연구논문

영대 금은광산 주변 농경지에서 비소 및 중금속의 계절적 변화와 토양과 식물의 상관성 평가

권지철¹⁾ · 정선희¹⁾ · 정명채^{1)*} · 김태승²⁾

Seasonal Variation and Correlation between Soil and Crop Plant of Arsenic and Heavy Metal Concentrations in Paddy Fields around the Yeongdae Au-Ag Mine, Korea

Ji Cheol Kwon, Seon Hee Jeong, Myung Chae Jung* and Tae Seung Kim

Abstract : This study has focused on evaluation on environmental contamination and seasonal variation of As and heavy metals in soils and crop plant (rice) in paddy fields around the Yeongdae Au-Ag mine. Paddy soils and crop plants were sampled at June, August and October, 2010 to examine seasonal variation of As and heavy metals. Soil samples were extracted by various methods including aqua regia, 1M $MgCl_2$, 0.01M $CaCl_2$ and 0.05M EDTA to evaluate the soil-plant relationships. Relative extraction ratio (RER) for As and heavy metals in the samples increased in the order of $EDTA < MgCl_2 < CaCl_2$. In the same extraction methods, the RER values for Cd and Zn were relatively higher than those for As, Cu and Pb due to differences in geochemical mobilities. For seasonal variation, relatively high concentrations of the elements were found in the soils and rice stalk grown under oxidizing conditions (October) than reducing (August) conditions. In addition, biological accumulation coefficients (BACs) of the rice stalks were higher than those of the rice grain, and the coefficients for Cd, Cu and Zn were higher than those for As and Pb.

Key words : Paddy field, Crop plant(rice), Seasonal variation, Chemical extractions

요 약 : 이 연구는 영대 금은광산 주변의 논토양과 식물(벼)의 비소와 중금속 오염과 계절적 변화를 고찰하고자 하였다. 계절적인 변화를 고찰하기 위하여 2010년 6월, 8월 및 10월에 조사 대상 농경지의 토양과 식물을 채취하였다. 또한 토양과 식물의 유기적 관계를 규명하기 위하여 토양 시료를 왕수, 1M $MgCl_2$, 0.01M $CaCl_2$ 및 0.05M EDTA 등 다양한 추출제로 전처리하여 비소 및 중금속을 분석하였다. 비소와 중금속의 상대적인 추출비(RER)는 $EDTA < MgCl_2 < CaCl_2$ 순서로 증가되었으며, 동일한 추출법에서는 원소의 지구화학적 이동도에 따라 Cd와 Zn의 상대적인 추출비가 As, Cu 및 Pb 보다 상대적으로 높았다. 또한 토양과 식물의 비소 및 중금속에 대한 계절적 변화에 있어서는 산화환경(10월)이 환원환경(8월)에 비해 상대적으로 높은 함량이 검출되었다. 또한, 벼줄기의 생물학적 농축계수(BAC)가 벼(쌀)보다 높았으며, 원소별로는 Cd, Cu 및 Zn이 As와 Pb에 비해 상대적으로 높은 결과를 얻었다.

주요어 : 농경지, 작물(벼), 계절적 변화, 화학적 추출법

서 론

현재 국내에 분포하는 휴·폐금속광산은 2,089개, 비

2013년 2월 18일 접수, 2013년 4월 4일 심사완료

2013년 4월 11일 게재확정

1) 세종대학교 에너지자원공학과

2) 국립환경과학원 토양지하수연구과

*Corresponding Author(정명채)

E-mail: jmc65@sejong.ac.kr

Address: Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

금속광산 2,198개, 석탄광 394개 및 가행광산 593개 등 총 5,274개가 전국에 분포되어 있다(MIRECO, 2011). 이들 중에서 많은 광산들은 적절한 환경관리가 시행되고 있지만 일부 광산의 경우는 적절한 정화 또는 복원이 이루어지지 않고 있다. 특히 이들은 집중강우나 강풍시 광산폐기물이 포함된 오염물질이 하류로 이동 또는 분산되어 농경지나 수계의 주요한 환경오염 원인이 되고 있으며, 이렇게 오염된 토양은 농작물에 영향을 미쳐 이를 섭취한 주민의 건강에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다(Jung and Jung, 2006). 대표적으로 국내에 산재되어 있

는 후폐광산에 대한 정밀조사 결과, 광산폐기물 및 광산 주변에 있는 농경지 토양의 80% 이상이 비소 또는 중금속으로 오염된 것으로 조사되었다(KMOE, 2005).

한편, 우리나라에서 생산되는 식량작물로는 곡류, 두류 및 과실류 등 다양하며, 특히 곡류는 우리나라의 주식으로 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 지난 10년간의 1인당 쌀 소비량은 2002년에 91.1 kg에서 2009년 81.3 kg으로 약 10 kg이 감소하였지만(National Statistical Office, 2010), 여전히 주식인 쌀에 미량의 중금속이 함유되어 있다면 우리 건강에 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 예를 들어 일본에서는 Cd으로 인한 이따이이따이병이 발생한 바가 있으며, 국내에서도 1990년대에 폐광산 주변지역의 농작물에 의한 피해사례로 대표적으로 경기도 가평광산 주변 주민들의 높은 혈중 카드뮴 농도를 보여 사회적인 문제가 되기도 하였다.

이에 국내에서는 폐광산 주변 토양과 식물의 중금속 오염에 관한 유기적 상관성 연구가 다양하게 진행된 바가 있다(Jung and Chon, 1998; Lee *et al.*, 2000). 또한, 왕수분해법 외에 토양에서 식물로의 전이를 연구하기 위해 EDTA, DTPA 및 연속추출 등을 이용하여 연구된 바 있다(Jung *et al.*, 2000; Jeong *et al.*, 2011). 하지만 주요 선진국들에 비해서는 다소 미흡한 수준이며, 국외에서는 단일 용출법을 통해 중금속 오염토양으로부터 식물로의 중금속 전이 가능성 평가에 여러 가지 용출제를 활용하고 있다(Van Ranst *et al.*, 1999; Boisson *et al.*, 1999; Tessier *et al.*, 1979; Rauret *et al.*, 1999; Quevauviller *et al.*, 1997; DIN, 1997).

