

점토광물을 이용한 매립지 가스중 실록산 흡착에 관한 연구

김종국[†] · 최호석* · 유인상**

진양대학교 화공생명학과[†], *충남대학교 화학공학과, **경원대학교 화학생명공학과
(2006년 5월 1일 접수, 2006년 7월 31일 채택)

Adsorption of the Siloxane Contained in Landfill Gas using Clay Mineral

Jong Kuk Kim[†], Ho Seok Choi*, and In Sang Yoo**

Department of Chemical and Bio Engineering, Konyang University, Nonsan, Chungnam 320-711, Korea

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-308, Korea

**Department of Chemical and Bio Engineering, Kyungwon University, Kyunggi-Do 461-701, Korea

(Received May 1, 2006; accepted July 31, 2006)

실록산은 많은 소비 및 공업제품에 사용되고 있고 이들이 매립되어 발생하는 매립가스에는 휘발성 실록산을 포함한다. 휘발성 실록산을 포함한 매립가스를 가스엔진의 연료로 사용할 경우 매립가스내 휘발성 실록산은 가스엔진뿐만 아니라 전처리 시설에 큰 해를 입히게 된다. 따라서 본 연구에서는 매립가스내 휘발성 실록산 흡착제로서 활성탄 대용으로 천연 점토광물인 질석과 일라이트를 사용해 이의 유용성을 검토하였다. 질석, 일라이트 및 활성탄의 SEM 및 BET 분석을 통해 이들의 물성값을 비교하였다. 또한 일라이트 및 질석을 흡착제로 사용하여 D5 실록산의 흡착용량을 평가 하였는바, 각각 1.7 g/g 일라이트 및 3.8 g/g 질석의 대단히 높은 흡착용량을 나타내었다.

Siloxanes are widely used in industrial processes and consumer products. When landfill gas is used as fuel for gas engines, volatile siloxane in landfill gas causes serious damage to gas engines and pretreatment facilities. In this study, the applicability of various clay minerals was evaluated as the alternative adsorbents of activated carbon. SEM and BET analyses of illite, vermiculite, and activated carbon were performed for comparing those physical properties. Siloxane adsorption capacities of illite and vermiculite were estimated very high to 1.7 g/g illite, 3.8 g/g vermiculite respectively through the adsorption experiments of D5 siloxane.

Keywords: landfill gas, siloxane, adsorption, clay mineral

1. 서 론

현재 국내의 경우 환경부에서 매립가스를 지구온난화 저감차원에서 CDM 사업으로 활용하기 위해 전국 매립지에 대해 경제성 평가를 한 결과 Table 1에 나타낸 것과 같이 13개 매립지가 선정되었다[1]. 이 중 Landfill gas (LFG) 이용은 수도권 및 부산, 울산 및 대전 및 대구 매립장 등에서 매립가스 자원화 사업이 진행 중이나, 국내 대부분 약 95%의 매립지가 백만 톤 이하의 소규모 매립지로서 발생 LFG를 자연 상태로 대기방출 및 소각시키고 있어, 소규모 매립지에 적용할 수 있는 LFG 전처리 시설의 설치를 통해 가스 연료로서의 활용을 추진해야 할 필요가 있다.

따라서 환경적으로나 실용적으로 활용 가능한 LFG를 얻기 위하여 연료 성분인 메탄과 이산화탄소를 제외한 수분, 황화수소 및 암모니아 성분, 할로젠 성분 및 실록산 불순물을 제거하는 전처리 시설을 최적화하여 LFG 활용공정인 가스엔진에 의한 전력생성 또는 소규모 매립장의 경우는 보일러 연료로의 활용도를 높일 필요가 있다[1,2].

