

부산 석대 생활폐기물 매립장의 환경오염에 대한 종합적 연구
The Synthetic Study of Environmental Contamination at the Seokdae Municipal Waste
Landfill in Pusan

김 병 우 · 정 상 용 · 이 민 회 · 이 병 현*

부경대학교 환경지질학과 · 부경대학교 환경공학과

(e-mail : sychung@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-6235, Fax : 628-6432)

요 약 문/ABSTRACT

부산 석대 매립지의 환경오염 특성을 파악하기 위해 매립장 지역의 가스발생량 측정, 침출수 및 토양시료 채취, 지구통계학적, 수리지질학적 및 지구화학적 분석과 실내 주상시험을 실시하여, 침출수의 오염 부하량과 가스발생량, 가스의 농도와 지반 침하, 지질매체의 특성, 침출수의 이동 및 확산의 관계를 고찰하였다. 그리고 물수지분석을 통하여 침출수의 발생량과 오염 부하량을 산정하였다. 매립장 A지구로부터 36개 가스정에서 획득한 가스자료를 O_2 , CH_4 , H_2S , CO 의 4가지 성분에 대해 지구통계학적 기법으로 분석한 결과, 다른 지점에 비해 가스의 농도가 높은 지점 주변에서 부분적으로 지반 침하가 발생하는 것으로 나타났다. Leachate-1, 2, 3에서 채취한 침출수의 화학적 분석 결과, 전기전도도와 Total Alkalinity는 높게 나타났으나, Cl, Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb 등이 과거보다 감소하였고, 수질유형은 삼각 다이아그램에서 $Na-HCO_3$ 형으로 나타난다. 수질분석 결과에 의하면 생활폐기물의 생분해가 아직도 계속해서 활발히 진행되고 있는 것으로 판단된다. 물수지분석 결과, 순수하게 지하로 침투하는 침출수량은 약 $465.11m^3/day$ 이고, Cl, Mn, Fe의 순수 오염 부하량은 각각 $223.8kg/day$, $0.2kg/day$, $0.3kg/day$ 로 추정된다. 매질에 대한 실내 주상시험에서 기반암 풍화토와 매립토에 대한 선형유속(\bar{V})은 각각 $0.206cm$, $0.019cm$, 확산계수(D)는 각각 $0.234cm^2/min$, $0.118cm^2/min$, 종분산 지수(α)는 각각 $1.136cm$, $0.095cm$ 로 복토재로 사용된 매립토보다 기반암풍화토가 오염물질의 확산속도가 더 큰 것으로 나타났다.

In order to understand the characteristics of leachate at the Seokdae municipal waste landfill in the Pusan city, the correlation between leachate pollution loading and volume of gas production, concentration of gas and subsidence of ground, the characteristics of media, and movement and diffusion of leachate were studied by geostatistical methods, geochemical analyses and laboratory column tests using samples of gases, leachate and surface soil of Seokdae waste landfill area. Through the analysis of water balance, leachate flow rate and pollution loading were estimated. Geostatistical analysis of four gas components (O_2 , CH_4 , H_2S and CO) shows the possibility of ground subsidence around the group of a site with high concentration of gas.

From geochemical analysis of leachate, EC and Total-Alkalinity were increased, and Cl, Cr, Mn, Cu, Zn, Cd and Pb were decreased comparing to the past, and the type of

water quality was Na-HCO₃ in trilinear diagram. It shows that biodecomposition of municipal wastes continues actively. From the analysis of water balance, the total leachate flow rate is about 465.11m³/day and pure pollution loading of Cl, Mn and Fe are estimated to 223.8kg/day, 0.2kg/day, 0.3kg/day, respectively. The laboratory column test of residual soil and landfill soil shows 0.206cm and 0.019cm for linear velocity (\bar{V}), 0.234 cm²/min and 0.018cm²/min for diffusion coefficient (D_l), and 1.136cm and 0.095cm longitudinal dispersion index (α_l), respectively. It demonstrates that the delay time of contamination for residual soil is shorter than that of landfill soil.

