

생물탈취상에 의한 도시폐기물 매립지가스내 악취물질의 처리

남궁완 · 박준석 · 황의영 · 이노섭 · 인병훈 · 김정대

건국대학교 공과대학 환경공학과

Biofiltration of Odorous Compounds in Municipal Solid Waste Landfill Gases

**Wan Namkoong, Joon-Seok Park, Eui-Young Hwang, Noh-Sup Lee,
Byung-Hoon In, Joung-Dae Kim**

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

Biofiltration is an attractive technique for elimination of VOCs and odorous compounds from low-concentration, high-volume waste gas streams because of its simplicity and cost-effectiveness. The objective of this study was to estimate the removal characteristics of odorous compounds including H₂S, NH₃ and BTEX in MSW landfill gases. This study was conducted at Nanjido landfill site. A compost from the Nanjido composting facility was used as a filling material for biofiltration. Extracted landfill gases were injected into biofilter reactors after mixing with air. Experiments were performed in an incubator being set to 20°C. H₂S concentrations were monitored at the depths of 25, 50, 75 and 100cm from the bottom of the biofilter reactors. 98% of H₂S was removed at the filling depth of only 25cm. NH₃ removal rate was about 85%. Toluene removal rate was the highest among BTEX. Significant pH drop of a filling material was not observed during the biofilter operation of 1 month. Without mixing the landfill gas stream with air, the removal rate of H₂S decreased down to 30%.

Key words : Biofiltration, Landfill gases, Odorous compounds, Volatile organic compounds

요 약 문

퇴비를 충전물질로 사용한 생물탈취상으로 난지도매립지에서 발생하는 매립지가스 처리시 악취유발 물질 및 휘발성 유기화합물의 제거특성과 생물탈취상의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구는 난지도매립지 상부에서 실시하였으며 충전물질로는 난지도퇴비화시범시설에서 생산된 퇴비를 사용하였다. 약 15ppmv로 유입된 황화수소는 25cm 충전깊이에서도 98%이상 제거되었으며 산소공급중단 후 혐기성가스만 유입시에는 처리효율이 30%로 저하하였다. 평균유입농도 40ppmv에서의 암모니아 제거효율은 85%정도이었다. BTEX중 톨루엔과 에틸벤젠의 제거효율은 80%로 벤젠과 자일렌보다 높았다. 수분손실은 가스유입구에서 가장 높게 나타났으며 약 30일 운전기간 동안 pH저하에 의한 산성화는 발생하지 않았다.

주제어 : 생물탈취상, 매립지가스, 악취유발물질, 휘발성 유기화합물

1. 서 론

도시폐기물 매립지가스는 메탄과 이산화탄소가 대부분을 차지하고 있으나 이 중 악취를 유발하는 것은 소량으로 존재하는 암모니아, 황화합물, 메르캡탄류 그리고 휘발성 유기화합물 등이다. 도시폐기물 매립지의 경우 일반적으로 황화합물과 메르캡탄류는 0~1%, 암모니아는 0.1~1%를 차지한다¹⁾. 휘발성 유기화합물 중 BTEX의 농도는 5~150ppm(부피비)이며 이 중 톨루엔이 가장 높게 검출되고 있다²⁾. 도시폐기물의 매립지가스는 주로 매립지 내부의 혐기성 상태에서 기인한 것으로서 악취 등을 포함하여 매립지 주변지역에 여러 가지 환경오염문제를 유발시킨다. 최근에는 매립폐기물이 안정화된 이후 부지를 굴착하여 재이용하려는 사업도 시행되고 있는데 이 과정에서 다량의 매립지가스가 발생할 수 있으므로 사업시행시에는 이에 대한 대책을 수립하여야 한다. 가스중의 악취물질을 처리하기 위한 방법으로는 연소법, 약물세정법,

활성탄흡착법 등을 고려하여 볼 수 있으나³⁾ 이러한 방법들은 대부분 비용이 많이 소요되며 특히 매립지가스 처리에 이용한다는 것은 한계가 있다. 최근에는 악취물질을 함유하고 있는 가스를 비용효과적으로 처리하기 위하여 생물학적인 처리방법을 시도하고 있으며 매립지가스를 처리 또는 재이용하기 위하여 적용된 연구보고도 발표되고 있다^{4,5)}. 생물학적인 처리 방법으로는 biowasher, biomembrane 그리고 biofiltration이 있으며, 이 중 생물탈취상(biofiltration)은 매립지가스내의 오염물질을 미생물, 산소, 수분 및 영양물질 등이 충족되어 있는 생물상을 통과시켜 이산화탄소화 물로 전환하는 공정이다⁶⁾. 생물탈취상은 황화수소 및 암모니아를 비롯한 일부 악취물질처리에 적용되어 왔으나 1990년 미국의 청정대기법(Clean Air Act)의 규제와 함께 여러 가지 오염가스에 적용하려는 연구가 본격화되었다. 생물탈취상에 의한 매립지가스의 처리는 메탄함량 및 처리목적에 따라 크게 2가지를 생각해 볼 수 있다. 매립지가스 중의 메탄

이 고농도로 존재할 경우에는 생물탈취법에 의하여 메탄제거가 어려우므로 오염물질을 적정처리한 후 에너지로 이용하는 것이 바람직하다. 매립지가스내에 황화합물과 염소화합물이 다량 존재할 경우 산가스를 형성하여 매립지가스 이용에 지장을 초래하므로 이 경우 생물탈취법의 주목적은 이들 산형성 물질들을 제거하는 데에 있다. 메탄함량이 낮은 경우에는 에너지로의 이용이 어려우므로 환경에 유해한 가스를 처리한 후 대기중으로 배출하는 것이 주목적이 된다.