일반적인 LFG 전처리 공정은 크게 3가지이며 cyclone type dehydrator 및 compressor를 이용한 물리적 수분제거, molecular sieve 흡착탑을 이용한 화학적 수분제거, Activated carbon 흡착탑을 이용한 미량 유해 성분제거 공정이다[3]. 그러나 LFG 활용 시설에 치명적 손상을 일으키는 실록산 성분을 제거할 수 있는 확실한 방법이 아직 개발되어 있지 않다. 실록산이 LFG내에 존재할 경우 연소되면서 silicone oxide 결정체가 되어 가스엔진실린더 및 LFG 활용 설비의 모든 기계부속품에 치명적인 손상을 발생시킨다. 실록산은 많은 소비 및 공업제품에 사용되고 있고 구체적으로 탈취제, 샴푸, 면도크림 등에 분산제로 사용되고, 공업적으로는 polydimethylsiloxane (PDMS)이라 불리는 실리콘 블록 형태, 세계적인 실란트로 사용되는 상온 가황 실리콘 등이다. 이들이 매립되면 매립 가스중에 휘발성 실록산이 존재하게 된다. 매립지 가스에서 나타나는 대표적인 휘발성 실록산의 물리적인 특성값을 Table 2에 나타내었다[3-5].

Table 3에 가스엔진 제조사들에 의해 허용되는 LFG내의 실록산 함량기준을 나타내었다. LFG내의 실록산 농도는 약 50 mg/m³로 보고되어 있고 가스엔진 제조사에 의해 허용되는 LFG내 실록산 함량은 10 mg/m³이다. 따라서 효율적인 실록산 제거공정이 필요하나 아직까지는

† 주 저자 (e-mail: kjkkim@konyang.ac.kr)

Table 1. Estimation of LFG Generation and Electricity Capacity of Domestic Landfills[1]

매립지명	매립기간	매립면적 (천m ²)	매립용량(천m ³)		매립가스 발생량 (천m ³ /일)	예상발전량 (MW)
			총량	'98년말		
수도권	'92~2022	19,580	280,810	46,976	800	50
부산 생곡	'96~2001	396	10,485	3,479	63	4.2
대구 다사	'91~2005	435	9,750	6,385	117	7.8
광주 운정	'93~2000	279	4,369	3,315	60	4
대전 금고	'96~2010	570	8,465	1,546	28	1.8
울산 성암	'94~2004	142	4,255	2,014	37	2.5
강원 영월	'82~2000	147	1,136	1,086	20	1.3
청주 문암	'94~2001	210	1,860	1,288	23	1.5
제천 고암	'79~2000	58	1,169	1,147	21	1.4
전남 순천	'94~2005	95	1,775	1,029	19	1.2
구미 구포	'90~2001	123	1,932	1,691	31	2.0
경남 창원	'94~2015	353	3,810	1,412	25	1.6
제주 회천	'92~2002	203	2,294	1,036	19	1.2

Table 2. Physical Properties of Volatile Siloxane Gas

Name and formula	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)	Melting point (°C)	Vapor pressure at 25 °C (mmHg)	Specific gravity	Viscosity at 25 °C (cSt)
D3 C ₁₂ H ₁₈ O ₃ Si ₃	222.46	134	64~66	10	1.02	2.35
D4 C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	296.61	175~176	17.4	1.3 at 25 °C 1 at 23 °C	0.96	2.3
D5 C ₁₀ H ₃₀ O ₅ Si ₅	370.77	210	-44	0.4 at 25 °C 2 at 50 °C	0.96	3.87
D6 C ₁₂ H ₃₆ O ₆ Si ₆	445.00	245	-3	0.02	0.97	6.6

Table 3. LFG Specification Supplied by the Manufacturer of Lean Burn Gas Engine

Constituent	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
Si	old standard without catalyst (1): < 20 mgNM ³ CH ₄ without warranty restriction; (> 20 mgNM ³ CH ₄ with restriction) new standard without catalyst: see below (2) with catalyst:old and new standard 0 mgNM ³ CH ₄	< 10 mgNM ³ CH ₄	< 21 mgNM ³ CH ₄	<50 mgNM ³ CH ₄ Total siloxanes (models with prechamber fuel system only) (3)

(1) manufacturer started specification in mg MJ⁻¹, converted to Nm³CH₄ assuming Calorific value CH₄ is 37.5 MJ NM⁻³

(2) Relative limiting value of < 0.02 according to the following calculation (without catalyst)

Relative limiting value = (mg kg⁻¹ Si in engine oil) × total oil quantity in liters/(engine power in KW) × (oil service time in hours)

(3) manufacturer started specification in µg/L, converted to NM³ CH₄ assuming 50% CH₄(v/v)

효율적이고 경제적인 방법이 확실히 결정되어 있지 않은 형편이다.

