

분리막과 증발기를 이용한 매립지 침출수 처리에 관한 연구(Lab test)

강신경 · 박영규*

포항산업과학연구원 환경보전연구팀
*영남대학교 환경공학과

(2000년 6월 28일 접수, 2000년 10월 12일 채택)

A Study on the Treatment of Landfill Leachate using Membrane and Evaporator (Lab Test)

Shin-Gyung Kang · Yung-Kyu Park*

Environmental Conservation Team, Research Institute of Industrial Science and Technology
**Department of Environmental Engineering, Yeungnam University*

ABSTRACT

This research was to develop the economical treatment processes of the landfill leachate to meet the legal discharge standards. To achieve this purpose, experiments were conducted in laboratory to choose the optimum process and to obtain the design factors before a pilot-scale test. The concept of the process developing in this research was using the reverse osmosis system. The submerged membrane bio-reactor was used to achieve pre-treatment of reverse osmosis system and the concentrate was treated by evaporator with land fill gas as a fuel.

The results of the research showed that SS, BOD₅, COD_{Cr}, NH₄⁺-N and T-N were removed 99.0%, 43.0%, 12.9%, 48.5% and 18.7% respectively in the submerged membrane bio-reactor. The reverse osmosis system could remove BOD₅, COD_{Cr}, NH₄⁺-N and T-N as an efficiency of 97.5%, 97.6%, 79.7% and 85.4% respectively. The evaporator could remove COD_{Cr}, NH₄⁺-N and T-N as an efficiency of 90.5%, 50.6% and 63.3% respectively. However the condensed water of the evaporator was not satisfied the legal standard and should be treated in reverse osmosis with the pre-treated leachate.

Key Words : Landfill Leachate, Submerged Membrane Bio-reactor, Reverse Osmosis, Evaporator

요약문

본 연구는 매립지에서 발생하는 침출수를 배출허용기준 이내로 처리함은 물론 경제적인 처리공정을 개발하기 위한 것이다. 이를 위해 현장 pilot test 이전에 최적 공정 선정과 장치 설계인자를 도출하기 위해 실험실에서 기초실험을 수행하였다. 본 연구에서 개발하고자하는 처리공정은 역삼투시스템을 이용하는 공정인데 전처리로서 침지형분리막 생물반응기를 이용하였으며, 역삼투시스템에서 발생하는 농축수는 매립가스를 열원으로 하는 직화식 증발기를 이용하여 처리하는 공정이다.

실험결과 침지형분리막 생물반응기에서 SS, BOD₅, COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N은 각각 99.0%, 43.0%, 12.9%, 48.5%, 18.7%의 제거효율을 보였다. 역삼투시스템은 BOD₅, COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N을 각각 97.5%, 97.6%, 79.7%, 85.4% 제거할 수 있었다. 증발기는 COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N을 각각 90.5%, 50.6%, 63.3% 제거할 수 있었으나 배출허용기준 이내로 처리하기는 어려운 것으로 나타나 농축수는 역삼투시스템 전단으로 보내서 전처리수와 함께 처리되어야 할 것으로 나타났다.

주제어 : 매립지 침출수, 침지형분리막 생물반응기, 역삼투시스템, 증발기

1. 서론

우리나라의 폐기물 발생량은 1997년 기준 하루 194,700톤으로써, 재활용(55%), 매립(39%), 소각(6%) 등의 방식으로 처리하고 있다. 국내 매립지는 총 445개소인데 생활쓰레기, 산업폐기물 및 하·폐수슬러지 등이 주로 매립되고 있다.¹⁾ 매립지에는 우수와 지하수 및 음식물쓰레기 등에 의해 침출수가 발생하게 되는데 발생량은 소량임에도 불구하고 고농도의 난분해성 오염물질을 함유하고 있어 지하수 및 하천의 주요 오염원으로 인식되고 있다. 따라서 정부에서는 침출수 배출허용기준을 단계적으로 강화하고 있으나²⁾ 대부분은 배출허용기준을 초과하여 배출되고 있는 실정이다.³⁾

현재까지의 일반적인 침출수 처리공정은 혐기성, 호기성 등의 생물학적 처리방식^{4~6)}과 펜톤법 등 물리·화학적 방식을 채택^{7,8)}하고 있다. 그러나 이들 방식들은 그 기술의 우수성에도 불구하고 공정 특성상 외부 조건변화에 따른 운전의 어려움 등으로 상용화하기 위해서는 상당한 수준의 운전기술이 요구되고 있다. 따라서 최근에는 운전기술이 간단하면서도 강화된 배출허용기준을 만족할 수 있는 역삼투법을 이용한 침출수 처리기술이 개발되고 있으며,^{9~11)}

국내 일부 매립지에는 시설을 도입하여 운영중에 있다.³⁾ 그러나 역삼투법의 우수성에도 불구하고 고가의 투자비 및 운전비용, 전처리 미흡으로 인한 분리막 오염의 심화,¹²⁾ 그리고 농축수 처리방안 미비 등으로 인해 이를 실용화하기 위해서는 많은 공정개선이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 매립지에서 발생하는 침출수를 배출허용기준 이내로 처리함은 물론 경제적인 처리공정을 개발하기 위한 목적으로 수행하였다.

