

유기성오니 직매립금지에 대한 수분함량의 영향 검토

고재영 · 배재근[†] · 박준석*

서울산업대학교 에너지환경대학원, *강원대학교 환경방재공학과
(2007. 9. 19. 접수/2007. 10. 18. 채택)

Effect of Moisture Content on Direct Landfilling Prohibition of Organic Sludge

Jae-Young Ko · Chae-Gun Phae[†] · Joon-Seok Park*

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

*Department of Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University, Gangwon 245-711, Korea

(Received September 19, 2007/Accepted October 18, 2007)

ABSTRACT

This research was conducted to evaluate the effect of moisture content on direct landfilling prohibition of organic sludge. Organic sludges with moisture content (MC) of 75 and 85% were filled in two lysimeters. The lysimeters were named as Exp.75 and Exp.85, respectively. LFG of 2,064 l was generated greatly for Exp.85, compared to 1,500 l for Exp.75. LFG generations in Exp.75 and Exp.85 were 64.1 l/kg and 157.1 l/kg as dry TS basis, and 113.6 l/kg and 266.2 l/kg as dry VS basis. Total CH₄ generation in LFG for Exp.85 was 1,238 l, while 1,050 l for Exp.75. H₂S of 3~150 ppmv was generated from Exp.85, which was 5 times higher than 2~30 ppmv from Exp.75. Leachate was not generated from Exp.75 during operation time. However, 420 ml of leachate was generated from Exp.85. From the results of gas generation, composition, odorous compounds, and leachate generation, landfilling of organic sludge with high MC was more harmful to the environment in spite of great LFG generation. However, direct landfilling of organic sludges without great difference of MC made a severe odor problem. Therefore, it was thought that current direct landfilling prohibition law for all organic sludge was appropriate.

Keywords: lysimeter, direct landfilling prohibition, organic sludge, moisture content

I. 서 론

1990년대 초 수도권 지역의 폐기물을 매립하는 난지도매립지가 포화됨에 따라 김포시에 수도권 광역매립장이 조성되었으며, 수도권 지역의 생활 및 사업장 폐기물이 반입, 최종처분되었다. 폐기물이 반입된 초기에는 수분함량이 높은 음식물류폐기물 및 각종 유기성오니가 혼합 매립됨에 따라 매립장내 악취발생, 해충발생, 매립지의 사면붕괴 등에 의하여 주변지역에 환경문제를 야기하고 각종 민원이 제기되었으며, 매립지내에서 발생되는 침출수처리 등 매립지 운영·관리상에 많은 어려움이 있었다.

수분함량이 높은 유기성폐기물(음식물류폐기물 및 유기성오니 등)의 매립처리에 따른 각종 문제의 발생으로 유기성오니의 재활용 촉진과 매립지의 수명연장 및 매립지 주변 환경의 개선을 위해 유기성오니의 직매립금지조항을 1997년에 폐기물관리법에 명시하였다. 초기에는 2001년 1월 1일부로 직매립을 금지하는 것으로 하였으나, 지자체의 준비미비로 잠정적 유예를 거쳐 2003년 7월 1일부터 본격적으로 규제를 실시하게 되었다.^{1,3)} 이러한 조치에 따라 반입되는 폐기물량이 감소하고, 반입 폐기물의 성상이 개선되면서 매립지의 수명연장과 주변 환경개선의 효과를 이루었다. 이러한 직매립금지 조치는 육상에서 재활용 혹은 처리하는 방향으로 유도하기 위하여 실시되었으나, 육상처리시설의 미비로 해양배출에 의존하게 되었으며, 근래에는 발생되는 하수오니의 80% 정도가 해양배출되고 있다.

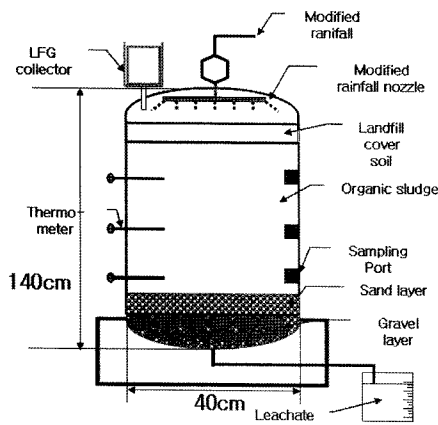
2005년 전국 하폐수오니 발생량은 18,501톤/일이었으

[†]Corresponding author : Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology
Tel: 82-2-970-6617, Fax: 82-2-971-5776
E-mail : phae@snut.ac.kr

