

고농도 PCE 및 1,1,1 TCA 제거를 위한 영가금속 선정

권 수 열*⁺ / 김 영**

Screening of Zero-Valent Metal for the Removal of High Concentration PCE and 1,1,1 TCA

Soo-youl Kwon*⁺ / Young Kim**

요약 : 본 연구는 고농도의 PCE 및 1,1,1-TCA가 단독 또는 혼합물로 오염된 지하수 복원을 위해 영가 금속을 이용한 탈염소환원공정을 적용할 때 기술적으로, 경제적으로 가장 적절한 영가금속 선정을 목표로 수행되었다. 고순도 영가철, 고순도 영가아연, 철광석, 고로 슬래그, 차수재용슬래그, 망간 광석 및 아연 광석 등을 대상으로 회분식 반응조 실험을 수행하였으며, PCE, 1,1,1-TCA 및 혼합물의 분해능 및 탈염소화율을 도출하고, 금속 단가 당 변환량을 포함한 경제성 등을 검토하여 최적의 금속광물을 선정하고자 하였다. 연구결과 단일물질 처리 시 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 의한 제거율 및 분해능이 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 아연광석에 의한 분해능이 양호하였다. 두 물질 제거를 위한 경제성 비교에서는 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 비해 아연광석이 매우 양호한 것으로 나타났다. 두 물질의 혼합처리 시에는 단일 처리에 비해 분해능이 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 단일 또는 혼합 1,1,1-TCA, PCE 처리를 위한 분해능, 처리특성 및 경제성 등을 고려하였을 때 아연광석이 가장 적절한 금속광물로 사료된다.

핵심용어 : 영가금속, 탈염소화, PCE, 1,1,1-TCA

Abstract : Chlorinated aliphatic hydrocarbons (CAHs) such as tetrachloroethylene (PCE), 1,1,1-trichloroethane (1,1,1-TCA) are the contaminants most frequently found in soil and groundwater. They have a potential to be toxic to and persistent in environment. This study is focused on selection of zero-valent metal and ores for the removal of high concentration PCE or 1,1,1-TCA and mixture of two compound. For the screening of suitable metals, we measured dechlorination rate, removal capacities and economics by using batch reactor test. This results suggest that removal rate and dechlorination of high quality iron and zinc are higher than slag and nature ores like zinc and manganese. Among nature ores, zinc ores(64% purity) have highest removal capacities. And in economics zinc ores is 10 times better than high quality metal tested. We conclude zinc ore is most suitable metal for the removal of PCE or 1,1,1-TCA.

Keywords : Zero Valent Metal, Dechlorination, PCE, 1,1,1-TCA

1. 서 론

염소계지방족화합물(Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons; CAHs)은 화학적으로 비중이 크고 지하 대수층의 토양입자에 흡착이 잘되지 않는 성질 때문에 지하로 침투하여 지하수 바닥에

Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPLs)이라는 고농도의 plume을 형성하고, 지하수를 따라 서서히 이동하면서 지하수오염을 확산시키는 대표적인 지하수 오염물질이다. 또한 이들은 대부분 난분해성물질들이며, 암을 유발할 가능성이 매우 높으며 아울러 기형을 일으킬 수 있는 것으로

+ Corresponding author : sykwon@knou.ac.kr

* 정희원·한국방송통신대학교 환경보건학과

** 비희원·고려대학교 환경시스템공학과

알려져 있는등 인체에 유해한 독성물질로 환경적 측면이나 공중보건측면에서 매우 중요한 물질이다 (WHO, 1993).

한편 CAH로 오염된 미국의 superfund site의 경우 한 종류의 CAH로 오염된 경우는 극히 드물며, 대부분 다종의 CAH로 오염된 것으로 보고되고 있다. 즉, 오염된 지하수 대부분이 chlorinated methanes(CMs), chlorinated ethanes (CAs), 혹은 chlorinated ethylenes (CEs)의 혼합물로 오염되어있는 경우가 더 많은 것으로 보고되고 있다(US EPA, 1998). 우리나라의 경우 현재 TCE 혹은 PCE 지하수 오염은 조사를 하고 있으나 기타 물질들에 의한 오염은 거의 조사되고 있지 않아 CAHs 혼합물의 오염도를 정확히 알 수 없다. 그러나 미국에서 밝혀진 CAH 오염원들이 우리나라에서도 비슷하게 존재하고 있다는 현실을 고려하면 우리나라 지하수도 CAH 혼합물로 존재할 가능성이 높다고 판단된다. 따라서 TCE와 PCE 뿐만 아니라 그 외의 CAHs (CMs와 CAs) 혹은 CAH 혼합물 의한 오염문제를 해결하기 위한 처리공정개발에 대한 연구가 필요한 시점이라고 하겠다.