Key word: leachate, geostatic analysis, geochemical analyses, trilinear diagram, leachate flow rate, pollution loading, column test

1. 서론

우리 나라에서는 폐기물의 약 80% 정도가 매립 처분되고 있는데(환경부, 1995), 기존의 매립공법은 안정화에 소요되는 시간이 길고, 침출수 및 CH₄가 오랜 기간동안 분산 발생하여 적정하게 처리하지 않은 침출수가 지하수 오염을 유발하여 매립지의 유지관리 및 차후 유효 토지로서의 경제적 이용에 많은 제약들을 유발하고 있다. 따라서 매립 쓰레기의 조기 안정화를 위해 침출수 및 매립가스의 관리를 해야 할 필요성이 대두된다.

본 연구대상 지역인 석대 매립장은 1987년 6월부터 폐기물 매립이 시작되어 1993년 5월까지 만 6년간 부산시에서 발생하는 생활쓰레기를 산간계곡에 단순 투기식으로 4단계로 구분하여 수용하여 왔다.

본 연구에서는 매립장에서 발생된 침출수 및 가스분석결과를 토대로 매립장의 침출수-가스 현황을 파악하고, 매립지에서 유기물의 분해에 의해 생성될 수 있는 성분들을 이론적으로 간략히 제시하였으며, 조사지역에 산발적으로 분포하는 가스자료의 효과적인 분석을 위해서 대표적 지구통계학적 기법인 크리깅(kriging)을 이용하여 가스항목별 등치선도(isopleth map of gas)를 만들었다. 매립지의 강수량과 증발산량, 표면유출량 등으로부터 폐기물 매립지 하부로 침투하는 침출수 발생량을 Visual HELP 모델을 이용하여 산출하였다. 매립지에서 채취한 침출수는 부경대학교 지하수환경연구실과 기초과학연구소(부산분소)에서 성분분석을 실시하였고, 매립가스는 매립지 가스정으로 부터 직접 측정하였으며, 매립장에서 기반암풍화도와 매립시료를 각각 채취하여 실내 주상시험을 실시하였다.

2. 실험 방법 및 분석

2.1. 유기물 분해에 의한 가스 발생

폐기물중의 여러 가지 물질은 시간경과와 함께 물리적, 화학적 및 생물·화학적 작용을 받아 변화하는데, 폐기물 매립지 내에서 산소가 고갈되면서, 유기물의 분해활동은 단계적으로 시작된다. 음식물 쓰레기에서 유기물이 혐기적으로 분해하여 고분자의 유기물이 혐기성 세균에 의해 저분자의 중간생성물로 분해되며, 안정화된 혐기성 매립지 내에서는 두 종류의 박테리아가 함께 작용하여 유기물질을 분해한다. 부생 미생물이 먼저 산으로 분해한 다음, CH₄박테리아(methane forming bacteria)가 CH₄와 CO₂로 전환시킴으로써 완결된다.

그리고 유기물의 분해에 의해서 발생하는 가스의 주성분은 CH₄나 CO₂, 기타 미량의 H₂S가 있다. 또한 발생한 CO₂의 일부는 물에 녹아서 HCO₃가 된다. 석대 매립지의 경우 2000년

10월 5일에 채취한 침출수 수질분석 결과에 의하면 HCO_3 가 과거 보다 상당히 높게 나타났다. 그것은 유기물의 생분해가 활발히 진행되고 있음을 나타내며, 유기물의 분해에 의해서 발생하는 가스성분 중 CH_4 나 CO_2 가 많은 양으로 방산하면서 CO_2 의 일부는 물에 녹아서 HCO_3 가 높은 농도를 가진다. 따라서 석대 매립지에서 채취한 침출수 수질 성분중 HCO_3 가 상당히 높게 나타났다.

2.2. 가스의 지구통계학적 분석

석대 매립지 A지구에 산발적으로 분포하는 가스자료(6월, 8월)의 효과적인 분석을 위해서 지구통계학적 기법인 크리깅(kriging)을 이용하였다. 가스자료의 공간상에 분포하는 특성과 연속성(continuity)을 파악하기 위해 각 자료들간의 거리에 대한 분산인 베리오그램(variogram)이 필요한데, 비선형 최소자승법(nonlinear least squares method)을 이용하여 shperiac model, exponential model를 적용한 결과, 4개 성분(O_2 , CH_4 , H_2S , CO) 모두 shperiac model이 가장 적합한 것으로 나타났다. 그리고 4개 가스성분에 대한 베리오그램 분석 결과, 대부분이 정상확률 함수를 이루었기 때문에 정규크리깅을 이용하여 등치선도(isopleth map of gas)를 작성하여 각 가스성분별 분포특성을 파악하였다

