



## 매립지 특성이 매립가스 내 siloxane 발생에 미치는 영향

남상철, 강정희, 허광범\*, 이남훈<sup>†</sup>

안양대학교 환경공학과, 전력연구원\*

(2011년 07월 29일 접수, 2011년 09월 19일 수정, 2011년 09월 24일 채택)

## Effect of Landfill Site Characteristics on Siloxane Production in Landfill Gas

Sangchul Nam, Jeong-Hee Kang, Kwang-Beom Hur\*, Nam-Hoon Lee<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Anyang University, Korea Electric Power Corporation(KEPCO)\*

### ABSTRACT

Siloxane, organo-silicon compound, is used in the various forms of products such as cosmetics and detergents due to its quality physical chemistry attributes. Siloxane included in landfill gas which is caused in the process of decomposing of such products after landfill has imposed negative impacts on the operation of landfill gas utility facilities. The objective of this study was to investigate the siloxane production characteristics depending on the features of various landfill site in Korea so that the analysis was made on the landfilling age and landfill waste by in terms of its concentration, structure and composition. As for the concentration of siloxane depending on time passage, 12 landfill sites were reviewed by landfilling age. As for production attributes change of siloxane by landfill wastes, the source of wastes, physical production ration and siloxane concentration were compared in 6 landfills. The average concentration of total-siloxane within LFG is  $6.75 \text{ mg/m}^3$  and cyclic-siloxane out of it occupies over 93%. By element, D4 and D5 in order take the highest proportion regardless of total-siloxane concentration and landfilling age. Even though this study is not able to verify the different impact of each kind of wastes on the generation of siloxane, it is confirmed that total-siloxane and cyclic-siloxane decrease in line with the increase of landfilling age as it does in the first order decay model for landfill gas.

Keywords : Landfill gas, Siloxane, Landfilling age, Waste composition, First order decay model

<sup>†</sup>Corresponding author(nhlee@anyang.ac.kr)

## 초 록

유기규소화합물인 siloxane은 물리화학적으로 우수한 특성으로 인하여 화장품이나 세제 등과 같이 우리 생활에서 다양한 제품 형태로 사용된다. 이러한 제품의 사용 후 매립되어 분해되는 과정에서 매립 가스에 포함된 siloxane은 매립가스 자원화 시설의 운영 시 악영향을 미친다. 본 연구에서는 국내 여러 매립지 특성에 따른 매립가스 내 실록산 발생특성을 파악하기 위하여 매립연령과 매립폐기물에 따른 siloxane 발생특성을 실록산의 농도, 구조 및 성분별로 고찰하였다.

시간에 따른 실록산 발생특성은 매립종료 전·후와 각 매립지의 매립연령별로 12개 매립지를 대상으로 검토하였으며, 매립폐기물에 의한 siloxane의 발생특성 변화는 6개 매립지를 대상으로 매립폐기물의 발생원 및 물리적 조성의 비율과 siloxane 농도를 비교하였다. 매립가스 내 total-siloxane의 농도는 평균  $6.75 \text{ mg/m}^3$  이었으며, cyclic-siloxane이 이 중 93% 이상을 차지한 것으로 나타났다. 성분별 실록산은 매립연령과 관계없이 D4 및 D5가 순서대로 가장 높은 비율을 차지하였다. 본 연구에서 매립폐기물의 종류(조성)가 실록산 발생에 미치는 영향은 확인할 수 없었으나, total-siloxane 및 cyclic-siloxane의 농도는 매립가스 일차분해모델과 같이 매립연령이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 매립가스, siloxane(유기규소화합물), 매립연령, 매립폐기물 조성

## 1. 서론

실록산(siloxane)은 규소와 산소의 결합에 (Si-O-Si) 각 규소마다 다른 작용기(주로 메틸기)가 결합된 유기규소화합물을 의미한다. siloxane의 분류는 분자구조상 고리구조를 'D', 선형구조를 'L'로 구분하고 있으며, 매립가스에 포함된 siloxane은 L2~L5, D3~D6 등의 다양한 형태로 존재하고 있다. 매립가스에서 siloxane이 검출되는 원인으로는 siloxane을 함유한 제품들이 매립 후의 분해과정에서 저분자화 된 siloxane 성분이 휘발되면서 매립가스에 포함되기 때문인 것으로 보고된 바 있다<sup>1),2)</sup>. Siloxane이 함유된 제품들은 물리화학적으로 우수한 특성으로 인하여 [Table 1]과 같이 널리 사용되고 있으며, 특히 개인적인 케어제품 (deodorant, 피부케어 및 헤어 컨디셔너 등)으로 일상생활에서도 많이 사용되고 있다<sup>3)-5)</sup>.

