

지하수 및 토양오염 가능성의 평가방법 고찰

박준범 (서울대학교 토목공학과 교수)

이종진 (한국수자원공사 조사기획처 대리)

1. 머리말

우리 나라에는 현재 생활 및 산업폐기물의 과반수 이상이 매립 처리되고 있으나, 비위생적으로 처리된 수많은 매립지로 인하여 지하수 및 지표수를 오염시키고 있는 실정이다. 1980년대 이후 1996년까지 사용 종료된 매립지는 확인된 것 만해도 전국적으로 873개소에 달한다. 더구나 매립지의 대부분이 농경지, 임야나 주거지역에 인접해 있으며 상수원 부근에 위치한 경우도 상당수 조사되고 있다.

이러한 비위생매립지의 철저한 사후관리를 위한 대책 수립이 시급하나, 오염문제를 해결하는데 소요되는 막대한 인적, 물적 재원을 정확히 추정하기 어려울 뿐 아니라 한정된 정부예산을 합리적으로 집행할 어떤 기준이나 모델도 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 오염부지로 인한 공중보건 및 생태계에의 위협을 해결하기 위해 보수해야할 오염부지를 선정하여 우선 순위를 정하는 것이 필요하다.

실제로 최근에 토양과 지하수의 오염가능성은 중요한 고려사항이 되고 있을 뿐만 아니라, 오염원이나 오염가능성이 농후한 오염원에 대한 조사와 평가가 요구되고 있다. 그러나 광범위한 감시체계를 설정, 운영하는 데는 막대한 비용과 시간이 소요되므로 지하수 자원 오염에 대한 수리지질학적인 취약성 조사 및 평가방법에 관심을 두게 되었다. 그 결과, 토양과 지하수의 오염을 평가하여 매립지의 입지선정이나 오염의 측정 및 감시, 보수계획에 널리 이용되고 있는 기법 중의 하나가 바로 경험적 평가방법 또는 간접 평가방법이다. 이러한 평가방법들은 지하수 오염을 상대적

으로 비교 평가하는 방법일 뿐 최종적인 평가법은 아니다. 그러나, 최소한의 이용 가능한 자료로 경제적 평가를 실시할 수 있는 접근법임에는 틀림없다(한정상, 1998).

토양과 지하수의 오염가능성은 오염물질의 특성과 지하수계의 오염취약성 등 복합적 요소에 따라 달라지며, 결정적인 자료가 결손된 경우 평가자의 경험과 수리지질학적 지식에 의존할 수밖에 없다. 따라서 이 평가 기법들을 이용하여 오염 가능성을 평가할 때는 상당한 전문 지식과 판단이 필요하다. 본 글에서는 외국에서 이용되고 있는 주요 평가방법들을 소개하고, 외국의 위해성평가 경향과 국내에 적합한 평가방법 개발의 필요성에 대하여 고찰하였다.

2. 외국의 평가방법

(1) 지표저류시설 평가 (Surface Impoundment Assessment, SIA)

이 방법은 Legrand(1964)가 개발한 방법으로써 적용 가능한 분야는 폐수저류시설, 정화조와 액상저류시설인 pit, pond 및 lagoon 등이다. 실제 이 방법은 액상폐기물 저류시설로부터 누출된 액상오염물질이 주변 지하수환경을 오염시킬 수 있는 가능성을 비포화대의 수리특성, 포화대 내에 저류되어 있는 지하수의 수리지질특성, 저류지 부근에 분포된 지하수의 수질특성과 액상 폐기물의 특성 등 네 가지 인자에 대하여 평가한다. 평가점수는 비포화대에 0~9점, 포화대는 0~6점, 지하수수질은 0~5점, 폐기물 오염물질 특성은 1~9점을 부여할 수 있다.

네 가지 인자에 대한 점수를 모두 합하면 최소 1점에서 최대 29점까지의 평가 점수가 산출된다. SIA는 평가점수가 높을수록 주변 지하수환경에 미치는 악영향이 크다.

