

공기주입방식에 의한 매립지가스 안정화에 관한 현장연구

Field Study on Stabilization of Landfill Gas by Air Injection Mode

김경* · 박준석†

Kim, Kyung* · Park, Joonseok†

Abstract

This study was conducted to evaluate air injection mode on stabilization of landfill gas and to predict the time for landfill mining. It took 8 times longer for pulse aeration to get to aerobic condition, compared to continuous aeration. It was evaluated that continuous aeration mode is more preferable than pulse mode for rapid air exchange in landfill mining. High correlation ($r^2 = 0.95$) was found between continuous aeration time and time to maintain aerobic condition when $0.2\text{m}^3/\text{min}$ of air was continuously injected and stopped. The aerobic condition ($\text{CH}_4 < 5\%$) was maintained for 1.5 times longer than aeration time.

Keywords : Continuous Aeration, Pulse Aeration, Landfill Gas, Stabilization

요 지

본 연구에서는 공기주입 방식과 공기주입 시간이 매립지가스 안정화에 미치는 영향을 평가하고 매립지굴착 사업 진행시 굴착작업 시간을 판단하고자 실시하였다. 간헐주입의 경우 혐기성에서 호기성으로의 전환되는데 연속주입보다 8배 정도 긴 시간이 소요되어 매립지굴착사업과 같이 혐기성 가스를 빠른 시간 내에 호기성 가스로 치환하여 굴착작업을 수행해야 하는 경우에는 연속주입이 더 적합할 것으로 판단되었다. $0.2\text{m}^3/\text{min}$ 유량으로 공기를 연속주입한 후 중단하였을 때 공기주입 시간과 호기성 조건($\text{CH}_4 < 5\%$)이 유지되는 시간과는 비교적 높은 상관도($r^2 = 0.95$)를 나타내고 있었다. 공기주입 시간을 1이라고 볼 때 공기주입 중단 후 호기성은 약 1.5배 정도의 긴 기간 동안 유지되고 있었다.

주요어 : 연속주입, 간헐주입, 매립지가스, 안정화

* 비회원, 한솔이엠이(주), 환경영업본부, 환경영업팀, 과장

† 정회원, 강원대학교 공학대학 환경방재공학과 조교수 (wan5155@kangwon.ac.kr)

1. 서 론

최근 들어 인구증가 및 도시팽창화로 인하여 기존의 비위생 매립지와 무분별하게 버려진 오염된 땅이 도시공간의 일부로 편승됨에 따라 이의 유효적절한 이용방안이 크게 대두되고 있으나, 이들 오염부지에 잔존하는 유해가스 및 악취 유발물질에 의한 환경오염문제는 근원적 해결방안이 정립되어 있지 않아서 오염지역 복원에 많은 어려움을 나타내고 있다.

2001년 12월말까지 사용종료된 매립지는 1,170개소이며, 이 중 폐기물관리법에 의거 설치승인을 득한 매립지는 65개소(5.6%)로 대부분의 매립지가 설치승인을 득하지 않은 비위생매립지의 형태로 존재하고 있다. 이 중 매립용량 80,000 m³이상으로 전문가가 필요하다고 판단되는 종료매립지를 조사한 결과 전체 1,170개 사용종료매립지 중 사후관리대상매립지는 494개로 이 중 244개를 정밀조사대상매립지로 중점관리하고 있다. 이 중 폐기물처리기술지원단의 심의를 거쳐 정비사업대상 매립지로 최종결정되면 환경오염 정도에 따라서 우선순위를 결정하여 연차별 정비를 실시하게 된다(환경부, 2002).

일반적으로 매립된 쓰레기는 완전 분해되어 안정화되기까지는 보통 20~30년이 소요되는 것으로 알려지고 있다(농어촌진흥공사, 1998). 따라서, 종료 매립지로 인한 이차오염 방지와 토지의 효율적 이용을 위해서는 적극적인 정화방법의 도입이 필요한 실정이다. 사용종료된 매립지에서 발생하는 오염물질이 주변 토양과 생태계로의 확산되는 것을 방지하고 효율적인 분해를 위해 최근에는 사전안정화공법이 적용되고 있다(농어촌진흥공사, 1998; 남궁완 등, 1999). 사전안정화 공법은 혐기성인 매립지 내부에 공기를 주입하여 호기성 미생물이 유기물의 분해를 촉진하도록 유도함으로써 매립지가스의 발생량을 억제하고 침출수의 수질을 개선할 뿐만 아

니라 폐기물 층의 빠른 부피 감소도 유도할 수 있다(이환 등, 2000).