본 연구에서는 매립지 굴착사업을 염두에 두고 난지도매립지에서 발생하는 매립지가스를 퇴비를 충전물질로 사용한 생물탈취상으로 처리시 악취유발물질 및 휘발성 유기화합물의 제거특성과 생물탈취상의 적용가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

연구에 사용된 생물탈취상 반응기는 원통형 아크릴로 제작하였다. 가능한 단회로현상을 줄이고 결과해석을 용이하게 하기 위해서 반응기의 내경을 작게 하였다. 전체적인 실험장치의 구성을 살펴보면 Fig. 1과 같다. 반응기의 내경은 5cm, 높이는 100cm로 제작하였고, 가스유입구로부터 25cm, 50cm, 75cm 그리고 100cm 높이에 시료채취구(sampling port)를 장착하였다. 유입구에는 유량계를 설치하였으며 가능한 가스를 균등하게 주입하기 위하여 지름 5mm의 비등석을 충전물질 하부에 10cm 높이로 충전하였다. 생물탈취상의 충전물질 높이가 1m이므로 1단으로 할 경우에는 자체중량에 의한 압밀현상이 일어날 수가 있다. 이와 같은 압밀현상을 방지하고 필요시 수분공급을 용이하게 하기 위하여 반응기를 분리가 가능하도록 4단으로 제작하였다. 반응기 하부에는 응축수를 배출하

기 위한 배수파이프(drainage pipe)를 설치하였다. 본 연구는 난지도 쓰레기매립지 현장에서 실시하였으며 낮과 밤의 기온차에 의한 영향을 최소화하고자 온도를 20℃로 설정한 항온기내에서 실시하였다.

2.2 실험재료 및 성상

생물탈취상 충전물질로는 미생물함량이 비교적 높은 퇴비를 사용하였다. 퇴비의 단위질량당 미생물수는 10^{10} bacteria/g으로 토양의 10^9 bacteria/g이나 활성탄의 0 bacteria/g보다 높다⁷⁾. 본 실험에 사용된 퇴비로는 난지도 퇴비화시설에서 음식쓰레기를 대상물질로 하여 생산된 것을 4.75mm 트롬멜스크린을 통과시킨 후 사용하였다. 압밀현상을 줄이고 유효공극을 증가시키기 위하여 퇴비에 파쇄한 나무가지를 혼합하는 실험도 실시하였다. 실험에 사용된 퇴비의 물리화학적 특성을 간략히 Table 1에 나타내었다. 중금속함량은 지정폐기물 판정 기준치 미만이었으며 용적밀도는 229 g/m³.

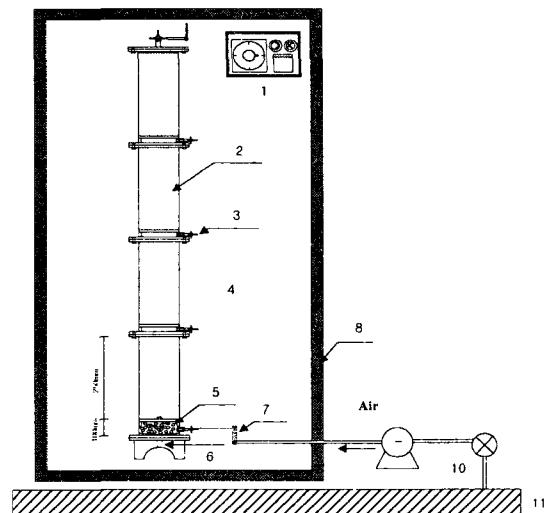


Fig. 1. Experimental apparatus used in this study.

pH는 8.8이었다. 나무가지는 야산에서 마른 것을 채취한 후 1cm정도의 크기로 파쇄하여 사용하였다.

2.3 실험조건 및 운전방법

퇴비의 초기수분함량은 수분보유능력(field capacity)의 60~80%로 조절하였다. 수분보유능력은 퇴비가 수분을 보유할 수 있는 양을 의미하며, 수분을 포화시킨 후 중력에 의하여 제거되는 것을 제외한 수분함량을 측정하는 것이다. 수분함량이 수분보유능력의 60~80%일 경우 미생물활성을 최대화할 수 있다⁸⁾. 퇴비의 수분보유능력은 약 70%이므로 수분함량을 수분보유능력의 60~80%로 조절한다면 42~56%(w/w)가 된다. 생물탈취법으로 악취물질 처리시 가스체류시간은 매우 중요하다. 가스체류시간이 증가할 수록 생물막(biofilm)과의 접촉시간이 증가하므로 처리효율은 증가하지만 이는 충전물질 부피를 증가시키게 되어

압력손실 및 운전비용을 증가시키게 된다. 생물탈취법 처리시 적정 가스체류시간은 처리대상물질의 종류와 농도에 따라서 달라진다. Wright 등(1997)은 휘발류 오염토양증기추출(SVE, soil vapor extraction)시 발생하는 배가스의 경우에는 최소한 2분이상이 필요하다고 권장하였으며⁹⁾, Leson 등(1997)은 휘발류 중의 BTEX는 1분 정도의 체류시간에서도 95%이상 제거되었으나 탄소수 5이상의 지방족 탄화수소류는 6분 정도의 체류시간에서도 50~90%의 처리효율을 나타내었다고 보고하였다¹⁰⁾. 대표적인 악취유발물질로 알려진 황화수소 및 암모니아 등에는 일반적으로 약 0.5~1분정도면 높은 처리효율을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다^{11,12,13)}.

