

영가철에 의한 토양 Cr(VI) 환원에 미치는 유기물 및 수분함량 영향

양재의 · 이수재 · 김동국 · 오상은 · 윤성환 · 옥용식*

강원대학교 자원생물환경학과
(2008년 1월 9일 접수, 2008년 3월 26일 수리)

Effect of Organic Matter and Moisture Content on Reduction of Cr(VI) in Soils by Zerovalent Iron

Jae E. Yang, Su-Jae Lee, Dongkuk Kim, Sang-Eun Oh, Sung-Hwan Yoon, and Yong Sik Ok* (Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

ABSTRACT: Current soil remediation principles for toxic metals have some limitations even though they vary with different technologies. An alternative technology that transforms hazardous substances into non-hazardous ones would be environmentally beneficial. Objective of this research was to assess optimum conditions for Cr(VI) reduction in soils as influenced by ZVI (Zero-Valent Iron), organic matter and moisture content. The reduction ratio of Cr(VI) was increased from 37 to 40% as organic matter content increased from 1.07 to 1.75%. In addition, Cr(VI) concentration was reduced as soil moisture content increased, but the direct effect of soil moisture content on Cr(VI) reduction was less than 5% of the Cr(VI) reduction ratio. However, combined treatment of ZVI (5%), organic matter (1.75%) and soil moisture (30%) effectively reduced the initial Cr(VI) to over 95% within 5 days and nearly 100% after 30 days by increasing oxidation of ZVI and concurrent reduction of Cr(VI) to Cr(III). The overall results demonstrated that ZVI was effective in remediating Cr(VI) contaminated soils, and the efficiency was synergistic with the combined treatments of soil moisture and organic matter.

Key Words: Cr(VI) reduction, zerovalent iron, moisture, organic matter, remediation

서 론

국내에서는 80년대 이후의 급속한 산업발달로 중금속을 포함한 다양한 오염물질이 토양환경으로 유입되었고 일부 지역에서는 토양의 중금속에 대한 천연부존량을 초과하여 토양의 고유 기능이 상실되고 있다. 오염물질의 경우 대기 및 수질에서는 자연현상에 의한 확산·희석이 쉽게 일어나지만 토양에서의 확산은 상대적으로 어려워 오염물질을 인위적으로 처리하기 전까지는 자연정화의 속도가 매우 느리며 국소적 오염상태가 지속되어 토양환경에 지속적인 악영향을 유발한다¹⁾.

과거 환경오염에 대한 관심은 주로 수질과 대기에 편중되어 왔으나 최근 토양오염으로 생태계의 균형이 파괴되고 오염된 토양에서 재배·생산되는 농산물의 안전성 문제 등이 제기됨에 따라 토양오염에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 또

한 전통적인 토양오염의 원인인 휴·폐금속광산 지역 폐기물에 의한 토양오염 이외에도 공장·산업지역, 비위생 폐기물 매립지, 부적정 유독물 지하저장시설 등에서의 토양오염 사례가 다양하게 보고되면서 그 영역은 점차 확산되었으며 오염물질의 종류도 다양해지게 되었다. 특히 최근 들어 중금속에 의한 토양오염이 심각하여 그 해결책의 마련이 시급한 실정이다²⁾. 유기오염 물질과 달리 중금속은 지속성을 갖고 있기 때문에 미량이라도 토양에 존재하면 먹이 사슬에 의해 인체에 축적되어 중독 현상을 유발할 수 있어 생태계나 인체에 무해하도록 처리해야 한다. 대표적인 중금속의 하나인 크롬·크롬 화합물은 크롬 합금, 크롬 도금, 스테인리스 용접, 도료 및 색소생산, 목재보존 등의 여러 산업분야에서 사용되어 왔다³⁾. 크롬의 화학종은 산화상태에 따라 -2가에서 +6가까지 다양하게 존재하며, pH, Eh, 전자제공체 및 전자수용체의 농도 등 주변의 화학적 특성에 의해 결정되며 토양에서는 3가 및 6가가 우점 하는 것으로 알려져 있다. 특히 크롬 화합물은 그 원자기에 따라 독성이 다른데 +6가의 물질이 +3가의 물질보다 상대적으로 높은 독성을 나타내는 것으로 알려

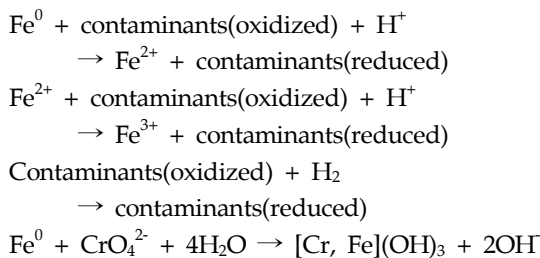
*연락처:
Tel: +82-33-250-6443 Fax: +82-33-241-6640
E-mail: soilok@kangwon.ac.kr

져 있다^{4,5)}.