(2) 지하수오염가능성 평가 (DRASTIC)

이 방법은 1987년 미환경청(EPA)과 미국지하수협회(NGWA)에서 개발한 것으로 일정한 지역의 지하수오염 가능성을 평가하기 위해 이와 관련되는 요인들의 영향을 수치적으로 평가하고 전체 인자들의 영향을 종합적으로 평가하는 방법이다. DRASTIC은 지하수의 이동에 영향을 미치는 지하수위(Depth of water), 지하수 함양량(Recharge), 대수층 구성물질(Aquifer media), 토양의 구성물질(Soil media), 지표의 경사 및 굴곡 상태(Topography), 비포화대의 구성물질(Impact of the vadose zone), 대수층의 수리전도도(Conductivity of aquifer)의 7가지 인자에 대해 고려한다. 오염 가능성이 적은 경우에 낮은 점수를 받게 된다.

각 인자들을 살펴보면 다음과 같다.

① 지하수위

지하수가 지표로부터 깊을수록 낮은 점수를 갖는다. 지표에서 지하수까지의 깊이가 깊을수록 오염물질의 이동거리가 길어지고 이동시간이 지체되어 오염물질이 이동 중에 희석될 확률이 높기 때문이다.

② 지하수함양량

지하수 함양량이 많을수록 오염물질을 더욱 쉽게 이동시켜 지반의 오염가능성을 높이므로 지하수 함양량이 적을수록 낮은 점수를 갖는다.

③ 대수층 구성물질

일반적으로 대수층에서 입자 크기가 크고 균열이 많으면 투수성이 커서 대수층에서 오염물질의 지체효과가 작아지므로 높은 점수를 갖게 된다.

④ 토양의 구성물질

입자크기가 작아질수록 오염가능성이 작아진다. 점수는 자갈(Gravel)이 가장 높고, 모래, 실트, 점토의 순으로 점토가 오염가능성이 가장 작다.

⑤ 지표의 경사, 굴곡 상태

경사가 급하면 유출에 의하여 지반으로 침투하지 않고 흘러간다. 따라서 경사가 급할수록 낮은 점수를 받는다. 보통 2% 이하의 경사로 된 지역은 오염가능성이 가장 높고, 18% 이상의 경사지는 오염물질의 지표유입 가능성이 적어 가장 낮은 점수를 갖는다.

⑥ 비포화대의 구성물질

vadose zone이 어떠한 물질인가에 따라 점수를 결정한다. 자갈>모래>실트>점토의 순으로 오염 가능성이 감소하므로 낮은 점수를 받는다.

⑦ 투수성

투수계수가 작을수록 낮은 점수를 갖는다. 일반적으로 자갈>모래>실트>점토의 순으로 낮은 점수를 받는다.

7개의 인자들에 대한 평가가 끝나면 각 인자의 점수에 각각 가중치를 곱하여 총합계를 계산하게 되는데 이를 DRASTIC Index라고 하며, 이것이 작을수록 오염가능성이 적은 것이다.

(3) 매립지의 오염가능성 평가 (Landfill Site Rating)

이 방법은 폐기물 매립지의 입지 선정 시 여러 개의 후보지 중에 주변 지하수환경에 악영향을 가장 적게 미칠 수 있는 부지를 선정할 때 이용되고, 여러 개의 기존 매립지 중에서 정화의 우선 순위를 결정하는 데에도 이용되는 방법으로 Legrand-Brown 평가법 또는 폐기물 처분장 평가의 표준시스템이라고도 불린다.

이 평가법에서 사용되는 인자는 오염원과 주변용수 취수지점 사이의 거리, 지하수면의 분포심도, 지하수의 동수경사와 오염원과의 방향, 오염물질이 거동하는 지표 아래 대수층의 수리성과 저감능 등 4가지이다. 평가방법은 각각의 인자에 대하여 점수를 부여하며, 이때 점수가 높을수록 지하수환경에 대한 오염가능성이 크다.