현재 제시된 활성탄 흡착탑을 이용한 실록산 공정의 문제점으로는 LFG 상대습도의 영향을 크게 받고 또한 탈착(74~83%)이 효율적으로 일어나지 않아 연속 사용시 문제점 발생하고 실리카 겔의 경우 활성탄만큼 실록산 흡착용량이 좋고 탈착도 95% 이상 효율적인 것으로 보고 되고 있으나 이 또한 LFG 상대습도에 영향을 크게 받는다고 보고 되어 있다[3].

따라서 본 연구에서는 점토광물인 질석 및 일라이트를 함유한 충전탑 운전을 통해 LFG내의 수분 함량에 따른 실록산의 제거효율을 측정하고자 한다. LFG에 포함되어 있는 휘발성 실록산 종류를 분류하면 trimethylsilanol, hexamethyldisiloxane (L2), octamethyltrisiloxane (L3), decamethyltetrasiloxane (L4), hexamethylcyclotrisiloxane (D3), octamethylcyclotetrasiloxane (D4), decamethylcyclopentasiloxane (D5), dodecamethylcyclohexasiloxane (D6) 등이다. 일반적으로 가장 널리 발

견되는 실록산은 D4 및 D5이다. 본 실험에서는 단일성분인 decamethylcyclopentasiloxane (D5)를 선택해서 흡착실험을 수행하였다.

LFG내 실록산 제거공정의 흡착제로 사용하고자 하는 점토광물인 질석 및 일라이트는 일반적으로 중금속 제거에 많이 이용되어왔다. 또한 질석 충전탑을 이용, 악취제거공정 연구결과 흡착 용량 면에서 활성탄과 거의 대등한 흡착능력을 구하였고 그 가격은 활성탄의 10% 이하여서 경제성도 충분하다고 보고 되어있다[2]. 본 연구에서 사용하고자하는 흡착제인 질석은 수분 흡수 능력도 뛰어나고 이상의 장점을 고려해 볼 때 LFG내 실록산 제거공정으로서 기존의 활성탄 충전탑의 문제점인 습도에 따른 흡착율 저하 및 탈착의 어려움등의 문제점을 해소할 수 있는 방법으로 사료된다.

2. 현재까지 연구된 실록산 제거방법

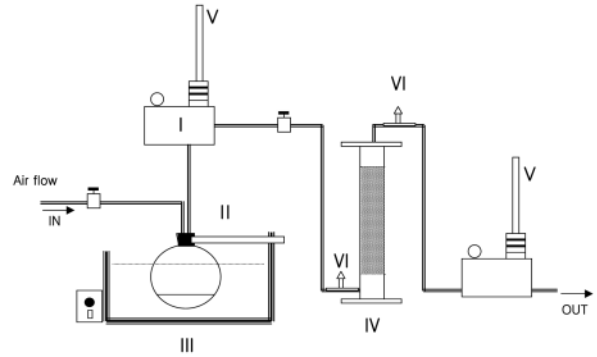
실록산 제거에 가장 자주 사용되는 방법은 활성탄 흡착법이다. 다른 가능한 흡착제로서 분자체나 고분자 펠릿이 사용되기도 한다. 또한 실록산 가스의 심냉 응축법도 가능하나 장치비용이 고가인 것으로 나타나고 있다.

Schweigkofler와 Niessner는 흡착제로서 폴리머 비드, 실리카겔 및 활성탄을 사용하여 많은 연구를 수행하였고 그 결과 모든 흡착제가 실록산 D5에 대해 높은 흡착용량을 나타내었다. 특히 실리카겔의 경우가 LFG의 건조뿐만 아니라 실록산 흡착용량까지 좋아 가장 비용 효율적인 흡착제로 보고하고 있다. 한편 실리카겔의 탈착효율은 250 °C, 20 min간의 가열에 의해 95%의 재생율을 보였으나 활성탄의 경우 비슷한 조건에서 열에 의한 재생율이 비 효과적인 것으로 보고하고 있다[4].

