

폐금속 광산에 식생하는 쑥의 카드뮴 흡수 해석을 위한 통계적 토양질 평가

Soil quality assessment for cadmium uptake of *Artemisia princeps* at abandoned metalliferous mines using statistical analysis

조훈제 · 김대연 · 이현준 · 오현주 · 강성욱 · 김정규 · 정진호 †
Hun-Je Jo · Dae-Yeon Kim · Hyun-Joon Lee · Hyun-Ju Oh · Sung-Wook Kang · Jeong-Gyu Kim · Jinho Jung †

고려대학교 환경생태공학부
Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University

(2009년 8월 21일 접수, 2009년 12월 22일 채택)

ABSTRACT : Physical, chemical and biological properties of soils and cadmium(Cd) content of *Artemisia princeps* var. orientalis collected from 10 metalliferous mines were analysed. Cd contents of unplanted soils and rhizosphere soils were not significantly different($p < 0.05$), and mean values were 5.92 and 5.91 mg/kg, respectively. In addition, Cd content of rhizosphere soils were correlated with Cd content of *Artemisia princeps* ($p < 0.05$, $R^2_{shoot} = 0.3120$, $R^2_{root} = 0.4177$). Minimum data set(MDS) of soil quality parameters for statistical assessment of Cd uptake was established by principal component analysis, and it was identified as organic matter(OM), dehydrogenase activity(DHA), pH, exchangeable Mg. According to multiple regression analysis using the MDS, coefficients of determination (R^2) for Cd uptake of shoot and root of *Artemisia princeps* were found to be 0.3418 and 0.5121, respectively. This suggests that statistical soil quality assessment using the MDS seems a useful tool to interpret heavy metal uptake of plant.

Key words : Heavy metal, Minimum data set, Principal component analysis, Soil quality index

요약 : 국내 10개의 폐금속 광산을 대상으로 토양의 물리적, 화학적 및 생물학적 특성과 자생하고 있는 쑥(*Artemisia princeps* var. orientalis)의 카드뮴(Cd) 함량을 분석하였다. 식생이 없는 대조군 토양과 쑥 근권 토양의 Cd 함량은 산술평균으로 각각 5.92와 5.91 mg/kg으로 나타났으며, 분산분석 결과 두 토양간의 Cd 함량에는 유의한 차이가 없었다($p < 0.05$). 그리고 쑥의 지상부와 지하부의 Cd 함량은 근권 토양의 Cd 함량과 유의한 상관관계를 보였다($p < 0.05$, $R^2_{shoot} = 0.3120$, $R^2_{root} = 0.4177$). 쑥의 Cd 흡수 해석을 위하여 주성분 분석(PCA)을 실시한 결과, 최소 토양질 인자(MDS)로 유기물 함량(OM), 탈수소효소 활성도(DHA), pH, 치환성 Mg가 선정되었다. MDS를 이용한 다중회귀분석 결과, 쑥의 지상부와 지하부의 Cd 함량의 회귀식에 대한 결정계수(R^2)는 각각 0.3418과 0.5121로 나타났다. 이것은 MDS를 이용한 통계적인 토양질 평가가 식물의 중금속 흡수를 해석하는 유용한 기법이라는 것을 나타낸다.

주제어 : 중금속, 최소 인자, 주성분 분석, 토양질 지표

1. 서론

토양질(soil quality) 개념은 식량생산, 폐기물의 재활용, 토양침식 및 수질오염의 방지 등 토양이 제공하는 다양한 기능을 설명하기 위하여 제안되었다. 토양질에 대한 정의는 여러 학자들에 의해 주장되었는데, Doran과 Parkin은 현재 또는 미래에 생태계에서 토양의 생산성과 환경의 질을 유지하는 기능을 할 수 있는 토양의 능력이라고 정의하였다.¹⁾ 또한 Larson과 Pierce는 토양질이란 토양의 이용 및 관리목적에 대해 적합한 정도라고 설명하였다.²⁾ 특히, 1990년대 이후 지속가능한 토양의 이용에 대한 관심이 증가함에 따라 토양질 평가에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

