

온산공단 주변 산림토양과 인동덩굴의 중금속 함량

박은희¹ · 조민기² · 양재경² · 김종갑² · 문현식³

¹국립공원관리공단, ²경상대학교 환경산림과학부, ³경상대학교 농업생명과학연구원
(2006년 7월 26일 접수; 2006년 11월 15일 수락)

Heavy Metal Contents of Forest Soil and *Lonicera japonica* near Onsan Industrial Region

Eun-Hee Park¹, Min-Ki Cho², Jae-Kyung Yang², Jong-Kab Kim², and Hyun-Shik Moon³

¹Korea National Park Service, Tongyeong 650-140, Korea

²Division of Environmental Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

³Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received July 26, 2006; Accepted November 15, 2006)

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the heavy metal content (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) of forest soil and of *Lonicera japonica* and to understand the correlation in contents of heavy metal between forest soil and *L. japonica* near the Onsan industrial region. The content of As, Cd, Cu, Pb and Zn was higher in the industrial region than in forest regions, but Fe, Mn and Ni content was higher in forest regions than in the industrial region. Among heavy metals, the content of Cd, Cu, Pb and Zn in leaf, stem and root of *L. japonica* growing near industrial regions was significantly higher ($p < 0.05$) than in forest regions. The content of As, Cd, Cu, Pb and Zn in *L. japonica* tissues showed a positive or negative correlation with those in forest soils. Correlation coefficients of Cu content between forest soil and organs of *L. japonica* ranged from 0.93 to 0.99 ($p < 0.01$). It was concluded that *L. japonica* could be used in heavy metal (Cd, Cu, Pb, and Zn) decontamination of forest soils of industrial regions.

Key words : Forest soil, Heavy metal, *Lonicera japonica*, Onsan industrial region

I. 서 론

최근 고도의 산업화와 도시화로 인한 화석연료의 수요 급증과 광범위한 오염물질의 확산 등은 그 정도와 복잡성이 매우 심화되어 대기오염의 피해가 날로 심각해지고 있는 실정이다. 대기오염으로 인한 생태계의 피해는 세계적으로 환경문제화되고 있어 이에 대한 조사와 연구가 지구적인 규모로 확산되고 있다. 대기오염물질은 산림생태계의 수관 상층부에만 영향을 미치는 것이 아니라 강우 시 수관 통과수와 수간류에 의해

여 임상내의 토양에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hoffman, 1980). 대기오염물질이 산림생태계 내로 유입되면 식물의 생식기관이나 잎에 영향을 미치는 직접적인 피해와 토양산성화 등과 같은 간접적인 피해가 발생하게 되며 이러한 피해들이 복합적으로 작용하게 된다(Mengel and Kirkby, 1987; Marschner, 1995). 전자의 경우는 초기 강우에 의한 일시적인 현상으로 추정되며 토양산성화에 의한 영향은 장기적인 교란의 결과로서 일단 발생되면 산림생태계에 지속적인 영향을 미칠 것으로 추정된다. 비록 어느 영향이 더 크게

작용하는지는 밝혀지지 않고 있으나 이러한 복합적인 영향으로 산림의 구조와 기능이 단순해져 산림생태계에 악영향을 미치게 되어 산림의 쇠퇴현상이 나타나게 된다(Bell, 1994). 국내에서 대기오염물질에 의한 식물이나 산림생태계의 피해에 대한 연구는 주로 공단지역을 중심으로 이루어지고 있으나(Kim, 1976; Kim and Kim, 1982; Lee and Lee, 1995; Mun et al., 1998; Lee, 1999) 대기오염으로 인하여 야기되는 직간접적인 영향인자와 산림피해와의 관계는 아직 구체적으로 밝혀지지 않고 있다.

산림이 대기오염과 산성강하물에 의한 생리적 피해를 받아 수목의 성장 및 번식력이 감소하게 되면 결국에는 대기오염에 내성이 약한 수종들은 내성이 강한 수종들로 대체되어 산림의 생태계 교란이 일어날 수 있다고 보고되고 있다(Puckett, 1982). 산림생태계의 피해가 복합적인 인자들에 의한 것임을 고려하면, 외부로부터 상당량의 중금속이 지속적으로 유입될 것으로 예상되는 공단지역과 같은 특정 산림지역은 토양 내 중금속 함량이 산림쇠퇴를 가속시킬 가능성이 높을 것으로 생각된다. 산림토양 내 중금속의 동태는 식물체 내의 축적과 이동에 직접적인 영향을 미치므로 산림토양은 물론 식물체 내의 중금속 정량화는 토양산성화에 따른 산림피해의 정도를 추정하는데 필수적인 연구내용이라 할 수 있으나, 온산공단 지역에서의 산림토양 내 중금속 함량 등과 관련된 자료는 많이 부족한 상황이다(Lee and Koh, 2003).

