

# 정화곤란부지 중금속 오염토양의 원위치 안정화를 위한 최적 안정화제 선정에 관한 제언

김하은\* · 이재희\*\* · 윤상규\* · 안진성\*,\*\*,\*\*\*

## Recommendation for selecting the optimal stabilizing agent for in situ stabilization of metal-contaminated soil at difficult-to-remediate sites

Kim, Haeun\* · Lee, Jaehui\*\* · Yoon, Sang-Gyu\* · An, Jinsung\*,\*\*,\*\*\*

**ABSTRACT** : 정화곤란부지 내 중금속(Pb) 오염토양의 원위치 안정화를 위한 최적 안정화제 선정의 일환으로, 문헌조사를 통해 선정한 3종의 후보 안정화제(mono ammonium phosphate (MAP), iron(III) phosphate (IP) 및 gypsum)에 대해 납에 대한 등온흡착실험을 실시했다. Langmuir 등온흡착식을 적용하여 산출된 각 안정화제의 납 최대흡착량은 MAP, IP 및 gypsum에서 각각 391, 42.4 및 32.2 mg/g으로 나타났다. Freundlich 상수(KF; 단위 =  $mg(1-1/n) \cdot L1/n/g$ ) 또한 MAP, IP 및 gypsum에서 각각 72.8, 24.5 및 14.3을 나타내, 최대흡착량 및 흡착 친화도 측면에서 MAP가 납의 안정화에 가장 적합함을 확인했다. 3종의 후보 안정화제가 적용된 납 오염토양에 대해 fluorescein diacetate (FDA) 가수분해효소 활성도 평가를 실시하여 안정화제의 적용이 토양의 생태학적 기능에 미치는 영향을 정량화했다. 안정화를 진행하지 않은 대조군 토양의 경우 FDA 가수분해효소의 활성을 지시하는 토양 중 fluorescein의 농도가 0.239 mg/g · h를 나타냈으며, MAP, IP 및 gypsum으로 안정화된 토양에서는 각각 0.026, 0.135 및 0.073 mg/g · h를 나타냈다. 안정화제를 첨가한 모든 토양에서 대조군에 비해 FDA 가수분해효소의 활성이 감소했으며, 이는 안정화제 첨가로 인한 토양 염류농도의 증가에 따른 염 스트레스의 영향으로 추정된다. 정화곤란부지 위해도 저감조치로서의 안정화 공법 고려 시, 안정화 처리 이후 대상 중금속이 안정한 형태로 유지되어 낮은 화학적 추출능을 나타내는지 여부도 중요하지만, 잔류 중금속 또는 주입한 안정화제 함유물질 및 중화제 등이 야기할 수 있는 토양 생태계에의 부정적 영향 또한 반드시 고려해야 함을 확인했다.

**키 워 드** : 원위치 안정화, 등온흡착실험, 토양 미생물 효소 활성, 생태학적 기능, 위해저감조치

**Key words** : In situ stabilization, Isothermal adsorption experiment, Soil microbial enzyme activity, Ecological function, Risk mitigation measures

## 1. 서 론

납(Pb)은 제련, 제조, 농업 활동 등 다양한 경로를 통해 토양으로 유입된다(Hettiarachchi et al., 2004; Ren et al., 2023; Luo et al., 2016). 납

으로 인한 토양오염은 생태계 및 식품 안전에 위협을 가하며(Li et al., 2020; Wang et al., 2019), 잠재적으로 인간 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로, 납 오염토양의 정화는 필연적으로 요구된다(Nabulo et al., 2010).

납을 포함하여 중금속 오염토양을 정화하기 위한 일반적인 공법에는 토양세척(soil washing), 토양세정(soil flushing), 동전기(electrokinetic process), 식물정화(phytoremediation), 안정화/고정화(stabilization/solidification) 등이 있다(Jeon et al.,

\* 한양대학교 ERICA 스마트시티공학과

\*\* 한양대학교 ERICA 건설환경시스템공학과

\*\*\* 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 조교수, 교신저자 (jsan86@hanyang.ac.kr)

2010; Li et al., 2011). 그 중 안정화는 적정 안정화제를 토양 내로 주입하여 중금속의 이동성(mobility) 및 생물학적이용성(bioavailability)을 줄임으로써 중금속의 위해성을 저감시킬 수 있는 효과적인 방법으로 알려진 바 있으며(Jeon et al., 2010; Xu et al., 2021; Huang et al., 2021), 건물 하부, 운행 중인 철도부지 등 굴착을 동반한 적극적인 정화(active remediation)가 곤란한 경우에도 활용할 수 있어 남을 포함한 다양한 중금속 오염 부지에서 위해도 저감을 위해 활용되고 있다(An et al., 2017; Park et al., 2024).

