

폐기물 매립지의 침하 거동 및 조기 안정화 기법 ②

서민우*1, 박준범*2, 김재영*3, 권오정*4

지난 호에서는 매립지 침하 거동의 특성과 침하 모델식에 관하여 알아보았다. 이번 호에서는 전편 내용에 이어서 제시된 모델식을 적용하여 매립지 침하를 분석한 사례를 다루고, 마지막으로 매립지의 분해 및 침하를 촉진시키는 매립지 조기 안정화 기법에 대하여 소개하고자 한다. (제목, 그림 및 표 등의 번호는 전편에 이어서 계속된다)

4. 매립지 침하 계측 사례 및 분석

본 장에서는 국내의에서 발표된 매립지 침하 계측 자료를 참고로 하여, 앞서 제시한 예측식을 적용·분석한 연구 내용을 제시하고자 한다.

4.1 난지도 쓰레기 매립지의 침하 특성 연구 사례 (박현일 등, 1997)

난지도는 1978년에서 1993까지 15년동안 서울 지역에서 발생한 쓰레기를 매립한 대표적인 쓰레기 매립지이다. 박현일 등(1997)의 연구에서는 2년 동안 난지도 매립지의 침하량을 측정한 후, 향후 10년 동안 발생할 침하를 예측하였다. 이 중 대표적인 위치에서 2년 동안 계측된 침하량은 그림 5와 같다. 그림 5에 나타난 침하 형태는 지난 호에서 제시한 Bjarngard와 Edgers가 제안한 식과 매우 유사한 형태를 보이고 있었다. 이 연구에서는 Bjarngard와

*1정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 박사과정
*2정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 교수
*3정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 교수
*4정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 석사과정

Edgers가 제안한 식과 Power creep law를 적용하여, 18번 위치의 10년 후 침하량을 예측하여 보았으며 그 예측 결과는 그림 6에 나타나 있다.

10년 후의 예측 침하량은 적용된 식에 따라 각각 3m와 12m로 9m의 차이를 보인다(그림6). 이처럼

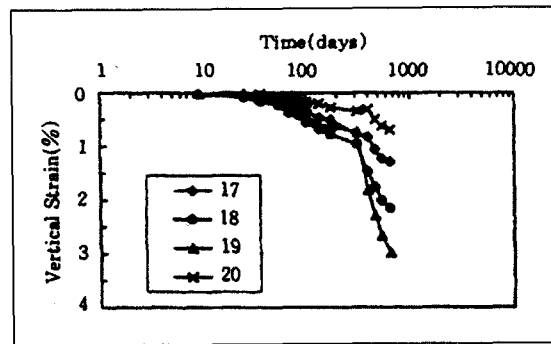


그림 5. 난지도 매립지의 침하량 (박현일, 1997)

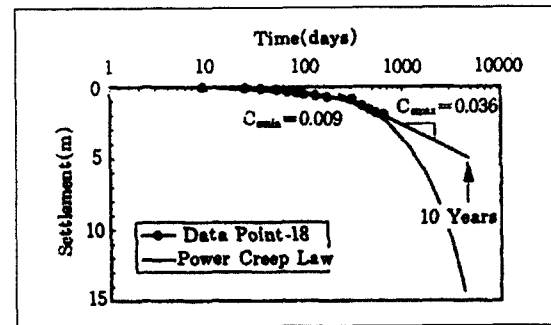


그림 6. 10년 후의 침하량 예측 (박현일, 1997)

초기의 침하자료를 이용하여 향후 침하량을 예측하는 경우, 적용하는 식에 따라 그 값의 차이가 매우 크기 때문에 적용하는 식의 선정에 매우 주의를 기울

여야 한다고 저자는 강조하고 있다. 이 분석에 의하면 계측자료가 충분하지 않은 경우에는 Power creep law에 의한 예측값은 침하량을 과대 평가할 수 있다고 보고있다.

4.2 쌍곡선 함수 적용 사례 (Ling et al, 1998)

Ling 등(1998)은 미국 내 3개의 매립지 (Wisconsin, Meruelo, Spadra) 현장에서 측정된 자료를 바탕으로 Logarithmic 함수(앞글의 Yen and Scanlon 식), 쌍곡선(hyperbolic) 함수를 적용, 시간과 침하율 및 침하량의 관계를 분석하였다. 계측된 침하 자료를 근거로 구성된 시간과 침하율 관계식(log 관계, 지수관계)과 쌍곡선 관계식은 표2와 같다.

여기서, r은 상관계수(correlation coefficient), S(m)는 침하량, t(일)는 시간, ρ (m/일)은 침하율임

표 2. 폐기물 매립지반의 시간에 따른 침하예측 경험식의 계수 (Ling et al., 1998)

| 침하 함수 | 계수 | Wisconsin | Meruelo | Spadra |
|--|----------|-----------|---------------------|---------------------------------------|
| $\rho = m \cdot n \cdot \log t$ (침하율과 log 시간) | m | 0.002 | 0.003 | 0.039 |
| | n | 0.004 | 0.0008 | 0.013 |
| | r | -0.36 | -0.599 | -0.513 |
| $\rho = \frac{p}{t^q}$ (침하율과 지수 시간) | p | 0.0033 | 0.009 | 0.348 |
| | q | 0.318 | 0.538 | 0.695 |
| | r | -0.388 | 0.562 | -0.557 |
| $S = \frac{t}{1/\rho_0 + t/S_{ult}}$ (쌍곡선 함수) | ρ_0 | 0.001 | 0.003, 0.002, 0.001 | 0.015, 0.04, 0.056, 0.102, 0.036 |
| | Sult | 1.14 | 0.62, 0.58, 0.51 | 0.48, 0.63, 0.72, 0.91, 0.69 |
| | r | 0.961 | 0.998, 0.992, 0.988 | 0.998, 0.9997, 0.9997, 0.9288, 0.9998 |

계측된 침하 자료를 이용하여 구성한 쌍곡선 함수에 의한 침하량과 실제 계측된 침하량을 비교한 내용이 그림 7에 제시되어 있다. 분석 결과 위의 침하 함수 중에서 쌍곡선 함수에 의한 침하량과 계측된 침하

량이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 함수비가 초기 침하율과 극한 침하량에 미치는 영향을 살펴보았는데, 분석 결과 폐기물의 함수비가 증가함에 따라 초기 침하율과 극한 침하량이 감소함이 밝혀졌다. 이러한 결과는 함수비가 증가하면 초기에 매립지가 느리게 침하하고, 최종 침하량은 감소할 수 있음을 보여주는 것이다.