따라서 본 연구에서는 영대 금-은광산 주변 농경지 토양과 식물에 축적된 중금속 함량을 계절별 특성에 따라 비교, 분석하기 위하여 토양과 식물을 건기(6월), 우기(8월) 및 추수시기(10월)에 맞추어 총 3회 채취하여 오염 상태를 확인하였으며, 단일 용출제인 1M $MgCl_2$ (Tessier *et al.*, 1979), 0.01M $CaCl_2$ (Van Ranst *et al.*, 1999) 및 유기용제인 EDTA(Quevauviller *et al.*, 1997) 등으로 토양을 추출하여, 토양과 식물간의 상관관계를 효과적으로 규명하고자 하였다.

연구 방법

연구대상 지역

연구 대상지역인 영대광산은 전북 장수군 산서면에 위치하며, 금, 은, 구리, 납을 대상으로 한 광산으로 기존의 연구에 의하면 광산 주변 토양에 구리, 납, 카드뮴, 비소의 오염이 확인되었다(KMOE, 2007). 광산이 위치한 산 서면에는 총 1,178세대 2,611명이 거주하고 있으며, 부

지 총 면적의 16.8%가 농경지로 사용되고 있다. 또한 농업용수는 광산 부근을 통과한 하천수와 저수지를 활용하고 있어 주변 농경지의 오염이 심각할 것으로 판단되었다.

시료채취

토양 시료의 경우 광산의 주 갱구를 기점으로 하부 2.0 km 이내에서 벼가 재배되는 경작지의 표토(0~15 cm)를 대상으로 토양오염공정시험기준에 따라 채취하였다(Fig. 1). 계절적 특성을 비교하기 위해 동일한 지점에서 6월(1차), 8월(2차) 및 10월(3차) 등 총 3회 채취를 하였다.

식물(벼) 시료의 경우 토양시료 채취 위치와 동일한 지점에서 채취하였으며, 모종삽을 이용하여 뿌리까지 채취한 후 바로 흐르는 물에 세척을 하였다. 계절적 특성을 비교하기 위해 토양과 동일하게 6월, 8월 및 10월 등 총 3회 채취하였으며, 벼(백미)시료는 10월에 1회 채취하였다.

단일 용출법

일반적으로 토양과 식물의 상관관계를 규명하기 위해 사용되는 방법은 토양과 식물의 함량을 절대적으로 비교할 수도 있지만, 토양에 존재하는 중금속의 존재형태 비교를 위해 다양한 추출 방법이 적용되기도 한다. 우선 1M $MgCl_2$ (Tessier *et al.*, 1979)를 활용하여 오염된 토양에서 전이 가능량을 예측하는 연구 결과, 연속추출 fraction 1(exchangeable)과 fraction 2(bound to carbonates)에 해당되는 농도가 생물학적 이용성을 가지는 것으로

Fig. 1. Sampling location map around the Yeongdae mine.

보고되었다(Li *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2009). 또한 0.01M CaCl₂을 이용하여 중금속을 추출하는 방법 역시 많이 적용된 바 있다(Van Ranst, 1999). 더불어 식물흡수 가능성 파악에 가장 많이 사용되는 유기용제인 0.05M EDTA를 사용하여 중금속을 추출한 결과도 활용되고 있다(Quevauviller *et al.*, 1997). 그러므로 이 연구에서는 용출제들의 효율성을 비교하고자 다양한 방법을 적용하였으며, 전처리 방법을 Table 1에 요약하여 제시하였다.

분석 방법

왕수분해법의 경우 -100mesh로 체질한 건조시료 3.0 g을 칭량하여, 시험관에 넣고 질산(7.0 mL)과 염산(21 mL)을 넣은 후 Heating Block에서 70°C를 유지하면서 한시간 동안 용출시킨 용액을 원자흡광분광광도계(Varian AA240, 호주)를 이용하여 Cd, Cu, Pb 및 Zn을 분석하였다(Ure, 1995). 비소는 국제기준 ISO/DIS 20280에서 제시한 예비환원을 한 후 hydride generation 방법을 이용하여 원자흡광분광광도계(Varian AA240, 호주)로 분석하였다. 식물시료는 증류수로 3회 이상 세척한 후 상온에서 7일 이상 자연건조시킨 후, 스테인리스강으로 제작된 식물용 믹서기를 이용하여 미분쇄하였다. 천칭으로 베타 줄기와 백미시료 1.0 g을 정량적으로 잰 후, 유리관에 콘덴서를 부착하고 휘발성 질산 10 mL를 넣고 완전 건조될

때까지 Heating Block에서 가열한 후 왕수로 분해하고 증류수를 첨가하여 20 mL를 정량한 시료를 원자흡광분광광도계(Varian AA240, 호주)로 분석하였다.

연구결과 및 고찰

추출방법에 따른 토양의 중금속 함량

농경지 토양의 중금속 함량을 파악하기 위해 왕수와 단일용출제를 이용하여 중금속 용출량을 조사하였다(Table 2). 왕수로 분해하여 분석한 중금속 평균함량(mg/kg)은 As 26.23, Cd 4.057, Cu 41.73, Pb 233.8 및 Zn 676.9의 함량을 나타내었다. 각 원소별 최고함량(mg/kg)은 As 71.02, Cd 9.424, Cu 146.6, Pb 885.2 및 Zn 1,604에서 Cu를 제외한 모든 원소에서 토양오염기준을 초과하였다. 또한 Kabata-Pendias 와 Mukherjee(2007)가 제시한 농경지 토양에 대한 최대허용농도(maximum allowable concentrations, MAC)와 연구지역의 평균 농도를 비교한 결과 As는 연구지역에서 다소 높은 농도를 보였으며, Cd에서는 약 2배 높은 농도를 나타내었다. Cu의 경우 최대허용농도보다 낮았으며, Pb에서는 허용범위 농도보다 다소 높은 함량을 나타낸 반면 Zn은 약 3배 높은 농도를 나타내었다. 분석결과를 2010년도 토양 측정망 및 토양오염실태조사(KMOE, 2011) 결과와 비교

Table 1. Overview of single extraction methods applied in this study

Extraction solution	Liquid : solid ratio	Equilibration time	Reference
1M MgCl ₂	8 : 1	1h	Tessier <i>et al.</i> (1979)
0.01M CaCl ₂	5 : 1	2h	Van Ranst(1999)
0.05M EDTA-NH ₄ OAc	5 : 1	1h	Quevauviller <i>et al.</i> (1997)

Table 2. Range, mean and standard deviation of As and heavy metal concentrations in paddy soils sampled around the Yeongdae mine (unit in mg/kg)

