

## 우라늄 함량이 높은 국내 토양에 대한 토양학적 특성 규명 및 토양세척법의 적용성 평가

장세은 · 이민희\*

부경대학교 환경해양대학 환경지질학과

## Characterization and Feasibility Study of the Soil Washing Process Applying to the Soil Having High Uranium Concentration in Korea

Seeun Chang · Minhee Lee\*

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

### ABSTRACT

The physicochemical properties of soils having high uranium content, located around Duckpyungrri in Korea, were investigated and the lab scale soil washing experiments to remove uranium from the soil were preformed with several washing solutions and on various washing conditions. SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure), TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), and SEP (Sequential Extraction Procedure) for the soil were conducted and the uranium concentration of the extracted solution in SPLP was higher than Drinking Water Limit of USEPA (30 µg/L), suggesting that the continuous dissolution of uranium from soil by the weak acid rain may generate the environmental pollution around the research area. For the soil washing experiments, the uranium removal efficiency of pH 1 solution for S2 soil was about 80 %, but dramatically decreased as pH of solution was > 2, suggesting that strong acidic solutions are available to remove uranium from the soil. For solutions with 0.1 M of HCl and 0.05 M of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, their removal efficiencies at 1 : 1 of soil vs. washing solution ratio were higher than 70%, but the removal efficiencies of acetic acid, and EDTA were below 30%. At 1 : 3 of soil vs. solution, the uranium removal efficiencies of 0.1 M HCl, 0.05 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and 0.5 M citric acid solution increased to 88%, 100%, and 61% respectively. On appropriate washing conditions for S2 soil such as 1 : 3 ratio for the soil vs. solution ratio, 30 minute for washing time, and 2 times continuous washing, TOC (Total Organic Contents) and CEC (Cation Exchange Capacity) for S2 soil were measured before/after soil washing and their XRD (X-Ray Diffraction) and XRF (X-Ray Fluorescence) results were also compared to investigate the change of soil properties after soil washing. TOC and CEC decreased by 55% and 66%, compared to those initial values of S2 soil, suggesting that the soil reclaimant may need to improve the washed soils for the cultivated plants. Results of XRF and XRD showed that the structural change of soil after soil washing was insignificant and the washed soil will be partially used for the further purpose.

**Key words :** Soil washing, Uranium, Soil contamination, Radioactive contamination, SPLP, TCLP

### 요 약 문

우라늄 함량이 높은 흑색 세일 및 점판암이 주요 기반암인 괴산군 청천면 덕평리 일대 토양의 물리/화학적 특성을 규명하였고, 토양으로부터 우라늄을 제거하기위한 다양한 세척용액 및 세척조건을 적용한 실내 세척 실험을 실시하여, 토양 세척법이 우라늄 함량이 높은 토양으로부터 우라늄을 제거하는데 효과적인 방법임을 입증하였다. 총 8지점 토양 시료의 우라늄 농도를 분석하여 인공강우 용출실험(SPLP), 독성물질 용출실험(TCLP)을 실시한 결과 가장 우라늄함량이 높은 S2 토양의 경우 SPLP 용출 농도가 USEPA 음용수 기준치(30 µg/L)를 초과하여 토양으로부터 주변

\*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2008. 6. 15 심사일 : 2008. 6. 26 게재승인일 : 2008. 10. 21

질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

\* 본 논문은 2008년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

수계로의 지속적인 오염 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 연속추출실험(SEP) 결과 약산 경우에 의해 토양으로부터 우라늄 용출이 발생할 수 있는 것으로 판단되었다. 토양으로부터 우라늄을 제거하기 위하여 다양한 세척액과 세척조건을 적용하여 토양 세척 실험을 실시한 결과, pH 1인 산성용액, 염산 0.1 M 용액, 황산 0.05 M 용액, 구연산 0.5 M 용액을 세척액으로 사용하는 경우 우라늄 제거 효율이 80% 이상이었으며, 아세트산과 EDTA 용액의 경우 30% 이하의 낮은 제거율을 나타내었다. 토양/세척액 비율은 1:3, 세척 시간을 30분, 토양 당 반복 세척 회수를 2회로 설정하여 위의 세척용액들을 이용하는 경우, 실제 우라늄 함량이 매우 높은 S2 토양 주변 현장에서 토양 세척법이 우라늄 제거에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다. 세척 전/후 토양의 총유기탄소함량(TOC), 양이온 교환능력(CEC)을 측정하였고, X-선형광분석(XRF)과 X-선회절분석(XRD)을 실시하여 비교함으로써 세척 후 토양 특성 변화를 규명하였다. 세척 후 토양의 TOC와 CEC가 각각 55%, 66%까지 감소하여 세척한 토양을 작물재배용으로 재사용할 경우 적절한 개량제를 첨가하는 것이 바람직할 것으로 나타났다. 세척 전/후 토양의 XRF 및 XRD 분석 결과, 산세척에 의한 토양의 주요 성분과 광물 구조 변화는 심각하지 않은 것으로 나타나 pH 회복을 위한 추가 물 세척 후 세척 토양을 재활용 할 수 있을 것으로 판단되었다.

**주제어** : 토양세척, 우라늄, 토양오염, 방사능오염, 인공강우 용출실험, 독성물질 용출실험

## 1. 서 론

산업화의 결과로 생성된 우라늄을 포함하는 다량의 방사능 폐기물에 의해 인위적으로 오염된 토양뿐 아니라, 우라늄 함량이 높은 암석의 풍화로부터 형성된 자연 토양도 우라늄을 포함한 유독성 중금속 광물로 이루어져 있는 경우가 많아 인체에 위해하며 장기간에 걸쳐 주변 생물권에 심각한 피해를 줄 수 있는 것으로 보고되고 있다(U et al., 1979; Lenhart et al., 2000; Chau and Chrusciel, 2007; Wei et al., 2007). 특히 흑색 셰일이나 점판암이 부존해 있는 국내외 지역의 암석 및 토양에서 우라늄을 포함한 다량의 방사성 물질들의 함량이 높은 것으로 나타나, 이들 지역을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다(Lee et al., 2005; Galindo et al., 2007). 국내의 경우 지질기원의 우라늄 오염 우려지역으로 남한 면적의 5.5%에 속하는 옥천대(연장 170 km, 폭 20~30 cm, 총 면적 5,100 km<sup>2</sup>)내 흑색셰일(또는 점판암) 분포지의 암석, 토양, 하상퇴적물에 대한 우라늄 함량 연구가 진행되었으며, 그 결과 괴산, 보은지역, 금산지역 등에서 지표방사능과 우라늄 함량이 높은 것이 확인되었다(김중환, 1982; 전효택과 정명채, 1991; 국립환경연구원, 2001). 특히 우라늄을 함유한 국내 대표적 광상들은 충청북도 옥동광상(페그마타이트 광상), 경기도 가평과 충청남도 공주지역 광상(변성 광상), 김화-철원-화천일대 광상(화성광상), 옥천능충군 흑색 셰일(또는 점판암)이 분포하는 광상(퇴적광상)등이며, 광상들의 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 평균품위는 0.03-0.04%에 이르는 것으로 나타났다(김중환, 1982). 국내에서는 원자력발전소 가동에 의한 핵폐기물과 산업 발전에 의한 다양한 방사성폐기물의 오염 가능성이 항상 존재하며, 지질학적 특성상 우라

늄을 함유한 광상이 국내 여러 지역에 걸쳐 나타나고 있음에도 불구하고, 우라늄 함량이 높은 토양에 대한 토양학적, 지질학적 특성 연구나 오염 토양의 위해성에 관한 연구는 거의 이루어진바 없다(Seaman et al., 2001; Choy et al, 2006). 특히, 우라늄 함량이 높은 토양에 대한 복원 및 관리 대책에 대한 연구는 전무하며, 대부분의 국내 방사능 오염 관련 연구는 주로 라돈과 관련된 대기/수질 분야에 한정되어왔다(한정희와 박계현, 1996; 전효택과 제현국, 2004).