중금속으로 오염된 토양을 정화하기 위하여 고정(fixation), 용탈(leaching), 이온교환(ion-exchange) 및 불용화(immobilization) 등의 다양한 물리화학적 방법이 사용되어 왔으며 이외에도 미생물을 이용한 생물학적 처리방법, 산·알칼리를 이용한 화학적 처리방법, 응결 침전법, 황화 침전법 및 흡착법 등이 사용되어 왔다⁶⁾. 그러나 기존의 기술은 오염된 토양의 처리에 있어 고가의 장비와 기술이 요구되며 농경지와 같이 상대적으로 낮은 농도의 중금속으로 광범위하게 오염된 지역에 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 현재 개발되어 사용되고 있는 크롬으로 오염된 토양과 수질의 복원기술은 방법에 따라 상이하지만 일반적으로 비용이 많이 들고, 처리 후 이차적인 오염을 초래하거나 시간이 많이 소요되며, 외부 투입 에너지에 크게 의존하여 실제로 현장에 적용하기에는 많은 문제점이 있다^{7,8)}.

그러나 환경에서 자연적으로 발생하는 토양의 산화·환원 반응원리를 이용하면 오염물질의 이동·동태·생물유효성 등을 조절할 수 있으며 외부로부터의 화학물질이나 에너지의 투입을 최소화할 수 있고 비용이 저렴할 뿐 아니라 쉽게 현장에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 최근 몇 년간 선진국에서는 적은 비용으로 난분해성 오염물질을 효율적으로 처리할 수 있는 기술을 확보하기 위하여 여러 가지 *in-situ* 복원기술을 개발하고자 노력해 왔으며 영가금속(zerovalent metal)을 이용한 화학적 처리기술의 경우 경제성과 적용성 면에서 특히 주목을 받고 있어 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다⁹⁾.

토양 중 Cr(VI)를 선택적으로 제거하는 것은 기술적으로 어려울 뿐만 아니라 많은 비용이 요구된다. 따라서 Cr(VI)의 독성을 저감시키는 방법으로 Cr(VI)를 Cr(III)로 환원시키는 방법이 적절할 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 최근 많이 활용되고 있는 방법이 영가철(zerovalent iron)을 사용하는 방법이다. 다음의 반응식은 영가철이 오염물질을 환원시키는 기본적인 반응기작과 영가철에 의한 Cr(VI)의 환원 반응을 나타내었다^{10,11)}.



본 연구에서는 Cr(VI)으로 오염된 토양에서 산화·환원 반응원리를 이용하는 영가철 복원기술의 효율성에 영향을 미치는 다양한 환경요인을 구명함으로써 향후 오염된 토양에 대한 현장적용 시에 기초 자료를 구축하고자 수행되었다. 이를

위하여 토양에서의 Cr(VI) 환원에 영향을 미치는 인자들로서 영가철의 처리량, 토양 수분함량, 유기물 함량에 따른 초기 Cr(VI)의 농도 변화와 반응시간에 따른 Cr(VI)의 복원효과를 반응속도모형을 이용하여 평가함으로써 최적 조건을 탐색하였다.

재료 및 방법

공시재료

영가철은 Shinyo Pure Chemical(Japan)의 철 분말을 사용하였다. 토양시료는 강원도 춘천시 우두동 소재 농경지에서 채취하여 풍건한 후 2 mm 체를 통과한 것을 실험에 사용하였다. 공시토양의 Cr(VI) 농도는 CrO₃(Acros Organics, USA)를 사용하여 조절하였다. 유기물 함량이 Cr(VI)의 환원에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시판 퇴비(Biocom, Korea)를 구입하여 처리하였다.