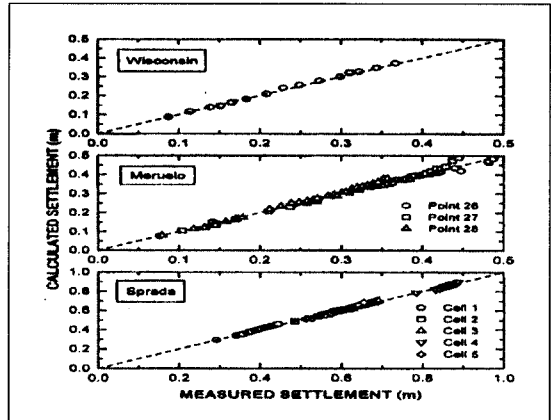


그림 7. 계측치와 쌍곡선 함수에 의한 침하량 비교 (Ling et al, 1998)

4.3 실내 실험을 통한 침하 분석 사례 (이복수 등, 1995)

이복수 등은 도시폐기물의 주요한 구성성분인 아파트와 일반가정용 쓰레기를 수거하여 대형 원통셀에 투기하고 2년 동안 침하를 관측하였다. 일차 침하는 2개월에 걸쳐 완료되었고, 이어서 2차 침하가 장기간에 걸쳐 계속되었다. 시간이 지남에 따라 쓰레기의 단위중량은 증가하였으며, 초기 2개월 정도에 걸쳐 발생한 일차침하는 전체 침하량의 30%~40%였다. 계측된 침하 자료를 여러 관계식-대수함수, 쌍곡선함수, 지수함수, Gibson and Lo의 제안식을 이용하여 분석을 실시하였으며, 모든 경우에서 상관계수가 거의 1에 가까운 결과를 보였다. 이 중에서 특히 Gibson과 Lo의 제안식과 계측치가 비교적 잘 일치하였다(그림 8).

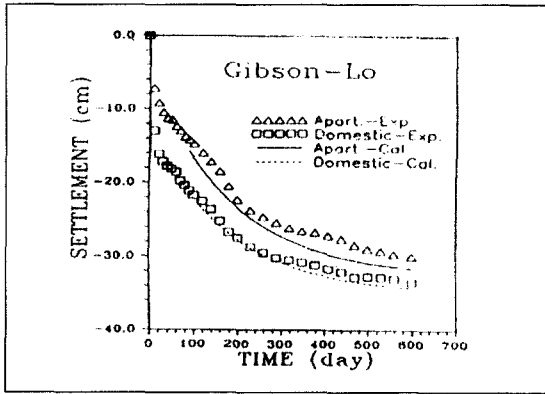


그림 8. Gibson과 Lo 곡선과 계측된 침하 비교 (이복수 등, 1995)

4.4 분해효과와 매립연한이 침하량 예측에 미치는 영향

(박현일 등, 1998a; 1998b; 1998c; 2000)

박현일 등은 3.8절에서 소개한 쓰레기 침하 모델, 4.1절의 난지도 매립지 침하 분석 등, 쓰레기 침하 분석에 관한 많은 연구를 수행하였다. 박 등은 국내의 쓰레기 매립지 침하 계측 및 실내시험 자료와 문헌 등에 제시된 외국 매립지의 침하 자료 등을 바탕으로, 매립지의 특성-침하 자료의 분해효과 포함여부, 매립지의 매립연한이 침하량 예측에 미치는 영향을 심층적으로 분석하였다.

박현일 등은 쓰레기의 분해 효과가 포함된 침하 자료와 그렇지 않은 자료를 비교하여, 분해가 쓰레기 매립지 침하에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 그리고, 분해가 시작된 이후의 압축지수가 분해가 포함되지 않은 이차압축 지수의 약 5배 가량 된다고 보고하였다. 분해에 의한 침하가 포함되지 않은 침하 자료로부터 산정된 예측 곡선과 쓰레기의 분해 효과가 포함된 침하 자료를 이용하여 산정된 예측 곡선을 비교한 결과, 분해가 포함된 자료를 바탕으로 장기 침하량을 예측한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 침하량이 약 2배 가량 크게 예측되었다. 이러한 결과는 그림 9에서도 확인할 수 있다. 그림 9는 시간에 따른 쌍곡선 모델에 사용되는 변수인 S_{ult}/H_0 (최종 침하량/매립고)의 변화를 보여주는 그림이

다. 그림 9에 따르면 최종 침하량은 시간이 지남에 따라, 즉 계측된 침하 자료에 분해 효과가 많이 포함될수록 그 양이 증가하였다.

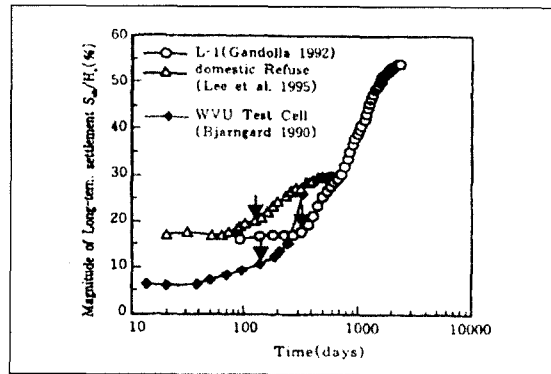
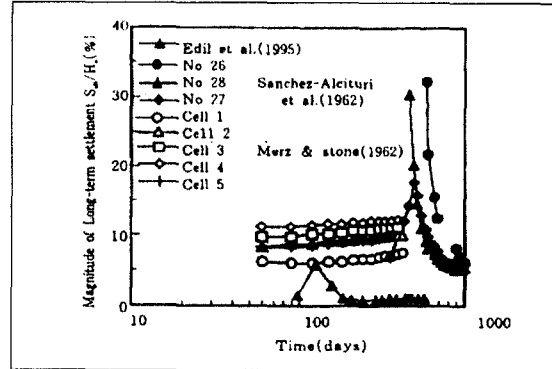


