ORIGINAL PAPER 원저

폐기물매립지의 사후관리종료 평가를 위한 안정화 지수 산정에 관한 연구

이남훈†, 한정현
안양대학교 환경공학과
(2006년 4월 17일 접수, 2006년 6월 8일 채택)

Development of Stability Index for Defining the End of the Post-closure Monitoring Period for MSW Landfill

Nam-Hoon Lee†, Jeong-Hyun Han
Dept. of Environmental Engineering, Anyang University

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop the stability index of landfill sites to assess it's degree of stability. In order to develop the stability index, field data including leachate qualities, Landfill gas (LFG) composition and element composition of wastes from 50 closed landfills were collected. Three parameters−BOD/CODcr among leachate quality parameters, CH_4 among landfill gases, and C/N ratio from wastes−were found to be the best parameters for measuring the stability of landfill sites. The trend line of these parameters were used to Also, CH_4 from landfill gases and C/N ratio from wastes were found to be the best parameters. The trend lines of these parameters were used to develop the stability index of landfill sites.

The equation for the index was as following;

$I_{LS} = S_L + S_G + S_W$

$S_L = -\{4.892 + 16.587 \cdot \ln[BOD/COD_{Cr}]\}$

$S_G = 53.872 - 12.782 \cdot \ln[CH_4]$

$S_W = 79.382 - 20.013 \cdot \ln[C/N]$

(The maximum score for S_L, S_G, and S_W was 33.3.)

where, I_{LS} : The stability index of the landfill

S_L : The stability score of the leachate

S_G : The stability score of the landfill gas

S_W : The stability score of the waste

Keywords : Solid waste landfill, stability, leachate, landfill gas, C/N

†Corresponding author(nhlee@aycc.anyang.ac.kr)

초 록

본 연구에서는 폐기물매립지의 안정화 정도를 용이하게 평가하기 위하여 매립폐기물의 분해정도를 수치화 할 수 있는 매립지의 안정화 지수 개발을 목적으로 하였다. 안정화 지수를 개발하기 위하여 50개소의 사용종료 매립지를 대상으로 침출수 수질, 매립가스 조성, 매립폐기물의 물리화학적 특성 자료를 수집하여 이들의 매립연령별 환경특성을 고찰하였다. 그리고 이들 환경지표중 폐기물매립지의 안정화와 상관도가 높은 세부 환경지표로서 침출수의 BOD/CODcr, 발생가스중의 CH_4농도, 매립폐기물의 C/N가 안정화 지표로 선정하였다.

각 지표에 대한 매립연령별 추세선을 이용하여 지수화한 결과 매립지 안정화 지수로 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$I_{LS} = S_L + S_G + S_W$

$S_L = -\{4.892 + 16.587 \cdot \ln[BOD/CODcr]\}$

$S_G = 53.872 - 12.782 \cdot \ln[CH_4]$

$S_W = 79.382 - 20.013 \cdot \ln[C/N]$

(단, SL, SG, SW는 각각 33.3점이 최대값이다.)

여기서, I_{LS} : 매립지 안정화 지수

S_L : 침출수의 안정화 점수

S_G : 매립가스의 안정화 점수

S_W : 폐기물의 안정화 점수

핵심용어 : 폐기물매립지, 안정화, 침출수, 매립가스, C/N

1. 서론

폐기물매립지는 계획단계에서 사후 토지이용단계에 이르기까지 장기간을 요하는데, 특히 매립종료 후 사후 토지이용 가능시점은 대략 20~50년 정도 소요되어 신규 매립지의 확보에 지장을 주고 있다. 따라서 폐기물매립지는 폐기물을 안전하게 저류하고, 매립된 폐기물이 신속히 분해·안정화됨과 동시에 침출수와 발생가스에 의한 환경오염을 방지할 수 있는 제반 기능을 충분히 갖춰주어야 한다. 아울러 매립 완료 후 폐쇄되면, 사후 토지이용이 조기에 가능하도록 다각적인 안정화 조치를 강구하여야 한다.

폐기물매립지의 안정화란 매립폐기물중 분해성 폐기물은 미생물의 작용으로 분해되어 감용·안정화되고, 그 외의 폐기물은 물리화학적으로 압축·분해되어 안정화되는 것으로 정의할 수 있다. 폐기물매립지의 안정화 정도의 평가는 매립된 폐기물 자체를 분석하는 것이 타당하지만 매립된 폐기물의 불균질성(heterogeneity)으로 인해 소량과 소수의 샘플만으로 전체를 평가하기에는 매우 곤란하기 때문에 안정화가 진행되는 과정에서 생기는 현상을 다각적으로 파악하여 안정화를 평가하는 것이 중요하다[1~3].