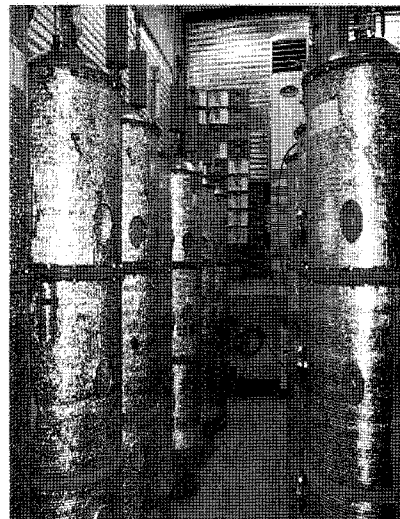
며, 이중 하수오니는 38%를 차지하였다. 하수오니는 하수종말처리시설 신·증설 등으로 1999년부터 2005년까지 6년 동안 약 159%가 증가하였다.²⁾ 유기성오니는 자원 빈국인 우리나라의 여건상 매우 중요한 자원으로써 재활용이 가능하며, 현재 유기성오니의 재활용 및 자원화기술에 대한 연구 활동이 활발하게 진행 중이다. 하지만 유기성오니의 재활용 및 자원화를 위한 연구개발이 활발히 진행되고, 기술이 상용화되어 있음에도 불구하고, 처리비의 상승 및 최종 생성물의 불안정한 수요처 등의 문제로 재활용처리에 어려움을 겪고 있다. 이러한 이유로 육상에서 처리, 재활용하는 것보다는 처리비용이 적고, 손쉽게 처리할 수 있는 해양배출을 선호하게 되었다. 유기성오니의 해양배출은 1988년부터 국내에서 허용되었으나, 런던협약 96의정서에 의하여 국제적인 규제가 강화되고, 비준안이 2006년 3월에 통과됨에 따라 해양배출에 대한 규제를 하지 않을 수 없는 입장에 처하게 되었다.³⁾ 이러한 국제정세를 반영하여 해양수산부에서는 각종 유기성폐기물의 해양배출에 대하여 재검토하게 되었다. 특히 배출량이 지속적으로 증가해 온 오폐수에 대한 규제를 중점적으로 검토해 왔다. 그 검토 결과, 해양오염방지법 시행규칙을 2005년 5월 22일에 개정하였으며, 규제항목을 대폭 늘리고, 시험방법을 용출시험에서 함량시험으로 전환시켰으며, 유해물질의 기준을 하한 기준, 중간기준, 상한기준을 설정하여 하한기준 이하에 대해서는 해양배출 가능, 상한 기준은 해양배출 금지, 중간단계는 정밀검토(생물독성시험)를 거쳐 투기 가능여부를 판단하도록 하

고 있다. 상한기준의 법적용 유예기간이 2년이며, 하한 기준은 5년인 것으로 볼 때 사실상 2011년도에는 오폐수 대부분이 해양배출이 불가능하게 될 것으로 예상되고 있다. 그러므로 오폐수 관련 정책이 직매립금지, 해양배출규제강화로 진행됨에 따라 전량 육상처리가 전제되는 정책의 수립이 필요하며, 또한 현행의 직매립금지 관련 제반문제점을 도출하고, 평가를 통하여 효율적인 관리방안을 수립하는 것이 필요하게 되었다.

오니는 상수, 공업용수, 산업용폐수, 하수 및 분뇨, 축산폐수 등의 수처리 공정을 통해 발생되는 최종산물이며, 이중 유기물(VS, volatile solids) 함량 40%를 경계로 40% 이상을 유기성오니, 40% 미만을 무기성오니로 구분한다.¹⁾ 현행의 직매립금지 조치는 유기물함량 40% 이상인 유기성오니에 대하여 적용하고 있으나, 이들 유기성오니가 매립장에 반입되어 어떠한 영향을 주는지에 대해서는 정밀 평가한 자료가 부족한 실정이다. 유기성오니는 매립되었을 때 유기물 및 수분함량에 따라 분해속도, 가스 및 악취발생량 등이 달라지게 된다. 폐기물종합관리의 가장 우선적인 단계는 발생원감량이다. 오폐수 감량화의 경우 탈수율에 따라 크게 달라질 수 있는데, 예를 들어 수분함량 80%인 오폐수 100톤을 탈수성능을 개선하여 수분감량 75%로 저하시키면 80톤의 오폐수가 발생하여 20%의 감량율을 보이게 된다. 현재 수처리공정에서 배출되는 탈수오니의 수분함량은 80~85%이나 적정효율은 75% 전후로 알려져 있다.¹⁾ 본 연구는 유기성오니의 수분함량을 75%와 85%의 두 가지 조건으로 변화시켜 매립하였을 때 수분함량 변화에



(a)



(b)

Fig. 1. Schematic diagram (a) and photograph (b) of lysimeter used in this research.

따른 매립가스, 악취 및 침출수의 변화를 살펴보고, 현행 유기성오니의 직매립금지 조치에 대한 타당성을 검토해 보고자 실시하였다.

II. 실험

1. 실험장치

모형매립조는 높이 140 cm, 직경 40 cm PVC 재질의 원통형관을 사용하여 제작하였다. 이를 부피로 환산하면 176 l가 된다. 또한 강우의 조건을 구현할 때 공급수의 편류현상을 방지하고 유기성오니 매립층에 물이 골고루 분포될 수 있도록 살수장치를 설치하였다 (Fig. 1(a) 참조). 모형매립조의 내부온도를 측정하기 위하여 매립층 상부, 중앙, 하단 부분에 bimetal 온도계를 설치하여 온도변화를 관측할 수 있도록 하였다. 모형매립조 상부에는 침하량을 측정하기 위하여 침하판을 설치하였으며, 상부, 중앙, 하단에 시료채취구를 설치하였다. 모형매립조 외벽은 단열재로 감싸서 가능한 외부온도의 영향을 받지 않도록 하였다. 운전 중 발생하는 가스는 반응기 상부에 외통 높이 18.5 cm, 직경 9 cm, 내통 높이 18.5 cm, 직경 7.4 cm인 가스발생량 측정장치를 제작하여 내부에 물을 충전하고 폐기물 분해에 의해 생성된 가스로 상승되는 내통의 높이를 시간단위로 측정하여 발생량을 측정하였다. 모형매립조 하부에는 발생하는 침출수의 양을 측정하고 시료를 채취할 수 있도록 하였다.