한편 고비점의 유기용매를 사용하여 실록산 흡수법도 연구되어 왔다. 실록산 흡수 장치는 스프레이 및 보통 라시히어링을 포함한 충전탑을 사용했다. 본 흡수법의 중요한 단점은 휘발성이 높은 실록산이 높은 가스 유속에서는 쉽게 탈리가 되기 때문에 실록산의 완전한 제거는 어렵다는 것이다. 그러나 이러한 문제는 실록산이 화학적으로 낮은 휘발성의 실록산으로 전환되어 흡수된다면 해결 가능하다고 보고하고 있다[4]. Huppmann 등은 tetradecane을 흡수액으로 사용하여 97%의 D4 제거효과를 달성했고[6], Stoddart 등은 LFG내의 할로젠 유기물을 제거하는 방법으로 탄화수소 오일을 흡수액으로 사용하여 60% 정도의 부수적인 실록산 제거효율을 나타냈음을 보고하고 있다[7].

한편 심냉법에 의한 실록산 제거 연구도 일부 연구자에 의해 수행되고 있다. LFG의 온도가 낮아질 때 실록산 가스의 일부가 응축액을 형성할 수 있다. Schweigkofler와 Niessner[4]는 LFG가 5 °C로 낮아질 때 초기 실록산 농도의 88% 이상이 LFG에 존재한다고 보고하고 있고, Hagman 등[8]은 LFG가 -25 °C로 냉각될 때 25.9%, -70 °C로 냉각될 때 99.3%의 제거효과를 보고하고 있다.

또한 염기 및 산 촉매 가수분해방법을 이용하여 실리콘-산소 결합을 파괴하는 방법도 보고 되고 있다. Schweigkofler와 Niessner[4]는 D5 및 L2를 제거하기 위해 황산, 질산 및 인산을 사용했고, 60 °C에서 48 wt%의 황산 또는 65 wt%의 질산을 이용하여 95% 이상의 실록산 가스 제거효율을 나타내었다. 20 °C 상온에서는 묽은 산용액을 사용하여 75%의 최대 효율을 나타냈고 인산의 최대 제거효율은 60%로 나타났다. Huppmann 등[6]은 수산화 나트륨 및 황산을 사용하였는바, 수산화 나트륨의 경우는 LFG내의 D4 제거에 성공적으로 적용되질 못했으며 더욱이 LFG내의 이산화탄소와의 반응으로 소디움 카보네이트 침전물이 형성되어 반응장치를 막는 현상을 발생시켰다고 보고



I : Mixing tank, II : Flask contained siloxane, III : Thermostating basin, IV : Adsorption tower, V : Humidity sensor, VI : Sampling tap

Figure 1. Diagram of adsorption equipment for siloxane treatment.

하고 있다. 한편 60 °C에서 농축황산을 사용한 경우는 D4 99%, 50% 항상 희석용액은 D4 26%의 제거 효율을 보고하고 있다. 한편 국내의 경우는 수도권매립지관리공사에서 “매립지 자원화 시설의 구조화합물류 등 전처리 효율 제고방안 연구”를 수행하고 있고 수도권매립지의 6.5 MW 발전시설에서는 7.19 mg siloxanes/m³ LFG가 발생되고 있다고 보고하고 있다. 결과적으로 LFG내의 실록산 가스는 LFG 활용 시설에 많은 문제점을 발생시키고 있으나 현재까지 효율적인 전처리 방법이 확실하게 제안되어 있지 않은 형편이다.

3. 실험장치 및 방법

질석과 일라이트를 이용한 실록산 제거용 흡착 실험 장치를 Figure 1에 나타내었다. 실험 장치를 간략히 설명하면 air compressor로부터 액상 실록산의 휘발을 위해 공기를 일정온도와 유량으로 주입하여 기화된 실록산 가스를 혼합탱크를 거쳐 흡착탑 하부로 주입하여 흡착 처리 하는 방법을 선택하였다.