본 연구는 대기오염이 산림토양환경의 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 대기오염이 심한 것으로 판단되는 온산공단에 인접한 조사구를 선정하여 각 조사구별로 산림토양의 중금속 함량과 이들 지역에 출현하는 대표적인 덩굴식물인 인동덩굴의 조직 내 중금속 함량을 비교하고, 산림토양 내 중금속 함량과 식물체 조직 내 중금속 함량과의 상관관계를 밝혀 인동덩굴을 중금속 오염지의 토양 정화 및 식생복원에 이용할 수 있는지에 대한 가능성을 평가하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

본 연구는 1980년을 전후해 석유화학공업과 철강산업 등이 집중적으로 육성되어 현재 우리나라를 대표하는 공업단지인 온산 공단지역을 조사지로 하였다. 대

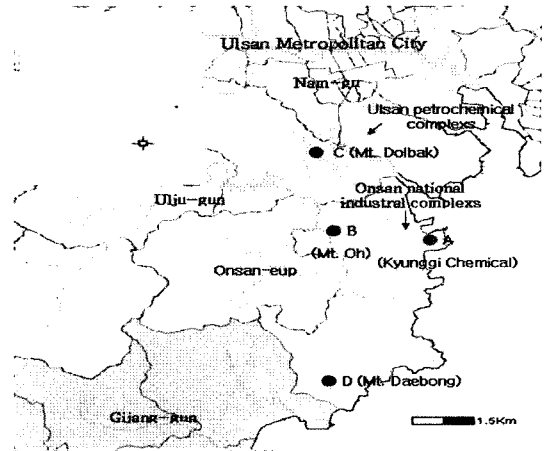


Fig. 1. Location map of the survey area in Onsan industrial complexes.

기오염에 따른 산림토양과 식물체 내 중금속 함량을 분석하기 위하여 온산 공단지역에 인접한 경기화학 지역과 공단에서 배출되는 대기오염물질의 직접적인 피해가 비교적 적은 것으로 판단되는 오산, 돌박산, 태봉산 지역을 대상으로 조사지를 설정하였다(Fig. 1). 경기화학 지역(이하 A)은 상층을 구성하는 식생이 없으며, 오산(이하 B) 지역은 해송, 돌박산(이하 C)과 태봉산(이하 D) 지역은 해송과 소나무가 상층을 우점하고 있는 것으로 나타나 조사지 모두 수종 구성이 아주 단순한 것으로 확인되었다. 본 조사지역의 연평균기온은 14.2°C, 연강수량은 1,219 mm인 것으로 나타났다으며, 2001년 울산 공업지역의 대기 중 이산화황, 오존, 이산화질소, 일산화탄소의 연평균 농도는 각각 0.02, 0.03, 0.03, 0.97 mg/kg이었다. 본 조사지의 식생에 대해서는 Park et al.(2004)에 의해 보고된 바 있으며, 조사지의 일반적인 개황과 산림토양의 화학적 특성은 Table 1과 2에 나타내었다.

2.2. 토양채취 및 분석

본 조사지역을 공단지역과 산림지역으로 분류하여 토양시료를 채취하였다. 온산 공단지역 산림토양의 중금속 함량 분석을 위한 토양 시료는 낙엽층을 제거한 후 0~10 cm 깊이의 표토를 대상으로 각 조사지에서 7개의 시료를 채취, 실험실로 운반하여 풍건 후 20 mesh 체로 친 후 분석용 시료로 이용하였다. 토양 중금속 함량은 0.1N-HCl로 침출하여 9개 원소(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)를 유도결합 플라즈마

Table 1. Description of investigated sites

Site*	Parent material	Aspect	Slope (°)	Alt [†] (m)	Depth of A horizon (cm)	Depth of B horizon (cm)	Dominant vegetation
A	Hornblende Granite	NW	22	30	3	26	—
B	Granite Porphyry	NE	40	82	5	34	<i>Pinus thunbergii</i>
C	Andesite	SW	18	88	5	26	<i>P. thunbergii</i>
D	Andesite	S	17	77	6	28	<i>P. thunbergii</i>

