

위해성기반 오염부지관리를 위한 의사결정체계 및 이를 위한 위해저감기술의 활용

정현용¹ · 김상현² · 이호섭¹ · 남경필^{1,*}

¹서울대학교 건설환경공학부

²한국과학기술연구원

Decision-making Framework for Risk-based Site Management and Use of Risk Mitigation Measures

Hyeonyong Chung¹ · Sang Hyun Kim² · Hosub Lee¹ · Kyoungphile Nam^{1,*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

오염부지 관리 기조가 매체 중심에서 수용체 중심으로 변화하면서 우리나라에 위해성평가 제도가 도입되었으나, 이를 오염현장에 충분히 활용하기 위한 체계와 관련 기술들은 아직 제대로 확립되어 있지 않다. 특히, 여러 가지 이유로 정화관부지로 분류가 되는 오염부지의 정화 및 관리와 그러한 부지에 적용될 수 있는 위해저감기술들에 대한 기술적, 사회적 논의와 합의도 부족한 실정이다. 본 연구에서는 그동안 오염토양의 정화에만 초점이 맞추어진 우리나라의 토양환경정책이 오염부지의 관점에서 그와 연결된 수용체를 보호하는 방향으로 나아가기 위해 필요한 위해성기반 오염부지관리 의사결정체계를 제안하고, 그러한 관리체계가 현장에서 적절히 적용되도록 하기 위해 필요한 위해저감기술들을 조사, 분류하여 위해저감 방식에 따른 위해저감기술의 활용성 및 적용성을 평가하는 방안을 제안하였다.

Key words : 위해성평가, 오염부지 위해관리체계, 위해저감기술

1. 서 론

토양환경보전법이 1995년 제정된 이후 우리나라는 토양에 존재하는 오염물질의 총 농도를 규제하는 매체 중심의 토양환경 관리를 수행해왔다(환경부, 2020). 토양오염물질로 규정된 24종(2020년 기준)의 물질에 대해 토양 내 농도가 우려기준을 초과하는 경우, 정화계획을 수립하고 기본적으로 2년 이내(최장 4년)에 그 농도를 우려기준 이하로 저감하도록 하는 방식이다. 이는 토양 내 오염물질을 적극적으로 제거하여 깨끗한 토양을 보전한다는 원칙

론적 의미를 갖지만, 과학적 타당성, 기술적 가능성, 경제적 효율성의 측면에서 불합리한 결과를 초래한다는 한계가 지적되어 왔다. 이러한 배경에서 매체 중심의 관리에서 수용체를 중심으로 한 관리로의 기조변화가 모색되어 왔으며, 그 일환으로 2006년 토양오염물질 위해성평가 제도가 도입되었다(환경부, 2018). 토양만이 아닌 토양 오염물질이 영향을 미칠 수 있는 오염부지 내 타 매체 또한 대상으로 하고, 오염물질의 총 농도가 아닌 오염물질이 인근 수용체에 미치는 위해성에 근거해 관리하는 방식으로, 미국, 네덜란드, 캐나다 등 선진국에서는 1980년대부터 적용해온 방식이다(국립환경과학원, 2015). 토양 내 오염물질의 총 농도뿐만 아니라 오염물질특성, 토양특성, 부지특성, 수용체의 행동특성 등 부지와 수용체의 다양한 측면을 종합적으로 평가하여 관리를 수행함으로써, 총 농도만을 기반으로 한 현재 우리나라의 오염토양 관리 체도를 보완하거나 대체할 수 있을 것으로 기대되어 왔다.

주저자: 정현용, 박사후연구원

공저자: 김상현, 박사후연구원; 이호섭, 박사과정

*교신저자: 남경필, 교수

E-mail: kpnam@snu.ac.kr

Received : 2020. 9. 2 Reviewed : 2020. 9. 6 Accepted : 2020. 9. 14

Discussion until : 2020. 12. 31

그러나 위해성평가 제도 도입 후 10년이 지난 지금, 우리나라에서 위해성평가는 그 목적에 따라 충분히 활용되고 있지 못한 실정이다. 이와 같은 결과가 초래된 가장 큰 이유는, 우리나라에서는 그동안 오염물질이 존재하는 토양의 정화에 초점을 맞추어 온 반면 위해성평가는 오염 토양(contaminated soil)이 아니라 오염부지(contaminated site)를 대상으로 하고 있기 때문이다. 현행 토양환경보전법에 따르면 어떤 한 지점의 오염물질의 농도가 오염 여부를 판정하는데 의미를 가지지만, 위해성평가에서는 오염된 부지(site)의 노출농도(exposure concentration)가 중요하고, 이는 어떤 한 지점의 최고농도가 아니라 통계학적으로 유의한 그 부지의 대표농도이다. 또 다른 이유는, 위해성평가를 수행했을 때, 그 결과에 따라 부지의 오염 특성과 위해성을 고려한 다양한 의사결정을 내릴 수 있는 틀과 그 구체적인 실행방안(예; 위해저감조치 등)이 마련되어 있지 못하다는 것이다. 토양환경보전법은 부지 위해도를 토양정화의 범위, 시기, 수준을 결정하는데에 반영하도록 하는데, 우리나라 위해성평가 지침(환경부, 2018)은 위해도가 목표위해도를 초과할 시 정화목표치를 설정하는 방법만을 제시하고 있으며 '정화'외의 위해저감을 위한 방안 또한 언급되어 있지 않다. 이는 우리나라가 매체 중심의 토양관리 체계 하에서, 단기간에 토양오염물질의 농도를 저감할 수 있는 기술만을 정화기술로 연구하고 활용해왔기 때문일 것이다. 하지만 위해도에 기반한 수용체 중심의 관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 적극적으로 농도를 저감하는 정화기술만이 아니라, 노출을 차단하는 방식의 기술 같이 농도 감소 없이 위해도를 저감하는 기술들도 폭넓게 도입하고 활용할 필요성이 높다.