대기 중의 siloxane은 메탄 및 이산화탄소와 같이 지구온난화 또는 인체유해성과 관련되어서는 알려진 바가 없고, 매립가스 내에서도 농도가

낮기 때문에 상대적으로 소홀하게 다루어져 왔다. siloxane은 각각의 매립지, 시간 및 지역에 따라 농도는 수 배에서 수십 배의 차이로 다양하게 나타나고는 있으나 메탄이나 이산화탄소와 같은 다른 물질에 비하여 매우 낮은 농도로(일반적으로 0.2~2 ppm 정도) 발생한다<sup>6),7)</sup>. 그러나 Tower (2003)에 의하면 D5가 1 ppm ( $15.7 \text{ mg/m}^3$  LFG인 매립가스를 140 SCFM (75 psig)의 유량으로 연소할 경우 매년 26 kg의 이산화규소가 발생하게 되고, 이 중 침적되는 양을 0.5%로 가정하였을 경우 매년 130 g의 이산화규소가 가스엔진 내부에 침적된다고 보고한 바 있다<sup>8)</sup>. 이로 인하여 매년 1 MW 엔진보수비용은 연간 \$60,000이상이며, 가스엔진 외에도 마이크로터빈, 연료전지, 보일러 및 밸브나 가스관로 등에도 다양한 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 게다가 siloxane의 연소에 의해 발생된 이산화규소는 안정적인 화학적 구조와 낮은 밀도로 인하여 제거가 어렵고, 소량으로도 자원화 시설에 미치는 영향이 심화된다. 따라서 최근 siloxane은 매립가스의 효율적인 자원화를 위하

[Table 1] The Types of Siloxanes and Their Utilization

Substance (Formular)	Abbr.	Products containing siloxane <sup>11)</sup>
Hexamethyldisiloxane (C <sub>6</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> )	L2	Unknown
Octamethyltrisiloxane (C <sub>8</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> )	L3	Lacquers, paint, varnishes
Decamethyltetrasiloxane (C <sub>10</sub> H <sub>30</sub> O <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> )	L4	
Dodecamethylpentasiloxane (C <sub>12</sub> H <sub>36</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> )	L5	Unknown
Hexamethylcyclotrisiloxane (C <sub>6</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> )	D3	Chemical products, cosmetics, motor vehicles and motorcycles, perfume
Octamethylcyclotetrasiloxane (C <sub>8</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> )	D4	Adhesives, anti adhesive agents, binding agents, cleaning/washing agents, construction materials, cosmetics, fillers, fuel additives, impregnation materials, lacquers, paints, process regulators, reprographic agents, surface treatment
Decamethylcyclopentasiloxane (C <sub>10</sub> H <sub>30</sub> O <sub>5</sub> Si <sub>5</sub> )	D5	Adhesives, binding agents, cleaning/washing agents, filler, fuel additives, impregnation material, lacquers, paints, process regulators, reprographic agents, softeners, surface active agents, surface treatment, varnishes
Dodecamethylcyclohexasiloxane (C <sub>12</sub> H <sub>36</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> )	D6	Lacquers, paint, surface treatment, varnishes

여 수분 및 황화수소와 함께 반드시 전처리가 필요한 물질로 인식되고 있다<sup>9),10)</sup>.

국내에서는 매립가스의 다년간의 자원화시설 운영을 통해 siloxane의 전처리 필요성을 인지하고 있으며, 일부 자원화시설에서 siloxane 제어를 위한 전처리 공정을 운영하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 자원화시설로 유입되는 siloxane에 대한 농도의 기준이나 매립가스 내 siloxane의 함유정도, 시료채취 및 분석방법 등에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다<sup>2)</sup>. 매립가스 내 포함된 물질의 발생특성과 양을 예측하기 위해서는 폐기물 내 특정 물질의 최대발생능력, 발생속도, 폐기물의 조성 및 매립량 등이 파악되어야 한다. 현재 siloxane의 경우에는 [Table 1]과 같이 siloxane이 포함된 일부 제품을 제외하면 폐기물의 조성별 함유량과 siloxane 각 물질별 분해 및 발생 속도 등에 대해서는 밝혀진 바가 거의 없다<sup>11)</sup>. 또한 국내 매립지에 대한 매립지별 장기간에 걸쳐 축적된 siloxane 측정 데이

터가 없으며, 매립지에서는 폐기물의 매립과 분해가 지속적으로 이루어지고 있기 때문에 매립지 내 전체 폐기물의 조성과 성상에 대한 siloxane 발생특성과의 상관관계를 직접적으로 파악하기는 현실적으로 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 폐기물매립지에서 매립가스 자원화시설 계획시 전처리 시설의 설치 필요성 검토, 적정 공정설계 등에 필요한 매립지 특성별 siloxane의 발생량에 대한 정확한 정보를 제공하기 위하여 폐기물매립지에서 발생하는 매립가스 내 siloxane을 측정·분석하고, 매립지의 특성이 siloxane 발생에 미치는 영향을 매립폐기물과 매립연령에 대한 일차분해모델의 적용을 통해 간접적으로 파악하였다.