*A: Kyunggi Chemical Co., B: Mt. Oh, C: Mt. Dolbak, D: Mt. Taebong, respectively

[†]Altitude

Table 2. Chemical properties of forest soil in investigated sites

Site	pH (H ₂ O)	EC (dS/m)	O.M. (%)	T.N. (%)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Exch. cations (cmol ⁺ /kg)			
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
A	4.03	0.12	4.49	0.15	20.4	0.74	0.27	0.19	0.03
B	4.14	0.05	5.17	0.16	27.1	1.36	0.54	0.52	0.04
C	4.29	0.06	3.21	0.12	31.8	1.42	0.77	0.49	0.14
D	4.23	0.04	5.52	0.16	38.7	1.74	0.75	0.44	0.19

분광계(Inductively Coupled Plasma, Atomscan 25, USA)로 측정하였다.

로 측정하고 분석항목은 토양과 동일하며 3반복을 실시하였다.

2.3. 식물체 분석

식물체 시료는 본 조사지인 공단지역과 산림지역에서 하층의 우점종으로 분포하고 있는 인동덩굴을 시료로 선택하였다. 중금속 분석을 위한 대상목인 인동덩굴은 토양시료를 채취한 장소에서 고정 plot를 설치하여 잎·줄기·뿌리로 구분하여 fresh sample을 채취하였다. 채취한 시료는 식물체 표면에 붙어 있는 분진을 제거하기 위해 2회 수돗물과 증류수로 3회 씻은 후 건조기로 80°C에서 72시간 건조시켜 분쇄한 후 시료로 이용하였으며, tenary solution(HNO₃:H₂SO₄:HClO₄=10:1:4)을 이용하여 완전분해 후 유도결합 플라즈마 분광계(Inductively Coupled Plasma, Atomscan 25, USA)

III. 결과 및 고찰

3.1. 산림토양의 중금속 함량

온산공단지역과 산림지역 산림토양 중 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) 함량을 Table 3에 나타내었다. 현재 우리나라에서 토양오염의 기준이 되는 중금속은 6개(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr)로 지정되어 있는데, 본 조사에서는 Hg를 제외한 Fe, Mn, Ni, Zn를 추가적으로 분석하였다.

중금속별로 살펴보면 먼저 As 함량은 공단지역이 2.7 mg/kg, 산림지역이 0.8~1.5 mg/kg로 분석되어 공단지역이 산림지역보다 유의적으로 높은 함량을 나타

Table 3. Average heavy metal contents (±sd in parenthesis) of forest soils around Onsan industrial complex (unit: mg/kg)

Site*	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
A	2.7a (0.45)	1.5a (0.24)	0.4b (0.11)	594a (41.9)	153b (19.7)	112b (18.4)	1.4b (0.41)	38a (5.08)	191a (21.3)
B	1.5b (0.24)	0.2c (0.11)	0.5b (0.07)	16c (2.4)	187b (24.5)	155b (29.4)	1.7b (0.29)	13b (2.44)	28c (3.7)
C	0.8c (0.18)	0.7b (0.12)	0.3b (0.13)	23b (3.1)	71c (4.8)	362a (31.7)	3.1a (0.83)	5c (1.91)	112b (14.2)
D	1.3bc (0.41)	0.2c (0.08)	0.8a (0.17)	10c (2.7)	244a (31.9)	133b (21.2)	1.1b (0.17)	10b (1.74)	21d (2.8)

*Refer to Table 1 for A, B, C and D of site. Each values represent mean of seven replications. Means with the same letter are not significantly different level at the 5% probability by the Duncan's multiple range test.