Figure 1에 도시한 크리깅의 각 가스성분별 등치선도 분석에 의하면 6월과 8월을 비교해 볼 때, O_2 와 CH_4 의 분포는 비교적 비슷한 양상을 나타내며, H_2S 와 CO 성분의 경우 크게 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 6월과 8월에 측정된 O_2 , CH_4 , H_2S , CO 의 가스성분별 분석에 의한 등치선을 중첩(overlap)시켜 보았다. 그 결과 크리깅에 의한 등치선과 외관으로 나타나는 부분 침하가 어느 정도 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 크리깅에 의한 등치선과 부분 침하가 두드러지게 나타난 위치는 농도가 국부적으로 나타난 지점 주변에서 수십 cm에서 수십 cm로 인지되는 침하 부분을 확인 할 수 있다.

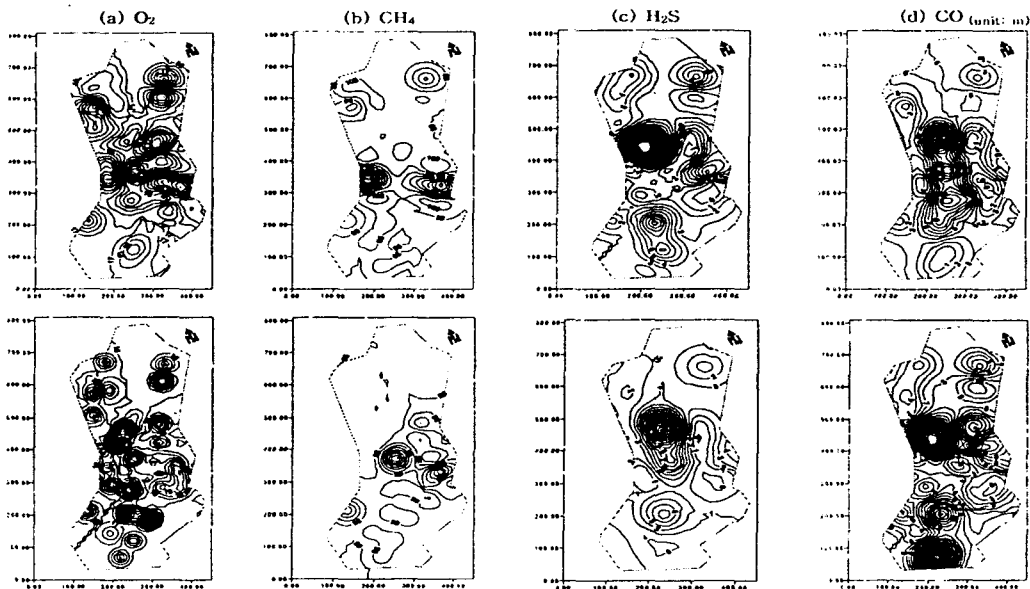


Fig. 1. Isopleth map of gases measured in June (top) and August (bottom).

2.3. 침출수 수질 및 수량분석

2000년 10월 석대 매립장에서 발생하는 침출수를 채취하여 수질분석을 실시한 결과, 전기

전도도는 8,600~10,030 $\mu\text{m/cm}$, Total Alkalinity는 2,048~2,820ppm으로 과거보다 감소되었고 Cr과 Mn도 93, 96, 97년 조사치 보다 약간 감소하였다. 침출수 수질분석 자료를 삼각다이어그램으로 표시한 결과 침출수의 수질 유형이 과거의 Na-Cl형에서 Na-HCO₃형으로 나타났다. 따라서 매립이 끝난지 7년이 지난 현재에도 생활폐기물의 생분해가 활발히 진행되고 있는 것으로 나타났다.