본 연구에서의 가스유입유량은 1L/min이었으며 이를 충전물질을 고려하지 않은 가스유입속도로 환산하면 0.5m/min이 된다. 이 때의 가스체류시간은 약 1분이며 다음과 같이 계산할 수 있다. 원통형 생물상반응기의 내경과 높이는 각각 5cm와

Table 1. Physical and chemical characteristics of compost (wet weight basis)

Bulk density (kg/m ³)		229.0
Moisture Content (%)		20.5
Field Capacity (%)		69.5
Electrical Conductivity (mmhos/cm)		4.7
Cation Exchange Capacity (meq/100g)		49.6
pH		8.8
VS (%)		69.5
TOC (%)		41.9
TKN (%)		1.6
Heavy metals* (mg/kg)	Pb	139.7
	Zn	168.5
	Cu	70.3
	Ni	Not Detected
	Cr	38.0
	Cd	13.3

* dry weight basis

100cm이다. 매립지가스 유입속도가 0.5m/min(50cm/min)이므로 유입유량은 $50\text{cm/min} \times 2.5^2\text{cm}^2 \times \pi = 982\text{cm}^3/\text{min} \approx 1\text{L}/\text{min}$ 가 된다. 빈 반응기를 통과하는 매립지가스 유입속도가 0.5m/min이므로 탈취상 내에서의 실제 가스유입속도는 탈취상의 공극율을 50%로 가정할 경우 1m/min이 되므로 25cm 높이에서의 체류시간은 약 0.25분이 되고 100cm에서는 약 1분이 된다. 이는 일반적으로 제시되는 생물탈취상의 체류시간과 동일한 시간이다.

본 실험을 실시한 곳은 난지도매립지 상부로서 매립대상 폐기물에 대한 정확한 이력은 알 수 없었으나 발생가스의 조성으로 미루어 보아 대부분 분해용이한 생활폐기물들이 매립되었던 것으로 판단되었다. 실험에 들어가기 전에 실험대상 매립부지에서 발생하는 가스의 메탄과 황화수소의 농도를 2주일 동안 조사하였다. Fig. 2는 매립지에서 발생하는 메탄과 황화수소의 농도이다. 메탄은 평균적으로 60% 이상이 발생되어 분해가 활발히 일어나고 있는 매립지임을 알 수 있었다. 이 단계는 대개 매립종료 후 1~2년이 경과한 후부터 나타나며 메탄가스의 비율이 50~70%에 이른다¹⁴⁾. 생물탈취상은 호기성 미생물에 의한 분해작용을 이용하는 것이므로 매립지가스를 그대로 유입시킬 경우 처리효율에 악영향을 미칠 수 있다. 매립지가스는 진공흡인펌프(GAST Vacuum Pumps, DOAPI04AA)를 이용하여 매립지상부에 설치된 가스모니터링정으로부터 추출하였다. 매립지가스에는 산소가 0%이므로 본 실험에서는 생물탈취상에 매립지가스를 유입하기 전에 공기와 혼합하여 산소농도가 5%가 되도록 조절하였다. 이는 토양중의 미생물이 호기성 대사활동을 하는 데에 충분한 농도로 알려져 있다¹⁵⁾. 생물탈취법이 호기성 미생물에 의한 분해인지를 확인하기 위하여 황화수소 처리효율이 정상상태에 도달한 반응기를 대상으로 유입가스의 산소농도를 0%로 조절하여 유입시켰다.

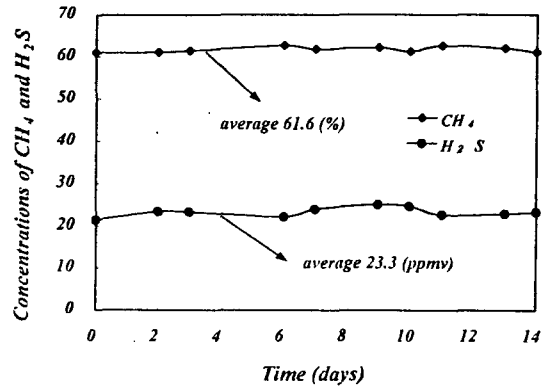


Fig. 2. CH₄ and H₂S concentrations of landfill gas of Nanjido landfill site

2.4 분석방법

황화수소 등 악취물질의 분석방법은 관능법, 검지관을 이용한 방법 그리고 가스크로마토그래피를 이용한 방법 등으로 대별할 수 있다. 가스크로마토그래피를 이용할 경우에는 비교적 정확한 자료를 얻을 수 있으나 저온농축장치가 필요하며 시료채취시 많은 가스포집백이 필요하다. 포집된 가스는 가능한 빠른 시간내에 분석하여야 한다. 현장과 분석실의 거리가 먼 경우에는 운반과정에서 시료의 변질에 의한 오차가 발생할 우려가 있으며 실험초기의 빠른 농도변화를 관찰하는 것도 어렵다. 본 연구에서는 황화수소의 초기 농도변화를 빠르게 측정할 수 있도록 GA 94(Geotechnical Instrument Ltd., UK)를 이용하여 매립지현장에서 직접 측정하였다. 본 기기는 매립지가스의 주성분인 메탄, 이산화탄소 그리고 산소농도를 모니터링할 수 있도록 매립지가스분석용으로 개발된 것으로서 흡인가스의 부피 100%중에서 목적가스가 차지하는 부피를 농도로 표시하여 준다. 황화수소센서를 장착할 경우 0~50ppm(v/v)의 범위내에서 황화수소농도

