

휘발성 유기화합물의 간헐적 배출원에 대한 활성탄 흡착 시스템 설계기준

Design Standard of Activated Carbon Vessel for the Intermittent Emission Sources of Volatile Organic Compounds

이시훈* · 임정환 · 임영준 · 김상도 · 우광재
손미숙 · 박희재¹⁾ · 서만철¹⁾ · 유승곤²⁾

한국에너지기술연구원 청정시스템연구센터,

¹⁾시흥환경기술개발센터, ²⁾충남대학교 공과대학 화학공학과

(2006년 11월 7일 접수, 2007년 1월 23일 채택)

Si Hyun Lee*, Jeong Whan Lim, Young Jun Rhim, Sang Do Kim,
Kwang Je Woo, Mi Sook Son, Hee Jae Park¹⁾,
Man Cheol Seo¹⁾ and Seung Kon Ryu²⁾

Clean Energy System Research Center, Korea Institute of Energy Research (KIER)

¹⁾Siheung Environmental Technology Research Center

²⁾Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

(Received 7 November 2006, accepted 23 January 2007)

Abstract

It was investigated that the emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from small and medium companies located on industrial complexes in Metropolitan area. The emission characteristics are intermittent sources in which VOCs emissions are highly depends on the working condition. Optimized ventilation system to improve air quality in working area for the three typical companies were installed. Adsorption characteristics of major VOCs such as MEK, IPA, and toluene emitted from the companies were investigated for design of the activated carbon vessel as a VOCs control facility in each company. Concentration of total hydrocarbon and gas amounts needed to ventilation were also used as a design parameter. Mixed adsorbent to improve adsorption characteristics of problematic solvents like IPA and the design guideline of the activated carbon vessel have been suggested.

Key words : Volatile organic compounds, Activated carbon, Intermittent emission, Multi-component adsorption, Vessel design

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-860-3452, E-mail : LSH3452@kier.re.kr

1. 서 론

2006년 현재 수도권 주변 시화 및 반월 산업단지에 입주하고 있는 중소기업체는 표 1에서 보는 바와 같이 약 7,200개 업체이며, 이 중에서 대기배출업체로 등록된 업체 수는 약 2,400개 업체에 달한다. 특히 악취 및 휘발성 유기화합물(VOCs: Volatile Organic Compounds) 배출업체에서 설치 운영하고 있는 활성탄 흡착탑은 약 900개로 추정하고 있다(김선태, 2006).

휘발성 유기화합물은 작업현장의 환경을 악화시키기도 하지만, 대기 중에서 태양에너지를 받아 질소산화물과 함께 광화학 스모그를 생성하기 때문에 인체에 악영향을 미친다. 국내의 경우 오존주의보 발령횟수와 지역수가 해마다 증가하고, 최고오염도도 지속적으로 상승하는 추세에 있어서 휘발성 유기화합물의 배출을 줄임으로써 오존 및 스모그 오염을 감소시킬 필요가 있다.

시화 및 반월 산업단지에서 발생하는 악취의 종류는 쇠 가공냄새, 화학약품냄새, 폐기물소각냄새, 제지, 피혁, 장류, 염색, 나염, 타이어 냄새 등 다양하다(김선태, 2006). 이 중에서 휘발성 유기화합물을 배출하는 지역은 그룹으로 나누어져 있기는 하지만 산업단지 전체에 분포되어 있으며, 휘발성 유기화합물이 스모그를 생성하는 원인 물질이라는 것을 고려할 때 시화 및 반월 산업단지의 광화학 스모그 형성의 가장 큰 원인이 되고 있다(김기현 등, 2005; 김진용 등, 2005).

현재 산업단지에서 휘발성 유기화합물의 배출 방지기술로 가장 많이 사용되고 있는 활성탄 흡착탑은 최적의 방지기술이 아니다. 활성탄을 사용할 수 있는 조건은 농도가 낮은 시설로 제한되어야 함에도 불구하고

하고 발생원으로부터의 물질 및 농도에 대한 정밀 분석 없이 활성탄 흡착탑을, 그것도 정확한 설계를 하지 않고 사용하는 사례가 많다.

산업단지에서 사용하는 용매는 크게 3가지로 나누어지는데 톨루엔, MEK (methyl ethyl ketone), IPA (Iso-propyl alcohol)가 주종을 이루고 있다. BTX로 대표되는 방향족류는 활성탄으로 제거하기가 가장 용이한 물질들이다. 평균적으로 활성탄 무게의 35~40% 정도를 제거한다. 물론 파과는 이의 50% 수준인 15~20% 수준이다. 케톤류의 경우에는 반응성이 커서, 활성탄에 흡착할 때 발생하는 흡착열로 인해 열화현상이 발생한다. 열화란 열에 의해 반응이 촉진되어 케톤류가 다른 물질로 전이되어지고, 전이되어진 물질들은 활성탄의 기공을 막아 활성탄의 성능을 저하시키는 현상이다(Henning *et al.*, 1989). 알콜류는 활성탄으로 제거하기 어려운 물질이다. 따라서 업체 별로 배출물질과 농도를 파악하여 흡착탑을 정확하게 설계하여 설치하여야 한다.

본 논문에서는 시화 및 반월 산업단지에 입주하고 있는 업체 중에서 휘발성 유기화합물을 배출하는 대표적인 3개 업체를 대상으로 배출원 분석을 수행하였으며 활성탄 흡착탑을 설계하고 설치하는 과정에서 가장 많은 오류를 범하고 있는 물질별 흡착성능을 분석하였고 이를 토대로 흡착탑 설계를 위한 기본적인 가이드라인을 제시하고자 하였다.

2. 간헐적 배출원

산업단지에 위치하고 있는 중소기업의 휘발성 유기화합물 배출 특성은 대부분 간헐적 배출원이다. 간헐적 배출원이란 작업시간이 일정하지 않을 뿐 아니라 작업시간에도 작업조건 및 양에 따라 배출되는 농도가 일정하지 않은 경우를 말한다. 따라서 간이 샘플러나 또는 특정시간에서의 시료 채취 및 분석과 이 결과에 의한 방지시설 설계는 의미가 없다. 시화 및 반월 산업단지의 대표적 화학제품 제조업체 3곳을 선정하여 휘발성 유기화합물의 배출 특성을 살펴 보았다. 그림 1에는 작업장내의 24시간 THC 농도를 나타내었으며 그림 2에는 각 업체의 방지시설 전단에서 측정된 THC 농도를 역시 24시간 동안 분석하여 나타내었다.