본 연구에서는 다양한 국내외 자료를 조사하여 위해성에 기반하여 오염부지를 관리하기 위한 의사결정체계를 제안하고, 이를 위한 위해저감기술의 활용 체계와 위해저감기술에 대한 조사·분석 결과를 정리하여 제시하였다. 본 연구에서 제안하는 위해성 기반 오염부지관리체계는 오염부지의 조사, 평가 및 적극적인 정화를 기본틀로 하고, 해당 부지의 위해성평가 결과, 오염특성 등을 반영하여 부지특이적인 위해저감기술의 적용 및 사후 모니터링과 궁극적인 부지관리의 종료에 대한 내용을 포함하고 있다.

2. 본 론

2.1. 오염부지 위해관리를 위한 의사결정체계

현행 토양환경보전법 상의 토양오염 정화는 토양으로부터 오염물질을 우려기준 이하로 제거하는 것에 초점이 맞

추어져 있고 2년 또는 4년 이내에 정화를 완료해야 하는 상황이다 보니, 정화 후 토양의 기능이 훼손되어 토양으로서의 역할을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있으며, 중금속 같은 경우 토양에서의 존재형태와는 상관없이 전함량을 기준으로 정화가 이루어져야 하는 불합리한 경우들이 발생하고 있다. 또, 적극적인 정화기술을 적용한다고 하더라도 기술적으로 정화목표를 달성하지 못하는 경우도 있을 수 있으며, 운영 중인 산업단지, 사격장 등 오염의 발생이 지속적으로 일어나는 경우와 도로, 철도시설 등과 같이 오염정화가 물리적으로 곤란한 경우도 문제로 대두되고 있다. 이러한 점들은 정화의무를 피하고자 토양오염을 적극적으로 신고하지 않거나 회피하려는 심리적 요인으로 작용하기도 한다. 환경적으로도, 이러한 부지들에서는 오염토양에 대한 적절한 조치가 지연됨으로써 오염물질의 확산, 이동에 따른 주변 환경의 2차 오염 우려가 존재한다. 한국환경정책·평가연구원(박용하 등, 2016)에서는 지상에 대규모 건물이나 시설 또는 지중의 전기, 가스, 통신시설 등으로 인해 현재의 정화기술로는 효과적으로 정화가 이루어지기 어려운 '정화곤란부지'의 사례와 관리방안을 연구하여 발표한 바도 있다.

본 연구에서는 토양 오염물질의 농도를 우려기준 이하로 유지한다는 토양환경보전법의 원칙을 따르면서도, 부지 위해도를 관리하면서 그 정화를 수행하는 시기를 합리적으로 결정할 수 있도록 하는 의사결정체계를 제안하였다. 위해성평가를 수행하는 부지는 오염물질 농도가 우려기준을 초과한 부지이므로 정화필요구역을 먼저 결정한다. 그리고 위해성평가를 수행하여 부지 위해도가 목표위해도를 초과하는지의 여부에 따라 관리 방안을 수립하게 된다. 부지의 위해도가 목표위해도를 초과하지 않는다면, 적극적 정화를 수행할 수 있을 때까지 부지 내부 오염물질의 외부확산을 방지하는 것이 기본적인 관리 방안이다. 반면, 부지의 위해도가 목표위해도를 초과한다면, 적극적 정화 혹은 위해저감기술을 통해 오염물질의 농도를 우려기준 이하로 저감할 때까지 부지 위해도를 목표위해도 이하로 유지하는 것이 기본적인 관리 방안이 된다. 위해성평가를 적용하는 부지는 기본적으로 적극적 정화에 물리적/기술적/경제적 곤란성이 있는 부지일 개연성이 높지만, 구역에 따라서는 적극적 정화가 가능한 구역이 존재할 수 있다. 따라서 부지 전체가 아닌 구역별로 적극적 정화 가능여부를 판단하고 적극적 정화 혹은 위해저감기술을 적용한다. 부지 위해도가 목표위해도를 초과하는지의 여부와는 무관하게 오염물질의 농도가 우려기준 이하로 저감되고 이에 대한 검증을 마친 후에 최종적으로 부지관리를 종료하게

