

TCE와 Phenanthrene에 대한 CFW의 흡착특성 분석

Analysis on Adsorption Characteristics of CFW for the TCE and Phenanthrene

한 중 근¹ Han, Jung-Geun 이 승 현^{2*} Lee, Soung-Hyun
이 기 석³ Lee, Ki-Seok 홍 기 권⁴ Hong, Ki-Kwon

ABSTRACT

This study was conducted to confirm the adsorption capacity of CFW(Carbonized Foods Waste), which is produced by the process of recycling waste, in PRB method that Electrokinetic(E/K) method was applied. The batch test was carried out to analyze the adsorption characteristics of CFW for adsorbing the organic compounds. The organic compounds used in the batch test were Phenanthrene and Trichloroethylene(TCE), and the anionic surfactant(SDS) and the nonionic surfactant(Brij[®]30) were used for the surfactants. The results of the batch test confirmed that the adsorption efficiency of Phenanthrene was 99% and TCE was 26%. The each compounds compared with the adsorption isotherms, which is calculated by the Langmuir and Freundlich models. The results indicated that Phenanthrene is fitted to the linear Langmuir model, whereas the distribution of TCE is unclear. The results of the batch test used in surfactants confirmed that the adsorption efficiency of CFW using Phenanthrene was reduced to 6~8%. However, the adsorption efficiency of CFW in TCE was increased up to 81% by surfactants. Especially, the nonionic surfactant was excellent in the adsorption of CFW using TCE. Nevertheless, the adsorption efficiency of CFW in Phenanthrene was still higher than TCE. Therefore, the adsorption efficiency of CFW in Phenanthrene was better than in TCE. In PRB method using E/K method, the adsorption of CFW used nonionic surfactant is better to use than the anion surfactants on the organic compounds.

요 지

본 연구는 E/K 정화기법이 적용된 PRB 공법에 있어서 음식물 쓰레기 재활용 과정에서 발생된 CFW(Carbonized Foods Waste)를 반응물질로 적용하고자 회분식 흡착실험(Batch Test)을 실시하였으며, 유기오염물질에 대한 흡착특성을 평가하였다. 실험에서 사용된 유기오염물질은 Phenanthrene과 Trichloroethylene(TCE)이며, 계면활성제는 음이온성 계면활성제인 SDS와 비이온성 계면활성제인 Brij[®]30을 적용하였다. 실험 결과, Phenanthrene과 TCE의 흡착효율은 각각 99%와 26%로 나타났으며, Phenanthrene에 대한 CFW의 흡착효율이 4배 정도 높은 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 Langmuir와 Freundlich 흡착등온 모델에 적용한 결과, Phenanthrene은 Langmuir 모델에 일치하였고, TCE는 그 구분이 불분명하였다. 또한 계면활성제를 사용하여 회분식 흡착실험을 실시한 결과, Phenanthrene의 경우에는 계면활성제가 방해요소로 작용하여 흡착지체현상이 발생했으며, 계면활성제가 적용되지 않은 흡착효율에 비하여 6~8% 정도 감소하였다. 그러나 TCE는 계면활성제가 반응촉매제로 작용하여 최대 81%까지 흡착효율이 증가하였으며, 비이온성 계면활성제를 사용함으로써 보다 높은 흡착효율을 얻을 수 있었다. 따라서 계면활성제의 적용과 관계없이 Phenanthrene에 대한 흡착효율이 TCE보다 우수한 것으로 나타났으며, PRB 공법에 E/K 정화기법을 적용할 경우에는 비이온성 계면활성제를 사용할 경우 보다 높은 흡착효율이 나타날 것으로 판단된다.

Keywords : CFW(Carbonized Foods Waste), Adsorption, Batch test, Phenanthrene, Trichloroethylene(TCE), Surfactants

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.)
2* 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Student member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ., E-mail: flight1017@naver.com)
3 비회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)
4 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

1. 서론

최근 문제가 제기되고 있는 군부대 부지, 과거 공장지대 및 사용 종료된 폐기물 매립지 등에서 발생하는 침출수에 함유되어 있는 물질인 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs)는 여러 개의 벤젠 고리가 결합된 분자 구조를 가진 화합물로 석유 및 관련 생산품의 주요 성분이다. 이는 낮은 용해도 및 강한 결합력에 의해 주변 토양 및 지하수 오염에 장기적인 영향을 주며, 특히 인체에 암 또는 돌연변이를 유발하는 것으로 알려져 있다(신성호 등, 2003; 박종섭과 김인수, 1998).

또한, 가정이나 산업현장에서 휘발성 유기화합물질(Volatile organic compounds; VOCs)의 사용량이 증대됨에 따라 지하수나 하천으로 유입되는 오염물질의 농도가 높아지면서 심각한 환경오염을 유발하고 있다. 그 중에서 Trichloroethylene(이하 TCE)는 미국 환경청(EPA)에서 지목한 중요 오염물질 중 하나로 공장지대에서의 취급 부주의나 폐기물 매립지에서의 침출수 유출 등으로 인해 토양 공극 내에 잔류하며 지속적으로 용해되어 나오는 특성을 가진 물질로 알려져 있다(이향숙 등, 1998; 류안나 등, 2006). 이와 같이 유기물질은 높은 독성을 가지고 있으며, 오염된 토양 및 지하수에 장기간 느린 속도로 노출되어 인간과 환경에 심각한 부작용을 초래한다.