본 연구의 목표는 토양 및 암석의 우라늄 함량이 매우 높은 지역인 충북 괴산군 덕평리 일대의 토양을 연구 대상으로 선정하여 토양학적, 지질학적 특성을 규명함으로써 연구 지역 토양의 오염 정도를 평가하고, 연구 지역의 토양을 복원하기 위하여 여러 가지 세척액을 이용한 토양 세척 공법을 적용하는 경우 최대 토양 복원 효율을 나타내는 세척액의 종류 및 세척 공정 조건을 실내 실험을 통하여 규명하는 것이다.

## 2. 실험 방법

본 연구는 크게 방사능핵종의 주요 물질인 우라늄 함량이 높은 연구지역 토양의 오염 특성 및 확산 가능성을 평가하기 위한 다양한 용출 실험과, 우라늄 함량이 높은 토양으로부터 우라늄을 효과적으로 제거하는 토양 세척 실험으로 이루어져 있다.

### 2.1. 연구 지역의 오염 토양 시료 채취

본 연구를 위해 토양 시료들을 채취한 지역은 기존의 연구 결과 우라늄 함량이 높은 흑색 점판암 및 셰일층이

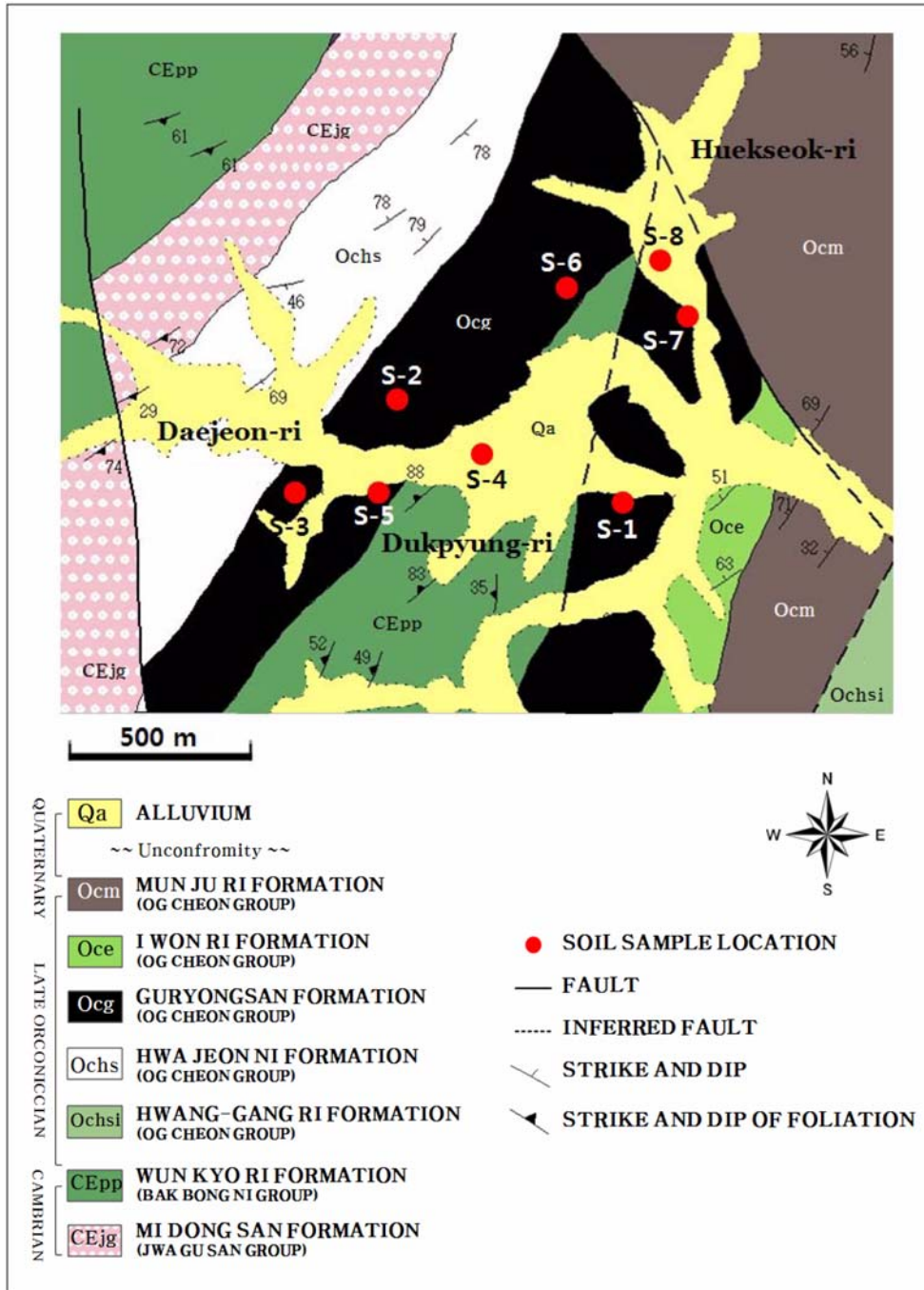


Fig. 1. Geological map and soil sample locations in the study area (Modified from Korea Institute of Geoscience and Mineral resources, 2002).

위치하고 있는 지역으로, 행정구역상 충청북도 괴산군 청천면 덕평리 지역이며 북위 36°40' ~ 36°50', 동경 127°45' ~ 127°55'에 위치하고 있다. 덕평리 지역은 오르도비스기의 이원리층(함력 사질 천매암), 구룡산층(흑색 점판암 또는 셰일) 및 화천리층(결정질 석회암, 석탄질 점판암)이 분포하며, 운교리층(시질 천매암)이 구룡산층을 양분하고 있다(한국지질자원연구원, 2002). 본 연구지역의

지질도는 Fig. 1에 나타내었다. 덕평리 지역 주변 과거 우리나라 노천채굴 광산을 중심으로 우리나라로 오염되어졌다고 판단되어지는 대표적인 8지점(산토양, 논토양, 밭토양, 사면토, 하천퇴적토 등)에서 토양공정시험법에 따라 표토를 채취하였으며(Fig. 1), 채취된 토양시료 자체의 변질을 막기 위해 영하 10°C의 냉동고에 보관하였다. 채취한 토양 시료의 특징을 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Characteristics of soil samples around the research area

Soil sample Number	Sites
S1	A field soil around an abandoned mine
S2	A hillock soil on the outcrop of the rock
S3	A field soil
S4	A farm land soil
S5	A stream sediment
S6	A soil included mine tailing
S7	A stream sediment
S8	A farm land soil