또한 도시폐기물매립지는 매립 후 일정기간이 경과하면 폐기물매립지를 굴착하여 재활용가능한 물질을 회수하고 부지를 재이용할 수 있으며(남궁완 등, 1998a), 이러한 매립지굴착사업을 실시할 경우 매립지 주변지역에 여러 가지 환경오염문제를 유발시킬 수 있으므로 이에 대한 대책 및 사전예방 조치가 필수적이다(남궁완 등, 1998b). 매립지굴착 사업시 문제로는 혐기성 및 악취가스 발생 등을 들 수 있다. 이러한 가스들이 굴착작업자의 건강 및 주변 생활환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 공기주입으로 매립지내부를 호기성으로 전환한 후 작업을 실시하는 것이 바람직하다.

본 연구는 공기주입 방식과 공기주입 시간이 매립지가스 안정화에 미치는 영향을 평가하고 매립지굴착사업 진행시 굴착작업 시간을 판단하고자 실시하였다. 공기는 연속주입과 간헐주입을 실시하였으며, 연속공기주입 시간은 24시간과 72시간을 실시하여 검토하였다.

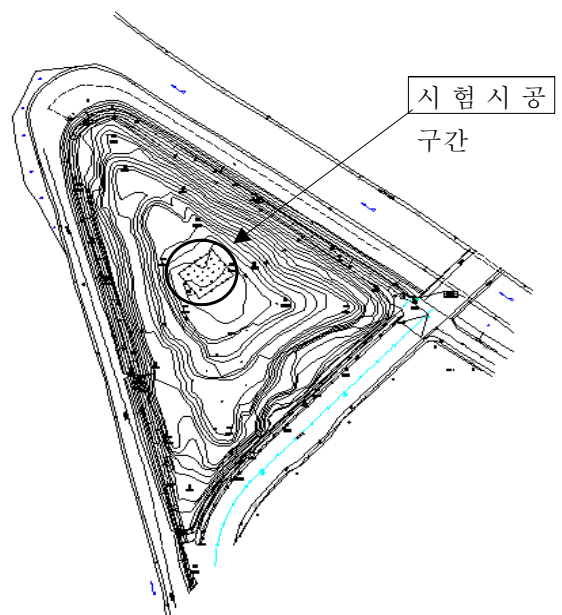


그림 1. 시험시공구간 위치도

2. 실험방법

2.1 부지현황

본 연구대상 부지는 전라북도 J시에 위치하고 있으며, 1991년부터 약 3년 동안 생활폐기물을 위생매립시설 없이 매립한 비위생매립지이다. 매립지의 면적은 43,888m²이며, 매립량은 지상 부분 422,267m³과 지하 부분 281,525m³을 합하여 총 703,792m³이다. 본 연구실험은 매립지 정상부 36m(W)× 42m(L) 구간에서 실시하였으며(그림 1 참조), 매립지 정상 및 사면에 우수배체를 위하여 HDPE sheet가 설치되어 있어 기존에 발생된 매립지가스가 매립지 내부에 축적되어 있었다. 시험시공구간은 공기주입시설로부터 약 50~150m 거리에 위치하고 있다. 본 매립장은 J천과 S천의 삼각주 지역으로 침출수에 의한 하천의 오염이 우려되고, 도심의 확장으로 해당 부지의 토지활용도가 높아져 정비사업이 요구되는 지역이다.

2.2 실험장치

공기주입시설은 매립지 내부에 강제로 공기를 주입 또는 추출하여 이산화탄소와 메탄 및 각종 악취성분을 매립지 밖으로 배출하는 장치로 크게 제어반, 송풍실, 바이오필터 시스템으로 구성되어 있다(그림 2와 3참조). 현장 여건에 따라 송풍기의 속도를 조절하여 주입(또는 추출)되는 공기의 양을 조절할 수 있으며, 공기압축기를 설치하여 압축공기를 매립지 내부로 공급할 수도 있도록 하였다. 공기주입시설로부터 공기주입정까지 거리는 50~150m로 송풍기에서부터 공기주입정까지 연결배관의 관경을 4단계(150mm, 100mm, 50mm, 25mm)에 걸쳐 조절하였으며, 공기분배기를 설치하여 압력손실을 최소화하도록 하였다. 본 장치에 사용된 송풍기의 최대 용량 및 압력은