오염지반의 다양한 복원기술 중 저투수성 오염지반에 효과적으로 사용되고 있는 E/K정화기법(한상재, 2000)의 주요 메커니즘은 전기삼투의 이류를 이용하지만, 다환방향족탄화수소(PAHs) 및 휘발성 유기화합물질(VOCs)과 같은 용해도가 낮은 소수성 유기오염물질은 토립자와 쉽게 흡착되어 이러한 방법에 의해서는 제거되지 않는다. 따라서 E/K 정화기법에서 효율증대를 위해 용해제(산성용액), 착화제(킬레이트제) 및 계면활성제 등과 같은 향상제를 첨가하는 방법이 사용된다. 이 중 토양입자의 흡착성질을 고려하여 유기물제거효율이 높은 음이온성 계면활성제를 사용하지만 고농도를 사용하는 단점이 있고, 비이온성 계면활성제는 다른 계면활성제에 비하여 경제적이며 용해화와 이동화 능력도 양호한 편이다(박지연, 2000). 그리고 오염지반에서 지하수의 정화 및 처리를 위한 방법들 중 원위치 처리방법이 있으며, 이 중 오염물을 오염지반으로부터 제거하는 방법으로 지하수의 흐름 변화 없이 반응물질이 삽입된 벽체에 반응물질이 통과하여 정화가 이루어지는 원리를 이용한 PRB공법이 사용되고 있다. 이 방법은

한번 설치할 경우, 운용에 필요한 별도의 시설이 불필요한 경제적인 공법이며(USEPA, 1997), 반응벽체 내에 삽입되는 대표적인 반응물질로는 영가철(ZVI), 제올라이트(Zeolite), 입상활성탄(GAC) 등이 사용되고 있다. 최근에는 폐자원을 활용한 반응물질에 대한 연구가 진행되고 있고, 그 중 음식물 탄화재(Carbonized Foods Waste; 이하 CFW)를 이용한 방법이 중금속에서 그 성능을 입증한 바 있다(이종영, 2010; 한중근 등, 2007; Han et al., 2010a).

음식물류 폐기물은 2005년 이후 직매립이 전면 금지되어 이에 따른 처리방법에 대한 연구가 급증되고 있는 것을 뿐만 아니라(환경부, 2011), 국내의 음식물류 폐기물 발생량은 2009년도 기준으로 전체 생활폐기물 발생의 약 28%를 차지하고 있으며, 이에 대한 처리 및 재활용 방법으로는 사료화, 퇴비화 및 탄화 등이 있다. 이 중 탄화작용에 의한 CFW는 부피 감량률이 90% 이상이고, 수급성 및 경제성이 뛰어나 비료, 연료 및 탈취제 등으로 다양하게 재활용되고 있다(이종영, 2010; 한중근 등, 2007).

따라서 본 연구에서는 음식물폐기물 탄화재(CFW)의 재활용 및 정화효율을 위해, 유기물오염지반의 E/K 정화기법을 이용한 정화방법 중 PRB 공법의 적용에 있어서 유기물 흡착물질로서의 CFW를 적용하고자 다환방향족탄화수소(PAHs)인 Phenanthrene과 휘발성 유기화합물질(VOCs)인 TCE를 대상으로 회분식 흡착실험을 실시하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델을 적용하여 CFW의 흡착효율과 흡착평형 특성을 평가하였다. 그리고 E/K 정화기법에서 향상제로 사용되는 계면활성제의 종류에 따른 흡착특성을 알아보고자 음이온성 계면활성제와 비이온성 계면활성제를 첨가하여 회분식 흡착실험을 실시하였으며, 각 계면활성제에 대한 CFW의 흡착효율을 평가하였다.

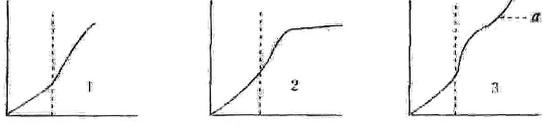
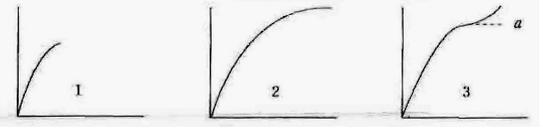
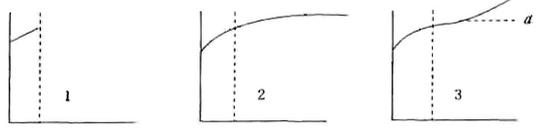
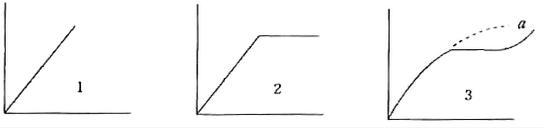
2. 흡착등온모델

이온을 포함하고 있는 용액이 흡착매체와 반응하게 되면 이온은 흡착제에 흡착되거나 용액에 남아있게 되며, 이를 통해 용액 내에서의 평형농도(Equilibrium Concentration)와 흡착재료에 흡착된 흡착량(Adsorbed Amount)과의 관계를 분석할 수 있다. 이를 흡착등온식이라고 하며, 단일성분에 대한 흡착등온식으로 Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델을 사용하고 있다(최승필 등, 2002).