CAH는 자연적으로는 분해가 거의 이루어지지 않으나 수용상태에서 Fe, Zn, Al이 포함된 금속과 접촉할 경우 탈염소화 반응이 진행되는 것으로 알려져 있다(Archer et al, 1977). 수소분자와 염소분자가 서로 치환하는 Hydrogenolysis와 2개의 염소분자를 제거하는 Reductive elimination (α , β)이 주된 반응이나, 제거하려는 유기용매나 반응 금속의 종류 등에 따라 복잡한 반응경로를 따르기 때문에 생성물이나 부산물이 매우 다양한 것으로 알려져 있다 (Arnold et al, 1998, 1999; Haggblom et al, 2003).

PCE는 TCE, [trans-and cis-1,2-Dichloro-ethylen (cis-DCE and trans-DCE), Vinyl Chloride(VC) 및 에틸렌과 같은 단계적인 환원 반응경로를 거쳐 탈염소화 하는 것으로 알려져 있다(Orth et al, 1996; Arnold et al, 2000).

PCE 등에 비해 chlorinated ethanes (CAs)의 환원반응은 많이 연구 되어있지 않은데 1,1,1-TCA는 1,1-Dichloroethane (1,1-DCA) 혹은 1,2-Dichloroethane (1,2-DCA)로 분해되어 ethane을 최종 생성물로 생성하며, 금속 표면의 활성화 정도를 높일수록 분해속도가 빨라지나, pH등의 다른 조건에 의하여 분해정도가 달라지는 것으로 보고되고 있다(Agrawal et al, 2002).

한편 CAHs 물질들이 혼합된 오염지하수를 Fe와 Zn등 영가 금속을 이용하여 처리한 예는 그리 많지 않은데 분해속도 비교 시 CT가 가장 크며 다음으로 1,1,1-TCA, PCE, CF, 및 TCE 순이라는 문헌이 보고되어 있다.(Johnson et al, 1996; Chen et al, 2001).

본 연구에서는 고농도의 PCE 및 1,1,1-TCA가 단독 또는 혼합물로 오염된 지하수 복원을 위해 영가 금속을 이용한 탈염소환원공정을 적용할 때 기술적으로, 경제적으로 가장 적절한 영가금속 도출을 목표로 다양한 영가금속을 대상으로 회분식 반응조 실험을 수행하였다. 사용한 영가 금속은 고순도 영가철, 고순도 영가아연, 철광석, 고로 슬래그, 차수재용슬래그, 망간 광석 및 아연 광석이었으며, 각 금속의 PCE, 1,1,1-TCA 및 혼합물의 분해능 및 탈염소화율을 도출하고, 금속 단가 당 변환량을 포함한 경제성 등을 검토하여 최적의 금속광물을 선정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 회분식 반응조 실험 방법

지하수의 기본적인 성상을 어느 정도 유지시킨 상태로 실험을 수행하기 위하여 TCE로 오염된 대수층에서 채취한 지하수를 이용하여 28 mL 크기의 Serum bottle(Septa와 알류미늄 뚜껑으로 밀봉)을 이용하여 회분식 반응조를 제작하였다. 현장에서 채취한 지하수 내 미생물, 용존산소 및 TCE를 없애기 위해 0.2 μ m membrane filter-paper(MFS, USA)로 지하수를 여과한 후 질소가

스(>99 %)로 포기하였다. 준비된 지하수 20 mL를 Serum bottle에 주입 한 후 대상이 되는 물질 및 금속을 일정량 주입하여 20 °C로 유지되는 진탕 배양기(150 rpm)에서 혼합시켜가며 실험을 수행하였다.

본 연구에 사용한 대상물질은 PCE (>99%, Sigma, USA), 1,1,1-TCA (>99%, Sigma, USA)였으며 액상 농도가 30~50 ppm이 되도록 주입하였다. 또한 사용금속의 물리적 성상 및 순도는 Table 1과 같은데 고순도 영가철과 영가아연의 순도는 86% 이상으로 높은 편이며, 망간 광석, 철광석 및 아연광석은 48~64% 내외로 비교적 높았으나 슬래그종류는 매우 낮다는 것을 알 수 있다. 금속주입량은 체가름 후 stoichiometric 상 각 물질이 완전 탈염소하면서 약 60%~80% 제거되는데 필요한 금속량과 주입한 금속의 전량이 반응에 이용되지 않고 주된 반응이 표면에서 일어나는 점을 고려하여 필요량의 약 6~11배를 주입하였다. 각 금속별 주입량은 고순도 영가철과 고순도 영가아연은 0.1 g, 나머지 광물은 대상 물질에 따라 0.5~5 g 정도 주입하였다. 한편 여과를 제외한 모든 작업은 질소가스로 채워진 혐기성 glove box (COY INC, USA)에서 수행하였다.