그림 9. 분해 효과의 포함이 침하량 예측에 미치는 영향 (박현일 등, 1998a)

또 본 논문에서는 신선한 쓰레기 매립지의 현장 지반에서 관측된 초기 침하 자료만으로는 분해가 고려된 적절한 장기 침하량 예측이 불가능하며, 이러한 문제점을 극복하기 위해서 대상 쓰레기 시료를 채취하여 분해 조건이 좋은 상태에서 얻어진 실내 시험 결과를 이용하는 것이 필요하다고 덧붙이고 있다.

한편 매립 연한도 쓰레기의 침하량 예측에 큰 영향을 준다고 알려져 있다. 여기서, 매립연한(fill age)이란 매립이 시작되어 완료된 때 사이의 중간 시점으로부터 침하 계측이 시작된 점까지의 기간을 말한다. 그림 10은 매립연한과 매립된 쓰레기의 분해에 의해 발생하는 변형량($\epsilon_{tot} - \epsilon_{dec}$)의 관계를 나타내는 그림

이다. 그림10에 따르면 매립 연한이 10년 이상된 매립지에서는 분해에 의해 추가로 발생하는 침하는 5% 미만이었다.

앞에서 제시한 침하 모델식 중 6개의 모델을 이용하여, 매립연한이 다른 국내의 9개 지역의 자료를 근거로 매립연한과 30년 후의 예측 침하량의 관계를 알아본 결과는 그림11과 같다. 이 결과는 같은 침하 자료를 이용하여 예측을 하여도 적용되는 모델에 따라서 크게 차이가 난다는 사실을 확인시켜 주고 있다. 예측 결과 Power creep law에 의한 예측은 지나치게 과다 예측을 하며, 지수 함수(Scanlon and Yen)에 의한 예측은 반대로 과소 예측을 하는 것으로 나타났다.

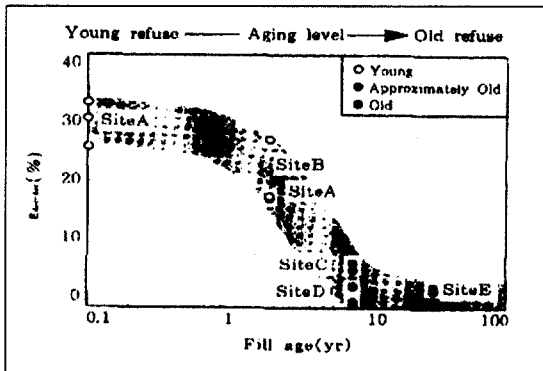


그림 10. 매립연한과 분해에 의한 변형량 비교 (박현일 등, 1998b)

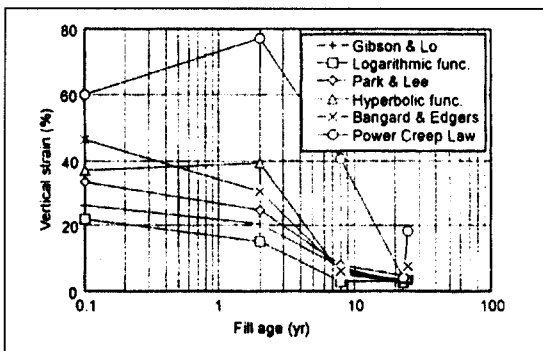


그림 11. 매립연한에 따른 예측된 장기 침하량 (박현일 등, 2000)

4.5 침하율과 시간과의 관계식 적용 사례

Coumoulos와 Koryalos(1998)는 자중을 받고 있는 매립장의 장기 침하율(settlement rate)이 시간이 지남에 따라 감소하는 모델을 제시하고, 실제 매립지의 침하를 계측하여 분석을 실시하였다. 이 분석에는 앞서 제시한 식(3)이 적용되었으며, 그림 12는 기존에 발표된 침하량 계측자료를 본 방법을 이용하여 분석한 결과이다.

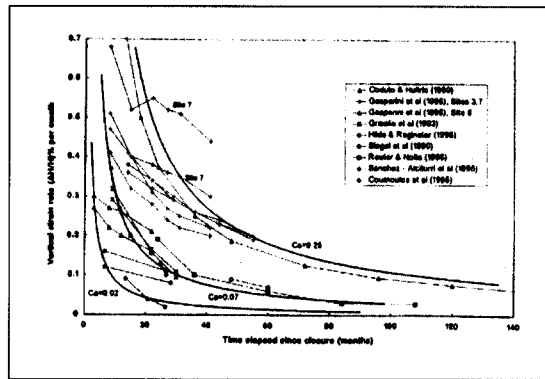


그림 12. 시간과 침하율 관계 (Coumoulos, 1998)

Yen과 Scanlon 모델의 경우 어느 한계 시점을 지난 후 침하율이 감소하지 않고 오히려 일정한 모습을 보이는 매립지에는 적용하기 힘든 단점이 있는데, 이러한 거동 형태는 그림 12에서 확인할 수 있다. Coumoulos와 Koryalos는 제시한 식은 시간에 따라 침하율이 감소하는 특성과 어느 시점을 지나면 침하율이 일정해지는 특성을 모사하는데 적절하나, 모델식에 의한 값이 현장 계측치에 비해 초기에 매우 급한 침하율을 나타내기 때문에 현장 측정치와는 많은 차이를 보이고 있다. 위의 분석 결과를 종합해 볼 때, 초기의 침하는 Yen과 Scanlon이 제안한 모델식으로, 그리고 일정 시간이 지나 침하율이 일정해지는 구간에는 식(3)-시간이 침하율과 지수관계를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.6 매립가스양을 이용한 침하량 예측 (Leonard et al., 2000)

