

생물학적 반응시스템(Bio-Reactor System)을 이용한 폐기물 매립지

전한용¹ · 이재영² · 안양남¹

¹전남대학교 응용화학공학부

²서울시립대학교 환경공학부

The Landfill Using A Concept of the Bio-Reactor Systems

Han-Yong Jeon¹ · Jai-Young Lee² · Yang-Im An¹

¹Chonnam National Univ.

²University of Seoul

1. 서 언

생물학적 반응시스템 매립지란 무엇인가?

생물학적 반응시스템 매립지는 생물학적 반응시스템 매립지의 영향력을 가진 SWANA(Solid Association of North America)에 의해 다음과 같이 규정되었다^{4,6}.

“위생매립은 미생물적인 공정을 높이기 위해서 의도적인 제어를 통해 매립종료 후 5년이나 10년 안에 손쉽게 알맞게 분해할 수 있는 유기적 쓰레기 요소로 변형시키고 안정화시킬 목적으로 운영된다. 생물학적 반응시스템 매립지는 매립지 안에서 발생하는 쓰레기 분해의 범위와 전환비 그리고 공정의 효율성을 증가시킨다.”

생물학적 반응시스템 매립지와 전형적인 매립지는 어떻게 다른가?

전형적인 매립지와 생물학적 반응시스템 매립지 둘 다 지하수와 지표수, 공기 오염을 막기 위해서 고안되었다. 전형적인 매립지는 수분의 공급을 최소로 해서 침출수 집적과 제거, 침출수와 가스 생성을 최소화하도록 고안되었다. 이것은 단지 부분적인 쓰레기 더미 분해만을 허용한다. 그러나 생물학적 반응시스템 매립지는 수분의 첨가를 통해서 쓰레기 더미의 분해의 정도와 침출수와 가스 생성을 최대화시키도록 고안되었다.

여기서는 최근에 사용되고 있는 생물학적 반응시스템 매립지의 특징과 종류, 기술에 대해서 소개하고자 한다.

2. 생물학적 반응시스템 매립지의 특징

생물학적 반응시스템 매립지 기술은 쓰레기를 분해하는 미생물에게 필요한 조건을 활성화시킴으로써 매립지 안에 음식, greenwaste, 종이, 다른 유기 쓰레기의 생물학적 분해를 가속화한다. 쓰레기 분해를 활성화하는 가장 중요한 인자는 쓰레기의 함수비이다.

액체는 최적의 함수비인 40~70%를 획득하기 위해서 쓰레기에 첨가되어야만 한다. 첨가되어지는 액체는 매립지 침출수, 가스 응축액, 물, 오수 처리 슬러지, 폭우(stormwater)에 의한 유거수 등이다. 여기서 획득된 함수비는 미생물의 생물학적인 행동과 결합해서 쓰레기를 분해한다. 여기서 쓰레기를 분해하는 미생물은 호기성 미생물과 혐기성 미생물이다.

3. 생물학적 반응시스템 매립지의 장점

생물학적 반응시스템 매립지는 중요한 경제적, 환경적인 이익을 제공한다. 생물학적 반응시스템 매립지에서 쓰레기 분해와 생물학적 안정성은 장기적인 환경 위험과 매립지 운영과 사후 관리비용의 잠재적인 감소를 제공하면서 전형적인 “dry tomb” 매립지보다 훨씬 짧은 시간의 발생할 수 있다. 생물학적 반응시스템의 장점은 다음과 같다.

- dry tomb에서 수십 년에 일어나는 분해와 안정화를 생물학적 반응시스템 매립지에서는 수 년 안에 분해와 생물적인 안정화가 이루어진다.

*Corresponding author : leeje@uos.ac.kr

원고접수일 : 2003. 3. 21 게재승인일 : 2003. 4. 25

질의 및 토의 : 2003. 9. 30까지

- 혐기성 미생물과 호기성 미생물에 의한 조건이기 때문에 낮은 쓰레기 독성과 이동성을 가지고 있다.
- 침출수 재순환으로 침출수 질은 증진시키면서 침출수 처리비용은 감소된다.
- 메탄 가스 생성은 생물학적 반응시스템 매립지의 활동적인 수명기간동안 집중되어지고 양이 증대한다. 매립지 수명 내내 온실효과를 일으키는 가스 방출을 줄이는 동시에 유익한 가스 사용 계획을 세울 수 있는 장점이 있고 가스를 관리하기 쉽다.
- 쓰레기 더미의 밀도 증가 때문에 매립지 공간이 15~30%가 증가한다.
- 사후 관리 책임이 줄어든다.

매립지 부피는 메탄과 탄산산화물로 구성되어 있고 위험한 공기 오염물과 휘발성 유기 화합물의 양이 줄어든다. 또한 바이오리액터는 전형적인 "dry tomb"에 비해서 매립지 가스가 더 많은 양으로 공정초기에 발생한다고 지적한다.

또한 몇몇 연구에서 생물학적 반응시스템이 비용효율이 많은 매립지 가스 회수 가능성이 있다고 지적되어왔다. 이것은 에너지 회수 계획에서 생물학적 반응시스템 매립지 가스의 재사용 기회를 제공한다는 것을 암시한다.

4. 생물학적 반응시스템 매립지 공정

쓰레기 처리는 다음에 소개하는 4 가지 형태의 생물학적 반응시스템 매립지로 평가하고 있다.

- 혐기성-호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지
- 혐기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지
- 호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지
- 다른 환경에서도 잘 적응하는 미생물(facultative)에 의한 바이오리액터 매립지

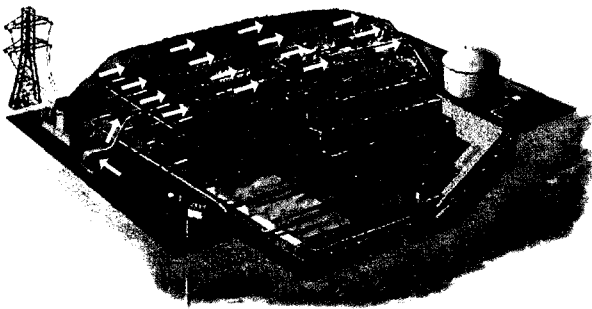


Fig. 1. Aerobic -Anaerobic Bioreactor.