(4) 폐기물, 비포화대와 매립부지의 상호연관 행렬식평가법 (Waste-soil-site Interaction Matrix)

육상 산업폐기물 처분장과 액상폐기물 처분장의 위

해성을 평가하기 위해 개발된 것으로 폐기물과 관련된 10개의 인자와 부지와 관련된 7개의 인자를 행렬 표로 작성하여 평가하는 방법이다. 평가부지가 각종 폐기물 처분장으로서 적합한지의 여부를 판단하는데 이용된다.

폐기물에 관련한 인자들은 인간에게 미치는 독성(0~10점), 지하수에 미치는 악영향(0~10점), 질병전파형태(0~10점), 화학적인 지속성(1~5점), 생물학적인 지속성(1~4점), 흡착성(1~10점), 점성(1~5점), 수용성(1~5점), 산도/알칼리도(0~5점), 폐기물의 부하율(1~10점)로서 10가지이며 각 인자에 대하여 점수를 부여한다.

부지 내에 분포된 토양군은 토양의 투수성(2.5~10점), 토양의 흡착성(1~10점)에 따라 수리지질군은 지하수위(1~10점), 동수경사(1~10점), 침투율(1~10점)에 따라, 부지군은 거리(1~10점), 다공질지층의 두께(1~10점)에 따라 등위점을 부여한다. 이때 오염에 대하여 위해성이 크면 높은 점수를 부여한다.

폐기물에 관련한 인자들의 점수와 부지군의 각 항목에서 할당된 점수를 서로 곱하여 폐기물-토양-매립 부지의 상호연관행렬표를 작성한다. 이 방법의 최소 점수는 45점이고, 최대점수는 4,380점이다. 여기서 평가점수가 500 이상이 되면 문제 부지로 구분한다.

(5) 부지점수화 평가법 (Site Rating Methodology, SRM)

SRM은 super-fund site의 정화 우선 순위를 결정하기 위해 사용된 평가법이다. 이 방법은 1개 매립지의 위해 가능성을 점수화하여 평가하는 시스템인 점수요인시스템(rating factor system), 부지가 가지고 있는 특수한 문제에 근거하여 점수화한 것을 추가 보정하는 시스템인 추가적 점수 시스템(additional points system), 점수화한 것을 합리적으로 해석하는 시스템인 점수조정시스템(scoring system) 등 세 가지 단계의 시스템으로 구성되어 있다.

점수요인 시스템에서는 수용체, 노출경로, 폐기물의 특성, 폐기물 관리방식의 네 가지로 분류된 31개의

인자들에 대해 위해가능성 정도에 따라 0에서 3까지의 점수를 부여한다. 0은 전혀 잠재 위험이 없는 경우이고, 3은 잠재위험 가능성이 매우 높은 것으로 구분하였다.

추가정보시스템은 점수요인 시스템에서 다루지 못한 평가대상시설물의 위치, 설계 및 운영에 관한 세부적인 형태를 다룬다. 각 점수요인에 추가적으로 부여할 수 있는 점수는 수용체부분에는 최대 50점, 노출경로부분에는 최대 25점, 폐기물 특성부분에는 최대 20점, 폐기물 관리형식부분에 최대 30점까지 부여할 수 있다.

최종 점수조정시스템은 부지를 평가하기 위해 점수화 한 앞의 두 단계의 총 점수를 이용한다. 총 점수를 최소 0에서 최대 100점이 되도록 조정한다. 이때 총 점수가 100점에 가까울수록 위해 가능성이 큰 것이고, 0점에 가까울수록 위해 가능성이 낮은 것이다.

(6) 부지점수화 등위시스템 (Site Rating System, SRS)

Hargerty, Pavoni, Heer Jr.가 1973년에 개발한 평가 기법으로서 산업폐기물 매립지의 입지선정과 산업폐기물 매립지의 주변 환경오염가능성 평가에 이용된다. 이 방법은 폐기물-비포화대-매립부지의 상호연관행렬평가법과 유사하게 토양군, 지하수군, 대기군으로 구성되어 있고 각 군마다 순위등급 요인 및 점수가 할당되어 있다.