## 2. 실험방법 및 연구대상 매립지 특성

### 2.1 Siloxane 채취 및 분석방법

현재까지 매립가스중에 함유된 siloxane 시료

채취의 표준화가 이뤄져 있지 않기 때문에 선행 연구를 바탕으로 Canister법에 비하여 정밀도가 높고 검출한계가 10배 정도 낮은 장점을 가진 임핀저 흡수법을 siloxane 시료 채취방법으로 사용하였다<sup>12)</sup>. 펌프를 통하여 일정한 유량을 유지한 매립가스는 각각 6 mL의 메탄올을 흡수액으로 하는 4 단의 임핀저에 흡수되도록 하였다<sup>13),14)</sup>. 임핀저는 가스의 흡수율을 증가시키기 위하여 4±2 °C의 저온으로 유지하였으며, 이때 유량은 100 mL/min으로 유지시키고, 임핀저 장치 후단에는 습식 가스미터를 설치하여 흡수한 가스의 총량 및 유량이 일정하게 유지되는지 재확인하였다<sup>13),14)</sup>.

한편 매립가스 내에서 다양한 형태로 존재하는 siloxane의 분석을 위하여 선택성이 우수한 GC/MS (Shimadzu QP-5050, Japan)를 이용하였으며, 각각 L2~L5, D4~D6의 7가지 물질을 분석하였다. Total-siloxane 농도는 이 7가지 성분별 siloxane의 농도를 합한 값을 사용하였으며, 구조별로 L2~L5를 linear-siloxane (L-siloxane), D4~D6을 cyclic-siloxane (D-siloxane)으로 구분하였다.

## 2.2 대상 매립지 특성

본 연구에서는 국내 수도권매립지, 구미, 광주, 영주 및 마산 매립지의 총 12개의 지점에서 발생하는 매립가스를 대상으로 하였으며 각 지점의 특성을 다음 [Table 2]에 나타냈다. 각각 1992년과 1990년에 매립을 시작한 수도권매립지의 제1매립지와 구미 매립지는 매립이 종료되어 사후관리 중이며, 수도권매립지의 제2매립지, 광주 매립지, 마산 매립지 및 영주 매립지는 현재 매립이 진행 중에 있다. 매립연령은 매립종료 전·후에 대한 siloxane 발생특성을 시간에 따라 더 자세히 파악하기 위하여 각 매립지의 지점별로 나타냈으며, 매립을 시작한 시점부터 siloxane을 분석한 시점까지의 기간을 의미한다.

매립폐기물의 특성은 폐기물의 발생원에 따라 생활폐기물과 사업장폐기물로 분류하였으며, 사업장폐기물은 사업장 생활폐기물, 사업장 배출시설계 폐기물 및 건설폐기물로 재분류 하였다. 각 폐기물의 비율은 매립폐기물의 분류는 수도권매립지관리공사의 '수도권매립지통계연감'의 연도별 자료와 환경부의 '전국 폐기물 발생 및 처리

[Table 2] Landfill Site Descriptions

Landfill site	Operation	Landfill period	Landfilling age*	Incoming source** (%)			
				M	General industrial wastes		
					D	F	C
Sudo-kwon	Closed	1-total	92.10~00.10	53.2	10.6	12.9	23.3
		1-I	92.10~00.07				
		1-M	93.03~99.12				
		1-Q	93.06~96.12				
Gumi		90.05~07.12	20.75	21.6	1.4	72.3	4.8
Sudo-kwon	Landfilling	2-total	00.10~	28.7	10.9	11.7	48.7
		3-C	01.04~				
		2-F	04.01~				
		4-G	05.03~				
Gwangju		05.01~	5.00	54.9	8.8	33.5	2.8
Masan		95.09~	15.42	68.7	10.7	20.6	0.1
Yeongju		99.01~	10.92	85.7	0.4	13.9	0.0

\* Landfilling age : Sampling time (year) - Landfill initiation time (year)

\*\* M : Municipal waste, D : Domestic waste, F : Facilities waste, C : Construction waste

현황'의 최근 5년(2005~2009년)간 자료를 가중 평균으로 계산하였으며, 수도권매립지를 제외한 광역시 또는 도시 간의 폐기물 이동은 없는 것으로 가정하였다<sup>15),16)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

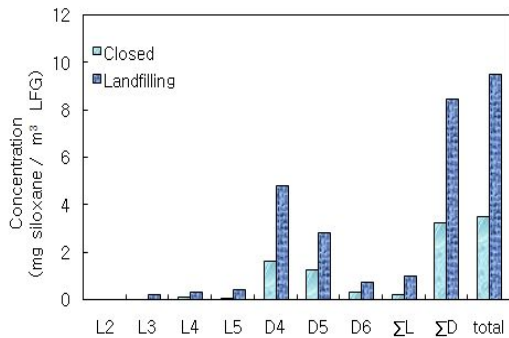
#### 3.1 매립 진행여부에 따른 매립가스 내 siloxane 발생특성