2. 운전조건 및 시료분석

본 연구를 수행하기 위하여 2개의 모형매립조 (lysimeter)를 준비하였으며, 충전물질의 특성에 따라 각각 Exp.75와 Exp.85로 명명하였다. Exp.75와 Exp.85는 각각 수분함량이 75%와 85%로 탈수된 유기성오니를 충전한 것이다. 85%를 선정된 것은 현재 유기성오니의 탈수효율이 80~85% 정도라는 점에 근거하였으며,¹⁾ 이 중 높은 수분함량을 선정하였다. 유기성오니의 직매립금지법을 결정하기 이전에 75% 이하의 수분함량을 가진 유기성오니는 직매립을 가능하게 할 것인가

에 대한 검토가 진행된 바 있으며, 현재는 수분함량에 관계없이 모든 유기성오니의 직매립이 금지된 상태이다. 그러므로 이러한 유기성오니 직매립금지의 적정성을 평가하기 위하여 75%의 수분함량을 검토하게 되었다. 충전에 사용한 유기성오니의 원소조성, 발열량, 용출시험 결과를 Table 1에 나타내었다. Dulong 식에 의하여 예측된 발열량은 약 5,000 kcal/kg이었으며, 용출시험 결과 중금속은 모두 지정폐기물 판단 기준치 미만인 것으로 나타났다. 각 모형매립조의 실험조건을 Table 2에 나타내었다. Exp.75와 Exp.85의 충전(充填)시 겉보기밀도는 각각 827 kg/m³과 780 kg/m³으로 하였다. 두 반응기의 충전밀도가 다른 것은 유기성오니의 수분함량이 차이 나기 때문이며, 수분함량이 서로 다른 유기성오니를 충전하면서 충전밀도를 동일하게 맞추는 것보다는 다짐조건을 동일하게 하는 것이 더 바람직할 것으로 판단되었다. 모형매립조내 충전물을 채운 후 윗부분에서 10 kg의 금속체를 10 cm 높이에서 10회씩 낙하시켜 표면이 수평이 되도록 골고루 다짐하였다. 실험은 25°C로 온도유지가 가능한 항온실에서 수행하였다 (Fig. 1(b) 참조). 모형매립조의 인공강우 주입은 다음과 같이 계산하여 주입하였다. 가장 큰 위생매립지인 수도권매립지의 위치를 고려하여 인천지역의 1971년부터 2000년까지 30년간 월평균 강수량(9.6 cm)을 산출하고 범봉수 등(2001)이 사용한 강우침투율 35%를 적용하였다.⁴⁾ 따라서 인공강우 주입량은 [20 cm×20 cm×3.14 (반응기 면적)]×[9.6 cm/월(인천지역 30년 월 평균강수량)]×[0.35(강우침투율)]=4,220 ml/월로 계산하였으며, 10일에 1.4 l씩 주입하였다.

발생된 가스의 조성(CH₄, CO₂, O₂)은 가스측정기 (LMSxi, Gas Data Co., UK)를 이용하여 측정하였으며, 암모니아(NH₃), 황화수소(H₂S), 메틸메르캅탄

Table 2. Experimental condition of lysimeter

Exp.	Moisture content of sludge (%)	Weight of sludge (kg)	Bulk density (kg/m ³)
Exp.75	75	93.5	827
Exp.85	85	88.2	780

Table 1. Physicochemical characteristics of organic sludge used in this research

Exp.	Chemical composition of volatile solids in organic sludge (%)					High heating value (kcal/kg)		Korean standard leaching procedure (mg/l)					
	C	H	O	N	S	Dulong eq.	Calorie bomb	Cd	Cr	Cu	Pb	As	Hg
Exp.75	54.79	6.97	36.88	0.94	0.42	5,250	4,276	0.02	0.02	0.06	0.11	ND	ND
Exp.85	55.02	6.39	36.93	1.16	0.50	5,068	3,966	0.01	0.04	0.17	0.07	0.01	ND

(CH₃SH), 디메틸메르캅탄((CH₃)₂SH) 등 악취물질은 가스검지관(Gastec, Japan)을 이용하였다. 발생된 침출수는 폐기물공정시험법⁵⁾과 Standard Methods⁶⁾에 따라 pH, TS, BOD₅, COD_{Cr}, TOC, TP, NH₃-N와 TN을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 가스발생 및 악취