60m³/min과 5,000mmAq로 주입용과 추출용을 각각 2대씩을 설치하여 24시간 운전을 기본으로 하여 4대의 송풍기가 연동으로 교대 운전할 수 있도록 운영하였다. 주입(또는 추출)되는 공기량을 측정할 수 있도록 유량계 및 온도계를 설치하였다. 공기분배관을 5m 간격으로 총 7개 설치하였으며, 각 분배관에서 공기를 분배하여 각 6개의 공기주입정으로 주입하였다. 주입정은 10cm 지름의 철제관으로 총 42개를 3.6m 깊이까지 설치하였으며, 시설물 설치 전 주입정의 사진을 그림 3(f)에 나타내었다.

2.3 운전조건 및 분석방법

공기주입시설에서 주입정까지 배관거리에 대한 압력손실을 고려하여 실제 주입정에 도달하는 유량은 0.2~0.4m³/min 정도가 된다. 본 연구에서는 연속주입의 경우 각 주입정에 대하여 0.2m³/min의 유량으로 24시간 연속주입을 실시하였으며, 간헐주입의 경우 동일유량으로 5분간 주입하고 25분간 휴지하여 연속주입과 간헐주입의 효율을 검토하였다. 또한 24, 48, 그리고 72시간으로 바꾸어 공기를 주입한 후 메탄농도가 회복되는 시간을 분석하여 재혐기화의 진행정도를 검토하였으며, 본 논문에서는 주로 24시간과 72시간의 효율에 대하여 검토하였다.

매립된 폐기물을 굴착한 후 폐기물공정시험법에 따라 물리적 조성, 삼성분, 그리고 원소분석

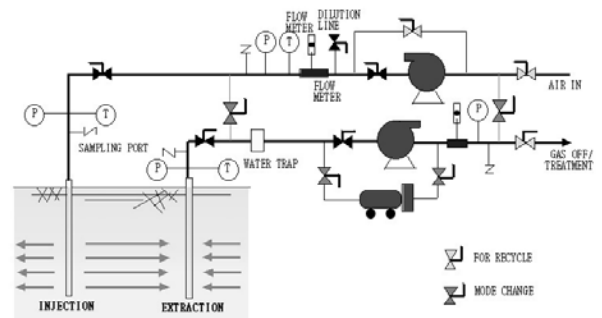


그림 2. 공기주입장치 공정도



(a) 실험장치 전경



(b) 주입·추출용 송풍기



(c) 제어시스템



(d) 공기분배기 A



(e) 공기분배기 B



(f) 주입(또는 추출)정



(g) 배관연결



(h) 설치 전경

그림 3. 실험장치 구성사진

을 실시하였다. 매립지가스의 주성분은 CH₄, CO₂, O₂, N₂로 대별할 수 있는데 휴대용 매립지가스측정기(GA-2000, Geoinstrument, UK)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 현장 측정시 수치가 안정화될 때까지 3회 반복 측정하여 평균값을 대표값으로 취하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 매립폐기물 특성

매립지 내부의 폐기물 특성을 분석하기 위하

여 각각 3m와 6m 깊이에서 약 1m³의 폐기물을 굴착한 후 손선별(manual sorting)을 통하여 물리적 조성과 삼성분을 분석하였다(표 1 참조). 굴착된 폐기물은 가연성분이 약 70%, 비가연성분이 약 30%이었다. 가연성분은 대부분 섬유류, 목재류, 고무/가죽류이었으며, 음식물류는 0.3%로 낮게 나타났다. 깊이에 따른 조성차이는 크지 않았으나 가연성분 중에서 쉽게 분해가 되는 음식물류와 종이류의 함량은 3m 깊이가 6m 깊이에서 보다 다소 낮게 나타났다. 폐기물 중 가연성분의 수분, 가연분, 회분함량은 각각 약 35~40%, 약 20~25%, 그리고 약 5~10% 정도

