

부산지역 폐광산, 쓰레기매립장 주변 토양 및 자생식물(쑥) 중금속오염도 조사연구

한상민[†] · 강성원 · 김효진 · 김도훈
폐기물분석과

A Study on the Characters of Heavy Metals of Soils and Mugworts in the Abandoned Mines and the Landfills of Busan

Han Sang-min[†], Kang Seong-won, Kim Hyo-jin and Kim Do-hoon
Industrial Waste Analysis Division

Abstracts

This study was designed to investigate the heavy metal (Cd, Cu, As, Pb, Cr⁺⁶, Zn, Ni and Hg) concentrations in soils and food crops(mugworts) around abandoned mines and landfills of Busan area. 40 samples were collected from all sites and analyzed with ICP and Hg-analyzer. following standard Analysis Methods. From the analytical results, we found that there were some variations of heavy metal contamination in each sample which were obtained from different areas. We also found that a trace of heavy metal was accumulated in mugworts.

Therefore, the results from this can be used as basic information to establish the practical criteria of allowance levels for heavy metals in crops around landfill soils and abandoned mines.

Conclusively, the transfer rate from soil to mugwort in each sample showed a trend in the order: Ni(169.50%) > Zn(73.78%) > Pb(20.47%) > As(19.57%).

The correlation coefficients of heavy metals in mugworts were showed Cd(0.72), Pb(0.69), As(0.23), Cu(0.15).

Key words : Abandoned mines, landfills, heavy metal contamination, transfer rate

서론

현재 부산지역의 광산지역 주변의 토양 및 수질오염을 유발시키고 있는 휴·폐광산은 주로 금속광산으로 7개소(용호, 경창, 가덕납석, 동래납석, 일광, 부산철광, 임기)가 위치하고 있으며, 전국적으로도 휴·폐광산은 석탄광이 335개소, 금속광산이 303개소 등 총 936개소가 전국에 위치하고 있다.^{1),11)} 이러한 휴·폐광산은 주변 농경지에 폐수(폐재)등을 유입시켜 토양과 수질 등의 재배환경을 악화시킬 뿐만 아니라 이곳에서 재배되는 농산물을 오염시키기 때문에 이에 따른 농산물의 안전성이 위협받고 있

으며, 또한 먹이 연쇄를 통하여 사람의 건강까지 악영향을 미칠 수 있다.

중금속은 금속 중에서도 비중이 4.0이상 되는 것으로 지각에 미량 함유되어 있는 원소들을 말한다. 중금속을 미량원소(Trace element) 혹은 미량영양소(Trace nutrient)라고 부르는 경우가 있으며, 중금속을 환경학적으로 좀 더 정확하게 표현하면 Potentially Toxic Trace Element라 부를 수 있다. 중금속 중에서 납, 비소, 수은, 카드뮴 등은 인체에 대한 독성이 매우 강한 것으로 알려져 있다. 이러한 중금속은 미량이라 하더라도 자연에 유입될 경우, 미생물의 활성 저해 및 먹이연쇄를 통해 식물

[†] Corresponding author, E-mail : HSM77777@korea.kr
Tel : +82-51-309-2943, Fax : +82-51-309-2929

체와 인체로 유입되고 축적되어 잘 배출되지 않으며, 대량노출에 따른 급성중독과 장기간에 걸쳐 서서히 축적되어 나타나는 만성중독을 일으키게 되어 그에 따른 부작용을 낳고 있다^{2),4)}.

중금속 토양 오염의 원리를 살펴보면 산업활동에 의한 오염물질이 직접 토양에 투기되기도 하고, 광산폐수, 공장폐수 등에 포함되어 하천을 오염시키고, 그 결과 토양이 오염되게 되었다. 또, 공장의 배연과 자동차의 배기가스 등에 의한 대기오염을 통해 토양이 오염되기도 한다. 이와 같이 해서 오염된 토양은 그 곳에 생육하는 식물만이 아니라 식물연쇄에 의해서 가축과 인간에게도 영향을 주게 되었다. 또한 토양오염이 진행됨에 따라 미생물의 활성이 저하하고, 토양이 가진 다양한 기능들도 저하하게 된다.

휴·폐광산으로부터 발생하는 폐수는 항내수, 채석장의 침출수, 선광폐수 등으로 구별된다. 모두 산성이 강하며, pH 1~3의 것이 많다. 광석의 성분조성 및 채취하는 금속의 차이에 의해, 배출되는 성분도 Cu, Pb, Cd, As 등의 여러 종류로 분류될 수 있다. 토양 중에 유해중금속이 존재하고 있어도 그것이 불용성 혹은 난용성이라면 토양용액중의 농도는 저농도로 유지되므로 식물에 의한 흡수량은 적기 때문에 장애로 나타나기 어렵다. 그러나 토양 중에 중금속의 용해성은 토양조건 혹은 다른 공존원소의 농도 등에 의하여 많은 차이가 있다. 토양 중에 중금속의 용해도는 토양의 pH에 따라서 다르다. 예를 들면 Mo는 산성에서 용해도가 감소하고, 중성에서 알칼리화 하면, Cu, Zn, Cd, Mn, Fe 등의 용해도는 감소한다. 또한, 중금속 중에는 산화적 조건하에서 불용화하는 것과, 환원적 조건하에서 불용화 하는 것이 있다. Fe, Mn 등은 전자의 예이고, Cd, Cu, Zn, Cr 등이 후자의 예이다. 또, Cr과 같이 산화와 환원의 형태에 의해 독성이 다른 원소도 있다. Cr은 산화 상태에서는 6가 크롬이 되고 환원 상태의 2가 및 3가 크롬보다 독성이 강하다. As도 산화상태의 비소산보다도 환원 상태의 아비산 쪽이 높은 독성을 가진다. 중금속은 토양 중에서 다른 성분과 결합해 불용성의 화합물을 만드는 경우가 있다. PO_4^{3-} 는 Cd, Zn과 Pb, SO_4^{2-} 는 Pb와 Ti, H_2S 는 Cd, Zn, Pb, Ni와 Fe와 반응해서 침전한다.^{2),4)}

매립지내에서 발생하는 각종 침출수 및 각종 유해물질은 주변의 토양을 오염시키며, 또한 지하수마저 오염시켜 한정된 지역의 자연정화작용을 마비시키게 된다. 미국에서는 유해물질에 의하여 오염된 매립지 토양을 회복시키기 위하여 막대한 예산(Super fund)을 투입하고 있으며,

또한 여러 기술을 개발하고 있는 실정이다.

석대매립장 일대의 지질은 대부분이 중생대 백악기 유천층군의 화산암류인 유문암질암과 안산암질암이 분포하고 있는데, 매립장을 중심으로 동축 및 동남축 대부분에 분포하고 있는 안산암을 기저로 유문암이 매립장 서측 및 북측에 분포하고 있다. 안산암은 암녹회색의 유리질 석기에 흰색의 장석질 반정을 함유하고 있는 안산반암이 대부분이며, 유문암은 담회색이 우세하고 매우 치밀 단단하며 사장석 반정이 나타나기도 한다⁶⁾.

석대매립장 지역의 지질 형성은 최하부의 안산암류를 기저로 하여 유문암이 관입 혹은 분출하였고, 그로 인하여 서측에 일부 안산반암이 유문암내 잔존하기도 하며, 그 후 인근의 대단층 활동시 수반된 여러 개의 단층으로 현재의 지질분포를 이루고 있다³⁾.

울속도일대의 지질은 사암을 모래를 주성분으로 하는 퇴적암으로 사암은 보통 석영함량이 현저히 높다. 석영과 장석 모두를 많이 함유하고 있는 것을 아르코스(arkose)라고 부르고 있다.