Leonard 등은 매립지의 침하를 결정하기 위해 생분해 모델과 물리적 creep 모델을 개발하여 총 침하량을 계산하고 이 결과를 계측치와 비교하는 연구를 수행하였다. 시간에 따른 메탄의 생성량을 나타내는 생분해 모델은 다음 식(12)와 같다.

$$Q_{LFG} = 0.029 G_{LFG} R(e^{-kN} - e^{-kt}) \quad (식12)$$

여기서, $Q(m^3/d)$ 는 매립가스(LFG)의 발생율, $G(m^3/t MSW)$ 는 총 가스발생능, $R(t/d)$ 은 쓰레기 분해율, $k(1/t)$ 는 분해상수, N 은 매립 종료 후 경과 시간, t 는 매립초기를 기준으로 한 경과 시간을 나타낸다. 생분해에 의해 향후 발생될 침하량은 식(13)에 의해 계산된다.

$$S_T = O \cdot T_R \cdot S_F \quad (식13)$$

여기서, S_T 는 향후 발생할 침하량, O 는 분해 가능한 유기물의 비율, T_R 은 두께, S_F 는 침하 계수(향후 가스 발생량/총 가스 발생량)이다.

물리적 creep 침하량은 기존 연구를 근거로 하여, 단위 log 시간 당 매립층 두께의 2%로 계산하였다. 이 creep에 의한 침하량은 대부분의 생분해가 발생한 이후, 즉 매립완료 후 약 40년 이후에야 발생하는 것으로 고려하였다. 본 모델에 의하여 예측된 침하량과 계측된 침하량은 그림13에 자세히 나타나 있다. 비교 결과에 의하면 예측된 침하량이 계측된 침하량보다 약간 크게 평가되었는데, 이는 본 모델이 cellulose를 기초로 한 유기 물질이 모두 분해된다는 가정을 포함하고 있기 때문이었다. 본 모델에 의한 예측치는 매립지의 구조물 설계시 보수적인 값을 제시해 준다.

4.7 폐슬러지 매립지의 cover 침하량 평가 (Quiroz et al., 2000)

Quiroz 등은 현장에서 계측된 매립지 침하량을 다음의 과정을 통해 분석하였다. (1) 먼저 현장의 압밀

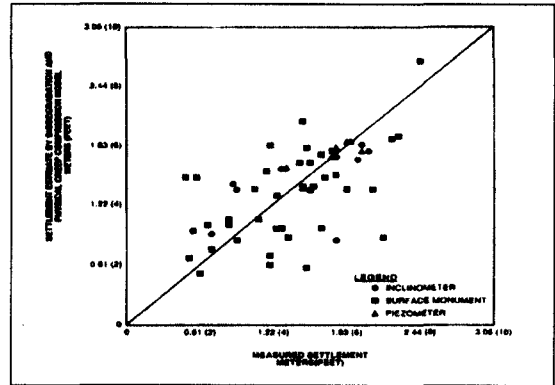


그림 13. 예측 침하량과 계측 침하량의 비교 (Leonard et al. 2000)

거동을 평가하기 위해 침하량과 log 시간 관계를 도출한다. (2) 곡선을 통해 C_v 와 C_a 같은 현장 압밀 계수를 결정한다. (3) 마지막으로 역계산된 압밀 계수를 이용하여 이론식을 구성하여 이로부터 예측치를 구하여 계측된 값과 비교한다.

Quiroz 등은 Moo-Young 등(1996)에 의해 제시된 매립지 침하 계측치를 이용하여 위의 순서로 분석을 실시하였다. 계측치의 이용한 역계산을 통해 구한 압밀 계수 C_v 는 $3.52 \text{ cm}^2/d$ 이며, C_a 는 0.0273 이었다. 매립지의 시료를 대상으로 실내 압밀시험을 실시한 결과, 압밀 계수들이 앞서 제시된 값보다 10배 가량 적게 나타났다. 그림 14는 계측치와 예측치를 비교한 결과를 보여주고 있으며, 그림에서 EOP는 1차 압밀이 종료되는 시점을 의미한다. 본 매립지의 경우 1차압밀에 의한 침하량은 총 두께의 14.8%, 2차압밀에 의한 침하량은 3.2%였다. 이차 압밀에 의한 침하량은 총침하량의 17.9%였다.

4.8 침하 계속 사례 분석 소결

현재까지 매립지 침하에 관계된 연구는 계속된 쓰레기 매립지의 침하 양상을 가장 잘 묘사하는 모델식을 찾아내는 것이었다. 매립지의 침하 거동을 잘 설명하는 모델식은 적용된 현장과 연구자에 따라 달라 지지만, 본 기사의 인용 문헌에서는 Gibson과 Lo의 제안식, 쌍곡선(hyperbolic) 함수 등이 비교적 침하

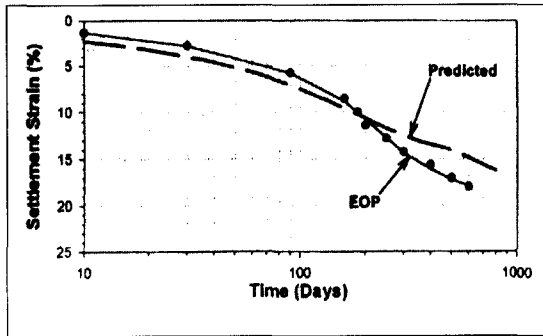


그림 14. Hubbardston 매립지 침하 곡선 (Moo-Young et al., 1996)