표 1. 굴착폐기물의 물리적 조성 및 삼성분

구분	종 류	3m 심도				6m 심도			
		조성비	수분	가연분	회분	조성비	수분	가연분	회분
가연성	음식물류	0.03	33.90	18.10	48.00	0.24	15.71	11.40	72.89
	종이류	1.93	70.03	25.85	4.12	3.56	70.20	21.74	8.06
	섬유류	30.93	55.27	35.38	9.35	39.31	63.88	21.84	14.28
	목재류	20.61	50.67	41.27	8.06	11.86	50.67	41.25	8.08
	고무/가죽류	8.48	40.99	48.80	10.21	10.22	31.54	55.13	13.33
	비닐/플라스틱류	4.62	51.54	38.61	9.85	4.53	53.47	35.11	11.42
	소 계	66.60	34.76	25.88	5.96	69.72	39.30	21.50	8.92
비가연성	금속류	3.57	-	-	100.00	5.34	-	-	100.00
	돌/도자류	3.53	-	-	100.00	1.99	-	-	100.00
	토사류	26.30	36.37	15.78	47.85	22.95	40.66	21.60	37.74
	소 계	33.40	9.57	4.15	19.68	30.28	9.33	4.96	15.99

표 2. 굴착폐기물 중 가연성분의 원소조성

구분	종 류	원 소					
		C	H	O	N	S	C/N
3m 심도	음식물류	11.50	1.98	35.14	3.34	0.04	3.40
	종이류	41.40	5.32	48.32	0.52	0.33	79.60
	섬유류	60.80	7.74	11.01	10.90	0.20	55.70
	목재류	45.60	5.77	39.23	1.17	0.17	38.90
	고무/가죽류	49.70	5.51	33.70	0.56	0.32	88.70
	비닐/플라스틱류	72.80	11.20	5.89	0.19	0.07	383.10
6m 심도	음식물류	11.70	1.09	12.94	1.38	0.01	8.40
	종이류	38.90	5.24	47.45	0.20	0.15	194.50
	섬유류	53.80	4.88	25.37	1.49	0.18	36.10
	목초류	41.20	5.24	44.70	0.46	0.32	89.50
	고무/피혁류	51.10	5.60	29.59	0.08	0.30	638.70
	비닐/플라스틱류	41.30	6.20	40.67	0.27	0.14	152.90

이었다.

굴착폐기물의 원소함량을 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 음식물류의 탄소와 질소는 11.50~11.70%와 1.38~3.34%이었으며, 이를 C/N비로 계산한 결과 3m 깊이의 폐기물은 3.4, 6m 깊이의 폐기물은 8.4로 나타났다. 안정화된 폐기

물일수록 C/N비는 낮게 나타나는데 6m 깊이의 폐기물 C/N비가 3m 깊이의 폐기물보다 다소 높은 것으로 보아 보다 덜 안정화된 것으로 판단된다. 그러나 음식물류의 경우 이 정도의 C/N비라면 대부분 모두 유기물의 안정화가 이루어졌다고 볼 수 있다.

3.2 공기주입방식의 영향

공기주입방식은 24시간 연속주입과 5분 주입하고 25분 휴지하는 간헐주입을 검토하였다. 송풍기는 가동중지 후 재가동시 많은 에너지를 소모하게 된다. 그러므로 예를 들어 15분 주입 후 15분 휴지는 연속주입의 경우와 비교할 때 큰 에너지 저감 효율이 없을 것으로 사료되어 간헐주입의 경우 시간변화를 다양하게 검토하지 못하였으며, 극한 상황인 5분 주입 후 25분 휴지를 검토하였다. 본 간헐주입의 경우 충분한 호기성을 유지시킬 수 있다면 단순한 산술계산으로는 연속주입의 경우보다 에너지 비용을 6배가량 줄일 수 있다.