표 1. 일반적인 단일 성분 흡착등온식(김택현 등, 2008)

Isotherm models	Author	Model equation	
Langmuir	Langmuir	$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e}$	C_e : 평형농도 q_e : 흡착제에 흡착된 이온의 농도 b : 평형상수
Freundlich	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^N$	q_{\max} : 최대흡착량 K_F : 흡착제의 상대적인 흡착용량 N : 흡착강도

표 2. Giles et al.(1960)의 흡착등온선

S형 등온선	
L형 등온선	
H형 등온선	
C형 등온선	

먼저, Langmuir 흡착등온식은 흡착제 표면이 균일한 경우에 사용 가능하고, 흡착질들 사이에는 아무런 상호작용이 없다는 가정 하에 최대흡착량은 흡착층이 단분자층을 이루었을 때의 값이라는 이론을 바탕으로 하며, 평형농도를 흡착된 이온농도와 최대흡착량의 항으로 정리하면 식 (1)같이 된다. 또한 Freundlich 흡착등온식은 흡착제 표면이 불균일한 경우에 적용 가능한 실험식으로서, 흡착제 특성에 따라 결정되는 매개변수인 K_F 와 N 을 구하는 식으로 나타내면 식 (2)와 같이 된다.

$$C_e = q_{\max} (C_e/q_e) - 1/b \quad (1)$$

$$\log q_e = M \log C_e + \log K_F \quad (2)$$

한편, Giles et al.(1960)은 등온선의 형태에 따라 4가지로 구분하였으며, 표 2와 보는 바와 같다. S형 등온선과 L형 등온선은 Langmuir의 비선형 흡착등온선으로서, S형 등온선은 초기에 흡착이 이루어지지 않은 경우이고, L형

등온선은 흡착은 잘 이루어지지만 흡착이 진행됨에 따라 흡착률이 감소하는 경우에 나타난다. 그리고 H형 등온선은 저농도에서도 흡착이 활발히 이루어지는 경우로 L형 등온선과 유사하며, C형 등온선은 흡착이 진행되는 동안 흡착지점이 가용한 경우에 나타난다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

3.1.1 음식물 탄화재(CFW)

CFW는 표 3에서 보는 바와 같이 전체 구성의 약 90% 이상이 ash, 탄소(C) 및 산소(O)로 구성되어 있으며, X선 형광분석(XRF) 결과 85%이상의 산소(O), 탄소(C) 및 칼슘(Ca)으로 이루어져 있다. 그림 1은 CFW를 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 것으로서, 입자의 크기는 75~150 μm (100~200 mesh)이며, 입자 표면은 불규칙하고 다공성 구조인 것으로 확인되었다. 또한 BET법을 이용

표 3. CFW의 구성요소

I. 물리적 구성(%)													
C	H	O	N	S	Cl	ash	Total						
11,3	0,52	11,9	1,09	0,48	1,85	72,9	100						
II. 화학적 구성(%)													
O	Ca	C	K	Cl	Na	P	Fe	Si	Mg	S	Al	Other	Total
38,39	25,51	21,73	3,2	3,05	2,64	1,5	1,29	0,97	0,71	0,51	0,27	0,23	98,28

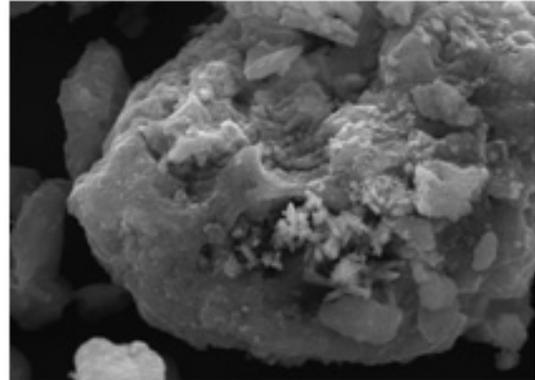
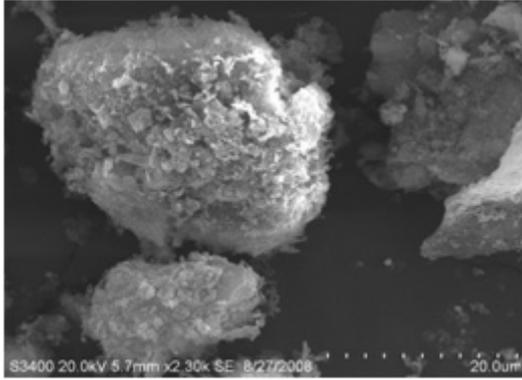


그림 1. CFW의 SEM 이미지(Han et al., 2010b)

표 4. Phenanthrene과 TCE의 물리화학적 특성

Materials	Properties	
Phenanthrene	mol formula	C ₁₄ H ₁₀
	molecular weight(g/mol)	178,23
	density(g/ml at 25°C)	1,063
TCE (Trichloroethylene)	mol formula	C ₂ HCl ₃
	molecular weight(g/mol)	131,39
	density(g/ml at 25°C)	1,463

하여 질소를 350°C에서 1Pa(7.5µmHg)이하로 압력을 가한 후 탈기시켜 비표면적을 측정(KS L ISO 18757, 2007)한 결과, 14.16m²/g으로 나타났다. 그리고 BJH(Barrett Joyner Halenda)모델을 이용한 세공용적 및 평균세공경은 각각 0.0469cm³/g, 132.4Å으로 측정되었다.