[Table 3]에는 각 매립지의 매립가스 내 siloxane을 2회 분석한 평균값을 나타냈다. LFG 내 총 siloxane의 농도는 1.85~13.25 mg/m<sup>3</sup> (평균 6.75 mg/m<sup>3</sup>)으로 선행연구들의 결과와 유

[Table 3] Results of Siloxane Analysis

Landfill site	L2	L3	L4	L5	D4	D5	D6	Total	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Sudo-kwon	1-total	ND (0.0)	ND (0.0)	ND (0.0)	ND (0.0)	2.04 (55.5)	1.36 (36.9)	0.28 (7.6)	3.68 (100.0)
	1-I	ND (0.0)	ND (0.0)	0.08 (1.8)	ND (0.0)	1.99 (45.4)	1.72 (39.1)	0.60 (13.7)	4.39 (100.0)
	1-M	ND (0.0)	ND (0.0)	0.05 (10.0)	0.19 (4.1)	1.99 (42.4)	1.91 (40.7)	0.56 (11.8)	4.69 (100.0)
	1-Q	ND (0.0)	ND (0.0)	0.03 (1.6)	ND (0.0)	0.93 (50.3)	0.69 (37.0)	0.21 (11.1)	1.85 (100.0)
Gumi	ND (0.0)	0.03 (1.0)	0.50 (16.8)	0.36 (12.1)	1.22 (41.0)	0.86 (28.9)	0.01 (0.2)	2.98 (100.0)	
Average (Closed)	ND (0.0)	0.01 (0.3)	0.13 (3.5)	0.11 (2.8)	1.63 (47.6)	1.31 (36.5)	0.33 (9.3)	3.27 (100.0)	
Sudo-kwon	2-total	0.04 (0.5)	ND (0.0)	ND (0.0)	ND (0.0)	4.93 (62.8)	2.27 (28.9)	0.61 (7.8)	7.85 (100.0)
	2-F	0.01 (0.1)	ND (0.0)	0.41 (3.1)	ND (0.0)	7.05 (54.2)	4.64 (35.7)	0.90 (6.9)	13.01 (100.0)
	3-C	ND (0.0)	ND (0.0)	0.08 (1.1)	ND (0.0)	3.35 (48.1)	2.44 (35.0)	1.10 (15.8)	6.97 (100.0)
	4-G	0.04 (0.4)	ND (0.0)	0.58 (5.8)	0.22 (2.1)	4.76 (47.1)	3.19 (31.6)	1.32 (13.1)	10.09 (100.0)
Gwangju	0.02 (0.2)	ND (0.0)	0.38 (2.8)	0.25 (1.9)	8.87 (66.9)	2.42 (18.3)	1.32 (10.0)	13.25 (100.0)	
Masan	ND (0.0)	0.64 (11.8)	0.39 (7.3)	0.66 (12.2)	1.17 (21.8)	2.52 (46.9)	ND (0.0)	5.37 (100.0)	
Yeongju	ND (0.0)	ND (0.0)	ND (0.0)	0.67 (9.6)	4.32 (62.1)	1.49 (21.4)	0.47 (6.8)	6.95 (100.0)	
Average (Landfilling)	0.02 (0.1)	0.09 (1.1)	0.26 (2.5)	0.26 (2.9)	4.92 (53.3)	2.71 (30.9)	0.82 (9.1)	9.07 (100.0)	
Total average	0.01 (0.1)	0.06 (0.7)	0.21 (3.0)	0.19 (2.9)	3.55 (50.8)	2.12 (33.4)	0.61 (9.2)	6.75 (100.0)	

사한 범위로 나타났다<sup>1),2),17),18)</sup>. [Fig. 1]은 매립이 종료된 매립지와 현재 매립중인 매립지의 매립가스 내 siloxane 농도를 성분 및 구조별로 비교한 그림이다. 매립이 진행 중인 매립지들의 siloxane 평균농도(9.07 mg/m<sup>3</sup>)는 매립이 종료된 매립지(3.52 mg/m<sup>3</sup>)에 비하여 높게 나타났으며, 이는 매립종료 후에 비하여 폐기물의 분해가 활발히 일어나고 있는 매립초기에 siloxane의 발생량이 많은 것으로 판단된다.



[Fig. 1] Comparison of siloxane concentration between landfiling and closed landfill.