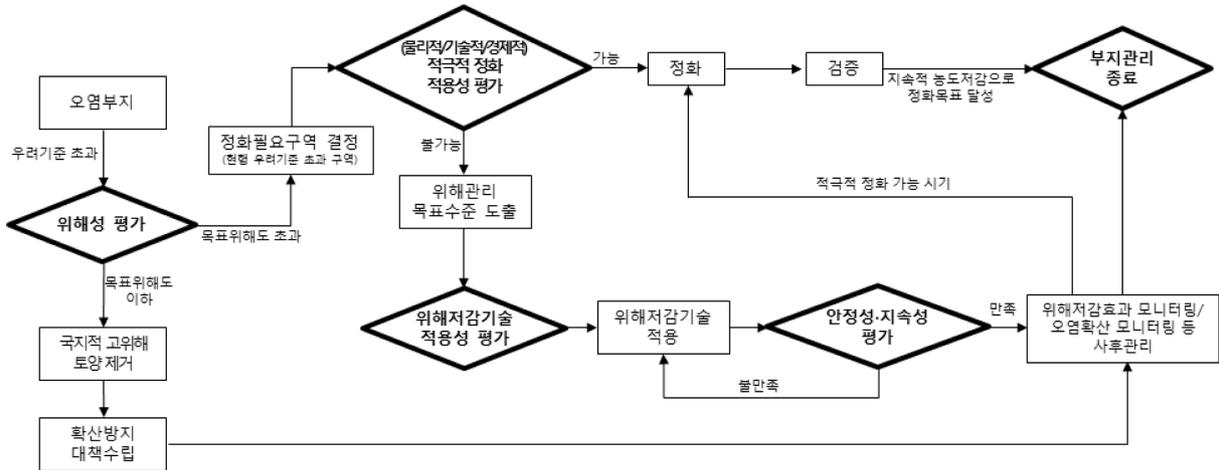


Fig. 1. 위험도 기반 오염부지관리 의사결정체계(안).

된다. 서술한 오염부지 의사결정체계를 도식화하면 Fig. 1과 같다.

본 연구에서 제안하는 위험성기반 오염부지관리체계에 서 중요한 사항은 위험성평가의 결과, 적극적 정화기술의 적용가능 여부, 위해저감기술의 적용성 및 안정성·지속성 평가 결과, 부지관리 종료 여부이다.

첫 번째 위험성평가의 결과는 적극적 정화 혹은 위해저감기술을 적용할 것인지를 판단하는 기준이 된다. 부지의 위험도가 목표위해도를 초과하지 않는다면, 적극적 정화나 위해저감기술을 적용하기 보다는 확산방지 대책을 수립하고 모니터링하는 것에 중점을 둔다. 다만, 위험도 산정의 기반이 되는 노출농도는 일반적으로 산술평균의 상위 95% 신뢰값으로 결정되기 때문에, 부지에는 오염도가 노출농도를 초과하는 구역이 존재할 수밖에 없고 이런 구역의 위험도는 목표위해도를 초과할 개연성이 있다. 이러한 국지적 고위해토양은 물리적/기술적/경제적 곤란성이 없다면 제거하는 것이 권장된다. 어떤 구역의 위험도가 비발암위해도 3 혹은 발암위해도 10^{-4} 을 초과하는 경우, 혹은 오염도가 평균치보다 월등히 높은 이상치(outlier)로 판단되는 경우 등에는 그 구역을 고위해구역으로 볼 수 있다. 부지의 위험도가 목표위해도를 초과한다면, 적극적 정화 혹은 위해저감기술을 적용한다. 정화가 필요한 구역은 기본적으로는 현행 토양우려기준을 초과하는 구역으로 설정하는게 바람직하고, 기술적, 물리적, 경제적으로 적극적 정화의 곤란성이 없는 구역에 대해서는 정화를 수행하여야 할 것이다. 적극적 정화에 곤란성이 있는 구역이 있다면, 이에 대해서는 위해관리 목표수준을 도출하고, 수용체를 보호하고 확산을 방지할 수 있는 위해저감기술을 적용하도록 한다.

두 번째 사항인 적극적 정화기술의 적용가능 여부는 목표위해도를 초과한 부지에서 이루어지는 의사결정이다. 목표위해도를 초과하였다면, 적극적 정화 혹은 위해저감기술을 적용하는데, 적극적 정화를 우선적으로 고려한다. 여기에서 적극적 정화란 토양환경보전법의 정화명령에 따라 2년(최장 4년) 이내에 토양 오염물질의 농도를 우려기준 이하로 낮추는 것을 말한다. 즉, 위험성평가를 수행한 부지라 하더라도 적극적 정화를 수행하는데에 물리적/기술적/경제적 곤란성이 없는 구역은 우선적으로 선별하여 정화를 수행한다. 하지만 실제 오염부지에는 적극적 정화를 수행하기가 물리적/기술적/경제적으로 곤란한 구역이 존재할 수 있다. 산업단지 내 화학물질 저장·운송 시설물이 설치된 구역이나 사격장 내 피탄지 등의 구역은 오염이 지속적으로 발생할 수 있기 때문에 부지를 활용하는 동안에는 정화를 수행하더라도 그 효과가 일시적일 수밖에 없다. 건축물 하부가 중금속으로 오염된 구역이나, 미세토 함량이 높은 중금속 오염 구역 등도 적극적 정화를 수행하는데 곤란성이 있다. 또한, 제련소나 광산으로 인한 오염부지 같이 오염도는 낮으나 오염범위가 매우 넓은 특성의 부지는 부지 대부분이 적극적 정화를 수행하기 곤란한 구역이 될 것이다. 적극적 정화를 수행하는데에 물리적/기술적/경제적 곤란성이 있다면 그 곤란성이 해소될 때까지 위해저감기술을 적용한다. 위해저감기술은 보다 장기간(4년 이상)에 걸쳐 오염물질의 농도를 저감하거나, 농도저감 없이 노출차단 등을 통해 위험도를 저감하는 기술들을 말한다.

세 번째 사항은 위해저감기술의 적용성 및 안정성·지속성 평가결과다. 어떤 구역에 위해저감기술을 적용한다면, 먼저 기술별 활용성·적용성에 따라 어떤 기술을 적용할 것인지를 결정한다. 기술을 적용한 후에는 위해저감효과

가 발생하고 그 효과가 지속되고 있는지, 즉 기술의 안정성과 지속성을 평가한다. 위해도를 저감하는 것은 농도를 저감하는 것뿐만 아니라 오염물질에의 노출을 차단함으로써 달성할 수 있다. 따라서 부지 및 오염 특성, 수용체로의 오염물질 노출경로를 종합적으로 고려하여 위해저감기술을 선정한다. 또한, 위해저감기술은 적극적 정화가 가능한 시점까지 장기간 적용되므로 기술이 적용되는 기간 동안 그 효과의 안정성·지속성을 평가한다.