공시토양 및 퇴비 분석

토양의 화학적 특성은 농촌진흥청의 토양화학분석법¹²⁾에 준하여 pH(1 : 5법), 전기전도도(1 : 5법), 유기물 함량(Tyurin 법), 전질소 함량(Kjeldahl법), 양이온치환용량(1 M NH₄OAc 치환침출법)을 분석하였다. 퇴비의 pH 및 전기전도도는 공시재료 10 g에 증류수 50 ml를 가해 1 : 5의 비율로 하여 측정하였고 수분함량은 ceramic crucible을 사용하여 105°C에서 건조시킨 후 측정하였다. 퇴비의 유기물 함량은 회화로(550°C)에서 5시간 동안 태운 후 무게를 측정하여 계산하였다. NaCl 함량은 시료를 백금도가니에 취하고 석회유를 가해 건조시킨 다음 유기물이 탄화할 때까지 강열 후 여액에 K₂CrO₄ 1~2방울을 가하여 표준 질산은 용액으로 적정하여 정량 하였다. 유해성분 함량은 산 가수분해 후 ICP-AES로 측정하였다¹³⁾. 분석결과 토양은 pH 5.30, 전기전도도 0.06 dS m⁻¹, 유기물 함량 14.1 g kg⁻¹, 전질소 함량 0.1%, CEC 16.07 cmol_c kg⁻¹을 나타내었다. 퇴비는 pH 6.94, 전기전도도 1.38 dS m⁻¹, 수분함량 64%, 유기물 함량 35%, NaCl 0.05%로 조사되었고 유해 중금속은 검출되지 않았다.

영가철의 물리적 특성 분석

영가철의 비표면적 분석은 Mastersizer 2000(Malvern Instrument, USA)를 이용하여 측정하였고 영가철의 입자밀도(particle density)는 이상기체 상태방정식(PV = nRT)에 근거하여 Gas Pycnometer(Micromeritics Instrument Co., USA)로 측정하였다. 용적밀도(bulk density)는 일정 부피의 용기에 영가철을 취하여 중량으로부터 계산하였다. 본 연구에 사용된 영가철의 비표면적은 0.065 m²g⁻¹이었고 용적밀도는 2.15 g cm⁻³, 입자밀도는 7.07~9.35 g cm⁻³의 범위를 나타내었으며 69.6~77.0% 범위의 공극률을 갖는 것으로 계산되었다.

항온배양 실험

영가철에 의한 Cr(VI)의 환원반응에 영향을 주는 인자를 조사하기 위하여 일정농도의 Cr(VI)을 처리한 토양 100 g에 영가철을 1~5%(w/w)로 처리한 후 0~30일 동안 20°C에서 항온배양하며 Cr(VI) 농도를 측정하였다. Cr(VI) 분석은 시료 10 g을 100 ml 수기에 취하고 0.1 M HCl 50 ml를 가한 후 30°C에서 1시간 진탕하여 여과지(Whatman No. 42)로 여과하였다. 여액의 Cr(VI)에 diphenyl carbazide(Aldrich Chemical Co., USA)를 첨가하여 생성된 적자색 착화합물의 흡광도를 Ultraviolet/Visible Spectrophotometer(UV-240, Shimadzu Co., Japan)로 510 nm에서 비색 정량하였다⁵⁾. 영가철에 의한 Cr(VI)의 환원반응에 미치는 유기물의 영향을 판단하기 위하여 유기물 함량을 기준으로 1.07~1.75%(w/w)의 퇴비를 처리하였다. 이 때 영가철은 5%(w/w)로 처리하였고 이외의 조건은 모두 동일하게 유지하였다. 수분 함량에 따른 효과는 토양 수분을 15%와 30%(w/w)로 유지하였으며 이외의 모든 조건은 동일하게 유지하였다. 영가철에 의한 Cr(VI)의 환원 반응에 영향을 주는 인자를 조사하기 위해서는 일정농도의 Cr(VI)을 처리한 토양에 영가철 5%(w/w), 유기물 1.75%(w/w), 수분 30%(w/w)을 혼합하여 동시에 처리한 후 0~40일 동안 반응하며 시간별 Cr(VI)의 농도변화를 측정하였다.