따라서 본 연구는 현재 운영중인 매립지와 사용종료된 매립지의 안정화 진행과정에서 일어나는 매립폐기물의 물리화학적 성질, 침출수 수질, 가스성상 등의 경년변화 자료를 수집하여 이들 지표들과 매립지의 안정화와의 상관관계를 고찰하고, 아울러 매립지 안정화와 상관성이 높은 지표들을 이용하여 폐기물매립지의 안정화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 평가기법을 개발하는 것을 궁극적인 목적으로 한다.

2. 대상매립지의 개요 및 자료조사방법

매립경과시간에 따른 환경지표들의 변화특성을 정확하게 파악하기 위해서는 단일 매립지에 대해 매립개시 단계부터 사후관리종료 단계에 이르기까지의 연속적인 모니터링 자료를 대상으로 하는 것이 바람직하다. 그러나 우리나라의 폐기물매립지 관리 역사는 외국에 비해 매우 짧을 뿐만 아니라 현행 폐기물관리법에서 규정하고 있는 환경지표들에 대한 모니터링 규정이 매우 미약하여 단일 매립지에 대한 장기간 연속 모니터링 자료 확보는 현실적으로 불가능하였다. 따라서 이를 보완하는 방법으로 매립경과 시간이 서로 다른 50개의 매립지를 대상으로 1회성으로 측정한 환경모니터링 지표자료를 경년별로 조합하여 이를 단일 매립지의 경년별 변화자료로 가정하여 평가하는 방법을 취하였다. 본 연구에서 조사대상 매립지로 선정된 50개소의 사용종료된 매립지에 대한 매립연령과 매립용량에 대한 분포를 [Table 1]에 나타내었다[4].

3. 결과 및 고찰

3.1 폐기물매립지의 환경지표 변화특성

3.1.1 침출수의 수질

사용종료된 매립지에서의 매립경년별 침출수중의 BOD 및 COD 농도변화를 [Fig. 1]에 나타내었다. BOD는 매립종료 시점에 7,000mg/L의 고농도를 보였으나 시간이 경과함에 따라 지수함수적으로 감소해 5년이 경과한 후에는 1,000mg/L이하, 10년이 지난 후에는 대부분이 20mg/L이하로 침출수 배출허용기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. COD_{Mn}과 CODcr 경우에도 초기에 BOD와 유사한 6,500mg/L과 8,000mg/L의 고농도를 보였으나 시간이 경과함에 따라 급속히 저하되는 것으로 조사되었다.

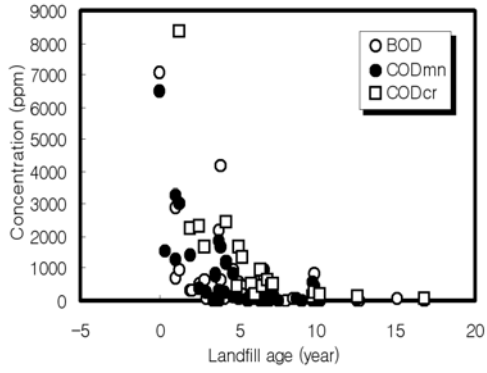
[Fig. 2]의 BOD/COD_{Mn} ratio의 경우 초기 2.5 정도이나 급격히 감소하여 7년 정도 경과하면 1.0 이하로 감소하며, 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 매립경년에 따른 COD_{Mn}농도와 BOD/COD_{Mn}는 일정한 경향을 나타내어 매립지 안정화지수의 인자로서 활용 가능성이 높았다. 그러나 현행 「폐기물관리법시행규칙」에서는 2001년 7월 1일부터는 과망간산칼륨법은 더 이상 적용이 되지 않으며, 중크롬산칼륨법에 의한 배출허용기준이 적용되고 있어 향후 안정화지수의 인자로 적용하기에는 부적절하다.

