

유독성 유기화합물 제거를 위한 흡착제 개발(Ⅱ)
- Organo-anthracite에 의한 유기화합물의 흡착용해 특성 -

장현숙 · 박상원

계명대학교 환경과학과

(1999년 10월 11일 접수, 1999년 12월 29일 채택)

Development of Adsorbent for Removing
Toxic Organic Compounds(Ⅱ)
-Characterization of Adsorbilization of Organic Compounds
by the Organo-anthracite-

Hyun-Suk Jang · Sang-Won Park

Department of Environmental Science, Keimyung University

ABSTRACT

This study is aimed to develop the adsorbent which can effectively remove toxic hydrophobic organic compounds from the aqueous phase. The emphasis was made to elucidate the adsorbilization behavior of sparingly soluble organic compounds (SSOCs) into the cetyltrimethylammonium bromide(CTAB) layer formed on anthracite by the partition coefficient. The amount of SSOCs removed from aqueous solution was increased with increase of the amount of CTAB coated on the surface and with increase of SSOCs's hydrophobicity.

With the surface-modified solid shown in above, chloroform and benzene at the initial concentration of 6×10^{-4} M were removed over 95%.

Experimentally determined partition coefficient(K_d) values between organo-anthracite and organics were 4~25 times higher than theoretical K_d values of same organics

Organo-anthracite formed by the addition of the CTAB can effectively immobilize organic contaminants dissolved in landfill leachate and can also be applicable to wastewater treatment containing toxic hydrophobic organic compounds such as chloroform and benzene.

Key Words : Adsorption, CTAB, Anthracite, Hydrophobic Organic Compounds

요약문

본 연구에서는 수용액 중의 유독성 유해물질로 미량으로 존재하여도 치명적 독성을 가진 난용성 유기오염물(sparingly soluble organic compounds, SSOCs)의 제거를 위한 흡착제 개발을 목표로 양이온 계면활성제(cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)로 표면 개질된 organo-anthracite의 유기화합물 제거능을 조사하고, 흡착 특성을 분배계수(partition coefficient, K_d)로 평가함으로써 organo-anthracite의 유기물질 흡착메카니즘을 규명하고자 하였다.

Organo-anthracite는 CTAB가 흡착됨에 따라 전 pH 범위에서 표면전위가 양의 값으로 상당히 증가되었으며, 또한 표면의 소수성이 증가되어 표면전하가 pH에 비의존적으로 나타났다. pH 2~10의 용액을 탈리액으로 하여 organo-anthracite의 탈착성을 실험한 결과 0%의 탈착율을 나타내어 전 pH 범위에서 안정함을 알 수 있었고, 이를 이용한 제거실험에서 초기 농도 6×10^{-4} M인 클로로포름과 벤젠이 전 pH범위에서 95% 이상 제거되었다. Organo-anthracite와 유기화합물간의 분배계수 K_d 값은 실측치가 이론치보다 4~25배의 높은 값으로 나타났다. 이는 다른 흡착제에 비해 organo-anthracite내에서 SSOCs의 분배가 더 쉽게 이루어짐을 의미한다.

따라서, 유독성 유기오염물질을 포함하는 폐수의 처리시 흡착제로써 이용이 가능하며 또한 organo-anthracite를 매립지의 차수막으로 이용시 유독성 유기오염물질의 이동을 보다 효과적으로 지연시킬 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : Organo-anthracite, 난용성 유기화합물, 분배계수

1. 서론

환경문제에 대한 관심이 고조되면서 지하수의 오염 방지와 수처리에 대한 방안이 여러 각도에서 제시되고 있다. 그 일환으로 토양 및 지하수가 침출수에 의해 오염되는 것을 방지하기 위해 점토를 매립지의 차수막으로 이용하고 있다. 그러나 점토의 큰 비표면적에 의한 흡착능으로 수용성 물질의 흡착제거는 가능하나 난용성 유기오염물(sparingly soluble organic compounds, SSOCs)이 함유된 경우 투수성이 증가하여 차수막으로서의 사용가능 여부가 논란이 되고 있다.^{1,2)} 또한 대부분의 흡착제가 음전하를 띠는 표면 특성으로 말미암아 저용해성임에도 불구하고 지하수나 지표수에 존재시 독성이 매우 큰 클로로포름이나 벤젠과 같은 SSOCs 처리에 흡착제를 이용하는데 어려움이 있었다.