유기성오니의 수분함량에 따른 영향을 평가하기 위하여 수분함량이 75%(Exp.75)와 85%(Exp.85)인 유기성 오니를 충전하여 모형매립조를 약 1년간 운전하였으며, 이 때에 발생된 누적가스량을 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 일별 가스누적량을 살펴보면 초기 약 40일간은 가스발생이 매우 미미하였으나 이후 가스 발생이 활성화되기 시작하여 약 200일까지 가스발생이 활발히 진

행되었다가 이후 둔화되기 시작하였다(Fig. 2(a)). 실험 종료시점인 390일차의 누적가스발생량을 살펴보면 Exp.75에서는 총 1,500 l, Exp.85에서는 총 2,064 l의 가스가 발생되어, 수분함량이 85%인 경우에 75%인 경우보다 30% 이상 더 많이 발생되었다. 이를 건조기준 총고형물함량(TS)으로 계산하면 Exp.75와 Exp.85에서는 각각 64.1 l/kg와 157.1 l/kg가 되며, 건조기준 휘발성유기물함량(VS)으로는 각각 113.6 l/kg와 266.2 l/kg되어 휘발성유기물 기준으로 비교할 때 차이가 더 크게 나타났다(Fig. 2(b)와 (c)). 수분함량이 85%인 경우가 75%인 경우 보다 가스발생량이 더 많은 것으로 보아 수분함량이 85%인 경우 미생물에 의한 분해가 더 활발히 일어나고 있음을 간접적으로 판단할 수 있었다. 류 등(2000)은 생활폐기물, 하수처리장 탈수오니, 소각재 등을 혼합하여 28.4 l 용량의 모형매립조를 500일 동안 운전한 결과 총가스발생량이 290~1,600 l라고 하였다.⁷⁾

모형매립조로 모사한 반응기의 매립가스 중 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 산소(O₂)의 조성변화를 Fig. 3에 나타내었다. 유기성오니 충전(또는 매립) 초기에는 두 반응기 모두 산소가 21%였으며, 나머지는 질소 79%로 대기조건과 동일하였다. 본 실험에 사용하였던 가스측정기(LMSxi, Gas Data Co., UK)는 가스조성의 총합을 100%로 환산하여 메탄, 이산화탄소, 산소, 그리고 질소의 농도를 나타내주는 기기이다. 2일차부터 가스의 조성이 급격히 변화하여 메탄이 62%, 이산화탄소가 21%, 산소가 13.5%, 그리고 질소가 3.5%를 차지하였다. 질소는 불활성 가스로서 생물학적 반응과는 무관하므로 Fig. 3에서는 제시하지 않았으나 가스 총합 100%에서 메탄, 이산화탄소, 산소의 농도를 제외하면 질소 농도가 되므로 추산에는 큰 문제가 없을 것으로

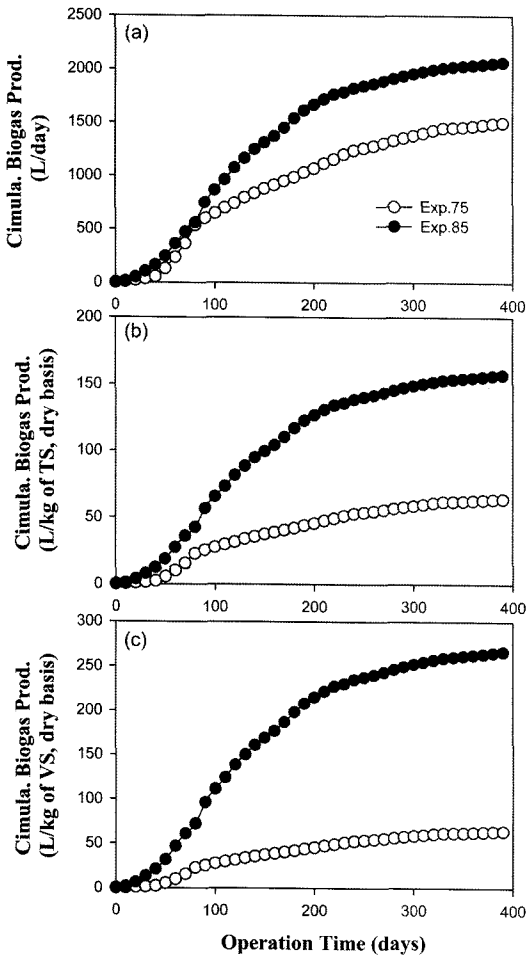


Fig. 2. Biogas produced during operation time.

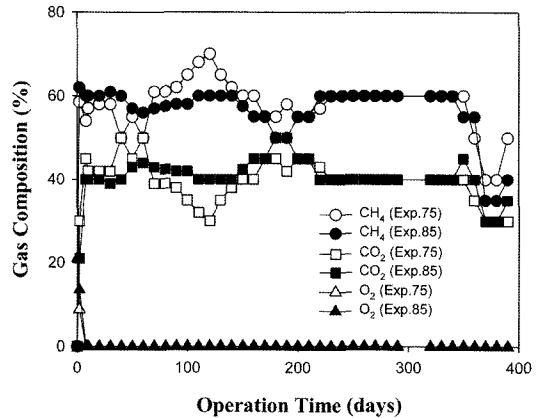


Fig. 3. Composition of biogas produced during operation time.

