

양이온-비이온 혼합계면활성제의 첨가가 영가철을 이용한 TCE환원에 미치는 영향

신민철¹ · 최현덕¹ · 양종석² · 백기태^{1*}

¹금오공과대학교 환경공학과, ²한국과학기술연구원 강릉분원

Effect of Surfactant on Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Zero-Valent Iron

Min-Chul Shin¹ · Hyun-Dock Choi¹ · Jung-Seok Yang² · Kitae Baek^{1*}

¹Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of Technology

²KIST Gangneung Institute

ABSTRACT

Trichloroethylene (TCE) is a representative dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) and has contaminated substance environments including soil and groundwater due to leakage and careless. DNAPL, has been treated by surfactant-enhanced aquifer remediation (SEAR). After application of SEAR, groundwater contains still surfactant as well as little amount of residual TCE. Permeable reactive barrier using zero-valent iron (ZVI) is a very effective technology to treat the residual TCE in groundwater. In this study, the effect of the residual surfactant on the reductive dechlorination of residual TCE was investigated using ZVI. Mixed surfactant composed of nonionic surfactant and cationic surfactant was used as a residual surfactant because of toxicity and enhancement of dechlorination rate. Structure of surfactant affected significantly the dechlorination rate of TCE. Mixed surfactant system with relatively short polyethylene oxide (PEO) chain in nonionic surfactant, cationic surfactant did not affect TCE dechlorination rate. However, mixed surfactant system with relatively long PEO chain in nonionic surfactant shows that TCE dechlorination rate was significantly dependent on fraction of cationic surfactant and HLB of nonionic surfactant. Cationic surfactant with trimethyl ammonium group enhanced reductive dechlorination rate compared to that surfactant with pyridinium group.

Key words : Trichloroethylene, Mixed surfactant, Zero-valent iron, Reductive dechlorination

요 약 문

트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE)는 지하 환경으로 누출되었을 경우 대표적인 고밀도 불용성 유체(dense non aqueous phase liquids, DNAPLs)를 형성하여 토양과 지하수를 오염시키며, 계면활성제를 이용한 SEAR(Surfactant-enhanced aquifer remediation) 공법으로 처리를 하여도 소량이 계면활성제와 함께 지하수에 존재한다. 본 연구에서는 SEAR공법으로 처리 후 잔존하는 TCE가 계면활성제와 함께 존재할 때, 영가철(zero valent iron, ZVI)로 이루어진 투수성 반응벽체(PRB)에서의 TCE 거동을 조사하였다. 특히 계면활성제의 독성과 반응속도의 영향을 고려하여 양이온과 비이온 혼합 계면활성제의 영향을 중점적으로 다루었다. 혼합 계면활성제를 사용할 경우 ZVI를 이용한 TCE의 분해는 계면활성제의 구조에 따라 상당히 다른 경향을 보였다. TCE의 제거율을 살펴보면 비이온 계면활성제의 친수성기인 polyoxyethylene(POE) 사슬이 짧을 경우 양이온 계면활성제와 상관없이 거의 일정하였고, 상대적으로 긴 POE사슬일 경우 양이온 계면활성제의 종류와 첨가량에 따라 차이가 발생하였다. 친수성기가 트리메틸암모늄(trimethylammonium)기인 양이온 계면활성제가 피리디늄(pyridinium)기를 가지는 양이온 계면활성제보다 더 높은 TCE

*Corresponding author : kbaek@kumoh.ac.kr

원고접수일 : 2007. 7. 24 게재승인일 : 2007. 11. 19

질의 및 토의 : 2008. 2. 29 까지

제거율을 보였다. 이러한 연구결과는 SEAR 후처리를 위해 PRB 적용시 잔존하는 계면활성제의 영향을 살펴보았으며 실제 현장적용의 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : TCE, 혼합 계면활성제, 영가철, 환원적 탈염소화

1. 서 론

염소계 유기화합물은 세정성이 좋고 건조가 빨라 세척 및 세정제로 산업, 군사분야에 많이 이용되었으나, 최근 토양 및 지하수에 대한 오염이 심각한 환경문제로 대두됨에 따라 염소계 유기화합물로 오염된 지역의 효율적인 복원이 중요한 문제로 부상되고 있다. 특히 trichloroethylene (TCE), perchloroethylene(PCE)과 같은 염소계 유기화합물은 인체에 유해를 끼칠 우려가 높으며, 지하수로 유출되었을 경우 물보다 무거운 특성 때문에 DNAPL을 형성하여 오랜 기간 지하수 오염원으로 작용하게 된다(Hooker and Klabunde, 1994; Hua and Hoffmann, 1996).