양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

침하 양상을 잘 묘사하는 예측식이 선정되면 그 예측식을 이용하여 앞으로 발생할 침하량을 예측할 수 있다. 현재까지 매립지 침하를 비교적 정확히 예측하는 방법으로 널리 인정받은 것은 없으며, 몇몇의 연구자에 의해 예측된 침하량도 현장 계측치를 통해 검증 받지는 못했다. 그러나 매립지 침하 예측시 중요하게 고려해야 할 몇가지 사항들은 여러 연구를 통하여 제안되었으며, 이에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 초기의 침하자료를 이용하여 향후 침하량을 예측하는 경우, 적용하는 식에 따라 그 값의 차이가 매우 크기 때문에 각 예측식의 특성을 잘 파악해야 한다. 계측자료가 충분하지 않은 경우는 Power creep law에 의한 예측값은 일반적으로 침하량을 과대 평가한다.
- 분해로 인한 침하 양상이 유발되기 전까지 계측된 침하자료를 근거로 향후 발생할 장기 침하량을 예측하는 경우, 침하량은 상당히 과소 평가될 수 있으며, 적용된 침하 모델의 종류에 따라 서로 예측된 장기 침하량이 영향을 받는다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 대상 쓰레기 시료를 채취하여 분해 조건이 좋은 상태에서 얻어진 실내 시험 결과를 이용하는 것이 필요하다.
- 다양한 예측식에 의해 산정된 침하 예측량은 매

립연한이 증가할수록 감소하였으며, 특히 매립 연한이 10년 근처에 이르면, 향후 발생하리라 예상되는 침하량은 매립고의 10% 미만으로 급속히 작아졌다.

아직까지는 매립지 현장 특성, 매립 쓰레기의 물리·화학적 특성치만을 가지고 침하를 예측하는 것은 시기상조라고 할 수 있다. 그러나, 만약 매립지의 침하량을 추정하고자 한다면, 우선 대상 현장에서 몇 년 동안 이루어진 현장 침하 계측자료의 확보가 우선적으로 필요하고, 매립지의 분해 조건을 평가할 수 있는 자료 및 매립지의 물리·화학적 성질 등에 관한 자료가 확보되어야 한다. 덧붙여, 현장 시료를 대상으로 실내시험을 실시하여 이들 결과를 종합, 분석하는 침하량을 예측하는 방법이 바람직할 것으로 생각된다. 물론 이러한 예측법은 향후 현장 매립지 침하 자료를 통해 검증하는 작업이 뒤따라야 한다.

매립지 침하 거동 분석 및 침하량 예측은 앞으로 국내 매립지 침하 계측 자료의 축적, 다양한 영향 요인에 대한 연구 등이 심도있게 이루어진다면, 매립지 재활용에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

5. 매립지 조기 침하 유발 및 안정화 기법

여러 가지 방법을 이용하여 매립지 현장에서 발생할 침하량이 예측되면, 매립 현장에서는 사용종료 매립지를 재활용하기 위해서 발생되리라 예측된 침하를 조기에 일으킬 수 있는 방법을 찾게 된다. 본 장에서는 이러한 목적으로 시도되는 방법 중 현재 연구되고 있거나, 혹은 현장에서 적용되고 있는 공기주입법과 침출수 재순환에 대하여 알아보려고 한다.

공기 주입법은 매립지에 공기를 주입해 매립지를 호기성 상태로 만들어 미생물에 의한 유기물질의 분해를 촉진시키는 방법이다. 호기성 상태를 유지하면서 폐기물 자체의 안정화를 유도하는 공기 주입법, 매립지 재활용 시 굴착·선별 과정에서 발생하는 악

취 및 위험요소 제거를 위한 공정, 그리고 매립지 내의 중온/고온성 미생물의 활성화를 이용한 조기안정화 시스템이 이에 해당한다. 침출수 재순환은 기존 위생매립지의 수분 차단에 의한 내부건조를 막기 위해 포집된 침출수를 다시 매립지 안으로 주입하는 방법이다. 이는 미생물 활성화에 필요한 수분공급과 동시에 침출수의 오염농도를 감소시키는 효과가 있다.

5.1 호기성 상태로의 전환

(1) 공기주입법 적용 (성도용 등, 1999)

공기 주입법이란, 매립지에 공기를 주입해 매립지를 호기성 조건으로 변환시킨 뒤 미생물에 의한 생물학적 분해를 유발시켜서 매립지를 안정화시키는 방법이다. 이 방법은 1~1.5년 정도의 짧은 기간 동안 매립지를 10~20년 정도 경과한 충분히 안정화된 상태로 만드는 기술로서, 국내 불량 매립지의 오염 경감 및 토지 이용에 그 적용성이 클 것으로 기대된다.

본 논문에서 실시한 현장시험은 1993년까지 8년 동안 쓰레기를 매립한 지역에서 면적이 1500㎡인 적용대상지역과 대조지역에서 수행하였고 시험기간은 3개월이었다. 침하량은 적용대상지역과 대조지역 각각 1개소를 선정하여 지표면에 침하판을 설치한 후 측정하였다. 90일 후 적용대상지역의 침하량(21.2cm)이 대조 지역(1.5cm)에 비해 14배 이상 침하한 것으로 나타나, 침하량 측정을 통해 공기 주입법이 조기안정화에 효과적임을 확인할 수 있었다.

공기주입법의 효과는 성분 분석에서도 확인할 수 있었는데, 공기 주입법을 이용할 경우 탄소는 63%, 질소는 12%가 감소하였다. 탄소의 경우 호기성 미생물의 활성화에 따라 유기물질이 이산화탄소로 전환되어 제거된 것으로 추정된다. 또한, 주요 악취성분의 농도를 살펴보면, H₂S는 미생물의 활성화가 이루어짐에 따라 크게 억제되었지만, NH₃는 오히려 증가되었다. 그러나, 이는 가스 추출정으로 추출하여 biofilter를 이용해 제거할 수 있었다.

다른 유사한 매립지에서 1년 이상 실험한 결과를 참고로 장래 매립지 안정화를 예측하면, 침하의 경우

공기주입법의 가동 초기(3개월 정도)에는 호기성 미생물의 급격한 유기 오염물질 분해로 큰 침하가 발생한다. 안정화가 충분히 진행될 경우(12~18개월) 잔류 유기성분의 분해로 8~9%의 침하가 발생하며, 이후 유기물 분해에 의한 잔류 침하가 더 이상 진행되지 않아 토지 이용성은 크게 증가된다.

이 방법은 약 2년 안에 매립지를 충분히 안정화시킬 수 있다는 장점이 있지만, 공기 주입정을 설치해 고압의 공기를 계속 주입함에 따라 경제성이 떨어진다는 단점이 있다. 이에 대한 보완으로 과산화수소 주입을 통한 산소공급 대체효과 등의 연구가 진행중이다.