3.1.2 유기오염물질

본 실험에서 사용된 유기오염물질은 Phenanthrene과 TCE이며, Phenanthrene(purity : 98%)은 다환방향족탄화수소(PAHs)의 한 종류로서 세 개의 벤젠고리로 구성되어 있고, 광택이 있는 무색, 비수용성 결정으로 주로 약품용으로 제조된다. TCE(purity : ≥99.5%)는 에틸렌의 수소원자 3개를 염소원자로 치환한 화합물로서 무색 유독의 액체이며, 용제, 추출제, 세척용으로 사용된다. 본 실험에 사용된 Phenanthrene과 TCE의 물리화학적 특성은 표 4와 같다.

표 5. 계면활성제의 물리화학적 특성

Materials	Properties	
SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)	mol formula	C ₁₂ H ₂₅ O ₄ SNa
	molecular weight(g/mol)	288,38
	density(g/ml at 25°C)	-
	CMC(mg/l)	20
Brij [®] 30 (Polyoxyethylene (4) lauryl ether)	mol formula	(C ₂ H ₄ O) ₄ C ₁₂ H ₂₆ O
	molecular weight(g/mol)	362
	density(g/ml at 25°C)	0,95
	CMC(mg/l)	2100

3.1.3 계면활성제

회분식 흡착실험에 사용된 계면활성제는 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate)와 Brij[®]30(Polyoxyethylene (4) lauryl ether)으로, SDS(purity : 85%)는 치약, 샴푸, 아스피린과 같은 가정용품뿐만 아니라 바닥 및 차량 청소용 세제 등을 포함한 제품에 사용되는 음이온성 계면활성제이다. Brij[®]30은 비이온성 계면활성제의 일종으로 친수성의 액체 및 무색무취의 성질을 갖고 있으며, 주로 E/K 실험에서의 향상제로 사용된다. 본 실험에 사용된 각 계면활성제의 특징은 표 5에서 보는 바와 같다.

3.2 회분식 흡착실험(Batch Test)

3.2.1 유기오염물질의 용해도 평가 실험

회분식 흡착실험을 수행하기에 앞서 본 연구에서 사용된

표 6. Phenanthrene과 TCE의 용해도 평가실험 조건

Materials	Concentration (mg/l)	Contact Time (hr)	Shaking speed (rpm)
Phenanthrene	500, 1000, 2000, 3000, 3500, 4000, 4500	12	50
TCE			

표 7. Phenanthrene과 TCE의 회분식 흡착실험 조건

Materials	Concentration (mg/l)	Contact Time (hr)	Shaking speed (rpm)
Phenanthrene	500, 1000, 2000, 3000, 3500, 4000, 4500	12	150
TCE			

표 8. 계면활성제를 이용한 Phenanthrene과 TCE의 회분식 흡착실험 조건

Materials	Surfactants	Surfactants Concentration(mol)	Concentration (mg/l)	Contact Time (hr)	Shaking speed (rpm)
Phenanthrene	SDS	0.01, 0.05, 0.1	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000	12	150
	Brij [®] 30				
TCE	SDS				7
	Brij [®] 30				

유기오염물질의 용해도를 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였으며, 실험조건은 표 6에서 보는 바와 같다. 20ml 부피의 Borosilicate Glass 재질의 유리병에 메탄올에 용해된 Phenanthrene과 TCE를 3차 증류수와 혼합하여 500~4500mg/l의 수용액으로 제조하였다. 자석교반기를 이용하여 50rpm의 속도로 12시간동안 교반을 실시하였으며, Phenanthrene은 고속 액체 크로마토그래피(HPLC)를 이용하여 분석하였고, TCE는 가스 크로마토그래피(GC-FID)를 이용하였다.

3.2.2 유기오염물질의 회분식 흡착실험

본 연구에서는 CFW에 대한 유기오염물질의 흡착효율을 평가하고자 Phenanthrene 및 TCE에 대한 회분식 흡착실험을 수행하였으며, 각각의 실험조건은 표 7에서 보는 바와 같다. 먼저, Phenanthrene의 회분식 흡착실험의 경우, 20ml 부피의 Borosilicate Glass 재질의 유리병에 CFW 0.1g을 넣고 메탄올에 용해된 Phenanthrene을 3차 증류수와 혼합하여 500~4500mg/l의 수용액으로 제조하였다. 교반기를 이용하여 150rpm의 속도로 12시간동안 교반을 실시하였고, 3000rpm으로 5분간 원심분리를 수행하였다. 그리고 0.45μm의 실린지 필터로 여과하여 5ml의 상등액을 취한 뒤 고속 액체 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다.

TCE의 경우에는 Phenanthrene과 같은 방법으로 500~4500mg/l의 수용액을 제조하였으며, TCE의 휘발을 최소화하기 위하여 상부 공간까지 수용액을 주입하였고, 유리병 마개에는 테프론 테이프를 부착하였다. 회전 교반기를 이용하여 7rpm의 속도로 12시간동안 교반을 실시하였고, 샘플링 시 3000rpm의 속도로 5분간 원심분리 시킨 뒤 0.45μm의 실린지 필터로 여과하여 10ml의 상등액을 취한

후 핵산을 주입하였다. 이 용액을 원심분리기를 이용하여 3000rpm에서 5분간 원심분리를 실시하여 핵산층에서 5ml을 추출한 후, 가스 크로마토그래피를 이용하여 TCE의 정량 분석을 수행하였다.

