Korean J. Environ. Agric.
Vol. 13, No. 1, April 1994

장항제련소 지역의 논토양과 수도체중 Cu 함량의 변화에 관한 연구

김성조 · 이만상 · 류택규 · 양창휴* · 문광현 · 백승화

Variation of Copper Content in Paddy Soil and Rice from Janghang Smelter Area

Seong-Jo Kim, Man-Sang Lee, Taek-Kyu Ryu, Chang-Hyu Yang*,
Kwang-Hyun Moon and Seung-Hwa Baek

Abstract

To investigate differences in Cu contents in paddy soils and rices, being affected by air pollutants from the Janghang Smelter, soil samples at the different directions and surface (0-15cm) and subsurface (15-30cm) were collected in 1982 and 1990, and rice plants at the soil corresponding sampling sites in 1990 were also at separately collected from the Janghang Smelter area.

Soil samples were extracted with 4M-HNO_3 and plant samples were digested with a mixture of HNO_3 and $HClO_4$ for analyzing Cu, Zn, Cd and Pb by atomic absorption spectrophotometry.

The Cu contents in soils ranged from 5.1 to 391.0 mg kg^{-1}. The average content of Cu in 1990 was higher than that in 1982. The Cu content in soils nearer to the center of the smelter was higher than that farther from the center. The Cu content was highest at the east direction, and was in order of east > north-north east = north east > north. The variation of Cu levels in soil at east sites was more considerable than other directions. The Cu level in surface soils was higher than that in subsurface soils. The Cu contaminated area was within 5 km at east, and

원광대학교 농과대학 농화학과(College of Agriculture, Wonkwang University Iri, 570－749, Korea)
*호남작물시험장(Honam Crop Experiment Station, RDA, Iri, 570－080, Korea)
본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비 지원(KOSEF 90-0700-13)에 의하여 수행되었음.

3 km at north-north east and north east. A significant correlation was found between Cu content in surface soils of 1982 and that in surface and subsurface soils of 1990, and between Cu content in soils and soil properties such as organic matter(OM), available phosphate, available silicate, exchangeable Ca^{++} and Na^{+} in 1982. The Cu content in brown rice ranged from 0.4 to 3.6 mg kg^{-1}, and was the lowest in parts of rice plant, and Cu content in a part of plant was 13.75 times higher than that in brown rice.

The Cu content of leaf sheath, stem and brown rice was correlated with the levels of Cd, Zn, Cu and Pb in soils. The Cu content in soil regardless of years and soil depths was correlated with Zn and Pb in soil in the area affected by waste gas.

서 론

산업활동의 증대 및 도시화로 인한 인구 집중 현상에 의하여 환경오염 물질인 중금속이 하천 및 대기중에 증가되는 원인이 되고 있으며, 이 밖에도 농업용수의 관개[1,2], 농약과 비료의 시용[3,4], 도시하수 sludge 및 산업 폐기물을 농업자재로의 이용[5]을 들 수 있다. 이들로 인하여 토양 중 중금속 물질을 증가시키는 원인이 되었다[6].

Dean 등[7]은 식물독성을 일으키며, 식품연쇄를 통한 환경을 오염시킬 수 있는 원소로 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb 및 Zn등 10가지를 들고 있으며, Culbard 등[8]은 영국의 도시분진과 토양의 중금속 오염현상에 대해 연구한 결과 중금속 물질에 장기간 노출되는 경우 토양에서 Pb, Cd, Cu, Zn등의 함량이 높아진다고 하였다.

Walsh등[9]은 토양에 Cu가 과잉 축적되어 발생되는 식물독성은 25-40mg Cu kg^{-1}일 때 대부분의 식물중에서 발생한다고 하였고 Bremner[10]는 Cu에 대해 예민한 양과 소와 같은 가축은 사료 중의 Cu 농도가 용해성 Cu염으로 25 - 100 mg Cu kg^{-1}에서 독성을 나타낸다고 하였으나 사료 중에 Zn, Cd, Fe 또는 Mo의 증가는 이들 동물의 경우 사료에 첨가된 Cu독성을 감소 시키는 결과가 되었다고 하였다.

토양 중에서 Cu는 Mn 및 Fe의 수산화물과 Phyllosilicate의 표면에 강하게 흡착되어 토양용액 중에서 농도가 낮으며, 유기물질과 결합하여 용해성과 비용해성 복합물질 상태로 축적되고 있는 것으로 알려져 있다[11,12,13,14].

우리 나라의 경우 토양 중 Cu 함량을 오염원 별로 보면 1987년의 결과에서 공단하류 지역은 Cu 8.963ppm, 도로변은 5.009ppm, 금속제련지역은 15.117ppm으로 보고 되고 있다[2].