(2) 이용한 악취 안정화 (Rettenberger, 1994)

일반적으로 매립지 내부는 혐기성 분해로 인해 대부분 CH₄, CO₂로 분해되지만 일부는 H₂S와 같은 유독성 가스로 분해된다. 따라서 별도의 전처리 없이 매립지 굴착, 이송작업을 수행할 경우, 대기오염, 악취, 폭발 등의 위험이 있다. 이러한 위해 요소를 제거하기 위해 매립지 가스의 외부방출을 막고, 이를 추출, 정화 처리함과 동시에 혐기성 상태를 호기성 상태로 전환하는 것이 악취 안정화의 목표이다.

작용원리는 공급하는 공기가 biofilter를 거쳐가도록 해 호기성 박테리아를 같이 유입시켜서 호기성 상태로의 전환을 더욱 용이하게 한다. 또, 생성되는 공기-가스 혼합물도 biofilter를 거치도록 설계해 이 과정에서 악취를 제거한다. 5~6m 간격으로 쇠파이프(lance)를 설치해서 공기를 유입, 유출시키며, 시간마다 방향을 바꿔주어 공기 통로가 생기는 것을 막는다. 굴착공사를 수행할 부분에 총 5~10일간 공기를 유입하면 쉽게 분해 가능한 유해물질들이 분해되고, 수분도 굴착공사에 알맞게 감소된다. 그리고, 이 부분은 장기간의 호기성 상태로 존재하게 되어 매립장 조기안정화를 이끌게 된다.

본 방법이 매립지를 호기성 상태로 전환시킨다는 점에서 공기주입법과 비슷하다고 할 수 있다. 하지만, 공기 주입법은 매립지 내에서 직접적으로 유기성

폐기물의 분해를 유도하는 반면, 악취 안정화의 경우 폐기물을 굴착·이송하기 이전에 매립지 내의 유해한 성분을 처리하는 간접적 처리법이라는 점에서 차이를 보인다.

(3) 불량매립지의 생물학적 조기안정화 (박대원 등, 1999)

호기성 미생물을 이용한 매립지 조기안정화기술은 매립지 내부의 환경을 호기성 상태로 전환하고 영양성분의 공급을 통해 중온/고온성 미생물의 활성을 인위적으로 증대시킨다. 이는 매립지 내의 유기폐기물을 경제적으로 신속하게 처리하므로 안정화에 소요되는 기간을 획기적으로 단축시키는 기술이다. 이 기술의 적용을 위해 개발된 매립지 조기안정화 시스템(Auto Thermic Aerobic Stabilization System, ATAS System)은 공기 주입 제어장치, 공기 주입정, 가스농도 및 압력 관측정, 영양성분 공급정, 지하수위 관측정, 표면 밀폐시설 등으로 구성되어있다.

박대원 등은 본 기술을 매립지에 적용할 때 일어나는 과정을 퇴비화과정(in-situ composting) 개념을 도입해 설명하였다. 즉, 적용 초기에는 중온성 미생물에 의한 분해가 일어나고, 시간이 지나면 내부의 온도가 점차적으로 상승하여 고온성 미생물에 의한 분해가 일어나 결국 유기성 폐기물의 분해속도가 매우 빨라지게 된다고 보고하였다.

특히, 시험 시공 결과 악취가 거의 감지되지 않음을 확인할 수 있었으며, 안정화 지역 내에 있는 유기오염물질의 미생물 분해과정에서 발생된 온도 상승작용에 의해 많은 양의 수증기가 외부로 방출되는 현상도 확인할 수 있었다고 한다. 또한 폐기물을 채취하여 분석을 실시한 결과, 유기성 오염물질의 농도가 단기간 내에 상당히 감소하였음을 확인할 수 있었고, 가스 농도의 변화를 관찰한 결과, CH₄의 경우 안정화 개시 전 14.5~48.7%의 높은 범위를 나타내었으나 안정화 이후 대부분 1% 이하의 농도를 나타내었다. 또 H₂S의 경우도 안정화 이전에는 0.2~8.5%를

나타내었지만 안정화 후에는 0.1% 이하의 낮은 수치를 나타내었음을 보여주었다. 이로서 유기 폐기물도 효과적으로 처리할 수 있는 것으로 평가하였다.

박대원 등은 매립지 조기안정화 시스템을 통하여 공기와 더불어 영양성분을 공급해주어 미생물이 더욱 증가하도록 하였다. 그리고 이러한 미생물의 활성 증가가 매립지 안정화 기간을 단축시켰다고 보고하였다.

5.2 침출수 재순환 (Townsend et al, 1995:1996)

기존의 위생 쓰레기 매립지에서는 수분의 침투를 철저히 차단함으로써 침출수의 발생을 감소시키지만, 이로 인해 내부의 수분이 감소되어 유기물에 대한 생분해능은 감소하게 된다. 이는 매립지의 안정화가 지연되는 결과를 가져온다. 따라서 매립지 내부 수분이 충분한 상태로 만들어 주기 위해 침출수 재순환(leachate recycle)이 고안되었다. 침출수의 재순환이 일어날 경우, 수분증가로 혐기성 분해가 촉진되어 메탄과 이산화탄소가 발생하고 이로부터 매립지 자체의 부피감소에 의한 조기 침하와 폐기물의 안정화에 의한 오염물질의 감소를 기대할 수 있다.

분해과정을 가속화하기 위한 침출수 재순환은 매립지가 쓰레기의 장기 저장시설뿐만 아니라, 침출수 처리 시스템으로 이용되는 것을 가능하게 한다. 또, 증가된 쓰레기 분해율로 인해 메탄의 생성이 가속화되어 이로부터 많은 에너지원도 얻을 수 있다. 아울러 폐수처리시설이 멀리 떨어져 있는 경우에도 유용하게 이용된다. 상대적으로 단순하고 비용이 저렴하다는 장점으로 인해 매립지 침출수 처리 및 조기안정화의 대안으로 제시되고 있다. 침출수 재순환 시스템의 종류에는 쓰레기에 직접 접촉시키는 방법(direct application to the solid waste), 매립지 표면에 살포하는 방법(spray irrigation of the landfill surface), 표면에 적용하는 방법(surface application) 등이 있다.