각각의 단일 물질과 혼합 물질[PCE+ 1,1,1-TCA]의 각 금속에 대한 제거특성을 알아 볼 수 있도록 회분식 반응조를 제작하였으며, 동일한 실험에 대해 동일한 3개의 반응조를 제작하여 실험 결과의 신빙성을 높이고자 하였다.

각 물질과 염소이온의 농도는 물질 주입 직후, 1일 및 3일후의 농도를 측정하였으며, 1일 및 3일 후에 측정한 CAH와 염소이온의 농도 차가 10% 미만일 때 실험을 종료 하였다. 그러나 그 차이가 10% 이상이면 6일 경과 후 CAH와 염소이온의 농도를 측정하여 이전 농도와 비교하여 실험 종료 여부를 판단하였다.

2.2 분석방법

모든 CAHs(PCE 1,1,1-TCA) 농도는 micro-Electron Capture Detector(u-ECD)가 장착된 GC(HP 6890N, USA)를 이용하였는데, 가스 상의 농도를 측정한 후 Henry 법칙을 적용하여 액상 농도를 산출하였다. GC의 운전조건은 유입부의 온도를 200°C로, 검출부의 온도는 230°C로 유지시키고, 오븐은 초기에 40°C로 5분간 유지시킨 후 10°C/min로 220°C까지 증가시키고 5분간 유지하도록 하였다. 탈염소화율(%) 산출을 위한 염소이온의 농도는 ion chromatography(IC, DIONEX, USA)를 이용하여 정성 및 정량 분석하였다.

한편 금속매체의 순도를 파악하기 위한 구성성분 분석은 X-ray Fluorescence (XRF)와 Inductively Coupled Plasma(ICP)를 이용 하였다.

Table 1. Properties of metals used in this study

Metals	Size	Purity	Source
High quality iron(0)	300 mesh	Fe 85.9%	Showa
High quality Zinc(0)	325 mesh	Zn 95.4%	Hayashi
Iron ore	100mesh	Fe 48.7%	Posco
Furnace slag	100mesh	Fe 0.56%	Posco
Dranage slag	100mesh	Fe 1.12%	삼운 ELC
Manganese ore	100mesh	Mn 57.63%	Hanhab
Zinc ore	100mesh	Zn 64%	Korea zinc

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 물질 제거 특성

3.1.1 PCE 제거

Fig. 1은 고순도 영가철, 고순도 영가아연, 철

광석, 슬래그, 망간 광석 및 아연광석을 주입한 회분식 반응조에서의 PCE 제거율과 염소이온 양의 변화를 나타내고 있다. 고순도 영가철과 고순도 영가아연을 주입한 회분식 반응조에서는 약 90%의 PCE 제거율을 보였으며, PCE가 금속과 반응하여 변환되면서 염소이온 양은 각각 증가되었다[Fig 1(B)와 (C)]. 이 결과로 PCE는 Fe 과 Zn와 반응하여 변환하는 것을 확인 할 수 있었으며, 염소이온 양이 증가한 결과를 통해 PCE는 탈염소화 환원반응으로 변환되었음을 확인 할 수 있었다. 또한 아연광석[Fig 1(H)]의 경우 PCE

제거율은 대략 40% 내외이고, 염소이온 생성량은 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 비해서는 적으나 다른 금속에 비해서는 큰 값을 보여주고 있다. 한편 철광석, 고로 슬래그, 차수재용 슬래그 및 망간 광석을 주입한 회분식 반응조에서는 3일간 15% 이하의 작은 PCE 제거율을 보였다. 이상의 결과에서 본 실험에 사용된 금속광물 중 PCE 변환에 비교적 효과적인 것은 고순도 영가철, 고순도 영가아연 및 아연 광석이라는 것을 알 수 있다.