생각된다. 2일차 다음에는 8일차에 가스조성을 측정하였는데 이 때 산소는 전혀 검출되지 않았고, 메탄과 이산화탄소가 6:4(60%:40%) 정도로 나타났다. 이산화탄소는 미생물 분해반응으로 발생하는 호흡의 대사산물로서 8일차 이후 이산화탄소가 40%로 높게 나타난 것은 미생물에 의한 분해반응이 빨리 진행되었다는 것을 의미한다. 메탄과 이산화탄소 농도는 360일차까지 각각 55~60%와 40~45%를 유지하였으며, 370일차에 이르러서야 메탄이 35%, 이산화탄소가 30%로 감소하였다. 이로써 유기성오니만을 매립한 경우 1년이 좀 지나자 메탄농도가 저감되면서 분해활동도 느려졌다. 분해활동이 활발히 일어났던 약 70~200일차의 가스조성을 살펴 보면 Exp.75의 메탄 조성비가 Exp.85 보다 약간 더 높게 나타난 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 메탄 역시 이산화탄소와 마찬가지로 혐기성 미생물의 활동에 의해 나타나는 가스로서 본 연구결과에서 Exp.75에서 메탄이 좀 더 발생되었으므로 더 활발한 혐기적 분해가 이루어졌다고 생각해 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 2에서 보았듯이 동기간 동안에 총가스발생량은 Exp.85에서 더 많이 발생이 되었으며, 메탄가스 조성비는 약간의 차이만 있을 뿐 전체적으로 볼 때 두 모형 매립조에서 메탄과 이산화탄소가 6:4를 나타내어 가스 조성비에서는 큰 차이가 있는 것으로 보기는 어렵다고 생각된다. 오히려 종합적인 관점에서 가스발생량(Fig. 2 참조)과 가스조성(Fig. 3 참조)으로 판단할 때 수분함량이 85%로 높았던 매립조형조가 가스발생이 많았고 메탄과 이산화탄소의 조성비가 유사하여 수분함량이 75%였던 경우 보다 분해가 더욱 활발히 일어났다고 판단된다. 이는 다음과 같이 개략적으로 간단히 추산할 수 있다. 390일차의 최종누적가스발생량이 Exp.75와 Exp.85에서 각각 1,500 l와 2,064 l이므로 여기에 메탄농도가 각각 평균 70%와 60%라고 가정해서 곱해보아도 실제 총가스발생량 중 메탄의 양은 Exp.75와 Exp.85에서 각각 1,050 l와 1,238 l로 Exp.85에서 더 많이 발생한 셈이 된다.

매립지에서 발생하는 매립가스는 메탄과 이산화탄소 이외에 미량 유해가스 및 악취가스를 포함하고 있어 주변환경 및 인근 주민의 생활에 까지 2차적 피해를 유발한다.^{8,9)} 유기성오니 수분함량에 따른 악취발생 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 암모니아는 실험기간 내내 검출되지 않아서 본 논문에서는 논의하지 않았다. 황화수소는 Exp.75에서는 2~30 ppmv의 범위를 나타내었으며, Exp.85에서는 전 기간 동안 3~150 ppmv의 높은 농도를 나타내었다. 특히 Exp.85의 경우 50~160일차까지는 황화수소가 거의 100 ppmv가 넘는 매우 높은

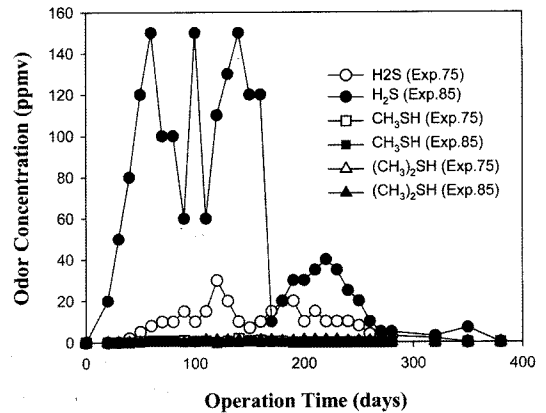


Fig. 4. Concentration of odorous compounds during operation time.

농도를 나타내었다. 일반적으로 매립가스 중의 황화수소 농도는 0~70 mg/m³(0~49 ppmv) 정도인 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 본 모의실험에서 황화수소가 일반적 매립가스 중 황화수소 농도보다 높게 나타난 것은 생활 폐기물이 아닌 보다 쉽게 분해가능한 유기성오니만을 충전물질로 사용하였기 때문으로 생각된다. 황화수소는 공업지역 황화수소 배출허용기준이 0.06 ppmv이고, 악취감지농도가 0.025~0.1 ppmv로 상당히 낮은 것을 감안한다면 Exp.85에서 발생된 황화수소는 건강에 문제를 일으킬 수도 있는 매우 높은 농도라고 판단된다. 황화수소는 TLV-TWA(Threshold Limit Values-Time Weighted Average)가 14 mg/m³, TLV-STEL(Threshold Limit Values-Short Time Exposure Limit)는 21 mg/m³이다.¹⁰⁾ 이를 표준온도(25°C), 표준압력(760 mmHg)에서의 기체부피로 환산하면 각각 9.2 ppmv와 15.8 ppmv가 된다. 여기에서 TLV-TWA는 작업자가 1일 8시간, 주당 40시간을 기준으로 매일 반복적으로 노출되어도 건강에 악영향이 없는 시간가중 평균농도를 의미하며, TLV-STEL은 작업자가 자극, 피부질환, 정신적 혼란상태 없이 15분 이내로 1일 4회 이내로 노출될 수 있는 시간가중 평균농도를 의미한다. 메틸메르캡탄(CH₃SH)은 Exp.75에서는 50~180일 사이에 0.5~1.0 ppmv를 나타내었고 Exp.85에서는 60~150일차 사이에 0.5 ppmv 이하로 검출되었으며, 이후에는 검출되지 않았다. 디메틸메르캡탄((CH₃)₂SH)은 두 반응기에서 실험기간 내내 0~1 ppmv 이하의 농도로 나타났다. 수분함량을 75%와 85%인 유기성오니를 매립한 경우 발생하는 악취를 분석해 본 결과 85%의 경우가 75%인 경우보다 악취(황화수소)가 5배 정도 높은 농도로 나타나 수분함량이 높은 유기성오니의 매립은 환경적으로