4.1. 혐기성-호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지

호기성-혐기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템은 호기성과 혐기성 생물학적 반응시스템의 결합된 특징으로 쓰레기 분해를 가속화하기 위해서 고안되었다.

혼합설비의 주요한 장점은 호기성 공정의 처리 효율성과 함께 혐기성 공정의 운영상의 간결함이 결합된 것이다. 추가로 쓰레기 더미에서 휘발성 유기 화합물의 파괴효과까지 기대할 수 있다.

연속적으로 발생하는 호기성-혐기성 미생물에 의한 처리 목적은 혐기성의 단계에서 메탄화합물 초기에 야기되는 유기산을 줄여서 호기성 단계에서 음식과 다른 쉽게 분해할 수 있는 쓰레기의 생물적 분해를 일으키는 것이다.

이 시스템에서 아래층은 액체를 공급받는 것과 반대로 최상 층 또는 쓰레기 층은 산소를 공급받는다. 매립지 가스는 액체를 공급받는 층보다 아래에 있는 각각의 층으로부터 방출된다. 건설 중 각각의 층에 설치된 수평적인 관은 공기, 액체, 매립지 가스의 수송을 위해 사용되어진다.

Fig. 1에 호기성-혐기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지의 모식도를 나타내었다.

4.2. 혐기성 생물학적 반응시스템 매립지

4.2.1 혐기성 분해

산소가 없는 조건하에서 유기물이 혐기성 박테리아에 의해 분해되면서 최종 산물인 메탄, 이산화탄소, 물 등을 생성하는 반응을 말한다. Fig. 2에 혐기성 분해과정을 나타내었다.

- 혐기성 분해의 반응단계

·1단계 : 유기물이 알코올과 유기산으로 전환되는 유기산 형성과정

·2단계 : 1 단계 생성물질이 메탄균에 의해 최종적으로 CH₄, CO₂, H₂S, NH₃ 등으로 전환되는 메탄형성과정

혐기성 분해는 여러 단계의 복잡한 생물학적 반응으로 이루어지는데 크게 산 생성 반응과 메탄 생성 반응으로 나눌 수 있다. 메탄 생성 반응은 특히, 관련된 미생물의

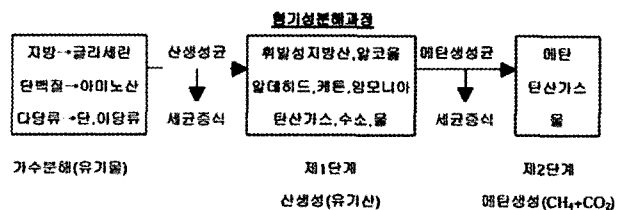


Fig. 2. Anaerobic decomposition process.

성장속도가 느릴 뿐만 아니라 주위 환경 변화(온도, pH 등)에 민감하여 메탄 생성 반응을 중심으로 각 단계의 반응들이 동력학적으로 평형을 이루도록 반응조를 조작하여야 정상적인 혐기성 처리가 가능하다.

혐기성 미생물들은 증식속도가 느리고 환경 변화에 민감하므로 성공적인 운전을 위해서 많은 혐기성 미생물들을 혐기성 반응조 내에 보유하는 것이 중요하다.

4.2.2 혐기성 미생물에 생물학적 반응시스템

혐기성 생물학적 반응시스템은 혐기성 박테리아를 위한 최적의 조건에 의해서 쓰레기 분해를 가속화시킨다. 매립지에서 혐기성 박테리아는 유기산과 메탄과 탄소 산화물로 유기적 쓰레기를 분해하게 된다.

혐기성 상태는 모든 매립지에서 자연적으로 발생한다. 전형적인 쓰레기는 10~20%의 물을 함유한다. 일반적으로 수분보유능력 가깝거나 수분 상태가 약 35~45%의 수분이 혐기성 분해를 최적화하는 것으로 받아들여진다.

수분은 다양한 배수 시스템을 통해서 침출수의 형태로 더해진다. 그러나 현장에 생산된 침출수의 양은 쓰레기에서 최적의 수분상태를 이루기 위해서 불충분하다. 오수 슬러지, 폭풍수, 다른 위험이 없는 액체 쓰레기와 같은 수분을 첨가하는 원소는 재순환을 이용해서 침출수를 증가시키는 것이 필요하다.

쓰레기의 함수비가 최적의 수준에 접근함에 따라 쓰레기 분해비는 증가한다. 이것은 생산된 매립지 가스의 양의 증가를 이끈다. 쓰레기의 밀도 증가 역시 발생한다. 이것의 가속된 생산량 때문에 바이오리액터 매립지에서 가스 수집 시스템은 최대 부피를 다룰 수 있는 능력이 있어야 하지만 가스 수집 시스템의 필요성은 더 짧아졌다.

Fig. 3에 혐기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템의 모식도를 나타내었다.

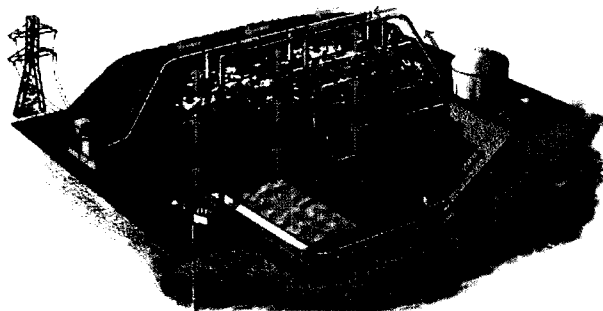


Fig. 3. Anaerobic Bioreactor.