내었다. Cd의 경우 공단지역인 A(경기화학) 조사구에서 1.5 mg/kg으로 산림지역인 B(오산), C(돌박산), D(태봉산) 조사구의 0.2~0.7 mg/kg 보다 높은 것으로 분석되었다. Bowen(1979)은 오염되지 않은 산림토양의 Cd 함량은 0.35 mg/kg이라고 보고한 바 있으며, Alloway(1990)도 비오염지역 산림토양은 보통 1 mg/kg 이하의 Cd를 함유한다고 보고한 바 있다. 본 조사지인 온산 공단지역의 Cd 함량은 이보다 높으며 또한 토양환경보전법 상의 토양오염 우려기준(Cd 1.5 mg/kg)에 있는 것으로 보아 공단지역의 Cd 오염이 염려되는 것으로 나타났다. Cd은 토양 내에서 가장 이동성이 큰 중금속 중 하나이므로(Alloway and Jackson, 1991; Schmitt and Sticher, 1991) 공단지역에서의 Cd의 동태에 대해서는 지속적인 관찰이 필요할 것으로 추정된다. Cr 함량은 D 조사구를 제외하면 공단지역과 산림지역 간에 유의적인 차이는 나타나지 않았다. Cu 함량은 공단지역이 산림지역보다 26~60배 정도의 높은 함량을 나타내어 상당한 양의 Cu가 온산공단 산림토양에 축적되어 있는 것으로 분석되었으며, Lee and Koh(2003)의 공단주변 토양의 Cu 함량은 녹지지역에 비해 유의적으로 높은 함량을 나타내었다는 보고와 일치하였다. 주변 산림지역의 Cu 함량(10~23 mg/kg)은 비오염토양의 Cu 함량 30 mg/kg(Bowen, 1979)의 범위 내에 있는 것으로 분석되었다. Fe 함량은 산림지역인 D와 B 조사구가 공단지역보다 높은 것으로 분석되었다. Mn 함량은 산림지역인 C 조사구가 가장 높았으며(362 mg/kg) 산림지역인 B, D 조사구도 공단지역 조사구보다 조금 높은 Mn 함량을 나타내었으나 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 이것은 울산의 공단주변 산림토양의 중금속 분석에서 Mn 함량은 공단지역보다 개발제한지역에서 더 높게 검출되었다는 보고(Lee and Lee, 1995)와 유사한 것으로 나타났으나 정확한 원인에 대해서는 아직 잘 알려져 있지 않다. Ni 함량은 산림지역인 C 조사구가 3.1 mg/kg로 가장 높은 함량을 나타내었으나 공단지역인 A 조사구와 산림지역인 B, D 조사구 간에는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 공단지역인 A 조사구의 Ni 함량은 익산공단의 10.8 mg/kg(Kim et al., 1998, 1999b) 보다 낮은 것으로 분석되었으나, 산림지역은 울산지역의 표토토양 중 Ni 함량 1.23~1.52 mg/kg(Kim et al., 1999a)과 유사한 경향을 나타내었다. Pb는 공단지역 38 mg/kg으로 산림지역의 5~13 mg/kg보다 유의적으로

높은 함량을 나타내었다. 공단지역인 A 조사구의 Pb 함량은 온산공단 인접지역의 토양 중 Pb 함량 39~67.6 mg/kg (Lee and Lee, 1995)보다는 다소 낮은 것으로 나타났으나 Kim et al.(1999b)의 익산공단 주변의 토양 중 Pb 함량 42 mg/kg과는 유사한 경향이 었다. Zn 함량은 공단지역인 A 조사구가 191 mg/kg로 가장 높은 함량을 나타내었으며, 산림지역인 C 조사구가 112 mg/kg, B와 D 조사구가 각각 28, 21 mg/kg으로 분석되어 Zn은 같은 산림지역이라 하더라도 조사구에 따라 변이가 심한 것으로 나타났다.

3.2. 식물체 내 중금속 함량

본 조사지에서 출현빈도 및 우점치가 높은 대표적 덩굴식물인 인동덩굴의 잎, 뿌리, 줄기 부분을 채취하여 기관별 중금속 함량과 평균값을 이용하여 조사지간의 유의성을 분석한 결과는 Table 4와 같다.