Liu et al. (2013)은 미국 내 남으로 오염된 소형 경찰 사격장 내 토양을 대상으로 실험실 규모로 안정화를 수행한 바 있다. 안정화제로 carboxymethyl cellulose를 사용하여 인회석 나노입자(apatite nanoparticles)를 제조하였으며, 인회석 나노입자를 토양과 혼합하는 방식을 이용하였다. Vrinceanu et al. (2019)는 루마니아에 위치한 Copşa Mică 지역의 중금속(Cd, Zn 및 Pb)을 대상으로 오염 토양 복원 가능성을 평가하기 위해 실험을 진행하였다. 이 지역은 비철 광석 가공 공장으로서 인해 토양에 중금속이 축적된 상태였으며, 4 m<sup>2</sup>의 현장 실증 부지를 구축하여 벤토나이트(bentonite), 천연 제올라이트(natural zeolite) 및 석회(lime)를 이용하여 표토와 혼합하여 안정화를 수행하였다. An et al. (2017)은 (구)장항제련소 주변 비소오염토양을 대상으로 위해도 저감을 목표로 안정화를 수행하였다. 해당 부지 주변은 산림욕장으로 생태계 교란을 최소화하기 위해 굴착을 수반하지 않은 안정화 공법을 이용하였으며, 화학적 추출능(chemical extractability) 평가를 통해 최적 안정화제를 선정하고 적용한 바 있다.

토양 내 중금속의 효과적인 안정화를 위해서는 안정화 처리 이후 대상 중금속이 화학적으로 안정한 형태를 유지해야 할 뿐만 아니라 잔류 중금속 및 주입한 안정화제 함유 물질 등에 의해 토양의 생태학적 기능에 부정적 영향을 미치지 않아야 하며, 설령 일부 생태학적 기능이 감소하더라도 토양의 생태학적 탄력성(ecological resilience)에 의해 회복가능해야한다(An et al., 2019; Park et al., 2024). 따라서, 오염물질의 종류 및 현장 부지의 특성에 따라 주입하는 안정화제의 안정화 효율 및 안정화제가 대상 토양환경에 미치는 영향을 고려

하여, 적절한 안정화제를 선정하는 것이 중요하다(Xu et al., 2021). 그러나 중금속으로 오염된 토양의 안정화 처리에 관한 기존 연구들에서는 대부분 화학적 추출능에 기반한 안정화 효율에만 초점을 맞추고 있으며, 안정화제가 대상 토양환경에 미치는 영향에 대한 고려는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 남으로 오염된 토양의 안정화를 위해 활용된 안정화제를 문헌조사를 통해 조사하여 후보 안정화제 3종을 선정했으며, 후보 안정화제를 이용하여 등온흡착실험을 실시함으로써 남흡착특성을 기반으로 안정화제의 화학적 안정화 효율을 평가하고자 했다. 또한 후보 안정화제가 적용된 남 오염토양에 대해 미생물 효소 활성 실험을 수행함으로써, 안정화제의 적용이 토양의 생태학적 기능에 미치는 영향을 정량화했다. 전술한 바와 같이 특정 오염토양에 대해 적합한 안정화제의 선정 및 적용을 위해서는 안정화 효율뿐만 아니라 안정화제의 주입이 대상 토양환경에 미치는 생태학적 영향에 대한 이해가 필수적이다. 또한, 생태학적 기능의 회복 가능성도 함께 검토되어야 한다. 이러한 측면에서 본 연구 결과가 정화곤란부지 내 중금속 오염토양의 위해도저감조치로서의 안정화 공법 적용 시 최적 안정화제 선정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 후보 안정화제 선정 및 남 오염토양 안정화