염소계 유기화합물을 제거하는 방법 중 하나인 투수성 반응벽체(permeable reactive barrier, PRB)는 매우 효과적인 원위치 복원 공법으로 입증되어왔다. PRB는 오염된 지하수를 복원하기 위하여 반응 매질로 채워진 지중 벽체를 이용하는 방법으로, 용존성의 오염물질이 지하수 흐름에 의하여 PRB를 통과하면서 처리된다. 염소계 유기화합물을 제거하기 위한 매질로서는 탈염소화 반응을 유도하기 위해 일반적으로 과립형태의 영가철(zero valent iron, ZVI)이 사용되고 있으며(USEPA, 1998), 이러한 영가철은 최근 수년간의 연구결과에서 염소계 유기화합물에 대한 우수한 제거율과 경제성을 갖는 물질로 입증되었다(Matheson and Tratnyek, 1994; Schreier and Reinhard, 1994; Gillham and O'Hannesin, 1994; Burris and Campbell, 1995; Johanson and Scherer, 1996; Arnold and Roberts, 2000; 신승철 외, 2006).

계면활성제는 친수성(hydrophilic property)과 소수성(hydrophobic property)이 한 분자 내에 존재하는 양친성 화합물로서 지하수에서 불투수층 위에 존재하는 DNAPL의 용해도를 증가시킬 수 있다. 계면활성제를 사용하여 DNAPL을 지하수로 용해시켜 정화하는 Surfactant-enhanced aquifer remediation(SEAR) 공법은 토양 및 지하수의 유용한 정화방법중의 하나로 입증되어 왔다(Pennell et al, 1994). 그러나 SEAR를 이용한 지하 환경 처리 후에도 지하수에는 미량의 염소계 유기화합물과 계면활성제가 존재하고, 최근의 지하수오염기준의 강화 등으로 인하여 이를 처리할 필요성이 증대되고 있다. 따라서 SEAR 공법을 적용한 후에도 계면활성제와 함께 지

하수에 용존하는 미량의 TCE를 영가철로 충전된 PRB를 이용하여 정화한다면 토양 및 지하수에 존재하는 DNAPL의 가장 이상적인 제거효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 처리방법의 개념도를 Fig. 1에 도 시하였다.

최근 영가철을 이용한 염소계 유기용제를 처리하는데 계면활성제의 영향에 대한 연구가 소개되고 있다. Cho and Park(2006)의 연구에 의하면 PRB에서 소수성인 TCE를 상대적으로 친수성인 영가철에 흡착을 증가시켜 영가철을 이용한 TCE 탈염소화를 촉진시킬 수 있다. 또한 양이온성 계면활성제를 사용한 경우 계면활성제와 ZVI 주변의 전자에 의한 순간적인 정전기적 인력으로 TCE의 제거율은 증가되었으나 계면활성제 자체 독성으로 인한 현장적용성이 문제가 되며, 비이온성 계면활성제의 경우 독성은 없지만 TCE의 제거율을 감소시키는 경향을 보였다(Alessi and Li, 2001). 최근에는 혼합계면활성제의 사용이 증대되고 있으며 염소계 유기화합물을 제거하기 위해 혼합계면활성제를 사용한 연구도 진행되고 있다(Zhao et al., 2006).

이러한 연구경향을 바탕으로 본 연구에서는 대표적인 염소계 유기화합물인 TCE를 계면활성제를 이용한 SEAR 공법으로 처리 후 잔존하는 TCE를 PRB를 이용하여 처리할 경우를 가정하여, ZVI를 이용하여 TCE를 제거할 때 여러 종류의 계면활성제 및 혼합계면활성제가 미치는 영향을 살펴보았다.

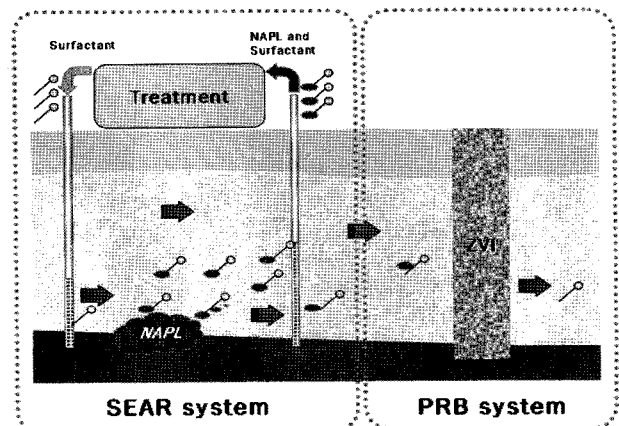


Fig. 1. Schematic diagram of overall treatment method with Surfactant enhanced aquifer remediation and Permeable reactive barrier.

