ORIGINAL PAPER 원저

공기주입과 침출수 재순환 방법을 이용한 폐기물 매립지 조기안정화에 관한 현장 실험 연구

윤석표†, 짜오신, 이남훈*, 전연호**, 변영덕**, 안영미***, 민지홍***
세명대학교 바이오환경공학과, 안양대학교 환경공학과*, (주)에이치플러스에코**, 한국환경공단 에너지사업단***
(2010년 5월 4일 접수, 2010년 6월14일 수정, 2010년 6월 15일 채택)

A field study on early stabilization of waste landfill using air injection and leachate recirculation

Seok-Pyo Yoon†, Xin Zhao, Nam-Hoon Lee*, Yeon-Ho Jeon**, Young-Deog Byun**, Young-Mi Ahn***, Ji-Hong Min***
Department of Environmental Engineering, Semyung University
Department of Environmental Engineering, Anyang University*, H-Plus Eco Ltd.**
Korea Environment Corporation***

ABSTRACT

Field study was conducted for 5 months to investigate the effect of leachate recirculation on aerobic landfill stabilization at active landfilling site. The area of field experiment was 24×24 m and 9 vertical air injection wells with screen ranging 3~9 m were installed. Aerobic landfill operation for 5 months increased average internal landfill temperature to 70 ℃ and 8 % of landfill height was settled down. 94 ㎥ of leachate was recirculated for 1 month to increase moisture content of landfill to favor microbial degradation of organic matter, which resulted in temporary increase of groundwater level and anaerobic environment. But leachate recirculation triggered increase of internal landfill temperature of neighboring monitoring well. Because excessive leachate recirculation decreased internal landfill temperature by cooling effect, internal landfill temperature should be checked to avoid abrupt decrease of temperature during leachate recirculation. Also, to prevent anaerobic environment, intermittent leachate recirculation was recommended.

Keywords : aerobic landfill operation, leachate recirculation, field study, temperature

†Corresponding author : yoonsp@semyung.ac.kr

초 록

현재 매립 중인 폐기물 매립지 현장에서 공기주입을 5개월간 하였으며, 일정기간 침출수 주입을 병행하면서 이에 따른 매립지 조기안정화 효과를 관찰하였다. 실험부지 면적은 24×24 m 규모이었으며, 부지 내에 3~9 m 깊이에 유공부를 설치한 9개의 공기주입용 수직정을 설치하였다. 매립지를 5개월 간 호기적으로 운전함에 따라 매립지 내부 평균 온도는 70 ℃까지 상승하였으며, 매립고의 8 %에 해당하는 침하가 발생하였다. 미생물에 의한 유기물 분해 촉진을 위하여 1개월간 94 ㎥의 침출수를 실험부지의 일부 구역에 재순환시킨 결과 일시적으로 매립지 내 지하수위가 상승하였고, 혐기성 환경이 조성되었다. 하지만, 침출수 재순환은 침출수 주입정 주변의 매립지 내부 온도를 급속히 상승시키는 효과를 가져왔다. 그러나 과도한 침출수 주입은 매립지 내부를 냉각시켜 온도 상승을 저하시키는 효과를 나타내므로, 매립지 내부온도 변화를 관찰하면서 침출수 주입량을 조절할 필요가 있으며, 침출수 주입은 간헐적으로 하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 호기성 매립지 운영, 침출수 재순환, 현장 실험, 온도

1. 서 론

2008년말 현재 운영 중인 전국의 생활폐기물 매립지는 220개소이며, 전체 매립용량은 384,963천㎥이다. 잔여매립용량은 192,465천㎥이며, 2008년도 생활폐기물 매립량 9,425천㎥을 기준으로 할 때, 매립지 평균 사용가능연수는 수도권 매립지 포함시 20년, 수도권매립지 제외시 13년이다. 향후 사용가능연수가 5년 미만인 매립지는 113개소로 전체 매립지의 51.4 %에 해당된다[1].

최근 생활폐기물의 처리에 있어서 매립의 비중은 점차 낮아져서 2007년말을 기준으로 할 때 23.6 %를 나타내고 있으나[2], 여전히 소각보다는 매립의 비율이 높으며, 폐기물을 소각하는 경우에도 바닥재와 같은 무기물은 매립에 의존할 수 밖에 없다.

하지만, NIMBY 현상에 의해 각종 폐기물 처리시설을 신규로 확보하는 것은 무척 어려운 실정이다. 따라서 토지자원의 효율적인 활용과 NIMBY 현상의 최소화 측면에서 기존에 사용 중인 폐기물 매립지를 공학적으로 적절한 처리를 통해 조기안정화시킨 후 순환이용하는 방법을 적극적으로 검토할 필요가 있다.

과거 각종 도로공사나 택지개발 현장에 묻힌 폐기물을 굴착/이송하기 위해 굴착시 발생하는 각종 악취 및 환경오염물질을 저감하기 위한 목적으로 사전악취안정화 공사를 시행한 사례는 국내에도 많이 있었으나[3)~11)], 이들은 굴착시 발생하는 악취를 일시적으로 저감하는 목적이었으며, 분해가능한 유기물질을 완전히 안정화시킨 것은 아니었다. 즉, 과거의 국내 적용사례는 매립지 굴착시 발생하는 악취의 일시적인 발생저감을 위해서 매립지 공극 내에 존재하는 악취성분을 공기로 치환하고, 일시적으로 호기성 환경을 유지함으로써 굴착시 악취발생에 의한 민원을 최소화하는데 목적을 두었었다.