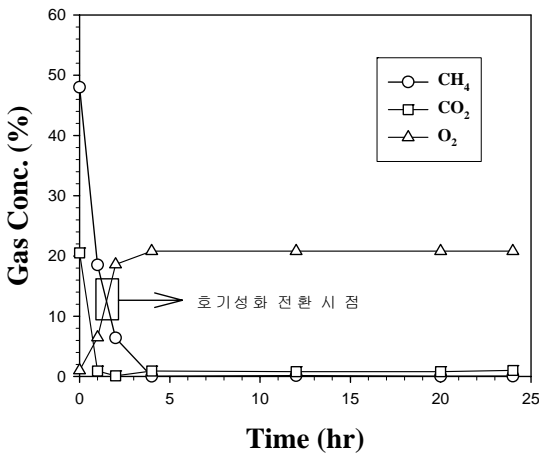


그림 4. 연속공기주입시 매립지가스 변화

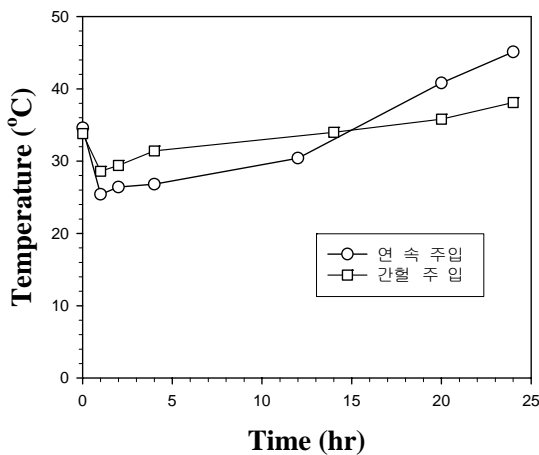


그림 5. 연속 및 간헐 공기주입시 매립지 내부온도 변화

24시간 동안 공기를 연속주입한 후 매립지가스의 농도변화를 살펴보았다(그림 4 참조). 매립지가스는 CH₄, CO₂, O₂ 농도를 중심으로 검토하였다. 총 42개의 주입점에서 발생하는 매립지가스의 변화는 각 주입점별로 다소 다르게 나타났지만 경향에는 큰 차이가 없었다. 그러므로 각 주입점에서 측정한 결과를 산술평균하여 시험대상 매립지의 대표값으로 하여 검토하였다. 공기를 주입하기 전 대상 매립지에서의 발생가스는 CH₄, CO₂, O₂ 농도가 각각 48.0%, 20.5%, 1.0%이었다. 분해가 활발히 일어나는 매립지의 경우 CH₄과 CO₂는 약 55%와 40% 정도에 이른다(이민희 등, 2005). 매립지가스 농도로 볼 때 본 시험대상 매립부지는 혐기성분해가 활발히 일어나는 혐기성단계를 지나서 마지막 안정화 단계로 진행 중인 것으로 판단된다. 이러한 부지에 대하여 공기주입을 통한 안정화를 유도한 후 매립지를 굴착하여 굴착폐기물을 처리하고 대상부지를 도시의 새로운 시설로 활용할 수 있도록 하는 것이 매립지굴착(landfill mining)사업이다. 3.6m 깊이까지 관입한 주입점에 공기를 0.2m³/min으로 연속주입하자 1시간 만에 CH₄와 CO₂ 농도는 급격한 감소를 보여 농도가 각각 18.5%와 0.9%까지 감소하였다. 이와는 반대로 O₂는 급격한 증가를 나타내기 시작하여 1시간 만에 6.5%까지 증가하였다. 공기주입에 따라 CH₄와 CO₂ 농도가 동시에 감소하고 있는 것으로 보아 주로 물리적인 치환현상으로 판단되며, 호기성 분해는 바로 일어나지 않는 것으로 보인다. 매립지굴착사업의 경우 매립지를 굴착하면서 발생하는 혐기성가스 및 미량 유해가스가 문제가 되므로 호기성을 유지하여 유기물의 안정화를 유도하는 것보다는 물리적 치환에 의한 호기성화가 주목적이 된다. 그러나 매립지 내부 온도변화를 살펴보면 공기가 주입되는 초기에는 온도가 감소하였다가 약 1시간 경부터 온도가 증가하기 시작하는 것을 볼 수 있다(그림 5 참

조). 이는 차가운 외부공기의 유입으로 초기에 온도가 감소하였으며, 부분적인 유기물의 추가 분해로 인하여 온도가 1시간 이후부터 증가한 것으로 사료된다. 매립지 내부의 온도는 대부분 유기성 폐기물의 분해로 발생하는 열에 의하여 증가하는 것으로 보아 주입공기는 과다용량이 아니었으며, 5시간 이후부터는 부분적인 호기성 분해가 이루어지고 있다는 것을 알 수 있었다. CH₄가 감소하고 O₂가 증가하면서 동일한 농도가 되는 시간은 1.5시간 경이었으며, 이 시간이 혐기성에서 호기성으로 전환되기 시작하는 시점이라고 볼 수 있다.