각 업체의 특성은 다음과 같다.

Table 1. Number of companies located on Siwha and Banwol industrial complex around metropolitan area.

| | Number of companies | Emission sources | | |
|--------|---------------------|------------------|-----------------|---------------|
| | | Atmospheric (A) | Waste water (B) | Both of A & B |
| Sum | 7,242 | 2,399 | 2,089 | 1,875 |
| Banwol | 2,489 | 1,410 | 1,318 | 1,212 |
| Siwha | 4,753 | 989 | 771 | 663 |

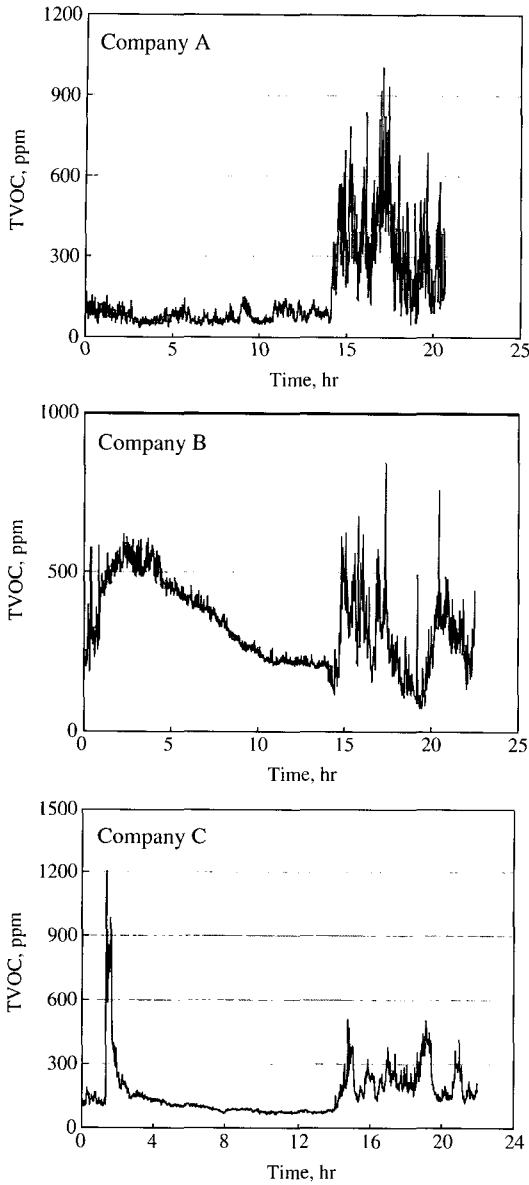


Fig. 1. Concentration of total hydrocarbon in working area (3~14 hr: nighttime).

A 업체

패드룸을 수거하여 톨루엔으로 세척하고 재생하는 업체이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 작업을 하지 않는 야간시간(그림 1, 2에서 3~14 hr)에도 약 100 ppm 이상의 THC가 측정되는 것을 알 수 있다. 이는 주간이나 그동안 오랜 기간 동안 배출되고 있던 휘

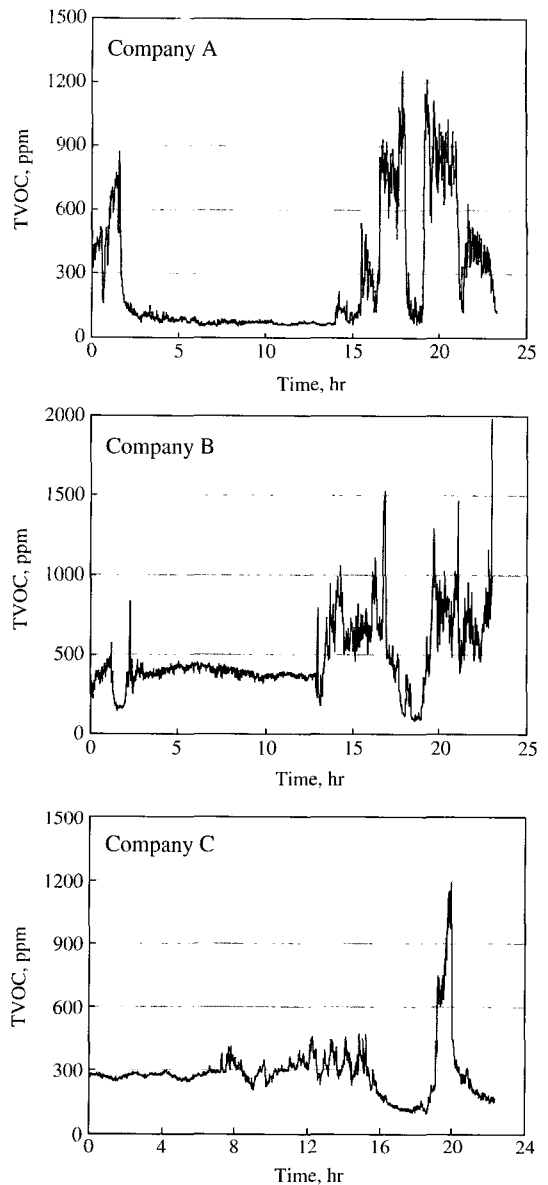


Fig. 2. Concentration of total hydrocarbon measured just before the VOCs control facility (3~14 hr: nighttime).

발성 유기화합물이 공장내부의 벽이나 바닥, 또는 덕트에 잔류하여 발생하기 때문이다. 작업장의 24시간 평균은 160 ppm, 작업시간인 8시간 평균은 330 ppm으로 측정되었다. 또한 덕트를 통해 기존 방지설비로 배출되는 과정에, 방지설비 전단의 측정 자료를 보면

Table 2. Major solvents used in each company.

| Company A | Company B | Company C |
|-----------|-----------------------|--------------------------------|
| Toluene | Toluene, IPA, EA, MEK | Toluene, Xylene, MEK, EA, MIBK |

IPA: Iso Propyl alcohol
 EA: Ethyl Acetate
 MEK: Methyl Ethyl Ketone
 MIBK: Methyl Iso Butyl Ketone

그림 2에서 보는 바와 같이 24시간 평균은 240 ppm, 작업시간 평균은 460 ppm으로 나타나 작업 환경보다는 높은 농도를 보였다.