외국의 경우에도 호기성 매립과 관련한 사례는 다수 보고되고 있으나[12)~17)], 대부분 사용종료된 매립지를 조기에 안정화하기 위한 목적이었으며, 현재 운영 중인 매립지에서 실규모로 호기성으로 운전하는 사례는 극히 드문 실정이다.

매립지 조기안정화의 지표는 사용종료된 매립부지의 토지사용목적에 따라 달라지게 된다. 본 연구의 목적인 순환형 매립지 정비사업과 관련한 매립지 조기안정화 지표는 정[18]에 의해 제안된 바 있다. 제안된 조기안정화 지표는 자원화 가능 안정화 지표로서 현장실험에서 매립지 내부온도(45 ℃ 이하), 실내실험에서 함수율(25 % 이하) 및 산소소모량(10 mg O_2/g DM 이하)을 제안하였으며, 굴착시 환경위해성 저감 안정화 지표로서 메탄, 산소, 이산화탄소, 일산화탄소, 황화수소, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 에

틸머캡탄 등을 제안하였다. 사용종료매립지의 사후관리 종료기준 개선안[19]에서는 메탄가스 농도(5 % 이하), 매립지 내부온도(주변 지중의 동일심도 온도보다 10 ℃ 이상 높지 않을 것), 매립폐기물의 산소소모량(5 mg O_2/g DM 이하) 또는 가스발생량(20 Nl/kg VS 이하) 등의 지표가 제안된 바 있다.

본 연구에서는 매립지 조기안정화 지표에 대해서는 다루지 않으며, 이는 추후 별도의 논문에서 다룰 예정이다.

본 연구에서는 현재 매립 중인 생활폐기물 매립지의 일부 구역에서 공기 주입을 통한 매립지의 호기성 운전을 도모하고, 아울러 매립폐기물의 수분 함량이 미생물의 생분해 측면에서 볼 때 낮은 상황을 감안하여 일정 기간 침출수 재순환을 시행하였을 때 침출수 재순환이 호기성 매립지 운전에 미치는 영향과 이때 나타나는 현상을 조사하였다. 이를 통해서 2010년부터 우리나라에서 시범사업이 실시될 예정인[18] 순환형 매립지 정비사업의 시행시에 고려하여야 할 기초자료를 제공할 수 있다.

2. 실험방법

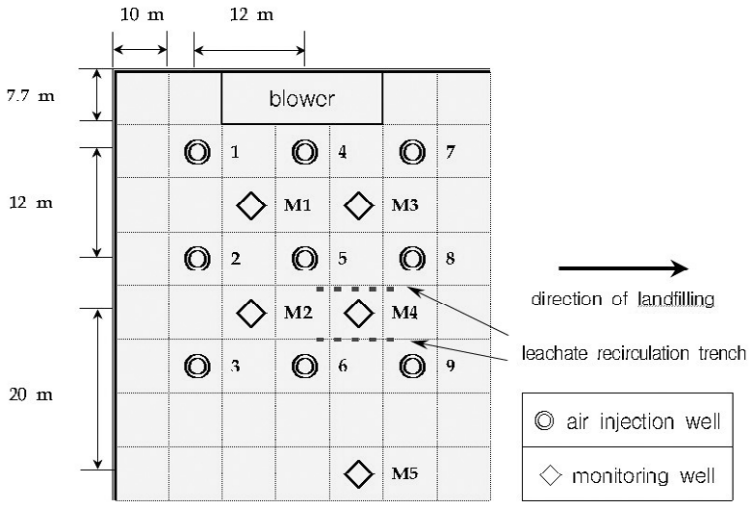
2.1 실험재료

호기성 안정화 현장실험은 현재 매립 중인 Y시 생활폐기물 매립지에서 실시하였으며, Y시 생활폐기물 매립지의 개요는 [Table 1]과 같다. 실험장치의 설치위치는 매립지 내에서 매립심도가 최소 10 m 이상이 되고, 6개월 이내에 매립작업이 진행되지 않는 위치를 매립지 운영자의 추천을 받아 결정하였다. 당초 공기주입정은 15 m 간격으로 설치할 계획이었으나, 현지 여건을 감안하여 12 m 간격으로 9개를 설치하고, 송풍기와 연결시켰다[Fig. 1]. 4개의 공기주입정이 격자를 이루는 가운데 지점에 관측정이 위치하도록 4개의 관측정을 설치하였으며(M1~M4), 대조 관측정 역할의 관측정 M5는 바닥차수층의 손상 우려로 멀리 이격하지 못하여서 가장 가까운 공기주입정인 9번 관측정과의 직선거리가 16 m에 불과하여 실제적인 대조 관측정을 하기에는 다소 미흡하였다.

공기주입정과 관측정은 직경 10 cm의 PVC관을 깊

[Table 1] Status of Y Municipal Solid Waste Landfill

Total area	Amount of landfilled waste	Amount of remaining capacity	Opening year	Estimated closing year	Average leachate generation
143,900 ㎡	594,335㎥	2,014,665 ㎥	1994	2018	150 ㎥/day



[Fig. 1] Plan view showing injection wells, monitoring wells and leachate recirculating trench.

