

토양·지하수오염원 관리우선순위 개략평가기법 개발

정승우¹ · 김영주² · 김재훈³ · 황상일^{2*}

¹군산대학교 환경공학과
²한국환경정책·평가연구원
³이앤위즈(주)

Development of Preliminary Assessment Methodology for Priority Listing of Soil and Groundwater Contamination Sources

Seung-Woo Jeong¹ · Young Ju Kim² · Jae Hoon Kim³ · Sang Il Hwang^{2*}

¹Department of Environmental Engineering, Kunsan National University
²Korea Environment Institute
³Environmental & Whole Information System

ABSTRACT

This study developed preliminary assessment methodology for priority listing of soil and groundwater contamination sources, considering source characteristics, local environments and risk receptors. Source characteristics were evaluated by scoring relative risk of contamination sources. Local environments were evaluated by scoring annual rainfall, hydraulic conductivity of aquifer, and annual groundwater use. Risk receptors were evaluated by scoring local population, direct distance to surface water, direct distance to drinking-water wells. Scores of each parameter were allocated by analysing distribution of parameter values obtained from government databases. Distributed scores of source characteristics local environments: risk receptors were 12 : 12 : 12. The preliminary assessment scored 0 to 36 for each soil and groundwater sources. Inventory of soil and groundwater sources consisted of 7 categories. This study applied the preliminary assessment methodology to Manan-Gu, Anyang City, Korea. The number of car repair and washing facility was the largest in the contamination source inventory. Petroleum storage facilities showed the highest assessment score. The preliminary assessment methodology also indicated that Anyang-Dong was the priority section among Anyang-Dong, Suksu-Dong, Bakdal-Dong. This study is the first trial for relative ranking soil and groundwater contamination sources by considering source and local characteristics. Therefore, further researches and revision of the preliminary assessment methodology need to be pursued for various applications.

Key words : Soil and groundwater, Contamination sources, Inventory, Priority listing, Preliminary Assessment Methodology

1. 서 론

산업의 발달과 함께 인간 활동에 의해 수많은 화학물질이 사용되면서 이들 물질에 의한 토양·지하수오염이 심각한 사회문제로 대두되었다. 토양·지하수오염은 다양한 기능을 저해함으로써 장래 국토 이용의 효율적인 활용에 큰 장애가 된다. 일단 오염된 토양·지하수는 원상회복이

어려우며 정화에 막대한 예산이 필요하고 사람이나 환경에 지속적인 피해를 준다. 토양·지하수오염을 합리적으로 관리하고 정화하기 위해 오염원 및 오염물질을 확인·평가하는 토양·지하수 오염원 관련 인벤토리를 구축하고 관리 우선순위를 선정하여 국가적 차원의 통합적인 대처가 필요하다. 구축된 토양·지하수 오염원 인벤토리 및 우선 관리 대상 평가는 토양오염 실태조사 후보로 선정하

*Corresponding author : sangilh@kei.re.kr

원고접수일 : 2011. 12. 14 심사일 : 2011. 12. 16 게재승인일 : 2011. 12. 16
질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지