**2.2. 토양의 물리/화학적 특성 규명 실험**

채취한 오염토양의 특성을 규명하기 위하여 체거름법과 피펫분석법을 이용하여 토양 입도 분석을 실시하였으며, 입도분석 결과를 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)의 함량 비로 나타내어 토성(soil texture)을 분류하였다. 토양 시료의 pH는 토양공정시험법에서 제시한 1:5 용출법(건조토양시료와 증류수 1:5 비율)을 이용하여 pH 측정기(Istek 회사제품)로 측정하였다. 토양의 총유기탄소함량(TOC) 측정은 오염 토양시료를 건조, 분말하여 CHN 원소 분석기(Thermo Finnigan Flash EA 1112)로 측정하였으며, 토양 시료의 양이온 교환능력(CEC)은 1 N의 암모늄아세테이트(ammonium acetate)를 이용하여 토양표면의 양이온을 암모늄이온(ammonium ion)으로 치환하여 측정하였다. 토양 시료의 주성분 종류 및 함량은 XRF(X선 형광분석기: SHIMADZU사의 XRF-1700기종)와 XRD(X선회절분석기: PHILIPS사의 X'Pert-MPD System기종)를 사용하여 측정하였다.

채취한 8곳의 토양 시료에 대하여 토양공정시험법에서 제시한 약산추출법(Pb, Cu, Cd, 및 Cr의 용출법)과 ISO에서 제시한 전함량법(용수법: 토양공정시험법의 Zn과 Ni의 용출법)을 이용하여 우라늄 농도를 측정하였다. 약산추출법의 경우 100 mL 삼각플라스크에 10번 체(< 2 mm)로 거른 토양 10 g에 0.1 N HCl 50 mL를 넣은 다음 항온 수평 진탕기(100회 1분, 진폭 10 cm)를 이용하여 30°C에서 30분 진탕하였으며, 항온진탕이 끝난 후 상등액을 거름종이(5B)로 거른 후 걸러진 용액을 ICP-MS(Perkin elmer, Elan 6100)를 이용하여 분석하였다. 전함량법의 경우 100번 체(< 0.5 μm)를 이용하여 걸러진 토양 시료 3 g을 정확히 취하여 250 mL 반응용기에 넣고 약 0.5 - 1 mL의 물로 적신 후 염산 21 mL와 질산 7 mL를 첨가하여 혼합하였다. 반응용기를 환류냉각기에 연결하여 2시간 정치 후 온도를 올려 환류조건에 도달하도록 한 다

음 2시간 동안 추출하였다. 추출 후 반응용기를 냉각시키고 여지(Whatman No. 40)로 여과시킨 용액을 ICP-MS로 분석하였다.

**2.3. 우라늄 용출 실험**

자연계에 존재하는 우라늄 방사성 동위원소에는 <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>234</sup>U 세 종류가 있으며, 이들 동위원소 중 <sup>238</sup>U은 전체 동위원소의 약 99%를 차지하고 반감기가 약 45억 년인 대표적인 우라늄 원소이다. <sup>238</sup>U은 U<sup>3+</sup>, U<sup>4+</sup>, UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> 및 UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>의 4종류 산화형태로 존재하는데 이 중에서 +3가와 +5가는 불안정한 형이며, 자연계에서는 일반적으로 대부분 +6가의 형태인 우라닐이온(UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>)으로 산소와 수반되어 존재한다(Schulz, 1965; Nishita et al., 1978). 우라늄은 자연 상태에서 매우 안정적이어서 일반적인 지표 환경에서 대부분이 고상으로 존재하는 것으로 나타나 우라늄 함량이 높은 토양이라 할 지라도 주변 수계로의 우라늄 용출이 적을 것으로 인식되어왔다(Shanbhag and Choppin, 1981; Abdelouas et al., 1998). 그러나 최근에는 토양 내 우라늄이 강우나 지하수의 중탄산이온이나 탄산이온과 결합하는 경우, 또는 토양 유기물인 휴믹산과 결합하는 경우, 수용성의 킬레이트화합물로 변하게 되어 지표수나 지하수에 용해되어 이동할 수 있는 것으로 밝혀지고 있다(Raskin and Ensley, 2000). 본 연구는 우라늄 함량이 높은 국내 토양으로부터의 우라늄 용출능을 규명함으로써 주변 수계로의 우라늄 용출량을 예측하여 위해성 및 오염 확산 가능성을 평가하고자 하였다. 8개의 토양 시료 중 우라늄 함량이 높은 2개의 토양 시료(S2와 S6)를 대상으로 인공강우 용출실험(SPLP: Synthetic Precipitation Leaching Procedure)과 독성물질 용출실험(TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure)을 실시하여 실제 주변 수계로의 우라늄 용출량을 측정하였으며, Tessier et al.(1979)이 제안한 연속추출법(SEP: sequential extraction procedure)을 기초로 하여 새롭게 수정/보안된 Li et al.(1994)의 연속추출법을 실시하여 토양 내 우라늄의 존재형태를 규명함으로써 우라늄 함량이 높은 토양으로부터의 용출에 의한 오염 확산 가능성 및 토양 내 우라늄의 안정성을 평가하였다.

**2.3.1. 인공강우 용출실험(SPLP)과 독성물질 용출실험(TCLP)**

SPLP과 TCLP는 폐기물 및 토양의 강우 및 지표수에 의한 중금속 용출량을 규명하기 위해 실시되는 대표적인 용출 시험이다(USEPA, 1994). 본 실험에서는 SPLP의 경

우 오염토양과 용출액(extraction fluid) 비는 1 : 20(W/V)의 비율(오염 토양시료 5 g vs. 용출액 100 mL)로 하여 250 mL 반응용기에 담았고, 사용되는 용출액은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/HNO<sub>3</sub> (60 : 40 weight percent) 용액을 100 mL 제조하여 pH를 5.00 ± 0.05로 조절한 후 사용하였다. 반응용기를 회전속도가 30 rpm 인 회전장치에 장착한 후 20시간 동안 용출시켰다. 용출 종료 후 0.45 μm glass fiber filter를 이용하여 액상과 고상을 분리하고, 분리된 액상시료를 ICP-MS를 이용하여 우라늄 농도를 분석한 후 우라늄 수질 기준치(USEPA 음용수 기준치 30 μg/L)와 비교하였다. TCLP는 국내 폐기물 공정시험법에 따라 토양시료 무게의 20배에 달하는 추출액(초산을 이용하여 pH 2.88로 적정한 수용액)을 각각 기한 후 Hag rotator 를 사용하여 30 ± 2 rpm의 교반속도에서 약 18시간 동안 용출하였다. 용출실험 후의 용액을 Whatman No. 41 여과지로 여과한 후 우라늄 농도를 ICP-MS를 이용해 분석하였다.