4.3 호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지

4.3.1 호기성 분해

산소 존재 하에서 유기물이 호기성 박테리아에 의해 분해되면서 일부는 박테리아의 증식에 이용되고 나머지는 최종 산물인 CO_2 , NH_3 , H_2O 등을 생성한다.

호기성 미생물은 공기 중의 유리 산소를 이용하여 영양소를 산화·분해하고, 이 때 발생하는 에너지를 미생물의 생활에 쓴다. 이와 같은 에너지 획득 과정을 산소 호흡이라고 하는데, 이 과정에서 산소를 필요로 하는 것은 치토 크롬계 효소를 가지고 있기 때문이다.

4.3.2 호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템

호기성 생물학적 반응시스템 세포의 호흡을 위해서 산소를 요구하는 유기체인 호기성 미생물을 위한 상태를 최적화함으로써 쓰레기 분해를 촉진시킨다. 호기성 미생물의 호흡에서 에너지는 산소를 소비하고 탄소 산화물을 생산하는 과정에서 유기적 분자로부터 얻을 수 있다.

호기성 미생물은 혐기성 미생물이 하는 것과 같은 기능을 하기 위해서 충분한 물이 요구된다. 그러나 호기성 유기체는 호기성 미생물의 호흡이 혐기성 미생물의 호흡보다 에너지 창출에 더 효율적이기 때문에 혐기성 미생물보다 더 빨리 자랄 수 있다. 이것의 중요성 하나는 호기성 미생물의 분해는 혐기성 미생물의 분해보다 더 빨리 진행될 수 있다. 다른 중요성은 호기성 미생물의 호흡은 많은 양의 물질대사 열을 창출할 수 있다는 것이다. 그것은 상당히 많은 양의 물의 양을 요구한다.

매립지에서 호기성 미생물의 활동은 쓰레기 더미 안에 공기의 주입을 통해서 촉진된다. 쓰레기 더미에 진공장치를 적용하는 것이 가능하고 투과성 캡을 통해서 공기를 끌어당긴다. 액체는 혐기성 미생물의 리액터 보다 훨씬 심한 추가적인 수분 원천에 따른 요구 때문에 침출수 재순환을 통해서 더해진다. 호기성 미생물의 공정은 메탄을 생

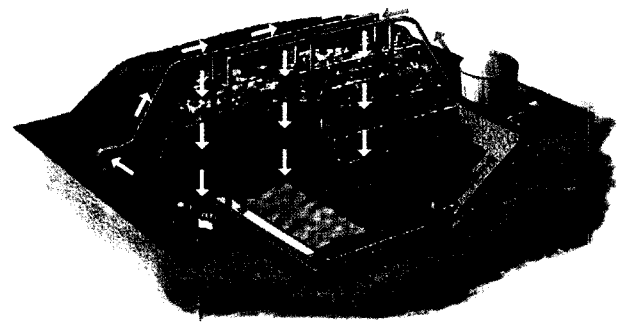


Fig. 4. Aerobic bioreactor.

산하지 않는다. 공정은 빠르게 진행되어지고 완전한 생물 분해에 2년보다 적은 시간이 요구된다.

Fig. 4에 호기성 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지의 모식도를 나타내었다.

4.4. 환경 적응성이 우수한 미생물(Facultative)에 의한 생물학적 반응시스템

주어진 환경에서도 잘 적응하는 미생물에 의한 생물학적 반응시스템은 액체가 매립지 안에 첨가되어질 때 나타나는 높은 암모니아 농도를 제어하기 위한 메카니즘과 전형적인 혐기성 분해를 결합시킨다. 이 시스템에서 높은 수치의 암모니아를 함유하는 침출수는 암모니아를 질소로 변환시키는 생물학적인 질소화 과정을 사용해서 처리되어진다. 처리된 침출수는 매립지에 첨가되어진다. 여기서 다른 환경에서도 잘 적응하는 미생물과 관련하는 어떤 미생물은 호흡을 위해서 산소없이 질소로 사용할 수 있다. 이 탈질소로 불리는 과정은 이 시스템에서 질소를 효율적으로 제거하는 질소 가스의 생산으로 끝난다.

다른 생물학적 반응시스템과 함께 다른 환경에서도 잘 적응하는 미생물에 의한 생물학적 반응시스템이 최적으로 기능을 하기 위해서 적당한 수분이 필요하다. 침출수와 다른 액체는 쓰레기의 함유율을 높이기 위해서 사용된다.

Fig. 5에 다른 환경에도 잘 적응하는 미생물에 의한 생물학적 반응시스템 매립지의 모식도를 나타내었다.

5. 생물학적 반응시스템 매립지 가스 처리

매립가스는 다량으로 발생하는 주요가스와 매우 소량으로 발생하는 여러 종류의 미량 가스로 구성되어 있다. 주요가스들은 폐기물의 유기물 분해에 의해 생산되며 어떤 미량가스는 소량으로 존재하지만 유독할 수 있고 공공의

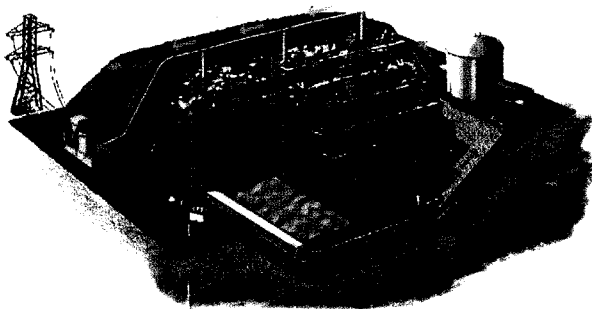


Fig. 5. Facultative bioreactor.