B 업체

잉크 제조업체이다. 작업장 THC 농도는 작업시간에 관계없이 평균 300 ppm 정도가 분석되었는데 이는 업체 A와는 달리 원료 저장고가 많고 국소배기 시스템이 원활하게 설치되지 못했기 때문이다. 방지시설 전단의 THC 농도는 24시간 평균농도 470 ppm, 작업시간 평균농도 610 ppm이 분석되었다.

C 업체

다양한 제품을 생산하기 때문에 많은 원료를 사용하고 있음에도 불구하고 작업장의 THC 농도는 24시간 평균 160 ppm, 작업시간 평균 220 ppm으로 낮은 편이며 그림 2에서 보는바와 같이 방지시설 전단 농도는 256 ppm으로 역시 낮은 상태이다. 특히 작업개시 후 4~5시간에 방지시설 전단에서의 THC 농도가 높게 나타나는 이유는 오전에 작업한 교반용기를 세척하기 때문이다. 전체적으로 작업환경은 150~300 ppm 정도이고 방지시설 전단 농도는 250~600 ppm 정도의 THC가 측정되었다.

표 2에는 업체별로 사용하는 용제 종류를 나타내었다. 업체 A는 페드럼을 세척하면서 주로 용제는 톨루엔을 사용하고 있으며 업체 B는 톨루엔과 EA, IPA를 일정 비율로 혼합한 용제를 사용하고 있다. 업체 C는 다양한 제품을 생산하기 때문에 사용하는 용제의 종류가 많다.

3. 대상 및 방법

3.1 국소배기 시스템

활성탄 흡착탑을 설계하기 전에 우선 해결하여야

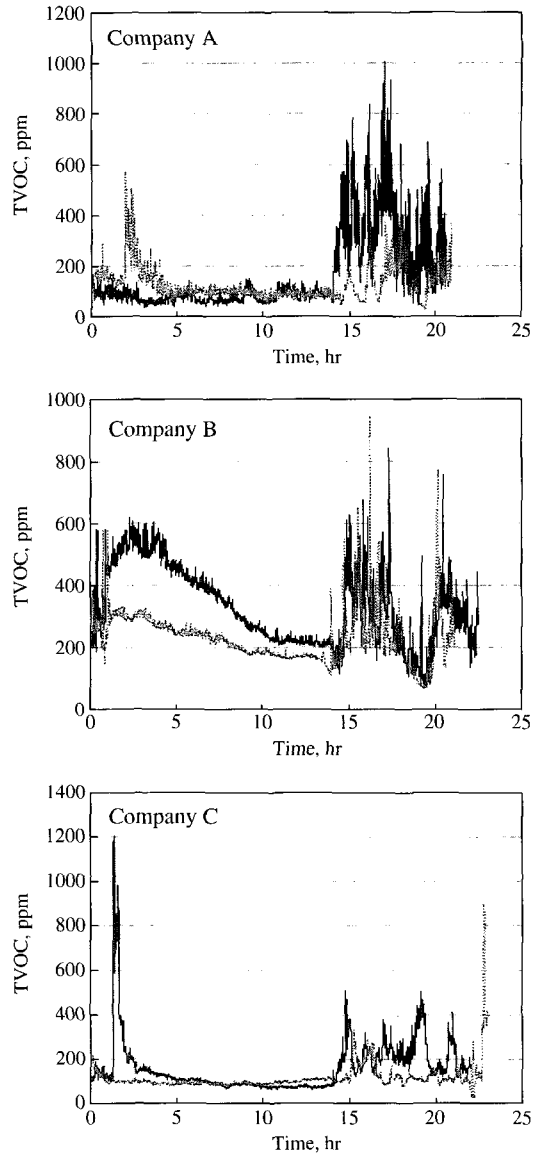


Fig. 3. Comparison of THC concentration before (—) and after (---) the optimization of ventilation system (3~14 hr: nighttime).

하는 것이 배출의 최적화이다. 배출 최적화가 되지 못한 상태에서 방지설비의 설치의 의미가 없다. 배출 최적화에 의해 작업장 환경이 개선되고 이 때 발생하는 총량을 기준으로 방지설비가 설계되어야 하는 것이다. 작업장의 각 배출원에서 배출을 최적화할 수 있는 배기속도와 배기시스템의 면적 등이 알맞게 선

정되어야 한다. 3개 대상 업체별로 작업장 국소배기 시스템을 최적화하여 설치하였으며 그림 3에 작업장 국소배기 시스템 설치 전후의 농도를 비교하였다. 본 논문의 목적이 활성화된 흡착탑 설계기준 마련이므로 국소배기시스템의 설계 및 설치 등에 대한 자세한 내용은 생략한다.

그림 3에서 3~14 hr 부분이 야간의 작업하지 않는 시간대의 분석결과이다. 여기에서 알 수 있는 것은 작업이 없음에도 약 100 ppm 이상의 잔류농도가 관측되고 있다는 것과 특히 업체 B의 경우 작업 시간이후인 야간에 잔류농도의 변화가 심하다는 것이 관

측되고 있다. 업체 B의 경우에는 용제가 그대로 생산품이기 때문에 가능하면 용제를 휘발시키지 않기 위해 배기 가스량을 조절하므로 업무시간대에 실내 누적량이 상대적으로 많기 때문이다.

국소배기 시스템 설치 후 전체적으로 작업장 내부의 THC 농도는 많이 감소된 것을 알 수 있으며 업체별로 약간의 차이는 있지만 A의 경우에는 60%, B는 30%, C는 50% 정도가 감소되었다. 측정값과는 달리 작업인원이 작업하는 국소배출원에 배기시스템을 설치하여, 실제로 작업자가 인지하는 취기강도는 더 많이 낮아졌다.

표 3에는 국소배기 시스템 설치 전후의 가스 유량, 작업장과 배출직전의 THC 농도 변화를 나타내었다. 표 3에서 보는 바와 같이 업체 A와 업체 C의 경우에는 가스유량이 크게 변화된 것을 알 수 있으며 THC 농도 역시 변화가 있음을 알 수 있다. 발생량의 변화는 활성화된 흡착탑을 설계하는데 사용된다.