### 2.3.2. 연속추출(sequential extraction) 실험

연속추출법(sequential extraction procedure)은 5가지의 연속 추출액을 단계별로 이용하여 각 단계별 추출액의 우라늄 량을 측정함으로써 토양 내 미량원소들의 존재 형태를 크게 5단계로 분리하는 정량적인 방법으로, 토양 및 퇴적물 내 중금속 오염의 장기적인 환경적 영향을 평가하거나 오염복구의 개발 및 적용에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있다. 토양 내 미량원소의 존재형태를 크게 (1) Exchangeable fraction(교환성 형태), (2) Bound to carbonate or specially adsorbed fraction(탄산염결합 형태), (3) Bound to Fe and Mn oxides fraction(환원성 철/망간 산화물 형태), (4) Bound to organic and sulfides fraction(산화성 유기물/황화물 형태), (5) Residual fraction(광물격자 내 잔류상 형태)인 5단계(5 step)로 구분하고, 각 단계별 추출액의 미량원소 용출량을 전체 미량원소 함량과 비교하여 5종류의 존재 형태로 존재하는 질량비를 계산한다. 단계별 추출액은 MgCl<sub>2</sub> 0.5 M(pH = 7), NaOAc 1 M(pH = 5), NH<sub>2</sub>OH·HCl 0.04 M(in 25% HOAc), 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (pH = 2), NH<sub>4</sub>OAc 3.2 M(in HNO<sub>3</sub> 20%)을 사용하였다(정명채, 1994).

### 2.4. 토양세척 실험

토양의 우라늄 함량 분석 및 용출실험결과 주변 수계로의 오염 확산 가능성이 가장 높다고 판단되어진 S2 토양을 대상으로 우라늄 제거를 위한 토양세척법을 적용하였다. 토양세척공법의 적용타당성과 최적의 세척조건을 도

출하기 위하여 다양한 조건에서 세척실험을 실시하였으며, 주요 실험 내용은 아래와 같다.

#### 2.4.1. 세척시간 및 세척액의 pH 변화에 따른 세척 효율 규명 실험

세척시간 및 세척액의 pH 변화에 따른 우라늄 제거 효율 규명을 위한 배치 실험을 실시하였다. 토양으로부터의 중금속 용출은 세척액의 pH 변화에 매우 민감한 것으로 보고되고 있으므로(김정대와 남궁완, 2005; Lee et al., 2007; Dermont et al., 2008), 세척수의 pH 를 강산성에서 강염기까지(pH 1~12) HCl 과 NaOH 용액으로 조정하여 세척실험을 실시하였다. 적절한 세척시간을 결정하는 것은 실제 대량의 오염 토양을 복원하는 과정에서 비용과 시간을 절약하는데 매우 중요하므로 S2 토양을 세척하는데 가장 적절한 최소 시간을 결정하기위한 실험도 실시하였다. 토양 S2와 pH 별 세척액의 비율은 1 : 1 (50 g : 50 mL)로 유지하였으며, 세척시간을 30분, 1시간, 2시간으로 설정하여 100 rpm으로 항온(30°C)에서 세척 후, 세척액을 분리하여 5B 필터지로 거른 후 ICP-MS 를 이용하여 우라늄 농도를 분석하여 토양으로부터 우라늄 제거량을 계산함으로써 최적의 세척액 pH와 세척시간을 도출하였다.

#### 2.4.2. 세척액의 종류, 농도 및 세척비율 변화에 따른 세척 효율 규명 실험

토양세척법은 주 세척액으로 물, 산/염기용액, 계면활성제용액 등을 이용하고 있으나, 오염물질의 종류와 농도, 토양 특성에 따라 제거 효율은 매우 다양하게 나타나기 때문에, 대상 토양에 대하여 가장 제거 효율이 높은 세척조건들을 적용하여야 한다(USEPA, 1996; Mann, 1999; Moutsatsou et al., 2006). 기존의 연구결과, 중금속의 경우 구연산(citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), 아세트산(CH<sub>3</sub>COOH), 염산(HCl), 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 등을 이용한 산 용액, 수산화나트륨(NaOH)을 첨가한 염기 용액, EDTA(C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)를 포함하는 계면활성제 용액들의 토양세척 효과가 뛰어난 것으로 나타나(Kantar and Honeyman, 2006; Jang et al., 2007; Lee et al., 2007), 본 실험에서는 염산, 황산, 구연산, 아세트산, EDTA용액을 세척액으로 사용하였다. 세척액 종류마다 각각 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 0.5 등의 4 가지 농도로 적정하여 세척액으로 사용하였으며, 토양과 세척액의 비율을 1 : 1, 1 : 3, 1 : 5(토양 20 g 사용)로 달리 하여 세척실험을 반복하였다. 최적의 세척시간을 도출하는 실험결과로부터 얻어낸 30분을 세척시간으로 결정하였다.

2.4.3. 연속 세척에 의한 세척 효율 규명 및 토양 특성 변화 실험

토양으로부터 우라늄 제거 효과를 높이고, 세척액을 재활용함으로써 비용을 절감할 수 있기 때문에, 현장에서 대부분의 토양세척 공정은 오염 토양을 반복 세척하는 과정을 포함하게 되나, 이러한 반복 세척에 의해서 토양으로부터의 우라늄이 약산추출법에 의해 용출되는 양보다 많이 추출됨으로써 초과 비용 및 부차적인 환경문제를 발생시킬 수 있다. 토양으로부터 중금속을 제거하기 위한 공정 중에서 토양세척법은 제거 효율이 다른 공정보다 비교적 높은 것으로 알려져 있으나, 강산이나 강염기 용액을 이용하여 세척하기 때문에 세척 후 토양의 물리/화학/생물학적 특성 변화에 대한 우려가 제기되어왔으며, 특히 세척 후 토양의 재활용을 고려하는 경우 심각한 토양 특성 변화에 의해 토양세척공정 적용이 제한될 수 있다(Dermont et al., 2008). 따라서 본 실험에서는 토양 세척횟수에 따른 우라늄 제거율 변화를 규명하여 오염토양에 대한 최적의 토양 세척 횟수를 도출할 뿐 아니라, 세척 전과 후의 토양의 특성 변화를 비교하여 토양세척 후 토양의 재활용이 가능한지를 평가하였다. S2 토양 50 g에 대해서 세척 횟수에 따른 우라늄 제거효율을 도출하기 위하여 오염토양과 세척액의 비를 1 : 1로 고정하여 다섯 번에 걸친 연속 세척실험을 실시하였다. 우라늄 제거 효율이 높았던 pH 1 용액을 이용하여 세척실험을 반복하여 세척 횟수별 우라늄 제거 효율을 계산하여 최적의 세척 횟수를 결정하였다. S2 토양을 pH 1 용액으로 세척 후 세척이 끝난 잔류 토양을 건조하여 pH 1 용액으로 세척 실험을 반복하였으며, 2회 연속 세척 실험이 끝나고 남은 잔류토양에 대하여 TOC(total organic carbon), CEC(cation exchange capacity, XRF(x-ray fluorescence), XRD(x-ray diffraction) 분석을 실시하여 세척 전 토양과 세척 후 토양의 물리/화학/생물학적 특성을 비교하여 세척 후 토양의 특성 변화를 규명함으로써 세척 후 토양의 재활용 가능성을 평가하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서 수행한 각각의 실험결과는 다음과 같다.