따라서 본 연구는 부산지역의 휴·폐광산(일광, 임기) 주변 및 쓰레기 매립장(석대, 울속도) 주변 지역의 토양 및 자생식물(쑥)에 대한 중금속 함량 및 전이 실태를 조사하여 함량 정도에 따른 안전성을 평가하는 기초자료 제공 및 자생식물(쑥) 중금속 잔류 허용 설정과 합리적인 기준이 설정될 수 있도록 과학적인 기초 자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

휴·폐광산지역 농산물 중금속 실태 관련 현황조사

국내·외 관련 기준

국민소득 및 생활수준 향상에 따른 건강에 대한 관심이 증대되고 중금속에 대한 농산물의 안전성 문제가 대두되면서 농산물의 안정성에 대한 소비자의 요구가 증대되고 있다. 1976년 이후 국제식품규격위원회(CODEX)는 식품의 안전성 평가를 위해 각국의 식품에 함유된 중금속에 대한 자료를 수집하여 평가하고 있다. 또한 미국과 일본 등의 선진국에서는 수입농산물에 대한 무역기준을 강화하고 있어 국내에서도 농산물의 안전성 평가에 따른 정책적 대응방안의 마련이 시급한 실정이다. Table 1은 우리나라, 일본, EU, 그리고 국제식품규격위원회(Codex)에서 현재 채택하고 있는 농산물에 대한 중금속 기준을 나

Table 1. Level of heavy metals in KOREA, JAPAN, EU, CODEX¹⁾ (mg/kg)

Crops	Nations	Pb	Cd	As
Rice	KOREA	0.2	0.2	-
	JAPAN	-	1.0	-
	EU	-	0.2	-
	CODEX	0.2	0.4	-
Chinese cabbage, Luttce etc	KOREA	0.3	0.2	-
	JAPAN	5.0(Spinach)	-	1.0(Spinach)
	EU	0.3	0.2	-
	CODEX	0.3	0.2	-
Green onion, onion, garlic etc	KOREA	0.1	0.1(green onion0.05)	-
	EU	0.1	0.05	-
	CODEX	0.1	0.05	-

Table 2. The description of sampling sites

	Site Name	Site(size)	Comparision
Abandoned mines	일광 광산	기장군 일광면(330 ha)	금, 은, 동(94년 소멸)
	임기 광산	기장군 철마면(4 ha)	납석(92년 소멸)
Landfill areas	석대매립장	해운대구 석대동	1993년(매립완료)
	을숙도매립장	사하구 하단동	1998년(매립완료)
Comparison sites	장산	해운대구 좌동	
	금련산	수영구 광안동	

타내었다

Table 1을 보면 우리나라의 경우 2012년 현재 농산물에 대한 중금속기준을 Pb, Cd만 그 기준을 설정해 놓고 있는 실정이다. 국내의 농산물 중금속 기준이 현재까지는 2개(Pb, Cd)항목에 대해서만 설정되어있는 반면에 일본은 농산물 업체류 중 시금치의 As의 중금속 기준도 정해 놓고 있다.

국내의 휴·폐광산 및 쓰레기매립장 주변 지역 중금속 실태 조사 사례

현재 우리나라에서는 휴·폐광산에 대한 오염실태 조사(폐금속광산 토양오염실태 일제조사, 환경부 2003~2004)¹³⁾가 많이 발표되었으며, 발표된 조사결과 대부분이 중금속 기준설정이 마련된 토양과 수질에 중점을 두고 조사가 이루어져 왔다. 농작물의 중금속 오염도를 조사함에 있어 작물별(자생식물) 중금속 기준이 설정되어 있지 않기 때문에 농작물(자생식물)의 오염도를 판

단하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 토양의 중금속 함량과 자생식물(쑥)의 중금속 함량을 비교 분석하여 각 중금속별 전이율과 상관관계를 비교 검토하여 향후 자생식물(쑥)의 중금속 잔류허용기준 설정 시 과학적인 기초 자료를 제공하고자 한다.

휴·폐광산지역 및 쓰레기 매립장 지역의 토양 및 자생식물(쑥) 중금속 오염도조사

조사 대상 휴·폐광산지역 및 쓰레기 매립장 조사 지점

Table 2 및 Fig. 1은 본 연구사업의 조사지점(휴·폐광산 4개 지점, 쓰레기매립장 4개 지점, 대조지역 2개 지점)을 총 10개 지점의 위치를 표와 그림으로 설명한 것이다. 현재 부산지역 내에는 7개소가 휴·폐광 상태에 있으며, 이들 중 임기납석광산 및 일광광산은 광해방지사업이 완료된 상태이지만, 현재 지속적으로 산성광배수를 배출하고 있다. 주변의 토양은 높은 중금속 오염도를 보

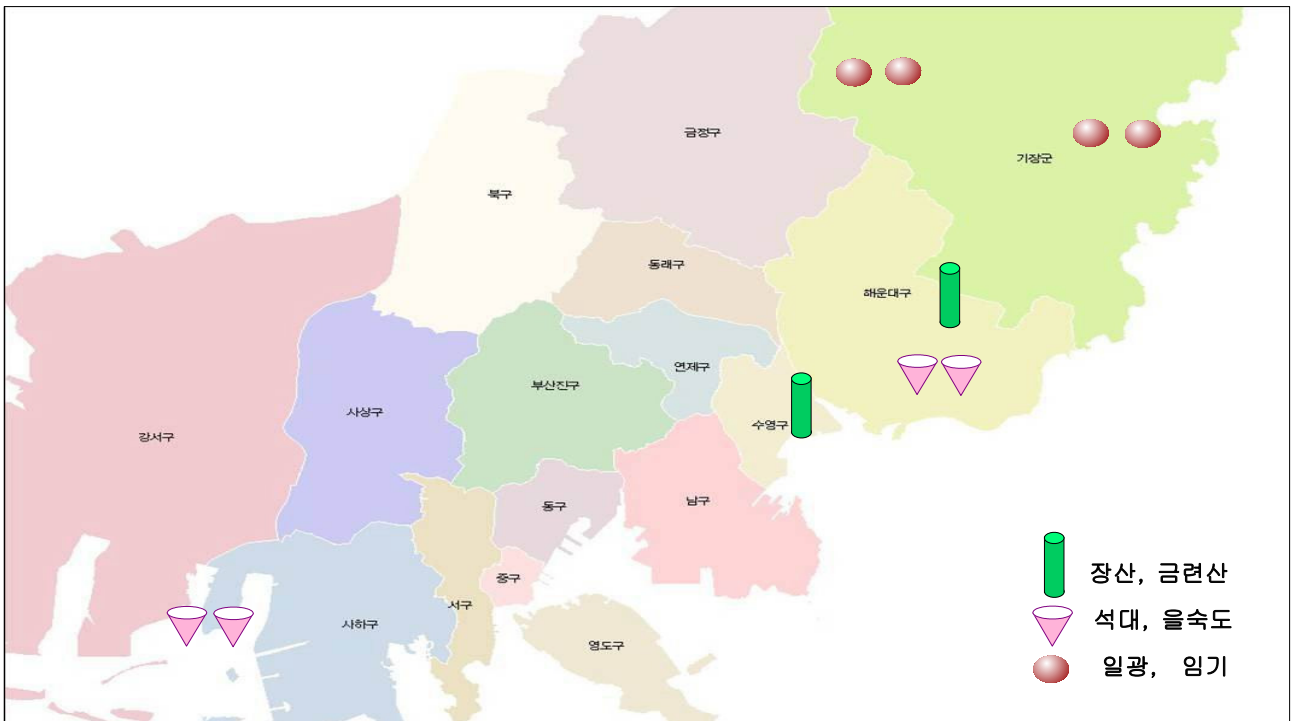


Fig. 1. Location of the sampling sites in Busan area,

여주고 있어 연구사업 조사지점으로 선정하였다. 또한, 석대쓰레기 매립장과 을숙도 매립장은 거의 매립이 완료된 시점이 15년~20년 가까이 지나, 우리시에서 유희지 개발 단계의 계획이 수립되어있어 휴·폐광산과의 비교 지점으로 연구사업 지점으로 선정하였다.

시료채취방법

시료 채취는 광산지역(일광, 임기) 인근 지역 4개소, 쓰레기 매립장(석대, 을숙도) 주변지역 4개소 대조지

역(장산, 금련산) 2개소의 토양 및 썩을, 토양(3, 4월)은 토양오염공정시험기준¹²⁾에 따라 표토층(0~10cm) 1개 지점씩 500g의 토양 시료를 총 5개 지점의 시료를 혼합하여 300g을 분취하여 분석에 사용하였으며, 자생 식물(썩)은 3, 4월에 걸쳐 채취하였고 한 지점에서 최소 5군데의 썩을 채취 혼합하여 300g을 분취하여 분석에 사용하였다. 자생식물(썩)을 직접 채취하는 사진과 대조(장산)지역의 사진을 각 Fig. 2와, Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 2. Sampling mugwort from the soils,



Fig. 3. Sampling site of The jangsan Mountain,

분석항목 및 분석방법

토양의 중금속(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁺⁶, Zn, Ni) 분석 실험

Hg을 제외한 7개 항목의 중금속 분석을 위하여 토양오염공정시험방법에 의하여 각각의 채취지점에서 채취한 시료를 범랑제 또는 폴리에틸렌 바트 위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되게 해쳐 놓고 풍건시킨 다음, 눈금간격 2mm의 표준체로 체거름한 시료를 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 사용하였다.