이의 대안으로 선진 외국의 경우 organo-clay를 이용한 유기오염물질의 제거에 관한 연구가 이미 폭넓게 이루어지고 있다.^{3~5)} Mortland 등의 유기적으로 변형된 smectite를 이용한 수용액으로부터 페놀류 제거 실험에서 소수성이 강한 난용성일수록 보

다 강하게 흡착 제거되는 결과를 나타내었으며,³⁾ Boyd 등은 clay-organic complexes로 pentachlorophenol을 제거한 연구결과에서 등온선이 수용액의 pH에 영향을 받지 않는다고 보고했다.⁴⁾ 또한 두 종류(humic substance, quaternary ammonium ions)의 다른 유기물로 개질된 clay에 의해 물로부터 비극성 유기오염물질 흡착 실험이 Lo 등과 Liljestrand에 의해 이루어졌다.⁵⁾ 이들은 organoclay에 의한 유기오염물질 제거는 주로 용질의 분배에 기인한다고 설명하였으며, 분배효과는 직선흡착등온선으로 나타날 것으로 추정하였다.

이와 달리 국내의 연구실태는 최근 들어 폐유기용제 배출량의 증가에 따른 지하수 오염 및 유해 폐기물에 대한 문제가 심각해지면서 많은 관심을 가지고 있으나 아직 이 분야에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 수용액 중의 SSOCs의 제거를 위한 흡착제 개발을 목표로, 이를 위해 일차적으로 표면이 소수성을 나타내는 anthracite를 흡착제로 선정하여, 양이온 계면활성제(cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)를 흡착시킴으로써 흡착

제의 기능을 증가시키기 위한 최적 조건과 소수기가 있는 표면과 계면활성제간의 흡착 메카니즘을 이전 연구에서 도출하였다.

본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 CTAB로 표면 개질된 organo-anthracite의 클로로포름과 벤젠의 제거능을 조사하고, 흡착용해 제거 특성을 분배계수 (partition coefficient, K_d)로 평가함으로써 organo-anthracite의 유기물질 흡착 메카니즘을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 용해도

수용액 내에 존재하는 유기화합물이 고체표면에 흡착된 계면활성제 회합 내부로 분배되는 현상을 흡착용해(adsolubilization)라 한다. 이 현상은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 micelle의 역할을 하는 bilayers가 고체 표면에 흡착된 계면활성제에서 나타나는 것으로, 단지 계면활성제만 존재할 때 형성되는 micelle에 용질이 분배되는 현상인 용해(solubilization)와 구별된다.⁶⁾ 토양에 함유된 유기물질에 의해 SSOCs의 흡착용해가 이루어지는 것에 관한 많은 연구가 최근 선진국에서 이루어지고 있다.^{7,8)} 토양에 흡착용해되는 SSOCs의 양은 토양의 유기탄소 함유량과 SSOCs의 용해성 또는 분배계수 (partition coefficient, K_d)로부터 예측되어질 수

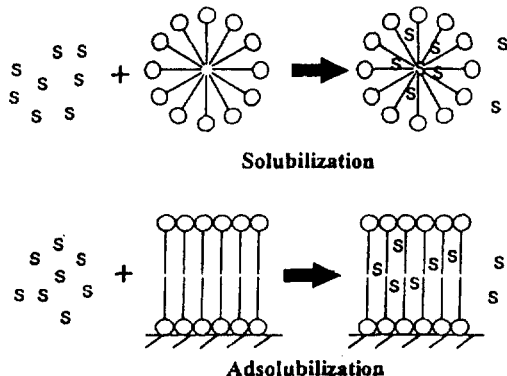


Fig. 1. Phenomena of solubilization and adsolubilization.