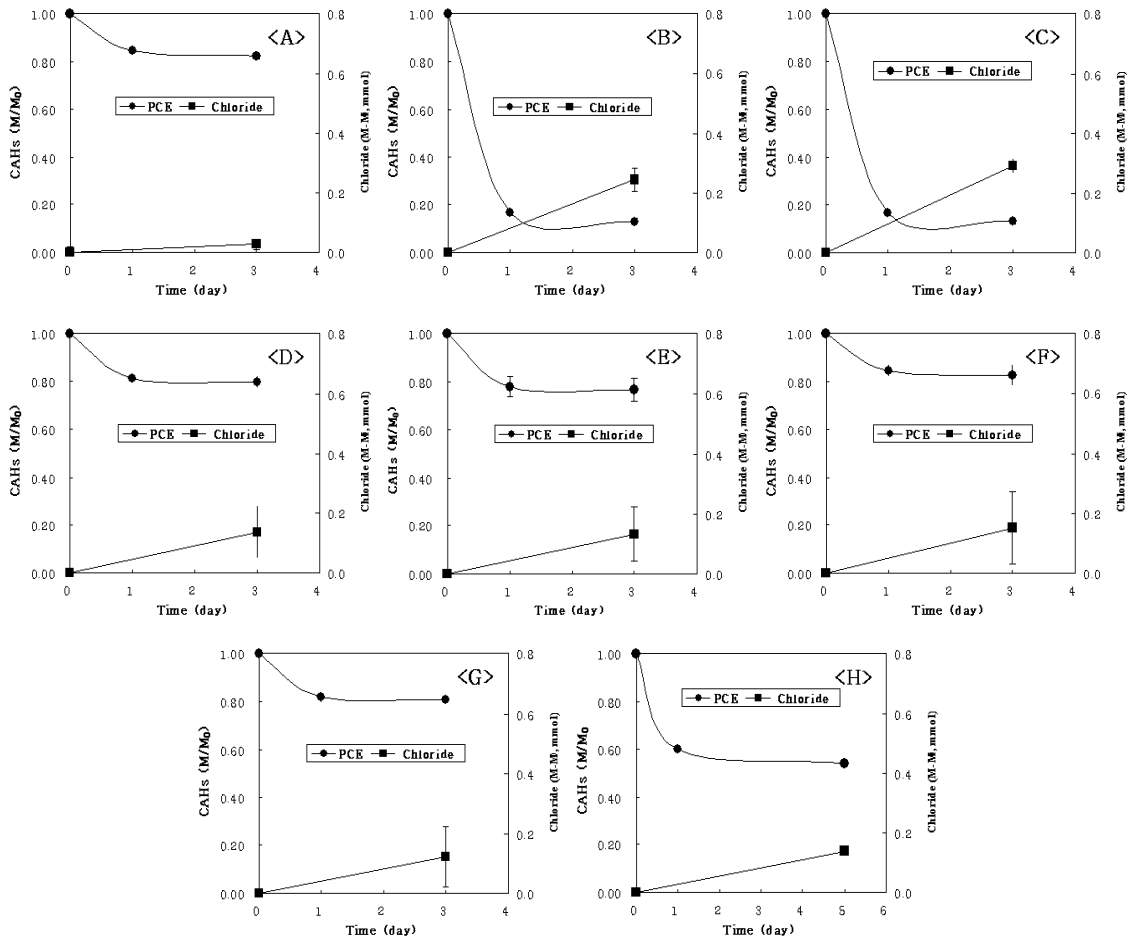


Fig. 1. PCE transformation and the amount of chloride ion released [Control (A), 0.1 g High quality Iron(0) (B), 0.1 g High quality Zinc(0) (C), 0.5 g Iron ore (D), 0.5 g Furnace slag (E), 0.5 g Drainage slag(F), 5 gManganese ore (G), 0.5 g Zinc ore(H)].

3.1.2 1,1,1-TCA 제거

Fig. 2는 각 금속 및 광물에 대한 1,1,1-TCA 및 염소이온 양의 변화를 나타내고 있다. 고순도 영가철과 고순도 영가아연을 각각 0.1 g 주입한 경우[Fig. 2 (B) 및 (C)], 영가 철에서는 약 90% 내외의 제거효과를 보여주고 있으나 영가 아연의 제거율은 60% 내외로 영가철에 비해 크지 않았다. 한편 아연광석의 경우 1,1,1-TCA 제거율은 대략 60% 내외로 고순도 아연금속과 큰 차이를 보여주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 세 경우 모두 정도의 차이는 있으나 염소이온이 생성되는 것으로 보아 탈염소화를 확인 할 수 있었다.

한편 다른 광물의 경우에는 같은 주입량으로는 제거량이 매우 작을 것으로 판단되어서, 광물주입

량을 30배(3 g)로 증가시켜 주입하였다. Fig. 2에서 철광석, 고로 슬래그, 차수재용 슬래그, 망간 광석을 주입한 회분식 반응조의 1,1,1-TCA 변환 결과를 볼수 있는데 각각 30%, 26%, 30%, 45%의 1,1,1-TCA 변환율을 보여주고 있어, 주입량 증가에도 불구하고 제거율이 크게 증가하지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 고순도 영가철과 고순도 영가아연 및 아연광석의 경우에는 1,1,1-TCA의 경우에도 탈염소화에 의한 분해능이 있는 것으로 판단되며, 다른 광물의 경우에는 주입량을 증가시켰음에도 제거율이 크게 증가하지 않는 것으로 보아 1,1,1-TCA 제거에 더 효과적이라고 말하기는 어려울 것으로 보인다.