침출수 재순환은 쓰레기의 분해 속도를 향상시키며 메탄 가스 발생속도에 영향을 미친다고 알려져 있다. Wall and Zeiss(1995)는 침출수 재순환이 매립지의 분해·안정화 종료 시간과 침하 발생에 미치는 영향을 연구하고, 침출수 재순환이 초기 메탄가스 발생량의 증가에 미치는 영향을 확인하였다(그림 15). 1989년부터 1993년 7월까지 미국의 Alchua County Southwest Landfill에서 이에 대한 실험이

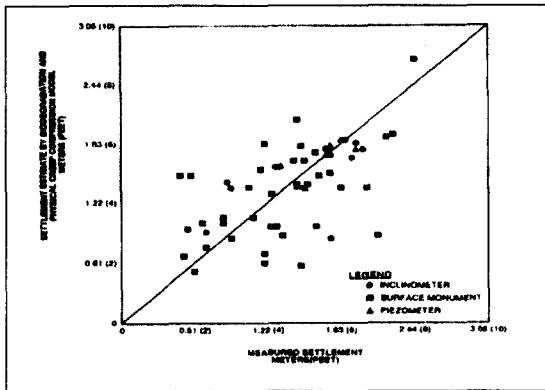


그림 15. 침출수 재순환에 의한 메탄 발생량 (Gabr et al, 2000)
(bioreactor는 침출수 재순환이 실시된 매립지를 의미함)

실시되었다. 침출수 재순환을 위해 홈이 파인 PVC 관을 매립지 바닥에 설치해서 침출수를 포집한 다음 1991년 7월부터 총 4500m³의 침출수를 매립지로의 배수가 가능한 연못을 설치해 이동시킨 후 매립지 내부로 주입하였다. 침하의 경우, 재순환 지역과 가장 가까운 지역이 1.01m(부피감소율:5.65%)로 가장 크게 발생했으며, 가장 멀리 떨어진 지역은 0.69m(3.82%)로 침하가 가장 작게 발생했다. 이를 통해 침출수 재순환을 통해 매립지가 안정화됨을 확인할 수 있었다. 함수비의 경우도 재순환 지역이 현저하게 크게 나타났으며, 이는 생분해를 더욱 촉진시키는 효과를 보여주었다. 침출수 농도의 경우는 pH만이 정상적으로 변할 뿐, 나머지는 오히려 점차 증가하는 모습을 볼 수 있었다. 이는 폐기물의 유입이 계속 이루어지기는 했으나, 이 방법이 침출수의 질적 향상에는 별로 도움을 주지 못한다고 것을 보여주는

결과였다. 이 현장에서는 메탄의 경우도 크게 차이를 보이지 않았다.

이러한 결과를 종합해 볼 때, 침출수의 초기 오염 정도가 작아서 별도의 정화대책이 필요하지 않는 곳은 침출수 재순환을 적용하여 매립지의 조기 안정화를 유도하는 방법이 효과적일 수 있지만, 침출수의 질적 향상은 기대하기 어려우므로, 심각하게 오염된 불량 매립지의 경우라면 이 방법은 적합하지 않다고 할 수 있다.

6. 결론

본 기사에서 매립지 쓰레기의 특성 및 침하 거동에 대하여 알아보았다. 쓰레기 매립지의 침하 특징을 설명하는 다양한 모델식을 제시하였으며, 이들 모델식을 현장 계측치에 적용한 사례를 소개하였다. 앞서 기술한 바와 같이, 현장 침하 자료를 근거로 모델식을 선정한 후에야 침하량 예측이 가능하므로, 현장 계측값이 없다면 정확한 침하량 예측은 매우 어려워진다. 그러나, 현장 계측 자료가 있는 경우에도, 침하 특성에 따른 예측식 선정이 제대로 이루어지지 않으면 예상치 못한 결과가 도출될 수도 있다.

예측식이 선정된 이후에는 매립연한, 쓰레기 침하 자료의 특성, 매립지의 물리·화학적 특성을 조사하여 침하량 예측을 실시하여야 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 이에 덧붙여 대상 매립지의 쓰레기를 이용한 실내 시험이 실시되면 보다 정확한 값을 얻을 수 있으며, 이에 대한 연구가 필요하다.

매립지 조기안정화 기법은 현재 다양한 각도에서 연구가 진행중이다. 대표적인 것으로 공기주입법과 침출수 재순환을 들 수 있으며, 이들 방법은 호기성 상태와 수분의 유지를 통해 미생물의 활성을 촉진시키는 것에 목표를 두고 있다. 현재 심각하게 오염된 매립지가 많은 우리의 현실을 고려할 때, 침출수의 질적 향상을 이루기 어렵다고 판단되는 침출수의 재순환보다는 매립지를 호기성 상태를 유지시켜 매립

지 내의 유기성 폐기물을 신속하고 완전하게 안정화시킬 수 있는 방향이 모색되어야 한다고 판단된다. 그러나, 최근에 신설되어 가동중인 매립지에는 시험적으로 침출수 재순환을 실시하여 국내의 적용성을 파악하는 연구 역시 이루어져야 할 것이다.