토양질 평가에 있어서 모든 토양 인자를 고려하는 것은 불가능하므로 토양의 이용목적에 적합한 인자를 선별하는 것이 중요하다. 이런 점에서 토양의 특성을 대표할 수 있는 최소한의 인자인 MDS(minimum data set)를 이용하여 토양질을 평가하는 방법이 요구된다.³⁾ MDS를 구축하여 토양질을 평가하는 연구는 대부분 농업생산 측면에서 연구되고 있는데, 작물의 생산량을 설명하기 위하여 MDS를 구축하고 토양질을 평가한 연구가 수행된 바 있다.^{4,5)} 이러한 토양질 평가는 농경지뿐만 아니라 폐금속 광산과 같이 중금속으로 오염된 토양에도 적용될 수 있다. 일반적으로 폐금속 광산 토양은 유기물 함량, 질소와 인의 유효도, 양분과 수분의 보유능력이 낮은 특성을 갖고 있다.⁶⁾ 이와 같은 토양의 물리화학적 특성은 식물의 중금속 흡수

† Corresponding author : E-mail : jjung@korea.ac.kr Tel : 02-3290-3066 Fax : 02-3290-3509

에 영향을 미치기 때문에 폐금속 광산의 식물정화를 위한 기초 자료로서 토양질 평가가 필요한 실정이다. 그러나, 국내의 폐금속 광산을 대상으로 식물의 중금속 흡수를 설명하기 위하여 토양질 평가를 실시한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 10개의 폐금속 광산을 대상으로 중금속으로 오염된 토양의 물리적, 화학적 및 생물학적 특성을 분석한 다음, 주성분 분석을 통하여 최소 토양질 인자인 MDS를 선별하였다. 그리고 중금속에 대한 내성과 흡수력이 우수하다고 알려진 쑥(*Artemisia princeps* var. *orientalis*)의 Cd 흡수를 정량적으로 해석하기 위하여 MDS를 이용한 다중회귀분석을 실시하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료 채취

총 10개의 폐금속 광산에서 식물과 토양 시료를 2005년 8월에 채취하였다. 대상 폐금속 광산은 강원도 정선군 임계면의 동명광산, 강원도 정선군 임계면 낙천리의 낙천광산, 강원도 정선군 임계면 골지리의 골지리광산, 강원도 정선군 남면 낙동리의 낙동광산, 강원도 영월군 상동면 구래리의 상동광산, 경기도 광명시 학온동의 가학광산, 경기도 포천시 창수면 운산리의 용석광산, 경기도 포천시 영북면 야미리의 포천광산, 충청북도 제천시 수산면 계란리의 서보광산, 충청북도 제천시 수산면 구곡리의 봉산광산이었다. 식물 시료는 폐금속 광산에 공통적으로 자생하는 쑥(*Artemisia princeps* var. *orientalis*)을 갱구로부터 약 50 m 이내에서 각 5점씩 임의로 채취하였다. 토양 시료는 쑥을 채취한 지점의 근권 토양(각 광산별로 5점)을 채취하였고, 갱구 주변의 식생이 없는 표층토 20 cm(A horizon)에서 채취한 토양을 식생대조건 토양(각 광산별로 1점)으로 사용하였다.

2.2. 쑥과 토양의 카드뮴 분석

중금속 분석을 위하여 쑥을 지상부(shoot)와 지하부(root)로 분리한 다음 80°C에서 48시간 건조하여 분해 전까지 데시케이터에 보관하였다. 지하부의 경우, 뿌리에 붙어있는 토양입자를 흐르는 물로 제거한 다음 5 mM CaCl₂ 용액에 5분 동안 정치시켜 세포간 공간(apoplast space)에 흡착되어 있는 중금속을 제거하고 증류수로 다시 세척하였다.⁷⁾ 습식 분해는 건조한 식물체 시료 1 g에 황산 5 mL을 가하여 1시간동안 가열한 후, 분해 액이 백색으로 투명하게 될 때까지 과산화수소를 0.5 mL씩 3회 첨가하여 실시하였다. 분해 액은 Whatman No. 6 여지로 여과하여 50 mL로 희석한 다음, 유도결합플라즈마분