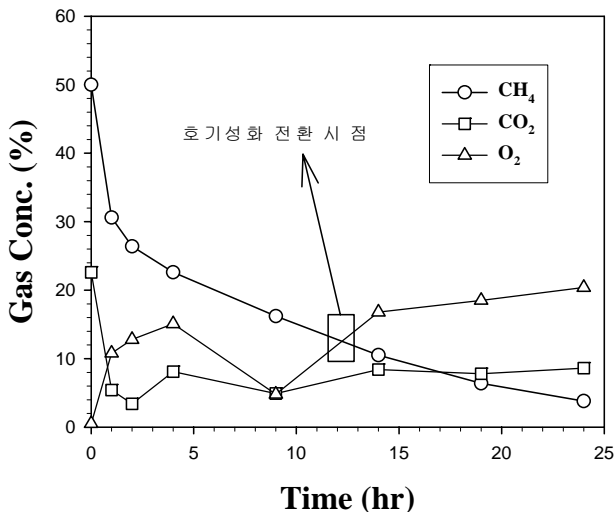


그림 6. 간헐공기주입시 매립지가스 변화

공기를 0.2m³/min 유량으로 간헐주입하는 경우의 초기 CH₄, CO₂, O₂ 농도는 각각 50.0%, 22.5%, 0.5%이었다(그림 6 참조). 5분 공기를 주입하고 25분간 휴지 후 재주입하는 방식으로 운전을 실시하자 1시간 후에 CH₄, CO₂ 농도가 30.6%와 5.4%로 감소하였고, O₂ 농도는 10.8%까지 증가하였다. 연속주입의 경우 1시간 만에 CH₄와 CO₂ 농도가 각각 18.5%와 0.9%까지 감소한 것과 비교하면 공기치환속도는 다소 느리게 나타났다. 혐기성에서 호기성으로 전환되기 시작하는 시점은 약 12시간 경으로 나타났으며, 연속주입의 1.5시간인 것과 비교해 보면 8배 정

도 늦게 호기성화가 진행됨을 알 수 있었다. 간헐주입에서는 CH₄농도가 24시간이 지나서야 폭발한계농도 하한치인 5% 미만으로 감소하였다.

일반적으로 오염된 토양을 호기성 미생물에 의하여 처리하는 바이오벤팅(bioventing) 공법의 경우 간헐주입을 하면 호기성을 충분히 유지시키면서도 송풍기 가동시간 감소에 의한 비용절감을 할 수 있다(박준석 등, 2003; 김경 등, 2005). 그러나 매립지굴착사업과 같이 유해가스를 빠른 시간 내에 치환하여 굴착작업을 수행해야 하는 경우에는 연속주입이 더 적합할 것으로 판단된다.

3.3 공기주입시간의 영향

앞 절에서는 매립지굴착사업을 위해서는 연속주입이 더 적합하다는 결과를 얻었다. 본 절에서는 0.2m³/min 유량으로 24시간과 72시간 공기를 연속주입한 후 공기주입을 중단하고 매립지가스의 농도가 어떻게 변화하는 지를 평가하였다.

그림 7에는 24시간 연속주입 후 가동을 중지하고 매립지가스의 농도를 측정된 결과이다. 가동을 중지한 직후에는 CH₄와 CO₂는 1% 미만이었으며, O₂는 약 20%로 대기 중의 농도에 가깝게 유지되고 있었다. 공기주입을 중단하자 CH₄와 CO₂는 12시간 후부터 농도가 증가하였고, O₂는 서서히 감소하기 시작하였다. 본 연구에서는 CH₄가 점점 회복되어 5%(폭발한계 하한치)에 이르기 전까지의 구간을 호기성 조건이 유지된 안정화 구간으로 설정하였다. 24시간 연속주입 후 가동 중지한 경우 약 30시간 동안 호기성 조건(CH₄ < 5%)이 유지되었다. 45시간 경에는 CH₄가 15%가 회복되어 있었다.

그림 8에는 72시간 연속주입 후 가동을 중지하였을 때 매립지가스의 농도를 나타낸 것이다. 가동중단 직후 CH₄와 CO₂는 0.2% 미만이었으며, O₂는 약 20%로 대기 중의 농도에 가깝게 유지되고 있었다. 공기주입을 중단하자 CH₄와

CO₂가 증가하고 O₂가 감소하였다. 그러나 24시간 주입의 경우 약 30시간 동안 호기성 조건이 유지된 것에 비하여 보다 긴 시간인 약 100시간 동안 호기성 조건이 유지되었다. 이는 매립지굴착을 진행할 경우 24시간 연속주입한 경우에는 1.25일간 굴착작업이 가능하고 72시간 연속주입한 경우에는 4일간 굴착작업이 가능하다는 것을 의미한다. 본 논문에서 1.25일과 4일은 하루 작업시간을 고려하지 않은 시간으로써 이 기간 동안 호기성이 유지되므로 굴착작업을 하여도 무방하다는 것을 의미한다. 암모니아(4.2ppm), 황화수소(21.0ppm) 등의 악취유발 물질들은 초기에 다소 검출되었으나 공기주입과 동시에 불검출되었으며, 안정화 기간 동안에도 불검출되어 본 논문에서는 따로 논의하지 않았다.