한편, 호기성 상태의 유지 방법 중 악취제거법은 굴착·이송작업 시 방출되는 악취 및 유해물질에 대한 처리만 할 뿐 매립지 내의 폐기물을 직접처리하지 못하고, 공기 주입법은 조기 안정화 시스템에 비해 경제성 및 신속성이 떨어진다는 점 등은 각 방법의 한계로 지적되기도 했다. 따라서, 매립지를 조기에 안정시키되 생물학적 조기 안정화같이 신속하고 경제적인 방법의 개발이 필요하다고 하겠다. 경제적인 측면에서 과산화수소를 이용한 산소주입 등과 같은 공기 주입방식 그리고 효율적인 공기 주입 시스템에 대한 연구도 계속 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Bjarngard A., and Edgers L. (1990), "Settlement of Municipal Solid Waste Landfills". Proc. 13th Annual Madison Waste Conference, Madison, USA
2. Coumoulos, D. G., and Koryalos, T. P. (1998), "Prediction of Attenuation of Landfill Settlement Rates with Time". GEOENVIRONMENT 2000, pp.1807-1811
3. Edil, T. B., Ranguette, V. J., and Wuellner, W. W. (1990), "Settlement of Municipal Refuse", Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. ASTM STP n. 1070, Philadelphia.
4. Gabr, M. A., Hossain, M. S., and Barlaz, M. A. (2000), "Solid Waste Settlement with Leachate Recirculation", Geotechnical News, June, pp.50-55
5. Gandola, M., Acaia, C., and Decha, I. (1995), "Previsione dei Cedimenti Della Superficie di Una Discarica di RSU". Proc. Italian-Brazilian Congress S.I.B.E.S.A., Gramado, Brasil. (in Italian)
6. Grisolia, M., Napoleoni, Q., Pagnoni, A., and Tancredi, G. (1992), "Considerazioni Sulla Compressibilita dei Rifiuti Solidi Urbani". Proc. 1st Italian-Brazilian Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Rio de Janeiro.
7. Landva, A.O., and Clark, J.I. (1990), "Geotechnics of Waste Fill", Geotechnics of Waste Landfills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, pp.86-103.
8. Leonard, M.L., Floom, K.J., Brown, S. (2000), "Estimation Method and Use of Landfill Settlement", Proc. of Geo-Denver 2000, Geotech. Special Publication, ASCE, No.105, pp.1-15
9. Ling, H. I., Leshchinchinsky, D., Mohri, Y., and Kawabata, T. (1998), "Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement", Journal of geotechnical and geoenvironmental Eng., January, pp.21-28
10. Manassero, M., Van Impe, W. F. , and Bouazza, A. (1997), "Waste Disposal and Containment", Proc. of the 2nd international congress on environmental geotechnics, osaka(Japan), pp.1425-1474
11. Moo-Young, H.K., Zimmie, T.F. (1996), "Geotechnical Properties of Paper Mill Sludges for Use in Landfill Covers," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.122, No.9, pp.768-776
12. Morris, D. V., and Woods, C. E. (1990), "Settlement and Engineering Considerations in Landfill and Final Cover Design",

- Geotechnics of waste fills-theory and practice, ASTM 1070, Philadelphia, pp.9-21
13. Oweis, I.S. and Khera, R.P. (1998), Geotechnology of Waste Management, 2nd Ed., PWS Publishing Company, New York, New York.
 14. Quiroz, J.D., Simpson, P.T., Zimmie, T.F. (2000), "Evaluation of Paper Sludge Landfill Cover Settlement", Proc. of Geo-Denver 2000, Geotech. Special Publication No.105, pp.16-31
 15. Rao, S. K., Moulton, L. K., and Seals, R. K. (1977), "Settlement of Refuse Landfills", Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, ASCE, Virginia, pp.574-598
 16. Rettenberger, G. (1994). "Burghof 매립장 정리 복원 프로젝트 보고서"
 17. Sowers, G. F. (1968), "Foundation Problems in Sanitary Landfills", Journal of San. Eng. Div., ASCE, 94(SA1)
 18. Townsend, T. G., Miller, W. L., and Earle, J. F. K. (1995), "Leachate-Recycle Infiltration Ponds", Journal of Environmental Engineering, Vol. 121, No. 6, pp.465-471
 19. Townsend, T. G., Miller, W. L., Lee, H. J., and Earle, J. F. K. (1996), "Acceleration of Landfill Stabilization Using Leachate Recycle", Journal of Environmental Engineering, Vol.122, No.4, pp.263-268,
 20. Wall, D. K., and Zeiss, C. (1995), "Municipal landfill Biodegradation and Settlement", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 121(3), pp.214-224
 21. Yen, B. C., and Scanlon, B. S. (1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of the geotechnical Eng. Div., ASCE, 101(GT5)
 22. 박대원, 김수철(1999). "불량매립지의 생물학적 조기안정화", 제1회 전문가 초청 세미나 "21세기 지속 가능한 매립기술", pp. IV-1~IV-14, 매립기술연구회
 23. 박현일, 이승래, 라일웅, 성상열 (1997), "난지도 쓰레기 매립지의 침하 특성", 한국지반공학회지, 제13권, 제2호, pp.65-75
 24. 박현일, 이승래(1998a), "신선한 쓰레기 매립지의 장기 침하 예측에 대한 분해 효과 평가", 한국지반공학회지, 제14권, 제6호, pp.127-138
 25. 박현일, 이승래, 고광훈 (1998b), "매립연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동", 한국지반공학회지, 제14권, 제2호, pp.21-30
 26. 박현일, 이승래, 고광훈(1998c), "분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동", 한국지반공학회지, 제14권, 제1호, pp.5-14
 27. 박현일, 이승래 (2000), "기존 침하모델들을 근거한 쓰레기 매립지 장기 침하 예측", 한국지반공학회, 제16권, 제2호, pp.41-50
 28. 성도용, 구관서, 전양근, 한병현(1999), "쓰레기 매립지 개량공법 연구 - 공기주입법을 이용한 단지조성을 중심으로 -", 대한토목학회지 기술기사, 제47권, 제12호, pp.16-27,
 29. 이복수, 황규호, 이광열, 이승 (1995), "도시 쓰레기의 침하특성", 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, pp.1773-1782
 30. 정문경 (1998), "사용종료매립장 활용을 위한 지반공학적 접근", 열린충남 98 가을호, 제4권 3호, 통권 13호, 충남발전연구원, pp.90-101
 31. 정하익 (1998), 지반 환경 공학, 유림
 32. 환경부 (1996), "국가 폐기물 관리 종합 계획"
 33. 황대규 (2000), "비위생 매립지의 전향적 해법", 토목학회지, Vol.48, No.7, pp.78-87