위생에 피해를 줄 수 있다. 매립지에서 발견되는 가스로는 암모니아(NH₃), 이산화탄소(CO₂), 수소(H₂), 황화수소(H₂S), 메탄(CH₄), 질소(N₂)와 산소(O₂) 등이 있다. 매립 가스 중에 가장 많이 발견되는 메탄과 이산화탄소는 도시 폐기물의 생분해성 유기물질의 혐기성 분해에서 발생하는 주요 가스이다. 미량 가스 성분으로 가장 많은 화합물은 휘발성 유기 화합물(VOCs)이다. 이러한 매립가스의 이동을 제어하기 위해서 매립가스를 집적한다. 매립가스의 이동을 제어하는 목적은 대기로의 방출을 줄이고 악취성 물질의 방출을 최소화하며 지하로 가스이동을 감소시키고 메탄으로 에너지를 회수하기 위한 것이다. 매립가스 제어 시스템은 소극적 방식과 적극적 방식이 있는데 소극적 방식은 매립지 내에서 자연적으로 발생된 가스의 압력만이 가스이동의 추진력으로 이용되는 방식이고 적극적 가스제어 방식은 에너지를 이용 진공상태를 형성하여 가스흐름을 제어하는 방식이다. 생물학적 반응시스템 매립지에 사용하는 매립가스 제어 시스템은 적극적 제어 방법으로 수직 및 수평 가스 추출정을 이용한다.^{1,2)}

5.1. 수직 가스 추출정

Fig. 6에 수직 가스추출정을 사용하는 일반적인 가스 회수 시스템을 나타내었다[1].

수직 가스 추출정은 매립지의 깊이와 매립복토의 설계에 따라 영향 반경이 다르다. 일반적으로 합성 차수막을 포함한 복합재질 복토를 사용하는 비교적 깊은 매립지에서는 45~60 cm의 간격을 둔다. 점토나 토양 복토를 설치한 매립지에서는 가스 회수 시스템으로의 대기가스 흡입을 막기 위해 보다 작은 간격(30 cm)로 설치하는 것이 바람직하다. 수직 가스 추출정은 매립지에서 매립이 일부

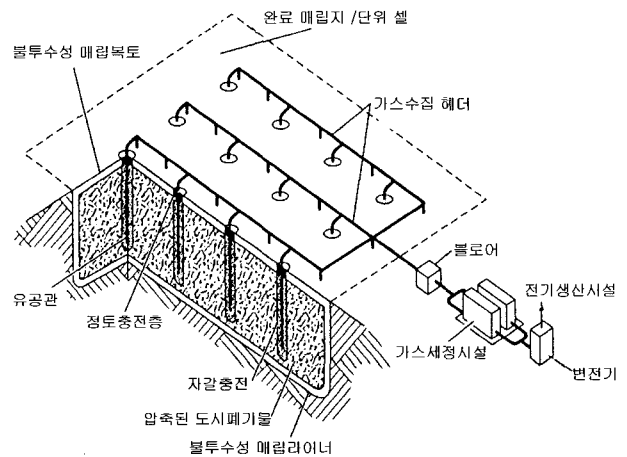


Fig. 6. Landfill recovery system used vertical extraction well.

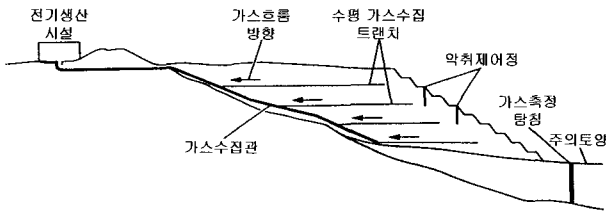


Fig. 7. diagram of horizontal gas extraction trench of landfill.

또는 모두 완료된 후에 설치된다. 일반적인 추출정의 설계단면은 45~90cm의 시추공에 설치된 10~15cm의 파이프 케이싱으로 구성된다. 케이싱 바닥으로부터 1/3~1/2되는 지점은 유공관으로 자갈로 뒤채움을 한다. 나머지 구멍이 없는 부분은 흙으로 뒤채우고 점토로 밀봉한다. 매립가스 회수정은 보통 매립지 내 폐기물 깊이의 80%까지 설치하도록 설계하고 있다.

5.2. 수평 가스 추출정

수평 가스정은 둘 이상의 층이 완성된 후에 설치한다 (Fig. 7). 수평 가스추출도랑은 백호(backhoe)를 사용해서 폐기물 층을 굴착한 다음 이 도랑을 자갈로 반을 채우고 가운데 느슨한 접속 장치로 연결된 유공관을 설치하고, 나머지 부분은 자갈과 폐기물로 덮는다(Fig. 8). 자갈을 채운 도랑과 느슨한 접속 방식(open joint) 유공관을 사용하게 되면 시간이 경과함에 따라 매립지에서 발생하는 부분적인 침하에도 가스 추출도랑은 그 기능을 유지할 수 있다. 수평도랑은 약 25 m 정도의 수직방향 간격과 60 m 정도의 수평방향 간격을 두고 적절하게 배치된다¹⁾.

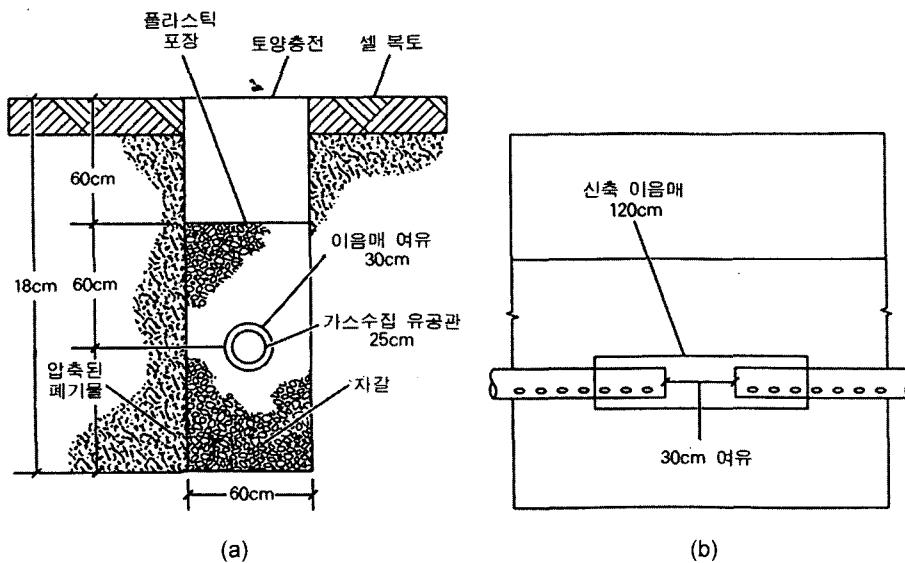


Fig. 8. diagram of horizontal gas extraction trench: (a) cross section (b) side section.