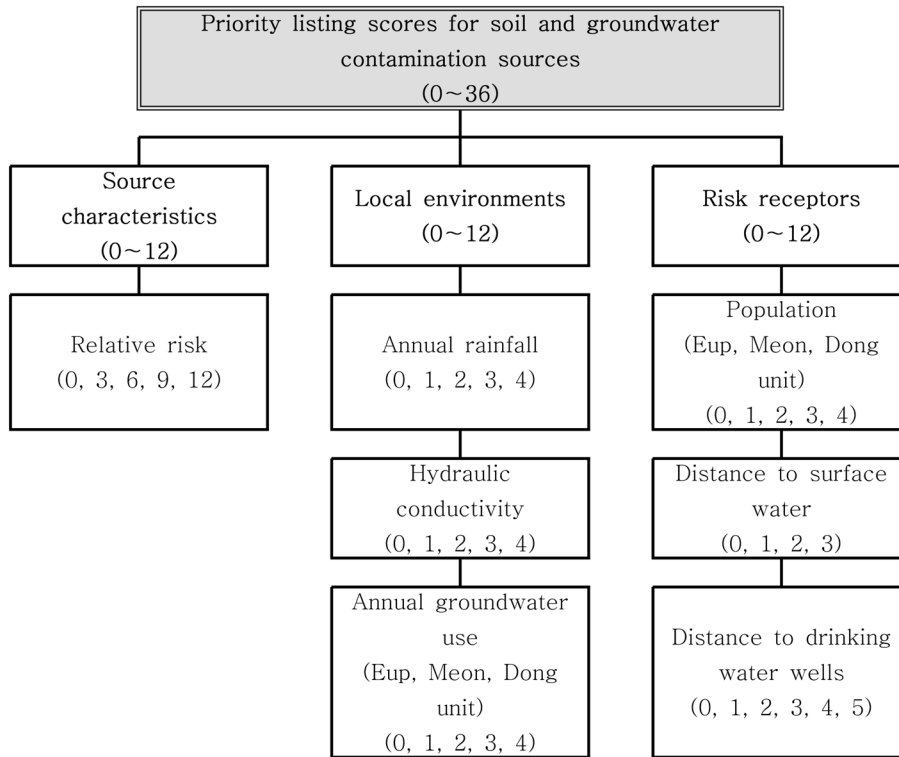


Fig. 1. An algorithm of preliminary assessment methodology for soil and groundwater contamination sources.

거나 중앙정부 및 지자체에서 오염원 관리 정책수립의 근거자료로 활용할 수 있다. 또한 신규 산업단지 및 매립지역 등의 입지 선정시 오염유발 최소화를 위한 적지분석자료 및 지하수측정망을 신설·조정하는데 활용이 가능하다.

국외에서는 토양·지하수오염원 인벤토리 구축을 위한 연구가 많이 진행되었으며(US EPA, 1991; UNESCO, 2002; Demetriades et al., 2007), 인벤토리 구축을 통해 오염현황을 확인하고 검증하여 우선순위평가가 이루어지고 있다. 하지만 국내에서는 토양·지하수 오염원 및 오염물질에 대한 정보수집 및 체계적인 관리를 위한 인벤토리가 구축되어 있지 않고, 휴·폐금속광산 및 산업단지 등 특정 지역에 대해서만 토양오염실태조사나 오염도 조사가 제한적으로 진행되어 왔다.

따라서 본 연구는 국내 실정에 맞는 토양·지하수오염원 관리우선순위 선정을 위한 개략평가기법을 구축하고 시범조사지역에 적용함으로써 관리우선순위 선정기법의 적합성을 검증하고 국가적 차원의 토양·지하수오염원 인벤토리 구축을 제안 하고자 한다. 이를 위해 토양·지하수오염원 인벤토리 구축에 우선적으로 필요한 오염원 분류체계는 이전 연구(안정이 외, 2010)의 분류체계(안)를 토대로 본 연구에 적합하게 수정·보완하였으며 오염원

관리우선순위 선정기법을 개발하여 안양시 만안구에 시범 적용 하였다.

2. 토양·지하수 오염원 개략평가 방법

2.1. 관리우선순위 선정 알고리즘

토양·지하수 오염원관리 우선순위 선정 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 오염원관리 우선순위 선정을 위해 3가지 범주의 평가인자를 결정하였다. 3가지 범주는 오염원특성, 지역특성, 수용체특성으로 구성된다. 전체 점수는 0~36점까지 분포하게 되며, 오염원특성:지역특성:수용체특성 비율은 12:12:12로 구성되어 있다.

각각의 세부인자에 따른 분류등급과 점수는 Table 1에 나타내었다. 구체적 평가인자로는 첫째, 오염원특성에서 오염원의 상대적 위해도를 결정하였다. 두 번째 범주의 지역특성인자로는 강수량, 수리전도계수, 지하수이용량이었다. 토양·지하수오염원 인벤토리 지역내 오염물질의 상대적 확산 및 이동성 등에 영향을 주는 대표적 인자로서 평가하고자 하였다. 세 번째 범주는 수용체특성으로서 읍, 면, 동 단위 인구수와 지표수와의 거리, 음용 지하수관정과의 거리였다. 인벤토리 평가지역내 인구수와 음용 지하