이 9 m까지 굴착하여 설치하였다. PVC관 주변에는 왕사를 채워 공기의 투과성이 좋게 하였으며, 상부는 공기의 흐름을 차단하기 위해 벤토나이트를 채우고, 맨 마지막은 시멘트 모르타르로 마감하였다. 수직관은 상부 3 m는 무공처리하고, 하부 3~9 m는 유공부위로 처리하였다. 9 m까지 수직관을 설치하는 동안 매립지 내부에 침출수에 의한 지하수면 형성은 관찰되지 않았다. 7.2 m^3/min × 5,000 mmAq × 15 kW 용량의 송풍기는 안정적인 운전과 에너지 절감 등을 고려하여 타이머로 40분간 운전한 후, 20분간 쉬는 형태로 연속운전 하였다.

매립지 내부의 수분함량이 낮은 사실을 고려하여 호기성 운전 73일째부터 관측정 M4 주변으로 2 m 깊이에 내경 32 mm의 PVC 유공관을 8 m로 2열 설치하여, 침출수를 1일 4 m^3씩 주 5회 빈도로 32일간(8/28까지) 총 94 m^3를 매립지에 주입하였다.

2.2 측정항목

관측정에서의 매립가스 농도변화는 휴대용 매립가스분석기(GA2000, Geotechnical Instruments)를 가지고 현장에서 바로 분석하였으며, 측정빈도는 시험 첫 주에는 4회, 둘째 주에는 2회씩 분석하였고, 셋째 주부터는 주1회 하였다. 동일한 조건 하에서의 측정을 위해서 공기주입용 송풍기를 가동시킨 상태에서 매립가스 농도를 측정하였으며, 매립지 내부온도 상승으로 매립가스 내에 수증기가 많아진 이후에는 매립가스분석기 앞단에 수분제거장치를 두어 기기의 오작동이 발생하지 않도록 하였다.

매립지 내부온도는 9 m 길이의 K-타입 온도센서를 관측정 내부 아래로 1 m 간격으로 내리면서, 지상의 관측부에 표시되는 온도를 1 m 간격으로 측정하였다. 관측정 샘플링 포트에서 온도센서와 알코올 온도계로 배출가스의 온도를 동시에 측정한 결과 측정값이 차이가 나서, 온도센서와 알코올 온도계와의 상관관계를 구하여, 온도센서로 측정한 관측정 내부온도는 보정식에 의해 보정한 값으로 표시하였다.

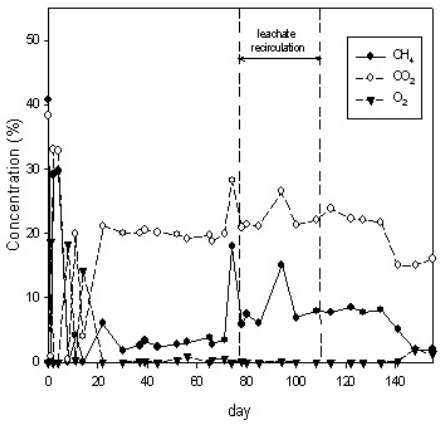
침하량 측정은 공기주입정과 관측정이 위치하는 14지점을 월 1회 수준측량을 하여 침하량과 침하에 따른 매립공간 확보량을 측정하였다. 이때 매립지 외곽에 위치하는 사면의 U형 측구 한 지점을 라커로 표시하여 이를 기준점으로 삼았다.

관측정 내의 수위는 수위계(Yamayo사 Million 수위계 10 m)를 이용하여 측정하였다. 수위관측은 침출수 재순환 전후에 관측정의 수위 변화를 관찰하는데 이용되었으며, 매립지 내부온도가 온도센서 기준으로 80 ℃ 이상으로 높아진 이후에는 수증기로 인해 센서의 오작동이 발생하여 측정이 불가하였다.

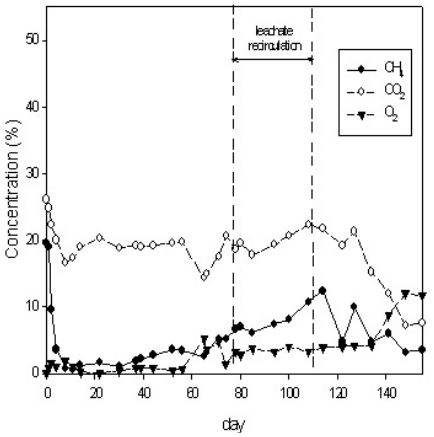
3. 결과 및 고찰

3.1 매립지 가스 농도 변화

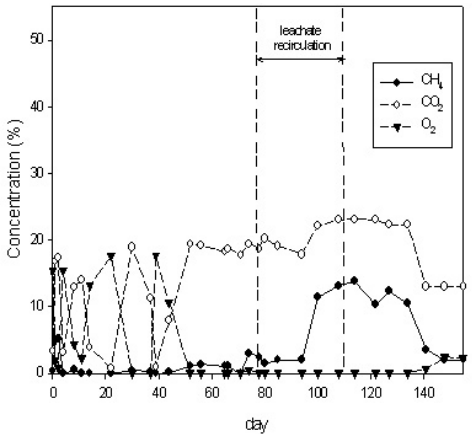
공기주입에 따른 호기적 조건에서의 관측정에서의 매립가스 농도 변화추이는 [Fig. 2]~[Fig. 6]과 같다.