더 바람직하지 않은 것으로 판단되었다.

2. 침출수 발생량 및 수질특성

매립지 폐기물의 수분은 고형폐기물의 가수분해 및 생물학적 분해, 강우의 침투 등에 의해 생성되며, 침출수의 배출이 일어나기 전에 폐기물층 내에 흡수된다. 그리고 폐기물 수분함량이 수분보유능력(field capacity)보다 많아질 경우 중력하강하여 침출수로 발생하게 된다.¹¹⁾ 매립종료 후 시간이 경과함에 따라 폐기물의 압밀현상이 발생하고 수분을 흡수할 수 있는 유기물 성분이 분해되기 때문에 폐기물 수분보유능력은 초기와 많이 달라지며 일반적으로 감소하는 현상을 보인다. Christensen 등(1989)은 폐기물의 분해와 압축과정에 의해 초기 80%이었던 매립폐기물의 수분보유능력이 점점 감소하여 4년 이상이 경과된 후에는 63~74%로 감소되어 침출수량의 증가를 가져왔다고 하였다.¹²⁾ 본 모형매립조에서 발생하는 침출수량을 누적하여 Fig. 5에 나타내었다. 매 10일마다 1.4 l의 인공강우를 주입하였음에도 불구하고 Exp.75 반응기에서는 약 400일의 운전기간 동안 침출수가 전혀 발생되지 않았으며, 일정시간이 지나자 가스발생을 측정하는 곳으로 인공강우가 월류되어 다시 배출되었다. 유기성오니의 경우 수분보

유능력이 매우 커서 주입되는 인공강우가 상당량 흡수, 흡착되었으며, 일부는 미생물 분해활동에 의하여 가스와 함께 배출되었지만 가장 많은 부분이 중력침강되지 못하고 반응기 밖으로 배출되었기 때문이다. 이는 유기성오니 자체의 수분보유능력이 크고 포화된 상태에서 인공강우가 매립장내로 더 이상 침투할 수 없음을 보여주는 것이다. Exp.85에서도 300여일 동안 침출수가 발생하지 않다가 330일차에 처음으로 65 ml가 발생되었으며, 실험종료시 까지 발생한 침출수량은 총 420 ml 정도였다. Exp.85에서도 Exp.75와 마찬가지로 인공강우가 매립장 밖으로 배출되는 현상이 관찰되었으나, Exp.75와 달리 Exp.85에서 330일 후에 침출수가 발생한 것은 초기 수분이 Exp.75보다 높아 자체 압밀에 의하여 유기성오니가 함유하고 있던 수분이 수분보유능력의 한계를 넘어서 일부 배출되기 시작한 것으로 사료된다. 침출수는 앞서 언급한 바와 같이 매립된 폐기물이 함유하고 있던 수분과 주입되는 강우가 매립층의 수분보유능력을 초과하면서 배출되기 때문이다.¹¹⁾ 수분함량이 다른 유기성오니 매립의 영향에 대하여 침출수량을 근거로 판단해 볼 때는 수분함량이 많았던 Exp.85가 Exp.75보다 더 바람직하지 못한 것으로 평가되었다.

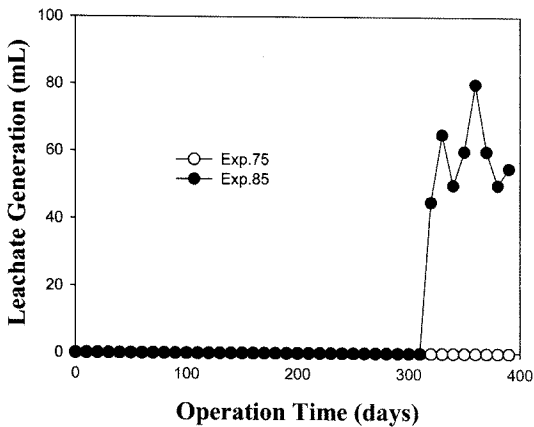


Fig. 5. Leachate volume generated from lysimeters.

