

水資源 오염 특성에 의한 不良埋立地 豫備評價模型 정립

홍상표, 김정욱*

서울보건전문대학 위생과

*서울대학교 환경계획학과

Establishment of Landfill Site Preliminary Assessment Model Based on Contamination Characteristics of Water Resources

Sang-Pyo Hong, Jung-Wuk Kim

Department of Sanitary Science, Seoul Health Junior College

*Department of Environmental Planning, Seoul National University

Abstract

To assess preliminarily the contamination potential of water resources including groundwater owing to the hydrogeological characteristics of landfill site and the potential impact to humans and animals through contamination of water resources by leachate, "Landfill Site Preliminary Assessment Model(LASPAS)" was contrived.

LASPAS could help them proritized of remediation of landfil sites by the convenient and relatively simple evaluation method of landfill site features. LASPAS was desgind to allot numerical ratings to landfill site related factors undermentioned;

- 1) hydrogeological factors such as hydraulic conductivity of aquifer, thickness of confining layer over aquifer, topographical slope, net recharge, and subsurface containment
- 2) water resources contamination factors of impacts on receptors such as proximity to drinking water supply, substitutability of drinking water supply, type of use of water resources, known impact on drinking water supply, and flood potential.

keywords : landfill site, hydrogeologic features, water resources, remediation

I. 서 론

오염된 埋立地에서 유출되는 중금속 및 특정화학물질

같은 독성이 강한 물질에 의해 지표수가 오염됨에 따라 飲用水源인 지하수가 악영향을 받고 있어 이에 대한 대책 이 시급하다¹⁾. 오염된 지하수는 그 수질의 회복이 지극히

곤란하거나 그 오염정화비용이 막대하게 소요된다¹³⁾. 따라서 매립종료 이후에 합당한 사후관리를 받지 못하고 있거나 현재 부실하게 운영되고 있는 대부분의 매립지에 대해 지하수 자원에 대한 오염영향 정도를 평가하여 시급한 補修를 요하는 곳을 확인할 필요성이 있다.

전국에 산재해 있는 오염된 매립지를 조사하여 인체건강과 환경에 미치는 현재 및 잠재적인 악영향을 비교평가할 수 있는 합리적이고 과학적인 평가체계의 확립이 요구된다. 즉, 매립지를 확인하여 매립지의 위험도 정도를 구분시켜 줄 수 있는 과학적인 평가체계의 확립이 필요한 것이다.^{10), 11)} 그런데 위해성 평가는 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 먼저 매립지의 오염 정도 분류 및 매립지 보수의 상대적 優先順位화를 할 수 있는 간편한 매립지 예비평가방법을 강구하는 것이 바람직한 것이다. 즉, 인체건강과 환경 보호를 위하여 본격적인 매립지의 특성 파악, 위해성 평가 및 補修 같은 후속조치가 필요한 것인가에 대한 선별과정이라고 볼 수 있는 오염된 매립지의 예비적 분류체계의 확립이 필요한 것으로 보인다¹²⁾.

평가 대상이 되는 매립지에 관련된 기존의 정보를 먼저 검토하여 현장의 구체적인 오염농도를 시료채취를 통하여 분석할 필요성의 여부를 결정한다면 매립지의 정밀한 조사에 소요될 비용을 절약할 수 있을 것이다. 매립지의 예비적 평가에서는 해당 매립지 고유의 기존 조사자료를 분석하여 현장조사 같은 정밀한 추가 조사여부 및 유해물질 누출을 방지 또는 최소화시키기 위한 응급조치의 우선순위를 결정하게 되는 것이다.

그런데 한정된 재원 및 시간의 제약조건 속에서 매립지 補修의 상대적 우선순위 결정을 하기 위해서는 매립지로 인한 각종 환경피해 중에서도 침출수로 인한 지하수 오염에 매립지 평가의 초점을 맞출 수 있다. 매립지로 인한 지하수 오염의 결정적 요인은 매립지가 입지한 지역의 수리지질학적 특성이라고 볼 수 있다⁶⁾. 따라서 이러한 수리지질학적 특성을 객관적으로 數值化하면 주관성이 개입될

수 밖에 없는 사회경제적 요인을 고려한 매립지 평가에 대한 異論의 여지를 감소시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 매립지 응급補修의 優先順位를 정하기 위해 매립지 주변 수자원 오염가능성을 매립지의 수리지질학적 특성을 기준으로 數值化하여 상대적으로 비교평가할 수 있는 새로운 매립지 예비평가모형으로 LASPAS (Landfill Site Preliminary Assessment Model)을 고안하여 정립해 보고자 하였다.