Table 3. Changes in the gas flow rate, THC concentration in the working area and the concentration just before the VOC control facility before and after the optimization of ventilation system.

| | Company | A | B | C |
|--------|--|-----|-----|-----|
| Before | Gas flow rate, CMM | 100 | 120 | 140 |
| | Average THC concentration in working area, ppm | 328 | 289 | 217 |
| | Average THC concentration in duct just before emitted, ppm | 462 | 611 | 281 |
| After | Gas flow rate, CMM | 200 | 120 | 270 |
| | Average THC concentration in working area, ppm | 147 | 236 | 129 |
| | Average THC concentration in duct just before emitted, ppm | 276 | 390 | 256 |

9 hours/day

3.2 간헐적 배출원에 대한 흡착시스템

농도가 상대적으로 낮고 운전시간이 불안정한 경우인 간헐적 배출원에는 여러 가지 배출방지기술 중에 고정층 농축산화 기술이 적합하다. 이유는 다음과 같다.

- 1) 운전시간이 불규칙하여 방지설비 운영을 공정 운영에 맞추기 어렵다.
- 2) 농도가 낮다. 앞에서 보인대로 방지시설 전단

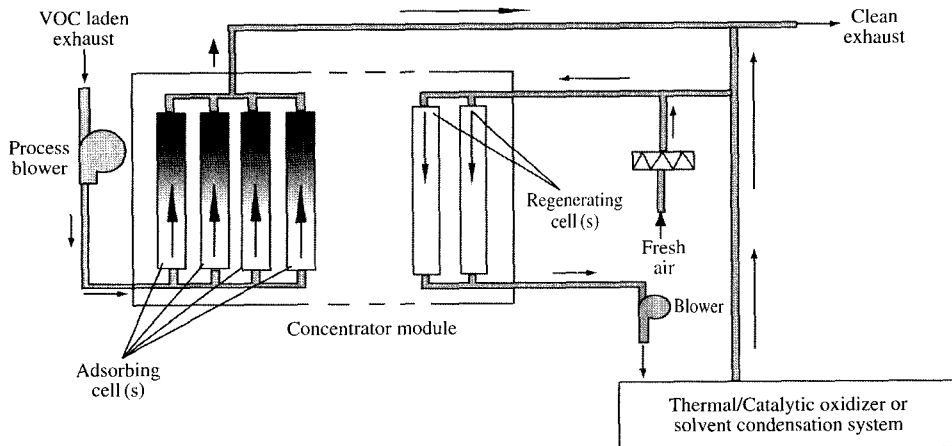


Fig. 4. Conceptual diagram of representative fixed bed concentration and oxidation system for the intermittent emission sources of VOCs.

농도가 THC 기준으로 200~400 ppm 정도면 톨루엔 기준으로는 30~60 ppm 정도이고 이는 LEL (Lower Explosion Limit) 0.25~0.5%에 해당한다. 따라서 일반적으로 알려진 휘발성 유기화합물 방지설비 선정 기준에도 농축산화설비가 적합한 것으로 판단되고 있다. 대표적인 고정층 농축산화기술인 영국 CSM의 고정층 농축산화설비의 개념도를 그림 4에 나타내었다. 일정기간 흡착 후 탈착은 생산공정과 분리하여 운전하는 것이 특징이다. 주로 중소기업에 적합한 방법이다.

3) 업체의 경제적인 여건이 고가의 방지설비를 설치하고 운영할 수 있는 상태가 아니다. 배출가스의 풍량은 앞에서 보인대로 200~300 CMM이 일반적이는데 이 정도의 풍량을 처리하는 직접산화시설이나, 촉매산화시설, 또는 연속식 농축산화시설을 설치하기에는 기업의 경제적 규모가 작다.

고정층 흡착 및 농축산화기술은 기존에 사용하던 활성탄 흡착방법과 동일하지만 활성탄을 일정형태의 카트리지에 장입하여 이동 및 탈부착을 용이하게 제작하여 흡착된 활성탄 카트리지를 분리 한 후 탈착 시설에서 탈착, 연소시키는 것이다. 활성탄 카트리지 는 일정기간(예를 들어 1개월) 사용하도록 설계하는 것이 필수적이다. 카트리지를 사용하면 활성탄의 장입 및 제거할 때 발생하는 먼지를 감소시킬 수 있

며 별도의 포장용기가 필요 없게 될 뿐만 아니라 작업시간도 단축시킬 수 있다. 또한 탈착설비를 보유한 기관에서는 농축된 휘발성 유기화합물을 보조연료로 이용할 수 있어서 에너지 절감효과도 기대된다. 따라서 자치단체의 지역냉난방이나 폐기물 소각로와 같은 시설에서 활용할 수 있도록 하는 법적 근거를 마련하는 것이 필요하다고 사료 된다.

3.3 흡착실험

흡착시스템을 정확하게 설계하기 위하여 각 업체 별로 발생하는 용매 중에 대표적인 물질을 선정하여 흡착실험을 수행하였다. 특히 문제가 되는 용매는 알콜류인 IPA (Iso-propyl alcohol)이다. 특히 인체용 잉크 용매로는 톨루엔, IPA, EA (Ethyl acetate)를 일정 비율로 혼합하여 사용하고 있다. IPA는 메틸알콜, 에틸알콜과 함께 활성탄으로 제거하기에 용이한 성분이 아니다 (박영태, 1992). 따라서 IPA용 흡착제를 선정하여 투입하여야 하는 문제가 있다.

메탄올이나 IPA와 같은 알콜류가 활성탄에 대해 흡착량이 작은 것은 두 가지 이유가 있다. 메탄올과 같이 분자크기가 작은 알콜류는 활성탄의 평균 미세 기공크기(약 20Å)를 쉽게 빠져나올 수 있기 때문이고 또 다른 하나는 활성탄이 제조되는 과정에서 OH group을 많이 갖게 되어 극성이 있는 물 분자나 알

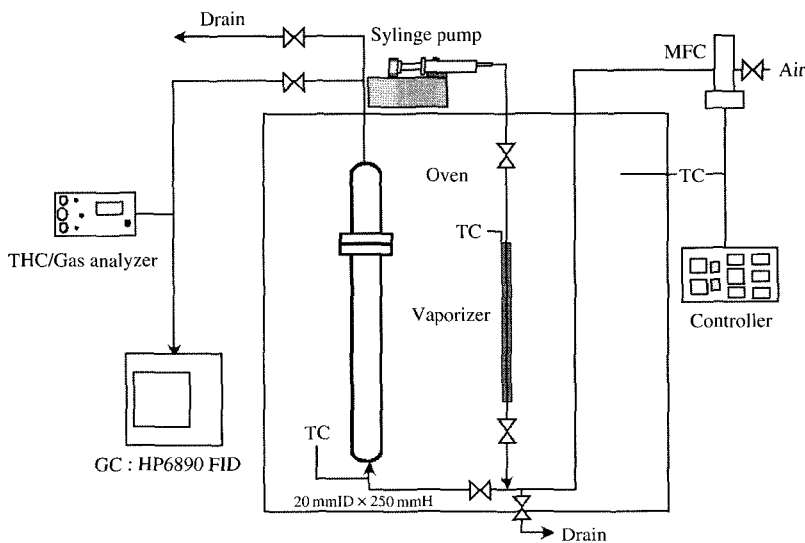


Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus for adsorption.