6. 생물학적 반응시스템 매립지의 라이너 시스템

6.1. 매립지 차수막 시설

매립지 차수막 설계의 목적은 매립지 하부의 지하 토양으로 침출수의 침투를 최소화하여 지하수 오염의 잠재성을 제거하는 것이다¹⁾. 그 동안의 연구는 더블 차수막 매립지가 충분히 침출수 이동을 막는 효과적인 장벽으로 행동함으로써 지하수 질을 보호한다고 보고해왔다⁶⁾. 생물학적 반응시스템 매립지의 경우 전형적인 매립지보다 침출수의 양이 더 많으므로 단층 차수막보다 이중 차수막이 더 효율적으로 보여진다. 규정에 제시된 차수막의 두두차는 300 mm인데 이것을 초과했을 때 라이너 시스템의 보전이 보증되어야 한다. 이것은 최소 지오멤브레인/압축 점토 차수재(GM/CCL)을 요구한다. 규정은 최소 1.5 mm (60mil)두께를 가지는 HDPE를 사용해서 최소 0.75 mm (30mil)두께가 되는 지오멤브레인을 요구한다^{2,3)}. CCL은 1×10^{-7} 의 투수계수를 가지거나 더 낮은 투수계수를 갖고 600 mm의 두께를 가져야 한다. 그러나 GM/CCL보다 GM/GCL이 누출시 보다 안전하고 수리학적으로 효율적으로 알려졌다^{1,2,7)}.

6.2. 생물학적 반응시스템 매립지 침출수처리

침출수는 폐기물 층을 침투하면서 용존 또는 부유물질이 추출된 액체로 정의된다. 대부분의 매립지 침출수는 표면 유출수, 우수, 지하수, 등의 외부 발생원과 지의 생물, 폐기물의 분해 시 생성된 액체 등의 매립지 내로 유입된

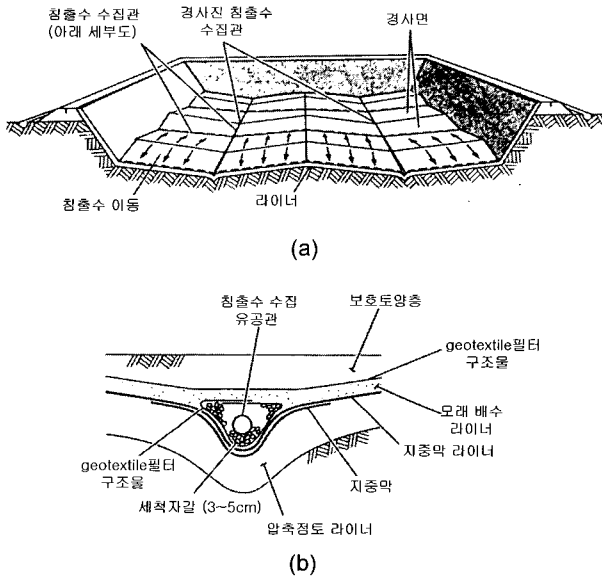


Fig. 9. Landfill leachate collection system: (a) schematic diagram (b) detail diagram.

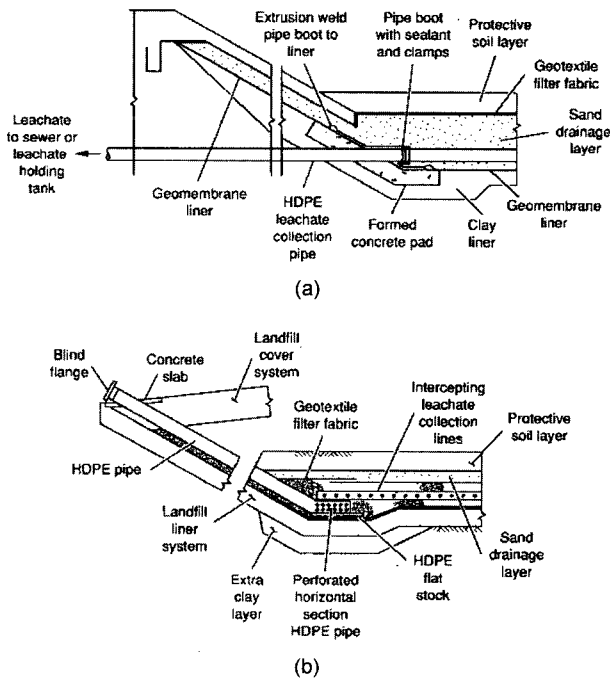


Fig. 10. Leachate removal system : (a) Leachate collection well passes side of landfill (b) inclined leachate collection well in the landfill.

액체로 구성된다.

6.2.1 침출수 집수설비

매립지 바닥에 침출수가 고이는 것을 피하려면 바닥은 완만한 경사면으로 되어야 한다.