3.1. 토양의 물리/화학/생물학적 특성 규명 실험 결과

우라늄 함량이 높다고 판단된 연구 지역 내 8곳의 토양 시료들의 우라늄 농도 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 약산추출결과 우라늄 농도는 S2(산사면 토양)에서 약 35.8 mg/kg으로 가장 높게 나타났고, S6 지점의 토양은 약

Table 2. Uranium concentration of soil samples

Soil sample number	From the weak acid extraction (mg/kg)	From the aqua regia extraction (mg/kg)
S1	0.018	0.425
S2	35.824	157.560
S3	0.012	0.300
S4	0.069	0.311
S5	0.030	0.210
S6	1.327	23.147
S7	0.018	0.320
S8	0.028	0.243

Table 3. Properties of S2 and S6 soils for the experiments

	S2 soil	S6 soil
Soil texture	Loamy Sand	Sand
pH	4.21	3.31
TOC (%)	13.34	17.49
CEC (cmol/g)	6.26	7.14

1.3 mg/kg으로 측정되었으며, 나머지 6개 토양 시료는 0.1 mg/kg 이하의 낮은 우라늄 함량을 나타내었다. 강산추출 결과 S2 토양과 S6 토양의 우라늄 농도가 각각 157.6 mg/kg, 23.1 mg/kg으로 높게 나타났으며, 대상 토양 시료의 전체적인 농도 분포는 약산추출 결과와 비슷한 양상을 나타내었다. 토양으로부터 우라늄을 제거하기 위한 본 토양세척 실험에서는 우라늄 함량이 가장 높은 S2 토양만을 사용하였다.

우라늄 함량이 높은 S2와 S6 토양의 물리/화학/생물학적 분석 결과들을 종합하여 Table 3에 나타내었다. 토양의 입도분석 결과, S2 토양과 S6 토양은 미국농무성에서 제시한 토성 분류(soil textural triangle) 범위 중 각각 'Loamy sand'와 'Sand'에 속하는 것으로 나타나, 두 시료의 입자 대부분이 토양세척의 적정범위인 모래 크기(0.25-2 mm)에 포함되기 때문에 우라늄 제거를 위해 토양세척법을 적용하기에 적절한 것으로 판단되었다. 토양의 수소 이온 농도 (pH) 측정결과, S2 토양은 약 pH 4로 나타났으며 S6 토양은 약 pH 3으로 나타나 두 토양 모두 pH 5 이하인 산성토양이었다. 총유기탄소 함량(TOC)을 측정한 결과, S2 토양과 S6 토양은 각각 13%와 17%로 나타났으며, 토양의 양이온 교환능력(CEC)을 측정한 결과 S2 토양은 6 cmol/kg으로, S6 토양은 7 cmol/kg으로 나타났다. 오염토양의 주성분 종류와 함량을 파악하기 위해 실시한 XRF(x-선 형광분석) 결과를 Table 4에 나타내었다. S2와 S6 토양 모두 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O 등의

성분으로 이루어져있으나, 특이하게도 바륨(BaO)과 바나듐(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 성분이 높은 수치를 나타내어 SiO<sub>2</sub>의 함량이 약 65% 이상임에도 불구하고 바륨(Bi)과 바나듐(V)등의 원소가 지질학적인 요인으로 첨가되면서 유기물과 함께 흑갈색을 띠는 토양으로 형성되었다.

**Table 4.** Results of XRF analysis for S2 and S6 soil

Component	Mass ratio (wt.%)	
	S2 soil	S3 soil
SiO <sub>2</sub>	67.72	69.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.37	10.70
BaO	5.97	1.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.10	8.71
K <sub>2</sub> O	2.30	3.25
SO <sub>3</sub>	1.47	1.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.27	0.89
MgO	0.92	1.93
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.76	1.61
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.68
Na <sub>2</sub> O	0.17	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	-
CaO	0.06	0.51
CuO	0.04	-
ZnO	0.03	0.06
MoO <sub>3</sub>	-	0.04

'-' represents < 0.01%.

**Table 5.** Uranium concentrations of extracted solutions for S2 and S6 soil in SPLP and TCLP

Soil	From SPLP (µg/L)	From TCLP (µg/L)
S2	56.821	153.951
S6	1.839	3.973

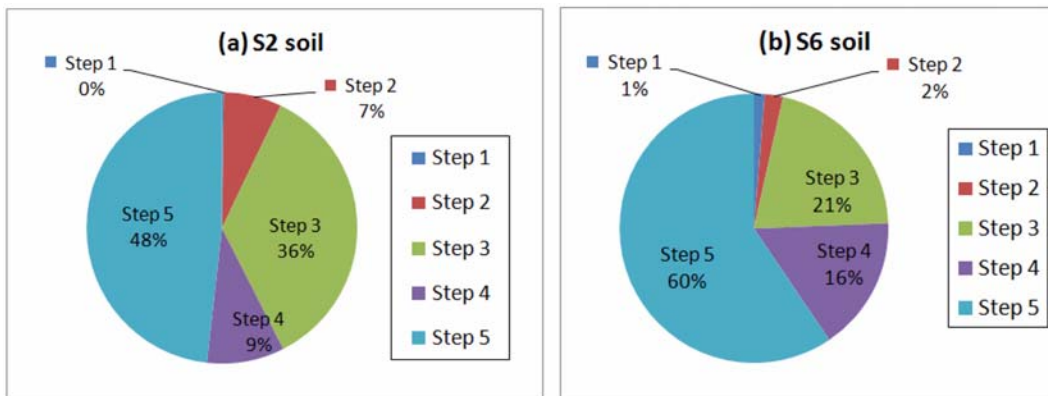
**3.2. 우라늄 용출 실험 결과**

**3.2.1. 인공강우 용출실험(SPLP)과 독성물질 용출실험(TCLP) 결과**

우라늄 함량이 높은 S2와 S6 토양에 대하여 실시한 인공강우 용출실험 및 독성물질 용출실험 결과를 Table 5에 나타내었다. 인공강우 용출실험 결과 S2 토양의 우라늄 용출 농도가 56.8 µg/L로 나타나, 주변 지역이 우라늄 함량이 4 µg/L를 훨씬 초과하는 우라늄 이상치(anomalous value) 지역일 뿐 아니라, USEPA 음용수 기준인 30 µg/L 이상이므로 토양으로부터 강수에 의한 지속적인 지표수(지하수) 오염 가능성이 있다고 판단되었다(USEPA, 1993). S6 토양의 우라늄 용출 농도는 1.8 µg/L를 나타내어 강수에 의한 오염 가능성은 적을 것으로 판단되었다. 독성물질 용출실험 결과 S2 토양은 약 154.0 µg/L의 우라늄 용출 농도를 나타내며, S6 토양은 4.0 µg/L의 용출량을 보였다. 독성물질 용출실험에 대한 국내 우라늄 기준치는 현재 설정되지 않은 상태이므로 오염 여부를 판단하기 어려우나, S2 토양의 경우 상당한 양의 우라늄 용출이 발생할 수 있을 것으로 판단되었다.