본 연구에서는 토양오염공정시험방법(ES 07400)의 염산과 질산으로 산분해하여 전처리하는 방법으로 중금속 변동 추이를 통한 변화를 살펴보았다.

Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, As는 분석용 시료 3g을 0.001g 까지 정밀하게 취하여 반응용기에 넣고 약 0.5 ~ 1 mL의 정제수로 시료를 적신 후 염산 21mL를 첨가하면서 잘 섞은 다음 질산 7mL를 가하여 잘 저어준다. 반응기 위의 흡수용기에 0.5M 질산 15mL를 붓고 흡수용기와 환류병 각관을 반응용기에 연결시킨 후 상온에서 2시간 이상 정치시켜 토양내의 유기물이 천천히 산화되도록 한다. 정치 후 반응혼합물의 온도를 서서히 올려 환류조건에 도달하도록 한 후 2시간동안 유지한다. 분해가 끝나면 반응용기를 정치시켜 Whatman No.40 여과지로 여과한 여액을 원자흡수분광광도계(AAS, Varian spectraAA220)와 ICP를 이용하여 분석하였다.

Cr⁺⁶ 는 분석용 시료 2.5 g을 정확히 취하여 250 mL

분해플라스크에 넣고 미리 온도를 90~95 ℃로 맞추어 놓은 분해용액 50 mL를 넣는다. 여기에 염화마그네슘(무수) 0.4 g과 인산완충용액(0.1 M) 0.5 mL를 함께 넣고 시계접시로 분해플라스크를 덮고 5분간 교반하여 시료와 분해용액 등이 잘 혼합되도록 하고 온도를 일정하게 유지할 수 있는 가열식 자력교반기 등을 이용하여 90~95 ℃가 되도록 유지하면서 60분간 지속적인 교반과 함께 분해를 한 후 시료용액을 0.45 μm 막여과지로 여과한다. 여액을 100 mL 비커에 옮긴 후 질산(5 M)으로 여액의 pH를 7.5±0.5로 맞춘다. 이때 pH를 교정한 여액의 pH가 7.5±0.5의 범위를 벗어나면 여액을 버리고 처음부터 분해를 다시 시작한다. pH 교정이 끝나면 여액을 100 mL 용량플라스크에 옮기고 흡광광도분석기를 이용하여 540 nm에서 분석하였다.

Hg은 채취지점에서 채취한 토양에서 돌, 나무 등 협잡물을 제거한 후 분석용 시료로 하였으며 수은환원기법을 사용하는 수은분석기(NIC SP-3D)를 이용하여 측정하였다.

자생식물(쑥)의 중금속(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁺⁶, Zn, Ni)분석 실험

본 연구에서 쑥의 중금속 시험은 식품공전의 중금속 시험을 참고로 하였으며 마이크로웨이브법을 이용하여 시험용액을 조제하였다. 채취한 시료의 가식부분을 시험부위로 하여 균질화 된 시료 일정량 (건조물 0.1 g)을 vessel에 넣은 다음 HNO₃ 7mL 와 H₂O₂ 1 mL를 가한 후

〈마이크로웨이브법을 통한 시험용액의 조제〉

식품검체	균질화 된 시료 일정량(0.1 ~ 0.5 g)을 vessel에 검체	· vessel에 물기가 남아있으면 안됨. · 분말형태의 시료는 vessel과 정전기가 일어나므로 주의.
↓		
HNO ₃ + H ₂ O ₂	시료에 HNO ₃ 7mL 와 H ₂ O ₂ 1 mL 가한 후 닫음	
↓		
Digestion	Digestion Program 1. 5min, 80℃, 1000W 2. 5min, 150℃, 1000W 3. 15min, 190℃, 1000W 4. 20min, 190℃, 1000W	· 매질이 단순한 경우에는 단계를 단순화 시킬 수 있다.
↓		
mass up	식힌 후 부피플라스크에 일정량으로 채움	

※ 참고 : 식품공전 중금속 분석법 실무해설서(2011년도)⁹⁾

Digestion Program(MARS-X)에 따라 분해시킨 다음 식힌 후 부피플라스크에 일정량으로 채워 분석용 시료로 사용하였다.

결과 및 고찰

휴·폐광산지역 토양의 중금속 실태 조사 현황

부산지역 휴·폐광산 및 쓰레기매립장 주변 토양의 중금

속 항목에 대하여 10개 지점을 2회 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 토양 중 중금속 Cd의 평균 농도는 1.551mg/kg로 2011년도 토양오염실태조사 지역별 평균농도(1.62~3.08mg/kg)와 비슷한 결과를 보였으며, Cu는 26.88mg/kg로 2011년도 지역별 평균농도(11.00~97.70mg/kg)중 산업단지 공장지역의 평균 농도인 26.73mg/kg 결과와 비슷하게 조사되었다. As는 11.207mg/kg으로 2011년도 토양오염실태조사지점 중 광산지역 8.90mg/kg보다 약간 높게 조사되었다. Pb은 2011년도 토양실태조사 광산지역 65.000mg/kg 보다

Table 3. Heavy metals concentration in soils (mg/kg)

sampling sites	NO	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁺⁶	Zn	Ni
S-1 (Gumryun Mt.)	1	0.60	14.25	4.97	0.01	14.21	0.00	78.20	2.76
	2	0.58	15.02	4.60	0.04	10.63	0.00	76.40	2.60
	evg	0.59	14.64	4.79	0.03	12.42	0.00	77.30	2.68
S-2 (Jangsan Mt.)	1	0.53	13.89	4.68	0.02	11.25	0.00	71.23	2.62
	2	0.47	13.25	4.24	0.02	12.09	0.00	69.97	2.50
	evg	0.50	13.57	4.46	0.02	11.67	0.00	70.60	2.56
S-3 (Ulsukdo-1)	1	1.18	31.19	11.24	0.03	41.29	0.00	124.59	4.93
	2	1.37	18.49	6.52	0.05	20.90	0.00	92.90	10.23
	evg	1.28	24.84	8.88	0.04	31.10	0.00	108.75	7.58
S-4 (Ulsukdo-2)	1	1.10	16.46	5.24	0.03	18.44	0.00	80.21	7.98
	2	1.06	14.83	5.28	0.03	17.12	0.00	78.50	8.41
	evg	1.08	15.65	5.26	0.03	17.78	0.00	79.36	8.20
S-5 (Seokdae-1)	1	4.04	18.90	16.82	0.03	202.80	0.00	271.93	2.80
	2	2.98	18.60	12.31	0.05	265.52	0.00	253.67	3.77
	evg	3.51	18.75	14.57	0.04	234.16	0.00	262.80	3.29
S-6 (Seokdae-2)	1	2.16	27.24	32.52	0.03	86.26	0.00	157.07	6.59
	2	1.76	23.16	15.01	0.04	43.26	0.00	112.62	6.95
	evg	1.96	25.20	23.77	0.04	64.76	0.00	134.85	6.77
S-7 (Ilkwang-1)	1	1.89	72.41	10.98	0.10	62.91	0.00	247.31	11.74
	2	1.99	85.17	18.68	0.05	95.96	0.00	250.44	12.13
	evg	1.94	78.79	14.83	0.08	79.44	0.00	248.88	11.94
S-8 (Ilkwang-2)	1	1.85	27.13	12.57	0.02	45.24	0.00	132.94	5.06
	2	1.79	25.73	7.56	0.01	47.66	0.00	127.11	4.92
	evg	1.82	26.43	10.07	0.02	46.45	0.00	130.03	4.99
S-9 (Imgi-1)	1	1.39	23.61	15.08	0.02	32.04	0.00	179.01	5.11
	2	1.06	23.41	6.98	0.03	25.13	0.00	102.23	4.85
	evg	1.23	23.51	11.03	0.03	28.59	0.00	140.62	4.98
S-10 (Imgi-2)	1	1.71	29.14	22.86	0.02	29.42	0.00	92.56	5.19
	2	1.48	25.73	5.99	0.03	39.46	0.00	100.92	10.16
	evg	1.60	27.44	14.43	0.03	34.44	0.00	96.74	7.68