광계(ICP-AES, Jobin Yvon, 138 Utrace, Edison, NJ, USA)를 이용하여 중금속의 농도를 정량하였다.⁸⁾

폐금속 광산에서 채취한 토양시료는 음건 후 분쇄하여, 2 mm 체눈을 통과시킨 시료를 일반성분 분석용으로 사용하였다. 그리고 이 토양을 다시 0.15 mm의 표준체를 이용하여 거른 후 중금속 분석용으로 사용하였다. 토양 중금속 분석을 위한 산분해(acid digestion)는 미국 EPA 방법(Method 3050A)에 준하여 실시하였다.⁹⁾

2.3. 토양의 물리화학적 특성 분석

토양의 물리화학적 특성은 농촌진흥청 토양화학분석법에 준하여 분석하였다.⁸⁾ 구체적으로, 입도분석은 피펫법을 이용하여 모래(sand), 미사(silt) 및 점토(clay) 함량을 정량하여 실시하였다. 토양의 pH는 1:5 H₂O법을 사용하였는데, 현탁액의 pH는 유리전극(Orion, 720A⁺)으로 측정하였고, 추출한 현탁액의 여액의 전기전도도(EC)도 측정하였다. 치환성 Na, Mg, K, Ca 함량은 1 N NH₄OAc(pH 7)를 가하여 추출한 여액을 원자흡광광도계(AAS, Sunil, Analab 9100 0A)로 측정하였다. 양이온 치환용량(CEC)은 1 N NH₄OAc(pH 7)로 치환·침출 후 치환·흡착된 NH₄⁺을 증류·적정하여 측정하였다. 유효인산(P₂O₅)은 Bray No. 1법에 준하여 측정하였고, 무기질소는 2 M KCl로 추출한 침출액을 이용하여 질산성 질소(NO₃⁻-N)는 Brucine법으로, 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)는 인도페놀법으로 분석하였다. 유기물함량(OM)은 0.5 mm 체눈을 통과시킨 토양시료를 이용하여 Tyurin법으로 측정하였다.

최대수분보유력(MWHC)은 토양 5 g을 유리병에 채우고, 여과지를 붙이고 뒤집어서 증류수로 3시간 동안 저면 관수시켜 물을 포화시킨 후, 젖은 모래에서 2시간 과포화된 수분을 배수시킨 다음 토양 시료의 중량수분 함량을 측정하여 구하였다(OECD, 2000).¹⁰⁾ 그리고, 생물학적 인자인 탈수소효소 활성도(DA)는 토양 10 g에 CaCO₃ 0.1 g과 3% TTC(2,3,5-triphenyl tetrazolium chloride)와 증류수를 혼합하여 24 ± 1°C에서 24시간 배양한 후, 메탄올을 첨가하여 혼합하고 여과한 다음 흡광광도계(Spectrophotometer, Varian, Cary 50 probe)를 이용하여 측정하였다.¹¹⁾

2.4. 자료 분석

모든 자료의 통계분석은 SAS(SAS Institute, Cary, NC)를 이용하여 실시하였다. 우선, 식생대조건 토양과 쑥 근권 토양간의 물리적, 화학적, 생물학적 인자 및 중금속 함량의 유의한 차이가 있는지를 확인하기 위하여 분산분석을 실시하였다. 그리고 쑥의 지상부 및 지하부와 토양의 중금속 함량간

의 상관관계도 분석하였다.

폐금속 광산 토양질 평가를 위한 MDS를 선별하기 위하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 토양 인자들을 가지고 주성분 분석(PCA)을 실시하였다.⁵⁾ 주성분 분석을 통하여 고유값(eigenvalue)이 1 이상인 값을 가지는 주성분을 도출하였다. 그리고 선정된 각 주성분의 토양 인자 중에서 고유벡터(eigenvector)의 크기가 최고인 것을 MDS 구성요소로 선정하였다. 이후 토양 인자들 간의 상관관계를 다시 분석하여 값이 0.7 이상이면 같은 주성분의 다른 토양 인자(고유벡터의 크기가 다음으로 큰 인자)로 대체하였다. 최종적으로 선정된 MDS 구성요소들이 폐금속 광산에서 썩의 Cd 흡수를 얼마나 잘 설명하고 있는지 알아보기 위하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐금속 광산 토양의 특성