있다. Chiou 등은 토양-물 계면에서 SSOCs의 흡착은 토양에 함유된 유기물질내로 분배되는 것에 기인하며 흡착상수는 SSOCs의 용해성에 의존한다고 제시하였다.⁷⁾

용해도(water solubility, C_w)는 f_w 를 이용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$f_w = \frac{C_w V_w}{C_w V_w + C_a V_a} = \frac{1}{1 + K_H \frac{V_a}{V_w}} \quad (1)$$

$$C_w = \frac{f_w \cdot M_{total}}{V_w} \quad (2)$$

여기서, C_a 와 C_w 는 각각 공기와 물 중으로 분배된 유기화합물의 농도(mol/L), V_a 와 V_w 는 각각 공기와 물의 부피(ml)를 나타낸다. K_H 는 C_a 를 Henry 법칙에 적용시켜 얻은 무차원 Henry상수를 의미하며, M_{total} 은 V_w 에 주입한 유기화합물의 질량(g), f_w 는 물질의 총질량에 대한 수용액상 내에서의 질량비이다.

2.2. 분배계수

실제로 물에 녹아 있는 유기화합물은 그 성격상 중성인 것도 있지만 이온성을 띠는 것도 있다. 더구나 고체의 표면은 유기성 표면, 광물성 표면뿐만 아니라 이온성 표면, 반응성 표면 등이 함께 존재한다. 이러한 특성들을 종합하여 K_d 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} = \frac{C_{om} \cdot f_{om} + C_{min} \cdot A + C_{ie} \cdot \sigma_{ie} \cdot A + C_{rxn} \cdot \sigma_{rxn} \cdot A}{C_{w,neut} + C_{w,ion}} \quad (3)$$

여기서, C_{om} : 유기성 표면에 분배된 흡착질 농도 (mol/kg_{om}), f_{om} : 무계분율 (kg_{om} / kg_{solid}), C_{min} : 광물성 표면에 분배된 흡착질 농도 (mol/m²), A : 광물성 표면의 표면적 (m²/kg_{solid}), C_{ie} : 이온성 표면에 분배된 흡착질의 농도 (mol/mol_{surface charges}), σ_{ie} : 고체표면에서 전하를 띠는 site의 농도 (mol_{surface charges}/m²), C_{rxn} : 반응성 표면에서의 흡착질의 농도 (mol/mol_{rxn sites}), σ_{rxn} : 고체표면에서

반응성 site의 농도(mol_{rxn sites}/m²), C_{w,neut} : 용액 내에서 전하를 띄지 않은 화합물의 농도(mol/L), C_{w,ion} : 용액내에서 전하를 띄는 화합물의 농도(mol/L)이다.

Organo-anthracite의 경우 표면이 계면활성제에 의해 유기성을 나타내므로 비극성 유기화합물이 유기성 표면에 흡착되는 경우만 고려하여 식 (3)을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_d = \frac{C_{om} \cdot f_{om}}{C_{w,neut}} = K_{om} \cdot f_{om} \quad (4)$$

여기서 f_{om}은 흡착제의 특성을, K_{om}은 흡착되는 유기화합물의 특성을 나타낸다.

f_{om}은 organo-anthracite의 유기적 표면 특성에 따라 최대값인 1로 가정하였고, K_{om}값은 linear free-energy relationships(LFER_s)를 이용하여 계산해 본 결과 클로로포름이 20.13, 벤젠이 24.61로 계산되었다.¹⁰⁾

클로로포름과 벤젠의 물리화학적 특성과 식 (2)와 (3)에 의해 이론적으로 계산된 C_w, K_d 값을 Table 1에 나타내었다. C_w와 K_d값의 관계는 용해성이 작을 수록 K_d값이 증가하는 반비례 관계를 보였다. C_w, K_{ow}(octanol/water partition coefficient), K_d값에 의해 클로로포름에 비해 벤젠의 소수성이 더 강함을 알 수 있다.