Table 4. Heavy metals concentration in mugworts(mg/kg)

sampling sites	NO	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁺⁶	Zn	Ni
S-1 (Gumryun Mt.)	1	0.21	10.25	0.97	0.00	2.65	0.00	58.60	4.76
	2	0.29	10.62	0.90	0.40	2.37	0.00	57.01	4.24
	evg	0.25	10.44	0.94	0.20	2.51	0.00	57.81	4.50
S-2 (Jangsan Mt.)	1	0.26	10.09	1.04	0.01	2.39	0.00	60.22	6.17
	2	0.19	9.72	0.70	0.10	2.45	0.00	51.28	3.76
	evg	0.23	9.91	0.87	0.06	2.42	0.00	55.75	4.97
S-3 (Ulsukdo-1)	1	0.28	11.58	0.78	0.05	2.87	0.00	67.86	8.20
	2	0.23	11.00	1.33	0.30	4.18	0.00	52.97	13.97
	evg	0.26	11.29	1.06	0.18	3.53	0.00	60.42	11.09
S-4 (Ulsukdo-2)	1	1.89	14.39	2.29	0.15	2.96	0.00	95.47	6.24
	2	2.04	14.46	1.73	0.00	5.70	0.00	80.42	5.56
	evg	1.97	14.43	2.01	0.08	4.33	0.00	87.95	5.90
S-5 (Seokdae-1)	1	5.68	39.45	3.44	0.00	24.99	0.00	382.04	4.35
	2	8.83	30.51	0.77	0.00	8.89	0.00	442.69	35.20
	evg	7.26	34.98	2.11	0.00	16.94	0.00	412.37	19.78
S-6 (Seokdae-2)	1	1.05	20.56	1.95	0.05	7.54	0.00	169.2	4.46
	2	1.90	21.04	1.08	0.70	5.78	0.00	184.44	41.25
	evg	1.48	20.80	1.52	0.38	6.66	0.0	176.82	22.86
S-7 (Ilkwang-1)	1	1.07	21.28	2.44	0.00	9.03	0.00	91.99	4.17
	2	0.51	19.17	4.55	0.00	7.97	0.00	76.62	7.82
	evg	0.79	20.23	3.50	0.00	8.50	0.00	84.31	6.00
S-8 (Ilkwang-2)	1	0.46	14.76	1.13	0.01	6.15	0.00	48.96	3.32
	2	0.95	20.21	1.37	0.00	8.95	0.00	69.98	6.20
	evg	0.71	17.49	1.25	0.01	7.55	0.00	59.47	4.76
S-9 (Imgi-1)	1	0.47	17.46	1.10	0.00	5.12	0.00	86.52	11.33
	2	0.81	20.14	2.66	0.60	7.15	0.00	220.53	7.36
	evg	0.64	18.80	1.88	0.30	6.14	0.00	153.53	9.35
S-10 (Imgi-2)	1	0.48	20.13	1.32	0.00	5.89	0.00	64.71	5.33
	2	0.55	18.30	1.84	0.00	6.08	0.00	64.36	6.89
	evg	0.52	19.22	1.58	0.00	5.99	0.00	64.54	6.11

약간 낮은 56.081mg/kg으로 조사되어 일반적으로 토양 중의 전체 중금속 오염도는 2011년도 토양오염실태조사 결과와 큰 차이가 없었다¹⁰⁾.

Table 4는 부산지역 휴폐광산, 쓰레기매립장 주변 자생식물(쑥)의 중금속 분석을 10개 지점에 대하여 2회에 걸쳐 분석한 결과를 나타낸 것이다.

토양과 쑥에 대한 Cd의 농도범위는 Fig. 4의 그래프와 같다. 토양의 평균 Cd농도 범위는 0.50~3.51mg/kg로 Cd 토양우려기준(2지역 : 10mg/kg) 이내로 조사되었다. 자생식물(쑥)의 평균 Cd농도범위는 0.23~7.26 mg/kg

로 분석되었으며, 자생식물(쑥)의 Cd농도는 국내에서 연구(식약청용역사업)된¹⁾ 파의 Cd 평균 농도 0.67 mg/kg 과 비슷한 결과를 보였다. 그러나 자생식물(쑥)은 농작물 분류상 엽채류로 분류할 수 있는데 농작물 분류상 엽경채 류중의 파의 Cd 농도와 비슷한 중금속 함량을 보인 것은 앞으로도 자생식물(쑥)의 전수조사 및 농작물간의 상호 비교 연구가 필요할 것으로 사료되며 농작물의 중금속 기준 설정 시 농산물 작물 분류별이 아닌 각각의 농산물별 기준이 필요할 것으로 생각된다.

토양과 쑥의 Cu의 평균 농도 결과를 Fig. 5에 나타내

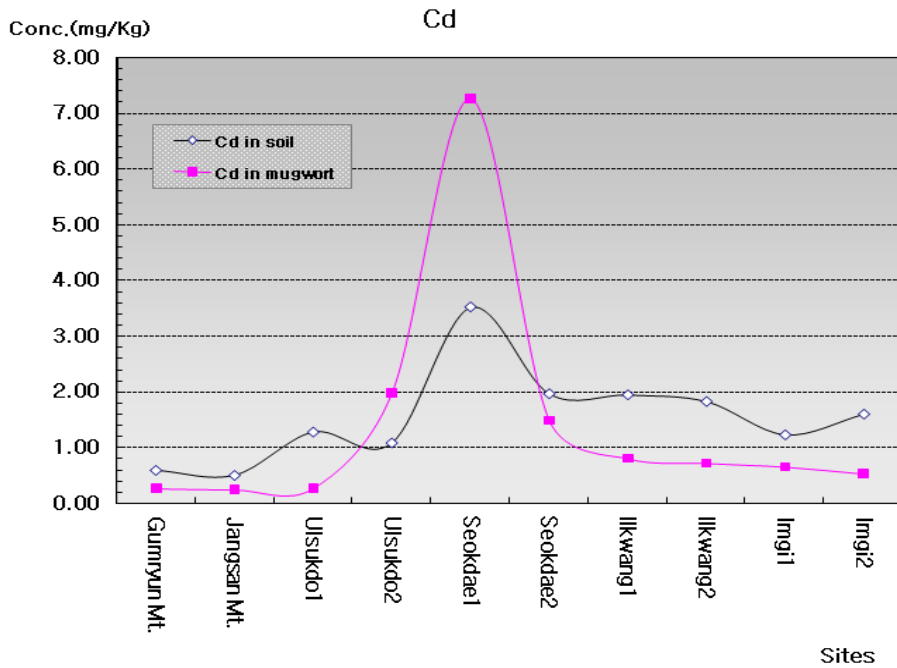


Fig. 4. Average concentration of Cd soils and mugworts.

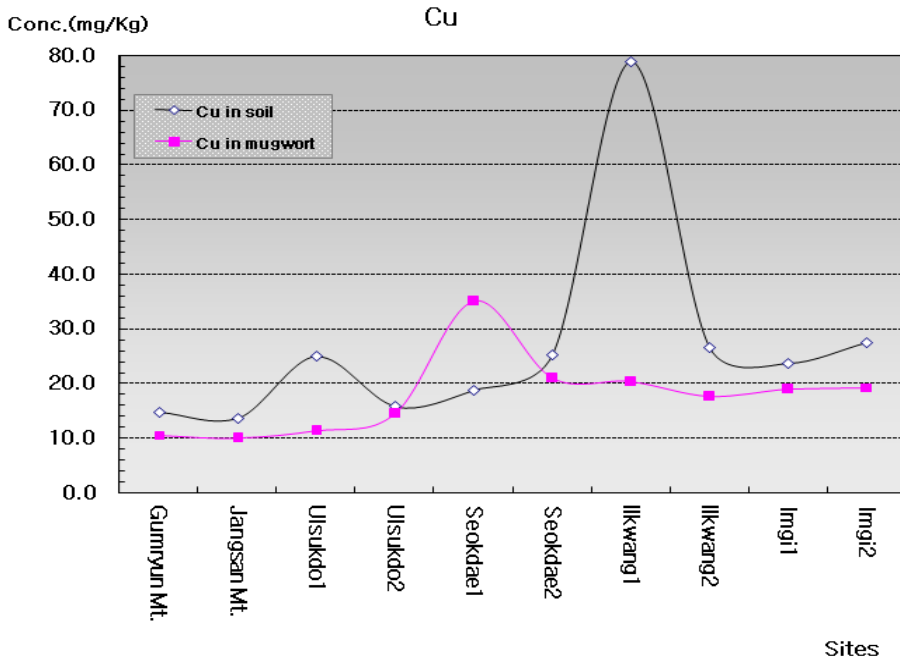


Fig. 5. Average concentration of Cu soils and mugworts.