본 실험은 현장 pilot test를 수행하기 이전에 침지형분리막 종류 및 생물반응기 체류시간 선정과 오염물질 제거율, 역삼투시스템 최적 회수율 결정과 오염물질 제거율, 스크래퍼식 증발기의 적용 가능성 및 오염물질 제거율 그리고 침출수처리 최적 공정을 구성하기 위해 실험실에서 수행한 기초실험이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치는 크게 침지형분리막 생물반응기(SMBR)와 역삼투(R/O) 장치, 그리고 증발기로 구성되어

있다. SMBR은 침출원수의 부유물질 제거와 동시에 유기물 및 질소성분의 일부를 제거하는 전처리 기능을 한다. 대부분의 오염물질은 역삼투 공정에서 제거된 후 처리수는 배출된다. 한편 역삼투 장치에서 발생하는 고농도의 농축수는 매립가스를 열원으로 하는 직화식 증발기를 이용하여 처리하는 공정개념으로 구성되어 있다.

2.1.1. 침지형분리막 생물반응기

SMBR은 크게 두 가지의 기능을 수행한다. 첫째는 분리막을 이용해서 침출원수 중에 존재하는 입자성 이물질질을 제거하는 것이며, 두 번째는 생물반응기를 이용하여 유기물과 질소성분의 일부를 제거하여 역삼투장치의 부하를 경감하는 것이다.¹³⁻¹⁵⁾ Fig. 1은 본 실험에 사용한 최대 5 L/hr 처리용량의 SMBR의 공정개략도이다.

분리막은 0.1 m²의 막면적을 갖는 중공사(hollow fiber)형의 정밀여과막 등급으로 흡입펌프의 진공압력에 의해 처리수가 투과되는 형태인데, 역세가 가능하도록 구성되어 있으며 각 공정의 시간은 timer로 조절이 가능하다. 또한 두 막의 성능을 동시에 비교할 수 있도록 두 세트가 반응기 내에 침지되어 있다. 한편 생물반응기는 전체 200 L의 용적을 갖는 투명 아크릴로 제작되어 있으며, 내부 칸막이에 의해 무산소조와 폭기조가 1 : 2의 비율로 나누어져 있다. 폭기조 내에는 산기관이 설치되어 있어 블로어에 의해 공기를 반응기 내에 불어넣어 주면서 산소 공급은 물론 막오염을 줄이는 역할을 한다.^{16,17)}

2.1.2. 역삼투 장치

역삼투 장치는 전처리 장치에서 미처리된 오염물

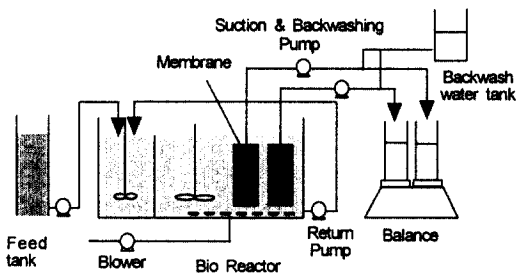


Fig. 1. Schematic diagram of submerged membrane bio-reactor.

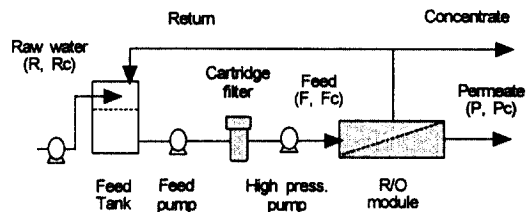
질의 거의 대부분을 제거하여 배출허용기준 이내로 처리한 후 배출하는 공정으로 전체 공정에서 가장 핵심적인 역할을 수행한다.¹⁸⁻²⁰⁾ 역삼투 장치는 카트리지필터, 고압펌프 그리고 역삼투 모듈로 구성되어 있는데, Fig. 2는 본 실험에 사용한 최대 50 L/hr 처리용량의 역삼투 장치 공정개략도이다.

역삼투 공정에 있어서 처리수의 수질은 사용한 막의 종류와 시스템 회수율에 전적으로 의존하게 되는데, 회수율은 공급수 대비 투과수량의 비율이며, 배제율은 공급수 중의 특정 성분 제거율을 나타내는 개념으로 다음 식으로 정의된다.

$$\text{회수율(Recovery ratio, \%)} = \frac{\text{Permeate flowrate(P)}}{\text{Feed flowrate(F)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{배제율(Rejection ratio, \%)} = \frac{\text{Feed conc.(Fc)} - \text{Permeate conc.(Pc)}}{\text{Feed conc.(Fc)}} \times 100 \quad (2)$$

이러한 회수율과 배제율은 모듈과 시스템에 각각 적용될 수 있는데 그 개념은 서로 다르다. Fig. 2에서의 경우 모듈 회수율은 P/F × 100이며, 시스템 회수율은 P/R × 100이다. 이는 배제율에도 같이 적용된다. 역삼투막은 크게 해수담수용(SW)과 염수용(BW)이 있는데 SW등급의 경우 배제율이 높아 처리수질은 우수하나 상대적으로 고압이 필요하며, 경제적인 측면에서는 BW막이 유리하다. 일반적으로 역삼투 모듈 1개는 약 10% 내외의 회수율을 갖는다. 따라서 회수율을 높이기 위해서는 여러 개의 모듈을 직렬 혹은 병렬로 구성된 다단 시스템을 사용하여야 한다.²¹⁾ 그러나 다단 시스템을 사용하면 장치의 용



R: The flowrate of raw water, Rc: The concentration of raw water, F: The flowrate of feed water, Fc: The concentration of feed water, P: The flowrate of permeate, Pc: The concentration of permeate

Fig. 2. Schematic diagram of the reverse osmosis system.