한편 침출수의 BOD/CODcr는 매립연령이 비교적 짧은 초기단계의 매립지에서는 0.5~0.8정도를 유지하나, 매립연령이 길어지면 0.2이하로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 미생물에 의해 분해가능한 유기물이 시간이 갈수록 감소되고 난분해성 유기물만 남기 때문인 것으로 보고되고 있으며[5,6], 본 연구에서도 그와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 BOD/COD_{Cr}은 침출수의 매립경년별 수질을 잘 나타낼 수 있는 BOD와 CODcr의 자료를 사용한 결과치로서 매립지 안정화지수 산정을 위한 지표로 적합한 것으로 사료된다.

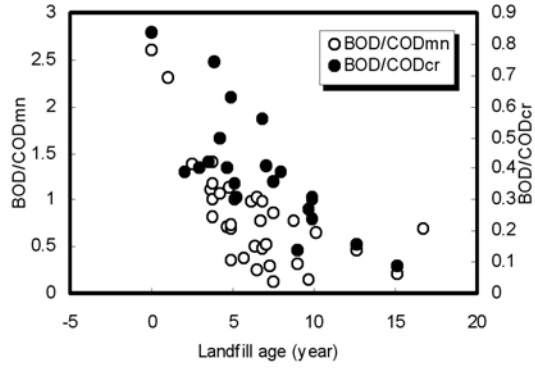
[Fig. 3]에서는 침출수중의 NH_3-N, NO_3-N, T-N의 농도변화를 나타내고 있다. 먼저 NH_3-N의 농도는 매립종료시에는 2,000mg/L 이상의 고농도를 보이나 시간이 경과함에 따라 급속히 감소하는 경향을 나타내어, 매립지 안정화 지표로서 적합하다고 판단된다. 그러나, 과거 많은 연구 결과

[Table 1] Outline of Closed Landfill Sites Surveyed in This Study

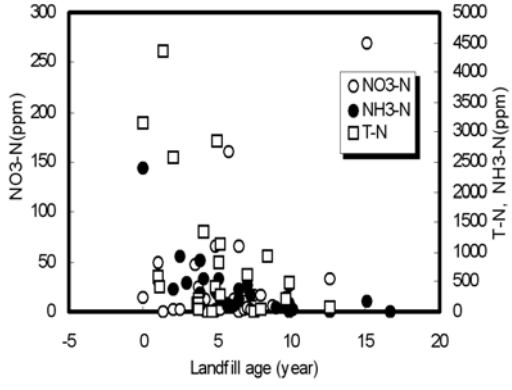
Landfill age after closing (year)	Total	0~4	4~7	7~10	10~14	over 14
No. of landfill site	50	13	9	19	5	4
Landfill volume (1,000㎥)	Total	0~1	1~5	5~10	10~50	over 50
No. of landfill site	50	3	9	4	16	18



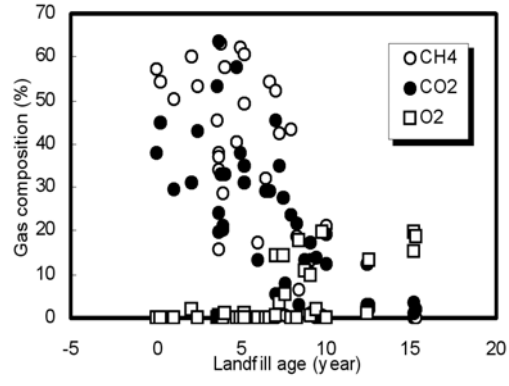
[Fig. 1] Landfill age versus BOD profile of leachate.



[Fig. 2] Landfill age versus BOD/COD_{Mn} and BOD/CODcr profiles of leachate.



[Fig. 3] Landfill age versus NH_3-N and NO_3-N, T-N profile of leachate.



[Fig. 4] Landfill age versus CH_4, CO_2, O_2 profiles.

에 의하면 매립지 침출수의 NH_3-N은 장기간 주변의 오염을 유발시키는 독성물질로 분류되며[7], 혐기성조건에서는 특별히 안정화되지 않기 때문에 매립종료후 30년이 경과하여도 고농도를 유지하는 것으로 보고된 바 있다[8]. 이러한 이유로 NH_3-N은 매립경년별 안정화지수 산정을 위한 지표로서 부적합하다고 판단된다. 한편 침출수의 NO_3-N농도는 전체적으로 0~70mg/L의 농도를 나타내었으며, 매립경년에 따른 특별한 변화특성을 찾아볼 수 없었다. 반면, 침출수의 T-N은 매립종료시점에 3,000mg/L이상의 고농도에서 급속히 감소하며 10년 이상 경과 시에도 그 농도가 지속적으로 감소하고 있는 것으로 나타나 매립경과년수와의 상관도가 매우 높은 것으로 나타났다.