었으며, 토양의 평균 Cu농도 범위는 13.57~78.79 mg/kg로 Cu 토양우려기준(2지역 : 500mg/kg)이내로 조사되었다. 자생식물(쑥)의 평균 Cu농도범위는 9.91~34.98mg/kg로 분석되었으며, 자생식물(쑥)의 Cu농도

도 Cd의 결과와 같이 식약청 용역사업 농작물분석 결과의 파의 Cu 평균 농도 7.37mg/kg과 가장 유사한 결과를 보였다. Cu 농도범위도 파와 비슷한 중금속 함량을 보인 것은 앞으로도 자생식물(쑥)의 전수조사 및 농작물간의 상

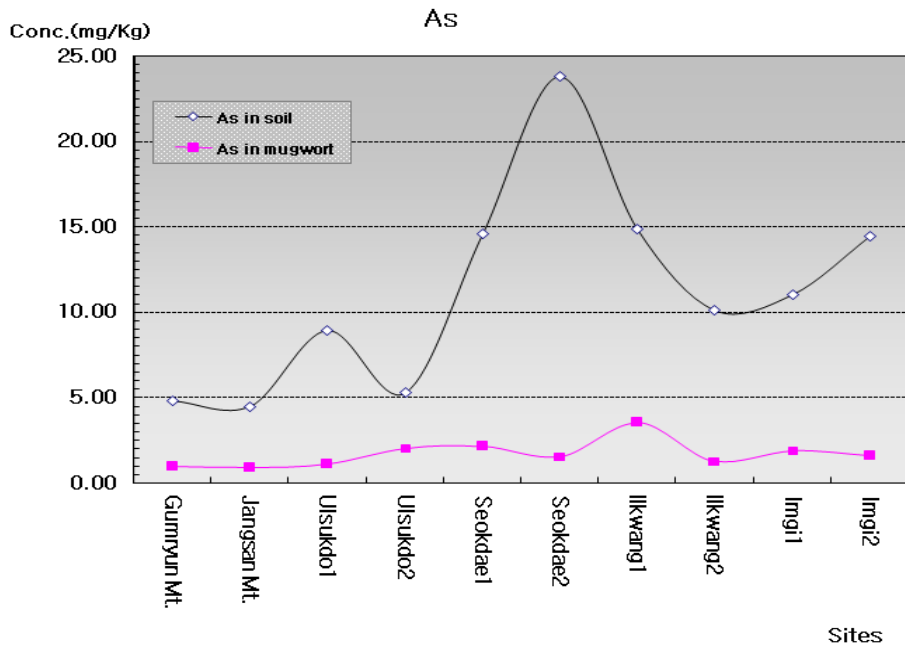


Fig. 6. Average concentration of As soils and mugworts.

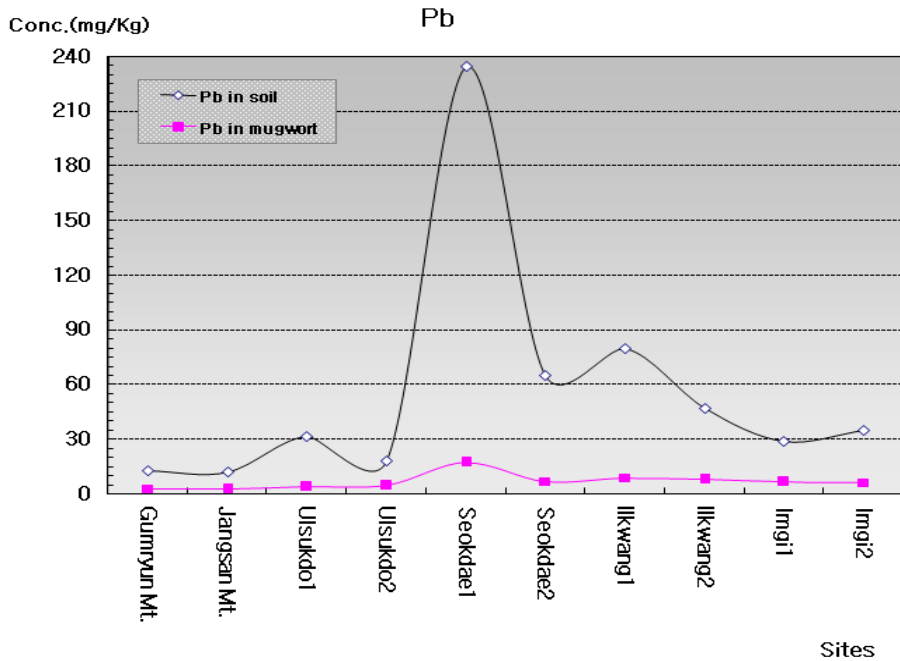


Fig. 7. Average concentration of Pb soils and mugworts.

호 비교 연구가 필요할 것으로 사료된다.

토양과 쑥에 대한 As의 농도범위는 Fig. 6에 나타내었다. 토양의 평균 As농도 범위는 4.46~23.77mg/kg로 As 토양우려기준(2지역 : 50mg/kg) 이내로 조사되었다,

자생식물(쑥)의 평균 As의 농도범위는 0.87~3.50 mg/kg로 분석되었으며, 자생식물(쑥)의 As농도는 국내에서 연구(식약청용역사업)된 파의 As 평균 농도 0.57mg/kg보다 높은 결과를 나타낸 것은 조사지점 중

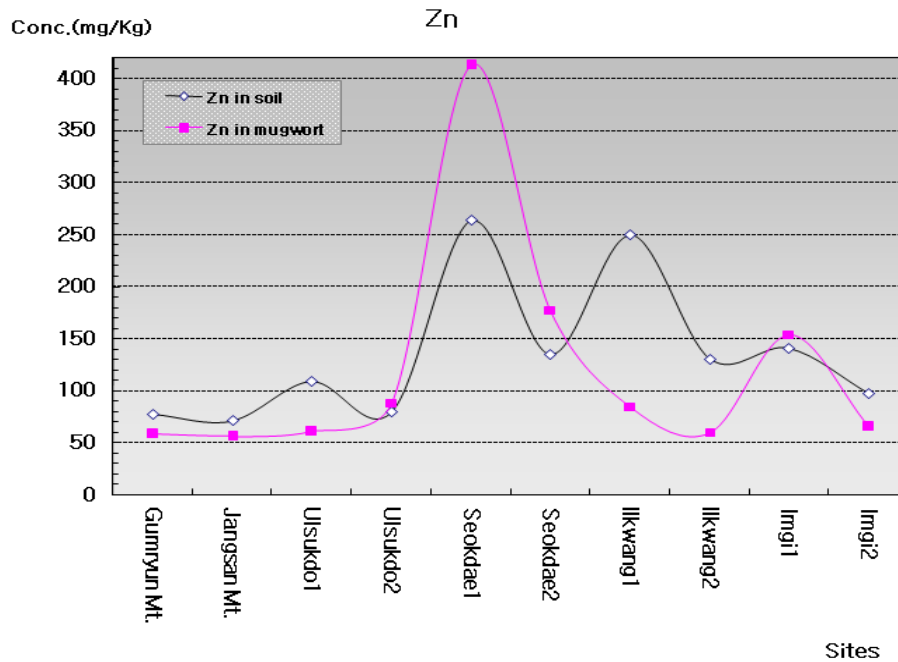


Fig. 8. Average concentration of Zn soils and mugworts.

일광광산지역의 산성광산배수의 영향인 것으로 사료되며, 따라서 일광광산 주변지역의 자생식물(쑥)에 대한 지속적인 조사가 필요할 것으로 판단되며, As의 중금속 기준 설정 시 일본의 농작물중 엽채류인 시금치(As: 1.0 mg/kg) 기준을 참고할 필요가 있다고 사료된다.

토양과 쑥에 대한 Pb의 농도범위는 Fig. 7에 나타내었다. 토양의 평균 Pb농도 범위 11.67~234.16mg/kg, 석대매립장지역의 Pb이 최고값으로 조사되어 쓰레기 매립장지역 토양 특성을 나타낸 것으로 보이며, 그와 대조적으로 대조지역인 장산지점의 Pb의 값이 11.67mg/kg로 최소값으로 조사되었다.

석대지역의 Pb의 농도가 우려기준(1지역 기준: 200 mg/kg)을 약간 초과(234.16mg/kg)하였으나 2지역 기준(400mg/kg)에는 훨씬 미치지 못 하였다. 참고로 2011년도 토양오염실태조사결과의 폐기물처리 재활용 관련 지역 지점 Pb의 최고농도 322.56mg/kg 보다는 낮게 조사되었다. 자생식물(쑥)의 Pb의 평균 농도범위는 2.42~16.94mg/kg로 조사되었으며, 자생식물(쑥)의 Pb 농도가 국내에서 연구(식약청용역사업)된 배추의 Pb의 평균값 0.697mg/kg보다는 약간 높은 결과를 보인 것은 쓰레기매립지역인 석대지점에서 Pb의 토양농도가 높게 조사되어 토양에서 자생식물(쑥)으로서의 Pb의 농도가 높게 전이된 것으로 사료된다. 앞으로도 석대지점은 지속적인

토양오염도 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

토양과 쑥에 대한 Zn의 평균농도범위는 Fig. 8에 나타내었다. 토양의 평균 Zn농도 범위는 70.60~262.80 mg/kg로 Zn 토양우려기준(2지역 : 600mg/kg) 이내로 조사되었다, 자생식물(쑥)의 평균 Zn농도범위는 55.75~412.37mg/kg로 분석되었으며, 자생식물(쑥)의 Zn농도는 국내에서 연구(식약청용역사업)된¹⁾ Table 5의 국내에서 재배된 농작물들의 중금속중 Zn 평균 농도 4.66~593.0mg/kg값과 비슷한 결과를 도출하였다.