네 번째 사항은 최종적인 부지관리 종료 여부이다. 부지관리 종료 여부를 판단하는 기준은 오로지 토양 오염물질의 농도가 우려기준 이하로 저감되었는지의 여부이다. 위해저감기술 중 장기간에 걸쳐 오염물질의 농도를 저감하는 기술을 적용하였다면, 우려기준 이하로 농도 저감이 완료되었을 때 부지관리를 종료할 수 있다. 그 외 농도저감이 없는 위해저감기술을 적용한 경우라면, 적극적 정화를 적용할 수 있을 때까지 위해도를 목표위해도 이하로 유지하고, 이후 적극적 정화를 통해 오염물질의 농도를 우려기준 이하로 저감한 후에야 부지관리를 종료할 수 있다. 예로, 오염이 지속적으로 발생하는 부지는 부지가 폐쇄되어 추가적인 오염이 발생하지 않게 되면 곤란성이 해소된 것으로 볼 수 있다. 그 시점까지는 위해저감기술을 통해 수용체가 오염물질에 노출되는 것을 차단하는 등의 부지관리를 수행하고, 곤란성이 해소되면 적극적 정화를 수행한 후 검증을 거쳐 부지관리를 종료하는 것이다.

본 논문에서 제안하고 있는 오염부지 위해관리체계는 오염부지에서 정화가 가능한 부지는 적극적인 정화를 수행하고, 그 이외의 부분에 대해서는 수용체를 보호할 수 있는 위해저감조치를 취하고, 오염물질의 확산, 이동 여부를 모니터링하는 것을 골자로 하고 있으며, 적극적인 정화와 위해저감기술을 현장 상황에 맞게 적절히 적용함으로써 토양 정화와 수용체 보호를 동시에 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 체계는 현재 위해성평가를 수행할 수 있는 대표적인 부지인 자연기원 오염부지에 대해서도 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 체계에서는 결국 위해저감기술을 적용하고, 장기적으로 그 기술의 안정성과 지속성을 평가하고 모니터링 하는 것이 가장 중요하다. 하지만 단기간에 농도 저감이 가능한 기술만을 정화기술로 활용해오던 우리나라에서는 위해저감기술이라는 개념 자체와 활용할 수 있는 기술의 종류, 기술의 활용성·적용성과 안정성·지속성을 평가하는 방안이 수립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 제시한 체계의 활용도를 높이기 위하여 다양한 방식의 위해저감기술을 조사하고, 그 활용성·적용성과

안정성·지속성 평가 방안을 마련, 제시하였다.

2.2. 위해저감기술 및 분류

앞서 제안한 오염부지 위해관리체계(Fig. 1)의 구현을 위해서는 오염토양의 즉각적인 완전한 제거, 정화뿐 아니라 오염부지(contaminated site)로부터의 위해를 저감하여 수용체를 보호하는 개념의 도입이 필요하고, 이 체계가 현장에 작동되기 위해서는 수용체로의 노출차단, 이동성 감소, 오염물질의 지속적인 분해, 제거 등과 같은 위해저감기술의 적용이 필요하다. 위해저감기술이란 오염부지의 위해도를 낮출 수 있는 모든 기술을 통칭한다고 할 것이다. 따라서 현재 정화기술로 분류되는 기술들도 경우에는 따라서는 위해저감기술로 분류, 사용될 수도 있지만, 위해저감기술은 오염물질의 농도가 아닌 위해도를 저감하는 것을 목표로 한다는 점과 장기적 측면에서 적용된다는 점에서 기존 우리나라의 정화기술과 차이가 있으며 기존 정화기술보다 넓은 범위의 기술들을 포함한다. 위해도는 오염매질 내 오염물질의 농도만이 아니라 수용체가 오염매질에 노출되는 정도, 오염물질이 오염매질로부터 수용체로 흡수되는 정도 등 다양한 요인에 의해 결정된다. 따라서 오염물질의 농도를 낮추지 않더라도 오염물질이 수용체로 흡수되는 정도를 줄이는 기술들도 위해저감기술에 포함된다. 적용 기간의 측면에서, 토양환경보전법에 따른 우리나라의 기본적인 오염토양 관리방안은 2년 혹은 4년의 비교적 단기간 내에 토양 내 오염물질의 농도를 토양오염 우려기준 이하로 저감하는 것이기 때문에, 단기간에 오염물질의 농도를 저감할 수 있는 기술(대표적으로 토양세척, 열탈착 등)만이 정화기술로 간주되어 왔다. 하지만 위해저감기술을 적용하는 부지는 오염물질을 단기간에 정화하는 것이 현실적으로 곤란한 부지이다. 따라서 위해저감기술은 정화가 가능할 때까지 부지의 위해도를 일정 수준 이하로 유지하거나 부지의 위해도를 장기간에 걸쳐 저감할 수 있는 기술들을 포함한다.