남으로 오염된 토양 내 추출 가능한 남의 분율을 저감시키기 위한 최적 안정화제의 선정을 위해 문헌연구를 수행했다. Kastury et al. (2019)는 호주의 남으로 오염된 토양을 mono ammonium phosphate (MAP)를 활용하여 안정화한 후 남의 생물학적접근성 평가를 위해 인체의 위장관 환경을 모사한 방법 중 solubility bioaccessibility research consortium (SBRC) 위 단계(gastric phase; SBRC-G) 및 장 단계(intestinal phase; SBRC-I) 추출 실험을 통해 안정화 효율을 평가한 바 있으며, 다양한 Pb:P 몰비를 사용해서 안정화를 한 결과 Pb:P 몰비 1:5에서 추출 농도의 큰 감소를 관찰한 바 있다. Liu et al. (2007)는 미국의 남으로 오염된

농장을 안정화하기 위하여 sodium carboxymethyl cellulose (CMC)로 합성된 iron phosphate (vivianite) nanoparticles를 사용하였으며, physiologically-based extraction test (PBET) 추출 실험을 통해 안정화 후 토양 내 납의 생물학적접근성이 31-93% 가량 저감됨을 확인하였다. Koralegedara (2016)는 제련소 부지 내 납 오염토양을 대상으로 flue gas desulfurization gypsum을 사용하여 안정화한 바 있으며, SBRC 추출 실험을 통해 유의미한 생물학적 접근성의 저감을 확인한 바 있다.

상기 문헌조사 결과를 바탕으로 phosphate 계열 안정화제인 mono ammonium phosphate (MAP;  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , 98%, Daejung), iron 계열 안정화제인 iron(III) phosphate (IP;  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Fe 29%, Sigma Aldrich), sulfate 계열 안정화제인 gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 99%, Duksan)을 후보 안정화제로 선정하였다. 건조된 납 함유 토양을 2 mm 체를 사용하여 체거름 하였다(왕수분해법으로 평가된 토양 내 납 농도 = 111.9 mg/kg-Pb). 토양 시료 50 g에 각 후보 안정화제 0.5 g 및 토양 수분보유능(Water holding capacity) 70%의 수분을 첨가한 후 혼합하고, 실온에서 48시간 동안 반응시켜 안정화가 진행 되도록 했다.

## 2.2 등온흡착실험

3종의 후보 안정화제(MAP, IP, gypsum)의 납 안정화 효율 평가를 위해 등온흡착실험을 수행했다. 등온흡착실험을 위한 납 ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , 99.5%, Kanto)의 초기 농도는 10, 20, 50, 100, 200 및 500 mg/L이며, pH는 0.1 M HCl을 활용하여 5.0 ( $\pm 0.1$ )로 조정했다. 이후 50 mL polypropylene tube에 각 안정화제 0.1 g과 40 mL의 농도별 납 용액을 혼합하여, 200 rpm에서 48 h 동안 교반하고 0.45  $\mu\text{m}$  syringe filter (H-PTFE, Whatman, UK)를 통해 여과했으며, 여과액 내 납의 농도는 inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES, Spectro arcos, Spectro, DEU)를 활용하여 220.353 nm의 파장에서 분석했다.

등온흡착실험 결과를 평가하기 위한 안정화제 단위 중량 당 납 최대흡착량( $q_m$  (mg/g)) 및 Freundlich 상수( $K_F$  ( $\text{mg}^{1-(1/n)} \cdot \text{L}^{1/n}/\text{g}$ ))는 Langmuir 및 Freundlich 등온흡착식(식 1-2)을 이용하여 산

출했다.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{bq_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (\text{식 1})$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $n$ 은 Freundlich 상수(dimensionless),  $q_e$ 는 안정화제 단위 중량 당 흡착된 납의 양 (mg/g),  $b$ 는 Langmuir 흡착 상수(L/mg),  $C_e$ 는 평형상태에서 용액 내 납의 농도(mg/L)를 나타낸다.

## 2.3 토양 미생물 효소 활성 실험

토양 효소 활성 실험은 MAP, IP, gypsum을 이용한 납 오염토양의 안정화 전/후에 대해서 fluorescein diacetate (FDA) 방법을 통해 수행됐다 (Green et al., 2006; Park et al., 2024). 토양 내 존재하는 미생물의 90% 이상이 FDA를 fluorescein 으로 가수분해할 수 있는 효소 활성을 나타내는 것으로 알려져 있으며(Adam et al., 2001), 따라서 FDA 방법은 토양 내 미생물의 활성을 정량화하기 위한 방법으로써, 토양의 생태학적 기능을 평가하기 위해 활용할 수 있다.