우리나라 휴·폐광산 주변의 자생식물(쑥)에 대해서는 국내에 보고된 자료는 없으며, Table 5는 1990년 이후 국내에서 발표된 기준의 연구 결과를 종합하여 광산 인근 농경지에서 재배되는 농작물의 중금속 오염도를 정리한 표이다. 현미 중 Cd 함량의 경우 우리나라의 현행 식품기준인 0.2mg/kg을 초과하지는 않았으나 CODEX 일반식품 권고기준 및 EU의 농산물중 중금속 잠정기준안인 0.06mg/kg과 0.1mg/kg을 초과하는 것으로 나타났다¹⁾. 또한 옥수수, 파, 상추, 콩의 Cd 함량은 0.360, 0.670, 0.876, 0.220 (mg/kg)으로 CODEX 일반식품 권고기준과 비교할 때 6배, 11.17배, 14.6배, 3.67배 초과하는 것으로 나타났고, As의 경우 옥수수에서 3.78배 초과하는 것으로 나타났다. 부산지역 폐광산 주변의 자생식물(쑥) 중금속 농도와 비교해보면 Cd의 경우 부산지역 휴·폐광산

Table 5. The contents of heavy metals in crops in the agricultural to the abandoned mine areas in Domestic.(2007)¹⁾ (mg/kg)

Crops	Cd	Cu	Pb	As	Hg	Zn
Unpolished rice	0.138	3.054	0.374	0.080	-	22.161
Corn	0.360	1.277	1.287	0.453	-	48.693
Green onion	0.670	18.400	2.070	-	-	86.000
Luttuce	0.876	19.600	3.000	-	-	593.000
Pepper	0.026	3.269	0.031	0.005	-	38.190
Red bean	0.220	6.280	0.040	0.003	0.010	67.490
Black sesame	N.D	2.560	N.D	N.D	N.D	53.420
Black sesam leaf	N.D	9.998	N.D	N.D	N.D	4.600
Rice	0.20	-	-	-	-	-

(임기, 일광) 지역의 평균 Cd농도가 0.66 mg/kg로 조사되어 식품의약품청에서 발표된 자료의 옥수수(0.36 mg/kg)보다는 높았으며, 파(0.67 mg/kg)는 비슷하였고 상추(0.876mg/kg)보다는 낮게 조사되었다. Cu의 경우는 18.93mg/kg로 조사되어 옥수수(1.277mg/kg), 고추(3.269mg/kg)보다는 높게 조사되었으나 파(18.400 mg/kg)와는 비슷하였으며, 상추(19.600mg/kg)보다는 약간 낮게 조사되었다. Zn의 경우에는 90.46mg/kg으로 조사되어 옥수수(48.693mg/kg), 파(86.000mg/kg)보다는 높았으나, 상추(593.000mg/kg)보다는 1/6배 정도의 농도로 조사되었다.

Pb과 As 경우에는 각각 7.04mg/kg, 2.05mg/kg로 조사되어 식약청 용역결과와 비교해보면 상추(Pb:3.000 mg/kg)과 옥수수(As:0.453mg/kg)보다는 2배~4배 정도 높은 결과를 얻었다. 이와 같은 결론을 종합적으로 분석해보면 Cd, Cu의 경우는 식약청 용역사업 결과와 비슷한 값을 도출하였으며, Pb, As 는 본연구의 결과 값이 높았으며, Zn의 경우에는 식약청 용역사업의 결과가 높게 조사되었으며, 향후 조사·연구 계획에서는 농업작물 확대와 채취지점 확대 및 채취 횟수 증가를 고려해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

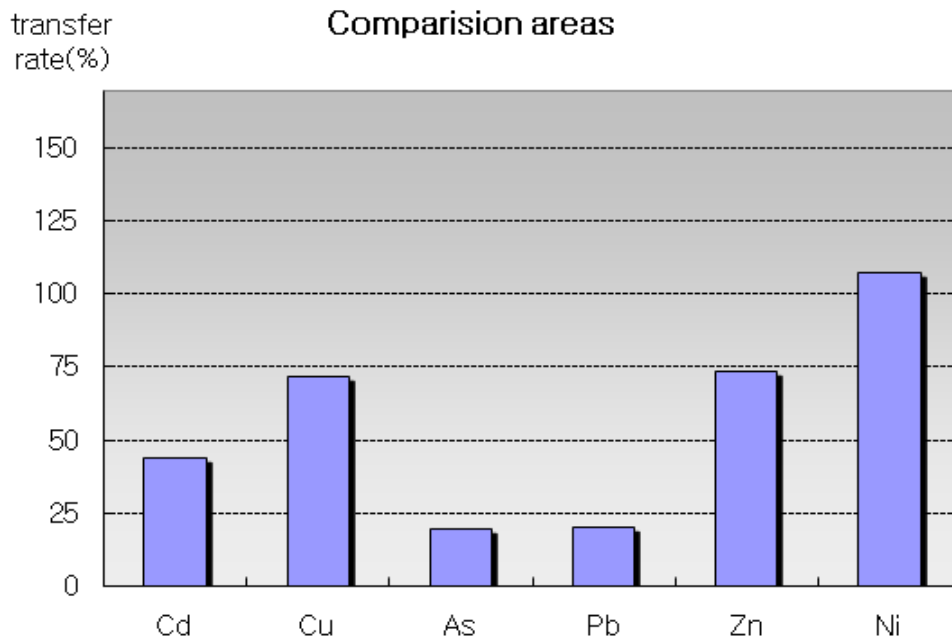


Fig. 9. Transfer rate of Comparision areas.

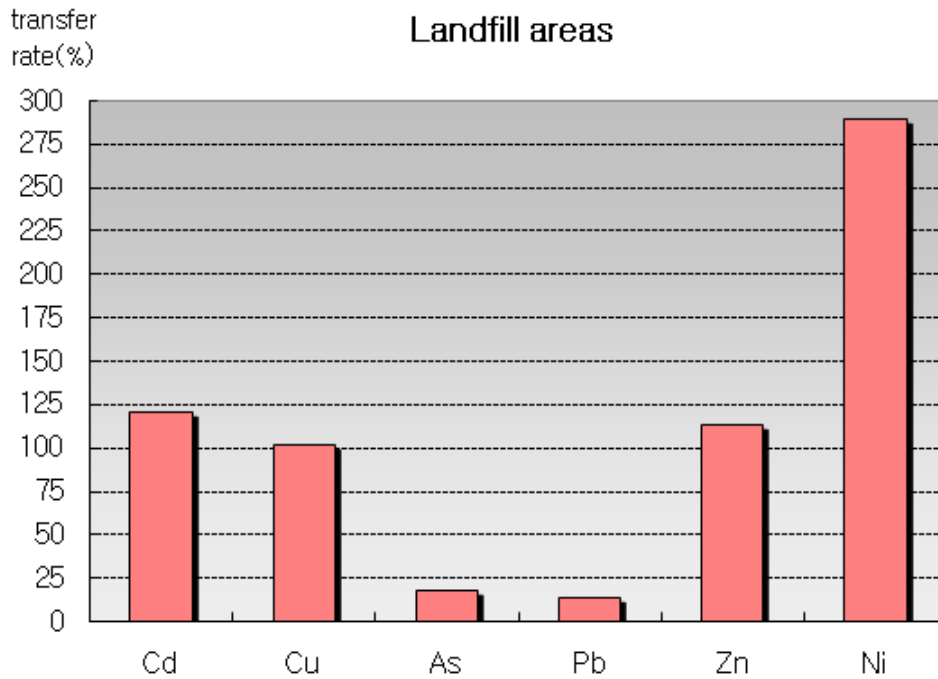


Fig. 10. Transfer rate of landfill areas.