본 연구에서는 상용화 단계 및 현장적용 사례가 있는 다양한 위해저감기술을 조사하고, 이를 위해도를 저감하는 방식에 따라 크게 네 가지로 분류하여 제시하였다(Table 1). 첫 번째 분류는 원위치 농도저감 기술로, 매질 내 오염물질의 농도를 낮추어 오염매질의 수용체에 대한 위해도를 저감하는 기술이다. 오염매질을 굴착 또는 추출하여 처리하는 ex situ 농도저감 기술은 오염매질 자체를 처리하는 데에는 시간이 소요되더라도, 오염매질을 부지 내부로부터 제거하는 것은 단기간 내에 수행할 수 있으므로 위해저감기술로 간주되지 않는다. 두 번째 분류는 안

Table 1. 위해저감 방식에 따라 분류한 위해저감기술

위해저감 방식	위해저감기술
원위치 농도저감 (<i>In situ</i> reduction)	Phytoremediation
	Bioremediation (+ Bioventing)
	<i>In situ</i> chemical oxidation
	Flushing
	Soil vapor extraction & Air Sparging
	Electrokinetics
	Fracturing
	Pump and treat
	Permeable Reactive Barrier
	Bioslurping (Vacuum Enhanced Recovery)
안정화 및 고형화 (Stabilization and solidification)	Monitored natural attenuation
	Stabilization and solidification using cement
	Stabilization using Fe oxide
	<i>In situ</i> bioprecipitation
공학적 노출차단 (Engineering controls)	<i>In situ</i> vitrification
	Capping
	Vapor mitigation system
	Vertical and Bottom Barriers
법적/행정적 노출차단 (Institutional controls)	Pumping wells and drains
	Institutional controls

정화 및 고형화 기술로, 오염물질의 농도를 낮추는 것이 아니라 매질에 존재하는 오염물질을 수용체에 흡수되거나 타 매질로 이동하기 어려운 형태로 변화시킴으로써 수용체에 대한 위해도를 저감하는 기술이다. 세 번째는 공학적 노출차단 기술로, 공학적으로 설계된 시설물 등을 통해 오염매질이 수용체와 접촉하는 것을 차단함으로써 수용체에 대한 위해도를 저감하는 기술이다. 네 번째는 행정적/법적 노출차단 기술로, 행정조치나 법적 제한을 통해 수용체가 오염매질과 접촉하는 것을 차단하여 수용체에 대한 위해도를 저감하는 기술이다. 공학적 노출차단이 오염매질에 대해 조치를 취하는 것이라면, 행정적/법적 노출차단은 수용체의 행동양식을 대상으로 조치를 취하는 것이라는 점에서 차이가 있다.

2.3. 위해저감기술의 활용성·적용성 평가

위해성평가 대상 오염부지에서 어떤 위해저감기술을 사용하는 것이 적합한지에 대한 결정을 내릴 수 있도록 국내외 문헌조사를 통하여 위해저감기술의 활용성 및 적용성을 판단하기 위한 7가지의 분석항목을 결정하고(Table 2), 앞 Table 1의 기술들을 각 항목에 따라 분석하여, 각 기술들의 평가표를 도출하였다(Table 3-5).

Table 2의 분석항목은 우선 위해저감기술의 활용성 측면에서 기술이 대상으로 하는 매질과 대상 오염물질로 구

성된다. 오염부지 위해성평가에서 실내/외 공기의 휘발물질 및 실외 공기의 비산먼지는 기본적으로 오염토양에서 유래하는 것으로 간주하므로, 위해저감기술은 토양과 지하수를 대상으로 적용되며 위해저감기술의 대상 매질 또한 이에 따라 토양과 지하수로 구분하였다. 대상 오염물질의 경우에는 중금속, 유류, 그 외 유기오염물질로 구분하는 것 외에도, 휘발성 물질 및 용존상 물질에만 적용 가능한 기술에 대해서는 이를 비고란에 표시하였다. 위해성평가에서 오염물질의 휘발성의 여부는 유효한 노출경로를 결정함에 있어 특히 중요한데, 실내/외 공기 휘발물질 흡입 경로는 휘발성 물질에 대해서만 유효하며, 반대로 토양피부접촉경로와 비산먼지 흡입 경로는 휘발성 물질에 대해서는 유효하지 않기 때문이다(USEPA, 2020). 결론적으로 위해저감기술의 대상 매질 및 오염물질을 알면, 위해저감기술을 적용하여 위해도를 저감하고자 하는 노출경로별로 적합한 위해저감기술을 선정할 수 있다. 위해저감기술은 장기간(기본 4년 이상) 적용한다는 점에서 적극적 정화와 큰 차이가 있다. 장기간에 걸쳐 오염물질의 농도를 저감하는 원위치 농도저감 기술은 목표농도를 달성하기 위해 소요되는 시간이 중요한 요소가 되며, 기술이 장기간 적용됨에 따라 부지의 환경매질이나 생태를 변화시킬 개연성도 있다. 반면, 안정화/고형화 기술과 공학적/행정적 노출차단 기술은 적극적 정화가 가능한 시점까지 반

Table 2. 위해저감기술 활용성 및 적용성 평가를 위한 분석항목

분석항목	세부내용	
	원위치 농도저감 기술	고형화/안정화 기술 공학적/행정적 노출차단 기술
대상 매질(토양/지하수)	기술이 대상으로 하는 오염매질	
대상 오염물질 (중금속/유류/그외유기물질/비고)	기술을 적용함으로써 대상매질에서 위해도를 저감할 수 있는 오염물질 분류	
기술 적용 소요기간(단/중/장)	시설물 설치를 포함하여 오염물질의 농도를 목표 수준 까지 낮추는 데에 소요되는 기간	*해당 없음
기술의 내구성(저/중/고)	*해당 없음	기술 적용 효과가 유지되는 정도
기술 적용 시 부지활용성(저/중/고)	기술 적용 후 농도저감 혹은 위해저감 기능을 하고 있는 기간 중 부지 활용성	
환경영향(저/중/고)	기술 적용으로 인한 타 환경매질 및 생태에 대한 영향 정도	
비용(저/중/고)	기술 적용 및 유지에 소요되는 비용	
기술 적용 시 고려사항 (매질특성, 오염특성, 기타사항 등)	기술 적용과 관련한 매질 및 오염 특성 및 기타 고려사항 등	