N=30		As	Cd	Cu	Pb	Zn
Aqua regia	range	6.663~71.02	0.010~9.424	10.03~146.6	21.76~885.2	51.67~1604
	mean±std ^a	26.23±14.48	4.057±3.179	41.73±30.07	233.8±196.1	676.9±452.4
1M MgCl ₂	range	0.022~0.078	0.100~5.572	0.130~0.890	2.000~50.00	0.880~167.6
	mean±std	0.049±0.017	1.652±1.373	0.337±0.158	12.31±12.59	32.11±36.02
0.01M CaCl ₂	range	0.001~0.085	0.010~2.035	0.015~0.275	0.350~1.650	0.105~148.9
	mean±std	0.017±0.016	0.604±0.583	0.060±0.051	0.598±0.222	16.84±28.99
0.05M EDTA	range	0.012~0.639	0.025~5.775	0.90~34.20	2.500~192.0	1.017~188.0
	mean±std	0.193±0.197	2.00±1.560	10.43±8.282	45.73±43.47	42.93±42.53

N = number of samples

^a = arithmetic mean±standard deviation

한 결과, As는 5배, Cd 4배, Cu 2배, Pb 8배 및 Zn 9배 정도 높은 함량을 보였다. 특히 Cd의 경우 최대 농도가 9.4 mg/kg으로 이는 Alloway(1995)가 제시한 토양에서 1 mg/kg 이상일 경우는 오염원이 존재한다는 것에 부응하는 결과를 얻었다. 또한, 유럽의 최대허용농도와 비교하면 모든 원소에서 연구지역이 높은 농도를 보이고 있으며 이러한 결과는 광산에 의해 발생된 오염물질이 주변 농경지에 영향을 주고 있음이 확인되었다.

1M MgCl₂로 추출한 토양의 중금속 농도(mg/kg)의 범위(평균)는 As 0.022~0.078(0.049), Cd 0.1~5.572(1.652), Cu 0.13~0.89(0.337), Pb 2.0~50.0(12.31) 및 Zn 0.88~167.6(32.11)로 나타났다. 그리고 0.01M CaCl₂로 추출한 토양의 중금속 농도(mg/kg)의 범위(평균)는 As 0.001~0.085(0.017), Cd 0.01~2.035(0.604), Cu 0.015~0.275(0.06), Pb 0.35~1.65(0.598) 및 Zn 0.105~148.9(16.84)의 값을 보였으며, 0.05M EDTA로 추출한 토양의 중금속 농도(mg/kg)의 범위(평균)는 As 0.012~0.639(0.193), Cd 0.025~5.775(2.0), Cu 0.90~34.2(10.43), Pb 2.50~192(45.73) 및 Zn 1.017~188.0(42.93)로 나타났다.

왕수분해법과 1M MgCl₂, 0.01M CaCl₂ 및 0.05M EDTA등을 활용한 화학분해에 따른 As 및 중금속의 원소함량 변화를 Table 3에 정리하였으며, 엑셀 프로그램의 회귀분석 방법을 활용하여 상관관계를 구하였다. 1M MgCl₂의 경우 As를 제외하고 Cd, Pb 그리고 Zn의 상관계수는 각각 0.872, 0.844, 0.758로 통계적으로 매우 좋은 상관관계를 보였으며(p<0.001), Cu도 0.577로 양호한 상관관계를 보였다(p<0.05). 또한, 0.01M CaCl₂에서는 Cu와 Pb의 경우 통계적으로 유의한 상관관계는 보이지 않으며, 원소의 이동도가 좋은 Cd와 Zn에서 상관계수는 각각 0.757, 0.592로 높은 상관관계를 나타냈으며(p<0.001), As도 0.630으로 좋은 상관관계를 보였다(p<0.01).

0.05M EDTA 추출의 경우 As의 경우 왕수함량과 용출 함량 사이에 통계적으로 유의한 상관관계는 보이지 않으나, Cd, Cu, Pb 및 Zn에서의 상관계수는 각각

0.905, 0.923, 0.978, 0.838로 매우 높은 상관관계를 나타내었다(p<0.001). Cd와 Zn은 모든 용출제에서 통계적으로 상관성이 있는 것으로 나타났으며(p<0.001), As는 0.01M CaCl₂, Cu는 EDTA 그리고 Pb에서는 1M MgCl₂와 EDTA에서 통계적으로 유의한 상관성을 보였다(p<0.001). 왕수분해법과 단일 용출제간의 추출된 원소함량의 변화를 Fig. 2에 도시하였다.

상대적인 추출비(relative extraction ratio, RER)을 아래의 식 (1)에 의해 구하였다(Son and Jung, 2011).

$$\text{Relative extraction ratio(\%)} = \frac{\text{concentration extracted by individual extractant(mg/kg)}}{\text{concentration extracted by aqua regia(mg/kg)}} \times 100(\%) \quad (1)$$

이 식을 이용하여 중금속 원소들의 추출률을 조사한 결과, 1M MgCl₂에서 As 0.26%, Cd 45%, Cu 1.1%, Pb 6.7% 및 Zn 3.9%의 추출률을 나타냈다. Jeong과 Namkoong (2012)이 제시한 추출률에 비해 Cd 3배, Pb 5배, Zn 4배 높게 나타났으며, Cu는 비슷한 추출률을 보였다. 추출률이 높게 나타난 이유는 용출제의 농도의 차이 때문이라 판단된다. 또한 Meers 등(2007)이 제시한 Cd의 추출률과는 유사한 값으로 나타났다. 0.01M CaCl₂의 경우 As 0.17%, Cd 19.4%, Cu 0.19%, Pb 0.78% 및 Zn 1.74%의 추출률을 보였다. Aten 과 Gupta(1996)가 제시한 값과 비교한 결과 Cd에서는 연구지역이 6배 정도 높은 추출률을 보였으며, 이는 기존 문헌자료의 경우 토양의 pH가 중성인 반면 연구지역의 경우 6미만의 산성 토양이므로 pH에 따른 토양에서 중금속의 용해도와 이동도에 영향을 미친 것으로 판단된다(Burgos *et al.*, 2006). Cu와 Pb에서는 모두 낮은 추출률을 나타냈으며, Zn의 경우 기존 문헌자료와 비슷한 추출률을 보였다. Zn의 경우 이동도가 좋은 원소임에도 불구하고 전반적으로 낮은 추출률을 보이는데 이는 토양 농도가 높아 용출제로 용출시

Table 3. Correlation matrix of As and heavy metal concentrations in paddy soils sampled around the Yeongdae mine

Metal content in soil (N=30)	Aqua regia				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
1M MgCl ₂	0.206	0.872***	0.577*	0.844***	0.758***
0.01M CaCl ₂	0.630**	0.757***	0.207	0.110	0.592***
0.05M EDTA	0.266	0.905***	0.923***	0.978***	0.838***

N=number of samples.