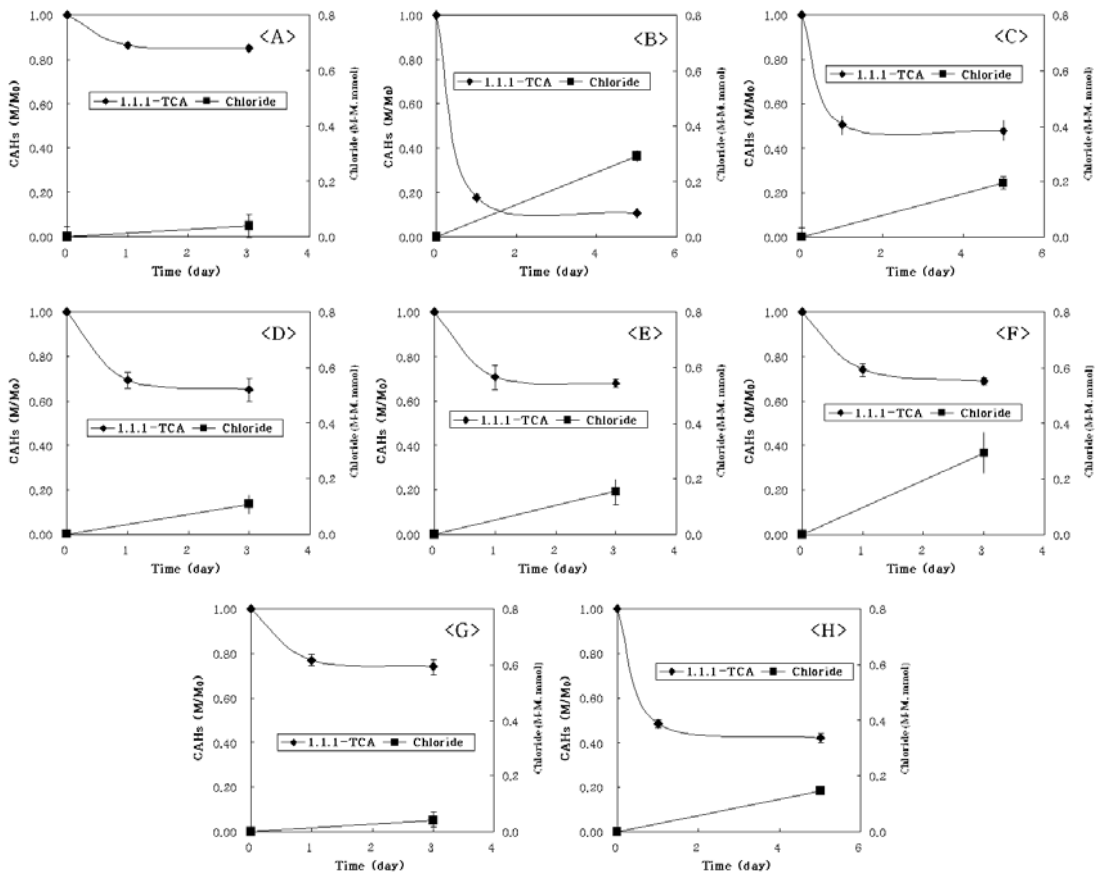


Fig. 2. 1,1,1 TCA transformation and the amount of chloride ion released [Control (A), 0.1 g High quality Iron(0) (B), 0.1 g High quality Zinc(0) (C), 0.5 g Iron ore (D), 0.5 g Furnace slag (E), 0.5 g Drainage slag(F), 5 g Manganese ore (G), 0.5 g Zinc ore(H)].

3.1.3 단일 물질의 분해능 및 경제성

PCE 및 1,1,1-TCA 제거를 위한 금속선정시 고려해야할 내용들인 탈염소화율, 분해능 및 경제성을 각 금속광물에 대해 비교한 결과는 Table 2와 같다. 탈 염소화율은 손(2007)이 사용한 방법을 이용하였으며, 물질분해능은 μg CAH 변환량/g 매체 주입량으로, 금속의 단가 당 물질 분해 양은 μg CAH 변환량/g 매체 단가 로 산정하였다. 이때 철광석 및 슬래그는 단가를 확인할 수 없어 경제성 자료를 추정하지 못했다.

표에서 보는 바와 같이 1,1,1-TCA 변환능은 순도가 높은 고순도 영가철이 7,129(μg CAH 제거량/g 매체 주입량), 고순도 영가아연이 5,546(μg CAH 제거량/g 매체 주입량)로 고순도 영가철이 높게 나타났다. 이 두 종의 고순도 금속은 기타 금속과 비교 시 90~200배의 더 높은 변환능을 보였고, 탈염소화율도 37~43%로 약 1.2~2배로 높게 나타났다. 아연광석의 경우 고순도 영가철과 고순도 영가아연을 제외한 다른 금속과 비교 시 변환능은 47(μg CAH 제거량/g 매체 주입량)로 1.5~2배 높게 나타났으며, 경제성에서는 고순도 금속에 비해 대략 10배 이상 큰 것으로 나타났다.