중금속별로 살펴보면 먼저 As는 잎과 뿌리의 함량은 조사구 간에 유의적인 차이가 나타나지 않았으며, 줄기에 있어서는 공단지역인 A 조사구가 4.6 mg/kg으로 산림지역인 B~D 조사구의 1.5~2.7 mg/kg보다 유의적으로 높은 함량을 나타내었다. Cd는 인동덩굴의 잎, 줄기, 뿌리 부위에서 공단지역인 A 조사구가 다른 조사구에 비해 유의적으로 높은 함량을 보였다. 산림지역에서 자라고 있는 인동덩굴의 부위별 Cd 함량은 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. Cr은 잎과 뿌리에 있어서 산림지역이 공단지역보다 유의적으로 높은 Cr 함량을 보였다. Cu는 인동덩굴의 모든 부위에서 A 조사구(공단지역)가 229~596 mg/kg로 B~D 조사구(산림지역)의 10~33 mg/kg보다 최대 60배 정도 높은 함량을 나타내었다. Fe은 잎과 줄기 부위에서는 공단지역(526~634 mg/kg)이 산림지역(75~366 mg/kg)보다 아주 높은 함량을 보였고 뿌리 부위에서는 반대로 산림지역(220~292 mg/kg)이 공단지역(144 mg/kg)보다 높은 것으로 나타났다. Mn은 산림지역에서 자생하고 있는 인동덩굴의 함량이 공단지역에서 자생하는 것보다 유의적으로 높게 나타났으며, 부위별 함량은 잎, 줄기, 뿌리의 순이었다. Pb와 Zn은 공단지역인 A 조사구가 산림지역인 B~D 조사구보다 유의적으로 높은 함량을 보였다. 부위별 Pb 함량은 공단지역의 경우, 줄기, 뿌리, 잎의 순이었으며, 산림지역에서는 B와 D 조사구가 뿌리, 잎, 줄기의 순으로 나타났다. 인동덩굴의 부위별 Zn 함량은 공단지역은 줄기, 뿌리, 잎의 순이었

Table 4. Average contents of heavy metal in leaf (L), stem (S) and root (R) of *Lonicera japonica* in Onsan industrial complex (unit: mg/kg)

Site*	Organ	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
A	L	3.4a	3.9a	1.8b	229a	634a	135c	4.8a	24.2a	658a
B		3.0a	1.1b	2.5ab	18b	140c	362b	4.1a	4.6b	69b
C		2.6a	1.0b	2.6a	14b	212b	452a	3.9a	5.0b	71b
D		3.2a	0.9b	3.3a	13b	83d	167c	3.7a	5.6b	45c
A	S	4.6a	6.8a	8.2a	596a	526a	95d	10.6a	47.3a	825a
B		1.5c	1.6b	4.5ab	13b	150c	240b	3.4c	2.4c	118c
C		2.7b	1.7b	6.6b	14b	366b	419a	6.5b	6.3b	155b
D		2.5bc	1.4b	3.2bc	10b	75d	171c	3.6c	3.7c	76d
A	R	3.2a	3.3a	2.7c	247a	144c	57c	4.4c	33.0a	804a
B		3.2a	2.4b	11.5ab	13c	292a	240a	8.2b	6.9b	287b
C		3.5a	1.4c	11.9a	33b	259ab	187b	11.4a	7.3b	250b
D		3.4a	1.3c	8.1b	13c	220b	147b	7.4b	7.2b	228b

*Refer to Table 1 for A, B, C and D of site. Each values represent mean of five replications. Means with the same letter are not significantly different level at the 5% probability by the Duncan's multiple range test

으며 산림지역은 뿌리, 줄기, 잎의 순으로 높은 함량을 보였다. Cd, Cu, Pb, Zn의 경우, 식물체 내의 정상적인 중금속 농도의 범위는 Cd 0.2~0.8 ppm, Cu 4~15 ppm, Pb 0.1~10 ppm 그리고 Zn 8~400 ppm 정도이며(Ross, 1994), 중금속에 오염된 토양에서 자라는 식물체 내의 중금속 농도는 Cd 5~30 ppm, Cu 20~100 ppm, Pb 30~300 ppm 그리고 Zn 100~400 ppm으로 알려지고 있다(Kabata-Pendias and Pendias, 1984). 공단지역인 A 조사구에서 자생하고 있는 인동덩굴의 잎, 줄기, 뿌리의 Cu와 Zn 함량은 각각 229~596, 658~825 mg/kg로 분석되어 온산공단과 주변 산림지역에서 자생하고 있는 인동덩굴은 많은 양의 Cu와 Zn을 식물체내에 함유하고 있는 것으로 나타났다. 또한 Markert(1994)는 식물체내 Mn, Fe의 함량은 각각 200, 150 mg/kg이라고 보고한 바 있는데, 온산공단지역 인동덩굴의 Mn, Fe 함량은 각각 57~135, 144~634 mg/kg으로, Mn 함량은 일반조성보다 낮았으나 Fe는 일반조성보다 높은 것으로 분석되었다. 주변 산림지역에 있어서 Fe의 함량은 뿌리가 220~292 mg/kg으로 일반조성보다 높았으나 잎과 줄기 부위에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며 Mn 함량은 D 조사구가 일반조성보다 낮은 것으로 나타났다.