*Statistically significant at p<0.05, **Statistically significant at p<0.01, ***Statistically significant at p<0.001.

Fig. 2. Relationships of As and heavy metal concentrations in soils extracted by aqua regia and various extraction methods sampled in the Yeongdae mine.

킬 수 있는 용출의 한계 때문으로 판단된다. 또한 Sastre 등(2004)이 제시한 값에 비해 Cd은 9배, Cu는 비슷한 함량을 보이며, Zn은 6배 정도 높은 함량을 나타내었다. 0.05M EDTA에서는 As 0.63%, Cd 52.5%, Cu 23.5%, Pb 18.9% 및 Zn 5.14%로 나타났다. Vidal 등(1999)이 제시한 함량에 비해 Cd와 Cu는 다소 높은 값을 나타내었고, Pb와 Zn은 낮은 함량을 보였으며, Sastre 등(2004)

이 제시한 값이 연구지역과 Cu는 비슷한 함량을 보이고, Pb은 2배, Zn은 4배 정도 높은 함량을 나타내었다. As의 경우는 모든 용출제에서 낮은 추출률을 보이고 있으며, Cd에서 가장 높은 추출률을 보이고 있다. 용출제별로 추출률을 비교해 본 결과 0.05M EDTA > 1M MgCl₂ > 0.01M CaCl₂ 순으로 추출률을 보이며 이는 기존 문헌 조사와 일치하는 결과이다.

식물(벼)시료의 As 및 중금속 함량

벼줄기 시료는 6월, 8월 및 10월 등 총 3회 채취하였으며, 백미 시료의 경우는 10월(추수기)에 채취하였다. 벼줄기의 As 및 중금속의 함량을 Table 4에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 6월에 채취한 벼줄기의 평균 농도(mg/kg)는 As 4.531, Cd 2.502, Cu 8.452, Pb 2.148 및 Zn 72.23이며, 8월은 As 8.172, Cd 2.912, Cu 5.166, Pb 2.334 및 Zn 91.46로 조사되었으며, 10월의 경우는 As 9.325, Cd 2.330, Cu 4.292, Pb 3.034 및 Zn 74.02로 나타났다. Khan 등(2005)이 제시한 오염된 토양에서의 벼줄기의 농도는 2.74~24.9인 것에 비해 연구지역에서의 농도는 유사하거나 낮은 값을 나타내었지만 Kabata-Pendias 와 Pendias(1984)가 제시한 독성을 보일 수 있는 함량을 초과하는 것으로 나타났다. 특히 높은 As 함량을 보이는 것은 금은광화작용에 의한 것과, 광물찌꺼기를 복토한 논에서 침출수가 저수지로 이동하였기 때문으로 판단된다. Jung(1995)의 자료와 비교하면 비오염지역에서 자란 식물의 Cd함량에 비해 최대 10배 이상의

높은 값을 보이고 있으며, 일부 11 mg/kg을 함유하여 Kabata-Pendias 와 Pendias(1984)가 제시한 허용한계값을 초과하는 것으로 나타났으며, Jung(1995)이 보고한 벼줄기의 함량보다도 높은 값을 보인다. Cu와 Pb의 경우도 Jung(1995)이 제시한 자연배경값에 비해 낮은 함량을 보이고 있다. Cu는 전반적으로 토양 내의 함량이 비교적 낮고 지구화학적 환경에서도 이동성이 낮은 원소이며, Pb의 경우는 최대 농도가 885 mg/kg이 검출되었지만 벼줄기에서의 함량은 낮게 나타난 것도 상대적으로 이동성이 적기 때문으로 판단된다. Zn의 경우 일부 시료에서 자연배경값의 3배인 300 mg/kg을 보였지만, 전반적으로 자연배경값 보다 낮은 함량을 나타내었다. 또한 Zn 함량이 높은 곳에서 Cd에서도 높은 함량이 관찰되었다.

백미시료에 대한 As 및 중금속 함량을 Table 5에 정리하였으며, 또한 기존 문헌에서 조사된 결과와 백미의 중금속 함량을 비교하였다. 백미시료의 평균함량(mg/kg)은 As 0.218, Cd 0.344, Cu 4.316, Pb 0.748 및 Zn 15.58

Table 4. Range, mean and standard deviation of As and heavy metal concentrations in rice stalk sampled around the Yeongdae mine

		Rice stalk(mg/kg, dry weight)				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
N=10 (June)	range	2.047~9.280	0.100~6.120	4.400~17.90	0.520~6.980	31.90~144.4
	mean±std ^a	4.531±2.346	2.502±2.537	8.452±4.717	2.148±2.071	72.23±44.97
N=10 (August)	range	5.250~11.51	0.080~11.08	2.460~10.14	0.940~5.320	39.40~307.8
	mean±std	8.172±2.447	2.912±4.262	5.166±3.045	2.334±1.540	91.46±85.98
N=10 (October)	range	6.660~12.05	0.080~8.700	1.980~8.080	1.000~12.56	28.90~159.0
	mean±std	9.325±1.695	2.330±2.655	4.292±2.019	3.034±3.734	74.02±43.14

N=Number of samples.

^a=arithmetic mean±standard deviation.

Table 5. Range, mean and standard deviation of As and heavy metal concentrations in rice grain sampled around the Yeongdae mine

		Rice grain(mg/kg, dry weight)				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
N=10 this study	range	0.162~0.280	0.060~0.980	2.320~7.120	0.080~1.800	10.25~20.60
	mean±std ^a	0.218±0.040	0.344±0.316	4.316±1.456	0.748±0.670	15.58±3.476
N=50 Yoo(1988)	range	0.029~0.193	0.027~0.091	0.918~4.380	0.153~0.765	12.65~21.25
	mean	0.110	0.060	2.650	0.460	16.95
N=63 Jung(2003)	range	0.043~0.286	0.010~0.279	0.430~4.228	0.009~1.074	11.23~21.59
	mean	0.126	0.040	1.958	0.361	16.56

N=Number of samples.