량이 커지기 때문에 실험하기에 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 실험에서는 1개의 모듈을 사용하여 농축수중 일부는 공급탱크로 다시 순환시켜 전체 시스템 회수율을 변화할 수 있도록 제작하였다. 역삼투막은 비교적 저압에서도 운전이 가능한 BW 등급으로, 2.5"(D)×40"(L) 규격의 나선형(spiral wound) 모듈을 사용하였다.

2.1.3. 증발기

역삼투장치는 그 공정 특성상 고농도의 농축수가 발생되는데 그대로 배출할 수가 없으며, 또한 염분을 고농도로 함유하고 있어 일반적인 방식으로는 처리하기가 어렵다. 이들 농축수는 증발기를 이용하여 처리할 수 있는데²²⁾ 장치비와 운전비가 고가인 관계로 적용에 어려움이 있다. 한편 매립지에는 매립물질의 분해에 의해 매립가스(land fill gas)가 발생하게 되는데, H-매립지 매립가스 분석결과 약 50% 정도의 메탄가스를 함유하고 있어 4,500 kcal/m³의 발열량을 갖는 것으로 조사되었다. 따라서 이 매립가스를 이용하면 증발기의 훌륭한 열원이 될 것으로 판단된다.²³⁾

Fig. 3은 본 실험에 사용한 증발기의 공정개략도인데, 매립지에서 발생하는 매립가스를 열원으로 하여 침출수를 직접 가열하는 직화식 증발기이다. 100,000 kcal/hr의 연소능력을 갖추고 있으며, 최대 50 L의 순수 물을 증발시킬 수 있는 장치이다. 증발수는 30,000 kcal/hr의 냉각 능력을 갖춘 열교환기를 거쳐 응축되어 처리되며, 증발잔류물은 스크래퍼를 이용하여 외부로 배출되도록 구성되어 있다.

2.2. 실험방법

본 실험은 H-매립지 침출원수를 실험실로 운반하여 수행하였다. SMBR은 24시간 연속 운전하였으며, 역삼투와 증발기는 처리용량에 맞게 간헐적으로 운전하였다. SS, BOD₅, COD_{Cr}, 색도 등은 공정시험법(수질편)에 의해 분석하였으며, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N 등은 IC(DINEX DX500)를, pH(ORION 230A), DO(YSI 95)는 portable 측정기를 이용하여 분석하였다.

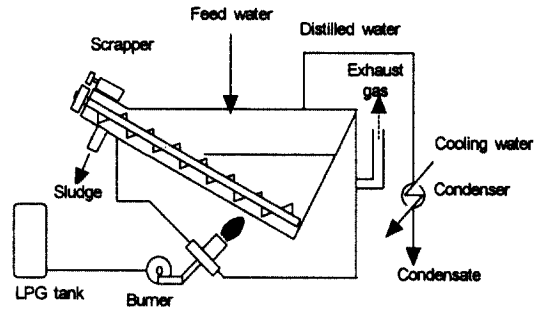


Fig. 3. Schematic diagram of evaporator.

2.2.1. 침지형분리막 생물반응기

본 장치의 목적은 크게 두 가지가 있는데, 첫째는 역삼투장치의 전처리 목적이다. 일반적으로 나선형 역삼투모듈의 유입수는 SDI(Silt Density Index) 값이 5이하의 조건을 만족하여야 한다. SDI 값은 30 psi 압력하에서 500 mL의 물이 0.45 μm의 필터를 통과하는데 소요되는 시간(T1)과 다시 15분 후 500 mL의 물이 통과하는데 소요되는 시간(T2)를 측정하여, $SDI_{15} = \{1 - (T1/T2)\} / 15 \times 100$ 로 계산되는 값이다. 따라서 선정된 두 막 중에서 SDI 값, 처리유량, 흡입압력을 조사하여 적정 막을 선정하였다.