식물체 내에서의 중금속 함량은 뿌리>잎>가지>줄기의 순으로 나타나며, 뿌리와 지상부에 균일하게 분포하는 Zn, Mn, Ni, 줄기보다 뿌리에 더 많이 분포하는 Cu, Cd, 그리고 줄기에는 적으며 뿌리에 대부분이

분포하는 Pb, Cr으로 구분한 바 있다(Adriano, 1986). 인동덩굴의 기관별 중금속 함량은 Cr, Fe, Ni, Pb, Zn의 경우 뿌리>줄기>잎, Cd는 줄기>뿌리>잎, Mn은 잎>줄기>뿌리의 순으로 나타나 Zn, Mn, Ni, Pb, Cr 등은 Adriano(1986)의 보고와 일치하는 경향을 보였다. Cu의 경우 공단지역에서는 줄기>뿌리>잎의 순이지만 산림지역에서는 대체적으로 뿌리>잎>줄기의 순으로 나타났다. Cd, Cu, Pb, Zn의 식물체 부위별 함량은 Han *et al.*(1998)의 아연폐광산 주변 식물의 부위별 중금속 함량은 식물종에 따라 그 순서가 다르다는 보고와는 상이한 것으로 나타났다. 또한, Cd, Cu, Zn에 대해 Jung *et al.*(1993)이 아연광산 주변에서 자생하는 야생식물(고비, 고마리, 망초, 썬바귀)의 식물체 부위별 중금속 함량에 대한 연구에서 Cd은 줄기, Cu는 뿌리, Zn은 뿌리와 잎의 함량이 높다고 보고한 바 있다. 이와 같이 식물체 부위별 중금속 함량이 다른 것은 식물종의 유전적 특성의 차이뿐만 아니라 환경조건에 따라서도 식물체의 중금속 흡수와 부위별 축적이 달라지기 때문인 것으로 추정된다. Baker (1981)와 Punz and Sieghardt(1993)는 지상부가 높은 중금속함량을 가지는 식물은 축적식물(accumulators), 지상부의 중금속 함량이 토양 중 함량과 비례하는 식물은 지시식물(indicators), 지상부의 중금속 함량은 토양의 함량과 관계없이 일정하게 낮은 식물은 차단식물(excluders)이라고 보고한 바 있다. 온산공단지역(A 조사구)의 인동덩굴은 본 연구에서 분석된 모든 중금속

(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)에 대해 지상부함량이 높은 것으로 나타나 축적식물인 것으로 판명되었다.

3.3. 토양과 식물체 내 중금속 함량의 상관관계

온산 공단지역 산림토양과 인동덩굴 잎, 줄기, 뿌리의 기관별 중금속 함량간의 상관관계를 분석한 결과는 Table 5와 같다. Cr, Mn, Ni 등을 제외한 중금속 원소는 토양 중 함량과 인동덩굴 식물체 기관별 함량 간에 정의 상관을 가지는 것으로 나타났다. As의 경우 잎과 줄기에서는 각각 $r=0.783, 0.833$ ($p<0.01$)으로 강한 정의 상관을 나타내었으나 뿌리에서는 부의 상관($r=-0.754, p<0.01$)을 가지는 것으로 분석되었다. Cu는 본 연구에서 분석된 중금속 중에서 토양과 식물체 기관별 함량 간에 가장 강한 정의 상관을 가지는 것으로 나타났다. Fe의 경우는 줄기에서 부의 상관($r=-0.608, p<0.01$)을 가지며, 잎과 뿌리에서는 토양 중 Fe 함량과 상관관계가 성립하지 않는 것으로 나타났다. Mn과 Ni은 토양 중 중금속과 식물체 기관별 함량 간에는 뚜렷한 관계가 없는 것으로 분석되었으며, Pb은 비교적 높은 정의 상관($r=0.671\sim 0.814, p<0.01$)을 보여주었다. Zn은 줄기와 뿌리에서는 정의 상관($r=0.657\sim 0.711, p<0.01$)을 보였으나 잎에서는 뚜렷한 관계가 확인되지 않았다. 이상의 결과는 Cd, Cu, Zn, Pb의 경우, 토양과 수목의 조직 내 중금속 함량은 r값의 차이는 있으나 대부분 정의 상관을 가진다는 Han et al.(1998)의 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 Zn, Cd, Cu는 토양의 중금속 함량과 식물에서