3.2.3 계면활성제를 이용한 회분식 흡착실험

계면활성제가 유기오염물질의 흡착효율에 미치는 영향을 확인하기 위하여, Phenanthrene 및 TCE에 음이온성 계면활성제인 SDS와 비이온성 계면활성제인 Brij[®]30을 각각 첨가하여 회분식 흡착실험을 수행하였으며, 실험조건은 표 8에서 보는 바와 같다. 먼저, Phenanthrene의 경우에는 20ml 부피의 Borosilicate Glass 재질의 유리병에 CFW 0.1g을 넣고 각각 0.01mol, 0.05mol, 0.1mol의 농도로 제조된 SDS와 Brij[®]30 수용액을 메탄올에 용해된 Phenanthrene과 혼합하여 500~4500mg/l의 수용액을 제조하여 실험하였다.

TCE의 경우, Phenanthrene과 동일한 방법으로 각 계면활성제의 농도에 따라 500~4500mg/l의 수용액을 제조하여 실험하였다. 그리고 휘발을 최소화하기 위한 방안 및 분석과정은 3.2.2절의 TCE에 대한 회분식 흡착실험과 동일하게 적용되었다.

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 유기오염물질의 용해도 평가실험 결과

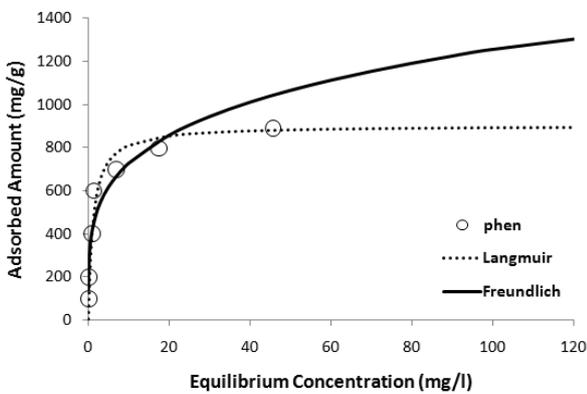
본 연구에서는 메탄올에 용해시킨 유기오염물질의 물에 대한 용해도를 알아보기 위하여 용해도 평가실험을 실시하였으며, 실험결과는 표 9에서 보는 바와 같다. Phenanthrene의 경우에는 초기농도와 비교하였을 때, 약 4.4%의 오차를

표 9. 유기오염물질에 대한 용해도 평가실험 결과값

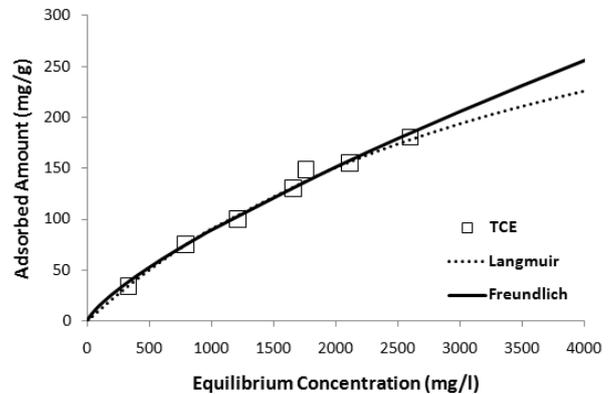
Materials	Concentration(mg/l)							
		500	1000	2000	3000	3500	4000	4500
Phenanthrene	solution	500	1000	2000	3000	3500	4000	4500
	pollution	479	953	1905	2875	3352	3817	4309
TCE	solution	500	1000	2000	3000	3500	4000	4500
	pollution	458	916	1831	2712	3226	3685	4151

표 10. 유기오염물질에 대한 CFW의 Langmuir와 Freundlich 흡착등온 매개변수 값

Isotherm	Isotherm parameters	Phenanthrene	TCE
Langmuir	q_{max} (mg/g)	902.84	450.96
	b	0.8303	0.000252
	R^2	0.9982	0.9306
Freundlich	K_F	335.815	0.3204
	N	3.0741	1.2327
	R^2	0.7992	0.9941



(a) Phenanthrene



(b) TCE

그림 2. CFW의 흡착등온곡선

나타내었으며, TCE는 약 8.4%의 오차를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 유기오염물질의 침전에 대한 영향은 거의 없는 것으로 분석되었으며, 회분식 흡착실험 시에 발생되는 농도 변화는 CFW에 의한 유기오염물질의 흡착으로 판단할 수 있다.

4.2 유기오염물질의 회분식 흡착실험 결과 고찰

본 연구에서는 유기오염물질에 대하여 회분식 흡착실험을 통해 흡착재료로 사용한 CFW의 흡착평형특성을 평가하고자 폐수 중 특정 물질이 흡착제에 의해 제거되는 양을 나타낼 수 있는 Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델을 적용하였다. 표 10은 Phenanthrene과 TCE에 대한 CFW의 흡착등온모델에 따른 매개변수 값을 정리하여 나타내었다. Phenanthrene 및 TCE의 최대흡착량은 각각 903mg/g

및 451mg/g으로 나타났으며, Phenanthrene이 TCE에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 확인되었다. 즉, 흡착용량 및 흡착강도를 산정하면 Phenanthrene이 TCE에 비하여 각각 약 1000배 및 약 2.5배 정도 높은 것으로 확인되었다.