그림 9에는 0.2m³/min 유량으로 공기를 연속주입한 후 중단하였을 때 공기주입 시간(X)과 호기성 조건(CH₄ < 5%)이 유지되는 시간(Y)과의 상관관계를 나타낸 것이다. 따로 논의하지 않았던 48시간 주입을 포함하여 24, 72시간과 함께 평가하였을 때 공기주입 시간과 호기성 조건 유지기간과는 비교적 높은 상관도($r^2 = 0.95$)를 나타내고 있었다. 공기주입 시간을 1이라고 볼 때 공기주입 후 호기성은 약 1.5배 정도의 긴 기간 동안 유지되고 있었다.

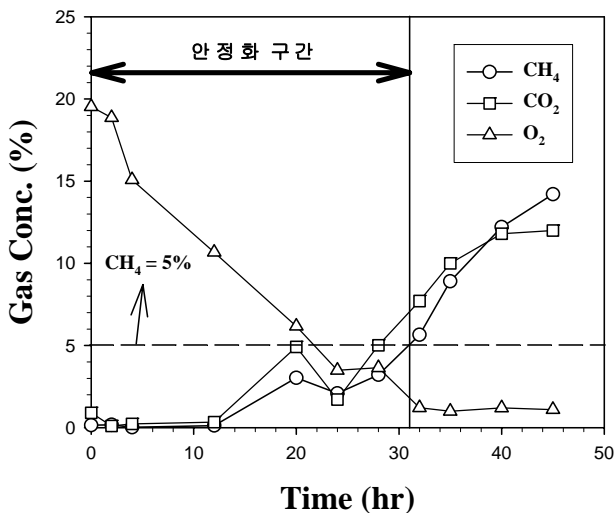


그림 7. 24시간 연속공기주입 후 중단시 매립지가스 변화

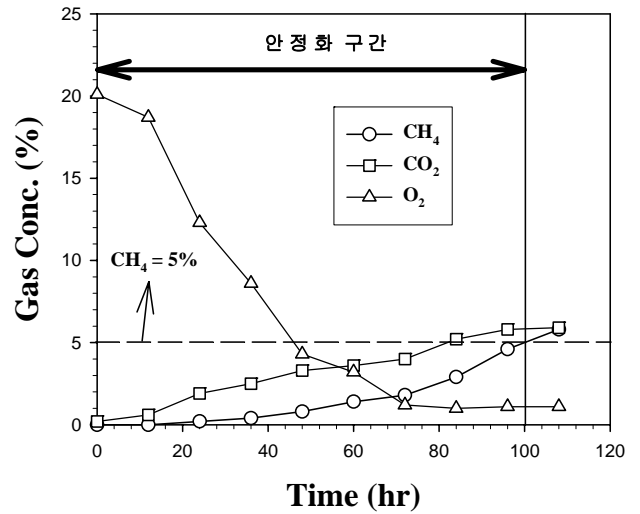


그림 8. 72시간 연속공기주입 후 중단시 매립지가스 변화

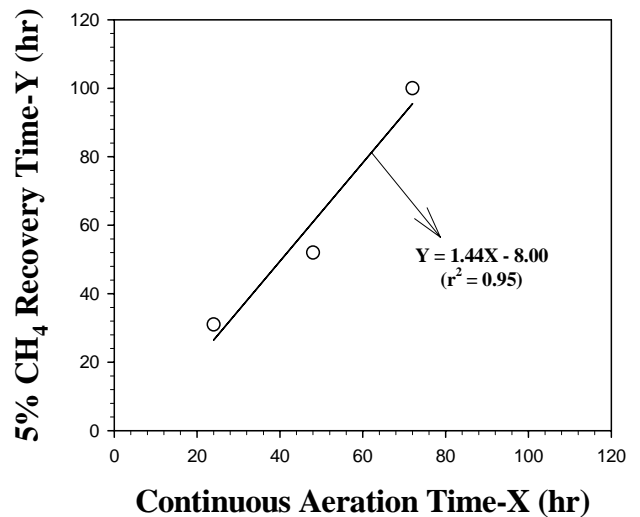


그림 9. 연속공기주입 시간과 5% CH₄농도 회복시간의 상관도

4. 결론

본 연구에서는 공기주입 방식과 공기주입 시간이 매립지가스 안정화에 미치는 영향을 평가하고 매립지굴착사업 진행시 굴착작업 시간을 판단하고자 실시하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 공기를 주입하면서 연속주입과 간헐주입의 경우 모두 CH₄와 CO₂가 O₂로 치환되었다. 그러나 CH₄와 O₂의 농도가 같아지는 시간

(혐기성에서 호기성으로의 전환점)을 기준으로 하였을 때 치환속도 면에서는 연속주입이 1.5시간, 간헐주입에서는 12시간이 소요되어 간헐이 연속주입 보다 호기성으로 전환되는데 8배 정도 긴 시간이 소요되었다. 매립지굴착사업과 같이 유해가스를 빠른 시간 내에 치환하여 굴착작업을 수행해야 하는 경우에는 연속주입이 더 적합할 것으로 판단된다.

(2) 24시간 연속주입 후 가동 중지한 경우 약 30시간 동안 호기성 조건($CH_4 < 5\%$)이 유지되었으나 72시간 연속주입 후 가동 중지한 경우에는 약 100시간 동안 호기성 조건

이 유지되었다. 이는 매립지굴착을 진행할 경우 24시간 연속주입한 경우에는 1.25일간 굴착작업이 가능하고 72시간 연속주입한 경우에는 4일간 굴착작업이 가능하다는 것을 의미한다.