두 번째는 유기물과 질소성분을 제거하는 목적이다. A/O 생물반응기의 운전조건을 도출하기 위해서는 수많은 변수들이 있으며 장기간의 실험이 필요하다. 바로 이러한 것이 생물반응기의 상용화를 어렵게 하는 점이기도 하다. 따라서 본 실험에서는 대부분의 운전조건 등은 문헌조사에서 선정된 조건을 유지하고 pilot plant를 설계하는데 우선적으로 중요한 수리학적 체류시간(HRT)만을 변수로 하였으며, 기타 중요 운전조건 등은 현장 pilot test시 도출할 계획이다. 본 실험에서 분리막은 A막을 사용하였으며, 흡입펌프의 흡입과 역세시간을 각각 10분과 1분으로 고정하였다. 무산소조와 폭기조의 용적비율은 1:2로 고정하였으며, 슬러지 반송유량은 원수공급 유량의 2~3배, 폭기조의 온도는 20~25℃, DO는 2~4 mg/L, SRT는 40~60일을 유지하였다. 그리고 질산화와 탈질 효율향상을 위한 별도의 성분을 주입하지 않았다. HRT는 무산소조와 폭기조의 용적을 합한 전체 생물반응기의 용적(200 L)을 기준으로 하였으며, 흡입유량을 조절하여 10일, 7일, 5

일로 변화시키면서 유기물 및 질소성분 제거율을 비교하였다.

2.2.2. 역삼투 장치

역삼투시스템의 효율을 향상시키기 위해서는 시스템 회수율을 최대한 높게 유지하는 것이 유리하다. 그러나 시스템 회수율을 높일 경우 공급수가 모듈 내에서 농축되면서 스케일 유발성분 등이 용해도를 벗어나 시스템 내에 스케일을 형성하여 막오염의 주요 요인으로 작용하며 투과수 수질도 나빠진다. 본 실험에서 가장 중요한 것은 H-매립지 침출수의 수질 조건에 맞는 최적 시스템 회수율을 선정하고, 이 조건에서의 유기물 및 질소성분 제거율을 도출하는 것이다. 그러나 최적의 시스템 회수율을 실험으로 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 상용화된 simulation program²⁴⁾을 이용하여 침출원수의 수질조건, 처리유량, 모듈 구성 및 단수 등을 고려해 적정 범위의 회수율을 선정하였다. 일반적으로 역삼투 모듈은 그 규격에 따라 일정한 범위의 공급수를 공급 해주어야 한다. 본 실험장치에 사용한 모듈(BW30-2540)의 최고 유입유량은 20 L/min이다. 따라서 모듈 유입유량은 최대 유입유량의 60%인 12 L/min로 공급하고, 투과수량이 1 L/min가 되도록 농축수 밸브를 조절하였다. 또한 농축수 11 L/min중 10.33 L/min는 원수조로 순환시키고, 0.67 L/min는 외부로 배출하여 전체 시스템 회수율이 60%가 되도록 유지한 상태에서 공급수와 처리수의 수질을 분석하였다.

2.2.3. 증발기

본 실험은 편이상 LPG를 열원으로 사용하고 역삼투시스템 농축수를 원수로 하여 batch 식으로 운전하였다. 본 장치의 최대 처리능력은 50 L이나 증발시 거품이 심하게 발생되어, 농축수 20 L를 증발기 내로 유입시킨 후 LPG 가스버너를 점화시켜 증발기 본체를 상압에서 직화식으로 가열하였다. 증발기 내의 증발수는 열교환기를 거쳐 응축되어 저장조에 수집되는데, 약 15 L 정도 처리된 후 증발잔류물을 제거하기 위해 스크래퍼를 가동시켰다. 수집된 응축수가 19.6 L가 되면 운전을 중지하고 농축액은 장치

외부로 배출시켜 전체 회수율이 98%가 되도록 하여 운전하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 침지형분리막 생물반응기

3.1.1. 분리막 선정

두 종류의 막을 실험하였는데, 실험결과 플럭스 및 흡입압력 그리고 처리수의 SDI는 Table 1과 같았다. 실험결과 두 종류의 막 모두 SDI₁₅ 값 5 이하를 만족하지 못했다. 두 막의 세공이 모두 0.45 μm 보다 작기 때문에 이론대로라면 5 이하 값으로 나올 것으로 예상하였으나, 수 차례 측정결과 두 막 모두 5를 초과하였다. 그 원인은 크게 두 가지 중의 하나로 예상되는데, 첫째는 일반적으로 정밀여과막의 세공은 nominal size가 아니기 때문에 0.45 μm 이상의 미세입자가 정밀여과막을 다량 투과했을 가능성이 있다. 두 번째는 SMBR 처리유량이 SDI₁₅를 측정하기에 상대적으로 적어 처리수를 2~3일 모아 실험한 관계로 그동안 미생물이 번식했을 가능성이 있다. 그러나 이 문제는 pilot test에서는 쉽게 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 SDI₁₀ 값을 측정하였는데 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 플럭스와 흡입압력 면에서 A막이 B막에 비해 훨씬 우수하였기 때문에 A막을 선정하였다.

3.1.2. SMBR의 운전조건

약 120일 동안의 운전기간 중 분리막의 흡입압력

Table 1. Test results of submerged membranes

Items	A	B
Material	Polysulfone	Polyacrylonitrile
Pore size(μm)	0.1	0.01
I.D/O.D(mm) of fiber	0.7/1.0	0.35/0.48
Suction pressure(mmHg)	50	200
Flux(L/m ² · hr)	8.4	3.0
SDI ₁₀	4.5	4.3

은 50~100 mmHg 범위로 큰 변화를 보이지 않았다. 즉 폭기와 역세에 의해 막오염은 충분히 제어 가능한 것으로 판단되었다. 운전기간 중 초기 30일을 제외하고, 무산소조와 폭기조 내의 평균 운전조건은 Table 2와 같다.