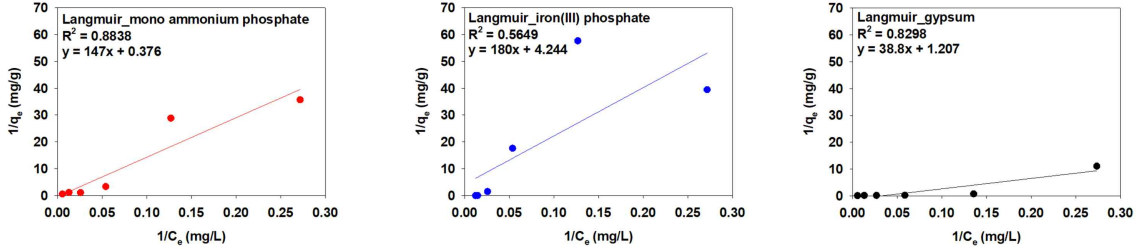
Fluorescein diacetate ( $\text{C}_{24}\text{H}_{16}\text{O}_7$ , Sigma Aldrich) 0.125 g을 acetone ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ , 99.8%, Daejung) 100 mL와 혼합하여 1000  $\mu\text{g}/\text{L}$ 의 FDA 용액을 제조하였으며, chloroform ( $\text{CHCl}_3$ , 99.5%, Daejung) 20 mL와 methyl alcohol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ , 99.8%, Daejung) 10 mL를 혼합하여 가수분해 종료 용액을 제조하였다. Potassium phosphate dibasic ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 99%, Daejung) 4.35 g과 potassium phosphate monobasic ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 99%, Daejung) 0.65 g을 증류수에 용해하여 pH 7.6인 60 mM 인산칼륨 완충액 500 mL을 제조한 후, fluorescein sodium salt (FSS; Sigma Aldrich) 0.113 g을 인산칼륨 완충액 100 mL와 혼합하여 1, 2, 3, 4 및 5 mg/L 농도의 표준 용액을 제조하였다. 표준용액은 UV/Vis 분광광도계 (DR3900, HACH, USA)를 이용하여 490 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다.

토양은 2 mm 체를 사용하여 체거름하고, 0.5 g의 납 오염 토양에 FDA 용액 0.05 mL와 인산칼륨 완충액 3.75 mL를 첨가하여 30 ° C에서 100 rpm

으로 1시간 배양하였다. 배양 후, 가수분해 종료 용액 3.75 mL를 첨가하여 토양 내 fluorescein을 추출하였다. 추출액은 0.45  $\mu\text{m}$  syringe filter를

통해 여과한 후, UV/Vis 분광광도계를 이용하여 490 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다.

(a) Langmuir isotherm fitting



(b) Freundlich isotherm fitting

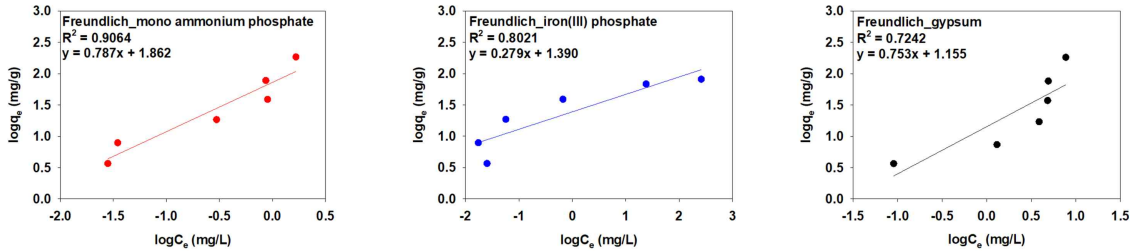


Fig. 2. 안정화제 별 납 등온흡착실험 결과. (a)는 선형 변환된 Langmuir 등온흡착식을 통해 도시된 결과이며, (b)는 선형 변환된 Freundlich 등온흡착식을 통해 도시된 결과를 나타냄. 빨간색(좌), 파란색(가운데), 검정색(우) 실선은 등온흡착실험에 사용한 안정화제의 종류를 의미하며, 각각 MAP, IP 및 gypsum을 나타냄