2.4. 침출수 발생량과 오염 부하량

석대 매립지의 침출수 발생량을 산정하기 위해 1991년부터 2000년 8월까지의 부산지방의 월별 강수량, 월별 평균지온과 수평면 일사량의 자료를 이용하여, Waterloo Hydrogeologic 사(社)에서 개발한 Visual HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) 프로그램을 이용하여 Table 1에 침출수 발생량을 산출하였으며, 침출수의 수질 분석 성분중 음용수 기준치를 초과한 4개 성분(Cl, Mn, Fe, Al)에 대한 오염 부하량을 산정하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Average annual totals of hydrologic data from 1991 to 2000.

	quantity(mm yr)	quantity(m ³ day)	ratio(%)
Precipitation	1331.11	1875.76	100
Runoff	140.713	198.29	10.57
Evapotranspiration	135.574	616.61	32.87
Percolation through layer 2	752.440	1060.31	56.53
Average head on top of Layer 2	2.812	-	-
Percolation through layer 3	648.881	965.11	51.45
Change in Water Storage	67.94	95.75	5.10

Table 2. Leachate pollution loading (unit: kg day).

Component	July,96	Oct,00
Cl	705.0	464.4
Mn	1.0	0.5
Fe	-	0.6
Al	0.2	-

2.5. 실내 주상시험

석대 매립장에서 발생하는 침출수의 수리분산을 구하기 위해 석대 매립장의 안산암질암의 기반암풍화토와 매립지의 상부 매립토를 이용하여 실내 주상시험을 수행하였다.

기반암풍화토의 경우 실험 방법은 농도가 54ml/ℓ 인 요오드(I) 용액을 직경 5cm, 길이 50cm에 주입하여, 총 409분에 걸쳐 1.7분의 시간간격(time interval)으로 시료 188개의 용액을 채집하였고, 매립토의 경우 기반암 풍화토보다 20cm 작은 컬럼(column)에 농도가 54ml/ℓ 인 요오드(I) 용액을 주입하여 3,089분에 걸쳐 29분의 시간간격으로 시료 82개의 용액을 채집한 후, 농도측정기(Istek Ion-Meter)로 요오드 이온의 농도를 측정하였다. Figure 2에서 시간별 농도변화곡선인 농도이력곡선(breakthrough curve)과 컬럼을 통과하는 평균유속 및 종분산지수를 구하였다. 컬럼을 통과하는 평균유속(\bar{V})은 각각 0.206cm, 0.019cm, 분산계수(D_l)는 각각 0.234 cm²/min, 0.018cm²/min, 종분산지수(α_l)은 각각 1.36cm, 0.095cm로 나타났다.

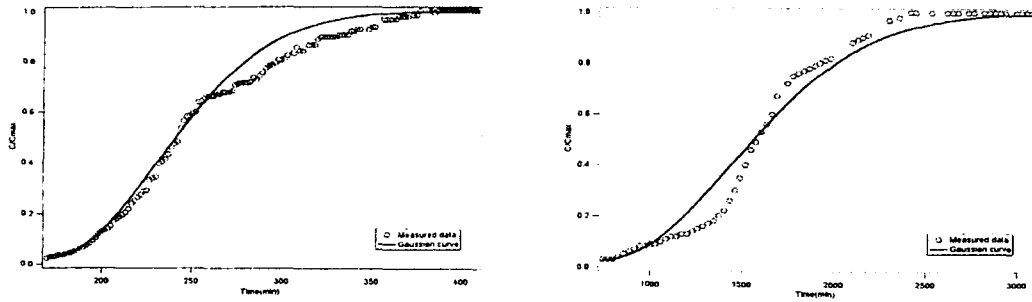


Figure 2. Breakthrough curve of measured and theoretical curve for residual soil (top) and landfill soil (bottom).

3. 결론

1) 석대 매립지 A지구에서 생분해 및 물리적 작용에 의한 부분 지반침하를 유추하기 위해 2000년 6월과 8월 A지구로부터 36개 가스정에서 가스자료를 획득한 후 Variogram과 Kriging을 이용하여 작성한 등치선도와 4가지 가스성분별 농도분포를 검토한 결과, 농도가 높은 지점 주변에서 수cm ~ 수십cm 정도의 부분 침하가 나타났다. 따라서 가스방출이 높은 지점은 유기물의 생분해가 활발한 곳으로 부분적인 침하가 발생한 지점으로 판단된다.