의 중금속 함량은 $r=0.88$ 전후의 높은 상관을 가지며, Pb는 $r=0.52$ 로 상대적으로 낮은 상관을 나타낸다는 Ross(1994)의 보고와도 일치하는 경향이였다. Cu, As, Pb의 토양 중 함량과 인동덩굴 중금속 함량 간의 상관관계는 토양의 중금속 함량이 식물체 내 중금속 함량에 영향을 미친다는 것을 보여주는 것이고, 이는 바꿔 말하면 토양 중에 축적되어 있는 중금속을 특정 식물이 흡수할 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 토양 중 중금속 흡수여부는 식물종의 생리적 특성이나 토양조건 등에 따라 다를 수도 있을 것이나 인동덩굴의 중금속 함량은 산림토양 중 함량과 높은 상관을 보여줌으로서 토양 내의 오염정도를 판단할 수 있는 수종으로 이용될 수 있을 것으로 추정된다. 특히 Cu, As, Pb와 같은 특정 중금속에 오염되어 있는 지역에 대해서는 식물복원을 위한 정화식물로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 조사지인 온산공단과 같이 공단 주변에 인접해 있는 산림의 경우 지금까지는 주로 대기오염에 의한 수목의 피해에만 초점이 맞춰져 왔으나 대기오염물질의 지속적인 산림생태계 내로의 유입으로 인해 발생하는 토양산성화에 따른 토양의 환경악화가 산림쇠퇴의 주원인으로 작용할 수 있을 것으로 추정되므로 토양의 성질과 식생의 변화에 대한 장기적인 관찰이 이루어져야 할 것이다. 또한, 공단지역과 같이 중금속에 의한 토양오염이 우려되는 지역에서는 그러한 지역에 대한 내성이 강한 식물을 이용한 친환경적인 정화기술을 확립하기 위해서라도 수목을 이용한 중금속 흡수능에 관한 연구가 지속적으로 이루어져야만 할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 온산 공단지역 산림토양과 그곳에 우점하고 있는 인동덩굴의 기관별 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) 함량을 분석하고 산림토양과 식물체간 중금속 함량의 상관관계를 규명하여 덩굴식물인 인동덩굴을 중금속 오염지의 토양 정화 및 식생 복원에 대한 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다. 토양중금속 중 As, Cd, Cu, Pb, Zn은 공단지역이 산림지역보다 유의적으로 높은 함량을 나타낸 반면 Fe, Mn 및 Ni 함량은 산림지역이 공단지역보다 유의적으로 높은 것으로 나타났다. 중금속 중 Cd, Cu, Pb과 Zn은 인동덩굴의 잎, 줄기, 뿌리에 있어서 공단지역에

Table 5. Correlation coefficient between heavy metal content of forest soil and leaf (L), stem (S), root (R) in *L. japonica*

Forest soil	<i>Lonicera japonica</i>		
	Leaf	Stem	Root
As	0.783**	0.833**	-0.754**
Cd	0.537**	0.582**	ns
Cr	ns	ns	ns
Cu	0.958**	0.986**	0.929**
Fe	ns	-0.608**	ns
Mn	ns	ns	ns
Ni	ns	ns	ns
Pb	0.703**	0.814**	0.671**
Zn	ns	0.657**	0.711**