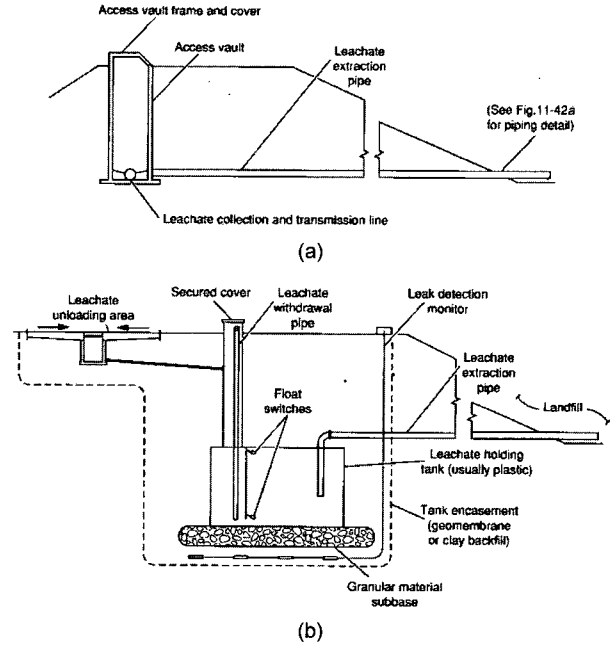


Fig. 11. Example of Leachate storage: (a) leachate collection facility (b) leachate storage.

Fig. 7에서 보면 집수 경사면 표면을 흘러 침출수는 경사 표면 사이의 침출수 집수도랑으로 모여지게 된다. 각 침출수 집수 도랑에는 유공관이 설치되어 집수된 침출수를 재순환시키기 위해서 중앙으로 이송한다. 매립지 내에 축적된 침출수를 배제하는데 Fig. 10a와 같이 침출수 집수관의 매립지 측면을 통과해야 한다. 이 경우에는 파이프가 매립지 치수막을 통과하는 연결부위에 밀봉이 잘 되었는지를 특히 주의해야 한다. 다른 방법(Fig. 10b)은 매립지 층 내부의 경사 집수관을 사용하는 방법이다.¹⁰⁾ 이렇게 빠져나온 침출수는 외부 저류조에 집수한다(Fig. 11)¹⁾. Fig. 9는 침출수 집수장비의 예이다¹⁾.

6.2.2 침출수 재순환

침출수 재순환은 매립지의 침출수를 처리하기 위해 사용된 많은 기술 중에 하나이다. 매립지 침출수의 특성 때문에 침출수 제어의 주요한 목표는 통제되지 않는 분산을 막기 위해서이다. 침출수는 그것이 환경에 나타내기 전에 항상 모아지고, 처리되고 담게 되어있다. 침출수 재순환 동안 침출수는 시의 폐기물 안에 재침투를 위해서 치수 매립지로 돌려지게 된다. 이것은 침출수가 매립지를 통해서 흐르는 것이 계속됨에 따라 그것은 생물학의 과정과 침전, 흡수를 통해서 처리되어지기 때문에 침출수 제어의 한 방법으로 고려되었다. 이 공정 역시 매립지 안에 매립지의 생물학적인 안정성과 생물학적인 분해의 비와 매립

지로부터 메탄 회수량을 증가시키는 함수비를 증가시킴으로서 매립지에 이익이 된다¹⁰⁾.

(1) 침출수 재순환의 방법

침출수 재순환에는 다음의 몇 가지 방법이 있다^{9,10)}.

① 처리 동안에 쓰레기에 직접적인 적용이 공정 중에 침출수는 쓰레기가 버려지고 침전되고, 압밀되어지는 동안에 들어오는 폐기물에 더해진다. 이 방법이 가지는 문제는 오물문제 노출에 기인하는 건강 위험, 매립지 장비와 기계류에 직접 접촉과 바람 때문에 현장 밖으로 이동 문제가 포함되어있다. 이 방법은 고도의 바람, 강우와 매립지의 폐쇄와 같이 침출수가 적용되어질 수 없을 때 침출수 저장시설이 요구된다.

② 매립지 표면에 물을 뿌림-여기 침출수는 관개수를 농작물에 적용시키는 것과 같은 방법으로 매립지 표면에 적용시키는 것이다. 이 방법은 침출수를 매립지의 더 많은 부분에 적용될 수 있도록 허락되어 있기 때문에 그리고 침출수 부피는 증발 때문에 줄어들기 때문에 유익하다. 그러나 직접적인 적용과 관계된 단점은 위에 제시된 방법과 관계가 있다.

③ 표면(surface) 적용-이것은 침출수를 뿌리거나 고이게 함을 통해서 이루어진다. 그 침출수가 모여있는 것은 대체적으로 폐기물 안에 굴착된 현장안에 또는 흙으로 된 좁은 통로에 모아지도록 매립지 지역에 대체적으로 형성되어진다. 이들 방법의 단점은 요구되는 땅 면적의 양의 증가와 침출수가 직접적으로 또는 폭우에 의한 유거수와 함께 도망갈 수 있도록 가능하게 하는 누출액, 누출, 파손을 찾기 위해서 침출수가 모여있는 곳의 모니터링이 포함된다.

④ 표면 밑에 적용-이것은 폐기물 안에 수직의 재충전 관(well)이나 수평적인 배수현장에 놓아둠으로써 이루어진다. 이 방법에 많은 양의 요구되는 건설공사와 굴착이다. 그렇지만 대기 노출의 위험은 매우 줄어든다.

(2) 침출수 재순환의 단점과 장점

재순환을 통한 침출수 처리에는 다음과 같은 장점이 있다.

① 침출수의 재순환을 사용한 매립지는 재순환 처리가 없는 매립지와 비교한 침출수의 농도의 감소를 경험했다.

② 폐기물 안에 증가된 함수비는 매립지 안에 유기적인 재료의 생물학적인 분해를 향상시키기 위한 시스템 조건을 강화한다.

③ 매립지 외부에서 처리를 요구하는 침출수 안에 유기적인 물체는 매립지를 통해서 재활용되는 처리 시간을 받는다. 이것은 매립의 처리비용을 줄인다.

④ 매립지 안에 축소된 환경은 침투와 흡수를 통해서 침출수 안에 무기물질을 제거한다.

⑤ 침출수 재순환은 매립지안에 생물학적인 시스템을 안정화시키고 이것은 매립지의 환경적인 위험을 줄이고, 요구되는 폐쇄 후 모니터링의 양을 줄인다. 그것은 역시 매립지 채광과 공간의 개척의 기회를 제공할 것이다.