II. 오염매립지 분류 예비평가

유해물질에 의한 인체건강 및 환경에의 악영향은 오염원에서 여러 경로의 연계과정에 의해 汚染受容體에 전달이 된다. 따라서 매립지의 위해성 또는 잠재적 위해성을 매립지 오염물질의 상대적 유해성, 被暴經路의 상대적 위해성 및 수용체에의 상대적 위험도의 범주로 구분하여 각각에 점수를 부과하여 합산하면, 그 매립지의 상대적 위해성을 수치화할 수 있을 것이다.

그러나 우리나라에 있는 매립지의 대부분에는 유해독성 폐기물과 일반생활폐기물이 혼재되어 있다. 매립된 폐기물의 독성과 매립된 폐기물의 양 그리고 매립지의 면적은 매립지 평가요소로서 중요하지만 매립폐기물 자체의 독성을 비교정량할 수 있는 분석자료의 확보가 곤란하기 때문에 매립지의 예비적 평가요소에서 제외시킬 수 있을 것이다. 따라서 매립지 평가요소의 범위를 수리지질학적 요인에 초점을 둔 피폭경로와 피폭체에 국한시키는 시간-비용 절약적인 방안으로서의 수리지질학적 예비평가모형을 정립할 수 있을 것이다.

매립지의 수리지질학적 예비평가 모형은 매립지의 수리지질학적 특성에 점수를 할당하는 數值合算法인데, 수치합산법은 사용이 간편하고 이해가 용이해서 환경평가 같은 多特性의사 결정 방법에 일반적으로 널리 이용되고 있다.⁶⁾

1. 오염매립지 분류의 예비평가 체계

본 연구에서 새롭게 정립된 水理地質學的 매립지 예비평가 모형(LASPAS : Landfill Site Preliminary Assessment Model)은 매립지의 위해성 평가 수단으로 매립지 평가요소에 점수를 할당한다. LASPAS에서는 매립지의 특성을 오염물질의 수리지질학적 피폭경로 및 수자원 오염에 의한 인간 및 동물 같은 피폭체에의 영향으로 2분하였다. 수리지질학적 피폭경로 및 수자원 오염에 의한 피폭체 영향 부분에 각각 7개의 評價要素를 설정하였으며, 평가의 비중을 동일하게 하기 위하여 각각에 동일한 加重値를 주었다. 각각의 평가요소에 대해서는 1-10사이의 점수를 할당하는데, 점수의 범위는 매립지의 위해성에 기여하는 잠재적 또는 실질적 영향의 연계 정도에 따라 차별화하기 위한 것이다. 즉, 최고 점수가 할당된 평가요소가 연계 정도가 높다고 간주되는 것이다. 점수의 할당은 각 평가요소의 분류에서 3등급으로 분류되면 10, 6, 2점을, 4등급으로 분류되면 10, 7, 4, 1점을, 5등급으로 분류되면 10, 8, 6, 4, 2점을 각각의 등급에 부과하는 방법으로 하였다. LASPAS에서는 매립지가 주변환경에 부정적 영향을 주면 높은 점수를 받게 되어 있다.

오염된 매립지의 평가를 위해 최소한으로 필요한 정보에는 음용수원예의 근접도, 지하수면의 깊이, 지표수예의 근접도, 오염물질의 종류 및 매립양, 지질도 및 지형도, 매립지 표면의 복토상태, 연간 강우량 및 홍수 빈도, 주변의 토지이용 상태 등이다. 만일 이러한 특정평가 요소에 점수를 할당하기에 매립지 관련 정보가 불충분하면 최대허용 가능 점수의 1/2를 추정치로 할당하고, 그 추정치의 합계를 총합계 점수 뒤에(+/-)표시를 한후에 표기하여 “허용오차”라는 것을 나타낸다. 그리고 “허용오차”의 합계가 최고가능점수의 30%를 초과하면 이 매립지는 “평가 유보” 매립지로 분류된다. 토양, 물 및 공기 같은 被曝媒體 그리고 被曝體의 현재까지의 오염정도를 알 수 없을 경우에

는, 그 매립지는 오염발생의 잠재치로 평가될 수 있다.