영구적으로 위해도 저감효과를 유지하여야 하므로, 처음 기술 적용에 소요되는 시간보다는 기술의 내구성이 중요하다. 이러한 사항들을 고려하여, 기술 적용성 항목은 기술 적용 시 부지활용성, 환경영향, 비용, 그리고 기술 적용에 소요되는 시간, 기술의 내구성으로 구성된다. 따라서 앞서 기술의 활용성 항목에 따라 적용 가능한 위해저감기술들을 선별하였다면, 적용성 항목들을 종합적으로 평가함으로써 오염부지 상황에 적합한 위해저감기술을 선정할 수 있다.

위해저감 방식에 따른 위해저감기술(Table 1)들의 구체적인 조사결과는 Supplemental materials에 기술하였고, 그 기술들을 Table 2의 각 7가지 분석항목에 따라 분석하여 위해저감기술의 분류별로 활용성·적용성 평가표를 도출하였다. 기술의 활용성·적용성은 오염부지에 어떤 위해저감기술을 적용할지를 판단하는데에 활용할 수 있다. 기본적으로 활용성 지표(대상 매질 및 오염물질)를 바탕으로 적용이 불가능한 위해저감기술을 제외하고, 오염부지의 상황과 기술의 적용성을 함께 고려하여 위해저감기술을 선정한다.

원위치 농도저감기술(Table 3)은 시간은 보다 오래 소요되거나 적극적 정화를 수행하지 않고 부지관리를 종료할 수 있다는 점이 특징이다. 따라서 목표농도를 달성하기 위해 소요되는 시간과 부지활용도 및 비용이 어떠한지가 경제적 측면을 평가하는 주요한 요소가 될 수 있다. 광범위한 토양이 중금속으로 오염된 재개발 계획이 없는 폐공장 부지를 예시로 들면, 우선 기술 활용성의 측면에서 중금속을 대상으로 적용 가능한 기술인 phytoremediation, *in situ* chemical oxidation, electrokinetics를 활용할 수 있다. 다음으로 적용성의 측면에서, phytoremediation은 기

술 적용 시 부지활용도가 낮고 정화에 소요되는 기간은 길지만 비용이 적다는 점이 특징인 반면, *in situ* chemical oxidation과 electrokinetics는 목표농도는 보다 단기간에 달성할 수 있지만 부지를 전혀 활용할 수 없고 비용이 높다. 이 경우, 장기간이 소요되지만 낮은 비용이 들고, 부지를 여가생활지 등으로 활용할 수 있는 phytoremediation의 적용성이 높다고 판단할 수 있다.

안정화·고형화 기술(Table 4)과 공학적/행정적 노출차단 기술(Table 5)은 농도저감을 수반하지 않는다는 공통점 때문에 활용성·적용성 측면의 판단 요소가 유사하다. 이 기술들은 기술적용에 소요되는 시간 자체는 주요 요소가 아니며, 기술적용 후 안정화/고형화 효과나 시설물이 파손되지 않고 유지될 수 있는지, 즉 내구성이 중요하다. 또한, 최종적으로 적극적 정화를 수행할 때까지 부지에 반영구적으로 적용되므로, 기술이 적용된 부지의 활용도와 환경영향, 마찬가지로 반영구적으로 발생하는 비용 등이 더욱 중요해진다.

2.4. 위해저감기술의 안정성·지속성 모니터링

위해저감기술은 장기적으로 적용되는 기술이며, 따라서 그 효과가 잘 유지되어 인체 및 생태 수용체를 보호하고 있는지, 즉 기술의 안정성·지속성을 모니터링해야 한다. 기술의 내구성에 따라 그 주기가 달라질 수는 있지만, 안정성·지속성 모니터링은 위해도 기반 부지관리 체계에서 반드시 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 위해저감기술 분류별로 기술의 안정성·지속성을 평가하기 위한 분석항목을 도출하였다(Table 6).

원위치 농도저감 기술은 오염물질의 농도를 저감함으로써 위해도를 낮추는 기술로, 기본적으로 오염물질의 농도

Table 3. 원위치 농도저감기술의 활용성 · 적용성 평가표

기술명	대상 매질 (토양/지하수)	대상 오염물질				비고	기술 적용 소요기간 (단/중/장)	기술 적용 시 부지활용성 (O/I/X)	환경영향 (저/중/고)	비용 (저/중/고)	기술 적용 시 고려사항
		중금속 (O/I/X)	유류 (O/I/X)	그 외 유기물질 (O/I/X)							
Phytoremediation	토양/지하수	0	0	0	-	장	△	저	저	pH 6~8에서 효과적	
Bioremediation (+ Bioventing)	토양/지하수	X	0	0	-	단	0	저	저	pH 6~8에서 효과적, 투수성 높으면 효과적	
In situ chemical oxidation	토양/지하수	X	0	0	-	단	X	저	저-중	투수성 높으면 효과적	
Soil flushing	토양/지하수	0	0	0	-	중	△	중	저	투수성 높으면 효과적	
Soil vapor extraction & Air sparging	토양	X	0	0	휘발성	중	X	저	저	수분함량이 높으면 적용성 떨어짐	
Electrokinetics	토양/지하수	0	0	0	-	단	X	중	중	투수성 낮으면 효과적	
Fracturing	토양	* 직접 제거하는 기술이 아님				단	X	저	저	다른 농도저감 기술의 보 조 기술	
Pump and Treat	지하수	0	△	0	용존상	장	0	저	중-고	투수성 높으면 효과적	
Permeable Reactive Barrier	지하수	0	0	0	용존상	장	0	저	저	-	
Bioslurping (Vacuum Enhanced Recovery)	토양/지하수	X	0	0	휘발성/ 용존상/ LNAPL	단	△	저	저-중	투수성 높으면 효과적	
Monitored natural attenuation	토양/지하수	0	0	0	휘발성/ 용존상/ LNAPL	장	0	저	저	강우량과 투수성 높으면 효과적	