의 측정이 가능하며 분자량, 온도 그리고 압력보정 시 mg/m^3 으로 환산가능하다. 황화수소는 2~3일 간격으로 측정하였으며, 초기의 빠른 변화를 살펴 보기 위하여 0일차에는 수 분 또는 1~2시간 간격으로 측정하였다. 암모니아는 대기오염공정시험법의 인도페놀법에 따라 분석하였다. BTEX는 handy sampler에 길이 7cm, 외경 6mm, 내경 4mm의 활성탄칼럼(SKC, Cat. No.226-01)을 연결하여 1.5L/min의 유량으로 30분간 흡착시킨 후 CS_2 용매로 탈착하였다. 이 탈착액을 가스크로마토그래피(Hewlett Packard 5890 Series II)로 분석하였으며 분석조건을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 검출기는 FID이었으며 capillary column은 HP-1을 사용하였다. 시료주입부의 온도는 200℃, 검출부의 온도는 250℃이었다. 불꽃점화를 위한 가스유량은 수소와 공기가 각각 33mL/min와 320mL/min이었으며, 운반가스로는 질소를 사용하였다. 분석시 오븐온도는 45℃에서 80℃까지 2℃/min의 속도로 승온하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 황화수소 및 암모니아의 제거

퇴비를 충전물질로 사용한 경우 매립지가스 중의 황화수소 제거특성은 Fig. 3에 나타내었다. 유입가스 중의 황화수소 농도는 평균 14.5ppmv이었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 공기로 희석하기 전 추출된 매립지가스 중의 황화수소 평균농도는 23.3ppmv이었다. 깊이별로 모두 초기에 제거효율이 30%까지 감소하였다가 증가하는 현상들을 보였는데 이는 퇴비의 흡착능력이 과과점에 이르렀다가 미생물활성으로 제거효율이 증가하였음을 의미하는 것이다. 25cm(체류시간 = 0.25분)의 충전깊이로도 1일 후부터는 98%의 높은 제거효율을 나타내었다. 짧은 체류시간에서도 높은 제거효율을

나타낸 것은 매립지가스중의 황화수소 유입농도가 15ppmv(약 $21\text{mg}/\text{m}^3$, 25℃)로 비교적 낮았기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 황화수소의 악취감지농도가 0.025~0.1ppmv이며 TLV-TWA와 TLV-STEL이 각각 10ppmv와 15ppmv인 것을 고려한다면 반드시 처리후 방출하여야 함은 자명한 것이다. 여기에서 TLV-TWA (Threshold Limit Value - Time Weighted Average)는 작업자가 1일 8시간, 주당 40시간을 기준으로 매일 반복적으로 노출되어도 건강에 악영향이 없는 시간가중 평균농도를 의미하며, TLV-STEL(Threshold Limit Value - Short Time Exposure Limit)은 작업자가 자극, 피부질환, 정신적 혼란상태 없이 15분 이내로 1일 4회 이내로 노출될 수 있는 시간가중 평균농도를 의미한다¹⁶⁾.

매립지가스 중의 황화수소 제거에 관한 기타 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 독일의 Gerolsheim매립지는 도시폐기물과 산업폐기물이 매립되어 있는 곳으로 황화수소가 평균 $1,200\sim 6,150\text{mg}/\text{m}^3$ 이었고 높을 경우에는 $15\sim 20\text{g}/\text{m}^3$ 까지도 검출되었다. 이 매립지의 황화수소는 산업공정에서 pH중화제로 사용했던 석고(CaSO_4)를 상당량 매립한데서 기인한 것이다. 이 매립지의 가스는 향후 20년 동안 발생될 것으로 추정되어 황화수소를 제거한 후 전력생산에 이용하려는 계획을 수립하였다. 충전물질로는 퇴비와 개량 점토를 혼합하여 사용하였다. 온도는 28~30℃로 유지하였으며, 겨울철에는 생물탈취상 반응기를 단열재로 둘러싼 후 보온하였다. 반응기의 용량은 약 18m^3 이었으며 가스부하량은 약 $150\text{m}^3/\text{h}$ 이었다. 충전물질은 8~10주마다 교체하였다. 처리결과 산성화가 진행되었으나 매립지가스 처리에는 문제가 없었다. 황화수소는 약산성하에서도 제거가 잘 되기 때문이다⁴⁾. Frechen(1989)은 유해폐기물매립지에서 발생하는 악취를 생물탈취상으로 처리하였다. 충전물질로는 음식쓰레기와 슬러지를 혼합하여 처