Table 1. 안정화제 별 납의 등온흡착실험 후 Langmuir 및 Freundlich 등온흡착식을 통해 산출된 매개변수와 결정계수(R<sup>2</sup>)

	Langmuir			Freundlich		
	q <sub>m</sub> (mg/g)	b (L/mg)	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub> (mg <sup>(1-1/n)</sup> ·L <sup>1/n</sup> /g)	n <sub>f</sub>	R <sup>2</sup>
MAP	391.270	0.3760	0.8838	72.7780	1.2715	0.9064
IP	42.410	4.2440	0.5649	24.5471	3.5881	0.8021
gypsum	32.150	1.2070	0.8298	14.2890	1.3273	0.7242

3. 결과 및 토의

3.1 안정화제 별 등온흡착실험 결과

Langmuir 등온흡착식을 통해 산출된 각 안정화제 별 최대흡착량(q<sub>m</sub>)은 MAP, IP, gypsum 각각 391.27 mg/g, 42.41 mg/g 및 32.15 mg/g을 나타냈으며(Fig. 1; Table 1), phosphate 계열의 안정화제인 MAP가 sulfate 계열의 안정화제인 gypsum 및 Fe 계열의 안정화제인 IP에 비해 납에 대한 최대흡

착량이 높은 것으로 나타났다. 또한, Freundlich 등온흡착식을 통해 산출된 각 안정화제 별 K<sub>F</sub>값은 MAP, IP, gypsum 각각 72.7780, 24.5471, 14.2890 mg<sup>(1-1/n)</sup>·L<sup>1/n</sup>/g을 나타냈다(Fig. 1; Table 1). K<sub>F</sub>값이 클수록 흡착제와 흡착질 간 친화도가 높음을 의미하는데(Na et al., 2011), Langmuir 등온흡착식을 통해 산출된 최대흡착량 결과와 동일하게 phosphate 계열의 안정화제인 MAP에서 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 IP 및 gypsum에 비해 phosphate 계열의 MAP가 납을 안정화하는데 더

적합할 수 있음을 나타낸다. 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency; USEPA)은 납으로 오염된 사격장의 유지 관리를 위한 best management practice (BMP)로써 phosphate 계열의 안정화제의 활용을 제안한 바 있다(Chrysochoou et al., 2007; Zeng et al., 2017). Halim et al. (2005)은 납으로 오염된 토양을 대상으로 보다 적합한 안정화 방법을 확인하기 위해, 포틀랜드 시멘트를 활용한 안정화와 인산염 계열의 calcium dihydrogenphosphate를 활용한 안정화를 비교한 바 있다. 각 안정화 처리된 토양에 대해 아세트산(0.05-0.6 M)을 이용해 추출한 결과 인산염 계열의 안정화 방법이 포틀랜드 시멘트를 활용한 안정화 방법에 비해 용출된 납의 농도를 크게 저감시켜 대상 토양 내 납을 안정화하는데 더 적합한 방법임을 확인했다. 또한, Brown et al. (2005)은 Pb, Cd 및 Zn으로 오염된 토양을 대상으로 hydroxyapatite, triple super phosphate, phosphoric acid, red mud, limestone, biosolids, cyclonic ashes, steel shots을 이용한 토양 내 중금속 안정화 실험을 수행한 바 있다. 안정화 후 토양 내 총 납의 농도 대비 PBET를 이용해 용출된 납의 농도는 triple super phosphate 및 phosphoric acid의 경우 약 30-40%, 나머지 안정화제들은 약 54-85%의 납 용출량을 나타냈으며, phosphate 계열의 안정화제가 다른 안정화제들에 비해 토양 내 납의 생물학적접근성을 감소시켜 대상 토양의 안정화 시, phosphate 계열의 안정화제를 활용하는 것이 더 적합함을 확인한 바 있다.