Table 1. Properties of organic chemicals used in experiments at 25°C

compound	chloroform	benzene
molecular weight	119.38	78.11
T _m (°C)	-63.5	5.5
T _b (°C)	61.7	80.1
K _H (atrn · L/mol)	4.00	5.357
C _w ^{sat} (mol/L)	6.5×10 ⁻²	2.24×10 ⁻²
K _{ow} ($\frac{\text{mol/L octanol}}{\text{mol/L water}}$)	79.43	132
C _w (mol/L)	4.98×10 ⁻²	4.95×10 ⁻³
K _d	20.13	24.61

3. 실험방법

3.1. Organo-anthracite 표면 특성

양이온 계면활성제가 흡착된 organo-anthracite 입자의 pH에 따른 제타전위(Zeta Potential)변화를 Zeta Master(Malvern Instruments, England)로 측정하였다. Organo-anthracite는 이전 연구에서와 같은 방법으로 조제하여 사용하였다¹¹⁾ 0.01 M NaCl용액 1ℓ에 200mesh anthracite를 0.2g을 주입하고 25°C를 유지하며 교반하면서 pH를 측정하고 기록하였다. pH는 범위가 3~10이 되도록 0.1N HCl과 0.1N NaOH로 조정하였다.

모든 시약은 제조 회사에서 공급되는 것을 그대로 사용하였으며, Adventec GS-2000을 통과한 탈염된 3차 증류수를 모든 실험에 사용하였다.

3.2. Organo-anthracite의 탈착성

Organo-anthracite입자의 탈착성 연구는 계면활성제를 이용하여 표면개조한 흡착제의 응용에 결정적인 영향을 미친다. 따라서 이전 연구결과를 바탕으로 100% 흡착율을 나타내는 농도인 2×10⁻⁵M CTAB로 표면개질된 organo-anthracite를 물로 세정하여 세정액내의 계면활성제 농도를 TOC로 분석함으로써 탈착된 계면활성제 양을 측정하였다. 그리고 개조된 흡착제의 pH 영향을 관찰하기 위해 pH 2~10 범위의 용액을 세척용액으로 사용하여 탈착에 대한 pH 영향을 규명하였다.

3.3. Organo-anthracite의 SSOCs의 흡착용해능

유기화합물의 제거 실험은 anthracite와 CTAB가 코팅된 organo-anthracite를 이용하여 행하였다. SSOCs로는 Junsei사의 클로로포름과 벤젠을 사용하였다. 계면활성제가 코팅된 anthracite에 6×10⁻⁴M의 클로로포름과 벤젠을 주입한 후 3시간 혼합시켜 평행에 도달시킨다. 상등액을 n-hexane으로 추출한 후 용해되어 있는 유기화합물의 농도를 GC/MS(GC 8000 series, MD 1000 series, 영국,

VGMassLab)로 분석하여 최초 농도와 비교를 통하여 총 물질수지를 확인하였다. 사용된 컬럼은 DB-WAX Column(30m×0.25mm ID, 0.25µm film)이었고, oven 조건은 40℃에서 5분간 유지한 후 100℃까지 5℃/min, 250℃까지 20℃/min으로 온도를 높인 후 250℃에서 10분간 유지하였고, 운반기체 헬륨의 속도는 35ml/min이었다. 시료 주입구의 온도는 180℃였고 transfer line의 온도는 250℃였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. Organo-anthracite 표면 특성 규명

Fig. 2는 양이온 계면활성제로 코팅시키기 전과 코팅후의 anthracite 입자의 제타전위 측정 결과로, Fig. 2에서 보는 바와 같이 $5 \times 10^{-5} \text{M}$ CTAB 코팅 시 전 pH 범위에서 표면전위가 양전하 값으로 상당히 증가되는 것으로 나타났다. 이것은 일반적으로 anthracite 입자의 표면이 음전하로 대전되어 있으므로 양이온 계면활성제인 CTAB가 정전기적 인력에 의해 흡착제 입자에 흡착되면서 표면전하를 중화시키므로 제타전위 값이 증가되는 것으로 보인다.