10개의 폐금속 광산에서 채취한 식생대조군 토양(unplanted soil)과 썩 근권 토양(rhizosphere soil)의 물리적, 화학적, 생물학적 인자 및 Cd 함량에 대한 분석결과는 Table 1과 같다. 폐금속 광산의 식생대조군 토양과 근권 토양의 Cd 함량은 산술평균으로 각각 5.92와 5.91 mg/kg으로 나타났다. 우리나라 비오염 지역 토양 중 Cd 함량은 0.2~1.7 mg/kg의 범위이며,¹²⁾ 토양환경보전법 상의 토양오염 농경지를 포함한 “가” 지역의 우려기준

과 대책기준이 각각 1.5와 4 mg/kg임을 고려할 때,¹³⁾ 폐금속 광산의 Cd 오염이 심각하다는 것을 알 수 있다.

폐금속광산 토양들은 대부분 모래(sand)를 많이 포함하고 있는 사토 혹은 양질사토였다. 임 등은 양토에서 사토로 갈수록 보수 및 보비력이 감소하여 식물생장 및 작물생산량이 낮아진다고 보고하였다.¹⁴⁾ 그리고 토양의 pH가 산성이면 일반적으로 중금속의 유효도가 증가하는데, 조사한 토양들은 중성 내지 알칼리성을 지니고 있었다. 양이온치환용량(CEC)은 우리나라 표토 평균 값인 8.79 cmol/kg 보다 매우 낮았는데, 이것은 양이온인 중금속이 쉽게 용출되어 이동할 수 있음을 의미한다.¹⁵⁾ 토양유기물(OM)의 농도는 1.19~6.41%의 범위를 보였는데, 이 수치는 우리나라 경작지 토양의 평균 유기물 함량인 2.4%보다도 오히려 높은 수치를 나타냈다.^{16,17)}

유효인산(P₂O₅) 함량은 10 mg/kg에도 못 미치는 지역이 상당수 있었는데, 이것은 벼의 논토양 적정 유효인산 함량인 140 mg/kg과 발작물의 적정 유효인산 농도인 300~500 mg/kg과 비교하였을 때, 매우 낮은 형편임을 알 수 있었다.^{18,19)} 탈수소효소활성(DHA)은 식생대조군 토양에서 0.04~3.91 mg TPG/kg, 근권 토양에서 0.11~16.96 mg TPG/kg으로 조사되었는데, 일반적으로 근권 토양에서의 미생물활성은 비근권 토양과 비교하여 더 높은 것으로 알려져 있다.²⁰⁾

식물의 자생이 토양의 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 식생대조군 토양과 썩 근권 토양 인자들 간의 분산분석을

Table 1. Properties of unplanted and rhizosphere soils at abandoned metalliferous mines

Soil properties	Unplanted soil				Rhizosphere soil					
	min.	mean	max.	SD*	min.	mean	max.	SD		
Physical	Texture(%)	Sand	76.35	86.98	97.75	7.74	62.92	88.04	98.28	8.18
		Silt	0.29	2.55	7.48	2.66	0.35	4.79	30.58	5.23
		Clay	0.42	10.48	22.95	7.53	0.05	7.17	36.24	6.69
	MWHC (%)	19.69	30.60	38.13	6.77	20.40	37.49	75.60	12.34	
	pH (1:5)	5.30	7.59	8.96	1.46	5.29	7.46	9.08	1.11	
	EC (dS/m)	22.10	115.82	485.80	145.79	2.40	76.39	440.00	69.02	
Chemical	Exchangeable cations (cmol/kg)	Na	0.183	0.232	0.316	0.053	0.05	0.16	0.33	0.06
		Mg	0.098	0.214	0.350	0.091	0.07	0.46	2.75	0.44
		K	0.085	0.258	0.386	0.121	0.08	0.321	0.95	0.18
		Ca	0.180	0.434	0.854	0.248	0.06	0.60	1.88	0.29
		CEC (cmol/kg)	0.65	3.24	6.05	1.83	0.53	3.64	9.18	1.90
		OM (%)	1.19	5.01	6.41	1.19	2.48	5.26	11.92	1.95
		P ₂ O ₅ (mg/kg)	0.94	10.43	26.94	8.18	0.79	15.65	178.16	25.68
Biological		NO ₃ -N (mg/kg)	9.92	30.56	50.79	13.24	3.33	17.83	53.46	13.85
		NH ₄ -N (mg/kg)	7.23	59.57	181.20	50.72	0.00	79.81	445.87	76.49
		Cd (mg/kg)	1.59	5.92	23.49	7.13	0.39	5.91	50.22	10.00
		DHA (mg TPF/kg)	0.04	0.85	3.91	1.32	0.11	3.84	16.96	4.82