토양군의 평가인자는 침투성(0.02~20점), 매립지 저면의 누수가능성(0.02~20점), 여과능(0~16점), 흡착능(0~16점)의 4가지이고, 지하수군의 평가인자는 유기물함량(0~10점), 완충능(0~10점), 잠재이동거리(0~5점), 지하수의 유속(0~20점) 등 4가지이며, 대기군의 평가인자는 풍향(0~5점), 인구요인(0~7점)의 2가지로 구성되어 있다. 각 군의 구성요인을 평가한 점수의 합은 최대점수가 129점이며 점수가 높을수록 위해 가능성이 크다.

(7) 농약지수법 (PESTICIDE Index)

지하환경에 가장 크게 영향을 주는 농약의 특성은

농약의 수용성, 용융점, 증기압, 헨리상수, K_{ow} , 흡착 계수, 반감기, 분자량 등이다. 농약사용이 지하수 환경에 미치는 영향을 평가하려면 1일 강수량, 증발산량, 온도, 일조량 등의 기상자료와 지하수위, 대상지질의 건조단위중량, f_{oc} , 간극률 등의 토양특성 뿐만 아니라 식생정보들이 필요하다.

그래서 Rao, Hornby, Jessup이 1985년에 앞서 설명한 복잡한 지역특성인자를 사용하지 않는 평가법을 제시하였는데 이것이 농약지수법(Pesticide index)이다. 이 평가법은 단지 농약이 식생의 뿌리대에서 그 주변 비포화대로 거동하는 경우만을 평가한다.

(8) 지하수 오염 취약성도 (The Groundwater Vulnerability Map)

지하수 오염 취약성도는 1985년 벨기에의 Flemish 지역에 있는 3개 종합대학의 수리지질전문가에 의하여 제안되어 Flemish지역에 적용한 방법이다. 이 지도는 환경관련 업무에 종사하는 이들에게 배포되어 광역적인 지하수 보호계획 수립 및 지하수 보전에 필요한 규제조항과 토지이용 행위 제한을 결정하는 중요한 지침서로 이용되고 있다.

지하수 오염 취약성도는 대수층의 구성암석(4단계), 토양층의 성상(3단계), 지하수의 분포심도(2단계) 등 세가지의 평가 인자를 조합하여 16개로 오염취약성을 지수화하고, 이에 따라 최종적으로 5등급으로 지하수 오염취약성도를 등급화 하였으며, 오염취약성의 심한 정도에 따라 적색으로부터 암청색으로 도면상에 색칠하여 작성한다.

이 지도에 따르면 오염취약성이 높은 지역에서 건축물을 신축하거나 소규모 주거단지 등을 건설할 때는 지하수 개발을 억제하고 있다. 특히 쓰레기 매립장이나 건설사업 예정부지는 특별한 보전대책을 수립토록 규정하였으며, 생활하수인 경우에는 반드시 처리 시설 설치를 유도하며 가능한 한 지하수의 오염 위험이 낮은 지역에 이용시설 건설을 유도하고 있다.

(9) 토양-대수층의 현장 평가법 (Soil/Aquifer Field Evaluation, SAFE)

1986년 Roux 등은 농약에 의한 지하수환경의 오염취약성을 평가할 수 있는 방법으로 토양과 대수층의 오염취약성 평가법을 고안하여 발표하였다. 이 방법은 평가대상 지역에 분포된 토양특성과 토양하부에 분포된 비포화대의 특성을 이용하는 것이다.

1단계로 오염민감 대수층(sensitive aquifer) 분포도를 작성하는데 주대수층의 지표노출 구간이나 천부 오염지하수와 지하에서 접촉하고 있는 주대수층의 지하접촉구간은 일종의 오염민감 대수층 분포구간이기 때문에 이들 분포상태를 지형도 상에 작도한다. 2단계로 수리전도도 등을 이용하여 오염 우심 토양(susceptible soil) 분포도를 작성한다.

SAFE 기법으로 작성한 최종 지하수 오염취약성도(vulnerability map)는 농약사용에 따른 하부 지하수 오염가능성 평가는 물론 각종 오염감시 프로그램을 계획하는데 사용할 수도 있다.