^a=arithmetic mean±standard deviation.

로 조사되었다. Jung(2003)과 Yoo 등(1988)의 우리나라 백미의 자연함유량과 비교한 결과 연구지역 As의 경우 약 2배 정도 높은 함량을 보였으며, Cd에서는 10배 가량 높은 평균값을 나타냈다. Cu와 Pb에서 2배 높은 농도를 보였으며, Zn은 기존 문헌 결과와 비슷한 농도값을 나타내었다. 이는 광산 오염물질이 주변 농경지에 직접 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

중금속 함량의 계절적 변화

약 두 달간의 간격으로 계절적 변화를 고찰하였다. 시료채취위치는 Fig. 1에서 제시한 바와 같이 광산의 주 오염원에 근접한 지점이 1번 시료이며, 반경 2 km 이내의 하부방향으로 논토양 10개 시료를 채취하였으며, 왕수

분해법으로 추출한 원소함량을 Fig. 3에 도시하였다. 또한 토양과 벼줄기에 대해 계절별 평균 원소 함량에 대한 t-test 결과를 Table 6에 정리하였다. 평균에 대한 통계적 차이를 규명하기 위하여 t-test의 쌍체분석을 활용하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 경우 계절적 변화가 있는 것으로 판단하였으며, 통계적으로 유의한 차이가 없는 것은 계절적인 변화가 없는 것으로 평가하였다. 분석 결과, 6월, 8월 그리고 10월의 농경지 토양 내 As 및 중금속 함량을 비교한 결과 모든 원소에서 큰 차를 보이지 않지만 환원환경인 8월에 비하여 산화환경인 10월에 함량이 증가하며, 통계적으로도 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 벼줄기에서도 환원환경인 8월에 채취한 시료에 비해 산화환경인 10월에 채취한 시료에서 As와 Pb의

Fig. 3. Seasonal variation of As and heavy metal concentrations in paddy soils sampled around the Yeongdae mine.

Table 6. Mean concentration of As and heavy metals in soils and rice stalk sampled around the Yeongdae mine

		N	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Soil	June	10	25.00 ^a	4.532 ^a	35.18 ^a	225.2 ^a	668.8 ^a
	August	10	23.51 ^b	3.820 ^b	42.07 ^b	211.9 ^b	650.1 ^b
	October	10	30.17 ^c	5.418 ^c	47.95 ^c	264.2 ^c	711.8 ^c
Rice stalk	June	10	4.531 ^a	2.502 ^a	8.452 ^a	2.148 ^a	72.23 ^a
	August	10	8.172 ^b	2.912 ^b	5.166 ^b	2.334 ^b	91.46 ^b
	October	10	9.325 ^c	2.330 ^c	4.292 ^c	3.034 ^c	74.02 ^c

N=number of sample.

Where mean values share the same letter suffix for a given soil property, there is no statistically significant difference between the sampling time at $p < 0.05$.

Where mean values have the difference letter suffix for a given soil property, a statistically significant difference between the sampling time occurs at $p < 0.05$.

Fig. 4. Seasonal variation of As and heavy metal concentrations in rice stalk sampled around the Yeongdae mine.

함량이 증가된 것으로 나타났으며(Fig. 4), t-test 분석결과에서도 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 이러한 경향은 환원환경에서 대부분의 중금속이 안정된 황화물과 결합된 형태로 존재하고 있어 식물이 유용하게 흡수하기 어려워 상대적으로 낮은 함량을 보이는 반면, 산화환경으로 변화되면서 황화물에서 분리된 토양중의 중금속을 식물이 쉽게 흡수하기 때문이다(Jung and Chon, 1998). 다만 토양 중 Cu의 경우 6월 채취한 시료에서 높은 함량을 보이며, 계절에 따른 변화가 미약한데 이는 Cu가 식물 성장의 필수 원소이며, 조사된 토양 내 함량이 낮기 때문으로 판단되며, Lee 등(2000)의 연구 역시 이러한 경향을 나타내었다. Cd와 Zn의 경우 환원환경인 8월에 비해 산화환경인 10월 다소 낮은 함량을 보였으며, Kabata-Pendias 와 Pendias(1984)에 의하면 식물 성장에 필수적인 원소에 대해서는 식물의 흡수능력이 좋고 성장에 적게 필요하거나 유해한 Pb나 Cd과 같은 원소는 일정수준까지는 흡수가 제한되거나 토양에서 농축이 많은 원소는 식물 자체의 자정능력을 넘겨 주어 식물체내에 농축된다고 알려져 있다. 이런 이유로 Cd는 토양 내 함량이 고농도 이므로 식물 성장시 식물체 내에 농축되었기 때문으로 판단되며, Zn의 경우 성장에 필수원소이므로 성장에 필요한 양을 충분히 흡수하였기 때문에 변화가 미미한 것으로 판단된다.

추출방법에 따른 토양의 농도와 식물간의 상관성 평가

농경지 토양시료와 동일지점에서 채취한 벼(백미) 시료 내 중금속 함량의 상관관계를 규명하기 위해 왕수로 추출한 토양 함량과 백미의 중금속 함량을 Fig. 5에 도시하였다. As와 Pb의 토양과 백미 내의 함량 사이에 통계적으로 유의한 상관관계는 보이지 않으며, 나머지 원소에서는 토양 내 함량이 증가할수록 백미의 함량도 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 Cd에서 높은 상관계수를 보이고 있다($p < 0.01$). 전반적으로 왕수분해법으로 추출할 경우 식물과의 상관성이 낮은 것으로 확인되었는데, 이는 중금속의 토양 내 지구화학적 존재, 거동 및 생물학적 이용성에 따라 가변적인 요소가 많기 때문으로 평가된다.

한편, 1M $MgCl_2$ 와 백미 시료 내 중금속 함량을 Fig. 6에 도시하였다. As와 Cu의 함량은 토양 내 함량이 증가하여도 일정한 농도로 유지되는 것으로 나타났으며, Pb에서는 백미와 토양 내 함량 사이에 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 왕수 추출과 동일하게 Cd에서만 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다($p < 0.001$).

또한, 0.01M $CaCl_2$ 와 백미 시료 내 중금속 함량을 Fig. 7에 도시하였다. As의 경우 토양 내 함량이 증가하여도 일정한 농도로 유지되는 것으로 나타났으며, Pb에서는 백미와 토양 내 함량 사이에 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 나머지 원소에서는 토양 내 중금속 함량이

Fig. 5. Relationship of As and heavy metal concentrations in soils extracted by aqua regia and rice grain sampled around the Yeongdae mine.