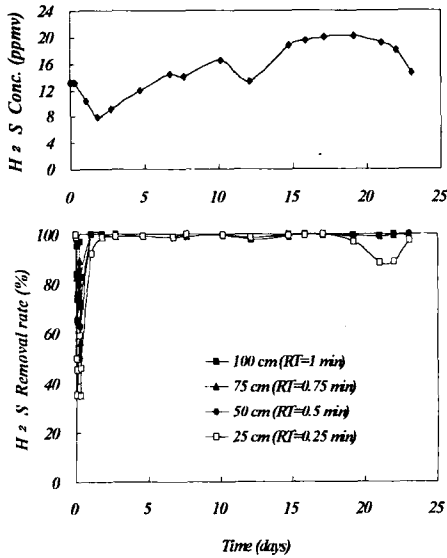


Fig. 3. H₂S input concentration and H₂S removal rates of a compost at the depth of 25, 50, 75 and 100cm.

리한 퇴비를 사용하였다. 가스부하량은 4.4m³/m²/h이었으며 암모니아, 황화수소 그리고 악취물질의 부하량은 각각 5.8g/m³(충전물질)/h, 3.1g/m³(충전물질)/h 그리고 172,500 O.U./m³(충전물질)/h이었다(O.U. = odor unit). 운전시작 후 3주 동안 이들 모두 99%이상의 높은 제거효율을 나타내었다. 운전시작 6주 후부터 암모니아의 제거효율은 70% 정도로 저하하였으나 황화수소는 여전히 99.9%의 제거효율을 유지하였다⁵⁾. 황화수소의 경우 매립지가스 중에서 기타 물질과 공존시에도 효율저하 없이 제거가 용이하였다.

산소가 공급되지 않을 경우 처리효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 처리효율이 우수한 '퇴비와 나무조각을 혼합한 반응기'를 선정하여 24일째에 산소공급을 중단하였다(Fig. 4). 산소를 차단하고 매립지가스만을 유입한 경우 처리효율이 현저하게 저하하기 시작하였으며 4일 후에는 체류시간이

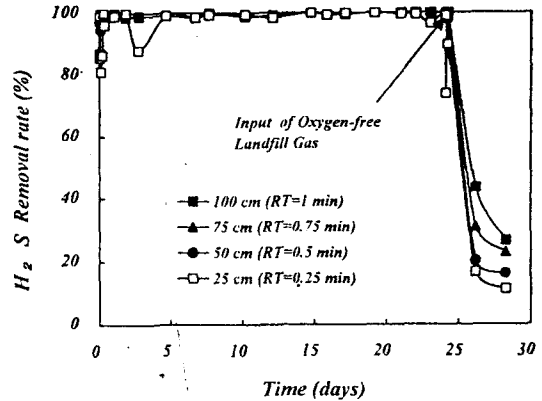


Fig. 4. H₂S removal rates of a compost mixed with woodchip at the depth of 25, 50, 75 and 100cm.

1분일 때에도 30%정도이었다. 이는 매립지가스만을 유입할 경우 공기에 의한 희석효과가 적어 이전보다 고농도의 황화수소가 유입되었기 때문으로 생각해 볼 수 있으나 앞의 사례연구결과 본 실험부지보다 훨씬 높은 농도의 황화수소도 생물탈취상으로 제거 가능하였음을 고려하면 호기성 미생물이 산소 부족에 의하여 활성도가 저하하였기 때문으로 판단된다. 이로써 산소(공기)가 공급되지 않은 상태에서 매립지가스내 황화수소를 생물탈취상으로 처리하는 것은 어려울 것으로 판단되었다. 황화수소의 황은 S²⁻로 존재하며 황산화박테리아에 의하여 S⁰로 산화된다. 산화된 S⁰는 산소와 반응하여 SO₄²⁻를 형성하게 된다. 생물탈취상의 수분과 공기공급이 적절히 유지된다면 S²⁻→S⁰의 산화반응이 S⁰→SO₄²⁻보다 빠르게 일어난다¹⁷⁾. SO₄²⁻로의 전환이 클수록 산성화가 빠르게 진행된다. 그러므로 미생물의 분해작용이 활발하여 질 수록 산성화에 미치는 영향도 줄일 수 있다.

퇴비를 충전재료로 사용할 경우 암모니아 제거효율을 Fig. 5에 나타내었다. 평균유입농도는 약 40ppmv이었으며 약 30일 동안의 암모니아 제거

Table 2. Physicochemical changes of a initial and a final filling materials

Item	Initial	Final			
	0~100cm	0~25cm	25~50cm	50~75cm	75~100cm
Moisture Content (%)	53.7	31.0	35.0	43.6	45.3
Volatile Solids (%)	70.1	67.5	68.7	66.7	68.3
pH	8.7	8.2	7.6	7.9	8.4

3.2 BTEX의 제거

퇴비를 충전재료로 사용하였을 때 BTEX의 제거효율을 살펴보면 Fig. 6에서 보는 바 와 같다. BTEX 유입농도는 30~60mg/m³이었다. 처리 후 초기 배출가스의 농도는 10~20mg/m³를 유지하였으나 3일 이후부터는 10mg/m³미만을 나타내었다. BTEX를 각 화합물질별로 살펴보면 톨루엔과 에틸벤젠이 약 80%로 비교적 높은 제거율을 보였으며 벤젠과 자일렌은 70%를 약간 상회하였다(Fig. 7). 독일기술인연합회의 생물탈취상지침(Standard 3477 Biofilter of VDI(Verein Deutscher Ingenieure))에 따르면 톨루엔과 자일