Langmuir와 Freundlich의 흡착등온모델을 이용한 Phenanthrene과 TCE의 오염농도 변화에 따른 흡착량을 나타내면 그림 2와 같다. Phenanthrene의 흡착량은 초기 농도 범위에서 급격한 증가를 나타냈지만, TCE는 Phenanthrene에 비해 완만히 증가하는 흡착거동을 나타내었다. 즉, 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 Phenanthrene은 500~4500mg/l의 오염농도 내에서의 흡착용량을 규명하는데 있어서, 평형농도가 증가함에 따라 흡착량이 지수형태로 증가하게 되는 Freundlich 흡착등온모델보다 Langmuir 흡착등온모델이 더 일치하였으며, TCE는 Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델의 차이가 명확하지 않지만 낮은 농도에서부터 비교적

높은 농도까지도 두 모델이 비슷한 값을 나타내었다. 단, 높은 농도에서는 Langmuir 모델에 더 유사할 것으로 예상되었다. 또한 그림 3에서 보는 바와 같이, 유기오염물질에 따른 CFW의 흡착효율은 Phenanthrene의 경우, 99% 이상인 것으로 나타내었으며, TCE의 경우에는 약 26% 정도로 확인되었다. 이는 TCE에 비해 Phenanthrene에 대한 CFW의 흡

착효율이 매우 우수한 것으로 판단된다.

4.3 계면활성제를 이용한 유기오염물질의 회분식 흡착실험 결과 고찰

계면활성제를 이용한 Phenanthrene과 TCE의 회분식 흡착실험 결과를 이용하여 Langmuir와 Freundlich 흡착등온 모델에 적용하였다. Phenanthrene의 경우에는 Langmuir 및 Freundlich 흡착등온모델과 일치하지 않는 것으로 확인되었기 때문에, 평형농도와 흡착량과의 관계만을 평가하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이, Phenanthrene은 모든 계면활성제 0.01mol에서의 평형농도 변화가 거의 없었으며, 일자형의 흡착등온선이 나타났다. 그러나 계면활성제의 농도가 증가할수록 평형농도의 증가와 함께 Langmuir의 비선형 흡착등온모델 중 하나인 S형 흡착등온선과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 계면활성제가 Phenanthrene에 대한 CFW의 흡착에 있어서 방해요소로 작용하여 흡착지체현

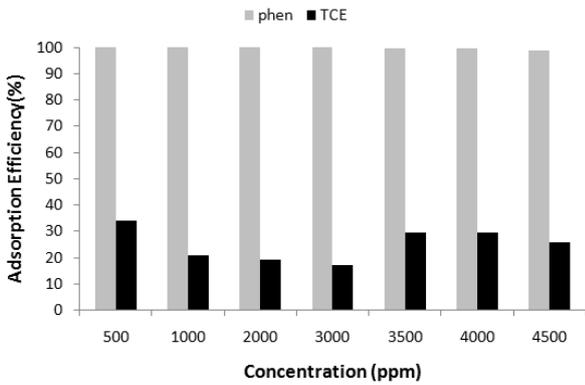
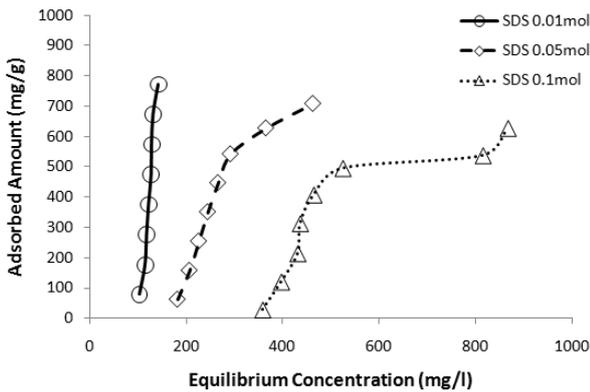
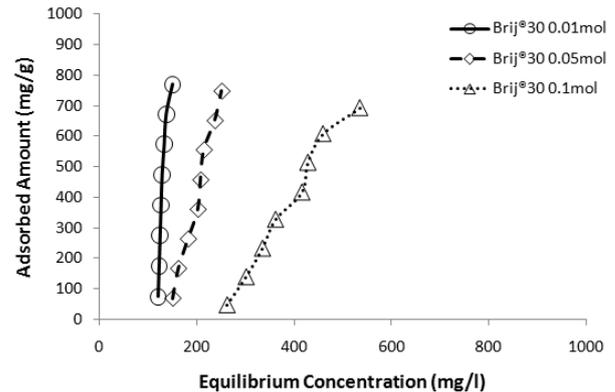