3. 외국의 평가 경향

선진 산업화된 국가들은 오랜 산업화 역사로 인하여 각각의 국가 상황에 따라 이미 나름대로의 시행기준과 위해성 평가 방법을 가지고 있다. 대부분의 국가에서는 오염지역 복원에 있어서 이미 결정된 조사방법, 사전 위해성 평가나 오염지역의 분류기준을 사용하고 있다.

이들 중 일부에서는 오염지역의 복원을 위한 우선 순위를 결정하기 위해서 미리 정해진 특정 형태의 위해성 평가를 사용하는 경향이 있으며, 이러한 우선 순위는 오염물질의 종류, 토지 이용과 연계된 노출경로, 취약한 수용체나 다른 요소들에 따라 결정된다.

또다른 경향은 토양질의 일반기준을 적용하는 것이다. 일반기준은 빠르고 간편한 실행, 각 지역에 대한 일관성, 일차정보를 이용하는 계획 실행의 용이성, 복원과 오염물질 제거를 수행하는 현장업자들의 지지, 환경기준에 대한 전략을 이용한 잠재적인 일관성, 오

염지역에 대한 감시도구로서의 적합성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 선호되기도 한다.

그러나, 토양오염을 심각한 문제로 인식하고 있는 국가들은 특정지역의 위해성 평가 방법과 일반기준의 사용에 관한 균형점을 찾으려 하고 있다. 즉, 토양질 기준을 사용할 때 문제점으로 대두되는 것은 그 지역의 특정조건을 어떻게 감안할 것인가이며, 위해성에 근거한 기준은 위해성 평가모델이 과학적인 접근법임에는 틀림없지만 무리하게 적용할 경우 낭비성 오염 대책을 초래할 수 있다는 것이다(황대규, 정문경, 1998).

미국에서는 오염된 토양을 특정지역의 위해성 평가(site specific risk assessment)를 이용하여 평가하는 반면, 네덜란드는 오염토양의 처리를 위하여 수리적 기준인 ABC-list를 종종 일반기준으로 사용하고 있다. 이러한 차이는 미국과 네덜란드의 국가환경의 차이에서 비롯되었다고 할 수 있다. 오염된 지역이 넓으며 대부분 인구밀도가 낮은 미국에서는 오염된 지역이 주변환경에 미치는 영향이 가장 중요하다. 이러한 상황이 위해성에 관한 집중적인 연구와 위해성의 복원실행을 야기하게 되었다.

반면에, 오염지역의 규모가 적은 네덜란드에서는 이러한 좁은 지역을 대상으로 하는 세부적인 특정지역의 위해성 평가는 오염원인을 제거하고 깨끗한 토양으로 대체시키는 비용과 비교하여 비경제적이다. 또한 많은 지역이 주거지역이기 때문에 정부 및 사업주체의 의사결정에 대하여 주민으로부터의 압력이 상당하며, 그 지역의 거주자들과 관련한 위해성은 종종 가장 우선적으로 해결해야 할 부분이 된다. 더구나 조밀한 인구밀도로 인하여 오염지역은 대부분 가능한 빨리 다시 이용되어야만 한다. 이러한 상황에서는 일반적인 기준이 보다 쉽게 선택될 수 있다.

지난 10여년 간의 오염토양을 다루어본 이들 국가들의 경험은 두 가지 접근방법에 대한 찬반양론에 대한 일반적 인식을 나타내게 되어 네덜란드에서도 특정지역의 위해성 평가 방법이 이미 사용되고 있으며, 미국의 몇 개 주에서는 현재 네덜란드에서 가치가 인정된 일반기준과 유사한 체계를 개발하고 있다.

현재 국가별로 개발된 오염토양에 대한 접근방법은 다양한데 일반기준을 절대적으로 사용하는 국가가 있는가 하면 덴마크와 같은 국가에서는 복원작업에 대한 결정은 미리 선정된 일반기준과 병행하여 해당지역의 위해성 평가 방법을 적용하고 있다. 이때 토양질 기준이 토양복원 기준으로 이용되기도 한다. 핀란드에서는 해당지역의 복원처리 우선 순위를 선정하기 위해 위해성 평가를 사용하고 있으며, 캐나다는 해당지역에 따른 특정 복원목표를 이용한다.