Fig. 6. Relationship of As and heavy metal concentrations in soils extracted by 1M MgCl₂ and rice grain sampled around the Yeongdae mine.

Fig. 7. Relationship of As and heavy metal concentrations in soils extracted by 0.01M CaCl₂ and rice grain sampled around the Yeongdae mine.

증가할수록 백미의 함량도 증가하는 경향을 보였으며, 특히 Cd에서는 높은 상관성을 보였다($p < 0.001$). Cd를 제외한 원소들이 전반적으로 낮은 상관성을 보이는 이유는 0.01M CaCl₂로 추출한 경우 토양 내 중금속 함량 추출률이 낮기 때문이라 판단된다.

0.05M EDTA와 백미 시료 내 중금속 함량을 Fig. 8에

도시하였다. As와 Pb의 경우 백미와 토양 내 함량 사이에 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 나머지 원소에서는 토양 함량이 증가할수록 백미의 함량도 증가하는 경향을 보였다. 특히, Cd에서는 높은 상관성을 나타내고 있다($p < 0.01$). 추출방법에 따른 백미와의 상관성을 확인한 결과, 모든 추출방법에서 As와 Pb에서는 상관성이

Fig. 8. Relationship of As and heavy metal concentrations in soils extracted by 0.05M EDTA and rice grain sampled around the Yeongdae mine.

Table 7. Correlation coefficients of As and heavy metal concentrations in soils and plants sampled around the Yeongdae mine

Metal content in soil(N=10)		June	August	October	
		stalk	stalk	stalk	grain
Aqua regia	As	0.050	0.259	0.273	0.100
	Cd	0.723*	0.403	0.551	0.828**
	Cu	0.452	0.068	0.258	0.336
	Pb	0.720*	0.538	0.114	0.450
	Zn	0.604	0.281	0.912***	0.506
1M MgCl ₂	As	0.481	0.130	0.294	0.345
	Cd	0.802**	0.630	0.697*	0.848***
	Cu	0.291	0.022	0.062	0.278
	Pb	0.469	0.939***	0.003	0.457
	Zn	0.507	0.045	0.687*	0.393
0.01M CaCl ₂	As	0.123	0.361	0.390	0.052
	Cd	0.755**	0.470	0.787**	0.864***
	Cu	0.145	0.644*	0.089	0.206
	Pb	0.089	0.045	0.472	0.384
	Zn	0.513	0.089	0.663*	0.374
0.05M EDTA	As	0.389	0.277	0.335	0.217
	Cd	0.812**	0.696*	0.829**	0.811**
	Cu	0.538	0.241	0.364	0.336
	Pb	0.527	0.495	0.145	0.519
	Zn	0.620	0.063	0.730*	0.442

N=number of sample

*Statistically significant at $p<0.05$, **Statistically significant at $p<0.01$, ***Statistically significant at $p<0.001$

낮은 것으로 조사되었으며, Cu와 Zn에서는 토양 함량이 증가할수록 백미 함량도 증가하는 경향을 보였다. 다만 Cd에서는 모든 방법에 높은 상관성을 보였는데, 이는 원소의 이동도가 좋은 원소이기 때문으로 판단된다.

토양에서의 금속 농도는 식물이 금속 농도를 흡수하는데 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 비록 식물에 의한 금속 흡수의 양과 정도는 생물학적 요소들에 의존하지만 많은 연구자들은 식물안의 금속 농도는 토양과의 양의 상관성이 있다고 보고되었다(Kim and Thornton, 1993). 다양한 용출제를 사용한 토양의 중금속 함량과 벼줄기와 백미와의 상관계수를 Table 7에 정리하였다. 왕수로 분해한 토양시료와 벼줄기 시료의 중금속 함량을 비교해 본 결과 6월에는 Cd와 Pb에서 상관성을 보이고 있으며($P < 0.05$), 8월에는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 10월 벼줄기의 경우는 Zn에서만 높은 상관성을 보이고 있으며($P < 0.001$), 1M $MgCl_2$ 의 경우 6월에 Cd에서 상관성을 나타냈으며($P < 0.01$), 8월은 Pb에서만 상관성을 보였다($P < 0.05$). 10월의 벼줄기의 경우 Cd와 Zn에서 상관성을 나타냈다($P < 0.05$). 0.01M $CaCl_2$ 는 6월에 Cd에서만 상관성을 보이며($P < 0.01$), 8월에는 Cu에서 상관성을 나

타내고 있다($P < 0.05$). 10월의 벼줄기에서는 Cd에서 $p < 0.01$, Zn에서 $p < 0.05$ 의 상관성을 나타내며, EDTA의 경우는 Cd 벼줄기에서 6월, 8월 및 10월 각각 $p < 0.01$, $p < 0.05$ 및 $p < 0.01$ 의 상관관계를 보이고 있다. 전반적으로 Cd에서는 모든 용출제에서 높은 상관성을 나타내며, As는 벼줄기 내 함량과 토양 내 함량 사이에 상관관계가 없는 것으로 확인되었다.

중금속 원소의 흡수비

식물학적 흡수계수(BAC : Biological Accumulation Coefficient)는 토양으로부터 식물로 이동되는 원소의 함량을 토양 내 원소함량으로 나눈 값으로 토양으로부터 식물로 이동되는 중금속 원소들의 흡수비를 나타낸다(Brooks, 1983). Kabata-Pendias 와 Mukherjee(2007)에 의하면 Cd는 1~10, 다른 원소는 0.1~0.01의 흡수계수를 제시하였으며, 원소별은 $Cd > Zn > Cu > Pb$ 순으로 나타났다.

식물 부위와 계절에 따른 식물학적 흡수계수를 Fig. 9에 도시하였다. Pb의 경우는 식물부위와 계절에 상관없이 0.02 이하로 가장 낮은 흡수계수를 보이고 있는데, 이

Fig. 9. Biological accumulation coefficient of rice stalk and grain sampled around the Yeongdae mine.