2. 오염매립지 평가요소

(1) 수리지질학적 피폭경로 평가요소

매립지의 오염물질은 물, 공기 및 토양 같은 전달매체를 통하여 주변환경 및 동식물에 영향을 미치게 된다. 공기를 전달매체로 한 오염물질의 이동에 따른 오염의 가능성은 오염나하물의 토양의 여과, 흡착 및 분해 작용에 의해 浸出水的 직접적 지하수 침투나 지표수 오염의 영향에 비해 극히 작을 것이다. 따라서, 매립지 오염으로 인한 피폭경로로서 공기를 제외하고 지하수 오염의 평가요소로는 帶水層 상부壓層의 두께 및 종류, 압층의 수리전도도, 연간 강우량 및 대수층의 수리전도도, 침출수 차집처리시설을 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1. Ratings for the Potential of Water Resources Contamination

Evaluation Factor	Classification	Rating
Thickness of Confining Layer Over Aquifer	<3m	10
	3-10m	6
	>10m	2
Hydraulic Conductivity of the Confining Layer	>10 ⁻⁴ cm/sec	10
	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁷ cm/sec	6
	<10 ⁻⁷ cm/sec	2
Hydraulic Conductivity of the Aquifer	>10 ⁻² cm/sec	10
	10 ⁻² -10 ⁻⁴ cm/sec	6
	<10 ⁻⁴ cm/sec	2
Annual Rainfall	>1600mm	10
	1400-1600mm	8
	1200-1400mm	6
	1000-1200mm	4
	<1000mm	2
Subsurface Containment	No Containment	10
	Partial Containment	6
	Full Containment	2
Surface Containment	No Containment	10
	Partial Containment	6
	Full Containment	2
Topography (% Slope)	<2	10
	2-6	7
	6-10	4
	>10	1

지하수와 지표수는 주변지역의 수리지질학적 특성에 따라 상호간에 수량 및 수질에 영향을 받게 된다. 따라서 지표수의 오염은 지하수의 수질을 악화시키는 오염경로로 평가할 필요가 있게 된다. 지표수 오염의 평가요소로는 지표면 역류시설, 경사도 같은 요소를 선정하였다.

지하수 오염의 평가요소에서 상부층의 두께 및 종류는 오염물질의 농도저감에 결정적 요소이며, 상부층의 수리전도도는 대수층에 오염물질 전달비율에 영향을 미친다. 연강 강수량은 침출수 발생량의 주요변수이며, 대수층의 수리전도도는 오염물질의 이동속도에 결정적인 요인이다.⁹⁾

(2) 수자원 오염 피폭체 평가요소

인간이 경제활동을 영위한 부산물로서의 폐기물 발생은 불가피하고, 발생된 폐기물을 재활용이나 소각 등으로 처리하여도 매립해야만 되는 폐기물 處理殘滓物이 남게 된다. 따라서 매립지의 설치는 불가결한 것이지만 가능하면 인체건강이나 환경에 악영향을 미치지 않도록 立地選定을 해야한다. 즉, 매립지에서 파생되는 오염물질에 의한 인간을 비롯한 피폭체에의 영향을 매립지 보수의 상대적 우선순위를 결정하는데 있어 고려할 필요가 있게 된다.

매립지의 인체건강 및 환경에의 위해성은 매립지의 수리지질학적 요소에 의한 피폭경로 뿐만 아니라 피폭체 자체가 매립지의 오염물질에 어떠한 상황으로 노출되어 있는가에도 결정적인 영향을 받게 된다. 따라서 오염물질 피폭체의 평가요소로는 매립지와 飲用水源 사이의 거리, 음용수원의 대체 가능성, 음용수원의 목적인 여가선용이나 灌溉 같은 용도로 쓰이는 곳까지의 거리, 수자원으로서의 이용빈도, 매립지 주변의 토지이용, 자연환경 보전지역과의 거리 등을 평가 대상으로 할 수 있다. 이러한 평가요소 중에서 매립지 주변의 水資源汚染 가능성에 밀접하게 관련된 항목으로 선정된 것은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2. Ratings for the Potential of Impact on Humans & Animals

Evaluation Factor	Classification	Rating
Distance to Drinking Water Supply	<100m	10
	100-300m	7
	300-1000m	4
	1000-5000m	1
Substitutability of Drinking Water Supply	Alternate Supply is unavailable	10
	Alternate Supply is unobtainable	6
	Alternate Supply is available	2
Distance to Water Resources	<100m	10
	100-300m	7
	300-1000m	4
	1000-5000m	1
Type of Use of Water Resources	Drinking	10
	Recreational	8
	Irrigational	6
	Industrial	4
	Domestic Uses not Drinking Other Uses	2 1
Known Impact on Drinking Water Supply	Known Contamination above Criteria	10
	Strongly Suspected Contamination	6
	Known not to be Contaminated	2
Known Impact on Water Resources Except Drinking Water	Known Contamination above Criteria	10
	Strongly Suspected Contamination	6
	Known not to be Contaminated	2
Flood Potential	1 in 2 years	10
	1 in 10 years	7
	1 in 50 years	4
	1 in 100 years	1

(3) 매립지의 예비평가결과 분류

각각의 특성에 따라 예비평가된 매립지는 補修조치의 우선순위에 따라 4단계로 분류되며, 매립지 관련정보가 부족하면 “평가유보”로 분류된다. 분류 단계별 특성은 다음과 같다.