Table 1. Factor scores of preliminary assessment methodology

Group	Factor	Classes	Scores	Remarks
Source characteristics	Relative risk	High	12	
		Medium	9	
		Low	6	
		Not classified, but listed	3	
		Not classified and listed	0	
	Annual rainfall (mm)	> 1,600	4	Korea Meterological Administration http://www.kma.go.kr
		1,400 ~ 1,600	3	
		1,200 ~ 1,400	2	
		1,000 ~ 1,200	1	
		< 1,000	0	
Local environments	Groundwater hydraulic conductivity (cm/day)	> 500 이상	4	Intergrated Goundwater Information Services (http://www.gims.go.kr) National Groundwater Network Report
		250 ~500	3	
		100 ~250	2	
		50 ~100	1	
		< 50	0	
	Annual groundwater use (Eup, Meon, Dong unit) ($\times 1000 \text{ m}^3/\text{년}$)	> 1,000	4	Intergrated Goundwater Information Services (http://www.gims.go.kr) http://www.gims.go.kr
		500 ~1,000	3	
		100 ~ 500	2	
		50 ~ 100	1	
		< 50	0	
	Population (Eup, Meon, Dong unit)	> 50,000	4	Korean census report http://www.census.go.kr
		25,000 ~50,000	3	
		10,000 ~25,000	2	
		5,000 ~10,000	1	
		< 5,000	0	
Risk receptors	Distance to surface water (m)	< 200	3	GIS for River Management System (RIMGIS) http://www.river.go.kr
		200~500	2	
		500~1,000	1	
		1,000 <	0	
		< 200	5	
	Distance to drinking water wells (m)	200 ~500	4	Drinking water wells information from Local authorities
		500 ~1,000	3	
		1,000 ~2,000	2	
		2,000 ~4,000	1	
		4,000 <	0	

수관정과의 거리는 오염물질로 인해 영향을 받는 인체위해성을 고려하고자 한 것이며 지표수와의 거리는 오염물질 이동 및 확산 등으로 인해 영향을 받을 수 있는 생태위해성을 고려하고자 한 것이다.

2.2. 오염원특성 인자

Table 2는 토양·지하수오염원 분류를 나타낸다. 오염원 분류체계는 이전 연구(안정이 외, 2010)의 분류체계(안)를 수정하여 주거에 의해 발생하는 오염원은 삭제하고

(특정)토양오염관리대상시설에 의해 발생하는 오염원을 추가하였다. 그 결과 오염원은 자연적으로 발생하는 오염원, 농업에 의해 발생하는 오염원, 도시에서 발생하는 오염원, (특정) 토양오염관리대상시설에 의해 발생하는 오염원, 상업에 의해 발생하는 오염원, 산업 또는 산업공정에 의해 발생하는 오염원, 군대에 의해 발생하는 오염원으로 총 7개 범주로 구분하였다.

각 범주마다 세부 오염원으로 나뉘지며 미국 펜실베이니아 주(Commonwealth of Pennsylvania, 2000), 캘리포니아

Table 2. Inventory categories for soil and groundwater contamination sources in South Korea

No.	Categories	Sources
1	Natural sources	- Natural radioactive sources (Radon etc) - Naturally abundant trace element regions (As etc)
2	Agricultural sources	- Irrigation channels - Livestock waste landfill - Livestock-raising facility - Pesticide and fertilizer storage facility - Agricultural land(Incl. Orchard) - Livestock waster water treatment facility - Compost area - Fuel storage (for agricultural)
3	Urban sources	- Wastewater treatment facility - Sewer - Landfill - Waste transfer station - Recycling/Reduction station - Incinerator - De-icing material storage facility for road - Groundwater wells
4	(Registered) Soil contamination sources	- Petroleum storage - Toxic chemical storage - Petroleum pipelines
5	Commercial sources	- Underground mines - Surface mines - Train maintenance station and railways - Bus terminal - Airport - Car washing facility - Car repair facility - Golf courses - Shooting ranges - Metal waste storage - Cemetary
6	Industrial and manufacture processing sources	- Mineral processing - Manufacturing - Electricity, gas, steam, drinking water business area - Sewage treatment, waste treatment, mineral extraction, remediation business area
7	Military sources	- Transport unit - Airplane unit - Resources unit - Ammunition unit - Training range - Dormitory - Medical unit - Tank unit - Maintenance unit - Cannon unit - Battleship area - Electric generation station