**3.2.2. 연속추출(sequential extraction) 실험 결과**

S2와 S6 토양에 대한 연속추출실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. S2와 S6 토양에 존재하는 우라늄은 각각 48%와 60% 정도가 Residual fraction(광물격자 내 잔류상 형태; 5단계) 형태로 존재하고 있어서, 토양 내 절반 이상의 우라늄이 안정된 형태로 광물 격자 내에 존재하는 것으로 나타났으나, 약산성인 강수에 의해 토양으로부터 탈착될 가능성이 있는 1-3 단계 형태로 존재하는 우라늄의 비율도 S2와 S6의 경우 43%와 24%로 나타나 토양으로부터 상당량의 우라늄 용출 가능성이 있을 것으로 판단되었다. 강산추출법으로 분석한 S2와 S6 토양의 초기



**Fig. 2.** Results of sequential extraction procedure (SEP) for S2 and S6 soil.

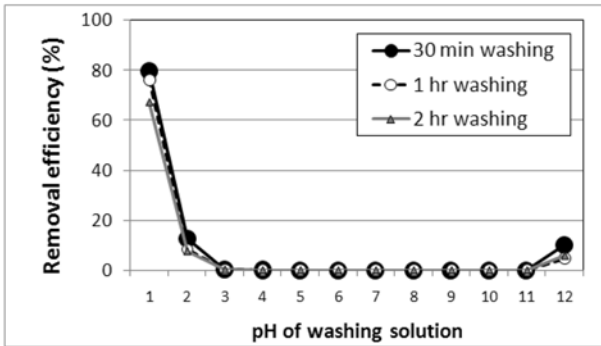


Fig. 3. Uranium removal efficiencies for different pH washing solution in different washing time.

우라늄 농도(S2 토양: 157.560 mg/kg, S6 토양: 23.147 mg/kg)와 비교해 연속추출과정에서의 총 우라늄 회수율은 각각 99.6%와 85.0%를 나타내었다.

### 3.3. 토양세척 실험 결과

#### 3.3.1. 세척시간 및 세척액의 pH 변화에 따른 세척 효율 규명 실험 결과

세척시간에 따른 세척 효율 변화를 규명하기 위한 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 세척액의 pH 를 1-12까지 다양하게 사용하여 세척실험을 실시한 결과 세척시간 30분, 1시간, 2시간의 세척 효율 변화는 거의 없는 것으로 나타나 S2 토양으로부터 우라늄을 제거하는데 필요한 세척시간은 약 30분으로 나타났으며, 이 후의 세척실험에서는 세척시간을 30분으로 고정하여 실험을 실시하였다. pH 변화에 의한 우라늄 세척 효율 결과를 약산추출법과 전함량법에 의해 분석한 S2 토양의 초기 우라늄 함량과 비교하여 Table 6에 나타내었다. 토양 세척액의 pH가 1일 때 우라늄 제거율이 79.6%(약산추출법에 의한 S2 토양의 초기 우라늄 농도와 비교한 경우)로 매우 높게 나타났으나, pH 2에서는 12.7%로 급격히 감소하여 pH 11까지 매우 낮은 제거 효율을 나타내다가 강염기 용액인 pH 12에서 10.1%로 약간 증가하였다. 이러한 실험결과로부터 pH 1 이하의 강산 용액이 S2 토양으로부터 우라늄을 제거하기 위해 적절한 세척액으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 3.3.2. 세척액의 종류, 농도 및 세척비율 변화에 따른 세척 효율 규명 실험 결과

본 연구에서 선정된 다섯 가지 세척액(염산, 황산, 구연산, 아세트산, EDTA)에 탈이온수를 혼합하여 각각 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 N의 농도로 조정하였고 토양과 세척액의 비율은 각각 1:1, 1:3, 1:5로 고정하여 세척실험을 실

Table 6. Results of soil washing for S2 soil in the different pH condition

pH	Washing time	Uranium removal efficiency	Uranium removal efficiency
		(%, compared to the initial amount from the weak acid extraction)	(%, compared to the initial amount from the aqua regia extraction)
1	30 min	79.60	18.10
2		12.67	2.88
3		0.27	0.06
4		0.20	0.05
5		0.01	0.00
6		0.02	0.00
7		0.00	0.00
8		0.00	0.00
9		0.00	0.00
10		0.00	0.00
11		0.00	0.00
12		10.12	2.30

시하였으며, 세척액의 제거 효율을 약산추출법에 의해 결정된 S2 토양의 우라늄 농도와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 염산을 세척액으로 사용한 경우, 0.01 M 용액을 사용해 1:1로 세척하는 경우 5%의 우라늄 제거효율을 보였으며, 염산 농도가 증가함에 따라 제거효율이 증가하여, 0.1 M 용액에서는 80%의 제거 효율을 나타내었다 (Fig. 4a). 같은 농도로 비교할 때, 황산 용액의 세척 효과가 염산 용액보다 높은 것으로 나타나, 황산 0.01 M과 0.05 M 세척액을 사용한 경우 8%와 71% 제거 효율을 보였고, 0.05 M 농도에서는 94% 제거 효율을 나타내었다 (Fig. 4b). 구연산의 경우 0.05 M 농도에서 7% 제거효율을 나타내었으며 구연산 농도 증가에 따라 제거 효율이 증가하나 0.5 M 농도에서 최대 33%의 비교적 낮은 제거 효율을 나타내었다(Fig. 4c). 아세트산의 경우 구연산보다 제거 효율이 낮게 나타나, 0.05 M 용액의 경우 2%, 0.5 M 용액의 경우 약 9%의 제거 효율을 나타내었다(Fig. 4d). EDTA 용액의 경우 우라늄 제거량이 매우 낮게 나타나 0.5 M 농도에서도 2% 이하의 낮은 우라늄 제거 효율을 나타내었다(Fig. 4e). 세척 실험 결과 S2 토양으로부터 우라늄을 제거하는데 황산, 염산, 아세트산, 구연산 용액 순으로 세척 효율이 높게 나타났으며, EDTA 용액은 제거 효율이 매우 낮았다. 다섯 종류의 세척액 모두에서 토양과 세척액의 비율이 증가할수록 제거 효율이 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 4). 토양 : 세척액 비율의 경우 1:1과 1:3으로 세척한 우라늄 제거 효율 차이는 크게 나타났으나, 1:3과 1:5 비율의 제거 효율 차이는 매우