수용액의 pH에 따라서 흡착제의 표면전하가 변화

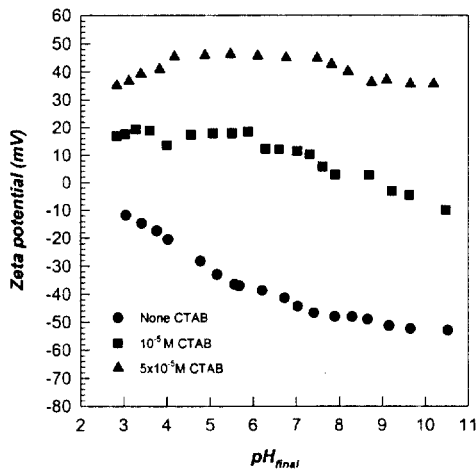


Fig. 2. The zeta potential of anthracite with CTAB as a function of pH (0.2g/L anthracite, 10^{-2}M NaCl).

하는 것은 이미 잘 알려진 사실이며, 이는 나아가서 유기화합물의 흡착특성에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 양이온 계면활성제가 코팅됨에 따라 anthracite 표면의 소수성을 증가시켜 표면전하가 pH에 비의존적으로 개질된다. 이로 인해 유기화합물의 흡착제거 효율성이 크게 증가될 것으로 예상된다.

4.2. Organo-anthracite의 탈착성 연구

David 등이 HDTMA(hexadecyltrimethylammonium)로 양이온 교환 능력(cation exchange capacity, CEC)의 100%가 개질된 zeolite의 안정도를 이온강도와 pH, 용매 등을 변화시키며 살펴본 결과 매우 안정한 것으로 나타났으며,¹²⁾ Donald 등은 개질된 montmorillonite와 같은 고형물에서는 좀처럼 가역반응이 일어나지 않는다고 보고하였다.¹³⁾ Anthracite의 경우에도 가역반응이 일어나지 않았다. pH 2~10의 용액을 탈리액으로 하여 실험한 결과 0%의 탈착율을 나타내어 전 pH범위에서 안정함을 알 수 있었다(Fig. 3). 이는 CTAB가 특이 흡착(specific adsorption)의 형태로 anthracite에 흡착됨을 증명하고, 이 농도에서 흡착메커니즘이 admicelles에 의한 것이 아니라 hemimicelles로 이루어짐을 나타낸다.¹¹⁾ 만약 admicelles이 형성되었다면 약한 결합력에 의해 탈착율이 나타났을 것이다. 따

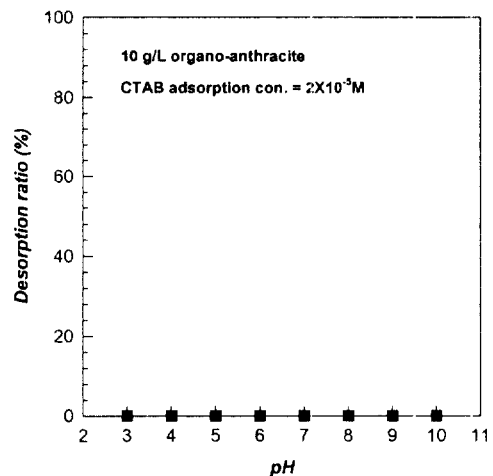


Fig. 3. Desorption of CTAB from organo-anthracite as a function of pH.

라서 유기성 anthracite는 양이온 계면활성제의 높은 흡착율과 함께 낮은 탈착을 나타내어 유기화합물 제거를 위한 흡착제로서의 가능성이 높음을 알 수 있다.

4.3. Organo-anthracite에 의한 유기화합물의 흡착용해

Organo-anthracite에 의한 클로로포름과 벤젠의 흡착용해는 30분 이내에 평행에 도달할 정도로 굉장히 빠르게 진행되었다.