A. “응급조치 필요”매립지(110-140점)

인체건강 및 주변환경에 있어 기존의 악영향이 염려되어 매립지의 구체적 분석, 위해성 관리 또는 보수조치가 필요한 매립지

B. “응급조치 검토”매립지(80-109점)

인체건강 및 환경에의 악영향이 대체로 즉각적인 위협을 주지 않지만, 원격지에의 잠재적 피해가 염려되어 모종의 조치가 필요할 것 같은 매립지

C. “추가조치 필요”매립지(50-79점)

현재는 크게 염려할 것이 없는 것으로 평가되었으나 매립지의 분류를 확정하기 위해서 추가조사가 수행되어야 할 매립지

D. “추가 조치 불필요”매립지(49점 이하)

인체건강 및 환경에의 상당한 위협의 가능성이 없을 것 같아 매립지의 재조사를 필요로할 정도의 새로운 정보가 얻어질 때 까지는 추가조치가 불필요한 매립지

E. “평가유보”매립지(추정치 52점 이상)

매립지를 분류한 만한 관련정보가 불충분하여, 즉 최대점수인 140점의 30%인 52점 이상이 조사자료가 아닌 추정치에 의해서 결정되는 경우에, 평가를 유보하게 되는 매립지

포 매립지 36점 이었고, 인간 및 동물에의 영향의 평가에서는 난지도 매립지54(+5)점, 화성 매립지 31(+5)점, 김포 매립지 38(+5)점 이었다. 매립지의 수리지질학적 특성 평가 영역과 水資源 오염에 의한 인간 및 동물에의 영향 평가 영역을 합산한 결과는 난지도 매립지 114(+5)점, 화성 매립지 65(+5)점, 김포 매립지 74(+5)점 이었다.

따라서 평가 대상이 된 3곳의 매립지의 補修(remediation)의 우선순위는 난지도 매립지, 김포 매립지, 화성 매립지 순서였다. 그리고 각각의 특성에 따라 평가된 매립지의 補修조치는 우선순위를 4단계로 구분한 매립지의 평가결과 분류방법에 따르면 난지도 매립지는 1단계인 “응급조치 필요 매립지”, 김포 매립지와 화성 매립지는 3단계인 “추가조치 필요 매립지”로 분류되었다.

Table 3. Ratings for Landfill Sites According to Potential of Water Resources Contamination

Evaluation Factors	Landfill Sites					
	Nanjido		Hwasung		Kimpo	
	Features	Rate	Features	Rate	Features	Rate
Thickness of Confining Layer Over Aquifer	<1.0m	10	3.3m	6	10.8m	2
Hydraulic Conductivity of the Confining Layer	1.0* 10E-4	10	1.0* 10E-6	6	3.6* 10E-6	6
Hydraulic Conductivity of Aquifer	1.9* 10E-2	10	5.9* 10E-5	2	5.7* 10E-6	2
Annual Rainfall	1176m	4	1374m	6	1100m	4
Subsurface Containment	No Containment	10	Full Containment	2	Partial Containment	6
Surface Containment	Partial Containment	6	Full Containment	2	Partial Containment	6
Topography (%Slope)	Flat	10	1%	10	0.6%	10
Total Score	60		34		36	

III. LASPAS의 매립지 적용 분석

매립지가 水資源 오염에 미칠 영향의 정도를 매립지별로 우선순위화하기 위하여 수리지질학적 특성에 의해 매립지의 점수를 수치화하는 예비평가 모형을 실제 적용해 보았다. 매립지 예비평가 모형을 실제 적용한 매립지는 水地理質學的 특성 자료^{1),2),3),4),7)}를 구할 수 있는 서울시 상암동에 위치한 난지도 매립지, 김포군 검단면에 위치한 수도권 매립지, 화성군 우정면에 위치한 특정폐기물 매립지로 선정하였다. 예비평가 모형에 의한 이들 매립지의 평가 결과는 다음의 Table 3, Table 4와 같았다.