실제 실록산 가스는 표준가스가 생산 되지 않으므로 메탄올에 녹인 액상 실록산을 이용하여 검량선을 구하였다. 실록산 가스와 공기의 효율적인 혼합, 균일한 가스 유량 및 압력을 유지하여 혼합 가스를 일정하게 공급하기 위해 혼합탱크를 설치하였다. 장치의 배관은 SUS재질을 사용하였으며, 실록산 가스가 통과하는 모든 구간의 피팅도 Swagelock사의 1/4 in SUS를 사용하였다. 흡착탑은 직경 8 cm의 아크릴 관을 이용하여 제작하였으며, 흡착탑 전, 후에 시료 채취구를 설치하여 흡착 전, 후의 가스를 10 mL 실린지를 이용 채취 Gas Chromatography (Young-lin ACME-6000) FID를 이용하여 분석하였다. Table 4에 본 실험에서의 실록산 분석 조건을 나타내었다[9,10].

4. 점토광물 흡착탑을 이용한 실록산 제거 실험 결과

4.1. 점토광물의 기본물성 측정

4.1.1. SEM 분석결과

각 흡착제의 기공 및 입자의 형태를 알아보기 위해 SEM을 이용 측정하였다. 일라이트는 D사의 황색 일라이트 입상 중을 이용하였으며, 질석은 M사 팽창질석인 gold vermiculite, 활성탄은 S사의 악취제거용 SGA-100 활성탄을 이용하였다. 일라이트, 질석 및 활성탄의 SEM 측

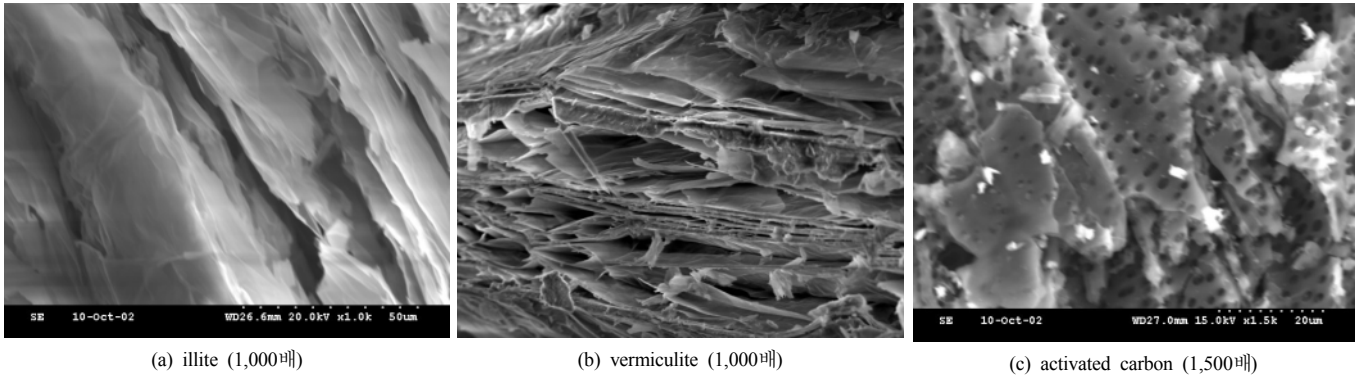


Figure 2. SEM photograph of illite, vermiculite and activated carbon.

Table 4. GC Analysing Condition for Siloxane

Item	Analyzing conditions
Detector	FID (Young-Lin Acme-6000)
Column length	DB1701 ϕ 0.53 mm \times 30 m (Capillary)
Column temp.	2 min at 50 °C \rightarrow 25 °C/min \rightarrow 5 min at 250°C
Injector temp.	250 °C
Detector temp.	250 °C
H ₂ pre.	50 kPa
Air pre.	50 kPa
He flow rate	10 mL/min

Table 5. BET Characteristics of Illite, Vermiculite and Activated Carbon

	V _{BH} (cm ³ /g)	BET specific surface area (m ² /g)	Average pore diameter (Å)
illite	0.0078	7.2	42.4
vermiculite	0.0487	14.7	132.7
*activated carbon	0.6285	1,165	21.7

* 국내 무연탄 압출성형 활성탄

정 결과를 Figure 2에 나타내었다. 각각의 SEM 사진에서 보듯이 일라이트와 질석은 운모류의 특징인 얇은 판형의 입자들로 구성되어 있으며, 활성탄은 무수히 많은 기공들로 이루어져 있다.