콜류에 친화력이 없기 때문이다. 그러나 분자크기가 큰 알콜류는 같은 극성이지만 직쇄상의 길이가 크고 분자크기가 크기 때문에 활성탄의 비극성 표면에 친화력이 있으며 기공에 쉽게 흡착될 수 있다(박영태, 1992).

알콜류의 흡착에는 분자크기에 적합한 지올라이트나 ACF (Activated Carbon Fiber)를 사용하는데(조순행, 2006) 일반적으로 활성탄에 비해 가격이 20~60 배 정도 차이가 있고 특히 ACF의 경우에는 비중이 작아 성능이 우수하다 하더라도 사용량이 제한되므로 교체주기를 빠르게 해 주어야 한다. 따라서 실제로 고정층 흡착탑에 사용하기 위해서는 흡착제를 적절하게 배합하는 것이 필요하며 이를 위해 흡착 실험을 수행하였다.

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 그림 5에 나타내었다. 흡착 칼럼은 내경 2cm, 외경 3cm, 전체 길이 25cm의 SUS 파이프로서 하부 20cm 깊이에 흡착제를 충전할 수 있도록 스크린을 설치하였다. 장치 및 주변 온도가 20°C 이하이면 용매의 응축이 생기는 반면 30°C 이상으로 상승하면 흡착효율이 떨어지고 특히, 케톤류의 경우 고온에서 흡착할 경우 활성탄을 촉매로 하여 촉매표면반응을 일으킬 수 있기 때문에 흡착이 가장 원활히 일어날 수 있는 25°C로 일정하게 온도를 유지하여 실험하였다.

각 실험에 적용된 휘발성 유기화합물은 삼성분의 경우 Toluene, MEK, IPA를 각각 일정비율로 혼합해 총 농도가 THC로 약 2,500 ppm이 되도록 주입하였고, 단일성분의 경우도 각 물질의 농도가 THC로 약 2,500 ppm이 되도록 조절하였으며 농도조절은 정밀한 실린저에 액상의 흡착질을 넣고 주입구부터 이동판 끝까지 열선을 감아 일정한 온도로 유지해 휘발될 수 있도록 하였고 시간당 주입량을 변화시켜 요구하는 농도를 조절하였다. 단일성분을 주입할 경우 톨루엔 3.5 mL/hr, MEK 7.5 mL/hr, IPA 1.8 mL/hr, 그리고 삼성분의 경우 4.0 mL/hr로 주입하였으며, 흡착시 반응기로 유입되는 공기의 유량은 5.0 L/min로 MFC를 이용해 정확히 조절하였다. 단일성분일 경우 장치의 유입부 및 출구부의 농도는 GC (Gas Chromatograph, HP 6890 FID)와 THC Analyzer (FID Model 10)로 동시에 측정하였으며 GC의 운반 가스로는 헬륨이 사용되었다. 단일 흡착제인 경우에는 활성탄 20g, ACF 10g, 그리고 조합 흡착제일 경우 활

Table 4. Physical properties of carbonaceous sorbents.

| Properties | Shinkwang AC | Handok AC | Mitsubishi ACF |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------------|
| Type | Pellet | Pellet | Fiber |
| BET surface area (m ² /g) | 1086 | 1094 | 1631 |
| Micropore area (m ² /g) | 1055 | 1066 | 1503 |
| Micropore volume (cm ³ /g) | 0.6 | 0.53 | 1.4 |
| Average pore diameter (Å) | 24.87 | 21.3 | 40.9 |

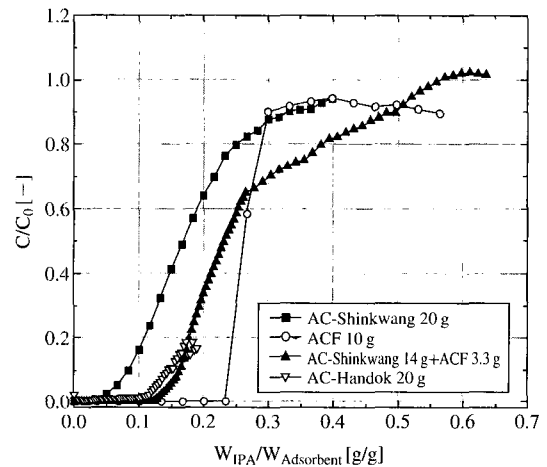


Fig. 6. IPA adsorption characteristics with various adsorbents (IPA-single component adsorption).

성탄 14g과 ACF 3g을 적용하였다. 시간에 따른 흡착량 (g/g, wt%)은 유입농도와 유출 농도 곡선의 미적분으로부터 구할 수 있었다. 사용한 흡착제는 국내 생산 활성탄 (Shinkwang AC, Handok AC)과 수입 ACF (Mitsubishi)를 비교하였다. 흡착제의 물성을 표 4에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 흡착실험결과

그림 6은 흡착제 종류에 따른 IPA의 파과특성을 보인 것이다. $W_{IPA}/W_{adsorbent}$ (g/g)는 흡착제 단위 무게 당 흡착질의 투입된 양을 의미하며 C_i/C_0 는 주입농도 대비 배출농도의 비이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 Shinkwang AC는 파과가 일찍 이루어져서 IPA를 제거하는데 사용이 어려울 것으로 판단된다. ACF의 경우에는 같은 탄소계 흡착제인데도 불구하고 파

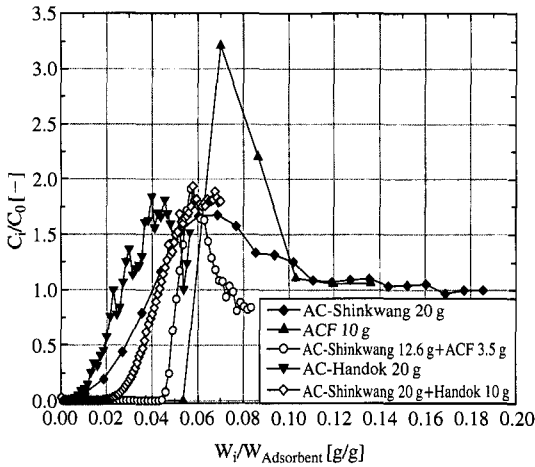


Fig. 7. IPA adsorption characteristics with various adsorbent (three component adsorption).