Table 1. Physico-chemical properties of used surfactant in this study

Trade name	Chemical name	Type	CMC ^a (mM)	HLB ^b	Company
DPC	1-Dodecylpyridinium chloride	Cationic	1.630	-	Sigma-Aldrich
DTAC	Dodecyl trimethylammonium chloride	Cationic	20.000	-	Fluka
CPC	Cetylpyridinium chloride	Cationic	0.900	-	Sigma-Aldrich
CTAB	Cetyl trimethylammonium bromide	Cationic	0.920	-	Sigma-Aldrich
Brij30	POE ^c (4) laurylether	Nonionic	0.035	9.7	Sigma-Aldrich
Brij35	POE ^c (23) laurylether	Nonionic	0.090	16.9	Sigma-Aldrich
Brij36	POE ^c (10) laurylether	Nonionic	0.200	14.1	Sigma-Aldrich

^a Critical micelle concentration^b Hydrophilic-Lipophilic Balance^c Polyoxyethylene (-CH₂CH₂O-)

2. 연구내용 및 방법

2.1. 실험재료

탈염소화 반응을 위한 반응물질로 0.5039 m²/g의 비표면적을 가진 영가철(100 mesh, Junsei, Japan)을 이용하였다. 이 연구에 사용한 계면활성제는 양이온성 계면활성제로는 1-dodecylpyridinium chloride(DPC, Sigma Aldrich), dodecyltrimethylammonium chloride(DTAC, Fluka), hexadecyl pyridinium chloride(CPC, Sigma Aldrich), hexadecyl trimethyl ammonium chloride(CTAB, Sigma Aldrich), 비이온성 계면활성제로는 polyoxyethylene 4 dodecyl ether(Brij30, Sigma Aldrich), polyoxyethylene 23 dodecyl ether(Brij35, Sigma Aldrich), polyoxyethylene 10 dodecyl ether(Brij36, Sigma Aldrich), 을 사용하였으며 계면활성제의 물리화학적 특징은 Table 1에 정리하였다.

2.2. 실험방법

혼합 계면활성제의 존재에 따른 영가철의 TCE 환원능을 파악하기 위하여 영가철 2g이 담긴 20 mL vial에 혼합 계면활성제의 임계미셀농도(critical micelle concentration, CMC)를 기준으로 양이온 계면활성제와 비이온성 계면활성제를 1:9, 2:8, 5:5의 비율로 1 CMC인 용액 20 mL를 주입하였다. 혼합 계면활성제의 CMC는 비이온 계면활성제의 물비가 50% 이상인 경우 비이온성 계면활성제의 CMC와 유사하기 때문에 비이온성 계면활성제의 CMC를 기준으로 두었다(Lee et al., 2005; Rao and He, 2005). HCl(0.1 N)을 이용하여 용액의 pH를 3으로 조절하였다. TCE는 마이크로 실린지를 이용하여 용액 내에서 35 mg/L가 되도록 주입한 후 0, 1, 5, 10, 24, 48, 72, 96 시간마다 용액에 존재하는 TCE의 농도를 측정하였다.

TCE의 탈염소화 반응속도를 파악하기 위하여 일반적으로 사용하는 유사일차반응으로 가정하며 식(1)의 반응속도식을 사용하여 반응속도상수(k)를 구하였다.

$$\frac{dC_{TCE}}{dt} = -kC_{TCE}, \quad \ln\left[\frac{C_{TCE}}{C_{TCE,0}}\right] = -kt \quad (1)$$

여기에서 C_{TCE} 는 일정시간이 지난후 TCE의 농도이며, $C_{TCE,0}$ 는 TCE의 초기주입농도이다.

2.3. 분석방법

영가철의 비표면적은 BET 측정기인 Tristar 3000 (Micromeritics, Australia)을 이용하였다. 반응 후 수용액 내에 존재하는 TCE의 농도는 Symmetry C₁₈(Waters, USA) 칼럼을 장착한 고성능액체크로마토그래피(HPLC, Agilent 1100, USA)를 이용하여 분석하였다. TCE의 측정은 UV 검출기(210 nm)를 사용하였으며, 이동상은 acetonitrile과 물을 6:4(v/v)의 비율로 혼합하여 1 mL/min 으로 흘려주었다.

3. 결과 및 고찰

계면활성제가 첨가되지 않은 용액에서 ZVI를 이용한 TCE 분해속도상수는 0.0052 h⁻¹m⁻²L이었으며 계면활성제가 존재할 경우 TCE 분해속도상수를 Table 2에 정리하였다.

양이온 계면활성제인 DPC, DTAC, CPC 그리고 CTAB와 음이온 계면활성제인 Brij30을 이용하여 혼합계면활성제를 첨가하였을 경우 TCE의 반응속도는 Fig. 2와 같다. 결과에서 양이온성 계면활성제의 물 비가 증가할수록 제거율이 다소 증가하는 경향이 나타났지만 제거속도상수는 비슷하였다. 사용된 혼합계면활성제 중에서는 DPC

Table 2. Summary of rate constants in the dechlorination of TCE by ZVI in presence of surfactants