한편 PCE 실험결과에서는 변환능은 순도가 높

은 고순도 영가철은 4,258(μg CAH 제거량/g 매체 주입량), 고순도 영가아연은 4,215(μg CAH 제거량/g 매체 주입량)로 고순도 영가철과 고순도 영가아연이 높게 나타났다. 이 두 종의 순도 높은 금속은 기타 광물과 비교 시 80~180배의 더 높은 변환능을 보였고, 탈염소화율도 35~38%로 약 1.2~1.7배로 높게 나타났다. 또한 아연광석의 경우 고순도 영가철과 고순도 영가아연을 제외한 다른 매체와 비교 시 변환능은 48(μg CAH 제거량/g 매체 주입량)로 1.3~2배 높게 나타났고, g CAH 제거량/g 매체 단가(원)에서 고순도 영가철과 고순도 영가아연의 약 15배로 나타났다.

이상의 PCE, 1,1,1-TCA 단일 물질 주입 실험결과 고순도 영가철과 고순도 영가아연의 변환능은 기타 광물의 약 80~200배로 매우 크게 나타났다고, 탈염소화율은 37~47%로 기타 금속광물의 탈염소화의 약 1.3~2배로 나타났다. 결과적으로 고순도 영가철과 고순도 영가아연은 변환능이나 탈염소화율도 우수한 것으로 판단되나 경제성은 다른 광물에 비해 매우 불리한 것으로 나타났다. 반면에 아연광석의 경우 물질 변환능은 순도가 높은 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 비해 작으나, 다른 광물에 비해서는 1.1~2배 정도 높으며, 경제성에서는 고순도 금속에 비해서도 10~20배정도 좋은 것으로 나타났다.

Table 2. 1,1,1-TCA, PCE Dechlorination rate, removal capacity, total mass removed per metal mass added, and total mass removed per price of metal(g) (average \pm 95% confidence interval)

Metal	Dechlorination (%)		Removal mass of CAHs(μg) / Injection mass of metal (g)		Removal mass of CAHs(μg) / Cost of g metal (won)	
	1,1,1-TCA	PCE	1,1,1-TCA	PCE	1,1,1-TCA	PCE
Control	7 \pm 1.5	6 \pm 1.0	-	-	-	-
High Iron	43 \pm 11	35 \pm 5.1	7,129	4,258	2.35	1.91
High Zinc	37 \pm 3.3	38 \pm 6.8	5,546	4,215	2.14	1.56
Iron ore	16 \pm 6.7	26 \pm 16	29	25	-	-
Furnace slag	21 \pm 18	26 \pm 4.3	29	38	-	-
Zinc ore	31 \pm 6.7	28 \pm 7.2	31	28	19	18
Manganese ore	5 \pm 3.1	27 \pm 21	25	27	19	-

3.2 혼합 물질 제거 특성

3.2.1 PCE와 1,1,1-TCA 혼합 주입 시 제거

Fig. 3은 회분식 반응조에서의 PCE와 1,1,1-TCA를 혼합 주입한 후, 각 CAHs 및 염소이온 양의 변화를 나타내고 있다. 고순도 영가철과 고순도 영가아연은 다른 광물에 비해 월등한 40~80% 제거율과 0.495~0.749 mmol 염소이온 증가량을 보였다. 고순도 영가철과 고순도 영가아연을 제외한 기타 광물에서는 아연광석이 PCE와 1,1,1-TCA 각각 43, 48%의 제거율 및 0.190 mmol 염소이온 증가량을 나타내어 다른 매체보

다 우수한 것으로 판단된다. 한편 철광석, 고로 슬래그, 망간 광석을 주입한 회분식 반응조에서는 5일간 40% 이하의 PCE와 1,1,1-TCA 제거율과 0.064~0.120 mmol 염소 증가량을 보였다. 또한 PCE와 1,1,1-TCA의 변환율에서는 대부분의 매체에서 PCE보다 1,1,1-TCA 변환율이 더 큰 결과를 나타내고 있다.

이처럼 PCE 및 1,1,1-TCA를 혼합하여 주입한 경우 CAH 간의 경쟁관계로 인해 단일 CAH 처리시의 분해능과 비교해 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 한편 혼합 CAH 간의 경쟁관계에서는 1,1,1-TCA가 PCE보다 더 우세한 것으로 나타났다.