3.1.2 매립가스의 성상

[Fig. 4]의 매립가스중의 CH_4농도를 살펴보면, 매립종료시점에서는 약 60%로 매립지에서 발생되는 가스의 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하여 약 7년 후에는 20%이하로 발생되고, 15년 이상 경과되면 환경부에서 제시한 안정화 기준인 5%미만으로 발생

되는 것을 알 수 있다. CH_4는 혐기성분해의 산물로서, 폐기물매립지의 안정화과정을 전체적으로 가장 잘 나타낼 수 있는 안정화지표로 판단된다. 그리고 LFG중 CO_2의 발생특성을 살펴보면 매립종료시점에서는 CH_4농도보다 약간 낮은 40%의 농도를 보이다가 5년이 경과하면 60%로 최대농도를 보이며, 그 후 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. LFG중 O_2의 발생특성은 매립종료시에서 약 7년 경과시점까지 거의 0에 가까운 농도를 보이며, 그 후 서서히 증가하여 15년 경과시점에는 대기중의 산소농도인 21%에 가까운 농도를 나타냄을 알 수 있다.

매립가스항목에서는 CH_4와 CO_2모두 매립지의 안정화를 나타내기 적합한 지표로 생각되어지나, 이 중 혐기성 분해의 산물로서 가장 중요시되는 CH_4가 안정화지표에 적합하다고 사료된다.

3.1.3 매립폐기물의 성분변화

[Fig. 5]에서 보는 바와 같이 매립경과시간에 따른 매립폐기물중 C의 함량을 살펴보면 매립경과시간이 증가함에 따라 폐기물중의 유기탄소가 혐기성분해에 의하여 CH_4와 CO_2로 전환되면서 급속히 감소하는 것으로 나타났으며, 그 결과 15년 경과후에는 유기탄소 함량이 5%미만으로 안정화되는 것으로 나타났다. 매립폐기물의 N함량을 살펴보면 전체적으로 2.5%미만으로 나타났고, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이면서 15년 이상 경과하면 0.5%미만을 차지하는 것을 알 수 있다.

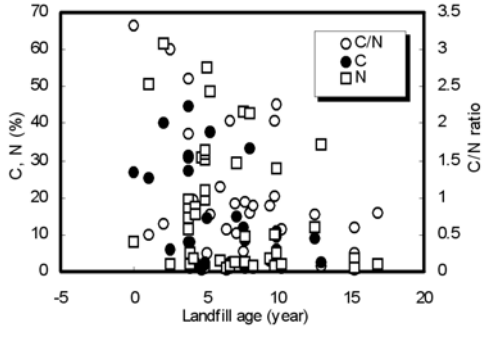
미생물 단위개체당 먹이가 어느 정도 공급되는가 하는 척도인[9] C/N의 경년별 변화특성을 보면, 매립종료시점에서는 65정도였으며, 시간이 경과함에 따라서 서서히 감소하여 15년이상 경과하면 10정도로 안정화됨을 알 수 있다. 따라서 C/N은 매립폐기물 영역에서 매립지의 안정화과정을 잘 표현할 수 있는 지표로 적합성이 뛰어난 것으로 사료된다[10~12].

3.2 안정화 지수의 작성

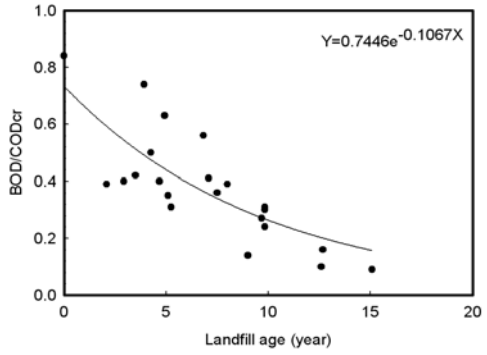
일반적으로 지수화 과정에서는 지수화관련 인자별로 그 중요정도에 따라 가중치를 부여하여야 하나, 본 연구에서는 침출수 수질, 매립가스 농도, 매립폐기물 특성의 세가지 영역별로 가장 연관성이 높은 한가지씩의 지표를 선정하여, 선정된 지표가 각각의 영역별로 가장 중요한 지표이므로 동등한 가중치를 부여하였다. 선정된 세가지 지표를 지수화함에 있어서 총합을 100점으로 하는 100점화 방법을 이용하기 위하여 각각의 지표에 33.3점씩을 부여하여 부지수함수를 작성하였다[13].