4.1.2. BET 분석결과

Table 5에 일라이트, 질석 및 국내 무연탄 압출 성형 활성탄의 V_{BH}, BET specific surface area, average pore diameter값을 나타내었다. 질석과 일라이트는 비 다공성 광물로서 Table 5에 나타낸 pore diameter는 층간 간격으로 해석하는 것이 옳을 것으로 사료된다. Figure 3에는 일라이트와 질석의 흡착등온선, Figure 4에는 활성탄의 흡착 등온선을 나타내었다. Figure 5에서 보듯 일라이트는 10~1000 Å까지 다양한 층간 간격(평균 층간 간격 42.4 Å)을 보여주고 있으나 질석의 경우 일라이트와는 달리 80~100 Å 사이 및 400~1000 Å 사이의 균일한 층간 간격(평균 층간 간격 132.7 Å)을 보여주고 있다. 특히 질석의 경우, 질석 원석을 300 °C 이상의 고온에서 6~20배 정도의 일정한 비율로 팽창시켜 사용하기 때문에 비교적 균일한 층간간격이 존재하는 것으로 판단된다.

Figure 6에서 보듯이 활성탄은 50~60 Å 사이의 공극 및 20 Å 이하의 미세공극(평균 공극 지름 21.7 Å)이 대부분이다. 결론적으로 Table 5에서 보듯이 점토광물의 경우 활성탄과 비교할 때 pore volume 및 비표면적은 극히 작은 값을 나타내고 있다.

4.2. 점토광물을 이용한 실록산 흡착

본 연구에서는 점토광물 중 하나인 질석 및 일라이트를 이용하여 단일성분의 D5의 흡착능력을 실험하였다. 질석을 이용한 D5의 흡착 실험은 다음의 조건하에 이루어졌다. 공탑속도 2.7 \times 10³ m/s, 실록산 가스 주입농도(C₀) 369 ppm, 흡착탑 내경은 8 cm, 흡착제 충전높이

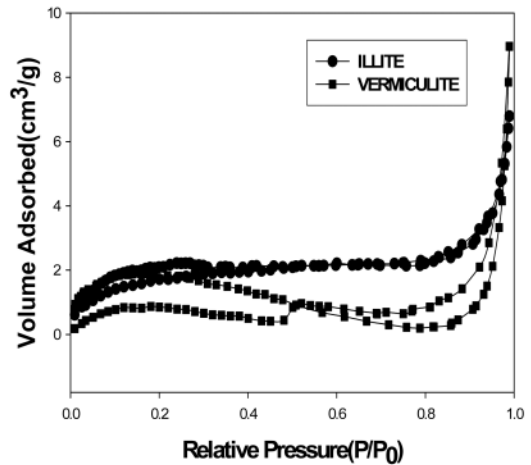


Figure 3. Isotherm of illite and vermiculite.

15 cm, 온도는 25 °C 로 하에서 흡착실험을 실시하였다.

질석을 이용한 실록산 흡착실험 결과 즉 질석의 파과곡선을 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 보듯 약 400 min에서 파과점이 나타났으며, 그 후 흡착이 계속 이루어지다가 3600 min 정도에서 흡착이 완료되었다. 질석의 D5 흡착 용량은 3.8 g/g 질석(질석의 밀도 0.2)으로 나타났다.