아 주(California Department of Health Services, 1999), 루지애나 주(Louisiana Department of Environmental Quality, 2002)의 문헌상 상대적 위해도 분류를 참고하여 위해도를 높음, 중간, 낮음, 무등급, 비오염원으로 구분하고 배점을 결정하였다. 축사 및 가축매몰지, 난방유 저장 시설, (특정)토양오염관리대상시설, 폐물과 고물야적장, 카센터, 비위생매립지, 석유판매소, 지정폐기물매립지 등은 “높음” 오염원의 위해도에 해당되며, 농경지, 폐기물재활용/감량시설, 소각시설, 골프장 등은 중간, 고속도로/도로 유지관리창고/제설시설, 공동묘지, 세차장 등은 “낮음” 위해도로 분류하였다. 상기 위해도 분류에 포함되지 않은 세부 오염원은 “무등급”으로 3점이 부여되었다.

2.3. 지역특성 인자

지역특성 인자로는 강수량, 수리전도계수, 지하수이용량으로 구분된다. 강수량은 토양오염물질의 발생과 토양·지하수 오염물질의 확산 및 이동에 지대한 영향을 미치는 요소이다. 도시 및 산업시설 또는 활동에서 발생하는 유기 및 무기물질은 강우시 토양으로 이동될 수 있으며 토

양내 축적된 토양오염물질은 강우에 의해 용해되고 이동하면서 오염의 범위를 보다 넓힌다(정승우 외, 2009). 본 연구에서는 우리나라의 1971년부터 2000년까지 30년간 강수량 평년값을 이용하여 5단계로 등급을 구분하고 배점을 부여하였다.

수리전도계수는 토양에서 유체의 흐름 정도를 나타내는 척도로 토양 매체의 특성뿐 아니라 유체의 특성을 포함하여 토양 지하수내 오염물질 이동 해석에 있어 가장 중요한 기초정보이다(Domenico and Schwartz, 1990). 수리전도계수 평가인자 범위는 국가지하수 정보센터(<http://www.gims.go.kr>)의 국가지하수 관측망 정보에서 총적층의 수리전도계수를 이용하여 5단계로 구분하여 상대적 오염물질 이동정도를 평가하였다.

지하수이용량이 많아지게 되면 지하수포획구간이 넓어지게 되고, 그에 따라 영향범위 또한 넓어짐을 의미한다. 본 연구에서는 2006년 국내 읍, 면, 동 단위 지하수이용량을 집계하여 지하수이용량 평가인자 등급을 5단계로 구분하였다.

2.4. 수용체특성 인자

수용체특성 인자로 인구는, 지표수와 의 거리, 음용 지하수관정과 의 거리로 구분된다. 평가지역내 인구는 인체 및 생태계 수용체특성을 고려한 토양·지하수 오염원 관리우선순위 선정을 위한 간접적 인체위해성 평가인자로 사용하였다. 읍·면·동별 인구는 각 인자에 대한 등급 분류를 위해 2005년 인구주택총조사결과(<http://www.census.go.kr>)를 이용하였다.

지표수와 의 거리는 오염물질 이동 및 확산 등으로 인해 영향을 받을 수 있는 수생태위해성을 고려하기 위해 선정하였다. 지표수 범위는 우리나라 국가 및 지방차천, 한국농어촌공사의 농촌용수종합정보시스템(RAWRIS)에 등록된 저수지, 한국수자원공사 운영 댐 저수지 등으로 정의한다. 지표수와 의 거리는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하여 지표면의 고도차에 따른 유효 거리를 이용하여 산정하였다. 지표수와 의 거리는 현재 각 지역별 하천과의 거리에 대한 통계가 유용한 것이 없으므로 외국 문헌에 기초하여 200 m 이내에 하천이 존재할 경우 영향이 있는 것으로 보고 등급화 하여 배점을 결정하였다(Conant, 2000).

음용 지하수 관정과 의 거리는 오염물질로 인한 보다 직접적인 인체 위해성을 반영하기 위한 인자로 음용 관정을 통해 공급되는 식수 및 용수를 통해 인체에 직접적인 영향을 미친다. 음용 지하수 관정의 위치정보는 시·군·구청 관정현황자료에서 용도가 음용인 관정의 주소와 연속지적도를 결합시켜 생성한다. 오염원으로부터 가장 가까운 음용 관정까지의 거리를 직선거리로 계산하였다.