각 항목별로 매립지 안정화와 가장 관련성이 높은 안정화 지표는 수질 항목에서는 BOD/COD_{Cr}, 매립가스 항목에서는 CH_4, 매립폐기물 항목에서는 C/N으로 조사되었다. 한편 이들 안정화 지표들의 경년별 변화 추세선을 [Fig. 6]~[Fig. 8]에 나타내었다.

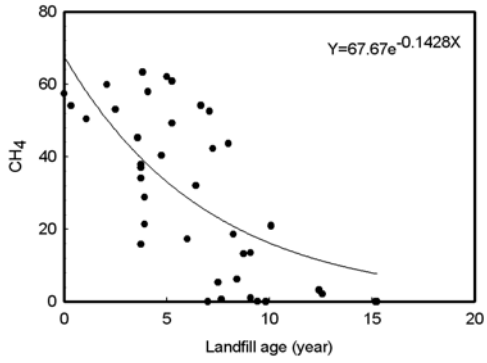
BOD/COD_{Cr}값을 안정화 점수로서 환산하기 위



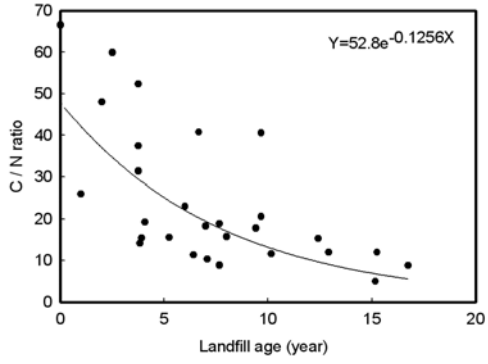
[Fig. 5] Landfill age versus C/N profile of landfill waste.



[Fig.6] Trend line of BOD/COD_{Cr}.



[Fig.7] Trend line of CH_4.



[Fig.8] Trend line of C/N ratio.

하여 [Fig. 6]에 나타낸 추세선을 X값(매립경년)으로 정리하면,

$$X=-\{0.295+\ln[BOD/COD_{Cr}]\}/0.1067 \quad (5)$$

여기서, X가 18.815년 일때 BOD/COD_{Cr}이 매립지 안정화 평가기준인 0.1에 도달하므로 이때의 S_L(Stability score of Leachate)값을 33.3점이라 가정하여 이를 식(5)에 대입해서 정리하면,

$$S_L=-\{4.892+16.587\cdot\ln[BOD/COD_{Cr}]\} \quad (6)$$

위와 같은 방법으로 [Fig. 7]과 [Fig. 8]에 나타낸 CH_4와 C/N을 각각 S_G(Stability score of Gas)와 S_W(Stability score of Waste)로 정리하면,

$$S_G=53.872-12.782\cdot\ln[CH_4] \quad (7)$$

$$S_W=79.382-20.013\cdot\ln[C/N] \quad (8)$$

위에서 얻어진 S_L, S_G, S_W로 본 연구의 목표인 안정화 지수 I_{LS}(Stability Index of landfill)는 다음과 같다.

$$I_{LS}=S_L+S_G+S_W \quad (9)$$

(단, S_L, S_G, S_W는 각각 33.3점이 최대값이다.)

3.3 사례연구

본 연구에서 개발한 안정화 지수의 적용성을 검토해보기 위하여 매립경년이 서로 다른 여러개의 매립지에 안정화 지수를 적용하여 안정화 점수를 [Table 2]에 나타내었다. 그 결과 매립경년이 12.58년인 산정동매립지가 99.9점으로 안정화에 도달한 것으로 나타났으며, 그 이외의 매립지는