는 Pb이 식물 성장에 유해한 원소라는 사실과 잘 일치하며, 문헌과도 일치하는 결과이다. As의 경우 백미 시료에서는 중금속의 흡수가 0.01로 매우 낮은 것으로 확인되었다. Cu는 식물성장의 필수원소이기 때문에 초기인 6월에 가장 높은 흡수계수를 보였고, 시간이 갈수록 흡수계수가 낮아지는 것을 확인하였다. Cd와 Zn의 경우 벼줄기에서는 최대 농도(mg/kg, DW)가 각각 6.0, 0.6이며, 백미에서는 0.6, 0.2의 높은 흡수계수를 나타내 토양에서 식물로의 원소의 이동이 상당량 이루어지는 것으로 판단된다. 모든 원소에서 벼줄기보다 백미에서 낮은 흡수계수를 나타냈으며, 이는 식물은 부위와 종류에 따라 흡수가 상이하여 백미와 같은 열매의 중금속 흡수가 저해되기 때문이다(Adriano, 1986). 또한 원소별로 살펴본 결과 Cd > Zn > Cu > As > Pb 순으로 기존 연구내용과도 일치하는 결과이다.

결 론

이 연구에서는 광산주변의 농경지 토양과 식물에 축적된 중금속 함량을 계절별 특성을 비교하고, 토양과 식물의 유기적 관계규명 위해서 중금속의 형태와 이동도 및 생물학적 이용가능성을 평가할 수 있는 다양한 용출제를 사용하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 왕수를 이용하여 분석한 중금속 평균함량(mg/kg)은 As 26.23, Cd 4.057, Cu 41.73, Pb 233.8 및 Zn 676.9의 함량을 나타내었으며, 토양측정망 및 토양 오염실태조사 결과와 비교해 본 결과 As는 5배, Cd 4배, Cu 2배, Pb 8배 및 Zn 9배 정도 높은 함량을 보여 광산에 의해 발생된 오염물질이 주변 농경지에 직접 영향을 주고 있음을 확인하였다.
2. 왕수분해법과 다양한 용출제의 화학분해 방법에 따른 원소함량을 비교해본 결과 1M MgCl₂와 0.05M EDTA에서는 As를 제외하고는 모든 원소에서 통계적으로 유의한 상관성을 보이고 있으며(p<0.001), 0.01M CaCl₂에서는 Cd와 Zn에서만 상관관계를 나타내었다(p<0.001). 추출률을 확인한 결과 Cd에서 가장 높은 추출률을 보이며, Zn을 제외하고는 모두 1%이하의 낮은 추출률을 보였다.
3. 농경지 토양의 계절적 변화를 조사한 결과 모든 원소에서 평균농도에서 큰 차이를 보이지 않지만, t-test 분석결과 통계적으로 유의한 차이를 보인 것을 확인할 수 있었다(p<0.05). 벼줄기에서는 Cu와 Zn에서는 계절에 따른 변화가 낮은 것으로 나타났으며, Cd는 계절에 따른 농도의 변화가 크지 않았

다. As와 Pb에서는 8월에 채취한 시료보다 10월에 채취한 시료에서 함량이 증가되어 통계적으로도 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

4. 왕수로 분해한 토양시료와 벼줄기 시료의 중금속 함량을 비교해 본 결과 6월에는 Cd와 Pb에서 상관성을 보이고 있으며(p<0.05), 8월에는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 10월 벼줄기의 경우는 Zn에서만 높은 상관성을 보이고 있으며(p<0.001), 1M MgCl₂의 경우 전반적으로 낮은 상관성을 나타냈으며, 산화환경인 10월의 벼줄기의 경우 Cd와 Zn에서 상관성을 나타냈다(p<0.05). EDTA의 경우는 Cd 벼줄기에서 6월, 8월 및 10월 각각 p<0.01, p<0.05 및 p<0.01의 상관관계를 보이고 있다. 백미에서는 모든 추출제에서 Cd에서만 통계적으로 유의한 상관성을 보였으며(p<0.01), Cu와 Zn에서는 양의 상관관계를 나타내고 있다. 또한 As와 Pb에서는 상관성이 없는 것으로 확인되었다.
5. 영대광산 주변에서 재배되는 벼식물의 식물학적 흡수계수는 계절과 부위에 상관없이 Pb에서는 0.1이하의 낮은 흡수계수를 나타내고 있으며, 원소의 이동도가 좋은 Cd와 Zn은 높은 흡수계수를 보였다. 모든 원소에서 벼줄기에 비해 백미의 흡수계수가 낮게 나타났으며, 특히 As의 경우 벼줄기에 비해 백미로의 매우 낮은 흡수계수를 보였다. 결론적으로 Cd > Zn > As > Cu > Pb 순으로 흡수계수가 감소하였으며 다른 연구 결과와 일치하는 결과이다.

참고문헌

- Adriano, D.C., 1986, "Trace Elements in the Terrestrial Environment," Springer-Verlag, New York.
- Alloway, B.J., 1995, "Heavy Metals in Soils," Blackie and Son, Glasgow.
- Aten, C.F. and Gupta, S.K., 1996, "On heavy metals in soil: rationalization of extractions by dilute salt solutions, comparison of the extracted concentrations with uptake by ryegrass and lettuce, and the possible influence of pyrophosphate on plant uptake," *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 178, pp. 45-53.
- Boisson, J., Ruttens, A., Mench, M. and Vangronsveld, J., 1999, "Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of hydroxyapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation," *Environ. Pollut.*, Vol. 104, pp. 225-233.
- Burgos, P., Madejon, E., Prez-de-Mora, A. and Cabrera, F.,