과가 많이 지연되는 것을 알 수 있으며 특히 같은 활성탄인 Handok AC의 경우에도 파과지연이 관측된다. 이러한 파과지연은 흡착제의 기공도차이에 의해 나타나는 것이다. 표 4의 micropore area 차이에 따라, 즉 micropore area가 클수록 IPA의 흡착량이 증가하는 것을 알 수 있다. Shinkwang AC와 ACF를 혼합하는 경우 활성탄과 ACF의 중간 정도의 파과특성을 보이고 흡착곡선은 활성탄의 흡착곡선을 따라가는 것을 알 수 있다.

Toluene-MEK-IPA 3성분계 흡착실험에서 탄소계 흡착제에 흡착력이 가장 약하다고 판단되는 IPA의 파과특성을 고찰한 결과를 그림 7에 나타내었다. 3성분을 동시에 투입하면서 IPA만의 흡착특성을 고찰한 경우이다. IPA에 대한 흡착능력 역시 ACF가 가장 우수하다는 것을 알 수 있으나 톨루엔이나 MEK와의 경쟁흡착으로 서서히 탈착되는 것을 알 수 있다. 3성분계 흡착에서 IPA 흡착능력은 Handok AC가 가장 낮게 나타나고 있다. Handok AC는 IPA 단일성분 흡착에 있어서는 Shinkwang AC보다 파과점이 지연되면서 우수한 흡착능력을 나타내었다(그림 6). 단일성분 흡착에서 우수한 성능을 보인 활성탄이 다성분계 흡착에서 성능이 저하되는 이유는 경쟁흡착에 의한 것이다(박준택 등, 1994). 즉, IPA보다 활성탄에 대한 친화력이 큰 toluene과 MEK가 흡착되면서 IPA가 빠져나가는 것이다. Shinkwang AC와 ACF를 혼

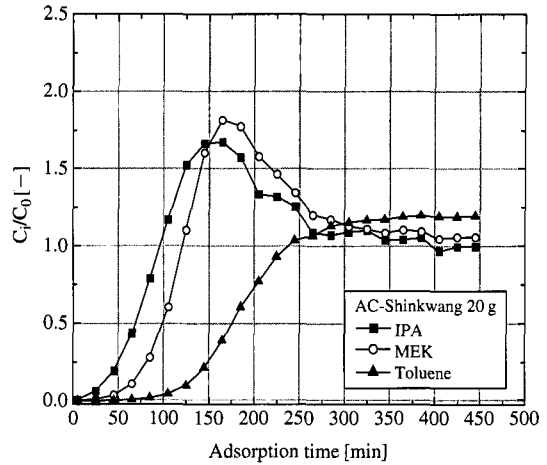


Fig. 8. Three component adsorption characteristics with Shinkwang activated carbon.

합하여 사용하는 경우에는 높은 파과지연효과를 얻을 수 있었으며, 또한 두 가지 활성탄을 혼합하는 경우에도 Handok AC의 우수한 IPA 흡착특성으로 인해 파과지연효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 톨루엔이나 MEK는 Shinkwang AC에 주로 흡착되고 경쟁흡착으로 탈착된 IPA가 Handok AC에 흡착되어 파과지연효과를 보이는 것이다.

결국 Toluene-MEK-IPA 3성분계 흡착에서 파과점을 지배하는 IPA의 효과적인 처리를 위해서는 제조 사별 활성탄을 조합하여 사용하면, 물론 AC+ACF 조합보다는 파과점을 더 크게 연장시키지는 못하였으나, 경제성과 현장 적용성 등을 고려하였을 때 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. ACF와 AC의 조합은 실험적으로는 성능이 우수하나 ACF는 현장에 많은 양을 충전할 수 없을 뿐만 아니라 또한 압력손실이 커서 중소기업 현장에 적용하기에는 더 많은 검토가 요구된다. 따라서 IPA와 같이 흡착력이 약한 성분을 용이하게 흡착할 수 있는 활성탄을 조합해서 사용한다면 활성탄소섬유와 조합하는 것보다 현장 적용성이 더 우수하리라 사료된다.

각 활성탄과 활성탄 조합의 경우 3성분계 흡착특성을 고찰하였다. 그림 8은 Shinkwabg AC를 이용한 Toluene-MEK-IPA 3성분계 흡착 특성을 보이고 있다. 그림 8에서 Shinkwang AC의 경우에는 toluene이 가장 안정적으로 흡착하며 다음으로는 MEK, IPA 순

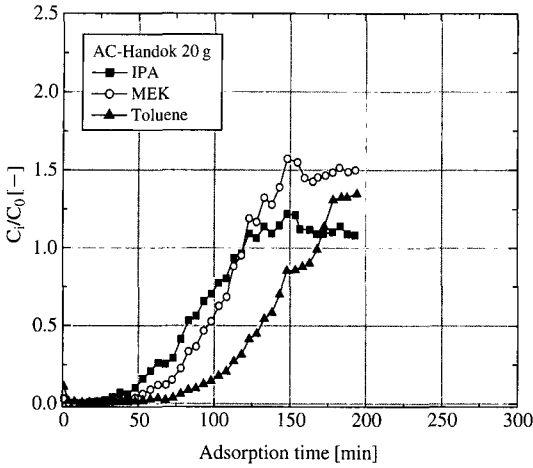


Fig. 9. Three component adsorption characteristics with Handok activated carbon.

으로 흡착성능이 차이를 보이고 있다. IPA의 경우 파과를 관측하기 어려울 정도로 초기부터 파과가 관측되고 있다. 또한 IPA의 경우에는 100분이 지나면서 경쟁흡착으로 흡착된 IPA 농도가 1.0을 넘어서었으며 MEK는 120분 정도에서 C_t/C_0 가 1.0이 넘어서는 것을 알 수 있다.