Conditions	k^a	$k_{SA}^b (\times 1000)$	Conditions	k^a	$k_{SA}^b (\times 1000)$
Control	0.0206	0.0052	Control	0.0206	0.0052
DPC : Brij30	1 : 9	0.0175	DTAC : Brij30	1 : 9	0.0172
	2 : 8	0.0170		2 : 8	0.0174
	5 : 5	0.0180		5 : 5	0.0177
DPC : Brij35	1 : 9	0.0109	DTAC : Brij35	1 : 9	0.0163
	2 : 8	0.0102		2 : 8	0.0157
	5 : 5	0.0115		5 : 5	0.0138
DPC : Brij36	1 : 9	0.0111	DTAC : Brij36	1 : 9	0.0133
	2 : 8	0.0116		2 : 8	0.0138
	5 : 5	0.0138		5 : 5	0.0152
CPC : Brij30	1 : 9	0.0167	CTAB : Brij30	1 : 9	0.0177
	2 : 8	0.0169		2 : 8	0.0171
	5 : 5	0.0174		5 : 5	0.0177
CPC : Brij35	1 : 9	0.0110	CTAB : Brij35	1 : 9	0.0161
	2 : 8	0.0117		2 : 8	0.0168
	5 : 5	0.0116		5 : 5	0.0167
CPC : Brij36	1 : 9	0.0111	CTAB : Brij36	1 : 9	0.0132
	2 : 8	0.0118		2 : 8	0.0130
	5 : 5	0.0130		5 : 5	0.0173

^a Rate constant (Unit: h^{-1})

^b Surface area normalized rate constants (Unit: $h^{-1}m^{-2}L$)

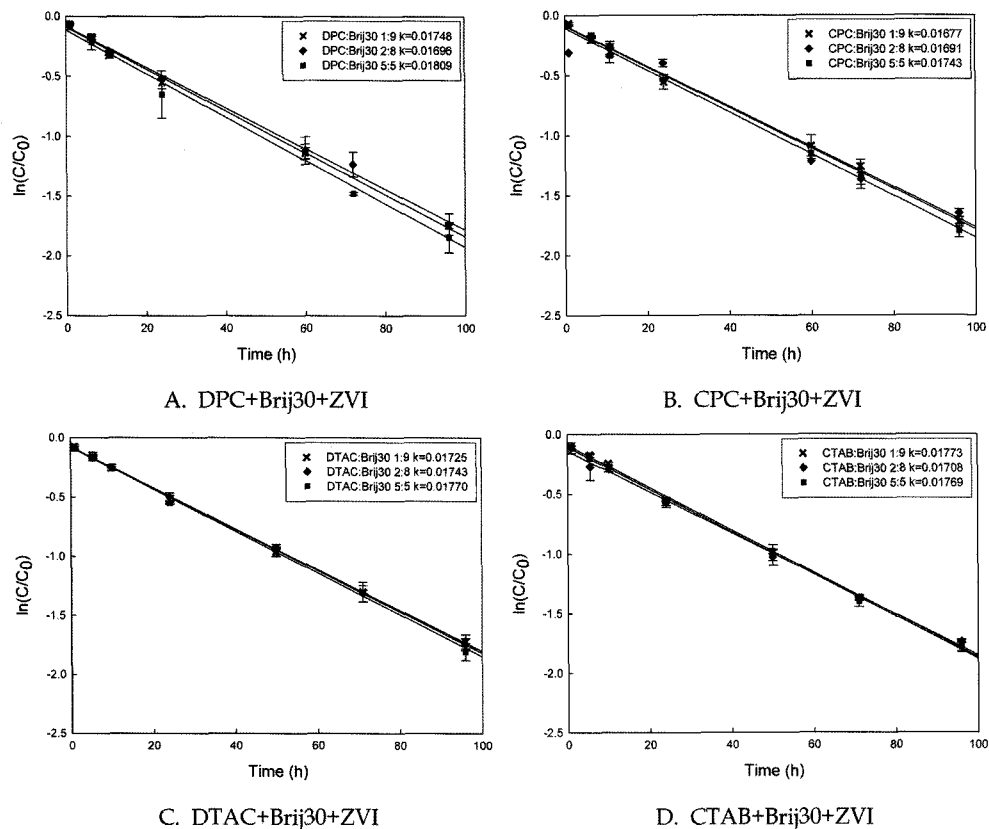


Fig. 2. TCE degradation kinetics with ZVI in presence of Brij 30 and (A) DPC, (B) CPC, (C) DTAC, and (D) CTAB.

와 Brij30이 5:5의 비율로 제조된 혼합계면활성제에서 반응속도가 가장 높았다(Fig. 2A). 대조군으로서 함께 진행된 Brij30 단독 계면활성제를 사용하였을 때 반응속도는 $0.0045 \text{ h}^{-1}\text{m}^{-2}\text{L}$ 이었으며, 결과적으로 혼합 비율 및 계면활성제 종류별로 미세한 차이는 있으나 함께 사용된 양이온성 계면활성제가 혼합계면활성제의 특성 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 분자구조상 짧은 polyoxyethylene (POE)을 갖는 비이온성 계면활성제를 이용하여 제조한 혼합계면활성제는 수용액속에서 양이온성 계면활성제보다는 비이온성 계면활성제에 의해 ZVI 표면에 흡착이 이루어지는 것으로 사료된다.