### 3.2 FDA 가수분해효소 활성 실험 결과

토양의 생태학적 기능에 미치는 안정화제의 영향을 평가하기 위한 안정화 전/후 토양 미생물 효소 활성 실험은 안정화제를 첨가하지 않은 대조군과 MAP, IP 및 gypsum을 이용한 안정화 토양에 대해서 수행되었다. 대조군의 경우, FDA 가수분해효소 활성을 지시하는 fluorescein의 농도는 0.239 mg/g · h를 나타냈으며, MAP, IP 및 gypsum으로 안정화된 토양에서는 각각 0.026, 0.135 및 0.073 mg/g · h를 나타냈다(Fig. 2).

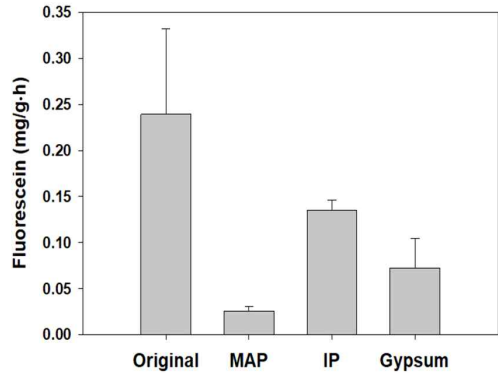


Fig. 3. MAP, IP 및 gypsum을 활용하여 안정화된 납 오염토양의 fluorescein 농도(mg/g·h). Original은 안정화가 수행되지 않은 토양을 의미하며, 오차막대는 표준편차(n=3)를 나타냄.

안정화제를 첨가한 모든 토양시료에서 대조군에 비해 FDA 가수분해효소 활성이 감소했으며, 이는 안정화제 첨가로 인한 토양 염류농도의 증가에 따른 염 스트레스의 영향으로 추정된다. Rietz et al. (2003)은 토양의 전기전도도가 증가함에 따라 FDA 가수분해효소 활성이 감소한 것을 확인하였으며, Yuan et al. (2007)은 염류가 높은 토양에서 FDA 가수분해효소 활성이 현저히 낮게 측정되었고 전기전도도와 가수분해율 사이가 반비례 관계가 성립함을 관찰하였다. Hong et al. (1998)은 토양 내 염류농도의 증가가 미생물의 호흡, 질소순환 및 효소 활성에 부정적인 영향을 끼침을 보고한 바 있다. 한편, 등온흡착실험 결과에서 납에 대한 가장 높은 흡착능을 나타낸 MAP는 토양에 적용될 경우 FDA 가수분해효소 활성도를 가장 많이 감소시키는 것으로 나타났다.

## 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 납 오염토양의 안정화를 위해 3종의 후보 안정화제를 선정하고, 각 안정화제에 대해 등온흡착실험을 통한 납 흡착능 평가 및 안정화제 적용 토양의 FDA 가수분해효소 활성도 평가를 수행했다. 등온흡착실험 결과, MAP가 납에 대해 가장 높은 최대흡착량 및 흡착친화도를 나타내는

것으로 평가된 반면, 이러한 MAP의 토양 적용은 가장 큰 생태학적 기능 저해를 야기했다. 토양 내 중금속의 이동성 및 독성을 저감시키기 위한 안정화의 목적을 고려할 때, 안정화 처리 이후 대상 중금속이 안정한 형태로 유지되어 낮은 화학적 추출능을 나타내는 여부도 중요하지만, 잔류 중금속 또는 주입한 안정화제 함유 물질 및 중화제 등에 의한 토양 생물체의 부정적 영향 또한 반드시 고려되어야 하는 요소이다.

종합적으로, 정화곤란부지에 대한 위해저감조치로서의 안정화 공법을 고려할 때, 화학적 추출능에 기반한 인체 위해도 저감을 평가 뿐만 아니라 토양 미생물 효소 활성 실험 등을 위시한 생태학적 기능 평가 또한 반드시 수행되어야 하며, 생태학적 기능의 회복 가능성 또한 함께 검토되어야 한다. 향후 연구에서는 안정화 처리 이후 장기적인 생태학적 영향을 모니터링하고, 안정화제의 최적 사용조건을 규명하는 것이 필요하다. 또한, 다양한 오염 토양 조건에서의 적용 가능성을 평가하고, 생태계 회복력을 증대시킬 수 있는 추가적인 안정화 기법을 개발하는 방향으로 연구를 확장할 필요가 있다.