결과 및 고찰

영가철 처리량에 따른 Cr(VI)의 환원효율

영가철의 처리량이 토양의 Cr(VI) 환원에 미치는 영향을 평가하기 위해 영가철의 양을 1~5%로 조절하여 Cr(VI) 환원효율을 측정된 결과 모든 처리구에서 시간에 따른 Cr(VI) 농도는 영가철의 처리량이 증가함에 따라 감소하였다(Fig. 1). 특히 영가철의 양을 1%에서 3%로 증가한 경우에 비해 3%에서 5%로 증가한 처리구에서 Cr(VI)의 제거효율이 가장 높았다. 영가철의 처리량이 증가함에 따라 Cr(VI) 농도가 감소

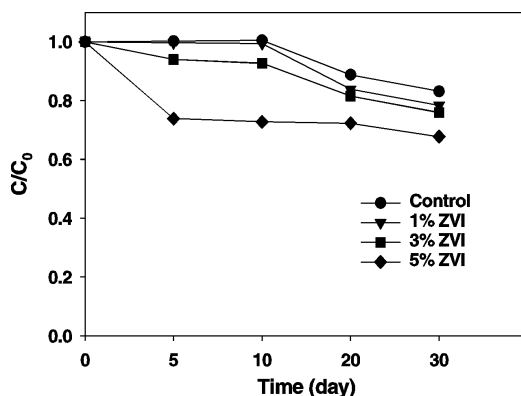


Fig. 1. Reduction of Cr(VI) in soils by different levels of zerovalent iron treatments.

하는 원인은 영가철의 산화에 따른 전자공급이 증가한 것에 기인하는 것으로 판단되며, 5% 처리수준에서의 Cr(VI) 제거효율이 가장 높은 이유는 반응에너지와 환원반응에 요구되는 전자량 등에 기인하는 것으로 판단된다. 영가철을 1~3% 수준으로 처리할 경우에는 Cr(VI) 환원에 요구되는 활성화에너지와 전자량을 충족하지 못해 그 제거효율이 낮고 영가철을 5% 이상 처리하는 경우에는 반응의 활성화에 요구되는 에너지와 전자량이 충분히 Cr(VI) 감소폭이 상대적으로 높은 것으로 보인다¹⁵⁾. 한편, 영가철 처리 10일을 기점으로 영가철 1~3% 처리에서 그 제거효율이 급격히 증가하였으며 이는 영가철에 의한 효과보다는 토양 중 Cr(VI)-Cr(III) 간의 화학적 평형에 의해 일정비율의 Cr(VI)이 Cr(III)로 환원되었기 때문으로 추정된다. 이는 대조구의 Cr(VI) 농도도 10일을 기점으로 유사한 수준으로 감소한 것으로도 유추할 수 있었다(Fig. 1). 그러나 영가철 5% 처리구에서는 그 변화폭이 상대적으로 적게 나타났으며 이는 영가철과 Fe^{2+} , Fe^{3+} 그리고 Cr(VI)-Cr(III) 간의 화학평형에 기인한 현상으로 판단되었다.

유기물 처리에 따른 Cr(VI)의 환원효율

일반적으로 토양 유기물에 존재하는 작용기(functional group)는 중금속과 배위결합을 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다¹⁶⁾. 따라서 유기물이 다량 함유된 토양에서는 중금속의 활동도가 감소하고 불용성 형태의 존재비율이 높아질 수 있다. 또한 유기물에 있는 작용기는 영가철의 이산화 반응에 의해 생성된 전자를 수용하여 친핵체($R\cdot$)를 형성할 수 있으므로 이는 영가철의 Cr(VI) 환원반응이나 유기물과 Cr(VI)의 chelation 반응에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다¹⁴⁾. 특히, 생성된 친핵체는 Cr(VI)의 환원반응에 직접 참여하여 영가철의 Cr(VI) 환원효율을 증가시킬 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 토양에 영가철을 처리하기 전에 유기물 원으로써 퇴비를 시용함으로써 토양의 유기물 함량을 증대시키고 이에 따른 Cr(VI)의 환원효율의 변화를 관찰하였다(Fig. 2). 실험결과 유기물 1.07% 처리구에서는 초기농도에 비해

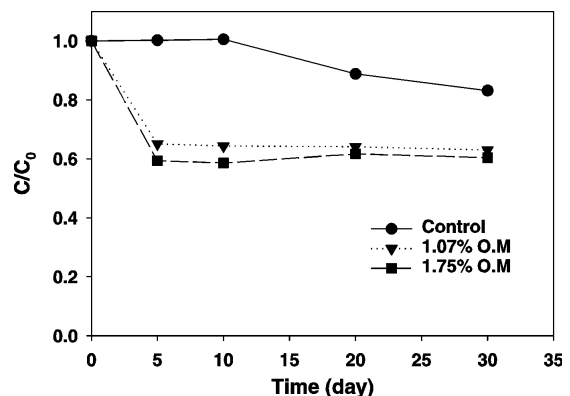


Fig. 2. Reduction of Cr(VI) in soils by different levels of organic matter treatments.