Anthracite 단독으로 처리시 초기 농도 $6 \times 10^{-4} M$ 의 클로로포름이 22%내외로 제거된 반면, $2 \times 10^{-5} M$ 의 CTAB로 표면개질 후엔 전 pH 범위에서 50% 내외, $6.78 \times 10^{-5} M$ 의 CTAB로서 표면 개질시에는 97% 이상의 높은 클로로포름 제거율을 보였다 (Fig. 4). 또한 벤젠의 경우에도 anthracite 단독으로 처리시 초기 농도 $6 \times 10^{-4} M$ 의 벤젠이 30% 내외로 제거된 반면, $2 \times 10^{-5} M$ 의 CTAB로 표면개질 후엔 전 pH 범위에서 62%, $6.78 \times 10^{-5} M$ 의 CTAB로서 표면개질시에는 거의 100%의 높은 제거율을 나타내었다(Fig. 5). 이를 흡착평형농도와 organo-anthracite에 흡착된 농도로 나타낸 것이 Fig. 6과 7이다. 클로로포름과 벤젠의 두 가지 경우 모두 직선관계(linear isotherm)로 나타났다. 이것은 Boyd 등의 토양에 함유된 유기물질에 의한 비이온성 유기 화합물(nonionic organic compounds, NOCs)의 흡착등온선⁴⁾의 형태와 일치하는 결과이다. 그러나 제거능에 있어서는 양이온 계면활성제로 개질된 토양에 비해 organo-anthracite가 훨씬 뛰어난 것으로 나타났다.

Anthracite 단독으로 처리시에도 클로로포름과 벤젠의 제거율이 어느 정도 나타난 것으로서 anthracite 표면이 소수성임을 확인할 수 있었다. Anthracite에 흡착되는 CTAB의 농도를 $2 \times 10^{-5} M$ 에서 $6.78 \times 10^{-5} M$ 로 증가시키기에 따라 같은 클로로포름과 벤젠의 농도에서 흡착용해되는 양은 거의 2배였다. $2 \times 10^{-5} M$ 은 흡착등온선에서 지역 II에 해당하는 농도로 hemimicelles의 형성에 의해 SSOCs의 제거율이 증가한 것으로 보이며, $6.78 \times 10^{-5} M$ 에서 제거율이 2배로 증가된 것으로써 anthracite 표

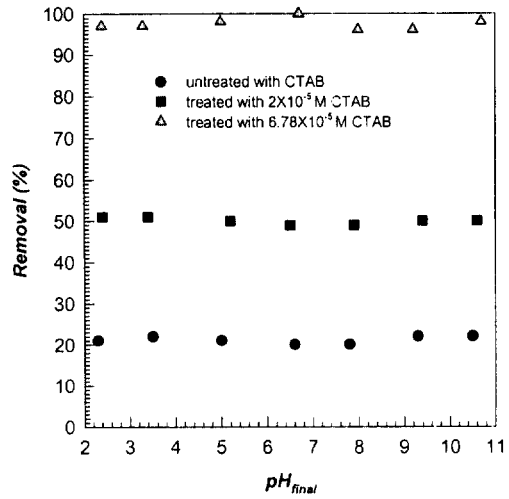


Fig. 4. Removal of chloroform by organo-anthracite as a function of pH (10g/L organo-anthracite, $[CCl_4]_{initial} = 6 \times 10^{-4} M$).

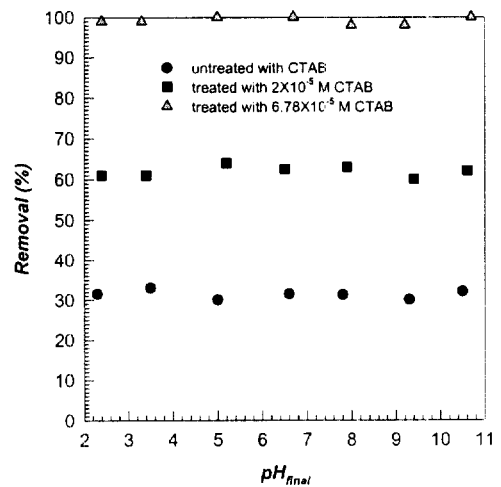


Fig. 5. Removal of benzene by organo-anthracite as a function of pH (10g/L organo-anthracite, $[C_6H_6]_{initial} = 6 \times 10^{-4} M$).