MWHC, maximum water holding capacity; EC, electrical conductivity; CEC, cation exchange capacity; OM, organic matter; DHA, dehydrogenase activity

* standard deviation

Table 2. Cadmium content of *Artemisia princeps* var. *orientalis* at abandoned metalliferous mines

Part	min.	mean	max.	SD*
shoot (mg/kg)	1.31	9.76	52.10	9.05
root (mg/kg)	3.37	9.95	33.87	7.12

* standard deviation

Table 3. Coefficients of determination (R^2) for correlation of soil Cd content (Soil Cd) or minimum data set selected by principal component analysis (PCA-MDS) against Cd content of *Artemisia princeps* var. *orientalis*

Part	Soil Cd*	PCA-MDS*
shoot	0.3120	0.3418
root	0.4177	0.5121

* significant at $p < 0.05$

실시한 결과, CEC, EC, Na, Mg, K, Ca 함량은 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 이것은 식생이 토양의 화학적 인자에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.²¹⁾ 그러나, 식생대조군 토양과 싹 근권 토양의 Cd 함량에는 유의한 차이가 없었는데 ($p < 0.05$), 이것은 싹의 Cd 흡수로 인하여 토양의 Cd 함량이 크게 감소되지 않는다는 것을 간접적으로 보여주고 있다.

싹의 지상부(shoot) 및 지하부(root)의 Cd 함량은 Table 2에 나타나 있다. Kabata 등은 식물체 중 Cd 독성함량 범위를 3~8 mg/kg으로 제시하고 있는데, 싹은 이보다 더 높은 Cd 함량을 보이고 있었다.²²⁾ 그리고 싹의 지하부와 지상부의 Cd 함량은 유의한 차이를 보이지 않았는데($p < 0.05$), 이것은 Cd가 흡수된 후에 뿌리에서 식물 상부까지 쉽게 이동된다는 것을 의미한다. 김 등은 싹 지하부의 Cd 함량과 비교하여 지상부의 함량이 오히려 높거나 유사한 값을 보이고 있다고 보고하였다.¹⁵⁾ 그리고 싹의 지하부와 지상부의 Cd 함량은 근권 토양의 Cd 함량과 유의한 상관관계를 보였다(Table 3, $R^2_{shoot} = 0.3120$, $R^2_{root} = 0.4177$). 김 등은 휴·폐광지역 오염지역에서 식물체내의 중금속 함량이 토양 내 중금속 함량에 영향을 받았다고 보고하고 있다.¹⁵⁾

3.2. MDS를 이용한 토양질 평가

중금속으로 오염된 토양의 식물정화를 위하여 토양의 어떤 인자들이 식물의 중금속 흡수에 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다. 일반적으로 싹의 Cd 흡수는 토양에 존재하는 Cd의 형태에 영향을 미치는 토양의 물리화학적 특성과 식물 성장과 관련 있는 토양 비옥도 인자들과 깊은 관련이 있다고 알려져 있다.²³⁾ 그러나 이것을 설명하기 위하여 모든 토양 인자들을 고려하는 것은 불가능하기 때문에, 주요한 인자들을 선별하기 위한 주성분 분석(PCA)을 실시하였다.⁵⁾ 주성분 분석에 사용한 토양 인자들은 10개의 폐금속 광산에서 유의한 차이($p < 0.05$)를 보이고 있는 최대수분보유량(MWHC), pH, 전기전도도(EC), 치환성 Na, Mg, K, 양이온치환용량(CEC), 유기물 함량(OM), 유효인산(P_2O_5), 질산성 질소(NO_3-N), 탈수소효소 활성도(DHA) 이었다. 이들 간의 관련성을 평가하기 위하여 단순상관분석을 실시하였다(Table 4). 전기전도도는 최대수분보유량($r = 0.2930$) 및 pH($r = 0.3183$)와 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 유기물 함량은 최대수분보유량($r = 0.4121$) 및 전기전도도($r = 0.3589$)와 더 높은 양의 관계를 나타냈다.