폭기조와 무산소조의 MLVSS/MLSS는 각각 37.4%, 39.0%로 낮게 나타났는데 이는 미생물의 성장률이 낮고, 유입수중 무기성 입자성분이 많은 것이 주요 원인으로 판단된다. 폭기조 내의 pH는 7.7로서 원수의 8.2보다 크게 떨어지지 않았는데 폭기조 내의 질산화율이 낮았기 때문이다. 또한 무산소조의 DO농도는 실험기간 중 평균 0.7 mg/L 정도로 높게 유지되었는데 이는 슬러지 반송과 장치상의 결합이 원인으로 판단된다.

3.1.3. 오염물질 제거율

H-매립지는 1994년부터 매립이 시작되었는데, 공단 인근에 위치한 관계로 slag 등과 같은 산업폐기물의 매립비율이 상대적으로 높아 침출수 중의 생분해성 유기물 농도는 낮고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 높은 특성을 보이고 있다. 따라서 기존의 침출수 처리공정도 생물처리를 이용하지 않고 물리·화학적 처리공정을 채택하고 있으며, 생물학적 처리공정만으로 처리하는 데는 한계가 있을 것으로 판단된다. Table 3에서 보는 바와 같이 SMBR에 있어서 SS는 99.0%의 높은 제거율을 보였으나, CODcr은 12.9%, T-N은 18.7%로 극히 낮은 제거효율을 보였다.

특히 CODcr의 경우 제거율이 낮게 나타나는 것은 크게 두 가지의 원인이 있다. 첫째는 생분해성 유기물 비율이 낮은 것이 원인이며, 두 번째는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 아질산화에 의한 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 가 반응기내에 축적되기 때문이다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 1/2 O_2 를 소모하여 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

Table 2. Test results of operating condition in SMBR

Operating condition	Anoxic zone	Aeration zone
Temperature(°C)	21.7	21.9
MLSS(mg/L)	5,148	5,836
MLVSS(mg/L)	1,923	2,276
DO(mg/L)	0.7	2.9
pH	8.1	7.7

Table 3. Removal efficiencies of the pollutant in SMBR

Items	Raw water	Treated water	Efficiency (%)
SS(mg/L)	300	3	99.0
BOD ₅ (mg/L)	350	200	43.0
CODcr(mg/L)	4,017	3,500	12.9
TOC(mg/L)	615	548	10.9
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	2,080	1,067	48.5
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ (mg/L)	1.3	624	
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	1.6	3.1	
T-N(mg/L)	2,083	1,694	18.7
m-Alk(mg/L)	8,000	4,000	50.0
pH	8.2	7.7	
Color	6,800	4,400	35.3

로 되는데, 이론적으로 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 1 mg/L는 1.143 mg/L의 CODcr에 해당한다. 즉 Table 3의 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 624 mg/L는 713 mg/L의 CODcr을 유발한다. 따라서 처리수의 CODcr 3,500 mg/L 중에서 713 mg/L은 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 의 산화에 의한 것으로 볼 수 있다. 이를 고려할 경우 CODcr은 최대 30.6%의 제거효율을 보인다.

3.1.4. HRT 변화에 따른 CODcr, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, T-N의 제거율

Fig. 4는 운전기간 중 HRT 변화에 따른 유입수와 처리수의 CODcr의 변화를 나타낸 그래프인데, HRT가 10일 때 10.2%, 7일 때 15.2%, 5일 때 9.5%의 제거율을 보였다. 전체적으로 HRT 변화에 따른 유기물 제거효율은 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 5는 운전시간에 따른 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거율 변화를 나타낸 그래프인데, HRT가 10일 때 53.1%, 7일 때 52.3%, 5일 때 40.1%의 제거율을 보였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거(엄밀한 의미의 $\text{NH}_4^+\text{-N} \rightarrow \text{NO}_2^-\text{-N}$)는 비교적 잘 일어나는 것으로 보였으나 완전한 질산화($\text{NO}_2^-\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 전환)는 잘 일어나지 않는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 부하는 0.14 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /kgMLVSS·day으로 상당히 높아 폭기조내에 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 의 축적이 일어나는 것으로 판단된다. 침출수의 질산화에 대해 많은 연구자들은^{4,6,25)} $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 부하가 0.03 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /kgMLVSS·day까지는 질산화가 잘 일어나지만 그 이상에서는

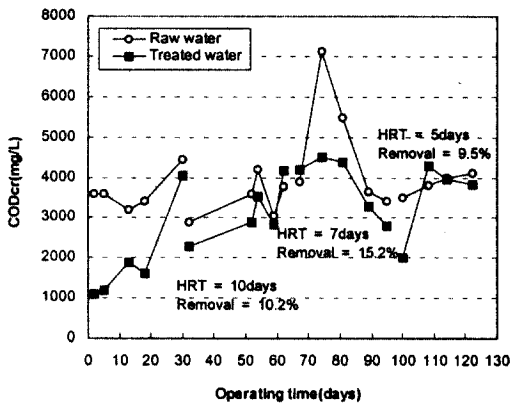


Fig. 4. Variation of CODcr in SMBR.