면에 admicelles이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이전 연구에서 제시한 지역 III에서의 소수성 결합이 정전기적 반발력을 상쇄할 정도로 훨씬 더 강하다는 가설이 증명되며, 흡착등온선에서 기울기가 지역 II와 유사함이 명백하다.¹¹⁾

클로로포름에 비해 벤젠이 더 높은 제거율을 보이

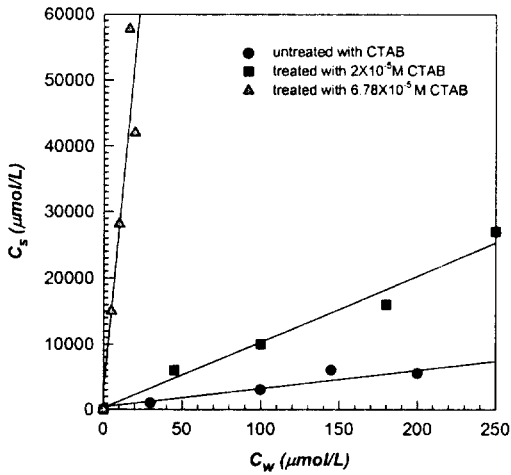


Fig. 6. Adsorption of chloroform by organo-anthracite at pH 7(10g/L organo-anthracite).

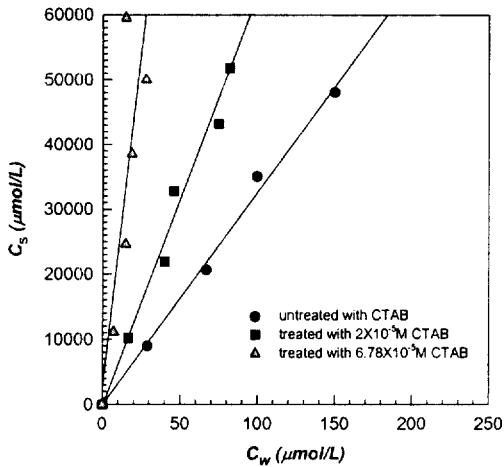


Fig. 7. Adsorption of benzene by organo-anthracite at pH 7(10g/L organo-anthracite).

는 것은 벤젠의 소수성 정도가 더 크기 때문이다. 이는 이론적으로 계산된 C_w , K_d 값으로 알 수 있다. 이것은 또한 실험결과치에 의한 K_d 값의 차이와도 잘 일치한다. 실험결과로부터 얻은 organo-anthracite와 클로로포름, 벤젠간의 K_d 값을 Table 2에 나타내었다. 흥미있는 사실로써 organo-anthracite의 f_{om} 이 1이라는 가정하에서 계산된 이론적인 K_d 값보다도 클로로포름의 경우 4배, 벤젠의 경우 25배나 더 큰 값으로 나타났다. 또한 CTAB의 흡착에

Table 2. Determined K_d values from experimental data

Compound	Anthracite (uncoating)	Organo-anthracite	
		($2 \times 10^{-5} M$ CTAB)	($6.73 \times 10^{-5} M$ CTAB)
chloroform	28.57	100.34	3496.97
benzene	306.87	610.78	3966.67

의해 K_d 값이 상당히 증가되었다. 이는 흡착제의 특성을 나타내는 f_{om} 값을 1로 가정하였으나, 실제 anthracite 표면에서는 CTAB가 micelle의 형태로 흡착되어 있으므로 흡착제 표면이 완전 유기성을 나타내는 1의 값보다 더 큰 유기성을 나타내는 것으로 생각되며, 또한 표면에 유기화합물(벤젠, 클로로포름)이 흡착되면서 흡착제 표면을 좀더 흡착하기에 유리하도록 변화시키는 결과를 초래하게 됨에 따라 실험결과에 의해 얻어진 분배상수가 훨씬 큰 값을 나타내는 것으로 보인다. 이것은 토양이나 clay와 같은 다른 흡착제에 비해 organo-anthracite 내에서 SSOCs의 분배가 더 쉽게 이루어짐을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 수용액 중의 유독성 유해물질로 미량으로 존재하여도 치명적 독성을 가진 SSOCs의 제거를 위한 흡착제 개발을 목표로 CTAB로 표면 개질된 organo-anthracite를 이용하여 소수성 유기물질인 클로로포름과 벤젠의 흡착 제거능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) $5 \times 10^{-5} M$ CTAB 코팅시에 전 pH 범위에서 표면전위가 양전하 값으로 상당히 증가되는 것으로 나타났다. 첨가되는 CTAB의 양이 증가함에 따라 정전기적 인력에 의해 anthracite 입자에 흡착되면서 표면전하를 중화시키므로 제타전위 값이 증가되는 것으로 보인다.
- 2) Organo-anthracite는 양이온 계면활성제의 흡착으로 인해 표면의 소수성이 증가되어 표면전하가 pH에 비의존적으로 나타났다.
- 3) pH 2~10의 용액을 탈리액으로 하여 organo-anthracite의 안정성을 실험한 결과 0%의 탈