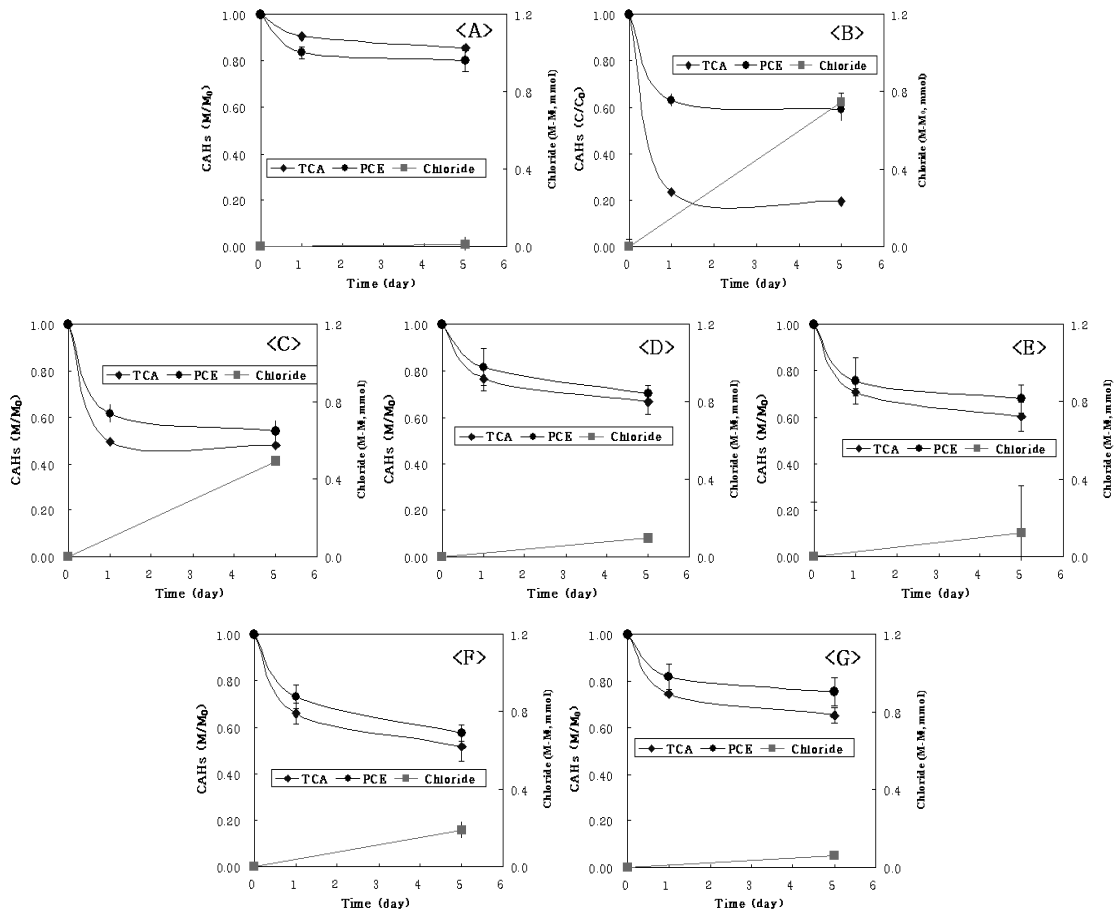


Fig. 3. Mixture of 1,1,1-TCA and PCE transformation and the amount of chloride ion released[Control (A), 0.1 g High quality Iron(0) (B), 0.1 g High quality Zinc(0) (C), 5 g Iron ore (D), 5 g Furnace slag (E), 0.5 g Zinc ore(F), 5 g Manganese ore (G)].

3.2.2. PCE와 1,1,1-TCA 혼합 주입 시 분해능 및 경제성

각 금속광물에 따른 PCE와 1,1,1-TCA를 혼합 주입하였을때의 탈염소화율, 분해능 및 경제성자료를 Table 3에 정리하였다. 표에서 보는바와 같이 고순도 영가철을 주입한 회분식 반응조에서 상대적으로 높은 29 %내외의 탈염소화율을 보였고, 고순도 영가아연은 18 % 내외로 낮은 탈염소화율을 보였다. 이처럼 두가지 물질을 혼합하여 주입한 경우, Table 2의 단일물질을 주입했을때의 35~43 %보다 작은 값을 보여주었는데, 이는 상호간의 경쟁때문으로 판단되며 경쟁의 영향은 아

연보다 철이 적은 것으로 판단된다. 또한 기타 광물을 주입한 반응조에서는 아연광석이 다소 높은 20 %내외 였으며 다른 광석의 경우는 낮은 탈염소화율을 나타냈다. 한편 두 물질의 혼합시 광석 단위무게당 분해능 결과에서는 고순도 영가철과 고순도 영가아연의 분해능은 아연광석에 비해 약 250배의 분해능을 갖고 있는 것으로 나타났다. 반면에 각 금속광물의 단위 무게 당 가격을 고려한 경우 고순도 영가철과 고순도 영가아연이 아연광석에 비하여 단위무게의 물질을 제거하는데 경제적이지 못한 것으로 나타났는데 약 10배의 비용이 더 소요되는 것으로 나타났다.

