를 샘플하였다. 채취된 샘플을 분석한 결과로는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 경우 실험용 침출수내 있는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 지중정화 반응조에 있는 Zeolite 흡착재로부터 모두 흡착 제거되어 처리수내 측정되지 않아 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 제거효율은 100.0%이다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 경우 ABA 흡착재로부터 대부분 흡착 제거되었지만 1일차 처리수내 0.049 mg/L가 측정되어 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 제거효율은 약 99.9%이다. SMZ의 경우 저급목탄 흡착재로부터 흡착 제거되며 초기농도인 1.05 mg/L에서 0.005~0.475 mg/L로 측정되어 SMZ의 제거효율은 약 73.4%이다. 초기에는 제거 성능이 월등하였으나 시간의 경과에 따른 제거 성능이 다소 저감되는 경향이 있었다. 이는 Humic Acid에 의한 흡착반응의 교란으로 인하여 제거효율이 다소 감소하는 것으로 판단된다.

### 3.4 흡착재 비용 분석 결과

축종별 사육 두수에 따라 발생하는 침출수량과 오염농도로 인해 산출된 처리오염량을 제거하는데 투입되는 흡착재량을 산정하였다. 흡착재의 판매 비용은 노무비, 재료비, 경비(장비비, 전력비, 운반비, 포장, 시설감가 등), 기업 이윤을 포함한 금액의 결과 1톤당 약 2,000천원(부가세 미포함)으로 산출되었다 (Korea Forest Service, 2023). 축종별 사육 두수에 따른 침출수와 흡착재 비용의 상관관계를 제시하였다. 사육에 따른 침출수 발생량과 오염농도를 고려하여 투입되는 흡착재 투입비용은 Table 11과 같다.

축종별 사육 따라 재래식 매몰지 1개소당 발생하는 침출수량은 돼지사육에 의해 12.4 m<sup>3</sup>(총 발생량의 90%)가 최소이고, 오리사육에 의해 19.7 m<sup>3</sup>(총 발생량의 90%)가 최대로 발생한다. 본 연구에 사용된 흡착재의 흡착성능, 투입량, 단가를 고려한 상관관계를 적용시 침출수 발생량의 최소일 경우 흡착재 투입비는 2,880천원, 최대일 경우 흡착재 투입비는 4,620천원이 소요된다.

또한, 대표적 수처리인 활성탄은 국세청에서 제공한 2022년 기준 1톤 당 2,713 달러(약 3,628천원, 환율 조회 일자 : 2023. 10. 12)로 수입되고 있다 (Jeon and Song, 2022). 본 연구에서 사용된 흡착재 보다 활성탄의 시중가격이 고가이며 동일한 성능을 위해 다른 흡착재를 추가로 적용하거나 개질이 필요하므로 경제성 검토는 생략하였다.



Table 10. Result of adsorption treatment of experimental leachate

No.	Discharge mass	Treated water concentration			Cumulative mass of adsorbed contaminants		
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SMZ	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SMZ
		Initial					
Unit	m <sup>3</sup>	38.92	2.53	1.05	g		
		mg/L					
1	1.4	-	0.049	0.005	54.4	3.8	1.3
2	2.9	-	-	0.095	108.8	7.6	2.6
3	4.3	-	-	0.166	163.2	11.4	3.7
4	5.8	-	-	0.132	217.6	15.3	4.8
5	7.2	-	-	0.131	272.0	19.1	6.0
6	8.6	-	-	0.138	326.4	22.9	7.2
7	10.1	-	-	0.211	380.8	26.7	8.2
8	11.5	-	-	0.284	435.2	30.6	9.2
9	13.0	-	-	0.258	489.6	34.4	10.1
10	14.4	-	-	0.312	544.0	38.2	11.0
11	15.8	-	-	0.344	598.4	42.1	11.9
12	17.3	-	-	0.343	652.8	45.9	12.8
13	18.7	-	-	0.230	707.2	49.7	13.8
14	20.2	-	-	0.224	761.6	53.6	14.8
15	21.6	-	-	0.243	816.0	57.4	15.8
16	23.0	-	-	0.382	870.5	61.2	16.6
17	24.5	-	-	0.454	924.9	65.0	17.3
18	25.2	-	-	0.412	952.1	67.0	17.7
19	25.9	-	-	0.473	979.3	68.9	18.0
20	26.6	-	-	0.475	1,006.5	70.8	18.4