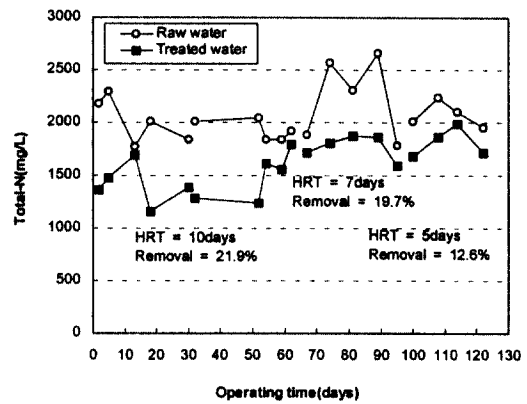


Fig. 6. Variation of T-N in SMBR.

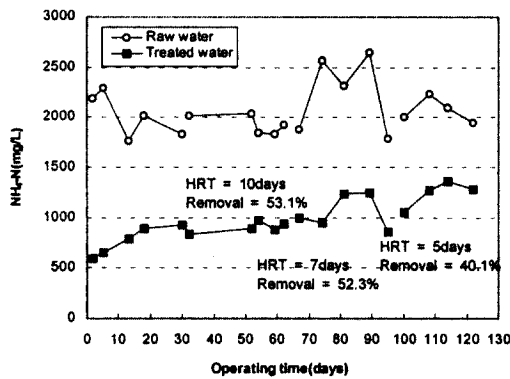


Fig. 5. Variation of NH₄⁺-N in SMBR.

NO₂⁻-N이 축적되고 0.1 kgNH₄⁺-N/kgMLVSS·day 이상에서는 NH₄⁺-N 제거율이 크게 떨어진다고 보고하였다. 따라서 본 침출수의 경우 원수중의 NH₄⁺-N 농도가 높아 질산화 미생물 활동에 저해요인으로 작용한 것이 주요 원인으로 판단된다.

Fig. 6은 운전시간에 따른 유입수와 처리수의 T-N의 변화를 나타낸 그래프인데, HRT가 10일 때 21.9%, 7일 때 19.7%, 5일 때 12.6%의 제거율을 보여 T-N 제거율이 극히 낮음을 알 수 있었다. 이는 탈질 미생물의 세포합성을 위한 탄소원이 부족하며, 탈질조의 무산소 조건이 완전하지 못한 것이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 따라서 pilot test에서는 탄소원 투입과 설비개선을 통해 탈질 효율향상 방안을 검토할 계획이다.

3.1.5. 생물반응기의 체류시간

일반적으로 침출수는 NH₄⁺-N 및 난분해성 유기

물의 함량이 많기 때문에 장기간의 체류시간이 필요하다. 본 실험에서 HRT를 각각 10일, 7일, 5일로 변화시키면서 실험한 결과 전체적으로 처리효율은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러나 HRT 5일에서는 CODcr, NH₄⁺-N, T-N의 제거율은 조금 떨어지는 것으로 조사되었다. 따라서 H-매립지 침출수의 경우 SMBR의 체류시간은 7일 정도 이상이면 될 것으로 판단된다.

3.2. 역삼투시스템

3.2.1. 시스템 회수율

역삼투시스템의 처리유량 측면에서 회수율이 높을수록 유리하다. 그러나 침출수와 같이 Ca⁺², Mg⁺², HCO₃⁻, SO₄⁻² 등의 농도가 높을 경우 시스템 내에 무기스케일 발생이 심화되어 회수율을 높이는 데는 한계가 있다. 그러나 적정 회수율을 실험으로 구하는 것은 결코 쉽지가 않다. 이러한 스케일의 발생 정도는 LSI(Langelier Saturation Index)²⁴⁾ 값으로 판단할 수 있는데 그 값이 0보다 큰 경우에는 스케일이 발생할 수 있다. Computer simulation 결과 본 침출수와 같은 유입수질 조건에서 회수율이 50%, 60%, 70%일 때 LSI 값은 각각 -0.1, 0.9, 2.3이었다. 즉 본 수질조건에서의 적정 시스템 회수율은 약 60% 이하로 운전하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

3.2.2. 유기물 및 총질소 제거율

Table 4는 시스템 회수율을 60%로 유지한 상태

Table 4. Removal efficiencies of the pollutant in R/O system

Items	Raw water	Permeate	Efficiency (%)
BOD ₅ (mg/L)	200.0	5.0	97.5
COD _{Cr} (mg/L)	3,197	78.3	97.6
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	1,059	214.6	79.7
NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	752.0	51.2	93.2
NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	5.1	0.2	96.1
T-N(mg/L)	1,816	266.0	85.4
pH	7.4	8.3	
Color	4,413	10.3	99.8
Ca ²⁺ (mg/L)	52.3	0.1	99.8
Cl ⁻ (mg/L)	3,544	70.1	98.0
m-Alk(mg/L)	4,000	47.1	98.8
Conductivity(μ s/cm)	17,767	509.7	97.1