반응 30일 후 Cr(VI) 농도가 37% 감소하였으며, 1.75% 처리에서는 초기 Cr(VI) 농도의 약 40%가 감소하여 토양 중 유기물 함량이 증가함에 따라 Cr(VI)의 제거효율이 증대되는 것으로 조사되었다¹⁷⁾. 특히 Cr(VI)의 환원반응은 초기 5일 이내에 대부분 종결되어 평형에 도달하는 것으로 나타났다 (Fig. 2).

수분함량에 따른 Cr(VI)의 환원효율

토양의 수분함량은 토양의 화학반응 속도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 토양의 수분함량이 높을수록 토양의 화학반응은 용이하게 이루어지며 반응속도 또한 빨라지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 토양의 수분함량이 Cr(VI) 환원에 미치는 영향을 평가하기 위해 Cr(VI) 오염토양에서 수분함량을 15%와 30%(w/w)로 조절하여 시간에 따른 Cr(VI) 농도변화를 조사하였고 반응 30일 경과 후 모든 처리구에서 Cr(VI)의 농도가 약 20% 정도 감소하였다 (Fig. 3). 그러나 감소된 Cr(VI)은 대부분 수분함량에 의한 영향보다는 토양에서 Cr(VI)-Cr(III) 간의 화학적 평형에 의해 나타난 결과로 판단되어 이를 제외한 수분함량 자체에 의한 효과는 약 4% 정도로 평가되었다.

유기물 함량이 영가철의 Cr(VI)의 환원효율에 미치는 영향

Fig. 4는 유기물 함량이 영가철의 Cr(VI) 환원 반응에 미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 4에 제시된 바와 같이 5% 영가철 처리구에서는 약 30%의 Cr(VI)이 환원되었으며 유기물만을 처리하였을 경우에는 40%의 Cr(VI)이 환원되었다 (Fig. 2). 그러나 영가철(5%) 처리구에 유기물(1.07, 1.75%)을 병행하여 처리한 경우에는 반응 30일 경과 후 Cr(VI) 제거율이 50% 이상으로 증가하였다. 이러한 결과는 영가철 또는 유기물을 단독으로 처리한 경우에 비해 월등한 효과로 그 환원반응은 5일 이내에 의사평형에 도달하였다.

수분함량이 영가철의 Cr(VI)의 환원효율에 미치는 영향

토양수분이 Cr(VI)의 환원에 미치는 영향을 평가한 결과

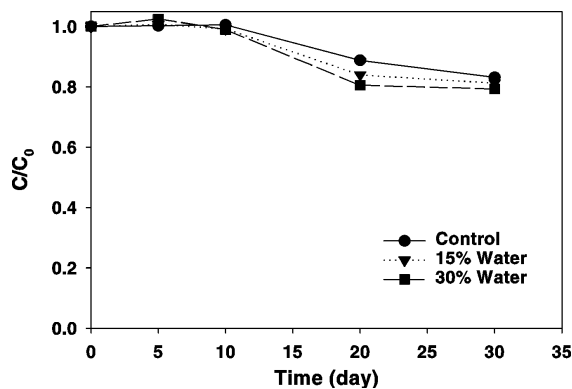
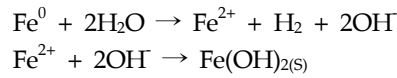


Fig. 3. Reduction of Cr(VI) in soils by different levels of soil moisture treatments.

수분에 의해 환원된 Cr(VI)은 4% 이하로 조사되었다(Fig. 3). 그러나 토양의 수분함량을 15%로 유지하면서 5%의 영가철을 처리한 경우에는 30일 후 89%의 Cr(VI)이 제거되었고 수분함량을 30%로 증가시킨 경우 90% 이상의 Cr(VI)이 제거되었다. 이상의 결과로부터 토양의 수분함량은 Cr(VI)의 환원반응에 직접적으로 참여하기보다는 영가철 자체의 이온화를 증가시켜 주는 역할을 하는 것으로 판단되었다. 또한 토양에서는 수분함량이 유기물 함량보다 Cr(VI)의 환원반응에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

일반적으로 영가철의 산화반응은 산소와 물에 의해 각각 일어나는데 산소가 존재하지 않는 혐기성 조건에서는 물에 의한 산화과정이 다음과 같이 진행이 되는 것으로 알려져 있다^{10,11)}.