한편 토양 표면의 퇴적물 중 중금속 물질의 농도 증가는 일반적으로 산업활동 또는 도시인근 지역의 대기형 오염원에 가까울수록 높았으나[15,16], 오염원으로부터 먼 곳에서는 Ca, Mg, K, Na의 함량이 높다고 하였다[17]. 이러한 현상은 화석연료의 사용과 중금속을 제련하는 제련과정에서 중금속 성분이 분진이나 Fume 상태로 연돌로 배출됨에 따라 배기 중에 이들 중금속 물질이 함유되어 있어 대기와 함께 이동된 결과일 것이다[18]. 따라서 함량증가의 정도차이는 있겠으나 제련소 지역의 토양 중에 중금속 물질이 점차 증가될 가능성이 높을 것으로 알려지고 있다[6].

본 연구는 대기오염에 따른 토양 중 Cu의 함량 변화 차이를 구명하기 위하여 과거 동제련을 장기간 하여 오므로써 대기형 오염물질 방출지역인 장항제련소 인근지역의 논 토양을 중심으로 표·심토로 구분하여 1982년도에 채취한 것과 1990년도에 채취한 토양시료를, 그리고 1990년에 토양시료 채취지역에서 재배된 수도체 중 Cu 함량을 분석하여 그 변화 요인을 추적 분석한 결과를 보고하는 바이다.

재료 및 방법

1. 시료의 채취 및 조제

충청남도 서천군 장항읍에 위치한 장항제련소의 배기연돌을 중심으로 동, 동북, 북북동 및 북쪽 등 4개 방향에서 1km간격으로 그림 1의 장항지역(1982년도 16개 지점과 1992년도 22개 지점)을 1982년에는 4월 30일부터 2주간, 1990년에는 10월 6일부터 1주간에 걸쳐 층위 별로 표토(A: 0-15cm)와 심토(B: 15-30cm)로 구분 채취하였으며 그늘진 곳에서 풍건 후 2mm체를 통과시켜 polyethylene병에 보관하였다가 분석 하였다.

수도체 시료는 수확직전에 토양시료를 채취시와

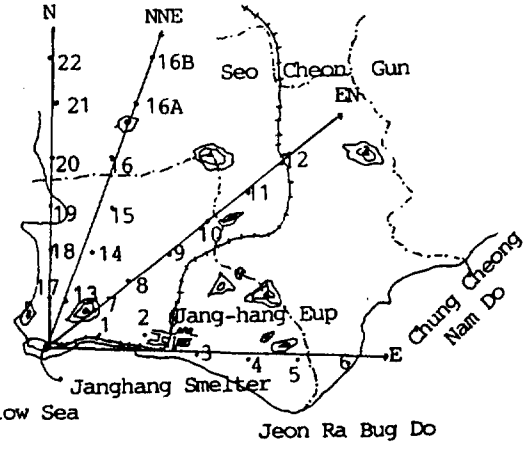

Fig. 1. Sampling sites at the Janghang Smelter area.

Table 1. Physico-chemical properties of surface and sub soils at the Janghang Smelter area in 1982 and 1990.

Item of analysis		1982 Range			1982 Mean	1990 Range			1990 Mean
					Surface soil(0-15 cm)				
Clay(%)		4.50	–	52.00	26.00	0.00	–	33.00	15.02
pH		4.90	–	7.70	5.60	5.10	–	8.30	6.44
Organic matter(%)		0.60	–	3.40	2.00	0.10	–	3.80	2.02
Available P_2O_5(ppm)		10.00	–	412.00	148.81	5.00	–	466.00	114.76
Available SiO_2(ppm)		51.85	–	462.00	133.05	52.00	–	711.00	167.00
C.E.C.(me/100g)		6.70	–	30.80	12.44	4.40	–	11.80	9.02
Exchangeable	K	0.08	–	1.17	0.31	0.11	–	0.51	0.25
Cation	Ca	1.59	–	3.13	2.30	0.95	–	3.13	2.43
(me/100g)	Mg	0.47	–	3.88	2.02	0.63	–	3.85	1.56
	Na	0.10	–	21.70	3.21	0.02	–	1.42	0.37
					Sub soil(15-30 cm)				
Clay(%)		3.50	–	52.00	29.09	0.00	–	33.00	16.38
pH		4.80	–	8.60	6.28	3.90	–	8.00	6.14
Organic matter(%)		0.40	–	9.60	2.33	0.10	–	3.50	1.91
Available P_2O_5(ppm)		5.00	–	459.00	118.39	3.00	–	388.00	99.40
Available SiO_5(ppm)		57.00	–	697.00	118.29	42.00	–	348.00	141.60
C.E.C.(me/100g)		4.20	–	16.00	9.22	0.90	–	11.00	6.47
Exchangeable	K	0.08	–	0.95	0.27	0.13	–	0.73	0.31
Cation	Ca	1.37	–	3.03	2.34	0.32	–	10.40	3.31
(me/100g)	Mg	0.37	–	3.83	2.25	0.26	–	3.92	1.24
	Na	0.07	–	5.30	0.92	0.01	–	0.79	0.13

* Data are average with value analytical of samples.