또한 점토광물인 일라이트를 사용, D5의 흡착능력을 평가하고자 실험하였다. 흡착실험은 다음과 같은 조건하에서 이루어졌다. 흡착탑 내경 8 cm, 흡착제의 충전높이 9 cm, 온도는 25 °C, 실록산 주입농도(C₀) 293 ppm, 공탑속도 2.3 \times 10³ m/s로 실시하였다. 일라이트를 이용한 실록산 흡착실험 결과 즉 일라이트의 파과곡선을 Figure 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 2600 min이 지나면서 파과점이 나타났으며, 그 후 흡착이 계속 이루어지다가 22000 min에서 흡착이 완료되었다. 실험결과 일라이트의 흡착용량은 1.7 g/g 일라이트(일라이트 밀도

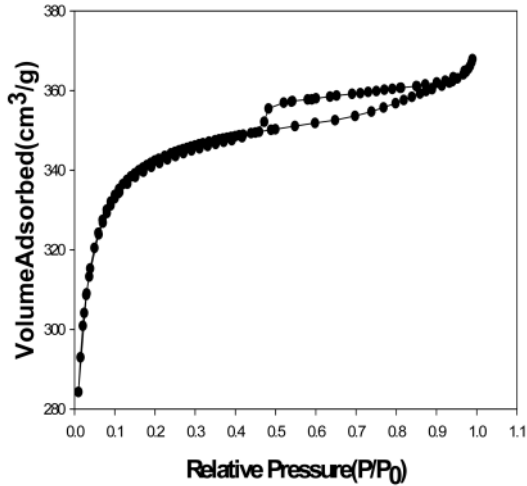


Figure 4. Isotherm of activated carbon.

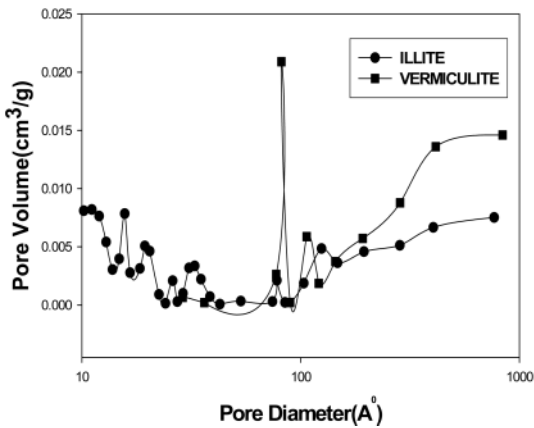


Figure 5. Pore size distribution of illite and vermiculite.

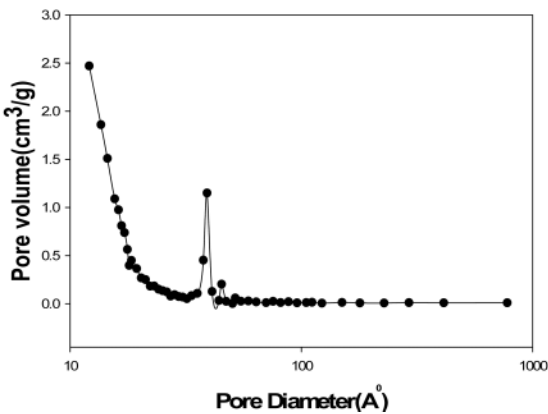


Figure 6. Pore size distribution of activated carbon.

2.7) 로 나왔다. 한편 본 연구자에 의해 질석 및 일라이트를 이용한 약취성분중 하나인 H₂S 흡착용량 실험 결과는 각각 7.7 mg/g 질석 및 5.8 mg/g 일라이트를 얻었다[2]. 점토광물의 실록산 흡착용량이 약취성분의 흡착용량에 비해 300~500배 정도 높은 것으로 나타나 점토광물의 성분이 실록산과 유사한 성분으로 흡착 친화도가 높은 것으로 판단된다.

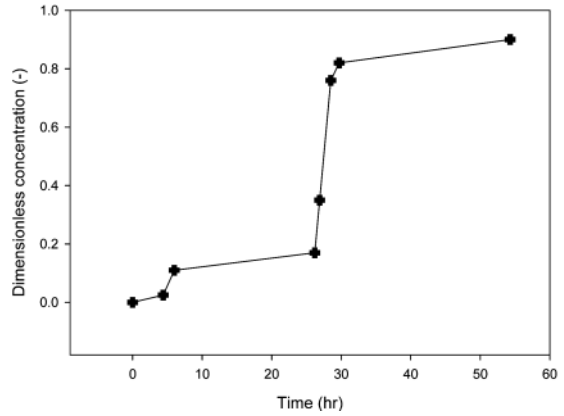


Figure 7. Breakthrough curve of siloxane adsorption using vermiculite (inlet concentration of siloxane : 369 ppm, packing height of vermiculite 15 cm, inside diameter of adsorption column : 8 cm, superficial velocity : 2.7×10^{-3} m/s, temperature : 25 °C).