[Table2] Results of Applied the Stability Index of the landfill

Landfill site	Landfill age (year)	BOD/COD_{Cr} (−)	CH_4 (%)	C/N (−)	Stability score of landfill			
					S_L	S_G	S_W	I_{LS}
Jumun2	2.08	0.39	59.9	13.01	10.726	1.559	28.484	40.770
Munam	2.50	0.22	53.0	59.91	20.223	3.124	0.000	23.347
Hoecheon I	4.08	0.08	57.9	19.26	33.300	1.993	20.633	55.926
HC	5.00	0.33	62.1	5.17	13.497	1.098	46.953	61.549
Dongan2	5.25	0.31	60.8	15.52	14.534	1.369	24.954	40.857
Changhyun	7.08	0.41	52.5	10.32	9.897	3.245	33.120	46.262
Jeongam	7.50	0.36	5.3	5.47	12.054	32.555	33.300	77.910
Yeonsan	8.00	0.39	43.6	15.73	10.726	5.619	24.685	41.030
Sano	8.42	0.01	49.0	19.00	33.300	4.127	20.905	58.332
Seongyeon	9.67	0.27	55.2	20.54	16.826	2.604	19.345	38.775
Yangwon	9.83	0.30	46.0	9.33	15.078	4.934	33.300	53.313
Sanjeong	12.58	0.10	2.1	8.18	33.300	33.300	33.300	99.900
Sasong	16.75	0.27	5.9	15.80	16.826	31.185	24.596	72.606

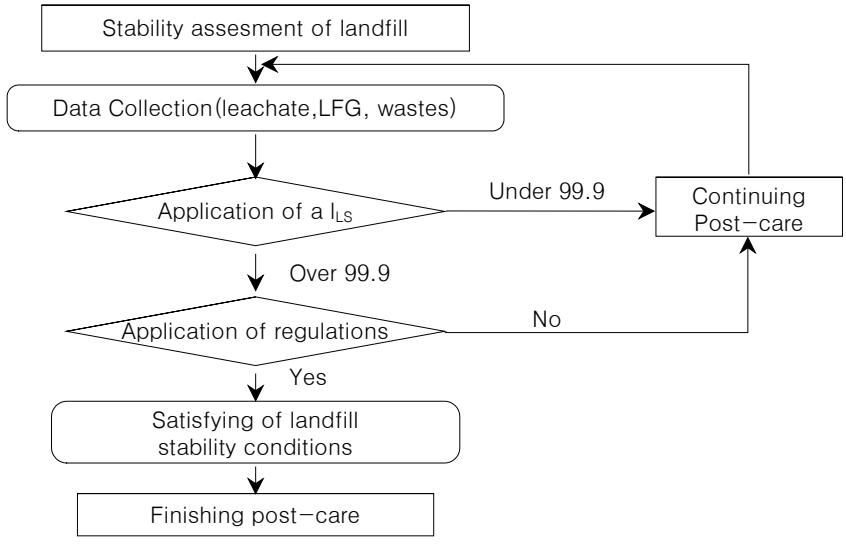
99.9점 이하로 안정화되기까지 아직 더 많은 시간이 필요하다는 사실을 알 수 있었다. 결과적으로 볼 때 본 연구에서 개발된 안정화지수는 매립지의 안정화정도를 나타내는데 적용성이 매우 높은 것으로 사료되며, 매립지별 안정화정도를 수치적으로 비교하는데 있어서 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

[Table 2]에 나타낸 것처럼 안정화점수가 99.9점이 되었을 경우 매립지가 안정화에 도달했다고 판단할 수 있다. 그러나 이 점수에 도달하였다 할지라도 법규에 나와 있는 안정화평가기준과 침출수 관리에서의 배출허용기준, 지하수 수질조사방법에서의 생활용수수질기준, 해수수질조사방법에서의 수질(해역)환경기준, 발생가스 관리방법의 발생가스 등의 기준을 모두 만족하지 못했을 경우에 그 매립지는 안정화 되었다고 할 수 없다. 따라서 최종적인 안정화 평가시에는 [Fig. 9]에 나타난 순서도에 따라 진행되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 폐기물 매립지에서 변화하는 다양한 환경지표들의 실제 매립지에서의 변화특성을 파악하고, 그 중 매립지 안정화와 가장 관련이 깊은 환경지표를 각 항목별로 선정하여 이를 지수화 함으로써 매립지 안정화를 평가하는데 있어서 기초자료로 사용하기 위한 안정화 지수를 제시하였다.