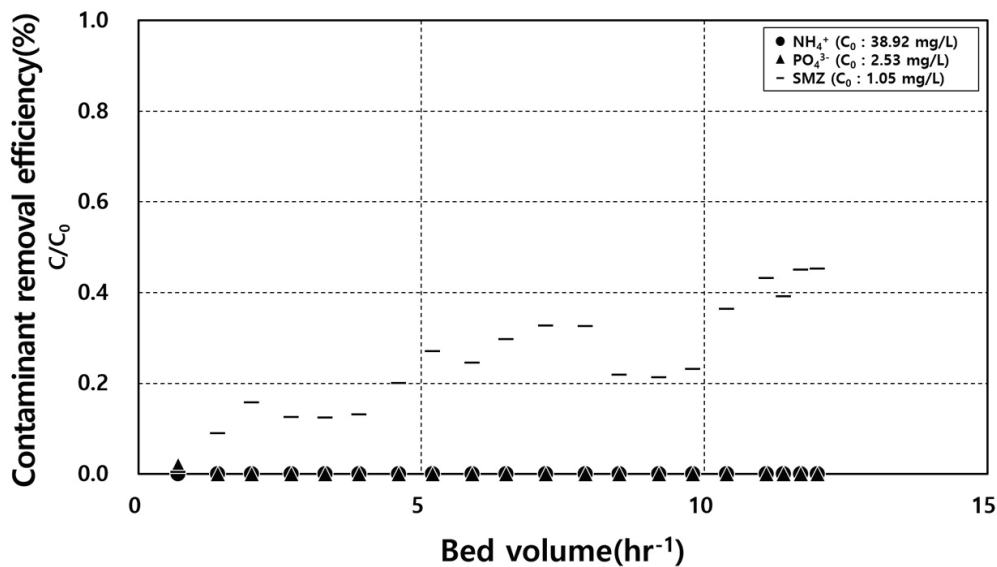


Fig. 5. Removal of contaminants by bed volume.

Table 11. Calculation of adsorbent input cost

Leachate volume (Unit: L)	Adsorbent Cost (Unit: Thousand KRW)	Livestock	Leachate volume (Unit: L)	Adsorbent Cost (Unit: Thousand KRW)	Livestock
1,750	364	Chicken	18,200	4,841	Swine
2,600	692	Swine	19,250	4,004	Chicken
3,500	728	Chicken	20,800	5,533	Swine
5,200	1,383	Swine	21,000	4,368	Chicken
5,250	1,092	Chicken	22,000	6,204	Cattle
7,000	1,456	Chicken	22,500	4,680	Duck
7,500	1,560	Duck	22,750	4,732	Chicken
7,800	2,075	Swine	23,400	6,224	Swine
8,750	1,820	Chicken	24,500	5,096	Chicken
10,400	2,766	Swine	26,000	6,916	Swine
10,500	2,184	Chicken	26,250	5,460	Chicken
11,000	3,102	Cattle	28,000	5,824	Chicken
12,250	2,548	Chicken	28,600	7,608	Swine
13,000	3,458	Swine	29,750	6,188	Chicken
14,000	2,912	Chicken	30,000	6,240	Duck
15,000	3,120	Duck	31,200	8,299	Swine
15,600	4,150	Swine	31,500	6,552	Chicken
15,750	3,276	Chicken	33,000	9,306	Cattle
17,500	3,640	Chicken	-	-	-

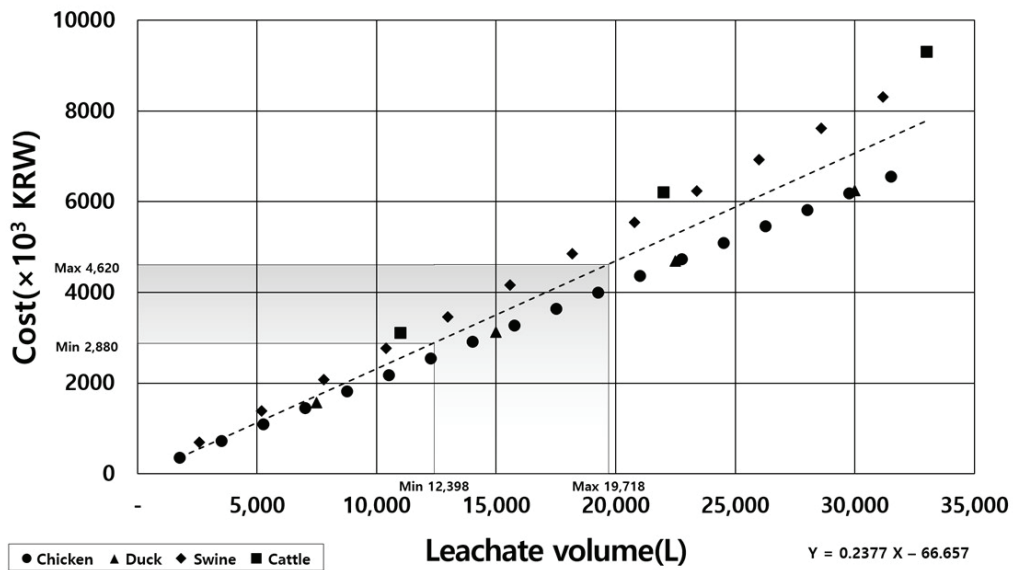


Fig. 6. Calculation of adsorbent input cost according to the amount of leachate volume.



## 4. 결 론

본 연구는 가축질병 확산억제 과정에서 발생하는 사육으로 인한 오염을 정화하기 위한 흡착재 개발 및 현장적용 설계자료 제시를 목적으로 한다. 본 연구 결과를 사육으로 인한 오염물질 관리에 적용함으로써 사육으로 인한 고농도 오염물질이 함유된 침출수를 적정하게 처리하여 토양과 지하수 오염방지 및 지하수를 통해 수계로 유입을 차단함으로써 상수원 수질 보전에 기여할 수 있다.