(3) $0.2m^3/min$ 유량으로 공기를 연속주입한 후 중단하였을 때 공기주입 시간과 호기성 조건($CH_4 < 5\%$)이 유지되는 시간과는 비교적 높은 상관도($r^2 = 0.95$)를 나타내고 있었다. 공기주입 시간을 1이라고 볼 때 공기주입 후 호기성은 약 1.5배 정도의 긴 기간 동안 유지되고 있었다.

(접수일 : 2006. 4. 4 심사일 : 2006. 4. 7 심사완료일 : 2006. 5. 10)

참고문헌

1. 김경, 박준석, 이환, 이철호, 김승호, 남궁완, 김정대(2005), 공기주입 방식을 이용한 매립모형조내 폐기물 안정화, *한국환경보건학회지*, 제31권, 제1호, pp. 15~22.
2. 남궁완, 박준석, 김정대(1998a), 폐기물매립지 굴착사업을 위한 가스치환시 공기공급방법의 효율성 비교, *한국토양환경학회지*, 제3권, 제2호, pp. 79~88.
3. 남궁완, 박준석, 이철호(1999), 매립지굴착사업을 위한 매립지가스 제거시 공기주입량 변화의 영향, *한국폐기물학회지*, 제16권, 제1호, pp. 79~89.
4. 남궁완, 박준석, 최정영, 황의영, 윤석표, 차명철(1998b), 공기주입에 의한 폐기물 매립지가스 제거를 위한 현장기초연구, *한국폐기물학회지*, 제15권, 제7호, pp. 738~747.
5. 농어촌진흥공사(1998), 농어촌지역 소규모 쓰레기매립지 계획설계 기법개발 연구, pp. 92~93.
6. 박준석, 신현균, 신철호, 박종은, 김영석, 안병구, 김승호, 남궁완(2003), 디젤오염토양의 바이오벤팅시 공기조절 및 미생물 첨가의 영향, *대한환경공학회지*, 제25권, 제11호, pp. 1344~1351.
7. 이민희, 장병인, 윤철, 연인준, 김광렬(2005), 비위생 매립지의 물리적 조성 및 가스 분석을 통한 안정화 평가 : 노은 매립지 사례연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제6권, 제4호, pp. 27~35.
8. 이환, 이채영, 전연호, 김경, 김두일, 이철호(2000), 공기주입방식을 통한 쓰레기 안정화의 현장적용에 관한 연구, *유기성폐자원학회*, 제8권, 제4호, pp. 121~128.
9. 환경부(2002), *전국사용종료매립지 기초조사결과 및 관리대책*, pp. 72~73.