구조별 siloxane의 농도는 매립종료 여부나 매립지와 관계없이 선형구조의 linear-siloxane 농도(ΣL)에 비하여 고리구조의 cyclic-siloxane 농도(ΣD)가 높게 나타났으며, cyclic-siloxane의 농도는 사용종료 매립지가 3.27 mg/m<sup>3</sup>로 현재 매립이 진행 중인 매립지의 8.45 mg/m<sup>3</sup>에 비하여 두 배 이상 차이가 났다. 그러나 total-siloxane에서 cyclic-siloxane이 차지하는 비율은 사용종료 매립지평균과 사용중인 매립지의 평균 모두 93.4%로 같게 나타났다.

결국 매립종료 전·후 total-siloxane의 농도는 감소하지만 매립가스 내 cyclic-siloxane과 linear-siloxane의 비율이 일정하게 유지되는 것으로 미루어, 구조별 siloxane은 매립지의 특성 중 시간 외의 다른 인자에 의해 영향이 있을 것으로 판단된다.

성분별 siloxane 농도는 모든 매립지에서 공통

적으로 D4와 D5의 비율이 높게 나타나, 매립가스 내 siloxane의 농도는 매립지 주변 환경 및 매립지 내 온도 등 다양한 요인에 의해 편차가 발생할 수 있으나<sup>19)</sup>, 일반적으로는 D4와 D5가 가장 높게 나타난다고 보고한 선행연구와 결과를 재확인할 수 있었다<sup>1),10),13),14)</sup>. 본 연구대상 매립지별 siloxane 성분비는 마산 매립지에서만 D5, D4 순으로 높게 나타났으며, 마산 매립지를 제외한 모든 결과에서 D4가 가장 높고 그 다음으로 D5가 높게 나타났다.

### 3.2 매립연령에 따른 매립가스 내 siloxane 발생특성

앞선 매립지의 사용종료 여부에 따른 siloxane의 농도결과와 매립연령에 따른 total-siloxane의 감소를 보고한 선행연구를<sup>20)</sup> 근거로 매립지 특성 중 시간과 관련하여 siloxane 발생특성을 살펴보았다. 다음 [Fig. 2]와 [Fig. 3]은 매립을 개시한 날로부터 시료를 분석한 시점까지의 경과된 개월 수인 매립연령을 X 축으로, L2~L5, D4~D6까지의 siloxane 농도의 합인 total-siloxane 농도를 Y 축으로 나타낸 그래프이다. [Fig. 2]와 [Fig. 3]은 매립폐기물의 조성을 고려하여 전체 매립지의 분석결과와 동일지역의 폐기물이 매립된 수도권매립지의 8 지점의 siloxane 분석결과를 분류하였다.

매립연령이 증가함에 따라 total-siloxane은 감소하는 경향을 나타냈으며, 전체 매립지의 매립연령에 따른 siloxane의 농도는 [Fig. 2]과 같이 결정계수가 0.81로 매우 높은 상관성을 보였으나, 수도권매립지의 결과(R<sup>2</sup>=0.74)는 오히려 이보다 낮게 나타났다. 수도권매립지의 분석결과가 상관성이 낮게 나타난 원인은 [Table 2]에 나타난 바와 같이 제1매립지와 제2매립지에 매립된 폐기물의 조성 차에 의한 것으로 판단된다. 매립가스 내 siloxane은 siloxane이 함유된 매립폐기물의 분해에 의해 발생되기 때문에<sup>1),2)</sup> 매립폐기물의 종류별 매립량과 siloxane의 함량은 매립가스 내 siloxane 발생에 있어서 가장 우선적으로 영향을 미칠 것이다. 그러나 매립연령에 따른

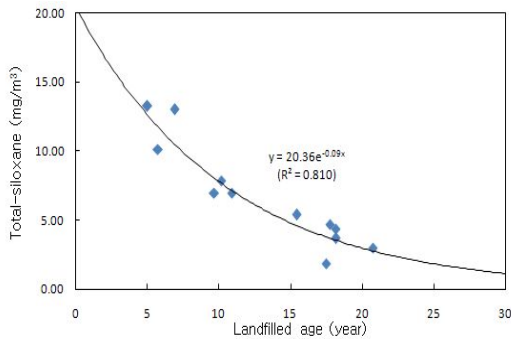
total-siloxane의 농도의 비교결과가 일차분해모델과 유사한 지수함수의 형태임과 동시에 높은 상관성을 나타내는 것으로 미루어 매립연령이 siloxane의 발생과 상관성이 있으며, 그에 미치는 영향 또한 큰 것으로 판단된다.

[Fig. 4]에는 매립연령에 따른 구조별 siloxane의 발생특성을 나타냈다. 수도권매립지의 구조별 siloxane 분석결과 매립연령에 따른 cyclic-siloxane의 경향은 total-siloxane과 유사하게 나타났는데, 이는 total-siloxane 중 cyclic-siloxane이 차지하는 비율이 93.4%로 매우 높기 때문에 충분히 예측 가능한 결과로 볼 수 있다. Linear-siloxane의 경우에는 [Fig. 4]와 같이 매립연령에 따른 영향이 cyclic-siloxane에 비하여 적은 것으로 나타났으며, 이는 linear-siloxane의 분석 시 낮은 회수율에 의한 것으로 판단되었다.