3. 시범평가

오염원의 인벤토리 작성은 대상지역의 규모 및 면적에 따라 달라지며, 농촌지역인지 도시지역인지 여부에 따라 서로 크게 달라질 수 있다. 본 시범평가는 도시지역의 오염원 특성을 반영하기 위해 토양·지하수오염원 관리우선순위 개략평가기법을 안양시 만안구 지역에 시범평가 하였다.

3.1. 분석을 위한 자료구축

안양시 만안구는 박달동, 석수동, 안양동으로 구성되어 있다. 오염원특성 인자인 오염원의 위치 파악을 위해 안양시청의 관계 부서를 대상으로 오염원 자료를 수집하였다. 오수처리시설·정화조 설치 신고서, 자동차정비업소 등록 신청서, 폐기물처리시설 설치 승인서 등의 관련 주

요 인허가·신고자료와 새울행정정보시스템을 이용하여 만안구에서 취득 가능한 오염원 자료를 구축하였다. 또한 수질오염원에 대해 매년 정기적으로 작성되는 ‘전국오염원조사자료’와 ‘화학물질배출량조사자료’를 국립환경과학원으로부터 수집하여 오염원을 파악하였으며, 토양지하수 종합정보시스템(<http://sgis.nier.go.kr>), 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 기 구축된 데이터를 수집하여 상호 비교함으로써 누락된 오염원 목록이 발생하지 않도록 하였다.

3.2. 오염원 위치정보 및 GIS자료 구축

GIS를 이용하여 오염원으로부터 거리를 산정하기 위해서 오염원의 위치정보를 구축하였다. 먼저 수집한 오염원 자료의 인·허가 신고서 자료의 주소정보가 행정동으로 기재된 경우는 법정동 주소체제로 변환하여 연속지적도의 지적코드로 변환이 가능하도록 수정하였다. 오염원의 위치정보는 오염원자료의 사업장 주소를 연속지적도에서 사용하는 지적코드로 변환하여 연속지적도의 지번코드와 매칭하여 위치정보를 생성하였다.

추출된 폴리곤 형태의 오염원의 위치를 지번 중심점 좌표로 포인트 주제로 변환한 다음, DEM을 이용한 유효 거리 산정을 위해 30 m × 30 m의 격자로 변환하였다. 음용 지하수 관정 정보는 관정현황자료 중에서 용도가 음용으로 파악된 관정을 추출하여 생성하였다.

오염원으로부터 지표수까지의 거리 및 가장 인근 음용 지하수관정까지의 직선거리는 ArcGIS 프로그램을 이용하여 산정하였다. 각 오염원별로 오염원 특성, 지역특성, 수용체특성 인자에 대한 각각의 배점을 속성자료로 구축하였다.

3.3. 관리우선순위 총 점수 산출 및 평가

본 안양시 만안구 시범조사 지역에 대하여 박달동, 석수동, 안양동의 오염계별 오염원 수는 Fig. 2과 같다. 7개 범주의 오염원 중 안양시 만안구에 해당되지 않는 자연적으로 발생하는 오염원과 군대에 의해 발생하는 오염원을 제외한 총 5가지의 오염원 범주가 분포하였다. 오염원의 수는 농업에 의해 발생하는 오염원(Table 2 참조, 이하 “농업계”) 4개, 도시에서 발생하는 오염원(이하 “도시계”) 6개, (특정)토양오염관리대상시설 (이하 “특정토양오염계”) 125개, 상업에 의해 발생하는 오염원(이하 “상업계”) 185개, 산업 또는 산업공정에 의해 발생하는 오염원(이하 “산업계”) 45개인 총 365개로 상업계 > 특정토양오염계 > 산업계 > 도시계 > 농업계 순으로 순위가 나타났다. 세부 오

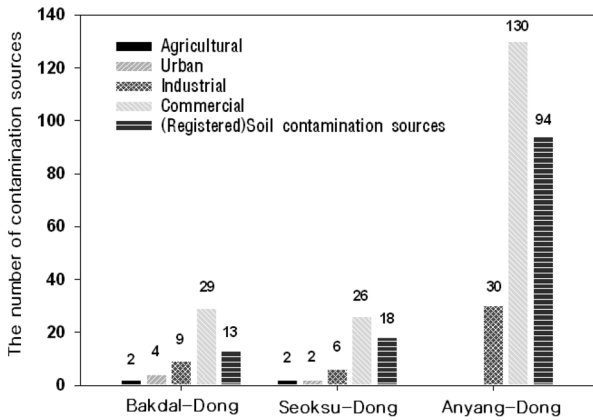


Fig. 2. The number of soil and groundwater sources located in Bakdal-Dong, Seoksu-Dong, and Anyang-Dong.