- 1) 토양·지하수내 사육 또는 침출수와 같은 오염원이 존재하는 경우, 매몰지 1개소당 축종별 침출수 발생량을 예측하고 침출수내 주요 오염물질을 산업 부산물인 저급목탄, ABA(Alum based adsorbent)와 천연물질인 제올라이트(Zeolite)를 사용하여 사육으로부터 발생하는 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있다.
- 2) 저급목탄, ABA, 제올라이트의 무게비 1:1:10으로 혼합한 흡착재를 침출수가 유출되거나 의심되는 가축매몰지 주변에 수직형 투수성반응벽체를 설치하여 오염물질을 제거할 수 있다.
- 3) 오염확산 억제 목적으로 현재 조성되고 있는 매몰지 1개소당 투입되는 저급목탄, ABA, 제올라이트 혼합 흡착재 적정가격으로 2023년도 기준 최소 2,880천원, 최대 4,620천원으로 산출되었으며 이를 사용하여 사육 매몰지의 관리기간 중 사후관리 예산을 책정할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술연구개발(2020211A00-2022-AC02)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Animal and Plant Quarantine Agency. (2021). National Antibiotic use and Resistance Monitoring, 5-7.
- Animal and Plant Quarantine Agency. (2012). <https://www.qia.go.kr/downloadwebQiaCom.do?id=22706> (October 11, 2023).
- Bracing for Superbugs. (2023). Strengthening environmental action in the One Health response to antimicrobial resistance, United Nations Environment Programme, 3-4.
- Cho, H.S. and Kim, G.H. (2012). Needs of Biosecurity and Protocols for the Environmental Management of Carcasses Burial, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28(2), 305-312.
- US Environmental Protection Agency. (1998). *Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation.*, 1.
- Jeon, K.W. and Song, M.G., *Maeil business news korea*. (2022). <https://www.mk.co.kr/news/economy/10375808> (October 11, 2023).
- Kim, C.G. (2016). Removal of ammonium and nitrate nitrogens from wastewater using zeolite, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, 59-60.
- Kim, H.S. and Kim, K.J. (2012). Microbial and chemical contamination of groundwater around livestock mortality burial sites in Korea - a review, *Geosci. J.*, 16(4), 479-489.
- Korea Animal Health Integrated System. (2023). <https://home.kahis.go.kr/home/lkntscinfo/selectLkntsOcrncList.do> (August 16, 2023).
- Korea Forest Service. (2023). Technical development of purification for leachate which occurs during disposal of the domestic disease infectious animals, 94-157.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum, *J. Am. Chem. Soc.*, 40, 1361-1403.
- Lee, K.K. (2011). Foot-and-mouth disease and that burial leachate and ground water contamination, *J. Korean GEO-Environ. Soc.*, 12, 6-17.
- Ministry of Culture, Sports and Tourism. (2023). <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156589065> (September 10, 2023).
- Ministry of Environment. (2017). Development of evaluation technology and safety assurance technology for the post management of burials, 488.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2020). Development of PRB-AOP linkage process technology to treat tetracycline antibiotics in final effluent of livestock wastewater treatment plant, 2.
- Munro, R. (2001). Decomposition of farm animal corpses in mass burial sites, *Veterinary laboratories agency report, United Kingdom*, 1-9.
- Na, C.K., Han, M.Y. and Park, H.J. (2011). Applicability of theoretical adsorption models for studies on adsorption properties of adsorbents(1), *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(8), 606-616.

- National Institute of Animal Science. (2011). Evaluation of carcass decomposition rate and leachate production from buried cattle mortalities, 3-4.
- Ok, Y.S., Kim, K.H. and Lee, S.S. (2014). Monitoring of Selected Veterinary Antibiotics in Animal Carcass Disposal Site and Adjacent Agricultural Soil, *J. Appl. Biol. Chem.*, 57(3), 189-196.
- Park, H.S., Han, S.G. and Lee, J. (2021). Study on Policy Improvement Measures to Respond to Infectious Diseases of Livestock through Field Investigation, *J. Disaster Inf.*, 17(2), 275-288.
- Park, J.A., Kim, J.H., Kang, J.K., Yoon S.Y., Son, J.W. and Kim, S.B. (2013). Removal Carcass Disposal Site Leachate using Pyrophilite/Slag/Zeolite, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 2013, 215.
- Pratt, D.L. (2009). Environmental impact of livestock mortalities burial, M.S. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Ryu, J.G. (2014). <https://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=20148> (October 11, 2023).
- Vohra, M.S., Selimuzzaman, S.M. and Al-Suwaiyan, M.S. (2010).  $\text{NH}_4^+$ - $\text{NH}_3$  removal from simulated wastewater using UV- $\text{TiO}_2$  photo catalysis Effect of co-pollutants and pH.
- Yuan, Q., Snow, Daniel. D. and Bartelt-Hunt, Shannon. L. (2013). Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses, *Sci. Total Environ.*, 456-457, 246-253.