그림 3. 유기오염물질 종류에 따른 농도별 CFW의 흡착효율 비교

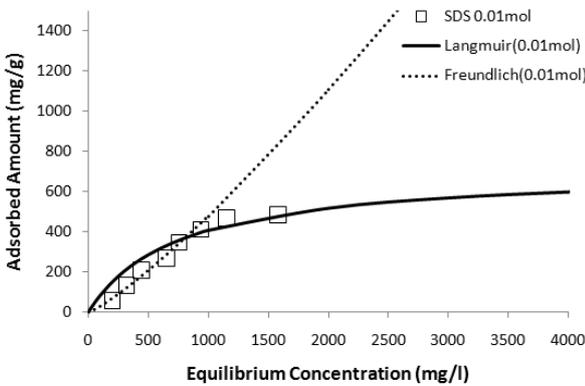


(a) SDS

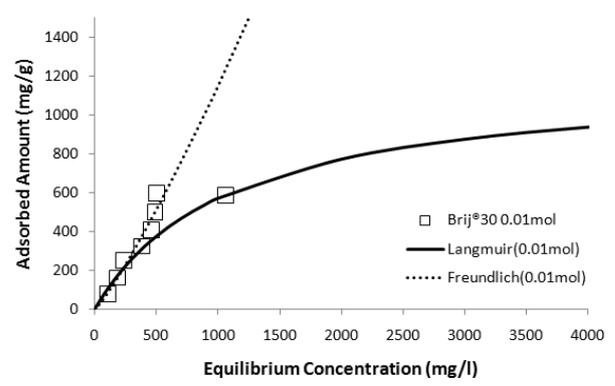


(b) Brij®30

그림 4. Phenanthrene에 대한 계면활성제 농도별 CFW의 흡착등온곡선



(a) SDS

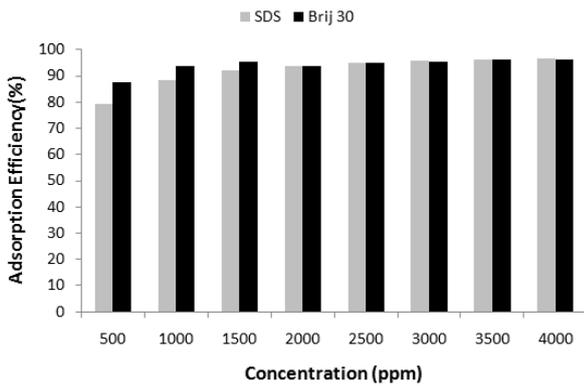


(b) Brij®30

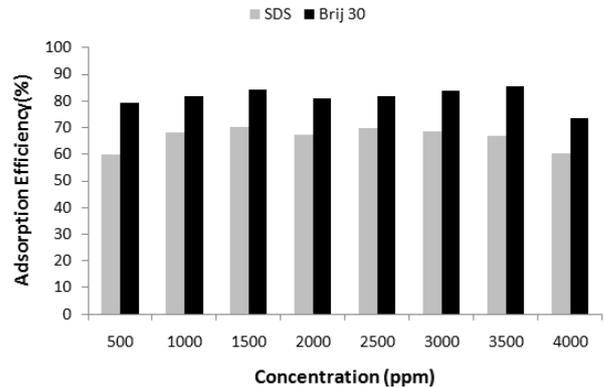
그림 5. TCE에 대한 계면활성제 농도별 CFW의 흡착등온곡선

표 11. TCE에 대한 계면활성제 종류별 CFW의 Langmuir와 Freundlich 흡착등온 매개변수 값

Isotherm	Isotherm parameters	Material	
		SDS 0.01mol	Brij [®] 30 0.01mol
Langmuir	q_{max} (mg/g)	712.91	1190.5
	b	0.00135	0.000921
	R_2	0.9834	0.9771
Freundlich	K_F	0.1159	0.3760
	N	1,2057	1,1616
	R_2	0.9740	0.9728



(a) Phenanthrene



(b) TCE

그림 6. 유기오염물질에 대한 계면활성제 종류별 CFW의 흡착효율 비교

상이 발생한 것으로 분석되었다.

그림 5에서 보는 바와 같이, TCE의 경우에는 Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델에 부분적으로 일치하였다. 즉, SDS 0.01mol인 경우, 낮은 평형농도에서는 Freundlich 흡착등온모델에 일치하였지만, 평형농도가 증가함에 따라 Langmuir 흡착등온모델에 일치하는 것으로 나타났다. Brij[®]30 0.01mol의 경우에는 낮은 평형농도에서의 구분은 불분명하였으며, 500mg/l 이상의 농도에서는 Freundlich 흡착등온모델에 일치하였다. 따라서 계면활성제에 따른 TCE에 대한 영향을 분석하기 위하여, Langmuir와 Freundlich 흡착등온모델의 매개변수 값을 정리하여 표 11에 나타내었다. Brij[®]30을 적용한 경우가 SDS를 적용한 경우보다 최대 흡착량 및 흡착용량에 있어서 각각 약 1.7배 및 3.2배 정도 높은 것으로 확인되었다. 이는 비이온성 계면활성제가 TCE에 대한 CFW 흡착효율의 증가효과에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

그림 6은 계면활성제 종류에 따른 Phenanthrene과 TCE 농도별 CFW의 흡착효율을 비교한 것으로서, 각 계면활성제의 농도 중에서 흡착효율이 뛰어난 0.01mol의 농도에