양이온성 계면활성제와 Brij35를 함께 사용하여 제조한 혼합계면활성제의 경우에는 양이온성 계면활성제의 종류나 물 비에 따라 뚜렷한 제거속도 변화양상을 보여주었다(Fig. 3). 대조군으로서 함께 진행된 Brij35 단독 계면활성제를 사용하였을 때 반응속도는 $0.0036 \text{ h}^{-1}\text{m}^{-2}\text{L}$ 이었으며, 전반적인 혼합 계면활성제의 TCE 제거 경향은 양이온성 계면활성제의 물 비가 커질수록 TCE 제거율이 낮아지거나 일정한 수준에 머무르는 경향을 보였다. 이 현상은

Brij35의 hydrophilic-lipophilic balance(HLB)가 Brij30보다 높기 때문에 비교적 물에 대한 상대적인 친화도가 높아서 영가철과 계면활성제간의 흡착이 줄어들었기 때문에 사료된다. 각각의 혼합계면활성제가 TCE 제거율에 미치는 영향을 비교해보면, 친수기의 형태가 pyridinium인 DPC 혹은 CPC와 혼합된 Brij35는 TCE 제거속도가 매우 낮았으나(Fig. 3A, B), 친수기가 trimethylammonium인 CTAB 혹은 DTAC와 Brij30이 혼합된 경우는 비교적 높은 TCE 제거율을 보였다(Fig. 3C, D).

Fig. 4는 Brij36과 양이온성 계면활성제를 사용하여 제조된 혼합계면활성제가 존재할 때 영가철 반응실험에서 TCE제거속도를 보여준다. 대조군으로서 함께 진행된 Brij35 단독 계면활성제를 사용하였을 때 반응속도는 $0.0025 \text{ h}^{-1}\text{m}^{-2}\text{L}$ 이었으며, Brij36을 이용한 혼합계면활성제의 TCE제거 반응은 다른 혼합계면활성제와 유사하게 친수성 pyridinium기를 갖는 CPC나 DPC보다는 trimethyl ammonium기를 갖는 CTAB나 DTAC와 혼합된 계면활성제에서의 TCE제거속도 상수가 더 높았다는 점에서 Brij35를 사용한 혼합계면활성제와 비슷한 경향을 띠지만,