2) 2000년 10월 매립장에서 발생하는 침출수를 채취하여 수질분석을 실시한 결과, 전기전도도와 Total Alkalinity는 과거보다 감소되었고, Cr과 Mn도 93, 96, 97년 조사치 보다 감소하였고, Cu, Zn, Cd, Pb 등은 나타나지 않거나 소량으로 나타났다. 침출수 수질분석 자료를 삼각다이아그램으로 표시한 결과 수질 유형이 과거의 Na-Cl형에서 Na-HCO₃형으로 나타났다.

3) 석대 매립지의 침출수 발생량을 산정하기위해 Visual HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) 프로그램을 이용하여 물수지분석을 실시한 결과 순수하게 지하로 침투하는 침출수량은 약 465.11m³/day이다.

4) 침출수 발생량의 연평균과 침출수의 수질농도의 곱으로 1996년 7월과 2000년 10월의 Cl 이온과 오염농도가 큰 중금속 성분(Fe, Mn, Al)의 오염 부하량을 산정하였다. 그 결과 96년에는 Cl이 705.0kg/day, Mn이 1.0kg/day, Al이 0.2kg/day, 2000년에는 Cl이 464.4kg/day, Mn이 0.5kg/day, Fe가 0.6kg/day가 매일 지하로 침투하는 것으로 나타났으며, 2000년 Cl성분은 1996년에 비해 1.52배, Mn은 2.0배로 낮게 나타났다.

5) 매립지의 풍화잔류토와 매립토에 대해 비반응성 물질인 요오드 이온(I⁻)을 이용하여 오염의 이동현상을 측정하는 실내 주상시험을 실시한 결과 column을 통과하는 평균유속(\bar{V})은 각각 0.206cm, 0.019cm, 분산계수(D_l)는 각각 0.234 cm²/min, 0.018cm²/min, 종분산지수(α_l)은 각각 1.36cm, 0.095cm이며, 요오드 이온의 통과시간은 풍화잔류토에 비해 매립토에서

6.2배 더 소요되는 것으로 나타났다. 따라서 매립토보다 기반암풍화토가 오염물질의 확산이 더 크게 나타났다.

4. 참고문헌

- 1) 기상청, 1991~2000, 기상연보.
- 2) 권해우, 1997, 부산 석대 폐기물 매립장 지역의 지하수 오염특성. 부경대학교 대학원 석사논문, pp. 1~67.
- 3) 김남천 외 7인, 2000, 환경미생물제어공학, 도서출판 동화기술.
- 4) 부산광역시 해운대구청, 1993, 석대 쓰레기 매립장 안전 진단 및 사후 환경 관리 방안연구(연구수행기관: 동아대학교 환경문제 연구소).
- 5) 부산광역시, 1996, 1999, 환경백서.
- 6) 부산발전연구원, 1998, 생활쓰레기의 효율적인 관리방안.
- 7) 정문식 외 3인, 1997, 환경화학, 신광문화사, pp. 335~336.
- 8) 정상용, 1995, 부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염. 지하수환경학회지, Vol.2, No.1, pp. 1~8.
- 9) 정상용 외 3인, 1997, 부산 석대 폐기물 매립지 일원의 수질 환경, 지하수환경학회지, Vol.4, No.4, pp. 175~184.
- 10) 환경부, 침출수 처리기술 개발, 1997a, (주)대우 건설기술연구소(최종보고서).
- 11) Gamma Design Software Inc, 1998, GS_{TM}^+ User's Manual.
- 12) Journel, A. G., and C. H. Huijbregts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, 600p.
- 13) Joseph S., Lorne G., James C. S., Robert L., 1989. " Subsurface Migration of Hazardous Wastes".
- 14) Matheron, G., 1969, Le Krigeage Univesal, Cah. Centre Marphol, Math.,1.
- 15) Matheron, G., 1970, The Theory of Regionalized Variable and its Applications, Cah. Centre Morphol. Math., 5.
- 16) Matheron, G., 1973, The Intrinsic Random Functions and Their Applications, Advanced Applied Probability, Vol. 5, pp. 439~468.
- 17) Waterloo hydrogeologic Inc, 1998, AquaChem User's Manual.
- 18) Waterloo hydrogeologic Inc, 1998, Visual HELP Model User's Guide, Version 1.1.