Table 4. 안정화 및 고형화 기술의 활용성 · 적용성 평가표

기술명	대상 오염물질					기술 적용 시 부지활용성 (O/Δ/X)	환경영향 (저/중/고)	비용 (저/중/고)	기술 적용 시 고려사항
	대상 매질 (토양/지하수)	중금속 (O/Δ/X)	유류 (O/Δ/X)	그 외 유기물질 (O/Δ/X)	비고				
Stabilization and solidification using cement	토양	0	Δ	Δ	-	고	중	저	-
Stabilization using Fe oxide	토양/지하수	0	X	X	-	저	중	중	pH 4~7에서 효과적
In situ bioprecipitation	토양/지하수	0	X	X	-	저	저	저	pH 4~9에서 효과적
In situ vitrification	토양	0	0	0	-	고	고	고	긴조된 토양에서 효과적

Table 5. 공학적 / 행정적 노출차단 기술의 활용성 · 적용성 평가표

기술명	대상 오염물질					기술 적용 시 부지활용성 (O/Δ/X)	환경영향 (저/중/고)	비용 (저/중/고)	기술 적용 시 고려사항
	대상 매질 (토양/지하수)	중금속 (O/Δ/X)	유류 (O/Δ/X)	그 외 유기물질 (O/Δ/X)	비고				
Capping	토양	0	0	0	-	저·중	저	저	-
Vapor mitigation system	토양/지하수	X	0	0	휘발성	중	저	저	오염원 근처 건물에서만 적용 가능
Vertical and Bottom Barriers	토양/지하수	0	0	0	-	고	중	저	-
Pumping wells and drains	지하수	0	Δ	0	용존상	중	저	저·중	투수성이 높을수록 효과 적
Institutional controls	토양/지하수	0	0	0	-	저	저	저	-

Table 6. 위해저감기술의 안정성·지속성 평가 항목 및 방법

위해저감 방식	평가항목	세부 평가방법	평가방법 참고문헌
원위치 농도저감	토양농도	- 전함량 농도 - 심도별 농도	- 환경부(2009) - USEPA (1994b) - Lee et al. (2017)
	용출농도	- 회분식용출시험(SPLP ¹⁾ 등) - 장기용출예측(30, 100년)	- ISO (2007) - 국립환경과학원(2017)
	공극수농도	- <i>In situ</i> sampler 이용한 측정 및 예측	- Jeong et al. (2020)
	토양독성	- 미생물독성(microtox 등) - 토양미생물독성(군집변화, 효소활성도 등) - 토양생물독성(지렁이, 보리 등)	- ASTM (2013) - USEPA (1994a) - OECD (2006)
	지하수 유출농도	- 부지 내부 및 시공간적 노출지점 지하수 농도	- 환경부(2019a; 2019b) - USEPA (1994b)
안정화 및 고형화	용출농도	- 회분식용출시험(SPLP ¹⁾ 등) - 장기용출예측(30, 100년)	- Lee et al. (2017) - ISO (2007) - 국립환경과학원(2017)
	공극수농도	- <i>In situ</i> sampler 이용한 측정 및 예측	- Jeong et al. (2020)
	지하수 유출농도	- 부지 내부 및 시공간적 노출지점 지하수 농도	- 환경부(2019a; 2019b)
	토양존재형태	- 연속추출법(Tessier ²⁾ , Wenzel ³⁾ 등)	- Tessier et al. (1979) - Wenzel (2001)
	생물학적이용성	- 위장모사시험(SBRC ⁴⁾ 등)	- Kelly et al (2002) - USEPA (2017)
공학적/행정적 노출차단	고형화 정도	- 압축강도 - 투수성 등	- ASTM (2017) - ASTM (2016)
	접근/노출차단의 안정성·지속성	- 적용 기술의 유지 여부	- USEPA (2012)

1) Synthetic precipitate leaching procedure

2) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals

3) Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure

4) Solubility Bioavailability Research Consortium

가 목표에 따라 줄어들고 있는지를 평가해야 한다. 또한, 농도저감 기술을 적용하는 중에 토양 오염물질의 용출이 증가한다거나, 이렇게 용출된 오염물질이 생물에 독성을 미치거나, 지하수로 유입되어 위해를 야기할 수 있다. 따라서 원위치 농도저감 기술에 대해서는 토양농도, 용출농도, 공극수농도, 토양독성, 지하수유출농도를 기반으로 안정성·지속성을 평가한다.