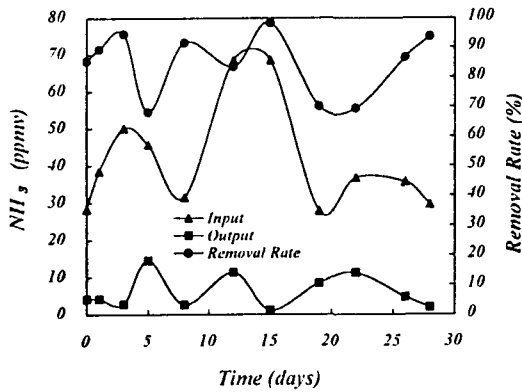


Fig. 5. NH₃ removal rate of a compost at the depth of 100cm.

효율은 85%정도이었다. 암모니아의 경우 황화수소와 비교하면 높은 제거효율을 보이지는 못하였으나 초기에 크게 저하하였다가 증가하는 과과현상은 나타나지 않았다. 이는 실험초기에 황화수소처럼 짧은 시간간격으로 측정할 수 없었기 때문에 이러한 현상을 관찰하기 어려웠을 수도 있다. 한국건설기술연구원에서 실시한 토양을 이용한 암모니아 제거실험에서는 2일차에 85%이었던 제거효율이 6일차에는 20%로 급격히 저하하였다⁸⁾. 암모니아 평균주입농도는 110ppmv이었다. 충전물질로는 양토(loam)를 이용하였으며 함수율, 가스유입속도 그리고 충전높이는 각각 12%, 0.6m/min와 10cm이었다.

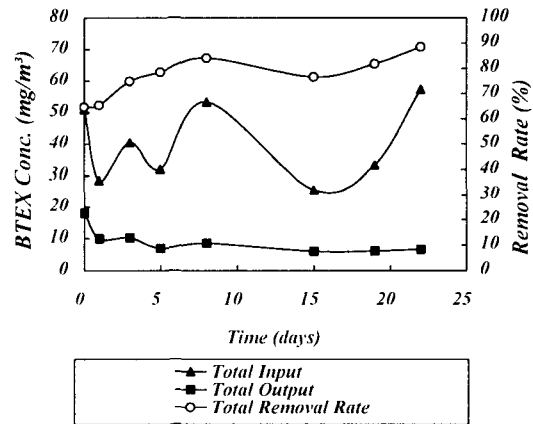


Fig. 6. Total input and output concentrations and removal rate of BTEXs at the depth of 100cm.

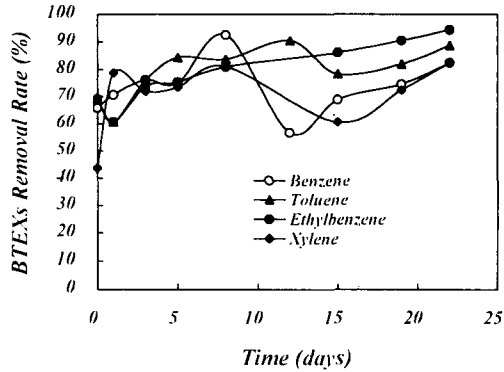


Fig. 7. Individual removal rate of BTEXs at the depth of 100cm.

렌은 매우 분해가 잘 되며 벤젠은 비교적 분해용이한 물질로 분류하고 있다⁶⁾.

3.3 처리전후의 충전물질의 특성변화

생물탈취상을 이용한 가스처리시 수분함량 조절은 가장 중요한 운전인자이다. 생물탈취상은 장치가 비교적 간단하지만 수분공급방법에 따라 설계가 복잡하여지기도 한다. Table 2는 생물탈취상을 운전하기 이전과 약 30일 운전후의 충전물질의 수분함량, 휘발성유기물함량 그리고 pH의 변화를 나타낸 것이다. 매립지가스의 상대습도는 95%이상을 유지하였으므로 추가적인 수분공급은 실시하지 않았다. 유입가스의 상대습도가 95%이상인 경우 수분손실의 영향을 크게 줄일 수 있다⁶⁾. 운전실시 후 수분함량은 초기보다 낮은 값을 나타내었으며 특히 가스유입구 부근인 0~25cm에서 가장 많은 수분손실을 나타내었다. 일반적으로 충전물질의 수분손실은 유입부분에서 가장 높게 일어난다¹⁹⁾. 휘발성고형물함량은 초기보다 다소 감소하였다. 생물탈취상 운전시 충전물질의 휘발성고형물함량은 오염가