이러한 방법은 인체의 건강과 환경 위해성에 근거한 수리적 기준의 형태로 나타나 있다. 이 경우 특정 상황에서는 위해성 평가를 이용하는 복원목표의 설정이 가능하다(환경부, 1998).

4. 국내 적용에 적합한 평가방법의 개발 필요

이상에서 살펴 본 바와 같이 선진 국가들은 이미 각국의 상황에 따라 다양한 평가 방법을 개발하여 사용하고 있으나, 우리나라는 일반기준의 적용이 시작 단계이며, 위해성 평가를 위한 검토가 진행 중으로 초보적 단계라 할 수 있다. 실제 위해성 평가시 우리나라의 경우 독특한 지리, 경제, 사회적 특성으로 인하여 외국에서 이미 개발된 기법을 그대로 적용하기에는 불합리한 점이 많다. 따라서 막대한 비용이 들어가는 오염평가 문제에 대한 효율적 정책 수립을 위해 국내 실정에 맞는 평가방법을 개발하는 것이 절실한 시점이다.

여러 가지 요인들 중에서 지하수의 오염가능성 또는 취약성에 초점을 맞추어 보면, 우리나라에서는 첫째, 좁은 국토에 높은 토지 이용률로 인하여 오염된 지역이 빠른 시일 안에 다시 이용될 수 있도록 하는 정화방법이 선호될 것이며, 주변의 환경보다는 인근 지역 주민에 미치는 유해성이 우선적으로 고려될 수밖에 없다. 둘째, 무더운 우기와, 추운 건기가 극명하게 교차하는 우리나라의 몬순기후는 대상지역의 지하수 및 지표수의 흐름, 생화학적 분해도 등에 대단히 큰 영향을 미친다. 셋째, 요즘 시행되고 있는 곡간 매립의 경우 산지에 건설되는 특징을 고려해야 한다. 즉

상대적으로 좁은 평가 대상지역, 깊은 지하수위, 급경사의 동수구배, 화강풍화토가 많이 함유된 토양층, 빈번한 습곡 및 절리의 발달 등은 기존 방법의 적용을 곤란하게 할 수 있다. 마지막으로 우리 나라의 경우에는 오염토양 및 오염지하수를 다룬 경험이 적고 전반적인 인식이 부족하여 평가에 필요한 기본적 자료조사가 미흡하므로 평가방법의 개발시에는 이러한 여건

을 충분히 고려해야 하며, 광범위하고 지속적인 자료조사 및 측정이 시급하고도 중요한 과제이다.

이상과 같은 우리 나라의 독특한 상황을 고려할 때 기존의 방법에 적용된 평가인자의 재설정이 불가피할 뿐 아니라 가중치나 조합 방법들도 상황에 맞게 다시 검토하여야 할 것이다. ●

참고문헌

1. 김병태, Robert M. Cowan, 오근찬, "자연내재복원 기술(Intrinsic Remediation) 적용을 위한 오염지역 평가과정 개발", 한국토양환경학회지, Vol.2., No.3 3-21, 1997.
2. 환경부, "오염토양보원기술 및 제도 발전에 관한 연구용역", 1998.
3. 홍상표, 김정욱 "수자원오염 특성에 의한 불량매립지 예비평가모형 정립", Vol.4., No.1 17-23, 1995.
4. 한정상, "지하수환경과 오염" pp. 677-734, 1998.
5. US EPA, "DRASTIC : A Standardized System for Evaluation Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting, EPA/600/2-87/035, 1987.
6. Yacov Y. Haimes, "The consideration of risk and uncertainty in management of groundwater contamination", Internation Conference on Groundwater Contamination, pp. 41-46, 1987.
7. 황대규, 정문경, "미국의 시행착오로 본 국내 토양오염 대책의 제언", 대한토목학회지, 제46권 제8호, pp. 6-15, 1998.