그림 9는 Handok AC를 이용한 3성분계 흡착특성이다. Shinkwang AC와 비교하면 toluene의 경우에는 짧아지고 MEK는 유사하며 IPA는 파과시간이 길어져 약 50분대에 파과가 관측되고 있다. 그림 8의 Shinkwang AC와 비교했을 때 물론 톨루엔이 가장 긴 파과시간을 보이는 하지만 MEK와 IPA 모두 전체적으로 큰 차이를 보이지 않으며 친화력을 갖는 것을 알 수 있다.

활성탄을 단독으로 사용하는 경우 각각의 특성 차이로 물질별로 친화력이 달라서 Shinkwang AC의 경우에는 IPA와 MEK의 파과시간이, Handok AC의 경우에는 톨루엔의 파과시간이 낮아지므로 이를 보완하는 방법으로 두가지 활성탄을 결합하여 사용하는 것이 타당하다고 판단된다. 그림 10은 Shinkwang AC와 Handok AC를 무게비로 2:1이 되게 series로 연결하여 증진한 상태에서 실험한 결과이다. 물론 사용한 전체 활성탄 무게가 20g에서 30g으로 증가되긴 했지만 두 가지 활성탄의 단점을 보완하는 흡착특성이 도출되는 것을 알 수 있다. IPA의 파과가 약

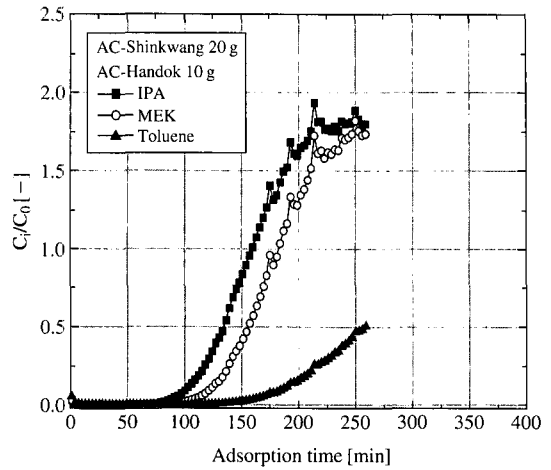


Fig. 10. Three component adsorption characteristics with Shinkwang/Handok activated carbon.

100분까지 증가되는 것을 알 수 있다.

4.2 흡착탑 설계

대상 화학공정에 필요한 처리시설의 구성요소는 활성탄 흡착탑과 blower이다. 흡착탑 설계의 기본적인 절차를 요약하면 다음과 같다(US Army Corps of Engineers, 2001).

- (1) 활성탄 교체주기 결정: 1개월
- (2) 1개월 주기에 필요한 활성탄 양 결정
- (3) 활성탄 흡착탑 크기 결정
- (4) 처리시설의 압력손실 예측과 FAN 결정
 - 발생원으로부터 활성탄 흡착탑까지의 piping, 밸브
 - 활성탄 흡착탑

4.2.1 활성탄

방지설비에 사용하는 활성탄에 기준을 정할 필요가 있다. 현재 산업단지에서 사용하는 활성탄은 조립탄(GAC: granular activated carbon, 파쇄탄이라고도 함)이다. 일반적으로 크기는 4×8 mesh 또는 3×10 mesh 크기로 석탄을 파쇄하여 만든 원료를 대상으로 활성화하여 제조하거나 미국 Calgon Carbon에서와 같이 원료를 분쇄하고 성형한 후 다시 파쇄하여 제조하기도 한다(예: Calgon BPL AC). 파쇄활성탄은 주로 위탁재생용으로 사용하는데 위탁재생방법은 많이 알려진 방법으로 850~950°C에서 스팀으로 재부

활시키는 방법을 사용하기 때문에 입자 크기가 작아 지고 20% 정도의 gasification loss가 발생한다. 농도가 높아 교체주기가 짧은 경우에는 현장재생용 활성탄을 사용하게 되며 이 경우에는 성형활성탄(pelletized activated carbon)을 사용하는 것이 원칙이다.

4.2.2 활성탄 양 결정

흡착탑 사용시간 1개월은 임의로 정한 수치이나 중소 산업체에서 감당할 수 있는 최대 교체주기라고 판단된다. 1개월 이상이 되면 흡착탑의 크기가 커져서 사업장 내에 설치면적이 부족하고 이보다 짧으면 교체에 소요되는 비용이 많이 소요되는 문제가 있다.

각 업체별로 1개월간 사용하기 위한 활성탄 양을 결정하기 위해서는 발생하는 휘발성 유기화합물 각각의 농도와 Freundlich Isotherm에 근거한 평형흡착량을 이용하여야 한다. 3개 대상업체에서 사용하는 용제의 종류는 다양하지만 A업체의 경우 사용하는 용제의 95% 이상이 톨루엔이며 B업체의 경우 톨루엔 70%, C업체에서도 80% 이상을 톨루엔을 사용하고 있으므로 톨루엔을 기준으로 활성탄 사용량을 결정한다. 활성탄의 톨루엔에 대한 adsorption isotherm은 제조사에 따라 다르겠지만 일반적으로 평균 350 (mg/g)을 사용한다. 각 업체의 발생량을 비교해서 활성탄 양을 결정하면 다음 표 5에 보인 바와 같다.

표 5에서 보는 바와 같이 각 업체별로 작업장 환경개선을 한 후 배출 THC를 기준으로 이를 톨루엔으로 가정하여 발생농도를 계산하고 1개월 동안 발생하는 톨루엔을 포집하는데 소요되는 활성탄 양을 결정하는데 평형흡착량을 350 mg/g으로 결정하면 업

체별로 각각 약 1.1톤, 0.95톤, 1.4톤의 활성탄이 필요하다는 결론이 도출된다.

그럼 10에서 보는 바와 같이 Shinkwang AC와 Handok AC를 2:1로 조합한 경우 가장 파과시간이 짧은 IPA의 평형흡착량과 파과시까지의 흡착량을 비교해 보면 파과시까지의 흡착량, 즉 working capacity가 평형흡착량의 약 65%를 차지하고 있다. 따라서 safaty factor를, 이를 감안하여 54%를 주어 계산한 활성탄 사용량은 표 5에서 보는 바와 같이 각각 1.7, 1.45, 2.14톤이 된다.