스의 분해로 미생물생체량(biomass)이 과도하게 성장할 경우에는 증가하며, 퇴비와 같은 충전물질의 경우 시간이 경과함에 따라 탄소원 및 영양물질이 분해되는 경향이 있어 감소하게 된다. 황화수소 가스를 대상으로 실험을 실시한 많은 연구자들이 pH저하의 문제점들을 보고하고 있다. 특히 퇴비를 충전물질로 사용한 경우 pH저하에 의한 산성화의 문제가 많았다. Degorce-Dumas 등(1997)은 2,270mg/m³의 황화수소를 16m/hr의 속도로 유입하였다. 초기에는 100% 가까이 제거되었으나 30일 이후부터 황화수소 처리효율이 저하하여 40일 차에는 50%까지 저하하였는데 이는 pH저하와 영양물질의 부족 때문이었다²⁰⁾. Yang 등(1994)도 산성화가 황화수소 제거효율에 큰 영향을 미친다고 밝히고 있다²¹⁾. 그러나 pH가 3.2미만일 경우에는 효율의 저하가 크지만 이 이상에서는 크게 영향을 미치지 않는다고 하였다. 황화수소 분해세균은 산성뿐만 아니라 중성조건에서도 잘 성장한다²⁰⁾. *Thiobacillus thiooxidans*는 pH 4.5에서 잘 성장하며, *Thiobacillus thioautotrophicus*와 *Thiobacillus denitrificans*는 pH 7에서 잘 성장하는 세균들이다. 그러나 대부분의 미생물들은 중성부근에서 잘 성장하므로 충전물질의 산성화가 진행될 경우 처리효율에 문제를 일으킬 수 있다. 이는 충전물질의 산성화가 진행될 경우 황화수소만을 단독적으로 처리할 경우에는 큰 문제를 일으키지 않으나 다른 화합물과 혼합된 악취물질의 경우에는 황화수소 이외의 악취물질 제거효율에는 영향을 미칠 수도 있음을 의미하는 것이다. 본 실험에서는 pH가 초기보다 약간씩 저하하기는 하였으나 모두 7 이상을 유지할 수 있었으므로 산성화에 의한 문제는 없었던 것으로 보인다. 이는 실험기간이 30일 정도로 산성화가 진행되기에는 비교적 기간이 짧았기 때문이다. 또한 매립지가스에는 여러 가지 성분들이 포함되어 있으므로 단일 가스성분만을 대상으로 실험을 실시한 다른 연구결과처럼 반드시 산성화가 일어난다고

볼 수는 없다. 예를 들어 메틸아민은 암모니아로 전환되며 암모니아는 아질산염으로 전환되는 것으로 알려져 있는데 메틸아민과 암모니아가 흡착될 경우에는 pH가 증가할 수도 있지만 암모니아의 질산화가 계속 일어난다면 pH가 감소할 수도 있다. pH는 결국 메틸아민과 암모니아의 축적율과 질산화에 따라 달라질 수도 있다²²⁾. 본 연구의 충전물질 변화와 비교하기 위하여 퇴비를 이용하여 황화합물과 휘발성 유기화합물질을 생물탈취상으로 처리한 Wani 등(1998)의 연구결과를 살펴보았다. 약 4개월간 운전후 유기물함량은 53.14%에서 52.76%로 pH는 8.95에서 8.13으로 다소 감소하였으나 큰 변화는 없었다. 이 기간동안 황화합물 처리시 우려되는 충전물질의 산성화는 발생하지 않았다²³⁾.

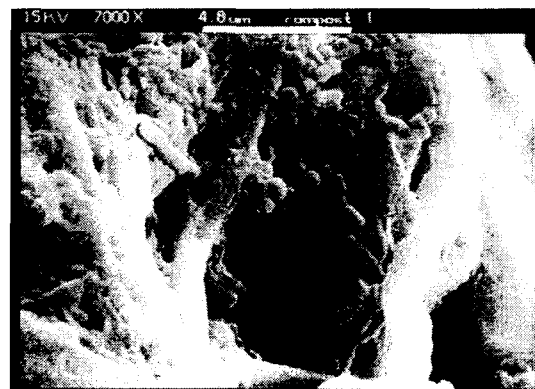
호기성 조건에서 매립지가스를 주입한 후 19일이 지나자 충전물질 표면에 육안으로 확인가능한 곰팡이류가 발견되었다. 생물탈취법을 실시하기 이전과 이후의 퇴비를 표면을 금코우팅한 후 SEM(Scanning Electron Microscopy, ALPHA 25-A, AKASHI)으로 촬영하였다. Fig. 8(a)는 생물탈취법을 실시하기 이전의 퇴비를 7,000배 확대하여 촬영한 모습이다. 표면에는 공극이 비교적 많이 있음을 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 실험 19일 후의 퇴비를 같은 배율로 촬영한 것이다. 초기와는 달리 미생물막으로 판단되는 바이오필름이 표면을 전면적으로 도포하고 있어 미생물에 의한 매립지가스 악취처리가 이루어짐을 짐작할 수 있었다. 이를 생물살수여상법과 생물탈취법으로 하수처리장에서 발생한 악취를 처리한 후 촬영한 사진과 비교하면 매우 유사하였는데 Jeong 등(1997)은 이를 filamentous form bacteria라고 보고하였다²⁴⁾.

4. 결 론

본 연구는 난지도매립지에서 발생하는 매립지가



(a)



(b)

Fig. 8. The morphology of microorganisms on the compost media before (a) and after (b) biofiltration using SEM($\times 7,000$).

스를 퇴비를 충전물질로 사용한 생물탈취상으로 처리시 악취유발물질 및 휘발성 유기화합물의 제거특성과 생물탈취상의 적용가능성을 평가하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 25cm 충전깊이(체류시간 = 0.25분)에서도 약 15ppmv로 유입된 황화수소는 98%이상 제거되었다.
2. 산소공급중단 후 혐기성가스만 유입시 황화수소 처리효율이 30%로 저하하였다.