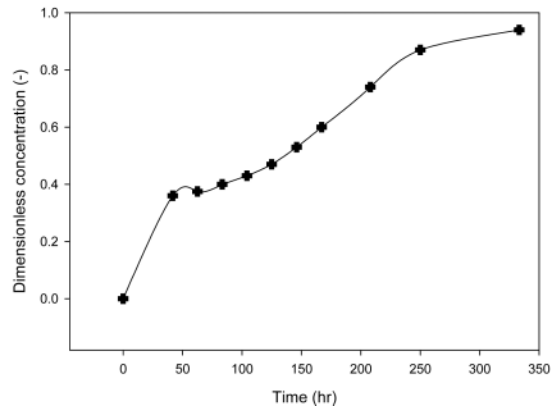


Figure 8. Breakthrough curve of siloxane adsorption using illite (inlet concentration of siloxane : 293 ppm, packing height of vermiculite 9 cm, inside diameter of adsorption column : 8 cm, superficial velocity : 2.3×10^{-3} m/s, Temperature : 25 °C).

5. 결 론

점토광물 흡착탑을 이용한 매립지 가스중 실록산 흡착실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 점토광물인 일라이트(pore volume 0.0078 cm³/g, 비표면적 7.2 m²/g) 및 질석(pore volume 0.0487 cm³/g, 비표면적 14.7 m²/g)은 활성탄(pore volume 0.6285 cm³/g, 비표면적 1,165 m²/g)에 비해 pore volume이나 비표면적이 현저히 낮게 나타났다.

(2) 질석의 D5 흡착 용량은 3.8 g/g 질석(질석의 밀도 0.2), 일라이트의 흡착용량은 1.7 g/g 일라이트(일라이트 밀도 2.7)로 측정되었다.

(3) 본 연구자에 의해 질석 및 일라이트를 이용한 약취성분 중 하나인 H₂S 흡착용량 실험 결과는 각각 7.7 mg/g 질석 및 5.8 mg/g 일라이트를 얻었다[2]. 반면 점토광물의 실록산 흡착용량이 약취성분의 흡착용량에 비해 300~500배 정도 높은 것으로 나타나 점토광물의 성분이 실록산과 유사한 성분으로 흡착 친화도가 높은 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 산업자원부 “에너지 자원기술 학술진흥사업(2003-N-WA03-P-02)”의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. K. Kim, J. T. Oh, and J. S. Hwang, *J. Korea society of waste management*, **20**, 529 (2003).
2. J. K. Kim, *J. KSEE*, **25**, 1131 (2003).
3. M. Schweigkofler and R. Niessner, *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 3680 (1999).
4. M. Schweigkofler and R. Niessner, *J. Hazard Mater.*, **B83**, 183 (2001).
5. R. Dewil, L. Appels, and J. Baeyens, *Energy Conversion and Management*, **47**, 1711 (2006).
6. R. Huppmann, H. W. Lohoff, and H. F. Schroder, *Fr. J. Anal. Chem.*, **354**, 66 (1996).
7. J. Stoddart, M. Zhu, J. Staines, E. Rothery, and R. Lewicki, *7th international waste management and landfill symposium*, II, 489 (1999).
8. M. Haggmann, E. Hesse, P. Hentschel, and T. Bauer, *8th international waste management and landfill symposium*, II, 641 (2001).
9. S. Wachholz, F. Keidel, U. Just, H. Geissler, and K. Kapler, *Journal of Chromatography A.*, **693**, 89 (1995).
10. Air Toxics Ltd, Siloxanes in Air by GC/MS Direct Inject Analysis. Standard Operating Procedures, SOP#71., March (2002).