ns: not significant, **significant at $p<0.01$

서 자라는 식물체의 함량이 산림지역의 함량보다 유의적으로 높은 것으로 나타났다. 산림토양의 As, Cd, Cu, Pb, Zn 함량과 인동덩굴 기관별 함량은 높은 정도의 혹은 부의 상관관을 보여주었으며, Cu가 산림토양과 인동덩굴의 기관 간에 0.93~0.99의 가장 높은 상관계수를 나타내었다. 인동덩굴 식물체의 기관 내 높은 중금속 함량과 산림토양과의 높은 상관계수를 고려하면, 인동덩굴은 공단지역과 같이 중금속(특히 Cd, Cu, Pb와 Zn)에 오염된 산림토양에서 정화식물로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Adriano, D. C., 1986: *Trace elements in the terrestrial environment*. Springer-Verlag, New York, 533pp.
- Alloway, B. J., 1990: *Heavy metals in soils*. Blackie and Son, Glasgow, 350pp.
- Alloway, B. J., and A. P. Jackson, 1991: The behavior of heavy metals in sewage sludge-amended soils. *The Science of the Total Environment* **10**, 151-176.
- Baker, A. J. M., 1981: Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3**, 643-654.
- Bell, N., 1994: *The Ecological Effects of Increased Aerial Deposition of Nitrogen*. Ecological Issues 5, British Ecological Society, 36pp.
- Bowen, H. J. M., 1979: *Environmental chemistry of the element*. Academic Press, New York, 333pp.
- Han, S. H., J. O. Hyun, K. J. Lee, and D. H. Cho, 1998: Accumulation of heavy metals (Cd, Cu, Zn, and Pb) in five tree species in relation to contamination of soil near two closed zinc-mining sites. *Journal of Korean Forest Society* **87**, 466-474. (In Korean with English abstract)
- Hoffman, W. A., 1980: Precipitation acidity-The role of forest canopy in acid exchange-. *Journal of Environmental Quality* **9**, 95-100.
- Jung, K. C., B. K. Kim, and S. G. Han, 1993: Survey on heavy metals contents in native plant near old zinc-mining sites. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **12**, 105-111. (In Korean with English abstract)
- Kabata-Pendias, A., and H. Pendias, 1984: *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 315pp.
- Kim, M. H., E. S. Min, and S. H. Song, 1999a: Comparison of the heavy metal concentrations of the soils and plants at the serpentine and rhyolite regions in Ulsan city. *Korean Journal of Environment and Ecology* **13**, 176-183. (In Korean with English abstract).
- Kim, S. J., S. H. Baek, K. H. Moon, K. H. Jang, and S. J. Kim, 1998: Distribution of heavy metals in soils at Iksan 1st industrial complex area. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **17**, 48-53. (In Korean with English abstract)
- Kim, S. J., S. H. Baek, K. H. Moon, K. H. Jang, and S. J. Kim, 1999b: Distribution of heavy metals in soils at Iksan 2nd industrial complex area. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **18**, 250-258. (In Korean with English abstract)
- Kim, T. W., 1976: Influences of air pollution on the growth ornamental trees-With particular reference to SO₂-. *Journal of Korean Forest Society* **29**, 20-33. (In Korean with English abstract)
- Kim, T. W., and S. I. Kim, 1982: Studies on the vegetation around the industrial complexes. *Journal of Korean Forest Society* **57**, 8-13. (In Korean with English abstract)
- Lee, B. K., and I. H. Koh, 2003: Analysis on heavy metal contamination in soils of the Ulsan area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **25**, 1436-1447. (In Korean with English abstract)
- Lee, C. G., 1999: Effects of acid depositions on forest decline, Ph. D. Dissertation. Gyeong-sang National University, Korea, 103pp.
- Lee, S. W., and S. W. Lee, 1995: The effect of soil acidification on the distribution of nutrients and heavy metals in forest ecosystem near Ulsan industrial estate. *Journal of Korean Forest Society* **84**, 286-298. (In Korean with English abstract)
- Markert, B., 1994: Plant as biomonitors-Potential advantages and problems. *Biochemistry of trace elements*. D. C. Adriano, Z. S. Chen, and S. S. Yang (Eds.), Science and Technology Letters, New York, 601-613.
- Marschner, H., 1995: *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London, 674pp.
- Mengel, K., and E. A. Kirkby, 1987: *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute, Bern, 593pp.
- Mun, H. T., J. H. Pyo, and J. H. Kim, 1998: Chemical properties of soils in the vicinity of Yoch' on industrial complex. *The Korean Journal of Ecology* **21**, 1-6. (In Korean with English abstract)
- Park, E. H., J. K. Kim, J. H. Lee, H. S. Cho, and J. K. Min, 2004: Vegetation of liana dominating in the vicinity of Onsan industrial complex. *The Korean Journal of Ecology* **27**, 335-345. (In Korean with English abstract)
- Puckett, L. J., 1982: Acid rain, air pollution and tree growth in southeastern New York. *Journal of Environmental Quality* **11**, 376-381.
- Punz, W. F., and H. Sieghardt, 1993: The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environmental and Experimental Botany* **33**, 85-98.
- Ross, S. M., 1994: *Toxic metals in soil-plant systems*. John Wiley & Sons, New York, 469pp.
- Schmitt, H. W., and H. Sticher, 1991: Heavy metal compounds in the soil. *Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis, and biological relevance*, E. Merian (Eds.), VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 311-331.