Table 3에서 수자원 오염 잠재도에 영향을 미치는 수리지질학적 특성에 의해 매립지 평가를 하였고 Table 4에서 매립지가 수자원을 이용하는 인간 및 동물에 미치는 영향에 따라 매립지 평가를 하였다. 그 결과 수리지질학적 특성 평가에서는 난지도 매립지 60점, 화성 매립지 34점, 김

Table 4. Ratings for Landfill Sites According to the Impact on Humans & Animals

Evaluation Factors	Landfill Sites					
	Nanjido		Hwasung		Kimpo	
	Features	Rate	Features	Rate	Features	Rate
Proximity to Drinking Water Supply	<100m	10	<300m	7	<100m	10
Substitutability of Drinking Water Supply	High	2	High	2	High	2
Distance to Water Resources	300m	7	1200m	1	>1000m	1
Type of Use of Water Resources	Multiple	10	Fishing	8	Fishing	8
Known Impact on Drinking Water Supply	Above Criteria	10	Not Polluted	2	Not Polluted	2
Known Impact on Water Resources Except Drinking Water	Above Criteria	10	Suspected	6	Above Criteria	10
Flood Potential	?	5	?	5	?	5
Total Score	54(+—5)		31(+—5)		38(+—5)	

IV. 결 론

지표수 오염의 가속화에 따른 대체 飲用水源으로 그 중요성이 점점증하는 지하수의 주된 오염원인 매립지에 대해 그 浸出水를 비롯한 오염물질의 주요 이동경로인 매립지의 수리지질학적 특성 그리고 매립지 침출수로 인한 수자원 오염이 인간 및 동물에 미치는 악영향 같은 평가요소를 數值化하여 매립지 보수의 優先順位를 결정할 수 있는 새로운 매립지 예비평가모형으로 LASPAS를 정립해 보았다.

그러나 이 매립지 豫備評價模型은 평가요소 선정의 타당성, 범위 설정의 타당성 및 점수 부여 방법의 타당성에

異論의 소지가 있을 수 있고, 수리지질학적 특성에 의한 매립지 補修(remediation)의 상대적 우선순위 결정은 사회경제적 요소에 의해 변동될 수 있다는 한계를 지니고 있다. 수리지질학적 특성에 의한 매립지 분류체계에는 정치적, 사회경제적, 법률적 및 기술적 요인, 매립지 補修소요 비용, 장기적 토지이용계획 같은 특정한 요인은 평가 영역에서 제외되었기 때문에, 법률적 강제조치나 매립지 보수계획의 수행을 위해서는 보완적인 조사연구가 추가되어야 한다.

이러한 한계와 문제점이 있지만 매립지 예비평가모형인 LASPAS는 한정된 물적, 인적 자원의 범위내에서 지하수 자원을 보존하기 위한 매립지 보수의 시급성을 고려해 볼 때 비교적 간단하게 매립지 보수의 우선순위를 결정할 수 있다는 점에서 의미가 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 수도권 매립지 운영관리조합, 1993, 수도권 매립지 종합환경조사 연구보고서, 4-39~4-124.
2. 신용승, 1993, 지하수 오염을 고려한 특정폐기물 매립지의 안전성 평가에 관한연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문.
3. 이철효, 1994, 난지도 매립지 침출에 의한 지하수 오염 특성 분석, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문.
4. 최세영 외, 1992, 쓰레기 매립지의 침출수에 의한 오염 물질 이동에 관한 연구, 대한광산학회 및 대한지질학회 공동학술 강연회집.
5. 홍상표, 김정욱, 1994, 폐기물 매립지 관리체계의 제도적 개선방안, 폐기물학회지, 11(4), 609-618.
6. 홍상표, 우세홍, The Hydrogeological Evaluation of Groundwater Degradation at Kimpo Metroplitan Landfill site, 한국환경위생학회지, 20(1), 68-74.
7. 환경관리공단, 1992, 환경관리공단 화성사업소 주변환경영향 조사연구, 37-43.

8. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., and Petty, R. J., 1987, DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings., EPA-600/2-87-035.
9. R. Allan Freeze and John A. Cherry, 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Inc, 426-434.
10. U.S.Environmental Protection Agency, 1989, Risk Assessment Guidance for Superfund(Vol. I) Human Health Evaluation Manual, 1-1~1-12.
11. U.S.Environmental Protection Agency, 1989, Risk Assessment Guidance for Superfund(Vol. II) Environmental Evaluation Manual, 1-4.
12. U.S.Environmental Protection Agency, 1991, The Superfund Program: Ten Years of Progress, 11-13.
13. U.S.Environmental Protection Agency, 1992, CERCLA/Superfund Orientation Manual.