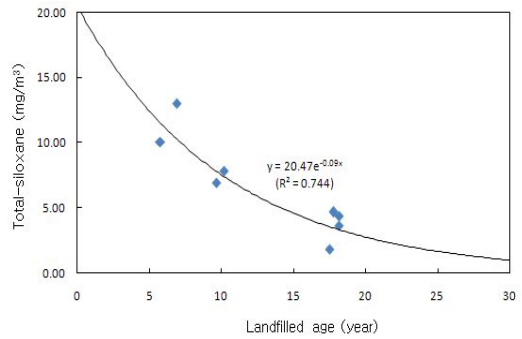
각 성분별 siloxane의 분석결과는 [Fig. 5]에 그림으로 나타냈다. 앞서 언급한 바와 같이 전체 매립지에서 D4와 D5가 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났으나, 매립연령에 따른 특정 성분의 변화는 보이지 않았다.

### 3.3 매립가스 내 siloxane 발생 예측을 위한 모델

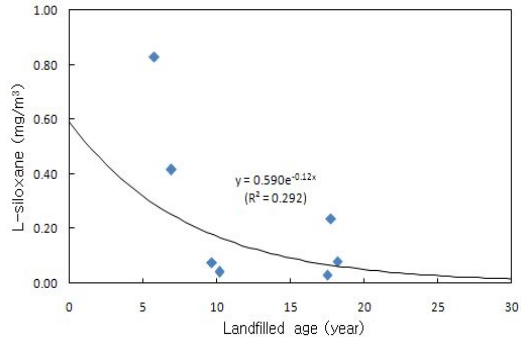
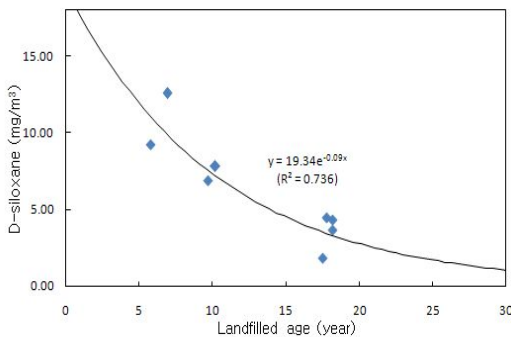
매립폐기물에 따른 siloxane 발생특성을 파악하기 위하여 [Table 2]의 매립폐기물에 대한 자료를 바탕으로 siloxane의 발생 농도를 비교하였으나 특정 분류에 따른 실록산의 변화를 발견할 수 없었다. 본 연구에 사용된 자료와 결과를 바탕으로 시간에 따른 실록산 발생특성 외에 필요한 인자를 파악하기 위하여 매립가스에 대한 일



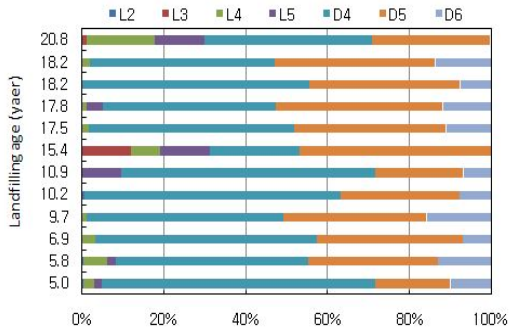
[Fig. 2] Total-siloxane concentration depending on landfill age in all 12 sites.



[Fig. 3] Total-siloxane concentration depending on landfilling age in 8 sites of Sudokwon.



[Fig. 4] Concentration of linear-siloxane and cyclic-siloxane depending on landfilling age.



[Fig. 5] Siloxane concentration by element depending on landfilling age.

차분해모델을 다음 식과 같이 응용하였다.

$$C_{Sr} = \sum_{i=1}^n L_i R_i (1 - e^{-k_i t}) / G$$

and 
$$Q_{Sx} = \sum_{i=1}^n L_i R_i (1 - e^{-k_i t})$$

where,  $C_{Sx}$  : concentration of siloxane (mg siloxane / m<sup>3</sup> LFG)

$Q_{Sx}$  : accumulated siloxane by time elapsed (m<sup>3</sup> siloxane / year)

L : siloxane generation potential (mg siloxane / ton waste)

R : landfilled waste (ton waste / year)

k : siloxane generation velocity constant (year<sup>-1</sup>)

t : landfilled age (or time elapsed) (year)

I : kinds of waste

G : LFG generation by time elapsed

1970년대 이후 유럽을 중심으로 매립가스의 효율적인 자원화를 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이에 따라 메탄과 이산화탄소, 황화수소 등의 발생 특성과 발생예측을 위한 다양한 방법이 제시되어 왔다. 위 식은 매립가스 및 메탄 발생예측에 대한 연구 중 일차분해모델을 적용한 예로 국내 연구 가운데 서동천 등(2001) 및 천

승규(2010)가 매립가스와 메탄가스에 대한 발생량 예측을 위하여 적용한 바 있는 IPCC Reference Method를 응용한 식이다<sup>21)~23)</sup>.