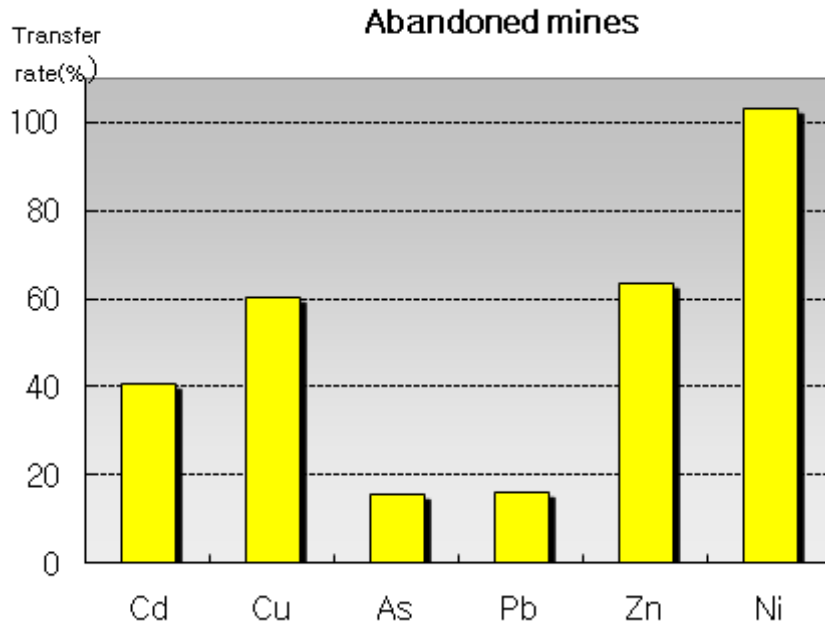


Fig. 11. Transfer rate of abandoned mine areas.

토양의 중금속 함량과 자생식물(쑥) 중금속 함량의 전이율 비교 분석

본 연구의 전이율 계산은 토양의 중금속 함량에 대한 자생식물(쑥)의 중금속 전 함량의 비율로 계산하여 대조

지역, 매립지지역, 휴폐광산지역 3분류로 하여 중금속의 전이 실태를 Fig. 9와 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 9의 대조지역에 토양에서의 자생식물(쑥)의 전이율은 Cd 44.19%, Cu 72.17%, As 19.57%, Pb

20.47%, Zn 73.78%, Ni 169.50%로 As의 전이율이 가장 낮았고, Ni의 전이율이 169.50%로 가장 높았다.

Fig. 10은 매립장 주변지역에서의 토양에서의 자생식물(쑥)의 전이율은 Cd 120.97%, Cu 101.69%, As 17.73%, Pb 13.308%, Zn 113.61.76%, Ni 289.45.%로 Pb의 전이율이 가장 낮았으며, Ni의 전이율이 가장 높게 조사되었다.

Fig. 11은 폐광산 주변지역에서 토양에서의 자생식물(쑥)의 전이율은 Cd 41.00%, Cu 60.46%, As 16.00%, Pb 16.45%, Zn 63.87% , Ni 103.22.%로 As의 전이율이 가장 낮았으며 Ni의 전이율이 가장 높았다.

본 연구에서의 전체적인 전이율을 분석해보면 대조지역, 폐광산 지역에서는 As의 전이율이 낮았으며, 매립지역에서는 Pb(13.3%)이 As(17.73%) 보다 조금 낮게 조사되었다. 폐광산지역과 매립지역에서 중금속 전이율 중 Ni의 전이율이 가장 높게 조사 되었다. 이와 같은 결론을 종합해보면 토양에서의 자생식물(쑥)로의 전이율은 중금속중 As, Pb의 전이율은 낮고, Ni, Zn의 전이율이 높다는 결론을 얻었다. 본 연구사업의 토양에서의 자생식물(쑥)으로서의 전이율과 다른 농작물의 전이율과 비교 분석해 보았을 때 식약청용역사업 보고서 결과의 농작물중 대두의 전이율 Pb 17.8%, Cd 71.8%, As가 2.5%, Cu는 185.2%로 Pb, As는 전이율이 낮으며 Cu, Cd의 전이율이 높은 결과치를 보여 자생식물(쑥)과 가장 비슷한 전이율 패턴을 보였다.

토양과 자생식물(쑥)의 중금속 함량 상관관계 비교 분석

국내 휴·폐광산 44개 광산지역에서 재배되고 있는 작물(쌀, 고구마, 배추, 시금치, 파, 무)과¹⁾ 본 연구사업의 자생식물(쑥)과의 중금속별(Pb, Cd, As, Cu) 상관관계를 비교하여 Fig. 12 및 Table 6에 나타내었다.

먼저 국내 휴·폐광산 농산물중 중금속(Pb, Cd, As, Cu) 함량과의 상관관계를 비교해보면, 전체적으로 쌀, 고구마, 배추, 시금치, 파, 무등 작물의 상관관계가 0.15미만으로 낮았으나, As의 경우 배추, 시금치, 고구마 등이 상관계수(0.19~0.63)가 다른 작물에 비해 상대적으로 높았으며, 카드뮴의 경우 쌀(0.39), 무(0.32)의 상관계수가 다른 중금속에 비해 다소 높게 나타났다. 본 연구사업의 자생식물(쑥)의 상관관계를 비교 분석해보면 Pb의 경우 0.69로 상대적으로 다른 작물의 상관관계보다 높았으며, Cd의 경우에는 0.72로 상관관계가 가장 높았고, As의 경우는 0.23, Cu의 경우는 상관관계가 0.15로 가장 낮았다. 이와 같은 연구 결과로 분석해보면 Pb와 Cd은 쌀과 상관관계가 비슷하였으며, 또한 As는 배추와 비슷하였고, Cu는 파와무가 비슷한 상관관계를 도출하였다. 향후 중금속 함량에 대한 토양과 자생식물 및 농작물간의 상관관계를 파악하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Table 6. Correlation Coefficient of heavy metals between agricultural crops and mugworts in domestic abandoned mine areas.¹⁾

Crops		Pb	Cd	As	Cu
Mugwort	r	0.69	0.72	0.23	0.15
	n	20	20	20	20
Rice	r	0.21	0.39	0.01	0.06
	n	568	600	559	640
Sweet potato	r	0.03	-0.03	0.63	-0.07
	n	130	113	117	161
Chinese cabbage	r	-0.04	0.27	0.31	-0.26
	n	288	292	323	326
Spinach	r	0.04	-0.13	0.19	0.11
	n	10	11	9	11
Green onion	r	-0.04	-0.04	0.46	-0.05
	n	131	139	153	160
Radish	r	0.04	0.32	0.19	-0.04
	n	176	208	188	222

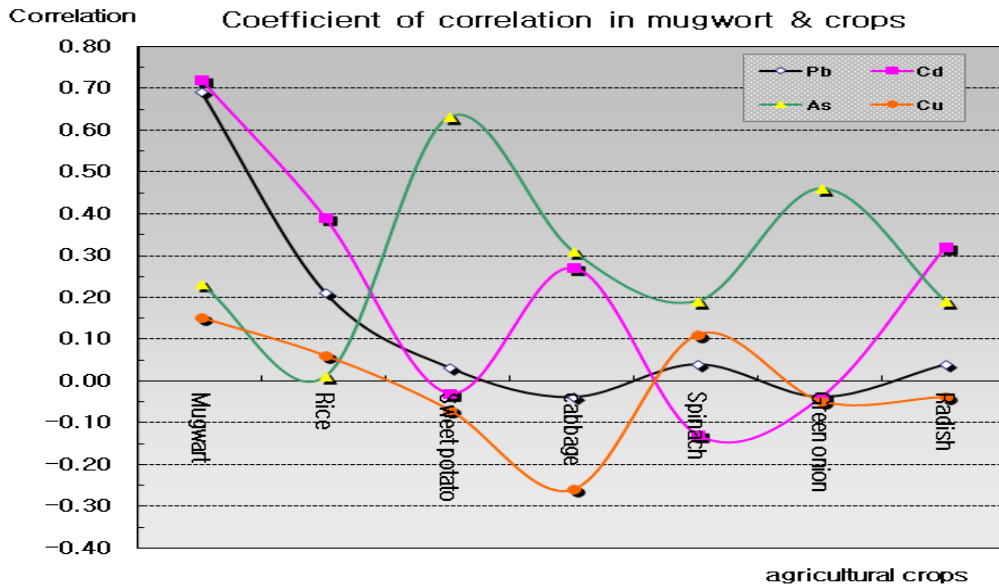


Fig. 12. Coefficient of correlation in mugworts and agricultural crops.