에서 역삼투장치의 오염물 제거율을 나타낸 것으로 실험기간 중 3회 측정의 평균값이다. COD_{Cr}은 97.6%, 색도는 99.8%로 비교적 높은 제거율을 보였다. 특히 NO₂⁻-N과 NO₃⁻-N은 90% 이상의 제거율을 보인 반면, NH₄⁺-N은 약 79.7%로 비교적 낮은 제거율을 보였다. 이는 NH₄⁺-N의 분자량이 상대적으로 작고 용해도가 높기 때문이다. 즉 본 실험결과 SMBR에서 NH₄⁺-N가 NO₂⁻-N이나 NO₃⁻-N으로 전환되면 역삼투시스템에서의 T-N 제거율을 훨씬 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

3.3. 증발기

3.3.1. 증발기 구조

본 증발장치를 이용한 실험결과 많은 구조상의 문제점을 발견할 수 있었는데, 고농도의 유입수가 증발기 내부에서 batch식으로 처리됨에 따라 일정시간 점화 후 응축수와 함께 유독가스가 배출되었는데 벽면의 농축수가 타면서 발생하는 것으로 판단되었다. 또한 증발잔류물이 내부 스크래퍼 유도판 부분에 모이지 않고 증발기 본체에 부착되어 스크래퍼에 의해 증발잔류물을 외부로 제거하는 것은 어려운 것으로 판단되었다. 따라서 pilot plant는 내부 침출수를 순환방식으로 바꾸어 벽면에 부착되는 스케일 발생을 최소화하고, 또한 스크래퍼 대신에 분리조를

이용해 스케일 성분을 제거하는 구조로 공정개선이 필요하다고 판단되었다.

3.3.2. 유기물 및 총질소 제거율

Table 5는 증발기의 오염물질 제거율을 나타낸 표인데 COD_{Cr}은 90.5%, T-N은 63.3%의 제거율을 보였다. 특히 NH₄⁺-N의 제거율은 50.6%로 매우 낮았는데 이는 암모니아가 증발수와 함께 증발되어 열교환기에서 응축수에 다시 용해되었기 때문으로 판단된다. 응축수의 COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N, 색도의 농도는 매우 높았으며, 침출수 중 휘발성 물질들이 상당량 존재하고 있다고 판단된다.

따라서 응축수는 그대로 배출할 수 없으며 전처리 수조로 유입시켜 역삼투시스템에서 다시 처리해야 할 것으로 판단된다.

3.4. Pilot Plant 공정 구성도

상기의 실험결과에 의해 SMBR에 의해 역삼투시스템 전처리는 물론 유기물과 질소성분 일부를 제거할 수 있었으며, 대부분의 오염물질은 역삼투시스템에서 제거할 수 있음을 알 수 있었다. 역삼투시스템에서 발생하는 농축수는 증발기로 처리하는데 응축수의 농도가 높아 그대로 배출하기는 어려우며 역삼투시스템으로 유입시켜 전처리수와 함께 처리하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 기초실험 결과 pilot plant의 최적 공정구성은 Fig. 7과 같다.

Table 5. Removal efficiencies of the pollutant in evaporator

Items	Feed water	Condensate	Efficiency (%)
COD _{Cr} (mg/L)	9,166	872.7	90.5
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	2,919	1,441	50.6
NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	2,172	428	80.3
NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	15.2	2.8	81.8
T-N(mg/L)	5,106	1,872	63.3
pH	7.5	9.1	
Color	8,900	246	97.2
Conductivity(μ s/cm)	38,747	2,426	93.7

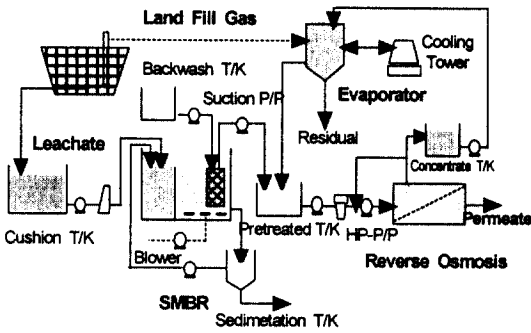


Fig. 7. The process of pilot plant for landfill leachate treatment.