착을 나타내어 전 pH 범위에서 안정함을 알 수 있었고, 이를 이용한 SSOCs 제거 실험에서 초기 농도 6×10^{-4} M인 클로로포름과 벤젠이 전 pH 범위에서 95% 이상 제거되었다.

- 4) Organo-anthracite와 유기화합물간의 K_d 값은 실측치가 이론치보다 4~25배의 높은 값으로 나타났다. 따라서 토양이나 clay와 같은 다른 흡착제에 비해 organo-anthracite내에서 SSOCs의 분배가 더 쉽게 이루어는 것을 알 수 있다.

이와 같은 사실들을 종합하면, anthracite는 다른 흡착제보다 훨씬 강한 소수성 결합으로 흡착이 가능하므로 높은 농도의 계면활성제 흡착율과 함께 유독성 유기화합물의 제거능이 탁월하였고, 이와 같은 결과는 organo-anthracite를 매립지의 차수막으로 이용시 유독성 유기 오염물질의 이동을 보다 효과적으로 지연시킬 수 있음을 의미한다.

참 고 문 헌

- Daniel, D. E. and Broderick, G. P., "Stabilization of compacted clay against attack by concentrated organic chemicals." Rep. Gr85-18, Civil Engineering Department, the University of Texas at Austin, Austin, Tex.(1985).
- Mitshell, J. K. and Madsen, F. T., "Chemical effects on clay hydraulic conductivity." *Geotech. practice for waste disposal '87*, R. E. Woods (ed.), ASCE, New York, N. Y., pp. 87~107(1987).
- Mortland, M. M., Shaobai, S. and Boyd, S. A., "Clay-organic complexes as adsorbents for phenol and chlorophenols." *Clays and Clay Minerals*, **34**(5), 581~585 (1986).
- Boyd, S. A., Mortland, M. M. and Chiou, C. T., "Sorption characteristics of organic compounds on hexadecyltrimethylammonium-smectites." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 652~657(1988).
- Lo, I. M.-C. and Liljestrand, H. M., "Laboratory sorption and hydraulic conductivity tests of modified-clay materials." *Waste Mgmt. and Res.*, **14**, 297~310 (1996).
- Nayyar, S. P., Sabatini, D. A. and Harwell, J. H., "Surfactant adsolubilization and modified admicellar sorption of nonpolar, and ionizable organic contaminants." *Environ. Sci. Tech.*, **28**(11), 1874~1881 (1994).
- Chiou C. T., Louis J. P., and Virgil H. F., "A physical concept of soil-water equilibria for nonionic organic compounds." *Science*, Vol. 16, p. 831(1979).
- Guangyao S., Shihe Xu and Boyd S. A., "Mechanism controlling sorption of neutral organic contaminants by surfactant-derived and natural organic matter." *Environ. Sci. Tech.*, **30**(5), 1553~1557 (1996)
- Rene P. S., Philip M. G. and Dieter M. I., *Environmental organic chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York(1993).
- Karickhoff, S. W., "Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils." *Chemosphere*, **10**, 833~846(1981).
- 장현숙, 박상원, "유독성 유기화합물 제거를 위한 흡착제 개발(I)-Anthracite 표면에서의 CTAB 흡착 특성-", *대한환경공학회지*, **21**(11), 2187~2194(1999).
- David A. S., Robert C. K. and Jeffrey H. H., "Surfactant-enhanced subsurface remediation." *ACS Symposium Series*, p. 594 (1995).
- Z. Zhong Zhang, Donald L. S. and Noel C. S., "Sorption and desorption of quaternary amine cations on clays." *Environ. Sci. Tech.*, **27**(8), 1625~1631(1993).