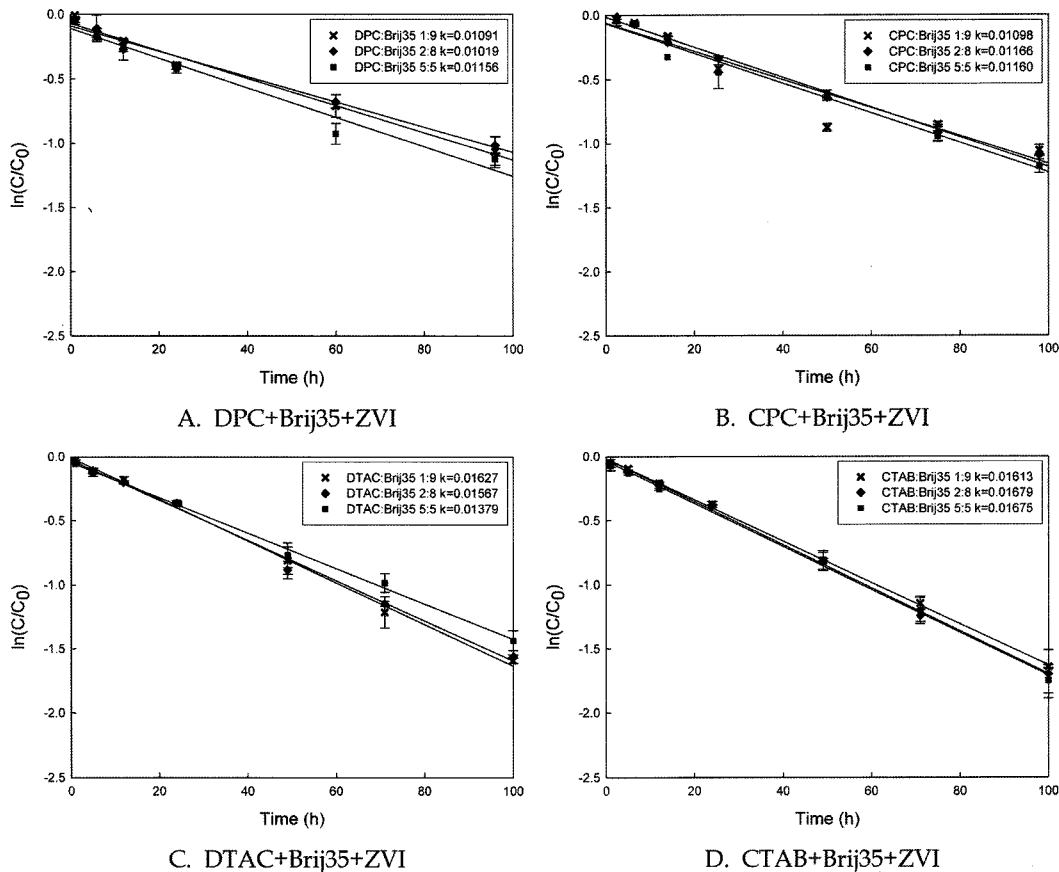


Fig. 3. TCE degradation kinetics with ZVI in presence of Brij 35 and (A) DPC, (B) CPC, (C) DTAC, and (D) CTAB.

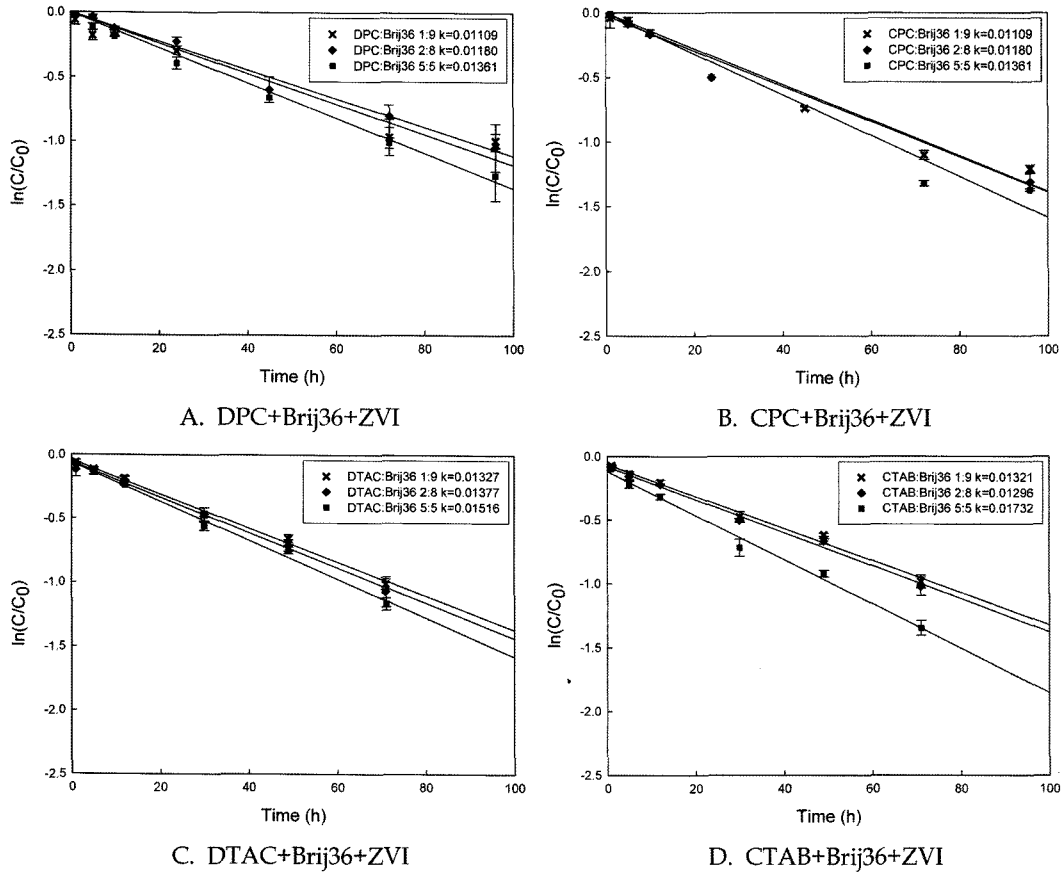


Fig. 4. TCE degradation kinetics with ZVI in presence of Brij 36 and (A) DPC, (B) CPC, (C) DTAC, and (D) CTAB.

양이온성 계면활성제의 몰 비의 증가에 따라 제거율도 증가하는 현상은 Brij30의 경향과 비슷하였다. 이러한 결과들은 각각의 비이온 계면활성제의 구조에서 기인한 것으로 사료된다. 상대적으로 친수기 사슬이 짧은 Brij30으로 제조된 혼합계면활성제의 경우는 양이온 계면활성제의 영향을 크게 받지 않지만, 비교적 긴 POE 사슬을 갖고 있는 Brij35 및 Brij36의 경우 혼합된 양이온성 계면활성제의 종류 및 몰 비에 따라 상당한 차이를 보였다.