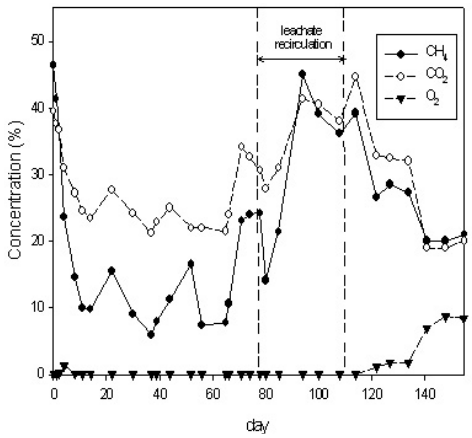
[Fig. 2] Concentration variation of emitted landfill gas at M1.



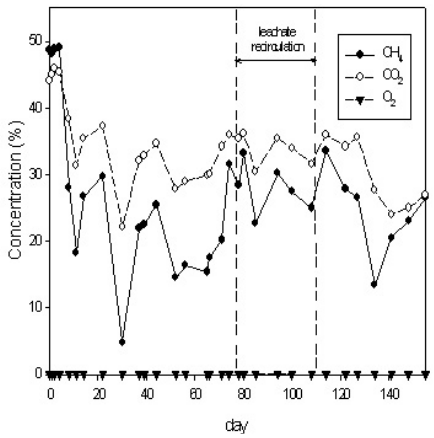
[Fig. 3] Concentration variation of emitted landfill gas at M2.



[Fig. 4] Concentration variation of emitted landfill gas at M3.



[Fig. 5] Concentration variation of emitted landfill gas at M4.



[Fig. 6] Concentration variation of emitted landfill gas at M5.

공기 주입 후 약 1주일간은 매립폐기물 내 공극이 공기로 치환되어 메탄가스의 농도가 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, 관측정 위치별로 메탄가스 농도는 상이하였다. 관측정 M1~M3은 메탄 농도가 5 % 이내로 낮아졌으나, M4의 경우 공기를 주입하였으나, 실험기간 중 평균 20 %의 메탄 농도를 유지하였다. M4는 [Fig. 1]의 현장실험장치 배치도에서 보듯이 사면부에서 가장 멀리 위치하고, 오른쪽은 폐기물 매립이 계속 진행되고 있어서 매립진행부에서 지속적으로 메탄가스의 전달이 이루어지는 관계로 공기주입에도 불구하고 메탄가스 농도가 높게 유지되었다.

71일째 M1의 메탄가스 농도가 17.9 %로 높아진 것은 송풍기를 끈 후 1시간 45분 경과한 후에 측정한 것에 기인하는데, 이는 현재 매립이 진행 중인 매립지여서 메탄가스 농도가 빠르게 회복되고 있음을 보여주는 사례이다.

관측정 M2는 실험 종반까지 가장 높은 온도를 나타낸 관측정으로 다른 관측정과 달리 실험기간 동안 계속 평균 2.5 % 수준의 산소가 검출되었다. 따라서 매립지의 내부온도를 높이는데는 토양 내 산소농도를 2 % 이상 유지키는 것이 효과적이라 할 수 있다.

관측정 M3의 경우 공기를 주입하기 전부터 메탄가스 함량이 낮았다. 관측정에서 매립고가 낮아지는 북측 소단까지의 직선거리가 약 14 m에 불과하므로, 사면에서의 공기유입을 의심할 수도 있으나, 동일한 조건인 M1의 경우 40 % 이상의 높은 초기 메탄 농도를 보였으므로, 사면에서의 공기유입이 직접 원인은 아닌 것으로 보이며, 관측정 주변에 비닐류와 같이 토양 내 공기의 흐름을 막는 물질이 감싸고 있어서 매립가스의 흐름이 원활하지 않는 것으로 추측하였다. 하지만, 침출수 재순환을 시작하고 23일째 측정한 메탄가스 농도는 11 %를 나타내었고, 약 한 달간 10 % 초반의 농도수준을 유지하였는데, 침출수 재순환에 의해 공기 전달이 차단된 결과로 보인다. 또한 산소농도는 실험 초기 10 % 이상으로 높았으나, 침출수 재순환을 실시하고는 검출되지 않았다. 공기주입 109일째(침출수 주입 32일째) 침출수 재순환을 종료함에 따라 매립지 내부의 침출수 수위는 다시 낮아져서 공기주입 141일째(침출수 주입종료후 32일째)에 측정한 결과 M3 지점

의 메탄가스 농도는 3.5 %로 낮아져서 침출수 재순환은 매립지 내부를 호기성으로 운전하는데는 불리함을 보여준다.

관측정 M4는 실험기간 동안 지속적으로 높은 메탄농도를 나타내었으며, 특히 침출수 재순환이 이루어진 후 메탄가스 농도는 약 20 %가 상승하여 40 % 수준을 나타내었다. 침출수 재순환이 종료된 후 내부 침출수위가 낮아지면서 공기주입 122일째(침출수 주입종료 후 13일째) 이후 산소농도는 1 % 이상으로 M3 보다 높은 수준을 나타내었다.