⑥ 침출수 재순환은 쓰레기를 분해의 비율이 증가되고 메탄생산의 양을 증가시킨다. 이것은 에너지를 위한 메탄 회수를 훨씬 쉽게 만든다.

⑦ 침출수 재순환은 상대적으로 간단하고 비싸지 않은 침출수 처리 방법이다.

그러나, 다음과 같은 침출수 재순환의 단점도 있다.

① 매립지는 잡다하기 때문에 침출수는 이동하기 위해서 분리된 채널을 찾을 것이다. 이것은 침출수가 모든 쓰레기와 반응하고 처리되는 것을 보증하기 어렵다.

② 침출수가 매립지의 표면에 적용되었을 때 환경적인 노출의 위험

③ 잘못 적용될 가능성의 증가에 관해서 정보와 교육의 부족

6.3. 매일 복토재료

매일 복토란 자연토 또는 퇴비와 같은 대체물로 폐기물 층을 15~30 cm 정도 덮는 것을 말한다. 매일 복토재료는 vector, 냄새, fire의 방지와 물과 가스를 제어하기 위해서 사용된다. 불행히도 이 매일 복토층은 침출수의 아래쪽으로 흐름에 장벽을 제공할 수도 있다. 그래서 침출수 생물학적 반응시스템 재활용에 기능을 갖는 매립지에서 대체 매일 복토재료(Table 1)를 추천하고 있다. 이 재료 다 폐기물 안에서 층에서 층으로의 자유로운 침출수 흐름을 허락한다^{1,2,7)}.

Table 1. Alternative Daily Cover Material, After Pohland and Graven (1993)

Polymer foams	
· Rusmar	· Sanifoam
Slurry Sprays	
· Con Cover (Paper)	· Posishell (Paper)
· Land-Cover (Clay/polymer)	
Sludges and Indigenous Materials	
· Naturite/Naturfill	· Ash-based
· N-Virosoil	· Auto fluff
· Chemfix	· Foundry Sand
· Green waste/compost	· Shredded tirds
Reusable Geosynthetics	
· Air space Saver	· Covertech
· Griffolyn	· Tarpmatic
· Cormier	· Aqua-Shed
· Fabrisoil	· Polyfelt
· Sanicover	· Typar

6.4. 최종복토

매립지의 장기간 매립 종료물 위한 최종 복토는 기반층, 가스 집적 층, 차단층, 지표수 배수층, 커버 토양층, 그리고 식물이 자랄 수 있는 표층으로 구성된다. 전형적인 규정은 쓰레기의 최종 층의 배치 후 1년 안에 최종복토 건설을 요구한다. 바이오리액터 매립지의 목표와 함께 침출수 재순환을 실행하는 매립지에서는 대부분의 정착이 일어난 때까지 최종 층의 배치 후에 아무것도 놓지 않을 것이다. 이것은 아마도 5~20년 후일 것이며 대신 임시 커버가 놓여질 것이다. 만약 냄새가 문제라면 지오멤브레인 또는 GCL은 임시복토 안에 놓아질 것이다^{1,2,7)}.

7. 생물학적 반응시스템 매립지의 연구 방향

7.1. 지속능력(sustainability)

지속능력은 경제적 이익의 가장 큰 잠재력을 가진 것으로써 지속할 수 있는 매립지는 다음과 같은 기준을 충족해야한다⁴⁾.

- 산출물은 제어되고 받아들일 수 있는 방법으로 환경에 방출되고 남겨진 잔여물은 받아들이기 어려운 환경 위험에 노출되지 않아야 한다.
- 사후 관리에 대한 책임이 다음 세대까지 넘어가지 않아야 한다.
- 지하수나 다른 자원을 손상하지 않아야 한다.

생물학적 반응시스템 매립지의 이러한 능력은 장기간 모니터링과 유지를 피하고 새로운 매립지의 대지계획을 연기함으로써 관련 비용을 줄일 수 있게 한다. 그러나 매립지 안에서 계속적인 화학적, 생물학적 절차를 받기 쉬운 잔존한 쓰레기 구성요소의 장기간의 fate(운명)을 알 수 없다. 예를 들면 혐기성의 상태하에서 황화물과 휴믹(humic)물질은 종종 중금속에 들어 붙는다. 시간이 흐른 후 산소와 물은 금속을 결집하는 상태를 야기해서 매립지로 들어가고 매립 밖으로 잔존하는 무생물의 오염물이 흘러나온다. 이들 구성요소의 fate에 관한 예측과 평가는 어렵다. 이들 쓰레기를 제거해버리거나 또는 더 영구적으로 이동하지 못하게 하는 방법과 주위환경에 인간 건강이나 환경에 거의 없는 위험을 가지고 오염물을 동화시키는 방법에 대해서 연구를 해야 한다⁴⁾.

7.2. 지질학적인 특성

쓰레기 수분포화를 야기하는 증가된 함수비는 내부 기공 압력과 줄어든 마찰각도를 이끈다. 전단강도에 관해서

쓰레기 분해 영향은 역시 중요한 문제이다. 많은 연구는 습식의, 깊은 매립지의 바닥에서 발견한 진흙과 같은 상태를 보고했다. 적극적인 침출수 재순환은 콜럼비아 SA에 매립지 중에 비극적인 산사태에 관한 기여인자로서 들었다. 그러한 위험을 최소화하기 위해서 연구는 안정된 쓰레기의 지질학적인 특성을 규정짓고 정확한 생물학적 반응시스템 매립지 안정성 분석을 위해서 적절한 정보를 제공하는 것이 필요하다^{1,4)}.