Exp.75의 경우 침출수가 전혀 발생되지 않았으며, Exp.85에서도 후반부에만 일부 발생이 되었기 때문에 (Fig. 5 참조) 이에 대한 비교그림은 제시하지 않았으며, 유기성오니의 수분함량에 따른 침출수 수질특성은 비교평가할 수 없었다. 그러므로 Exp.85에 대한 침출수 특성만을 Table 3에 정리한 후 고찰하였다. 330일차 이후 발생한 침출수의 pH는 7.39~7.79로 약알칼리성을 띠었으며, TS는 1.15~184 g/l의 범위를 나타내었다. BOD₅와 COD_{Cr}은 각각 3,000~6,000 mg/l와 347~1,819 mg/l의 범위를 나타내었으며, 실험기간이 경과함에 따라 수치가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 3에서 메탄과 이산화탄소 농도가 급격히 감소하고 있는 것으로 볼 때 분해가 상당히 진행되어 안정화단계로 들어갔다고 판단할 수 있다. TOC는 136.8~205.5 mg/l의

Table 3. Water quality of leachate from Exp.85 lysimeter during operation time

Operation time (days)	pH	TS (g/l)	BOD ₅ (mg/l)	COD _{Cr} (mg/l)	TOC (mg/l)	TP (mg/l)	TN (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)
0~320	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
330	7.39	1.84	6,000	1,819	162.9	7.2	245.8	65
350	7.58	1.58	4,500	1,467	205.5	5.0	235.3	98
380	7.79	1.15	3,000	347	136.8	3.6	499.9	414

NG=Leachate was not generated.

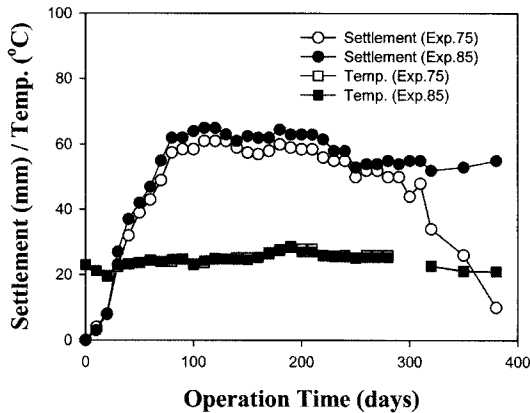


Fig. 6. Variation of settlement and temperature in lysimeters.

범위를 나타내었고, TP는 3.6~7.2 mg/l의 범위를 나타내었다. TN은 235~500 mg/l, NH₃-N은 65~414 mg/l를 나타내었다.

3. 침하량 및 온도

매립지에서 발생하는 폐기물의 침하는 폐기물의 초기 공극비, 폐기물 조성, 매립높이, 지질 스트레스, 그리고 환경적인 조건 등에 의해 영향을 받는다. 특히 폐기물의 조성은 침하에 영향이 크며 이는 폐기물에 포함된 유기물의 함량에 기인한다.¹³⁾ 유기물은 쉽게 분해가 되므로 폐기물 매립지의 지반침하는 매립지내 폐기물이 혐기성 분해되면서 일어난다. 그러므로 폐기물 층의 침하가 많이 일어났다는 것은 그만큼 폐기물의 분해가 많이 일어난 것을 의미한다. 수분함량이 다른 유기성오니를 충전한 두 모형매립조의 운전일수 경과에 따른 침하량과 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 실험 초기부터 80일차까지 침하량이 계속 증가하여 Exp.75와 Exp.85에서 62 mm까지 침하가 일어났으며, 200여일까지 유사하게 유지되다가 이후 다소 회복되었다. 그러나 Exp.85의 침하량이 실험종료시까지 55 mm로 계속 유지된 것에 반하여 Exp.75에서는 10 mm대로 거의 회복되었다. 유기성오니의 분해가 진행됨에 따라 계속적으로 침하가 일어나거나 유지되지 않고 회복되는 이유는 10일마다 인공강우가 주입되었기 때문에 수분의 영향이 작용한 것으로 생각된다. 생활폐기물 충전 후 공기 주입방식을 변화시킨 김 경(2005) 등의 연구에서는 약 15 mm의 침하가 있었다.¹⁴⁾

본 연구에서 반응기내 온도변화는 외기가 25°C로 유지되는 항온실에서 온도를 측정하였다. 두 반응기의 온도변화는 큰 차이가 없었으며, 운전기간 내내 20~28°C를 유지하였다. 유기성오니의 수분함량에 따른 온도변

화는 차이가 없었지만 침하량 부분에서는 수분함량이 높았던 Exp.85가 수분함량이 낮았던 Exp.75 보다 더 많은 침하를 일으킨 것으로 평가되었다.