즉, 영가철이 Fe²⁺로 산화되면 전자와 OH⁻가 생성되며 Fe²⁺와 OH⁻가 결합하여 ferrous hydroxides를 형성하는 것이다. 이와 같이 발생된 전자는 Cr(VI)의 환원반응에 기여하기

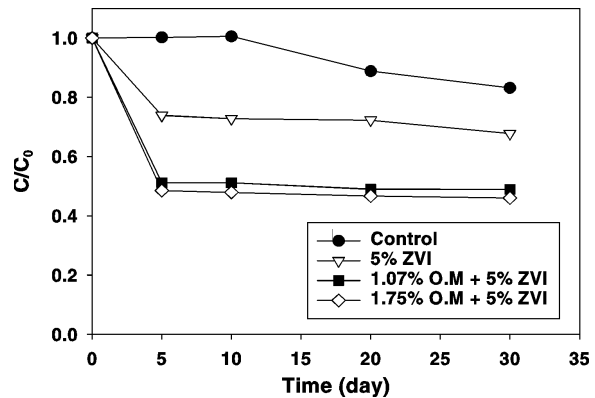


Fig. 4. Effect of organic matter on reduction of Cr(VI) in soils by zerovalent iron.

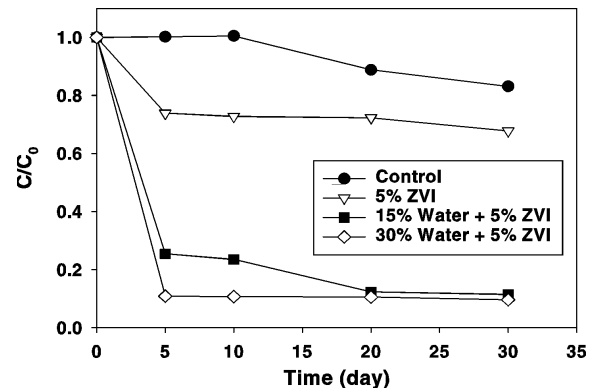


Fig. 5. Effect of soil moisture content on reduction of Cr(VI) in soils by zerovalent iron.

때문으로 판단된다. 따라서 영가철에 의한 Cr(VI)의 환원반응에 있어 영가철의 산화반응을 활성화시키는 조건은 수분이 유기물 보다 효과적인 것으로 판단된다.

유기물과 수분함량이 영가철의 Cr(VI)의 환원효율에 미치는 영향

Fig. 6은 유기물과 수분 함량을 동시에 조절하였을 때 시간에 따른 영가철의 Cr(VI) 환원 반응에 미치는 영향을 나타내었다. 반응 5일 후 97% 이상의 Cr(VI)이 제거되었으며 20일 경과 후에는 99% 이상이 환원되었다. 특히 영가철, 유기물, 수분함량을 개별적으로 처리하였을 경우에는 MCL(Maximum Concentration Level) 이하로 Cr(VI)의 농도를 저감시킬 수는 없었으나 이들을 동시에 처리하는 경우에는 MCL 이하로 Cr(VI)의 농도를 저감시킬 수 있었다. 또한 세 인자를 복합 처리한 경우에는 반응 5일 후에 초기 농도의 97%가 감소하여 생물학적 처리와 비교하여 매우 빠른 정화속도를 나타내 향후 Cr(VI) 오염토양의 독성을 화학적으로 빠른 시간 내에 감소시킬 수 있는 방법으로 현장적용 시 경제성과 효율성이 매우 높은 처리기술임을 확인 할 수 있었다.