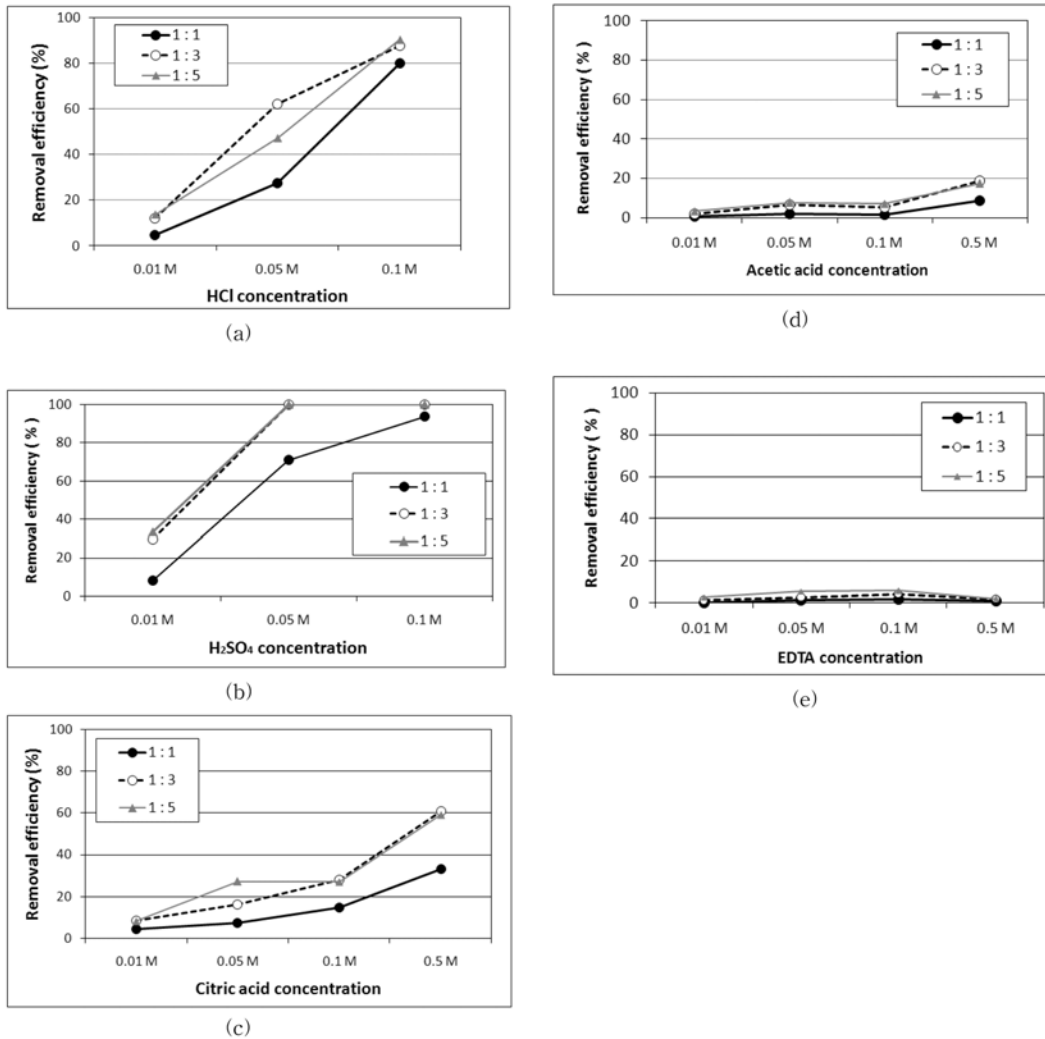


Fig. 4. Results of S2 soil washing with different washing solution (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, citric acid, acetic acid, and EDTA solution) at various soil vs. solution ratio (1 : 1, 1 : 3, and 1 : 5).

Table 7. Results of removal efficiency in different washing times for S2 soil

Washing solution	Removal efficiency (%)				
	1st washing	2nd washing	3rd washing	4th washing	5th washing
pH 1	69.60	33.28	17.67	11.75	6.56

미비한 것으로 나타나, 현장에서 토양과 세척액의 비율을 약 1 : 3으로 조정하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

3.3.3. 연속 세척에 의한 세척 효율 규명 및 토양 특성 변화 실험 결과

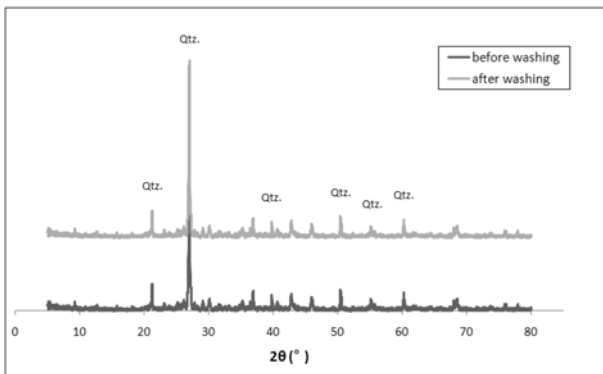
연속 세척에 의한 제거율 변화 실험 결과를 Table 7에 나타내었다. 세척 회 수가 증가함에 따라 우라늄의 용출량이 줄어들어 세척 효율은 로그함수 형태로 감소한 경향

을 나타내었다. 2회 세척 시 효율은 1회 세척 효율의 절반 이하로 급격히 감소하였으며, 4회 이후부터는 약 10% 내외의 낮은 세척 효율을 나타내었다. 세척회수가 증가함에 따라 세척 효율을 누적하여 계산하면, 제거효율은 2회 세척 후 부터 약산추출법에 의해 결정된 S2 토양의 우라늄 함량을 초과하여(회수율 100% 이상) 3회 이상의 세척 시 토양 내 안정하게 존재하는 우라늄 성분까지 용출되는 것으로 나타나, 세척 효율과 세척량을 고려한다면 S2 토

**Table 8.** Results of S2 soil property change after 2 times washing with pH 1 solution

		Before washing	After washing
TOC ( % )		13.34	7.35
CEC (cmol/g)		6.26	4.15
XRF mass ratio ( % )	SiO <sub>2</sub>	67.72	70.41
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.37	11.53
	BaO	5.97	6.68
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.10	3.53
	K <sub>2</sub> O	2.30	2.15
	SO <sub>3</sub>	1.47	2.13
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.27	1.06
	MgO	0.92	0.80
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.76	0.73
	TiO <sub>2</sub>	0.72	0.73
	Na <sub>2</sub> O	0.17	-
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	-
	CaO	0.06	-
	CuO	0.04	0.04
	ZnO	0.03	-
	Cl	-	0.19
SrO	-	0.03	

‘-’ represents < 0.01%.



**Fig. 5.** Comparison of XRD peaks for S2 soil before/after two times soil washing.

양의 세척 회 수는 2회가 적절한 것으로 판단되었다.

pH 1 용액으로 2회 연속 세척한 S2 잔류토양의 TOC (총유기탄소 함량)와 CEC(양이온 교환 능력)를 측정하였고, XRF 와 XRD 분석을 실시한 후 세척 전 결과들과 비교하여 Table 8과 Fig. 5에 나타내었다. TOC 는 세척 전 토양보다 2회 세척 후 55%까지 감소하였으며 CEC 는 세척 후 66%까지 감소한 것으로 나타나(Table 8), 세척 후 S2 토양을 작물재배를 위해 재활용하는 경우 TOC 와 CEC 를 높일 수 있는 추가적인 토양 개량이 필요할

것으로 판단되었다. 2회 세척 후 잔류 토양의 XRF 분석 결과 SiO<sub>2</sub> 함량이 70.4%로 약간 증가하였으며 Ca, Na 와 함께 중금속인 Al, Fe, Cr, Zn 이 감소하여 우리늄이 외 다른 이온들이 세척에 의해 제거됨을 알 수 있었으나 제거량은 소량이었다(Table 8). 세척 전 후 토양의 XRD 분석 결과 거의 차이가 없어서(Fig. 5), 산 용액을 이용한 토양 세척 후 토양 내 주요 광물의 구조적 변화는 매우 미비할 것으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

본 실내 실험을 통하여 도출된 결론은 아래와 같다.

(1) 과거 우리늄 노천 채굴 광산 주변 연구 대상 지역의 토양을 채취하여 우리늄을 분석한 결과 토양의 우리늄 농도는 약산추출법의 경우 최대 35.8 mg/kg, 강산추출법은 157.6 mg/kg 으로 나타나 우리늄함량이 높은 것으로 나타났으며, 인공강우 용출실험 결과 우리늄 용출 농도가 56.8 µg/L로 USEPA 음용수 기준치인 30 µg/L 이상으로 나타나 지속적인 수계로의 오염 가능성이 있는 것으로 나타났다.