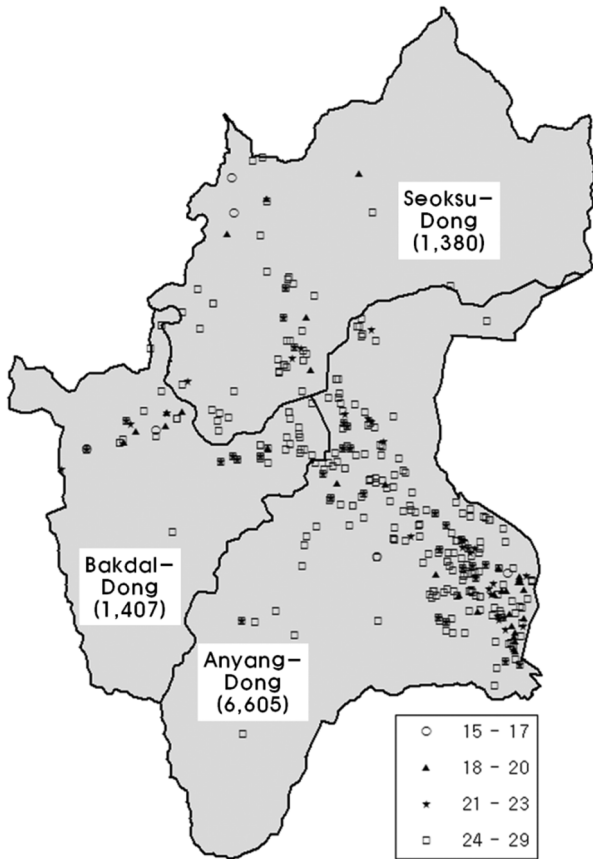


Fig. 3. Preliminary assessment scores and distribution of soil and groundwater sources in Bakdal-Dong, Seoksu-Dong, and Anyang-Dong.

염원은 상업계에서는 자동차정비와 세차장, 특정토양오염계는 석유류저장시설, 도시계는 하수처리시설, 중간집하장, 재활용시설, 농업계는 축사로 조사되었다. 그리고 산업계는 금속가공제품 제조업(기계 및 가구 제외), 1차 금속 제

조업, 전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외), 전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업, 병원, 식료품 제조업, 출판업, 기타 제품 제조업 등 다양하게 구성되어 있었다. 가장 많은 오염원으로는 상업계의 자동차정비와 세차장, 주유소를 포함한 특정토양오염계의 석유류저장시설로서 도시지역 오염원 특징을 보여준다.

박달동, 석수동, 안양동의 동별 오염원 수는 박달동 57곳, 석수동 54곳, 안양동 254곳으로 조사되었으며, 동별 관리우선순위 총 점수 합계는 박달동 1,407점, 석수동 1,380점, 안양동 6,605점으로 산정되었다. 점수분포구간은 15~17점, 18~20점, 21~23점, 24~29점 4가지로 구분하였으며. 관리우선순위가 높은 24~29점 구간의 동별 오염원 수를 비교해 보면 박달동 40곳, 석수동 41곳, 안양동 189곳으로, 관리우선순위 개략평가 결과 안양동이 가장 우선관리대상임을 알 수 있었다(Fig. 3).

관리우선순위 최고 점수인 29점을 살펴본 결과 전체 46개 중 특정토양오염계 석유류저장시설이 25개(54.3%)로 가장 많았으며, 상업계 자동차정비시설이 20개(43.5%), 산업계 금속가공제품 제조업이 1개(2.2%)로 나타났다.