IV. 결 론

본 연구는 유기성오니의 수분함량을 75%(Exp.75)와 85%(Exp.85)의 두 가지 조건으로 변화시켜 매립하였을 때 수분함량 변화에 따른 매립가스, 악취 및 침출수의 변화를 살펴보고, 현행 유기성오니의 직매립금지 조치에 대한 타당성을 검토해 보고자 실시되었으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 누적가스발생량을 살펴보면 Exp.75에서는 총 1,500 l, Exp.85에서는 총 2,064 l의 가스가 발생되어, 수분함량이 85%인 경우에 75%인 경우보다 30% 이상 더 많이 발생되었다. Exp.75와 Exp.85에 대하여 TS 건조기준으로는 64.1 l/kg와 157.1 l/kg, VS 건조기준으로는 각각 113.6 l/kg와 266.2 l/kg되며 VS 기준으로 비교할 때 차이가 가장 뚜렷하게 나타났다. 메탄가스 조성비는 약간의 차이만 있을 뿐 전체적으로 볼 때 두 모형매립조에서 메탄과 이산화탄소가 6:4를 나타내어 가스조성비에서는 큰 차이가 없었다. 가스발생량과 가스조성을 종합하여 판단할 때 총가스발생량 중 메탄의 양은 Exp.75와 Exp.85에서 각각 1,050 l와 1,238 l로 Exp.85에서 더 많이 발생하였다.

2. 악취 중 황화수소는 Exp.85에서 3~150 ppmv로 Exp.75의 2~30 ppmv 보다 5배 정도의 높게 발생되어 수분함량이 높은 유기성오니의 매립은 환경적으로 더욱 바람직하지 않은 것으로 판단되었다.

3. Exp.75에서는 침출수가 전혀 발생되지 않았으며, Exp.85에서는 420 ml가 발생되어, 침출수 발생면에서도 수분함량이 85%인 유기성오니를 매립하는 것은 더욱 바람직하지 않은 것으로 평가되었다.

4. 유기성오니의 수분함량에 따른 온도변화는 차이가 없었지만 침하량에서는 Exp.85가 55 mm이었으며 Exp.75는 10 mm로 Exp.85에서 더 많은 침하를 일으켰다.

5. 종합적으로 판단할 때, 수분함량이 85%(Exp.85)인 경우에는 가스발생면에서 볼 때 분해가 더 활발히 일어났으나, 악취와 침출수 등 매립지 주변환경에 미치는 영향을 고려해 볼 때는 수분함량이 낮은(75%, Exp.75) 유기성오니의 매립보다 더 심각한 환경문제를 야기시켰다. 그러나 수분함량이 75%와 85%인 두 유기성오니의 매립에서 모두 인체에 위해한 수준의 악취물질을 발생시키고 있어 유기성오니의 직매립은 금지되어야 할

것으로 판단되며, 현행 유기성오니의 직매립금지법은 환경적으로 타당하다고 생각된다. 유기성오니는 매립보다는 재활용 또는 처리후 매립쪽으로 유도되는 것이 바람직할 것이다.

참고문헌

1. 김영구, 배재근, 류돈식 : 유기성오니 처리체계 법적·제도적 검토를 통한 개선방안 연구. 한국폐기물학회 춘계학술연구발표논문집, 512-519, 2006.
2. 신충식 : 유기성오니 처리 종합대책(안). 한국폐기물학회 춘계학술연구발표논문집, 1-17, 2006.
3. 배재근 : 유기성오니의 효율적 관리 및 처리를 위한 시스템 구축방안. 한국폐기물학회 춘계학술연구발표논문집, 79-99, 2006.
4. 범봉수, 배재호, 조광명 : 혐기성 및 준호기성 모의매립조의 운전특성 비교. 대한환경공학회지, 23(11), 1899-1907, 2001.
5. 환경부 : 폐기물공정시험법. 2004.
6. APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. 2002.
7. 류돈식, 이해승, 이찬기 : 침출수 무배출식 모형매립조를 이용한 도시폐기물 분해특성. 대한위생학회지, 15(2), 49-57, 2000.
8. 박동일, 최석규, 강동수, 안재동, 장인용 : 산업폐기물 매립지의 매립가스 발생특성에 따른 안정화 조사연구. 한국환경위생학회지, 25(1), 29-36, 1999.
9. 윤오섭 : 폐기물 매립장에서의 환경오염에 대한 조사연구. 한국환경위생학회지, 15(2), 69-73, 1989.
10. Massacci, G. : Physico-chemical characteristics and toxicology of landfill gas components, In: Landfilling of Waste: Biogas. Christensen, T. H., Cossu R., Stegmann R. (eds.), E & FN SPON, 73-84, 1996.
11. Blackey, N. C. : Model prediction of landfill leachate production. In: Landfilling of Waste: Leachate, Christensen, T. H., Cossu, R. and Stegmann, R. (eds.), Elsevier Applied Science, London, 17-34, 1992.
12. Christensen, T. H. and Kjeldsen, P. : Basic biochemical processes in landfills. In: Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, Christensen, T. H., Cossu, R., and Stegmann, R. (eds.), Academic Press, London, 29-49, 1989.
13. 한정훈, 권정안, 이경대, 김용진, 신충식, 천승규, 송수성, 유돈식, 이경호, 이동훈 : 대형모형매립조를 이용한 유기성 폐기물 매립 비율에 따른 도시고형폐기물의 침하특성 비교 실험. 한국폐기물학회 춘계학술연구발표논문집, 474-477, 2006.
14. 김경, 박준석, 이환, 이철효, 김정대 : 공기주입 방식을 이용한 매립모형조내 폐기물 안정화. 한국환경보건학회지, 31(1), 15-22, 2005.