상기 11개의 토양 인자들에 대한 주성분 분석결과는 Table 5에 나타나 있다. 고유값(eigenvalue)이 1 이상인 주성분(PC)은 총 5개로 나왔으며, PC1부터 PC5에서 최고의 고유벡터 값을 가지는 토양질 인자들은 각각 OM, pH, Mg, DHA, Mg이었다. PC1과 PC5에서 Mg가 중복되므로 PC5에서 Mg 다음으로 고유벡터 값이 높은 CEC를 MDS 구성요소로 추가하였다. 이렇게 선정된 OM, pH, Mg, DHA, CEC 간의 상관관계가 0.7 미만이므로(Table 4), 이들 모두를 MDS로 최종 선정하였다. 싹의 Cd 흡수에 영향을 미치는 주요한 인자들은 CEC, OM, P_2O_5 , pH 등이라고 알려져 주성분 분석을 통하여 구한 MDS와 매우 일치함을 알 수 있다.^{23~25)} 한편, 유효인산(P_2O_5)은 조사 지역인 폐금속 광산에서 매우 낮았기 때문

Table 4. Pearson correlation coefficients for soil quality indicators

	MWHC	pH	EC	Na	Mg	K	CEC	OM	P_2O_5	NO_3-N	DHA
MWHC	1.0000	-0.2023	0.2930*	-0.0328	0.1570	-0.2193	0.2706	0.4121**	-0.0138	0.0571	0.0094
pH		1.0000	0.3183*	0.1180	-0.1109	0.0621	-0.1430	-0.0041	-0.4062**	0.2014	0.2681
EC			1.0000	0.0225	0.0545	-0.1293	-0.0332	0.3589*	-0.0273	0.2359	0.1877
Na				1.0000	0.1762	0.2043	-0.2153	-0.1545	-0.2613	-0.0521	-0.1545
Mg					1.0000	0.0901	0.0407	0.1303	-0.0899	-0.2687	0.2326
K						1.0000	-0.0945	-0.0367	-0.0238	-0.1578	-0.3973**
CEC							1.0000	0.2619	-0.1581	-0.2923*	0.0773
OM								1.0000	0.0108	0.0597	0.0337
P_2O_5									1.0000	0.0140	-0.0759
NO_3-N										1.0000	0.0302
DHA											1.0000

* significant at $p < 0.05$ ** significant at $p < 0.01$

Table 5. Principal component analysis (PCA) for rhizosphere soils at abandoned metalliferous mine

	Principal Component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Eigenvalue	2.0683	1.8043	1.5626	1.3176	1.1034
Proportion	0.1880	0.1640	0.1421	0.1198	0.1003
Parameter	Eigenvector				
MWHC	0.4631	-0.2050	0.0849	0.2999	0.0510
pH	0.0639	0.6113	0.1306	-0.0870	-0.2385
EC	0.4217	0.3066	0.0045	0.2989	0.1333
Na	-0.2078	0.2248	0.4352	0.2480	0.2408
Mg	0.1336	-0.1213	0.4977	-0.0987	0.5620
K	-0.3489	-0.0285	0.3079	0.3861	-0.1219
CEC	0.2878	-0.3434	0.2150	-0.2014	-0.5227
OM	0.4650	-0.1119	0.0870	0.3505	-0.1111
P ₂ O ₅	-0.0532	-0.3220	-0.4616	0.1306	0.4152
NO ₃ -N	0.1137	0.3790	-0.4206	0.2736	0.0222
DHA	0.3256	0.2156	0.0084	-0.5809	0.2750

에 MDS에 포함되지 않은 것으로 생각된다.