표 1에는 각 처리 별 반응에서 5일 경과 후의 반응비 상수(k_5)를 나타내었다. 영가철, 유기물 및 수분 처리의 반응비 상수는 0.192로 모든 처리 중 반응 초기의 Cr(VI) 환원속도가 가장 빠른 것으로 조사되었으며, 다음으로는 영가철(5%)

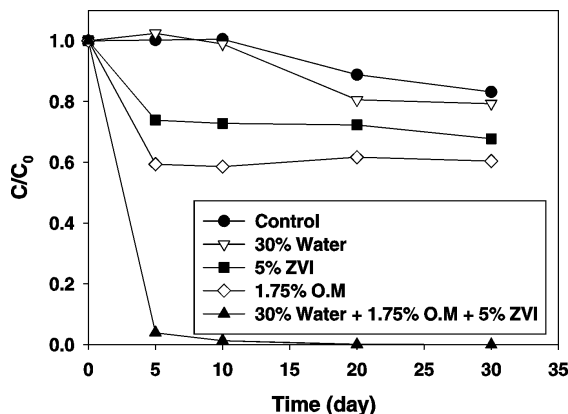


Fig. 6. Effect of combined treatments of organic matter and soil moisture on reduction of Cr(VI) in soils by zerovalent iron.

과 수분함량(30%) 처리가 0.178이었다. 각 인자 별 반응비 상수는 유기물 처리(1.75%)에서 가장 높았으나 영가철 처리(5%)와 조합하였을 경우에는 수분함량 처리(30%)에서 가장 큰 효과를 나타내었다. 즉, 영가철을 현장 적용할 경우 영가철의 처리량 다음으로 고려되어야 할 인자가 토양수분인 것으로 판단되었다. 적절한 수분 공급은 영가철의 이온화를 촉진하고 국부적 환원조건을 조성하여 Cr(VI)의 환원율을 증가시키고 반응속도도 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다⁸⁾. 토양 유기물의 경우 유기물 자체에 의한 Cr(VI)의 제거 효율은 높으나 유기물의 Cr(VI) 제거 기작은 영가철의 이온화 과정에서 발생하는 전자를 통한 Cr(VI)의 환원 기작과는 달리 주로 chelation이나 complexation에 의한 것이기 때문에 토양 유기물은 영가철의 이온화에 있어 촉매제 역할을 하지는 않는 것으로 판단된다. 그러나 토양 유기물의 함량 증가를 통해 Cr(VI)의 제거 효율 향상은 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

요 약

현재 개발되어 사용되고 있는 중금속 오염의 복원기술들은 방법에 따라 상이하기는 하지만 일반적으로 비용이 많이 들고 처리시 이차적인 오염이 발생되거나 시간이 많이 소요되고, 외부 투입 에너지에 크게 의존하므로 실제 현장에 적용하기는 많은 문제점이 있다. 이러한 실정에서 오염물질을 완전히 분해시키거나 더 이상 독성을 야기하지 않고 원래의 물리화학적 특성을 상실한 다른 물질로 변환시킬 수 있는 처리기술의 확보는 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 본 연구에서는 Cr(VI)으로 오염된 토양에서 간단한 산화-환원 반응의 원리를 이용한 영가철 복원방법에 영향을 미치는 다양한 환경요인을 구명하여 향후 현장적용시 기본 자료로 활용하고자 하였다. Cr(VI)으로 오염된 토양에 영가철만을 처리한 결과 반응 30일 후 Cr(VI)의 환원 정도는 영가철의 처리량이 증가할수록 증가하였다. 또한 유기물 함량이 증가할수록 Cr(VI)의 환원정도는 증가하였으며 반응속도 또한 유기물 함량에 따라 증가하였다. 또한 Cr(VI) 농도가 반응 5일 동안 90% 이상 감소하는 것으로부터 유기물에 의한 Cr(VI)의 환원 반응은 초기 반응이 우세함을 알 수 있었다. 수분함량의 경우 수분에 의한 직접적인 효과는 Cr(VI) 감소량 대비 4% 수준

Table 1. Rate constants of Cr(VI) reduction in soils following different treatments at 5th day

Treatment	$k_5(d^{-1})$
5% zerovalent iron	0.052
1.75% organic matter(OM)	0.081
5% zerovalent iron + 1.75% OM	0.103
5% zerovalent iron + 30% water content	0.178
5% zerovalent iron + 1.75% OM + 30% water content	0.192