7.3. 침출수의 질(Quality)

수분정보는 dry control cell과 비교한 것처럼 순수 유기적인 침출수양을 향상시킨다는 것을 실험실과 Pilot 크기의 연구에서 잘 알려져 왔다. 현장 범위의 연구에서 침출수 유기적인 품질은 초기 피크 후에 빠르게 향상되는 것으로 나타났다. Worcester County, Maryland에 매립지에서 12개월 기간의 반인 침출수 COD를 계산했다. 뉴질랜드 Auckland에 Rosedale 매립지에서 12개월 후에 43000 mg/l에 피크가 있던 침출수 COD는 18개월안에 30%까지 감소했다. 현장실험 역시 생물학적 반응시스템 침출수 안에 위험한 유기 물질의 낮은 농도를 보고했다⁴⁾. 생물학적 반응시스템은 다음과 같이 유기적인 오염물질의 제어를 최적화하는 경향이 있다.

- 가스 생산을 증가시킴으로써 휘발성 유기물질을 소모
- 미생물에 의한 생물 분해를 위한 조건을 최적화시킴
- 오염물의 고정

이러한 메카니즘은 Sanin and Barlaz와 Pohland에 의해서 실험실에서 확립해왔다. 지하수 오염의 위험과 관계된 침출수의 유기적 농도 감소의 중요성을 regulator에게 설명해야한다. 그러나 위에서 설명했던 것처럼 중금속과 다른 무생물의 장기간 운명은 위에 논의한 것처럼 알아내기 어렵다⁴⁾.

7.4. 호기성 생물학적 반응시스템

매립지 생물학적 반응시스템 운영의 전형적인 방법은 혐기성의 미생물에 의한 매립지 안정화를 높이는 것이다. 최근 증가하고 있는 관심은 호기성 생물학적 반응시스템을 만들어 내기 위해서 매립지에 산소를 산출하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 공기는 가스를 뽑아내거나 침출수를 주입하기 위해 사용되는 것과 같은 장비로 매립지안에 주입된다. 이 기술의 사용을 막는 나머지 문제는 매립지 열의 문제와 부가적인 비용이 포함된다. 그 나아가서 탐구 분야는 혼성 또는 호기성과 혐기성 미생물이 결합된 시스

템의 사용이다. 그러한 시스템의 제어에 관한 문제가 해결될 수 있다면 혼성 시스템은 수많은 이익을 제공할 것이다^{1,2)}.

7.5. 비용분석

몇몇 연구자들이 다양한 결과를 가지고 수명 주기 비용을 모델로 해왔음에도 불구하고 생물학적 반응시스템의 비용 영향은 예측하기 어렵다. 생물학적 반응시스템이 가지는 경제적 이익은 침출수 처리비용의 감소, 쓰레기 안정화 기간의 감소와 사후 모니터링 기간의 감소, 새로운 매립지의 대기계획의 연기 등이 있다.

그러나 이들의 비용 이익을 상쇄하는 것은 생물학적 반응시스템 기술이행을 위한 자본금과 운영 비용이다. 생물학적 반응시스템으로서 매립지 운영과 관계가 있는 주요한 자본금은 매립지 안에서 이루어지는 침출수 재순환에 필요한 장비와 유기 쓰레기 분해의 결과로서 가스 생성비의 증가로 가스를 회수하기 위해서 설치하는 매립지 가스 시스템을 건설하기 위한 건설비용이다⁹⁾.

많은 연구자들은 여러 가지 비용 분석을 통해서 어떤 환경하에서 매립지 생물학적 반응시스템이 경제적으로 유효하다는 것을 입증하였다⁴⁾. 그러나 비용 분석은 수많은 변수(부지 재사용의 잠재력, 쓰레기분해, 침출수 처리 비용, 기후, 매립지가스의 유익한 사용을 위한 기회, 지역적인 규제기관의 유동성) 때문에 일반적으로 적용하기 힘들다.

운영 기간동안 빠른 유기적 분해와 정착, 증가한 쓰레기 밀도, 가스 생산량의 증가, 침출수 처리비용의 증가와 사후 관리의 감소와 같은 기술적 이익이 잠재적인 클라이언트에게 생물학적 반응시스템 기술을 받아들이게 하는데 중요하지만 생물학적 반응시스템 매립지 운영의 수락은 생물학적 반응시스템을 운영하는데 드는 비용과 함께 제시되어야 가능할 것이다. 그러므로 생물학적 반응시스템 매립지의 실제적인 비용 데이터와 재정적인 모델 분석을

제시해야 할 것이다^{8,9)}.

8. 결 언

매립지 생물학적 반응시스템 기술의 적용은 액체처리 과정의 확장이다. 앞에서 제시된 기술적인 도전은 실물 크기의 연구 과제에서 기획되어야 할 것이다. 실물 크기의 연구 결과는 데이터의 보편적인 적용을 하도록 제시해야 할 것이다. 너무 멀지 않는 미래에 쓰레기 처리를 위한 이러한 접근은 현실에 기준과 지속 가능한 매립지가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 남궁 완, 이동훈, "폐기물처리공학", 동화기술.
2. 윤오섭, "폐기물처리공학", 동화기술.
3. 백운봉, "폐기물관리", 영풍문고.
4. Debra R. Reinhart & Philip T. McCreanor & Timonhy Townsend, "The bioreactor Landfill: Research and Development Needs", Proceedings of the GRI-14 Conference.
5. Annex, "R.P. (1996) Optimal Waste Decomposition-Landfill as Treatment Process", Journal of Environmental Engineering, 964-974.
6. Robert J. Phaneuf, "Bioreactor Landfills-Regulatory Issues", Proceedings of the GRI-14 Conference
7. Robert M Koerner & George R. Koerner, Y. Grace Hsuan, "Bioreactor Landfills: The Liner System Issues", Proceedings of the GRI-14 Conference.
8. Ramin Yazdani & John Pacey, "U.S. Project XL", Proceedings of the GRI-14 Conference.
9. Prentiss A. Shaw & Amy J. Knight, "Dollars and Sense of Implementing a Bioreactor Landfills", Proceedings of the GRI-14 Conference.
10. Kevin Fellin & Mike Cuccinello & Becky Cheadle, "Leachate Recirculation", Groundwater Pollution Primer CE 4594 : Soil and Groundwater Pollution, 1996.