주성분 분석을 통하여 구한 MDS가 쑥의 Cd 흡수를 얼마나 잘 설명하고 있는 지 알아보기 위하여 다중회귀분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{쑥 지상부 Cd 함량} = & 23.48176 - 0.01627[\text{Mg}] + \\ & 2.23626[\text{OM}] - 3.09542[\text{pH}] - \\ & 0.29589[\text{DHA}] + 0.60841[\text{CEC}] \\ R^2 = & 0.3418 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{쑥 지하부 Cd 함량} = & 22.08921 - 0.01631[\text{Mg}] + \\ & 2.39938[\text{OM}] - 2.97400[\text{pH}] - \\ & 0.43440[\text{DHA}] + 0.75140[\text{CEC}] \\ R^2 = & 0.5121 \end{aligned}$$

다중회귀분석 결과, 쑥의 Cd 함량은 토양의 유기물 함량 및 양이온치환용량과 정의 관계를, pH, Mg 및 DHA와 부의 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 유기물함량과 pH가 쑥의 Cd 흡수에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 토양의 유기물 함량은 토양의 비옥도와 관련이 있는 인자로서 쑥의 Cd 흡수를 촉진하였다고 생각한다. 그리고 일반적으로 토양의 pH가 증가할수록 중금속의 유효도가 감소하기 때문에 pH는 식물의 중금속 흡수와 부의 상관관계를 가지고 있다고 판단된다.²⁶⁾ 따라서 이러한 토양 인자들을 개선한다면, Cd로 오염된 토양에서 쑥에 의한 Cd 흡수를 더 증가시킬 수 있을 것이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 다중회귀식에 의하여 계산한 쑥의 Cd 함량은 측정값과 유의한 상관관계를 보여 주었다. 결정계수(R^2)를 통하여 알 수 있듯이, 다중회귀식은 쑥의 지상부 Cd 흡수의 분산을 34% 정도, 지하부는 이 보다 더 높은 51% 정도

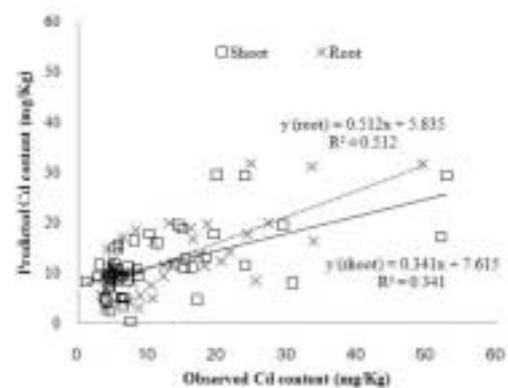


Fig. 1. Correlation between calculated and observed cadmium contents of *Artemisia princeps var. orientalis* at abandoned metalliferous mines

를 설명할 수 있었다. 이것은 단일 인자인 토양의 Cd 함량으로 쑥의 Cd 흡수를 설명하는 것보다는(Table 3의 결정계수 참고) 통계적으로 선별된 다중 인자로 쑥의 Cd 흡수를 설명하는 것이 더 좋은 결과를 보여준다는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

폐금속 광산 토양질 인자들의 주성분 분석을 통하여 선별된 MDS(유기물 함량(OM), 탈수소효소 활성도(DHA), pH, 치환성 Mg)를 이용하여 쑥의 지상부 및 지하부 Cd 함량을 통계적으로 유의하게 정량적으로 해석할 수 있었다. 이것은 다양한 토양의 특성이 쑥의 Cd 흡수에 영향을 미친다는 것을 나타내며, 이들 토양질 인자의 개선을 통하여 쑥의 Cd 흡수를 촉진할 수 있다는 것도 의미한다. 그러나 본 연구에서 구축된 MDS의 효용성을 평가하기 위하여 다른 폐금속 광산을 대상

으로 한 검증 연구가 이루어 져야 할 것이다.

토양질 평가의 궁극적인 목표는 MDS로 선정된 인자를 기반으로 각 인자들에 대한 표준화된 지수화와 이들 지수를 통합하여 하나의 토양질 지표(soil quality index)를 만드는 것이다. 따라서 본 연구를 바탕으로 추가적인 연구가 더 진행된다면 폐금속 광산 축의 Cd 흡수 해석을 위한 토양질 지표를 만들 수 있을 것으로 생각한다. 이러한 지표는 궁극적으로 폐금속 광산의 복원을 모니터링할 수 있는 지표로도 활용될 수 있을 것이다.