대조정의 역할을 하는 관측정 M5는 주변에 직접적인 공기 주입정은 없으나, 공기주입정과의 직선거리가 16 m에 불과하여 공기주입의 영향을 약간은 받는 것으로 추정된다. 즉, 송풍기 가동 유무에 따라 관측정 시료채취 포트에서의 공기 유량이 다른 것을 볼 때 송풍기의 공기가 M5까지 이동하여 오는 것을 알 수 있었다. 하지만, 실험기간 동안 평균 23 % 수준의 메탄가스농도를 나타내었고, 산소는 검출되지 않아 대조정의 기능은 충실히 하는 것을 보여준다. 다만, 초기 49 % 수준의 메탄가스 농도가 공기 주입 후 23 %로 약 절반 가까이 낮아져서 공기 주입의 영향이 다소는 있음을 볼 수 있다.

공기주입 141일째 매립지 토양에 공급되는 공기량을 2배로 증가시킨 이후 전체 관측정에서 산소가 검출되고 있으며(1.3~12 % 범위), 이에 따라 메탄가스의 농도는 낮아졌다. M4의 경우 산소 농도가 8 % 대로 높음에도 불구하고, 메탄가스의 농도도 20 %의 높은 값을 나타내어 주입한 공기와 주변에서 발생하는 매립가스가 혼합된 상태임을 알 수 있다.

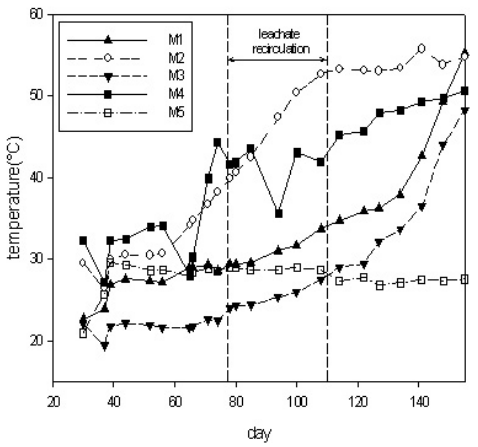
3.2 매립지 내부 온도 변화

실험초기 각 관측정 8 m 깊이에서의 매립지 내부온도는 22~32 ℃ 범위였으나, 공기주입에 의해 온도가 상승하여 공기 주입 155일째 매립지 내부온도는 48~55℃로 18~33℃ 상승하였다[Fig. 7].

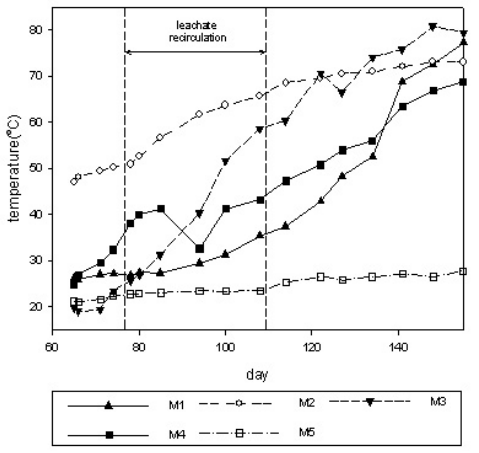
산소농도가 높게 유지된 M2의 온도가 실험 기간 중 가장 높게 나타났으며, 침출수 재순환이 이루어진 M4의 경우 주입된 침출수에 의한 냉각효과로 94일째(침출수 주입 17일 후, 누적 침출수량 50 m^3) 온도가 7.9 ℃ 낮아졌다가 이후 다시 상승하는 것을 볼 수 있다.

공기량을 2배로 증가시켜 모든 관측정에서 산소가 검출된 141일 이후에는 상대적으로 내부온도가 낮았던 M1, M3의 온도도 높아져서 8 m 깊이에서의 모든 관측정 온도가 55 ℃ 주변으로 수렴하였다. 대조정인 M5는 실험기간 내 28 ℃ 부근의 일정한 값을 보였다.

깊이별 온도 측정은 공기주입 65일째부터 측정하였는데, 온도가 가장 높은 3 m에서의 온도 변화를 [Fig. 8]에 나타내었다. 3 m 깊이에서의 온도는 산소농도가 높았던 M2가 가장 높았으나, 공기주입 122일째 M3의 농도가 M2를 상회하였다. 이는 침출수 재순환에 의한 효과로 판단된다. 즉, M4의 경우 침출수 재순환에 의해 침출수위가 높아져서 산소전달에 어려움이



[Fig. 7] Temperature variation of monitoring well at the depth of 8m.



[Fig. 8] Temperature variation of monitoring wells at the depth of 3m.

있었던 반면, 인접한 M3의 경우 공극이 주입한 침출수로 완전히 막히지 않는 수준에서 수분 공급이 이루어져서 미생물의 활동도가 증가한 것으로 판단된다. 특히, 141일째부터 공기주입량을 2배 증가시킴에 따라 매립지 내부온도는 M1과 M4의 온도는 온도센서 측정값 기준으로 65 ℃를 상회하였다. 매립지 내부 최고온도는 공기주입 148일째에 M3에서 80.8 ℃를 나타내었다. 이 온도는 관측정 내부의 빈 공간에서 측정한 온도이고, 매립토양에서 PVC 파이프로 열전달되는 과정을 고려하면 실제 매립지 내부의 온도는 이보다 다소 높은 온도일 것으로 추정된다.