인 것으로 평가되었다. 유기물 함량이 영가철의 Cr(VI) 환원에 미치는 영향을 조사한 결과 Cr(VI) 농도는 50% 이상 감소하였으나 유기물 함량이 영가철의 이온화나 활동도에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니므로 판단되었다. 특히 수분함량을 15~30%로 처리한 경우 영가철의 Cr(VI) 환원에 있어 반응 30일 후 초기 Cr(VI) 농도의 90% 정도가 제거되었다. 따라서 토양 수분 함량은 영가철의 이온화 및 활동도에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 인자로 판단되었다. 특히 영가철, 유기물, 수분함량을 개별적으로 처리하였을 경우에는 MCL 이하로 Cr(VI)의 농도를 저감시킬 수는 없었으나 이들을 동시에 처리하는 경우에는 MCL 이하로 Cr(VI)의 농도를 저감시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3)에 의해 수행되었습니다. 일부 시료의 기기분석은 강원대학교 농업과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Ok, Y. S., Jung, J., Lee, H., Song, H., Jung, N., Lim, S. and Kim, J. G. (2004) Chemical characterization and bioavailability of cadmium in artificially and naturally contaminated soils. *Agric. Chem. Biotechnol.* 47, 143-146.
- Wittbrodt, P. R. and Palmer, C. D. (1995) Reduction of Cr(VI) in the presence of excess soil fulvic acid. *Environ. Sci. Technol.* 29, 255-263.
- Yang, J. E., Kim, J. S., Ok, Y. S. and Yoo, K. Y. (2007) Mechanistic evidence and efficiency of Cr(VI) reduction in water by different sources of zerovalent irons. *Water Sci. Technol.* 55, 197-202.
- Yang, J. E., Kim, J. S., Ok, Y. S., Kim, S. J. and Yoo, K. Y. (2006) Capacity of Cr(VI) reduction in an aqueous solution using different sources of zerovalent irons. *Korean J. Chem. Eng.* 23, 935-939.
- Yang, J. E., Kim, J. S., Ok, Y. S. and Yoo, K. R. (2005) Reduction efficiency of Cr(VI) in an aqueous solution by different sources of zerovalent irons. *Korean J. Environ. Agric.* 24, 203-209.
- Ok, Y. S., Kim, S. H., Kim, D. Y., Lee, H., Lim, S. and Kim, J. G. (2003) Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated mining area. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36, 323-332.
- Lee, D. C., Park, C. J., Yang, J. E., Jeong, Y. H. and Rhee, H. I. (2000) Screening of hexavalent chromium biosorbent from marine algae. *Appl. Microbial. Biotechnol.* 54, 445-448.
- Lee, D. H., Min, Y. W., Rhee, H. I., Yang, J. E., Chun, G. H. and Jeong, Y. H. (2002) Removal of chromate by white rot fungus, *Inonotus cuticularis*. *J. Microbial. Biotechnol.* 12, 292-295.
- Yoo, K. Y., Ok, Y. S. and Yang, J. E. (2006) Mechanism and adsorption capacity of arsenic in water by zero-valent iron. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39, 157-162.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J. and Jambor, J. L. (1997) In-situ remediation of Cr(VI) contaminated ground water using permeable reactive walls. *Environ. Sci. Technol.* 31, 3348-3357.
- Kimbrough, D. E., Cohen, Y., Winter, A. M., Creelman, L. and Mabuni, C. (1999) A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 29, 1-46.
- Rural Development Administration (RDA) (2000) *Method of soil and plant analysis*. RDA, Suwon, Korea.
- Lee, S. J. (2002) Factors affecting Cr(VI) reduction by zero-valent iron. MS Thesis, Kangwon National University, Chunchon, Korea.
- Yoo, K. Y., Yang, J. E., Ok, Y. S. and Park, C. J. (2006) Nitrate removal in water by different sources of zerovalent irons. *J. Agric. Sci.* 16, 143-149.
- Xu, Y. and Zhao, D. (2007) Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles. *Water Res.* 41, 2101-2108.
- Mayes, M. A., Jardine, P. M., Larsen, I. L., Brooks, S. C. and Fendorf, S. E. (2000) Multispecies transport of metal-EDTA complexes and chromate through undisturbed columns of weathered fractured saprolite. *J. Contam. Hydrol.* 45, 243-265.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. and Maurice, C. (2008) Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - a review. *Waste Manage.* 28, 215-225.
- Comfort, S. D., Shea, P. J., Machacek, T. A., Gaber, H. and Oh, B. T. (2001) Field-scale remediation of metolachlor-contaminated spill site using zerovalent iron. *J. Environ. Qual.* 30, 1636-1643.