이를 보다 정확히 파악하기 위하여 비이온성 계면활성제의 HLB에 따른 TCE제거 속도상수를 살펴보았다(Fig. 5). 이 결과로부터 TCE의 제거속도가 혼합계면활성제에 사용된 비이온성 계면활성제의 HLB에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 낮은 HLB의 계면활성제는 상대적 친유성이 크기 때문에 계면활성제와 영가철간의 흡착의 증가가 일어나며, 흡착된 계면활성제는 TCE의 ZVI흡착을 증가시켜 ZVI와 반응기회를 보다 많이 만들기 때문이다. 양이온성 계면활성제가 pyridinium기를 갖는 DPC와 CPC의 경우 HLB가 증가할수록 제거율이 오히려 소량 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5A,C). 그러나 trimeth-

ylammonium기를 갖는 양이온성 계면활성제의 경우 높은 HLB를 가지는 Brij 35에서 HLB가 더 낮은 Brij36보다 TCE 제거상수가 더 높게 나타났다(Fig. 5B, D). 이는 양이온성 계면활성제와 Brij35의 이중층 형성(Fig. 6)이 Brij36보다 이상적으로 형성되었기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

SEAR를 이용하여 처리된 지하수의 잔존하는 염소계 유기화합물을 처리하기 위한 PRB공법에서 비교적 독성이 없으며 탈염소화 제거속도가 빠른 혼합 계면활성제를 조사하기 위해 다양한 양이온성 계면활성제와 비이온성 계면활성제를 함께 사용하여 영가철의 제거속도 상수를 측정하였다. 전반적으로 혼합 계면활성제를 사용한 실험들은 계면활성제를 첨가하지 않은 바탕실험에서의 TCE제거 속도보다 낮았다. 이것은 사실의 길이가 긴 비이온 계면활성제가 ZVI와 TCE 사이의 전자전달을 방해하였기 때문으로 사료된다. 비이온 계면활성제 중에서는 Brij30을 사용한 혼합계면활성제의 경우, 양이온성 계면활성제에 의

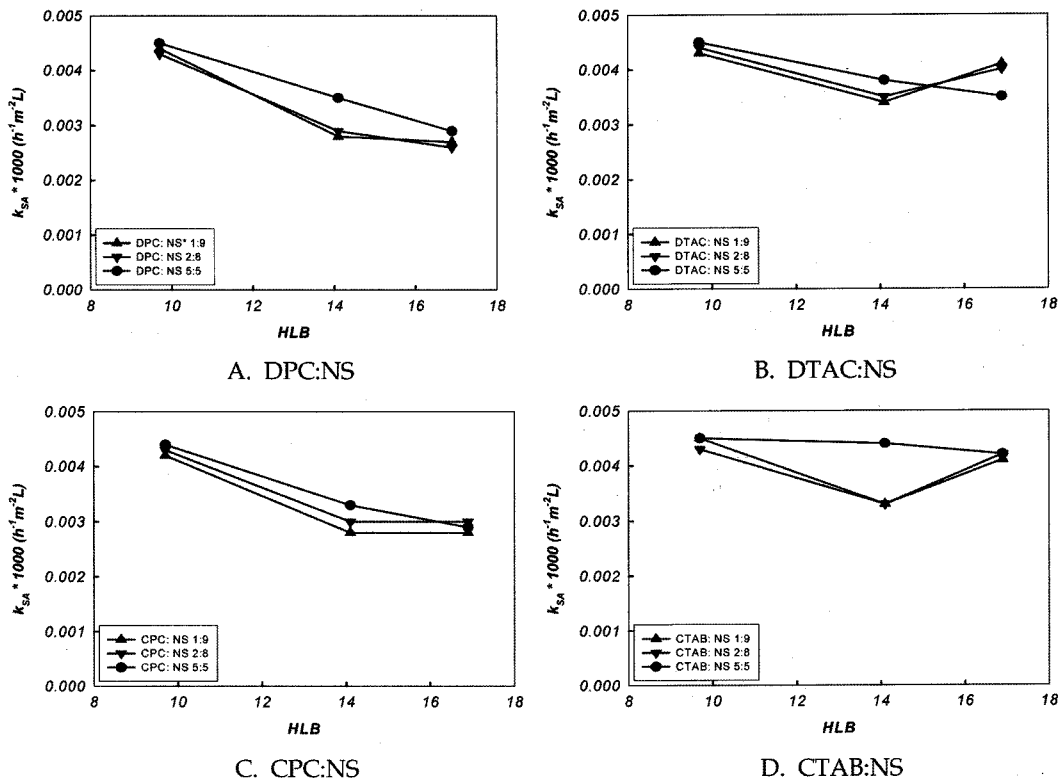


Fig. 5. The effect of nonionic surfactant (NS) HLB for TCE degradation rate constant with ZVI in presence of NS and (A) DPC, (B) CPC, (C) DTAC, and (D) CTAB.