관측정별 평균 온도변화는 [Fig. 9]와 같다. 산소농도가 계속 검출되었던 M2의 온도가 지속적으로 계속 가장 높은 온도를 보였으며, 공기 주입 후 5개월을 경과해서는 M3가 가장 높은 온도를 보였는데, 이는 침출수 재순환에 의해 수분함량이 높아져서 미생물 분해에 유리한 환경이 조성된 결과에 기인하는 것으로 보인다.

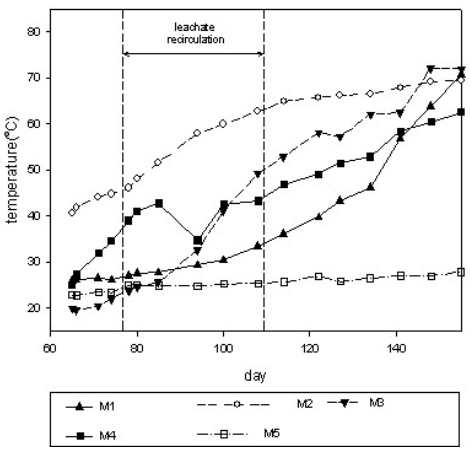
공기주입량을 2배로 증가시킨 141일째 이후 매립지 내부온도는 급격히 증가하여 전체적으로 평균 온도가 65 ℃ 이상으로 높아졌는데, 산소공급은 미생물 분해반응에 유리한 환경을 조성하여 매립지 내부온도를 급속히 증가시켰으며, 높아진 내부온도에 의해 관측정 주변에는 응축수가 생성되어 국부적으로 수분함량이 높아지는 현상이 발생하였다. 따라서 매립지 내부로 공기를 주입하면 매립지 내부온도가 증가하고, 장기적으로는 수직정과 관측정으로 배출되는 수증기에 의해 매립지 내부의 수분함량은 지속적으로 감소할 것으로 추정된다.

3.3 침출수 주입 효과

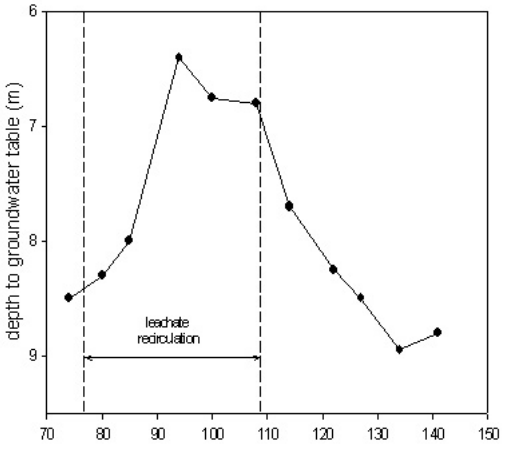
침출수 주입관 설치 이전 7월 중에 내린 Y시 강우량은 378.6 mm이었음에도 불구하고, 침출수 주입을 위한 매립지 굴착시 채취한 2 m 깊이의 토양시료 수분함량은 10.3 %, 21.9 %, 22.8 %의 낮은 값을 보였고, 이중 10 %대의 수분함량을 보인 토양 굴착시에는 먼지가 심하게 날려서 매립지 내부에는 50 cm 두께로 설치된 중간복토층에 의해 수분의 침투가 거의 이루어지지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

매립지 내부의 낮은 수분함량은 미생물 분해반응에 불리한 환경을 조성하여 공기주입 전에 조사된 각 관측정에서의 매립지 내부온도는 30 ℃ 부근의 낮은 상태를 나타내고 있었다. 따라서 매립지에서 발생하는 침출수를 주입하여 매립지 내부의 수분함량을 높임으로써 미생물 분해반응에 유리한 환경을 조성하고자 하였다.

침출수 주입시에는 막힘이나 악취, 사면부 침출수 누출과 같은 문제 발생이 전혀 없었다. 하지만, 침출수 주입으로 M4의 수위 상승이 관측되었으며, 이에 따라 주변 공극이 포화되어 공기 흐름이 원활하지 못하였으며, 혐기성 환경으로 전환되어 메탄가스 농도가 증가하는 현상이 발견되었다. 침출수 주입을 중단한 후 M4의 수위는 2주 후 다시 이전 상태로 회복되었다[Fig. 10].



[Fig. 9] Variation of average temperature at each monitoring wells.



[Fig. 10] Variation of water level at M4 during leachate recirculation period.

M4의 경우 77일째 침출수 주입 후 85일째까지 내부 온도가 급격히 증가하였으나(3 m 깊이에서 74일째와 비교시 8.9 ℃ 상승) 94일째에는 8.7 ℃ 감소하였다. 이는 침출수 주입으로 내부가 냉각된 효과에 기인한 것으로 보인다. 하지만, 이후 다시 온도는 증가하였다. 이와 함께 20 % 초반 수준이었던 메탄가스의 농도가 40 % 부근으로 급격히 증가하여, 주변이 완전히 혐기성 환경으로 전환되었음을 보여준다.

M4에 인접한 M3의 경우 실험 초기 높은 산소농도와 낮은 메탄 농도를 보인 지역이었으나, 침출수 주입 후 온도가 급격히 증가해서 M4보다 온도가 높아졌다. 특히, M4의 온도가 감소한 94일째부터 온도가 급격히 상승한 것은 주입한 침출수가 M3 부근으로 이동하여 미생물 분해에 유리한 환경을 조성한 것으로 추정된다. M3의 경우에도 메탄 농도가 침출수 주입 이전에는 2~3 % 수준이었으나, 공기주입 100일째(침출수 주입 23일째)부터는 11~13 % 수준으로 높아진 것을 볼 수 있다.