1. 환경지표의 변화특성을 살펴본 결과 침출수 항목에서는 BOD/COD_{Cr}이 매립가스 항목에서는 CH_4가, 매립폐기물 항목에서는 C/N가 매립지의 안정화를 가장 잘 나타낼 수 있는 각 항목별 환경지표라고 판단되었다.
2. 매립경년(X)과 환경지표값(Y)을 이용해 다음과 같은 추세선을 얻을 수 있었다.
   BOD/COD_{Cr} : $Y = 0.7446e^{-0.1067X}$
   CH_4 : $Y = 67.67e^{-0.1428X}$
   C/N ratio : $Y = 52.8e^{-0.1256X}$
3. 각 항목별 추세선의 최고값을 0점으로, 안정화 평가기준 값을 항목별 안정화 도달점수인 33.3점으로 놓고, 다음과 같은 안정화 지수식을 얻을 수 있었다.
   $I_{LS} = S_L + S_G + S_W$
   $S_L = -\{4.892 + 16.587 \cdot \ln[BOD/COD_{Cr}]\}$
   $S_G = 53.872 - 12.782 \cdot \ln[CH_4]$
   $S_W = 79.382 - 20.013 \cdot \ln[C/N]$
   (단, S_L, S_G, S_W는 각각 33.3점이 최대값이다.)



[Fig.9] Flowchart of stability assessment in landfill site.

여기서, I_{LS} : The stability Index of the landfill
S_L : The stability score of the leachate
S_G : The stability score of the landfill gas
S_W : The stability score of the waste

4. 안정화지수를 여러 매립지에 적용해 본 결과 매립경년이 12.58년 경과한 산정동매립지의 경우 99.9점으로 이미 안정화에 도달한 것으로 평가된다. 따라서 이러한 안정화 지수는 매립지의 안정화정도를 나타내기에 그 적용성이 뛰어난 것으로 판단되며, 여러 매립지의 안정화정도를 수치적으로 비교하는데 있어 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

본 연구에서는 다수의 매립지를 하나의 매립지로 생각하고 그 변화특성을 파악하여 안정화지수를 개발하였다. 그러나 폐기물매립지는 매립현황과 지역특성 등에 따라 환경지표의 변화특성이 많은 차이를 나타낼 수 있으므로 안정화 지수를 개발하기 위해서는 다수의 매립지가 아닌 단일 매립지에서의 환경지표의 변화특성을 사용하여야만 그 결과가 보다 신빙성이 있을 것으로 사료된다. 따라서 앞으로는 단일 매립지에서 매립개시부터 매립종료, 사후관리 시까지의 장기적인 환경지표의 변화특성 자료를 수집하여 안정화 지수를 개발하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

사사

본 논문은 안양대학교 안식년 기간중에 연구되었음.

참고문헌

1. (주)대우엔지니어링, 광주시 비위생매립지 환경영향조사 연구 (2001).
2. 환경관리공단, 경산시 비위생매립장의 매립폐기물 및 발생가스 성상조사 (2003).
3. 이남훈외 6인, "매립전처리 유무에 따른 매립후 2년이 경과된 폐기물의 물리화학적 특성비교", 한국폐기물학회, 22(2), pp. 153~160 (2005).
4. 한정현, 폐기물매립지의 안정화평가기법에 관한 연구, 안양대학교 공학석사학위논문 (2004).
5. 정승현, 신현무, 정병곤, "매립지 사용기간 경과에 따른 침출수 특성변화", 대한환경공학회지 춘계학술연구발표, pp .984~992 (2003).
6. Ehrig, H. J., Leachate Quality in Sanitary Landfilling, Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press, NY (1989).
7. Cheung, K. C., Chu, L. M., Wong, M. H., Toxic Effect of Landfill Leachate on Microalgae, Wasp 69, p.337~349 (1993).
8. Kruempelbeck, I., Ehrig, H. J., "Long Term behavior of Municipal Solid Waste Landfills in Germany" Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, October 4-7, Volume I, pp. 27~36 (1999).
9. 조재연, 폐기물매립장에서의 매립가스 성분과 C/N비 특성에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문 (2002).
10. 이남훈외 3인, "매립지 안정화 기술 동향" 지반환경, 한국지반환경공학회, 4(3), pp. 53~60 (2003).
11. 한정현, 권상빈, 이남훈, "폐기물매립지에 있어서 경과시간에 따른 환경지표의 변화특성" 한국폐기물학회 추계학술연구발표, pp. 589~592 (2003).
12. 수도권매립지관리공사, 폐기물 매립지에 있어서 Bioreactor형 매립공법 (침출수 재순환시스템 등) 도입에 관한 타당성 연구보고서 (2003).
13. 이남훈, 송선호, 폐기물 매립지의 안정화 지수 산정에 관한 연구, 한국폐기물학회 2004년도 춘계학술연구발표, pp. 343~346 (2004).