안정화 및 고형화 기술은 오염물질 및 오염토양의 물리/화학적 특성을 변화시켜 오염물질의 이동성(용출 특성 등)을 낮추어 위해도를 저감하는 기술로, 기술적용 결과 변화된 특성이 계속 유지되고 있는지를 분석해야 한다. 용출농도, 공극수농도, 지하수유출농도 등을 기반으로 오염물질의 용출량을 직접 분석하여 안정화 및 고형화 기술의 이동성 감소 효과 및 지속 여부를 평가할 수 있다. 용출량을 직접 분석하는 방법 외에도, 토양 내 오염물질의 존재형태(오염물질이 결합하고 있는 토양 성분, 결합 세기 등)를 분석하여 오염물질의 용출 가능성을 판단할 수도

있다. 생물학적이용성은 매질 내 오염물질 중 수용체에 영향을 미칠 수 있는 비율 혹은 양으로, 이를 분석함으로써 오염물질의 수용체의 접근성을 직접 평가할 수 있다. 이 외에도 고형화 정도를 기반으로 기술의 안정성을 분석할 수 있다.

공학적/행정적 노출차단 기술은 오염매질이 수용체와 접촉하는 것을 차단하는 기술로, 오염물질의 농도 혹은 물리/화학적 특성의 변화를 수반하지 않는다. 따라서 설치한 시설물이 제대로 작동하고 있는지의 여부를 평가하는 것이 기술의 안정성·지속성을 판단하는 방법이 된다.

서술한 각 위해저감 방식별 위해저감기술들의 안정성·지속성 평가항목과 항목별 세부적인 평가방법 및 그 방법론을 제시한 문헌은 Table 6과 같다.

3. 결 론

우리나라에서 위해성평가가 도입되면서 토양환경보전법

은 위해성평가 부지에서 산정된 위해도를 반영하여 토양 정화의 수준, 범위, 시기를 결정할 수 있도록 하였으나, 구체적인 의사결정 방안이 미비하고 이 역시 토양 오염물질의 정화만을 염두에 두고 있다는 한계가 있다. 본 연구에서 소개한 의사결정체계는 위해저감기술을 활용하여 부지의 위해도를 목표위해도 이하로 유지하면서 토양 정화의 '시기'를 조절하도록 하는 방안이다. 이 방안은 토양 정화의 '수준'과 '범위'는 토양오염우려기준을 따르도록 하여 깨끗한 토양 자원을 보존한다는 토양환경보전법의 취지를 유지하고, 기존의 토양정화에 따른 이해관계의 충돌을 방지할 수 있다. 또한, 본 오염부지 위해관리체계를 적용하면 기술적, 물리적으로 오염토양에 대한 정화를 수행할 수 있을 때까지 위해도에 기반해 오염부지로 인한 수용체 악영향을 관리하도록 함으로써, 수용체 중심 오염 관리리는 위해성평가 제도의 장점을 토양환경보전법의 체제하에서 최대한 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지중환경오염-위해관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2018002450002). 또한, 서울대학교 공학연구원의 기술적 지원에도 감사드립니다.

References

국립환경과학원, 2015, 토양오염부지 위해성평가 시범사업 및 선진화 방안 연구('15), NIER-SP2015-398.

국립환경과학원, 2017, 폐기물공정시험기준: ES 06151.1 상향류 투수방식의 유출시험.

박용하, 황상일, 정슬기, 2016, 토양정화 곤란부지의 최적 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원.

환경부, 2009, 토양정밀조사지침, 환경부고시 제2009-181호.

환경부, 2018, 토양오염물질 위해성평가 지침, 환경부고시 제2018-184호.

환경부, 2019a, 부지 및 오염 특성에 따른 위해노출농도 결정기술 개발.

환경부, 2019b, 포화대 회석-저감 특성을 반영한 오염물질 위해노출농도 결정기술 개발.

환경부, 2020, 토양환경보전법, 법률 제16613호.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 2013, Standard Test Method for Determining the Antimicrobial Activity of Antimicrobial Agents Under Dynamic Contact Conditions, ASTM International. West Conshohocken, PA. ASTM

E2149-13a.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 2016, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International. West Conshohocken, PA, ASTM D5084-16a.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 2017, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM D1633-17.

ISO (International Organization for Standardization), 2007, ISO/TS 21268-3: Soil quality – Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials. Part 3: Up-flow percolation test.

Jeong, B., An, J., and Nam, K., 2020, Time series analysis for determining ecologically acceptable Cu concentration from species sensitivity distribution with biotic ligand models in soil pore water, *Environ. Eng. Res.*, **26**(2), 200021.

Kelley, M.E., Brauning, S., Schoof, R., and Ruby, M., 2002, Assessing Oral Bioavailability of Metals in Soil, Battelle Press, Columbus, OH, USA, 75-85.

Lee, H., Yu, G., Choi, Y., Jho, E.H., and Nam, K., 2017, Long-term leaching prediction of constituents in coal bottom ash used as a structural fill material, *J Soil Sediment*, **17**(12), 2742-2751.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), 2006, OECD guidelines for the testing of chemicals section 2: Effects on biotic systems.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem.*, **51**(7), 844-851.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1994a, Catalogue of standard toxicity tests for ecological risk assessment. Office of Solid waste and Emergency Response. 9345.0-051.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1994b. Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste. Physical/Chemical Methods, SW-846.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2012, Institutional Controls: A Guide to Planning, Implementing, Maintaining, and Enforcing Institutional Controls at Contaminated Sites, OSWER 9355.0-89 EPA-540-R-09-001.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2017, Validation assessment of the in vitro arsenic bioaccessibility assay for predicting relative bioavailability of arsenic in soil and soil-like materials at Superfund Sites.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2020, Regional Screening Levels (RSLs), Available at <https://>

www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide.

Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., and Adriano, D.C., 2001, Arsenic fractionation in

soils using an improved sequential extraction procedure, *Anal. Chim. Acta*, **436**(2), 309-323.