따라서 침출수 재순환은 매립지 내부 환경을 메탄 생성이 활발하도록 하는데 유효함을 알 수 있으며, 매립지를 호기성 환경으로 운전하고자 할 경우에는 장애가 될 수 있으므로 간헐적으로 소량의 침출수를 공급하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

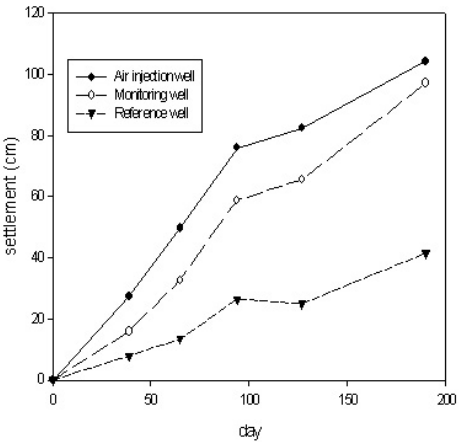
3.4 침하에 의한 매립지 추가공간 확보

호기성 안정화 개시 후 일정 시간 간격으로 지반고를 측정하여 침하량을 조사하고, 24×24 m의 조사영역 내에서의 침하에 따른 매립용량 추가확보량을 계산하였다. 공기주입 후 측정한 침하량 변화는 [Fig. 11]과 같다. 침하량은 대조정과 비교할 때 공기주입정은 2.5배, 관측정은 2.3배가 컸다.

호기성 운전개시 190일째 9개 공기주입정의 평균 침하량은 104.4 cm 이었으며, 최대 침하량은 115.8 cm 이었다. 침하에 따른 추가 매립공간 확보량은 호기성 운전 190일 현재 596.8 m^3로 계산되었다(24 m × 24 m 구역 외의 침하분은 제외한 수치임).

매립지 침하는 공기주입 후 약 3개월간 선형적으로 증가하다가 이후 완만하게 증가속도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

이러한 매립지 침하에 의해 공기주입정 설치시 수직정 둘레에 친 모르타르의 들뜸현상이 발견되고, 공기



[Fig. 11] Settlement of monitoring wells during aerobic landfill operation.

주입정과 연결되는 호스가 매립지 침하로 당겨져서 호스나 연결부위가 손상되는 현상이 발생하였다. 따라서 2개월 이상 호기성 방식으로 운전하는 매립지의 경우 매립지 침하를 고려하여 충분한 길이의 연결 호스를 설치하고, 모르타르와 같이 강직성이 있는 재질은 이내 파손되거나 주변 토사와 분리되므로, 수직정의 기밀을 위해서 모르타르 대신 벤토나이트 등 주변 토사와 함께 거동하는 재질을 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.5 공기주입의 영향 반경

매립지 가스를 추출하는 경우의 수직가스 포집정의 설치간격은 45~90 m 범위로 하고 있으나, 수도권매립지에서 실시한 LFG 추출실험에서 조사된 한 연구에 의하면 영향반경은 20~23 m 범위였다[20]. 매립가스 추출시의 영향반경은 각 관측정에서 측정된 (-)압에 기초하는 물리적인 인자로 결정된다. 하지만, 매립지를 호기적 조건으로 조기안정화하는 경우에는 매립지 내부 전체가 호기성 조건(산소 농도 2 % 이상)을 유지할 수 있도록 충분한 양의 공기를 공급할 수 있도록 송풍량과 수직정의 간격을 조정하여야 할 것이나, 매립폐기물의 물리화학적 성상, 매립년한, 공기투과율, 토양 내 수분 함량 등 생물학적 요인과 물리적 요인 등에 복합적으로 좌우되므로 현지 조건에 기초하여 공기주입의 영향 반경을 산정하여야 한다. 또한 지나치게 송풍량이 많으면 매립지 내부가 냉각되는 효

과가 발생할 수 있으며, 침출수 재순환과 호기성 안정화가 함께 이루어지는 경우 침출수에 의한 공극 막힘으로 일시적으로 혐기성 조건이 발생하는 측면과 수분공급에 의한 미생물 활성도 제고의 긍정적 조건이 복합적으로 작용하게 되므로 공기주입량과 관련해서는 보다 많은 경험의 축적이 필요한 것으로 판단된다.

우리나라 폐기물 매립지의 경우 쓰레기 종량제 봉투 안에 있는 폐기물은 매립지를 호기적으로 운영하는 경우에도 국부적으로 비닐에 의해 혐기성 상태를 나타낼 수도 있으므로, 사실상 매립지 전체를 호기성 상태로 유지하는 것은 불가능하다.