## REFERENCES

Adam et al., 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil biology and biochemistry*, 33(7-8), 943-951.

An et al., 2017. Risk mitigation measures in arsenic-contaminated soil at the forest area near the former janghang smelter site: applicability of stabilization technique and follow-up management plan. *J. Soil Groundwater Environ.* 22(6). 1-11.

An et al., 2019. Evaluation of the effectiveness of in situ stabilization in the field aged arsenic-contaminated soil: chemical extractability and biological response. *Journal of Hazardous Materials*. 367. 137-143.

Brown et al., 2005. An inter-laboratory study

to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb, and Zn in situ. *Environmental Pollution*. 138(1). 34-45.

Chrysochoou et al., 2007. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization: The unclear role of phosphate. *Journal of Hazardous Materials*. 144(1-2). 1-14.

Green et al., 2006. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: optimization for soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(4), 693-701.

Halim et al., 2005. Evaluating the applicability of regulatory leaching tests for assessing the hazards of Pb-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. 120(1-3). 101-111.

Hettiarachchi et al., 2004. Soil lead bioavailability and in situ remediation of lead contaminated soils: a review. *Environmental Progress*. 23(1). 78-93.

Hong et al., 1998. 시설재배지토양의 이화학적 특성변화. *한국농공학회지*, 40(1), 88-95.

Huang et al., 2021. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*. 305. 124685.

Jeon et al., 2010. Applicability test of various stabilizers for heavy metals contaminated soil from smelter area. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 11(11), 63-75.

Kastury et al., 2019. Relationship between Pb relative bioavailability and bioaccessibility in phosphate amended soil: Uncertainty associated with predicting Pb immobilization efficacy using in vitro assays. *Environment International*, 131, 104967.

Koralegedara et al., 2016. Alterations of lead speciation by sulfate from addition of flue gas desulfurization gypsum (FGDG) in two contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 575, 1522-1529.

Li et al., 2011. 폐자원을 이용한 사격장 토양내 중금속 (Pb, Cu) 안정화 처리. *대한환경공학회지*, 33(2), 71-76.

Li et al., 2020. Experimental Study on Solidification

and Stabilization of Heavy-Metal-Contaminated Soil Using Cementitious Materials. *Materials*, 14(17), 4999.

Liu et al., 2007. Reducing leachability and bioaccessibility of lead in soils using a new class of stabilized iron phosphate nanoparticles. *Water Research*, 41(12), 2491-2502.

Liu et al., 2013. Synthesis and characterization of a new class of stabilized apatite nanoparticles and applying the particles to in situ Pb immobilization in a fire-range soil. *Chemosphere*, 91(5), 594-601.

Luo et al., 2016. Investigation of Pb species in soils, celery and duckweed by synchrotron radiation X-ray absorption near-edge structure spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 122, 40-45.

Nabulo et al., 2010. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils. *Science of The Total Environment*, 408(22), 5338-5351.

Na et al., 2011. Applicability of theoretical adsorption models for studies on adsorption properties of adsorbents(1). *J Korean Soc Environ Eng.* 46(4). 199-130.

Park et al., 2024. Effects of in situ Fe oxide precipitation on As stabilization and soil ecological resilience under salt stress. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132629.

Ren et al., 2023. Solidification/stabilization of lead contaminated soils by phosphogypsum slag based cementitious materials. *Science of The Total Environment*. 857(3). 159552.

Rietz et al., 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 845-854.

Sardar et al., 2007. Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb. *Journal of Environmental Sciences*, 19(7), 834-840.

Vrinceanu et al., 2019. Assessment of using bentonite, dolomite, natural zeolite and manure for the immobilization of heavy metals in a con-

taminated soil: The Copșa Mică case study (Romania). *CATENA*, 176, 336-342.

Wang et al., 2019. Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification. *Environment International*, 126, 336-345.

Xu et al., 2021. Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: available stabilizing materials and associated evaluation methods—a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 321. 128730.

Yuan et al., 2007. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *Applied Soil Ecology*, 35(2), 319-328.

Zeng et al., 2017. Precipitation, adsorption and rhizosphere effect: The mechanisms for Phosphate-induced Pb immobilization in soils—a review. *Journal of Hazardous Materials*. 339. 354-367.