- 2006, "Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation," *Geoderma*, Vol. 130, pp. 157-175.
- Brooks, R.R., 1983, "Biological Methods of Prospecting for Minerals," John Wiley and Sons, New York.
- DIN, Deutsches Institut für Normung, 1997, "Bodenbeschaffenheit-Extraktion von Spurenelemente mit Ammoniumnitratlösung. Vornorm DIN V 19730, DIN Boden-Chemische Bodenuntersuchungs-Chemische Bodenuntersuchungsverfahren," Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- Hong, C.O., Gutierrez, J., Yun, S.W., Lee, Y.B. and Yu, C., 2009, "Heavy metal contamination of arable soil and corn plant in the vicinity of a zinc smelting factory and stabilization by liming," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 56, pp. 190-200.
- Jeong, S.K., An, J.S., Kim, Y.J., Kim, G.H., Choi, S.I. and Nam, K.P., 2011, "Study on Heavy Metal Contamination Characteristics and Plant Bioavailability for Soils in the Janghang Smelter Area," *J. of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 16, pp. 42-50.
- Jeong, T.H. and NamKoong, W., 2012, "Immobilization characteristics of heavy metal-contaminated soil with soluble phosphate," *J. Korea Society of Waste Management*, Vol. 29, No. 6, pp. 542-550.
- Jung, G.B., Kim, W.I. and Ryu, I.S., 2000, "Fractionation and Availability of Heavy Metals in Paddy Soils near Abandoned Mining Areas," *J. of Environmental Agriculture*, Vol. 19, pp. 319-323.
- Jung, M.C., 1995, "Environmental contamination of heavy metals in soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mine in Korea," PhD thesis, Univ. of London, U.K.
- Jung, M.C., 2003, "Background levels and daily intake of As, Cd, Cu, Pb and Zn in white rice produced in Korea Econ.," *Environ. Geol.*, Vol. 36, No. 5, pp. 357-363.
- Jung, M.C. and Jung, M.Y., 2006, "Evaluation and management method of environmental contamination from abandoned metal mines in Korea," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 43, No. 5, pp. 383-394.
- Jung, M.C. and Chon, H.T., 1998, "Seasonal variation of heavy metal contents and environmental contamination in paddy fields around the Sambo Pb-Zn mine, Korea.," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 35, pp. 19-29.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1984, "Trace Elements in Soils and Plants," CRC Press, Inc. USA.
- Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B., 2007, "Trace Elements from Soil to Human," Springer, New York.
- Khan, M.A., Islam, M.R., Panaullah, G.M., Duxbury, J.M., Jahiruddin, M., Loeppert, R.H. and Meisner., 2005 "Movement of arsenic in irrigated rice soil," 8th Intern. Conf. on Biogeochemistry of Trace Elements, Adelaide.
- Kim, K.W. and Thornton, I., 1993, "Influence of Ordovician uraniferous black shales on the trace element concentration of soils and food crops, Korea," *Applied Geochem Suppl 2*, pp. 249-255.
- KMOE(Korea Ministry of Environment), 2005, "Detailed survey for soil and water contamination in abandoned metal mines in Korea," KMOE., Seoul.
- KMOE (Korea Ministry of Environment), 2007, "Detailed survey for soil and water contamination in abandoned metal mines in Korea," Korea Ministry of Environment, Seoul.
- KMOE (Korea Ministry of Environment), 2011, "Soil monitoring system and soil pollution survey in 2010," Korea Ministry of Environment, Seoul.
- Lee, C.G., Chon, H.T. and Jung, M.C., 2000, "Arsenic and heavy metal contamination and their seasonal variation in the paddy field around the Daduk Au-Pb-Zn mine in Korea.," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 37, NO.1, pp. 53-66.
- Li, J.X., Yang, X.E., He, Z.L., Jilani, G., Sun, C.Y. and Chen, S.M., 2007, "Fractionation of lead in paddy soils and its bioavailability to rice plants," *Geoderma*, Vol. 141, pp. 174-180.
- Meers, E., Du Laing, G., Unamuno, V., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Samson, R., Tack, F.M.G. and Verloo, M.G., 2007, "Comparison of Cd Extractability from Soils and Sediments by Commonly Used Single Extraction Protocols," *Geoderma*, Vol. 141, pp. 247-259.
- MIRECO(Korea Mine Reclamation Corporation), 2011, "Mine Reclamation Statistical Yearbook," Korea Mine Reclamation Corporation, Seoul.
- National Statistical Office, 2010, "Statistics of rice grain consumption per capita in Korea, 2010," National Statistical Office in Korea, Dae-Jeon.
- Quevauviller, P., Rauret, R., Rubio, G., Lopez-sanchez, J.F., Ure, A.M., Bacon, JR. and Muntau, H., 1997, "Certified reference materials for the quality control of EDTA-and acetic acid-extractable contents of trace elements in sewage sludge amended soils(CRM483 and 484)," *Anal. Chem.*, Vol. 357, pp. 611-618.
- Rauret, G., Lopez-Sanchez, J.F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A. and Quevauviller, Ph., 1999, "Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials," *J. Environ. Monit.* Vol. 1, p. 57-61.
- Sastre, J., Hernandez, E., Rodriguez, R., Alcobe, X., Vidal, M.

- and Rauret, G., 2004, "Use of sorption and extraction tests to predict the dynamics of the interaction of trace elements in agricultural soils contaminated by a mine tailing accident," *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 329, pp. 261-281.
- Son, H.O. and Jung, M.C., 2011 "Relative extraction ratio (RER) for arsenic and heavy metals in soils and tailings from various metal mines, Korea," *Environ. Geochem. Health.*, Vol. 33, pp. 121-132.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M., 1979, "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals," *Anal. Chem.*, Vol. 51, pp. 844-851.
- Ure, A.M., 1995, "Methods of analysis for heavy metals in soils," Blackie and Son, Glasgow. pp. 58-102.
- Van Ranst, E., Verloo, M., Demeyer, A. and Pauwels, J.M., 1999, "Manual for the soil chemistry and fertility laboratory: analytical methods for soils and plants equipment, and management of consumables," International Training Centre for Post-Graduate Soil Scientists, Universiteit Gent, Gent, Belgium.
- Vidal, M., Lopez-Sanchez, J.F., Sastre, J., Jimenez, G., Dagnac, T., Rubio, R. and Rauret, G., 1999, "Prediction of the impact of the Aznalcollar toxic spill on the trace element contamination of agricultural soils," *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 242, pp. 131-148.
- Yoo, H.I., Seo, Y.S., Jeon, S.H., Lee, M.H., Yoon, S.J., Hur, S.N. and Kim, S.Y., 1998, "Survey on heavy metals in paddy soil and brown rice in Korea," *J. of National Institute of Environmental Reserch*, Vol. 10, pp. 155-163.

권 지 철

2012년 세종대학교 이학박사(지구환경학 전공)

현재 세종대학교 전임 연구원
(E-mail; hang1299@naver.com)

정 명 채

현재 세종대학교 에너지자원공학과 교수
(本學會誌 第50卷 第1号 參照)

정 선희

현재 세종대학교 에너지자원공학과 재학 중(석사과정)
(本學會誌 第50卷 第1号 參照)

김 태 승

1992년, 충북대학교 이학박사(물리화학 전공)

현재 환경부 국립환경과학원 토양지하수연구과
(E-mail; tskim99@korea.kr; ts-kim@daum.net)