본 연구에서 매립지 내부로 적용한 초기 공기량 7.2 ㎥/분을 기준으로 할 때 매립지 부등침하에 의해 균열의 발생이 나타났는데, 공기주입정에서 이 균열 부위까지의 거리를 공기주입의 영향반경으로 간주할 수 있다. 공기주입정에서 균열부까지의 거리는 11.5~16.5 m의 범위로 평균 13.8 m를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 현재 매립이 진행 중인 생활폐기물 매립지에서 일정 구역을 호기적 조건으로 운전하였을 때 매립지의 안정화 진행 경향을 현장실증실험을 통해 파악하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매립지 조기안정화를 위한 호기성 안정화 현장실험을 5개월간 시행한 결과 매립지 내부 평균온도는 70 ℃로 상승하였으며, 이 기간 동안 매립고의 8 %에 해당하는 침하가 발생하여 추가적인 매립용량이 확보되었다.
2. 폐기물 매립지의 매립폐기물 수분함량은 토사기준으로 10.3~23.8 %로 낮아서 미생물 분해활동이 저해받을 수 있으므로, 침출수 재순환 방법을 통해 수분을 공급할 필요가 있었다. 1개월간 12×12 m 부지에 94 ㎥의 침출수를 주입한 결과 일시적으로 매립지 내 수위상승과 혐기성 환경조성이 이루어졌다. 하지만, 인접한 관측정에서는 매립지 내부온도 상승을 촉발시켰다.
3. 과도한 침출수 재순환은 매립지 내부온도를 저하시킬 수 있으므로 매립지 내부온도를 모니터링하면서 침출수 주입량을 조절할 필요가 있다. 또한 침출수 재순환은 매립지 내부를 혐기화하여 매립지를 호기적으로 운전하는 것을 방해하므로, 침출수 주입은 간헐적으로 하고, 주입정의 위치는 공기주입정 아래에 위치하도록 하는 것이 바람직하다.
4. 24×24 m의 부지면적에서 7.2 ㎥/분의 공기량을 6 m의 유공부위를 갖는 수직정으로 공급한 Y시 생활폐기물 매립지에서의 공기주입의 영향반경은 13.8 m이었다.

참고문헌

1. 환경부, 전국 매립시설 설치 · 운영실태 조사결과 및 조치계획 (2009).
2. 국립환경과학원, 한국환경자원공사, 2007 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 (2008).
3. 남궁완, 박준석, 최정영, 황의영, 윤석표, 차명철, “공기주입에 의한 폐기물 매립지가스 제거를 위한 현장기초연구”, 한국폐기물학회지, 15(7), pp. 738~747 (1998).
4. 전양근, 쓰레기매립지 처리기법 연구 – 공기주입법을 이용한 공원조성방안을 중심으로, 한국토지공사, p. 367 (1999).
5. 남궁완, 박준석, 이철효, “매립지 굴착사업을 위한 매립지가스 제거시 공기주입량 변화의 영향”, 한국폐기물학회지, 16(1), pp. 79~89 (1999).
6. 전양근, 박규홍, 한병현, 이응, “공기주입법을 이용한 쓰레기매립지 조기안정화에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(3), pp. 557~560 (1999).
7. 주식회사 IUT, “불량매립지 정비, 복원공사의 매립가스 악취안정화 장치(인천 경서동 매립지 안정화사업)”, 폐기물자원화, 8(4), pp. 30~39 (2000).
8. 주식회사 청산산업, “ATAS(Auto Thermic Aerobic Stabilization)시스템을 이용한 매립지 조기안정화 공법”, 폐기물자원화, 8(4), pp. 47~52 (2000).
9. 주식회사 오이코스, “자원순환형 매립지 복원기술과 HABS 안정화 공법”, 폐기물자원화, 8(4), pp. 7~24 (2000).
10. 이환, 이채영, 전연호, 김경, 김두일, 이철효,

"공기주입방식을 통한 쓰레기 안정화의 현장적용에 관한 연구", 폐기물자원화, 8(4), pp. 121~128 (2000).
11. 김경, 박준석, "공기주입방식에 의한 매립지가스 안정화에 관한 현장연구", 한국지반환경공학회논문집, 7(4), pp. 63~71 (2006).
12. Stessel, R.I. and Murphy, R.J., "A lysimeter study of the aerobic landfill concept", Waste Management & Research, 10(6), pp. 485~503 (1992).
13. Goeschl, R., "Odor stabilization in waste disposal sites", In Situ Aeration : Air Sparging, Bioventing, and Related Remediation Processes, eds., Hinchee, R.E., Miller, R.N., Johnson, P.C., Battelle Press, pp. 289~295 (1995).
14. Read, Adam D., Hudgins, M., Harper, S., Phillips, P., and Morris, J., "The successful demonstration of aerobic landfilling - The potential for a more sustainable solid waste management approach?", Resources, Conservation and Recycling, 32(2), pp. 115~146 (2001).
15. Layton, G., Courtney, D., Smith, M., and Johnson W., "Aerobic bioreduction of municipal solid waste landfill mass", United States Patent, 6916136 (2005).
16. Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., and Stegmann, R., "Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills", Waste Management Vol. 26, pp. 356~372 (2006)
17. Rich, C., Gronow, J. and Voulvoulis, N., "The potential for aeration of MSW landfills to accelerate completion", Waste Management, 28(6), pp. 1039~1048 (2008).
18. 정호경, "순환형 매립지 정비사업의 정책방향과 전망", 폐자원 에너지화를 위한 PoA-CDM 사업화 방안 및 순환형 매립지 정비사업 현황과 전망, 한국환경자원공사, pp. 37~51 (2009).
19. 한국환경자원공사, 사후관리 종료기준 및 토지이용 개선방안 연구용역 (2008).
20. 김용화, "매립지 가스 포집효율에 대한 실험적 연구", 제3회 전문가 초청세미나-21세기 지속가능한 매립 기술, 매립기술연구회, pp. 45~59 (2001).