Table 3. Dechlorination rate, removal capacity, total CAH mass removed per metal mass added, and total CAH mass removed per price of metal(g) in Mixture of 1,1,1-TCA and PCE (average \pm 95% confidence interval)

Metal	Dechlorination (%)	Removal mass of CAHs(ug) / Injection mass of metal (g)	Removal mass of CAHs(ug) / Cost of g metal (won)
Control	1 \pm 2.7	-	-
High Iron	29 \pm 3.1	10,633	4.63
High Zinc	18 \pm 2.1	9,221	3.67
Iron ore	11 \pm 0.5	23	-
Furnace slag	12 \pm 11	32	-
Zinc ore	20 \pm 12	43	27
Manganese ore	16 \pm 2.8	43	31

4. 결 론

고농도의 PCE 및 1,1,1-TCA가 단독 또는 혼합물로 오염된 지하수 복원을 위해 영가 금속을 이용한 탈염소화공정 적용시 기술적으로, 경제적으로 가장 적절한 영가금속 도출을 위한 회분식 실험을 수행하였다. 이를 위해 각 7개의 금속광물에 대한 및 두 물질의 제거율, 분해능, 탈염소화율, 매체 단가당 CAH 분해량 등을 도출하여 비교 하였다.

각각의 단일물질 처리 시 고순도 영가철과 고

순도 영가아연에 의한 제거율 및 분해능이 가장 높게 나타났으며 그 다음으로 아연광석에 의한 분해능이 양호하였다. 또한 탈염소화율 자료로부터 대부분의 광석에서 탈염소화가 발생하고 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 두 물질 제거를 위한 경제성 비교에서는 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 비해 아연광석이 매우 양호한 것으로 판단되어 두 물질 제거를 위한 금속 매체로는 고순도 영가철과 고순도 영가아연에 비해 아연광석이 양호한 것으로 판단된다.

한편 두 물질의 분해능에서는 고순도 영가철과

고농도 영가아연 및 아연광석 모두 1,1,1-TCA가 PCE에 비해 잘 제거 되는 것으로 나타났다. 두 물질의 혼합처리 시에는 광물 및 물질에 따라 다소 상이하나 단독처리에 비해 분해능이 감소하는 것으로 나타났는데, 아연광석의 경우 감소율은 고농도 금속에 비해 그리 크지 않았다. 이상의 결과로부터 단일 또는 혼합 1,1,1-TCA, PCE 처리를 위한 분해능, 처리특성 및 경제성 등을 고려하였을 때 아연광석이 가장 적절한 금속광물로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 한국방송통신대학교 학술진흥재단의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

손봉한, 영가 금속을 이용한 지하수내 고농도 염소계 지방족 화합물의 단일 또는 혼합 시 제거 특성, 고려대학교 석사학위논문, 2007.

Archer, W. L. and Simpson, E. L., Chemical Profile of Polychloroethanes and Polychloroalkenes, *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.*, 16(2) pp. 158-162 (1977).

Arnold W. A. and Roerts A. L., Pathways of Chlorinated Ethylene and Ahlorinated Acetylene Reaction with Zn(0), *Environ. Sci. Technol.*, 32, 3017-3025 (1998).

Arnold W.A., Ball W. P. and Roberts A. L., Polychlorinated Ethane Reaction with Zero-Valent Zinc: Pathways and Rate Control, *Journal of Contaminant Hydrology*, 40, 183-200 (1999).

Arnold W. A. and Roberts A. L., Pathways and Kinetics of Chlorinated Ethylene and Chlorinated Acetylene Reaction with Fe(0) Particles, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 1794-

1805 (2000).

Agrawal A., Ferguson W. J., Gardner B. O., Christ J. A., Bandstra J. Z. and Tratnyek P. G., Effects of Carbonate Species on the Kinetics of Dechlorination of 1,1,1-Trichloroethane by Zero-Valent Iron, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 4326-4333 (2002).

Chen J. L., Al-Abed S. R., Ryan J. A. and Li Z., Effects of pH on Dechlorination of Trichloroethylene by Zero-Valent Iron, *Journal of Hazardous Materials*, B83, 243-254 (2001).

Chen, J. L., Al-Abed, S. R., Ryan, J. A. and Li, Z., Effects of pH on Dechlorination of Trichloroethylene by Zero-Valent Iron, *Journal of Hazardous Materials*, B83, pp. 243-254 (2001).

Hagglblom M. M., and Bossert I. D., *DEHALOGENATION*, Microbial processes and environmental applications, Kluwer academic publication (2003).

Johnson T. L., Scherer M. M. and Tratnyek P. G., Kinetics of Halogenated Organic Compound Degradation by Iron Metal, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 2634-2640 (1996).

Orth W. S. and Gillham R. W., Dechlorination of Trichloroethene in Aqueous Solution Using Fe⁰, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 66-71 (1996).

WHO, Guidelines for Drinking Water Quality, 1993

US EPA(1998). *National water Quality Inventory*, Report to Congress.

○논문접수일 : 10년 04월 12일
 ○심사의뢰일 : 10년 04월 12일
 ○심사완료일 : 10년 04월 22일