대하여 분석하였다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이, 음이온성 계면활성제에서는 Phenanthrene과 TCE가 각각 92%와 66%로 나타났으며, 비이온성 계면활성제는 각각 94%와 81%인 것으로 확인되었다. 따라서 Phenanthrene의 경우에는 계면활성제 적용에 따라 흡착효율이 감소하였지만, 계면활성제의 종류와 관계없이 수용액의 농도가 증가할수록 흡착효율은 유사하게 나타났다. 또한 TCE는 계면활성제에 의해 흡착효율이 크게 증가되었으며, 비이온성 계면활성제가 음이온성보다 높은 흡착효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 E/K 정화기법을 이용한 PRB공법에 있어서, 음식물쓰레기 재활용 차원에서 생산된 CFW에 대한 유기물 흡착재료로서의 적용성을 평가하고자 하였다. 이에 유기오염물질인 Phenanthrene과 TCE를 대상으로 계면활성제 적용에 따른 회분식 흡착실험을 실시하여 각각의 흡착특성을 평가하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계면활성제 적용이 이루어지지 않은 경우의 회분식 흡착실험 결과, Phenanthrene은 낮은 평형농도에서 대부분 흡착이 완료되었고, TCE는 평형농도 증가에 따라 흡착량이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 유기오염물질에 대한 CFW의 흡착효율은 TCE에 비하여 Phenanthrene이 보다 우수한 것으로 분석되었다.
- (2) 음이온성 및 비이온성 계면활성제를 이용한 회분식 흡착실험 결과, Phenanthrene의 경우에는 계면활성제가 흡착을 방해하는 요소로 적용됨으로서 흡착효율이 감소하였다. 또한 계면활성제의 농도가 증가할수록 흡착 시에 흡착지체현상이 발생하였다. 그러나 TCE는 계면활성제의 적용에 따라 최대 81%의 높은 흡착효율이 나타났다. 특히, 비이온성 계면활성제가 적용된 흡착효율이 그렇지 않은 경우에 비해 최대 3.2배 정도 증가하였다.
- (3) CFW를 이용한 회분식 흡착실험에서는 계면활성제의 적용과 관계없이 Phenanthrene이 TCE보다 우수한 흡착효율을 나타내었으며, 비이온성 계면활성제를 사용한 경우가 흡착효율이 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 계면활성제가 CFW의 흡착효율을 증가시키는데 있어서 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 즉, E/K 정화기법을 적용할 경우에는 보다 높은 흡착효율이 나타난 비이온성 계면활성제를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2010-0014890)에 대한 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김탁현, 박철환, 감상용 (2008), “툽밥에 의한 염색폐수의 흡착처리”, *대한환경공학회지*, 제30권, 제4호, pp.439-445.
2. 류안나, 한상원, Sushil Raj Kanel, 최희철 (2006), “계면활성제 이용표면개질 나노영가철을 이용한 TCE 분해”, *대한환*

- 정공학회 2006 춘계학술연구발표회*, pp.503-506.
3. 박종섭, 김인수 (1998), “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)의 용해도와 생분해에 미치는 비이온계 계면활성제의 영향”, *대한환경공학회 1998 춘계학술연구발표회*, pp.558-559.
4. 박지연 (2000), *동전기 기술과 계면활성제를 이용한 탄화수소 오염토양의 정화*, 석사학위논문, 한국과학기술원.
5. 신성호, 우승한, 박종문 (2003), “토양 슬러리 시스템에서 Phenanthrene 생분해에 대한 계면활성제 영향 모델링”, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol.14, No.6, pp.750-758.
6. 이종영 (2010), *중금속으로 오염된 지반에서 음식폐기물 탄화재를 적용한 PRB 정화기법*, 박사학위논문, 중앙대학교.
7. 이항숙, 강주원, 양원호, 정문식 (1998), “커피찌꺼기를 이용한 흡착제 제조 및 수중 Trichloroethylene(TCE) 흡착제거에 관한 연구”, *한국환경위생학회지*, 제24권, 제2호, pp.20-31.
8. 최승필, 이종원, 이현석, 정홍조, 이재욱 (2002), “천연 제올라이트를 이용한 암모늄 제거의 흡착평형과 고정층 흡착”, *Theories and Applications of Chem. Eng.*, Vol.8, No.2, pp.3393-3396.
9. 한상재 (2000), *Electrokinetic 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성*, 박사학위논문, 중앙대학교.
10. 한중근, 이명호, 이종영, 김영용, 홍선미 (2007), “음식물탄화재의 중금속 흡착특성에 관한 실험적 연구”, *중앙대학교 과학기술연구소 논문집*, 제37권, 제1호, pp.67-72.
11. 환경부 (2011), *폐기물관리법 시행규칙 제 14조(폐기물 처리 등의 구체적인 기준 방법)*.
12. KS L ISO 18757 (2007), *파인세라믹스-기체 흡착 BET법에 의한 세라믹 분말의 비표면적 측정방법*.
13. Giles, G.H., MacEwan, T.H., Nakhwa, S.N. and Smith, D. (1960), “A system of classification of solution adsorption isotherms and its use in diagnosis of adsorption mechanism and in measurement of specific surface areas of solids.”, *J. Chem. Soc., Studies in adsorption Part XI.*, pp.3973-3993.
14. Han, J.J., Hong, K.K., Kim, Y.W. and Lee, J.Y. (2010a), “Enhanced electrokinetic(E/K) remediation on copper contaminated soil by CFW(carbonized foods waste)”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.177, pp.530-538.
15. Han, J.J., Lee, J.Y., Hong, K.K., Lee, J.Y., Kim, Y.W. and Hong, S.M. (2010b), “Adsorption characteristics of Cu²⁺ and Zn²⁺ from aqueous solution using carbonized food waste”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol.12, No.3, pp.227-234.
16. USEPA (1997), *Permeable reactive subsurface barriers for the interception and remediation of chlorinated hydrocarbon and chromium(VI) plumes in ground water*, EPA/600/F-97/008.

(논문접수일 2011. 3. 7, 심사완료일 2011. 3. 25)