(2) 우리늄 함량이 높은 S2 토양 내 존재하는 우리늄의 존재 형태를 알아보기 위하여 연속추출실험을 실시하였으며, 그 결과 절반 정도가 안정된 광물격자 내에 존재하였으나, 산성 강우에 의해 용출이 일어날 수 있는 1-3단계 형태로도 약 40% 이상이 존재하는 것으로 나타나 강우에 의한 주변으로의 우리늄 용출 가능성이 있는 것으로 판단 되었다.

(3) 토양세척 실험결과 강산인 pH 1 용액에서만 우리늄 제거율이 80%를 나타내었으며, pH 2 이상의 용액에서는 우리늄 제거율이 급격히 감소하여 우리늄 제거 효과가 매우 낮았다. 토양 : 세척액 비가 증가할수록 세척 효율이 증가함을 확인하였고, 적절한 세척비는 약 1 : 3인 것으로 나타났다. 다양한 세척액을 사용하여 세척 실험을 실시한 결과 토양 : 세척액 비가 1 : 1인 경우 우리늄 제거에 효과적인 세척액의 농도는 염산 0.1 M, 황산 0.05 M, 구연산 0.5 M 임을 알 수 있었으며, 아세트산과 EDTA 용액은 제거효율이 30% 이하를 나타내어 토양 세척 효과가 낮았다.

(4) 연속세척실험결과 S2 토양의 세척 회 수는 제거효율과 세척량을 고려하면 2회 세척이 가장 적절한 것으로 나타났으며, 세척 후 토양의 TOC와 CEC가 각각 55%, 66%까지 감소하여 세척한 토양을 작물재배용으로 사용할 경우 적절한 개량제를 첨가하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. XRD 분석 결과 산세척에 의한 토양의 주요

성분과 광물 구조 변화는 심각하지 않은 것으로 나타나 pH 회복을 위한 추가 물 세척 후 재활용 할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 사 사

이 논문은 2007년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2007-036). 논문을 세심하게 검토하여 주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 국립환경연구원, 2001, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구, 최종 보고서.
- 김정대, 남궁완, 2005, 토양세척용매의 종류 및 농도에 따른 폐금속광산 폐기물 내 중금속의 추출특성, 대한자원공학회, 787-798.
- 김종환, 1982, 한국의 지질과 광물자원, 제 15장 우라늄, 연세대 김옥준교수 정년퇴임기념 논문집, 454-458.
- 전효택, 정명채, 1991, 함우라늄 흑색셰일 분포지역에서의 유독성원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구, 대한광산학회, 24(3), 245-260.
- 전효택, 제현국, 2004, 중부 옥천대에서 지질방사능 위해성평가를 위한 광역적 라돈농도 조사, 추계학술발표회 논문집, 한국지구시스템학회, p. 3-6.
- 정명채, 1994, 토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구, 자원환경지질, 27(5), 469-477.
- 한국지질자원연구원, 2002, 지질정보검색시스템, 과산 1:50,000 지질도 검색 <<http://geoinfo.kigam.re.kr/kigam/gsearch1.htm>>.
- 한정희, 박계현, 1996, 대전 지역 지하수에 함유된 우라늄 및 라돈의 함량, 자원환경지질, 29, 589-595.
- Abdelouas, A., Lutze, W., and Nuttall, E., 1998, Chemical reactions of uranium in ground water at a mill tailings site, *J. Contamin. Hydrol.*, 34, 343-361.
- Chau, N.D. and Chrusciel, E., 2007, Leaching of technologically enhanced naturally occurring radioactive materials, *Radiation and Isotopes*, 65, 968-974.
- Choy, C.C., Korfiatis, G.P., and Meng, X., 2006, Removal of depleted uranium from contaminated soils, *J. Hazard. Mater.*, 136, 53-60.
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Lafleche, M.R., 2008, Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications, *J. Hazard. Mater.*, 152, 1-31.
- Galindo, C., Mougin, L., Fakhi, S., Nourreddine, A., Lamghari, A., and Hannache, H., 2007, Distribution of naturally occurring radionuclides (U,Th) in Timahdit black shale (Morocco), *J. Environ. Radio.*, 92, 41-54.
- Jang, M., Hwang, J.S., and Choi, S.I., 2007, Sequential soil washing techniques using hydrochloric acid and sodium hydroxide for remediating arsenic-contaminated soils in abandoned iron-ore mines, *Chemosphere*, 66, 8-17.
- Kantar, C. and Honeyman, B.D., 2006, Citric acid enhanced remediation of soils contaminated with uranium by soil flushing and soil washing, *J. Environ. Eng.*, 132(2), 247-255.
- Lee, J.U., Kim, S.M., Kim, K.W., and Kim, I.S., 2005, Microbial removal of uranium in uranium-bearing black shale, *Chemosphere*, 59, 147-154.
- Lee, M., Paik, I.S., Do, W., Kim, I., and Lee, S., 2007, Soil washing of As-contaminated stream sediments in the vicinity of an abandoned mine in Korea, *Environmental Geochemistry and Health*, 29, 319-329.
- Lenhart, J.J., Cabaniss, S.E., Maccarthy, P., and Honeyman, B.D., 2000, Uranium(VI) complexation with citric, humic and fulvic acids, *Radiochim. Acta*, 88, 345-353.
- Li, X., Coles, B.G., Ramsey, M.H., and Thornton, I., 1994, Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES, *Chem. Geol.* 124(1-2), 109-123.
- Mann, M.J., 1999, Full-scale and pilot-scale soil washing, *J. Hazard. Mater.*, 66, 119-136.
- Nishita, H., Wallace, A., and Romney, E. M., 1978, Radionuclide uptake by plants, *U.S. Nuclear Regulatory Commission*, NUREG/CR0336, UCLA 12-1158.
- Moutsatsou, A., Gregou, M., Matsas, D., and Protonotarios, V., 2006, Washing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities, *Chemosphere*, 63, 1632-1640.
- Raskin, I. and Ensley, B.D., 2000, *Phytoremediation of Toxic Metals*, John Willey & Sons, Inc.
- Schulz, R.K., 1965, Soil chemistry of radionuclides. *Health Phys.* 11, 1317-1324.
- Seaman, J.C., Meehan, T., and Bertsch, P.M., 2001, Immobilization of cesium-137 and uranium in contaminated sediments using soil amendments, *J. Environ. Qual.*, 30, 1206-1213.
- Shanbhag, P.M. and Choppin, G.R., 1981, Binding of Uranyl by humic acid. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 43, 3368-3372.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem.*, 51, 844-851.
- U, A.K., Song, K.J., and Kim, T.S., 1979, Uranium levels in soil and plant, and estimation of its intake by the residents at the uranium deposited area, *J. Kor. Agricul. Chem. Soc.*, 22(4).
- USEPA, 1993, Integrated Risk Information system(IRIS) on

Uranium, Soluble Salt, Environmental Criteria and Assessment Office, Office of Health and Environmental Assessment, Office of research and development, Cincinnati, OH.

USEPA, 1994, Toxicity characteristic leaching procedure and synthetic precipitation leaching procedure, EPA/SW/846/1311-1312.

USEPA, 1996, Citizens guide to soil washing, EPA/542/F62/002 and /018.

Wei, M., Liao, J., Liu, N., Zhang, D., Kang H., Yang, Y., Yang, Y., and Jin, J., 2007, Interaction between uranium and humic acid(I): Adsorption behaviors of U(VI) in soil humic acids, *Nuclear Sci. Tech.*, **18**(5), 287-293.