4. 시사점 및 결론

본 연구에서는 토양·지하수오염원 관리우선순위 선정을 위해 오염원특성, 지역특성, 수용체특성을 고려한 개략평가기법을 개발하였다. 구축된 평가기법을 도시지역인 안양시 만안구에 시범 적용한 결과, 오염계별 오염원 수는 상업계 자동차정비시설과 세차장이 가장 많고, 관리우선순위 최고 점수는 특정토양오염계 석유류저장시설이 차지하였다. 박달동, 석수동, 안양동의 동별 관리우선순위 비교 결과, 최고 오염원 수와 점수를 나타낸 안양동이 박달동과 석수동에 비해 관리우선대상임을 파악할 수 있었다.

관리우선순위 개략평가기법에서 오염원 특성, 오염물질의 확산 및 이동성, 인체 및 생태 위해성 인자들과 결부시킴으로써 오염원 자체 특성뿐 아니라 위해성을 동시에 고려하였다. 또한 지역내 행정구역에서 상대적 관리순위의 우위에 있는 읍·면·동을 파악할 수 있어, 중앙정부나 지자체에서 최우선 오염원 관리의 판단 근거를 마련하고 토양·지하수오염원의 적극 관리를 통해 국민건강과 생태계를 보호하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 토양·지하수 오염원관리우선순위 개략평가 기법은 다양한 토양·지하수 오염원과 지역특성을 상대적으로 평가하고자 하는 국내 최초 연구로서 그

의미가 있으며 앞으로 많은 보완과 수정을 통해 보다 활용도를 높일 필요가 있다. 좁은 지역내에서 지역특성과 수용체특성이 유사하여 동일한 인자 값을 사용함에 따라 오염원간 비슷한 관리우선순위 점수가 나타날 수 있다. 따라서 앞으로 이러한 동종 오염원간의 관리우선순위를 평가할 수 있는 정밀평가기법 개발이 요구된다. 또한 도시 지역 특성만이 아닌 농업계나 자연기원 오염원 등 다른 오염원에 대한 특성을 반영하기 위해 도농복합도시 등 다양한 오염원이 존재하는 지역이나 시·군·구 수준으로 공간적인 범위를 확대하여 적용할 수 있는 다양한 토양·지하수 오염원 평가 기법이 필요하다.

사 사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원 수탁연구과제 “토양·지하수오염 국가인벤토리 구축기법 개발” 연구의 일부분으로써 한국환경정책·평가연구원과 한국환경산업기술원의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국가지하수정보센터, 국가지하수관측소정보망, <http://www.gims.go.kr>
 기상청, 기상정보, <http://www.kma.go.kr>
 안정이, 신경희, 황상일, 2010, 토양·지하수오염원 분류체계 구축방안: 2. 분류체계 구축 및 속성자료 활용방안, 지하수토양환경, **15**(6), 122-127.
 인구주택총조사, <http://www.census.go.kr>

정승우, 안윤주, 이병진, 2009, 토양복원공학, 동화기술.

한국하천일람, 하천현황, <http://www.river.go.kr>

California DHS, 1999, Drinking Water Source Assessment and Protection(DWSAP) Program, California Department of Health Services.

Conant, B. Jr, 2000, Ground water plume behavior near the groundwater/surface water interface of a river, Proceedings of the Groundwater/Surface Water Interactions Workshop, US EPA report EPA/542/R-00/007, Washington, DC 20460.

Commonwealth of Pennsylvania, 2000, Source Water Assessment & Protection Program, Department of Environmental Protection.

Demetriades, A., Androulakis, N., Kaminari, K., and Vergou, K., 2007, National Inventory of Potential sources of Soil Contamination in Cyprus-Part 1: Compilation of the Inventory of Soil Polluting Activities.

Domenico, P.A., and F.W. Schwartz, 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, Wiley, New York., USA.

Louisiana Department of Environmental Quality, 2002, Potential Susceptibility Assessment of a Groundwater Source of Public Drinking Water.

UNESCO, 2002, Groundwater contamination inventory: a methodological guide, IHP-VI series on groundwater No. 2.

US EPA, 1991, Wellhead protection strategies for confined aquifer settings. Office of Water, Washington, DC. EPA570/9-91/009.

US EPA, 1993, Seminar Publication, Wellhead Protection: A Guide for Small Communities, Office of Research and development, Washington D.C.