3. 평균유입농도 40ppmv에서의 암모니아제거효율은 85%정도이었으며 황화수소보다 낮았다.
4. BTEX중 톨루엔과 에틸벤젠의 제거효율은 80%로 벤젠과 자일렌보다 높았다.
5. 약 30일 운전기간 동안 pH저하에 의한 산성화는 발생하지 않았다.
6. 운전실시 19일 후 충전물질 표면에 곰팡이류가 발견되었으며 SEM촬영 결과 바이오필름이 형성되어 있음을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.A., "Integrated Solid Waste Management : Engineering Principles and Management Issues", McGraw-Hill Inc.(1993).
2. Senior, E. and Kasali, G.B., "Landfill Gas" in "Microbiology of Landfill Sites" edited by Senior E., CRC Press Inc., pp113-158(1990).
3. Nyer, E.K., Fam, S., Kidd, D.F., Johns II, F.J., Palmer, P.L., Boettcher, G., Crossman, T. L., and Suthersan, S.S., "In Situ Treatment Technology", CRC, pp221-243(1996).
4. Rettenberger, G., "Landfill Gas Upgrading : Removal of Hydrogen Sulphide" in "Landfilling of Waste : Biogas" edited by Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R., E&FN SPON, pp559-568 (1996).
5. Frechen, F.B., "Odour Emissions and Controls" in "Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact" edited by Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R., Academic Press, pp425-436(1989).
6. Figueroa, R.A., "Landfill Gas Treatment by Biofilters" in "Landfilling of Waste : Biogas" edited by Christensen, T. H., Cossu, R. and Stegmann, R., E&FN SPON, pp.535-549(1996).
7. Bohn, H.L., "Biofilter Media", Air & Waste Manage. Assoc., 89th Annual Meeting & Exhibition, June 23-28, 96-WP87A.01(1996).
8. Namkoong, W., "Removal of Phenolic Compounds in Soil", Ph.D. dissertation in University of Texas at Austin, p72(1988).
9. Wright, W.F., Schroeder, E.D., Chang, D.P.Y., and Romstad, K., "Performance of A Pilot-Scale Compost Biofilter Treating Gasoline Vapor", J. Env. Eng., June, pp547-555(1997).
10. Leson, G. and Smith, B.J., "Petroleum Environmental Research Forum Field Study on Biofilters for Control of Volatile Hydrocarbons", J. Env. Eng., June, pp556-562(1997).
11. Leson, G. and Winer, A.M., "Biofiltration : An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions", J. Air & Waste Manage. Associ., Vol.41, No.8, pp1045-1054(1991).
12. Toffey, W.E., "Biofiltration-Black Box Or Biofilm?", J. Biocycle, June, pp58-63(1997).
13. Lith, C.V., Leson, G., and Michelsen, R., "Evaluating Design Options for Biofilters", J. Air & Waste Manage. Assoc., Vol.47, Jan., pp37-48(1997).
14. 한국지반공학회, "폐기물 매립시설 세부설치 기준 연구보고서"(1994).
15. Hurst, C.J., Sims, R.C., Sims, J.L., Sorenson, D.L., McLean, J.E., and Huling, S., "Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Biodegradation as A Function of Oxygen Tension in Contaminated Soil" , Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, pp20-32(1995).
16. Massacci, G., "Physico-Chemical Characteristics and Toxicology of Landfill Gas Components" in

- "Landfilling of Waste : Biogas" edited by Christensen, T.H., Cossu R., Stegmann R., E&FN SPON, pp73-84(1996).
17. Wainwright, M., "Sulphur-oxidising Micro-organisms on Vegetation and in Soils Exposed to Atmospheric Pollution", *Environ. Pollut.* Vol.17, pp167-174(1978).
 18. 한국건설기술연구원, "포기조 및 토양탈취상을 이용한 하수처리장 악취 제거"(1993).
 19. Lith, C.V., Leson, G. and Michelsen, R., "Evaluating Design Options for Biofilters", *J. Air & Waste Manage. Associ.*, Vol. 47, Jan., pp37-48(1997).
 20. Degorce-Dumas, J.R., Kowal, S., and Cloirec, P.L., "Microbiological oxidation of hydrogen sulphide in a biofilter". *Can. J. Microbiol.* Vol.43, pp264-271(1997).
 21. Yang, Y. and Allen, E.R., "Biofiltration Control of Hydrogen Sulfide 1. Design and Operational Parameters", *Air & Waste*, Vol.44, Jul., pp863-868(1994).
 22. Chou, M.S. and Shiu, W.Z., "Bioconversion of Methylamine in Biofilters", *J. Air & Waste Manage. Associ.*, Vol.47, Jan., pp58-65(1997).
 23. Wani, A.H., Branion, R.M.R., and Lau, A.K., "Degradation Kinetics of Biofilter Media Treating Reduced Sulfur Odors and VOCs", *J. Air & Waste Manage. Associ.*, Vol.48, Dec., pp1183-1190(1998).
 24. Jeong, S.M., Kang, S.K., Lee, J.Y. and Shin, B.C., "2-step Biological Treatment of Off-gas from Industrial Wastewater Treatment Plant : Process Evaluation", 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Vol. I , pp656-663(1997).