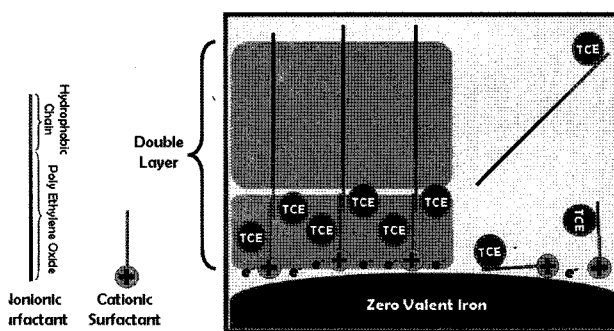


Fig. 6. Formation of double layer with nonionic, cationic and mixed surfactants on ZVI.

한 영향이 작았으며 TCE의 분해속도상수도 가장 높았다. 이것은 HLB가 낮아 ZVI에 많이 흡착되었고, Brij35과 Brij36이 Brij30에 비해 POE 사슬 길이가 길어 ZVI와 TCE 사이의 전자전달을 방해하였기 때문으로 사료된다. 양이온 계면활성제의 영향을 살펴보았을 경우에는 CTAB가 첨가된 혼합계면활성제의 경우 가장 높은 제거 속도 상수를 보였다. 대부분의 혼합계면활성제에서 양이온성 계면활성제의 몰 비가 증가함에 따라 제거상수가 조금씩 증가하는 모습을 볼 수 있었으나 비이온성 계면활성제

Brij36이 첨가된 혼합계면활성제들을 제외하면 증가 정도는 미미하였다. 각각의 비이온성 계면활성제는 고유의 HLB를 갖는데, 혼합계면활성제는 HLB가 낮을수록 높은 TCE제거율을 나타내었다. 낮은 농도의 trimethylammonium기를 갖는 양이온성 계면활성제를 이용한 경우 높은 HLB를 갖는 비이온성 계면활성제에도 불구하고 제거상수가 증가하였는데, 이는 적절한 양이온성 계면활성제와 비이온성 계면활성제간의 이중층이 형성되었기 때문인 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 국가지정연구실 사업 (M1040000266-05J0000-26611)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

신승철, 김영훈, 고석오, 2006, 니켈로 코팅된 영가금속을 이용한 4-염화페놀의 환원제거율 평가, 한국지하수토양환경학회지, 11(3), 59-65.

- Arnold, W.A. and Roberts, A.L., 2000, Pathways and Kinetics of Chlorinated Ethylene and Chlorinated Acetylene Reaction with Fe(0) Particles, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 1794-1805.
- Burris, D.R. and Campbell, T.J., 1995, Sorption of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in a Batch Reactive Metallic Iron-Water System, *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2850-2855.
- Alessi, D.S. and Li, Z., 2001, Synergistic effect of cationic surfactants on perchloroethylene degradation by zero-valent iron, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3713-3717.
- Cho, H.-H. and Park, J.-W., 2006, Sorption and reduction of tetrachloroethylene with zero valent iron and amphiphilic molecules, *Chemosphere*, **64**, 1047-1052.
- Gillham, R.W. and O'Hannesin, S.F., 1994, Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron, *Ground Water*, **32**, 958-967.
- Hooker, P.D. and Klabunde, K.J., 1994, Destructive Adsorption of Carbon Tetrachloride on Iron (III) Oxide, *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 1243-1247.
- Hua, J. and Hoffmann, M.R., 1996, Kinetics and Mechanism of the Sonolytic Degradation of CCl₄: Intermediates and Byproducts, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 864-871.
- Johnson, T.L. and Scherer, M.M., 1996, Kinetics of Halogenated Organic Compound Degradation by Iron Metal, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 2634-2640.
- Lee, J., Yang, J.-S., Kim, H.-J., Baek, K., and Yang, J.-W., 2005, Simultaneous removal of organic and inorganic contaminants by micellar enhanced ultrafiltration with mixed surfactant, *Desalination*, **184**, 395-407.
- Matheson, L.J. and Tratnyek, P.G., 1994, Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal, *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 2045-2053.
- Rao, P. and He, M., 2005, Adsorption of anionic and nonionic surfactant mixtures from synthetic detergents on soils, *Chemosphere*, **63**, 1214-1221.
- Schreier, C.G. and Reinhard, M., 1994, Transformation of chlorinated organic compounds by iron and manganese powders in buffered water and in landfill leachate, *Chemosphere*, **29**, 1743-1753.
- Pennel, K.D., Jin, M., Abriola, L.M., and Pope, G.A., 1994, Surfactant enhanced remediation of soil columns contaminated by residual tetrachloroethylene, *J. Contam. Hydrol.*, **16**(1), 35-53.
- USEPA, 1998, Permeable Reactive Barrier Technologies For Contaminant Remediation. EPA 600-R-98-125.
- Zhao, B., Zhu, L., and Yang, K., 2006, Solubilization of DNAPLs by mixed surfactant: Reduction in partitioning losses of nonionic surfactant, *Chemosphere*, **62**, 772-779.