KSEE

사 사

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(토착식물을 이용한 중금속 오염지역의 자연형 장기복원기술개발)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Doran, J. W., and Parkin, B. T., "Defining and assessing soil quality," *Soil Sci. Soc. Am.*, **35**, 3~21(1994).
- Larson, W. E., and Pierce, F. J., "The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management," *Soil Sci. Soc. Am.*, **35**, 37~51(1994).
- Liebig, M. A., Varvel, G., and Doran, J., "A simple performance based index for assessing multiple agroecosystem functions," *Agronomy Journal*, **93**, 313~318(2001).
- Bram, G., Ken, D. S., and Jozef, D., "A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico," *Soil and Tillage Research*, **87**, 163~174(2006).
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., and Mitchell, J. P., "A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California," *Agric. Ecosystems Environ.*, **90**, 25~45(2002).
- Tordoff, G. M., Baker, A. J. M., and Willis, A. J., "Current approaches to revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes," *Cheomosphere*, **41**, 219~228(2000).
- Rauser, W. E., and Ackerley, C. A., "Localization of cadmium in granules within differentiating and mature root cells," *Can. J. Botany*, **65**, 643~646(1987).
- NIAS, Method of Soil and Plant Analysis, National Institute of Agriculture Science and Technology, Suwon(2000).
- USEPA, Acid digestion of sediments, sludge, and soils, Method 3050A, United States Environmental Protection Agency(1992).
- OECD, Enchytraeidae reproduction test, OECD Guideline 200, Paris, pp. 13(2000).
- Casida, J., Klein, L. E., and Santoro, D. A., "Soil dehydrogenase activity," *Soil Sci.*, **98**, 371~376(1964).
- 전효택, 정명채, "함우라늪 흑색세일 분포지역에서의 유해성 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구," *한국자원공학회지*, **24**, 245~260(1991).
- 환경부, 토양환경보전법, (2006).
- 임수길, 윤준현, 이창호, "무궁화 생육에 미치는 토양의 영향(토성과 pH를 중심으로)," *자연자원논집*, **34**, (1994).
- 김정규, 임수길, 이상환, 이창호, 정창윤, "휴폐광산지역 오염토양의 phytoremediation을 위한 식물자원 검색," *한국환경농학회지*, **18**, 28~34(1999).
- 농촌진흥청, 농업환경 변동 조사사업 보고서, (2003).
- 농촌진흥청, 농업환경 변동 조사사업 보고서, (2005).
- 정병간, 최정원, 윤을수, 윤정희, 김유학, "우리나라 밭 토양 화학적 특성," *한국토양비료학회지*, **34**, 326~332(2001).
- 정병간, 윤정희, 김유학, 김석현, "논토양에서 유효인산 함량과 인산 흡수능에 따른 0.01M CaCl₂ 가용 인산 농도 변화," *한국토양비료학회지*, **36**, 384~390(2003).
- Kandeler, E., Marschner, P., Tschirko, D., Gahoonia, T. S., and Nielsen, N. E., "Microbial community composition and functional diversity in the rhizosphere of maize." *Plant Soil*, **238**, 301~312(2002).
- Paniagua, A., Kammerbauer, J., Avedillo, M., and Andrews, A. M., "Relationship of soil characteristics to vegetation successions on a sequence of degraded and rehabilitated soils in Honduras," *Agric. Ecosystems Environ.*, **72**, 215~225(1999).
- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H., Trace elements in soil and plants. CRC Press Inc., New York, (1984).
- 윤영만, Zn, Cd 처리토양에서 쑥(*Artemisia princeps* var. *orientalis*)의 중금속흡수와 생육에 미치는 토성, 토양수분, 토양 pH의 영향, 고려대학교 석사학위논문, pp. 13~43(1997).
- 이옥민, 카드뮴의 현미로의 이행에 미치는 개량제의 영향, 고려대학교 석사학위논문, pp. 18~53(2004).
- 김환기, 이성백, "토양층에서 카드뮴 흡착에 대한 유기물의 영향," *대한환경공학회지*, **20**(1), 1~8(1997).
- Wang, X. P., Shan, X. Q. Zhang, S. Z., and Wen, B., "A model for evaluation of the phytoavailability of trace elements to vegetables under the field conditions," *Cheomosphere*, **55**, 811~822(2004).