이 식에서는 siloxane의 농도( $C_{Sx}$ )와 siloxane의 발생량( $Q_{Sx}$ )이 시간(t)과 폐기물의 조성(L · R), 즉 siloxane의 발생은 매립지의 매립연령(t)과 siloxane 최대발생능력(L) · 폐기물매립량(R)의 두 변수에 의한 종속변수임을 나타낸다. G는 단위 시간당 siloxane 발생량( $Q_{Sx}$ )을 단위 매립가스 부피에 대한 siloxane의 양(mg siloxane / m<sup>3</sup> LFG)인 농도( $C_{Sx}$ )로 환산하기 위해 사용하였다.

본 연구에서 siloxane 발생에 대한 매립폐기물의 영향의 경향이 나타나지 않은 원인으로는 매립폐기물 특성과 관련된 자료와 siloxane과의 연관성을 들 수 있다. IPCC Reference Method의 경우 매립가스는 메탄 및 이산화탄소가 100%에 가깝고 두 가스 모두 탄소가 핵심원소로 구성되어 있기 때문에 매립폐기물의 조성 별 탄소의 함량으로 가스발생을 예측할 수 있다. 반면 siloxane은 규소를 중심으로 한 화합물이기 때문에 매립폐기물의 조성별 규소 함량이 필수적이다. Dewil 등(2006)이 성분별 실록산이 포함된 물질의 분류에 대해 보고한 바를 제외하면 폐기물 조성별 규소의 함량과 siloxane 최대발생량에 대한 연구는 거의 없다<sup>11)</sup>.

따라서 기존에 매립가스가 발생되고 있는 매립지에서 siloxane의 발생 예측을 위해서는 폐기물 조성별 siloxane의 함유량에 대한 지속적인 연구가 필요하고, 추가적으로 siloxane의 발생원인 매립지 내에서 siloxane 발생을 제어하기 위한 매립지 운영방법에 대한 개발이 필요할 것이다.

#### 4. 결론

매립가스 자원화시설 계획 시에는 미량물질의 종류와 농도 등에 따라 전처리 시설의 설치 필요성을 검토하고 적정 공정 설계가 필요하다. 본 연구에서는 이 때 요구되는 매립지 특성별 siloxane의 발생량에 대한 정확한 정보를 제공하



기 위하여, 매립폐기물과 매립연령에 따른 siloxane 발생특성을 siloxane의 농도, 구조 및 성분별로 고찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구 대상 매립지의 매립가스 내 total-siloxane 농도는 평균  $6.75 \text{ mg/m}^3$  ( $1.85 \sim 13.25 \text{ mg/m}^3$ )으로 나타났으며, 현재 매립중인 매립지의 total-siloxane 농도는  $9.07 \text{ mg/m}^3$ 로 사용종료 매립지( $3.52 \text{ mg/m}^3$ )에 비하여 높게 나타나 폐기물의 분해가 활발히 일어나고 있는 매립초기에 siloxane의 발생량이 많은 것으로 판단하였다.
2. 구조별 siloxane의 발생농도 또한 total-siloxane과 같이 사용종료 전·후로 큰 차이가 있었으나 구조별 실록산의 비율은 linear-siloxane이 6.6%, cyclic-siloxane이 93.4%로 일정하게 나타났으며, 성분별 siloxane의 농도는 사용종료 여부와 관계없이 D4 및 D5 성분이 순서대로 가장 높은 비율을 차지하였다.
3. 매립연령에 따른 total-siloxane의 발생특성은 시간에 따라 total-siloxane 농도가 감소하는 경향이 나타났으며, siloxane 발생예측을 위한 일차분해모델에 수렴하였다.
4. 폐기물의 분류에 일반적으로 사용되는 발생원에 의한 분류나 물리적조성에 의한 분류가 siloxane의 발생특성에 미치는 영향에 대해서는 상관성을 파악할 수 없었으나, 이는 탄소 원자를 중심으로 한 폐기물의 분류방법이 규소 원자를 중심으로 이루어진 siloxane의 발생 특성을 예측하기 위한 변수로 적절하지 못함을 의미한다.