결 론

부산지역 휴·폐광산, 쓰레기매립장 주변 토양 및 자생식물(쑥)중금속 오염도 조사연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 휴·폐광산, 쓰레기매립장 주변 토양 오염도 조사 결과는 토양 중 중금속 Cd의 평균 농도는 1,740mg/kg로 2011년도 토양오염실태조사 지역별 평균농도 1.62~3.08mg/kg와 비슷한 결과를 보였으며, Cu는 27.253mg/kg로 2011년도 지역별 평균농도 11.00~97.70mg/kg중 산업단지 공장지역의 평균 농도인 26.73mg/kg 결과와 비슷하게 조사되었다. As는 11.943mg/kg으로 2011년도 토양오염실태 조사지점 중 광산지역 8.90mg/kg보다 약간 높게 조사되었다. Pb는 2011년도 토양실태조사 광산지역 65.000 mg/kg 보다 약간 낮은 57.460mg/kg으로 조사되어 일반적으로 토양중의 전체 중금속 오염도는 2011년도 토양오염실태조사 결과와 큰 차이가 없었다.
2. 부산지역 휴·폐광산 주변의 자생식물(쑥) 중금속 농도와 비교해보면 Cd의 경우 부산지역 휴·폐광산(임기, 일광) 지역의 평균 Cd농도가 0.66 mg/kg로 조사되어 식품의약청에서 발표된 자료의 옥수수(0.36 mg/kg)보다는 높았으며, 파(0.67 mg/kg)는 비슷하였고 상추(0.876mg/kg)보다는 낮게 조사되었다. Cu의 경우는 18.93mg/kg로 조사되어 옥수수(1.277mg/kg), 고추

(3.269mg/kg)보다는 높게 조사되었으나, 파(18.400mg/kg)와는 비슷하였으며, 상추(19.600mg/kg)보다는 약간 낮게 조사되었다. Zn의 경우에는 90.46mg/kg으로 조사되어 옥수수(48.693mg/kg), 파(86.000mg/kg)보다는 높았으나, 상추(593.000mg/kg)보다는 1/6배의 농도 값으로 조사되었다. Pb과 As의 경우에는 각각 7.04mg/kg, 2.05mg/kg로 조사되어 식약청 용역결과와 비교해보면 상추(Pb:3.000 mg/kg)와 옥수수(As:0.453mg/kg)보다는 2배~4배 정도 높은 결과를 얻었다. 이와 같은 결론을 종합적으로 분석해보면 앞으로의 조사·연구에서는 농업작물 확대와 채취지점 및 시료 채취 횟수 조절 및 증가가 필요할 것으로 사료된다.

3. 본 연구사업에서의 전체적인 전이율을 분석해보면 대조지역, 휴·폐광산지역에서는 As의 전이율이 낮았으며, 매립지역에서는 Pb(13.3%)이 As(17.73%) 보다 조금 낮게 조사되었다. 폐광산지역과 매립지역에서 중금속 전이율 중 Ni의 전이율이 가장 높았으며, 이와 같은 결론을 종합해보면 토양에서의 자생식물(쑥)로의 전이율은 중금속중 As, Pb의 전이율은 낮고, Ni, Zn의 전이율이 높다는 결론을 얻었다. 본 연구사업의 토양에서의 자생식물(쑥)로의 전이율과 다른 농작물과 전이율과 비교 분석해 보았을 때 식약청 용역사업 보고서 결과의 농작물중 대두의 전이율이 Pb이 17.8% Cd이 71.8%, As가 2.5%, Cu

는 185.2%로¹⁾ Pb, As,는 전이율이 낮으며 Cu, Cd의 전이율이 높은 결과치를 보여 자생식물(쑥)과 가장 비슷한 전이율 패턴을 보였다.

4. 본 연구사업 자생식물(쑥)의 중금속농도와 상관계수를 비교 분석해보면 Pb의 경우 0.69로 상대적으로 다른 작물의 상관관계보다 높았으며, Cd의 경우에는 0.72로 상관관계가 가장 높았고, As의 경우는 0.23, Cu의 경우는 상관관계가 0.15로 가장 낮았다. 이와 같은 연구 결과로 기존 식품의약품 안전청 용역사업 결과의 데이터와 비교해보면, Pb와 Cd는 쌀과 상관관계가 비슷하였으며, 또한 As는 배추와 비슷하였고, Cu는 파 및 무와 비슷한 상관관계 결과를 도출하였다.
5. 본 연구사업의 결론을 종합적으로 정리해보면, 전이율(토양→쑥)은 아래와 같이 중금속이 어느 정도 전이율이 높은 순으로 경향을 보여주고 있다
 (대조지역)⇒ Ni > Zn > Cu > Cd > Pb > As
 (매립지역)⇒ Ni > Cd > Zn > Cu > As > Pb
 (폐광산지역)⇒ Ni > Zn > Cu > Cd > Pb > As
 본 연구에서의 자생식물(쑥)에서의 중금속 상관관계는 아래와 같이 Cd과 Pb는 어느 정도 상관관계가 있음이 조사 결과로 확인되었으며, 또한 데이터를 분석해본 결과 전이율이 낮은 중금속 항목들에서도 높은 상관관계를 발견할 수 있었는데 이런 결과들은 앞으로도 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.
 끝으로, 비록 조사지점들(휴·폐광산, 쓰레기매립장)이 원천적으로 광산배수의 영향 및 생활폐기물 매립지역으로 토양의 중금속 함량이 일부 지역에 비해 다소 높게 나타났으며, 자생식물(쑥)의 중금속 농도도 토양으로부터의 전이로 인해 다소 높게 조사되었다. 향후 자생식물(쑥) 뿐만 아니라 우리나라 농산물의 중금속 잔류허용기준 설정 시 분류별(곡류, 엽채류, 근채류, 열경채류 등)이 아닌 각 농산물별(쑥, 시금치, 파, 양파, 옥수수, 고구마, 배추 등) 합리적인 잔류허용기준이 필요할 것으로 사료되며, 현재 국내 농산물 중금속 잔류허용기준은 Pb와 Cd, 2항목만 설정되어있어, 향후 As 등의 중금속 항목도 추가로 잔류허용기준 설정이 필요할 것으로 사료된다.
 향후, 본 연구에서의 조사된 중금속 노출농도가 오염 노출특성 노출농도기반의 평가에서 위해성 기반 평가로의 정책 전환시 객관적인 자료로 제공될 것으로 본다.

참고문헌

1. 광산 지역에 재배되는 농산물의 중금속 오염 및 전이실태 조사, 식품의약품안전청(2006).
2. 오종민, 배재근, 토양오염학, 신평문화사(2001).
3. 석대매립장 주변 환경영향 종합보고서, 부산광역시(2007).
4. 조성진, 박천제, 토양학, 향문사(2002).
5. 손문, 이선갑, 김종선, 김인수, 이진, 부산시 도심지의 지하 지질구조와 단층선상과 관련된 지질위험도 분석, 자원환경지질, 40(1), pp.87~101(2007).
6. 장태우, 강필중, 박석환, 황상규, 이동우, 한국지질도 부산 설명서, 한국동력자원연구소(1983).
7. 한기석, 박창규, 농업환경화학, 동화기술(1989).
8. 김재욱, 조성환, 지의상, 차원섭, 농산식품가공학, 문운당(2006).
9. 식품공전시험법, 식품의약품안전청(2009).
10. 2011년도 토양오염실태조사보고서, 부산광역시보건환경연구원(2011).
11. 신현무, 부산지역내 휴·폐광산 지역의 토양오염도 정밀조사 및 대책마련을 위한 우선순위 수립 및 대책제시, 부산지역환경기술개발센터(2007).
12. 토양오염공정시험기준, 환경부(2009).
13. 폐금속광산 토양오염실태 일제조사, 환경부(2003~2004).
14. 신용건, 강원도내 폐광산 인근 토양오염지역 농산물 안정성 평가, 한국토양비료학회(2010).
15. 최진원, 유근제, 구명서, 박준홍, 폐광산 주변 토양 중금속 오염노출농도 우려기준과 위해성 비교 연구, 대한토목학회(2012).
16. 오찬환, 유연희, 국내토양오염공정시험방법중 중금속 관련 오염평가의 문제점과 개선책, 한국지하수토양환경지질학회지, 제6권(2001).
17. 이진수, 전효택, 금속광산지역 독성 중금속원소들의 인체위해성 평가, 한국지하수토양환경지질학회지, 제37권(2004).
18. 김정대, 강원도 폐금속광산지역의 광미와 주변토양의 중금속오염현황 및 오염도 평가, 대한광산학회지, 제22권(2005).
19. Risk Assessment information system(<http://rais.ornl.gov>), US EPA(2006).
20. Intergrated Risk Information system(<http://epa.gov/iris>), US EPA(2008).