4. 결 론

매립지 침출수 처리의 최적 공정구성과 pilot plant 제작을 위한 기초실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SMBR에서의 분리막은 유량, 압력, SDI 분석 결과 A막이 적합하였으며, 체류시간은 전체 반응기 부피 기준 7일 이상이 필요하였다. SS, BOD₅, COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N은 각각 99.0%, 43.0%, 12.9%, 48.5%, 18.7%의 제거효율을 보였다.
- 2) 역삼투시스템 회수율은 simulation 결과 60% 이하로 유지하여야 하는 것으로 나타났다. BOD₅, COD_{Cr}, 색도 제거율은 각각 97.5%, 97.6%, 99.8%로 우수하였으나, NH₄⁺-N와 T-N의 제거율은 각각 79.7%, 85.4%로 비교적 낮았다. 처리수 수질은 NH₄⁺-N, T-N을 제외하고는 배출허용기준(청정지역 기준)을 만족하였다. NH₄⁺-N, T-N의 경우 SMBR과 역삼투시스템을 고려한 전체 제거율은 각각 92.4%, 87.3%로 배출허용기준(처리효율 기준)을 만족하였다.
- 3) 증발기는 COD_{Cr}, NH₄⁺-N, T-N을 각각 90.5%, 50.6%, 63.3% 제거할 수 있었으나 응축수는 오염물 농도가 높아 그대로 배출할 수 없는 것으로 나타났다. 또한 본 실험장치와 같은 스크레퍼 방식으로는 스케일 제거가 어려우며, 공정개선이 필요하였다.
- 4) 침출수는 SMBR을 이용해 전처리한 후 역삼투시스템에서 처리하여 투과수는 배출한다. 역

삼투 농축수는 증발기에서 처리하는데 응축수는 전처리수조로 유입시켜 역삼투시스템에서 SMBR 처리수와 함께 다시 처리하는 공정으로 구성하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 환경부, 환경백서(1998).
2. 환경부, 수질환경보전법 시행규칙(1977).
3. 국립환경연구원, 쓰레기매립지 침출수 처리대책 연구(1997).
4. 배재호, 김상근, 장현식, 이동욱, "매립지 침출수의 암모니아성 질소 및 유기물 제거," 대한환경공학회지, **20**(12), 1657~1677(1998).
5. 이관용, 박수영, 조광명, "혐기성 여상과 호기성 유동상의 2단 처리에 의한 침출수 중의 질소제거," 대한환경공학회지, **21**(1), 77~85(1999).
6. 백선재, 가길현, 김종구, 이종운, "수도권 매립지 발생 침출수중 고농도 질소성분의 생물학적 제거방안에 관한 연구," 대한환경공학회지, **21**(5), 929~939(1999).
7. 환경관리공단, 수도권매립지 침출수 처리장 운영현황 및 적정 처리방안 연구(1997).
8. 권철용, 조순행, 최영수, 구태완, 이의신, 유희찬, "수도권 매립지 침출수의 물리·화학적 처리," 대한환경공학회지, **21**(6), 1129~1139(1999).
9. Pirazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B. N., and Kim, S. H., "Hybride membrane filtration process for leachate treatment," *Water Res.*, **30**(11), 2691~2706(1996).
10. Peters, T. and Stanford, P., "Reverse osmosis and DT-module for purification of landfill leachate," in *Proceedings of the 1993 eleventh annual membrane technology*, Newton, Massachusetts, October 11~13, pp. 1~8(1993).
11. EPA, Manual ground-water and leachate treatment systems(1995).
12. Khedr, M. G., "A case study of RO plant failure due to membrane fouling, analysis and diagnosis," *Desalination*, **120**, 107~

- 113(1998).
13. Kishino, H., Ishida, H., Iwabu, H., and Nakano, I., "Domestic wastewater reuse using submerged membrane bioreactor," *Desalination*, **106**, 115~119(1995).
 14. Engelhardt, N., Firk, W., and Warnken, W., "Integration of membrane filtration into the activated sludge process in municipal wastewater treatment," *Wat. Sci. Tech.*, **38**(4-5), 429~436(1998).
 15. Davies, W. J., Le, M. S., and Heath, C. R., "Intensified activated sludge process with submerged membrane microfiltration," *Wat. Sci. Tech.*, **38**(4-5), 421~428(1998).
 16. Ueda, T., Hata, K., Kikuoka, Y., and Seino, O., "Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor," *Water Res.*, **31**(3), 489~494(1997).
 17. Bouhabila, E. H., Aim, R. B., and Buisson H., "Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling," *Desalination*, **118**, 315~322(1995).
 18. Masson, M. and Deans, G., "Membrane filtration and reverse osmosis purification of sewage: Eraring Power Station," *Desalination*, **106**, 11~15(1996).
 19. Vigneswaran, S., Boonthanon, S., and Prasanthi, H., "Filter backwash water recycle using crossflow microfiltration," *Desalination*, **106**, 31~38(1996).
 20. Gutman, R. G., *Membrane Filtration : The technology of pressure driven cross flow processes*, Adam Higler, Bristol(1987).
 21. 강신경, 박영규, "냉연공장 폐수재이용을 위한 3단 역삼투시스템에서 각 단별 투과특성 연구," *멤브레인*, **9**(4), 209~214(1999).
 22. Miura, M. and Harada, K., "Application of concentrator on the treatment of industrial waste water," *Desalination*, **98**, 375~381 (1994).
 23. 환경부, 폐기물매립기술: 매립가스처리 및 이용 기술 개발, pp. 256~286(1996).
 24. Dow chem., Filmtec membranes, Dec. (1993).
 25. 최인철, 박수영, 이관용, 배재호, 조광명, "암모니아 부하가 활성탄 유동상에서 질산화 및 아질산 축적에 미치는 영향," *대한환경공학회지*, **22**(1), 53~60(2000).