따라서 매립가스 내 siloxane의 발생을 예측하기 위해서는 매립연령과 동시에 매립폐기물 내 siloxane 함유량에 대한 추후 연구가 필요하며, 더 나아가서 매립지의 적절한 운영을 통해 매립가스 내 siloxane의 발생 자체를 저감시키기 위한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한

국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(5MW급 바이오 가스터빈용 전처리시스템 개발). (No. 2009T100200127)

## 참고 문헌

1. 서동천, 윤수경, 김문정, 오일균, 권석구, 송수성, 천승규, “매립가스 중 전처리대상 유기규소화합물(실록산)의 평가”, 한국폐기물자원순환학회지, 24, pp. 391~399. (2007).
2. 서동천, 송수성, 원종철, “흡착제에 의한 매립가스 중 휘발성 유기규소화합물(실록산) 제거특성, 대한환경공학회지, 31(9), pp. 793~802. (2009).
3. Allen R. B., Kochs P., and Chandra G., Industrial organosilicon materials, their environmental entry and predicted fate. In: Chandra, G. (Ed.), The Handbook of Environmental Chemistry, Part H: Organosilicon Materials, vol. 3. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1~25. (1997).
4. Graiver, D., Farminer, K.W. and Narayan, R., “A review of the fate and effects of silicones in the environment”, J. Polym. Environ., 11 (4), pp. 129~136 (2003)
5. Whelan M.J., Estrada E. and Egmond R., “A modelling assessment of the atmospheric fate of volatile methyl siloxanes and their reaction products”, Chemosphere, 57, pp. 1427~1437.
6. Häusler and Schreier, “Analyse siliziumorganischer Verbindungen im Deponiegas sowie CO-Messungen zur Brandfrüherkennung”. Verlag Abfall aktuell – Band 16 – Stilllegung und Nachsorge von Deponien, pp. 241~249. (2005).
7. Anorld M., and Kajolinna T., “Development of online measurement techniques for siloxanes and other trace compounds in biogas”, Waste management, 30, pp. 1011~1017. (2010).
8. Tower P., “Removal of siloxanes from landfill gas by SAGTM polymorphous porous graphite treatment systems”, 26th Annual Landfill Gas Symposium, Proceedings, SWANA (Solid

- Waste Association of North America), Tampa, Florida, US, March pp. 1~5. (2003).
9. Prabucki M.J., Doczyck W., Asmus D., "Removal of organic silicon compounds from landfill and sewer gas", In proceedings of Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 631~639. (2001).
  10. Wheless, E. and Pierce, J., "Siloxanes in landfill and digester gas update", 27th annual landfill gas symposium proceedings, Solid waste association of North America, San Antonio, Texas, US, March 22~25. (2004).
  11. Dewil R., Appels L., and Baeyens J., "Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes", Energy Conversion and Management, 47, pp. 1711~1722. (2006).
  12. Saeed, S., Kao, S., and Graening, G., "Comparison of impinger and canister methods for the determination of siloxanes in air", AWMA Symposium on air quality measurement methods and technology, San francisco, CA, November, pp. 13~15. (2002).
  13. 정새롬, 박정극, 허광범, 이채영, 이남훈, "매립가스 중에 함유된 실록산 농도의 특성", 한국폐기물 자원순환학회지, 27(4), pp. 356~362. (2010).
  14. 송선호, 엄채윤, 허광범, 이남훈, 이채영, "유기성폐기물의 혐기성 소화가스 중에 함유된 실록산 농도의 특성", 한국폐기물자원순환학회지, 27(4), pp. 348~355. (2010).
  15. 수도권매립지관리공사, 수도권매립지통계연감
  16. 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황
  17. VDI, In : K. D. L. I. V. u. D.-N. KRdL (Ed.) Measurement of Landfill Gas - Principles Beuth Verlag, Berlin. (2006).
  18. Ajhar M., Travesset M., Yuce S. and Melin T., "Siloxane removal from landfill and digester gas - A technology overview", Bioresource Technology, 101, pp. 2913~2923. (2010).
  19. 송수성, Characterization and Adsorptive Removal Methods of Siloxanes in Landfill Gas, 인하대학교 공학박사 학위논문 (2009).
  20. Pierce J., "Siloxane quantification, removal and impact on landfill gas utilization facilities", In proceedings of 8th Annual LMOP Conference and Project EXPO, Baltimore, Maryland, January 10~11. (2005).
  21. 서동천, 이동훈, 이정준, 한현수, 권정안, 김승도, 이남훈, 김낙주, 유만식, 서창일, 정용환, "폐기물의 유기탄소함량을 이용한 매립가스 발생량 예측", 한국폐기물자원순환학회지, 18(8), pp. 702~714. (2001).
  22. 천승규, "폐기물 에너지화가 수도권매립지 매립가스 발생량에 미치는 영향", 대한환경공학회지, 32(10), pp. 942~948. (2010).
  23. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 5, pp. 3.17~3.18, 3.32~3.40 (2006). 