4.2.3 활성탄 흡착탑 크기

활성탄 흡착탑을 결정하는 방법은 우선 허용가능한 superficial velocity를 갖는 흡착탑의 직경을 구하고 높이를 구한 다음 이 규격의 흡착탑이 현장에 적용가능한가를 고려하여 변경여부를 결정하게 된다. Superficial velocity (V)는 흡착탑이 비어 있다고 가정 한 상태에서의 가스 유속이고 일반적으로 5~50 cm/s 범위에서 결정하는데 속도가 커지면 흡착탑의 압력 손실이 커지고 소요 에너지가 증가한다. 일반적으로 25 cm/s가 적당하다. 각 업체의 가스유량으로부터 vessel의 직경 D를 결정하여 표 5에 나타내었으며 각 업체별로 각각 4.1, 3.2, 4.8 m가 계산된다.

Vessel의 높이는 사용하는 활성탄의 비중이 지배한다. 일반적으로 석탄계 pellet 형태의 활성탄은 450 kg/m³의 비중을 갖는다. 이로부터 각각의 필요한 흡착탑 부피를 구하고 높이를 계산하면 역시 표 5에 보인 바와 같이 높이는 각각 29, 40, 26 cm이며 접촉 시간은 1.16, 1.6, 1초이다. 이 정도의 높이로 흡착탑을 설치하면 층의 높이가 낮아 축열에 대한 우려가 없으며 따라서 반응에 의한 열화현상을 최소화할 수 있다.

그러나 이러한 기본적인 자료를 토대로 각 업체의 설치면적을 고려하여 설치하게 되는데 직경에 비해 높이가 낮아 설치면적이 커진다면 여러개의 단위 unit을 높이로 설치하고 가스흐름을 계산된 접촉시간을 맞추는 방법으로 변경이 가능하다. 단 소요 표면적을 변경해서는 안된다.

4.2.4 처리시설의 압력손실

압력손실은 설치된 시설전체에 대해 적용된다. 우선 활성탄 흡착탑의 압력손실은 일반적으로 60 mmH₂O/m-carbon이 걸리는 것으로 알려져 있다(US

Table 5. VOCs emission characteristics of the companies and design parameters for the carbon vessel.

| Company | A | B | C |
|--|-------|-------|-------|
| Gas flow (CMM) | 200 | 120 | 270 |
| THC (ppm) | 276 | 390 | 256 |
| Concentration (ppm, as toluene) | 39.4 | 55.7 | 36.6 |
| Toluene emitted (kg/min) | 0.032 | 0.027 | 0.04 |
| Toluene emitted (kg/month) | 388.7 | 329.5 | 486.7 |
| Carbon (kg/month) | 1,110 | 941 | 1,390 |
| Carbon (kg/month) safaty factor (100%) | 1.7 | 1.45 | 2.14 |
| Vessel diameter (m) | 4.1 | 3.2 | 4.8 |
| Vessel height (m) | 0.29 | 0.4 | 0.26 |
| Contact time (sec) | 1.16 | 1.6 | 1 |
| Pressure drop (mmH ₂ O) | 268 | 300 | 266 |

Army Corps of Engineers, 2001). 따라서 각각업체별 흡착탑의 압력손실은 각각 18, 24, 16 mmH₂O가 걸릴 것으로 예상된다. 또한 일반적으로 흡착탑에서 blower까지의 압력손실은, 물론 거리와 duct 직경에 따라 다르지만 일반적으로 약 250 mmH₂O가 소요된다. 따라서 전체적으로는 268, 300, 266 mmH₂O의 압력손실이 예상되며 FAN은 이 압력손실을 이길 수 있는 용량으로 결정한다.

5. 결 론

오존 및 스모그의 원인물질인 휘발성 유기화합물을 배출하는 시화 및 반월 산업단지의 중소기업을 대상으로 배출원 분석을 수행하였다. 분석결과 작업 시간에 따라 배출량이 변하는 간헐적 배출원이며 작업시간 외에도 상당량의 잔류농도로 인해 실내 및 배출되는 농도가 최소 100 pm 이상이 되는 것을 알 수 있었다. 실내환경 개선을 통해 업체별로 배출량을 최적화하고 최적화된 배출농도에 적합한 활성탄 흡착탑을 설계하였다. 흡착탑을 설계하는 과정에서 가장 많은 오류를 범하고 있는 물질별 흡착성능을 분석하였고, 특히 활성탄으로 제거가 어려운 IPA를 제거하기 위하여 활성탄과 활성탄소섬유, 기공도가 서로 다른 활성탄들을 조합하여 흡착실험을 수행하였다. 실험결과 활성탄소섬유가 가장 우수한 흡착성능을 보였으나 중소기업에서 수용 가능한 흡착제의 가격과 압력손실 등을 고려하여 IPA를 효과적으로 제

거하기 위한 방법으로는 기공도가 서로 다른 활성탄의 조합을 사용하는 것이 적용성이 우수하다는 것을 보였다. 효율적인 활성탄 흡착탑 설계를 위한 기본적인 가이드라인을 제시하였다.

참 고 문 헌

- 김기현, 주도원, 최여진, 홍윤전, 사재환, 박종호, 전의찬, 최철렬, 구윤서 (2005) 안산시 주거지역을 중심으로한 환경대기 중 휘발성 유기화합물과 황계열 성분의 온라인 연속측정 연구, 한국대기환경학회지, 21(1), 107-118.
- 김선태 (2006) 배출업체의 환경방지시설 운영 및 시설구조 현황과 문제점, 제1회 반월·시화산업단지 환경포럼, 2006년 3월, 한국산업기술대학교.
- 김진용, 이효송, 유재근, 길인섭, 김덕현, 이영우 (2005) 시화지구에서 발생하는 VOCs 농도분포 특성 연구, 한국대기환경학회지, 21(6), 613-624.
- 박영태 (1992) 신판 활성탄: 기초와 응용, (주)동화기술.
- 박준택, 김종식, 정경환, 문희, 서곤 (1994) 입상활성탄에 대한 n-헥산, 메틸에틸케톤 및 톨루엔의 기상 흡착성질, 화학공학, 32(3), 476-482.
- 조순행 (2006) 흡착제 그 원리와 응용, 지구문화사.
- Department of Army (2001) Engineering and Design; Adsorption Design Guide, U.S. Army Corps of Engineers, Design Guide No. 1110-1-2.
- Henning, K.D., W. Bongarts, and J. Degel (1989) Adsorptive recovery of problematic solvent in: Proceedings of the 19th Biennial Conference on Carbon, June 25-30, Pennsylvania State University, USA.