동일지점에서 채취하였다. 다만 미작지가 아닌 지점 그림 1의 1, 2, 3, 20 및 21 위치에서는 시료채취가 불가능하였다. 수도체의 시료는 음건한 상태를 50°C에서 2시간동안 재건조하여 엽초, 엽신, 줄기, 화서축 및 왕겨등은 20 mesh, 현미는 60 mesh로 분쇄하여 분석 하였다.

2. 일반분석 및 중금속분석

공시토양의 일반적 이화학적 성질은 점토함량, 토양산도(pH), 유기물함량, 유효인산, 유효규산, 염기치환용량(CEC) 및 치환성양이온 등에 대하여 분석을 행하였고[19], 토양 중의 총 중금속함량은 풍건세토 3.5g에 4M HNO3 20ml를 가하여 70℃ 에서 24시간 가열 환류추출하고 여기에 탈이온 증류수를 가하여 35ml로 정용 후 30분간 진탕시켜 여과한 여액을 원자흡수분광광도계(Model: Varian SpectrAA 30; Graphite furnace GTA-96)로 분석하였다[20].

수도체중 중금속함량은 엽초, 엽신, 줄기, 화서축, 왕겨 및 현미 각 0.2g에 진한 HNO_3과 진한 $HClO_4$(2 : 1, v/v) 혼합액을 2ml 가하고, 서서히 가온시켜 최종 분해온도를 70℃로 유지, 분해액의 색이 미색 또는 투명해지면 분해가 종료된 것으로 하여 60℃ 수욕조에서 3시간 중탕 후 탈이온 증류수로 20ml되게 정용하고 그 여액을 원자흡수분광광도계(Model: Varian SpectrAA 30; Graphite furnace GTA-96)로 측정하였다[21].

3. 통계처리

분석되어진 모든 자료는 SYSTATS STATISTICS PACKAGE와 CRICKET GRAPH를 이용하여 상관관계를 구하였다.

결과 및 고찰

1. 토양 중 Cu 함량

1982 및 1990년에 채취한 토양을 표·심토 별로 나누어 물리화학적 성질을 분석한 결과는 표 1과 같다.

분석치의 평균치로 비교해 보면 시료채취년도와 관계없이 심토에서 보다는 표토에서 P_2O_5, SiO_2, CEC, 치환성 Na^+가 높았고 점토와 pH는 표토 보다는 심토에서 높았으며, 유기물함량(OM) 및 K, Ca, Mg과 같은 치환성 양이온은 표·심토간 차이가 거의 없었다.

토양 중의 Cu 함량을 년도별, 방향별 및 표.심표별로 범위, 평균 값을 나타낸 것은 표 2와 같다.

1982년과 1990년 모두 제련소 동쪽 방면의 토양 중의 Cu 함량이 표토는 각년도에 따라 27.4-391.0,

Table 2. Copper contents in soils with directions, soil depths and years at the Janghang Smelter area in 1982 and 1990.

Directions	Soil depth (cm)	1982		1990	
		Range	Mean	Range	Mean
			(mg kg-1)		
E	0−15	27.4−391.0	124.26	22.2−368.4	134.86
	15−30	20.4−113.1	59.57	18.3−364.0	132.72
NE	0−15	23.1−122.3	53.00	17.6−110.8	60.42
	15−30	10.4−185.1	63.36	18.0− 87.1	46.23
NNE	0−15	38.6− 96.9	58.57	28.7−203.6	66.86
	15−30	6.9− 18.4	13.97	23.1−187.1	58.64
N	0−15	−	−	5.1− 36.5	21.25
	15−30	−	−	6.8− 36.3	21.00

22.2-368.4 kg mg^{-1} 심토에서 20.4-113.1, 18.3-364.0 kg mg^{-1}으로 다른 방향보다 높았고, 그 평균 함량도 1990년도의 표·심토에서 138.46, 132.72 kg mg^{-1}으로 보다 높아지고 있었다. 각 방향별 최소치와 비교해 볼 때 1982년 보다 1990년도의 토양중 Cu함량이 많아진 원인은 제련소 배연이 영향을 끼친 것으로 볼 수 있었다. 그러나 북동쪽의 토양에서는 1990년도에 표토에서는 증가되었으나 심토의 경우 증가된 경향을 보기 어려웠으며 분석결과 오히려 감소되는 것으로 나타났다.

이와같이 Cu함량은 년도가 지남에 따라 증가하고 주로 표토 중에 집적되고 있으며, 제련소 배연 방향에 따라 Cu 함량의 차이가 있었는데, 이는 해양으로부터 불어오는 바람 때문인 것으로 생각되었고 특히 동쪽 방향에서 높은 Cu의 함량을 보인 것은 편서풍의 영향이었다고 보고한 김과 양[6]의 결과와

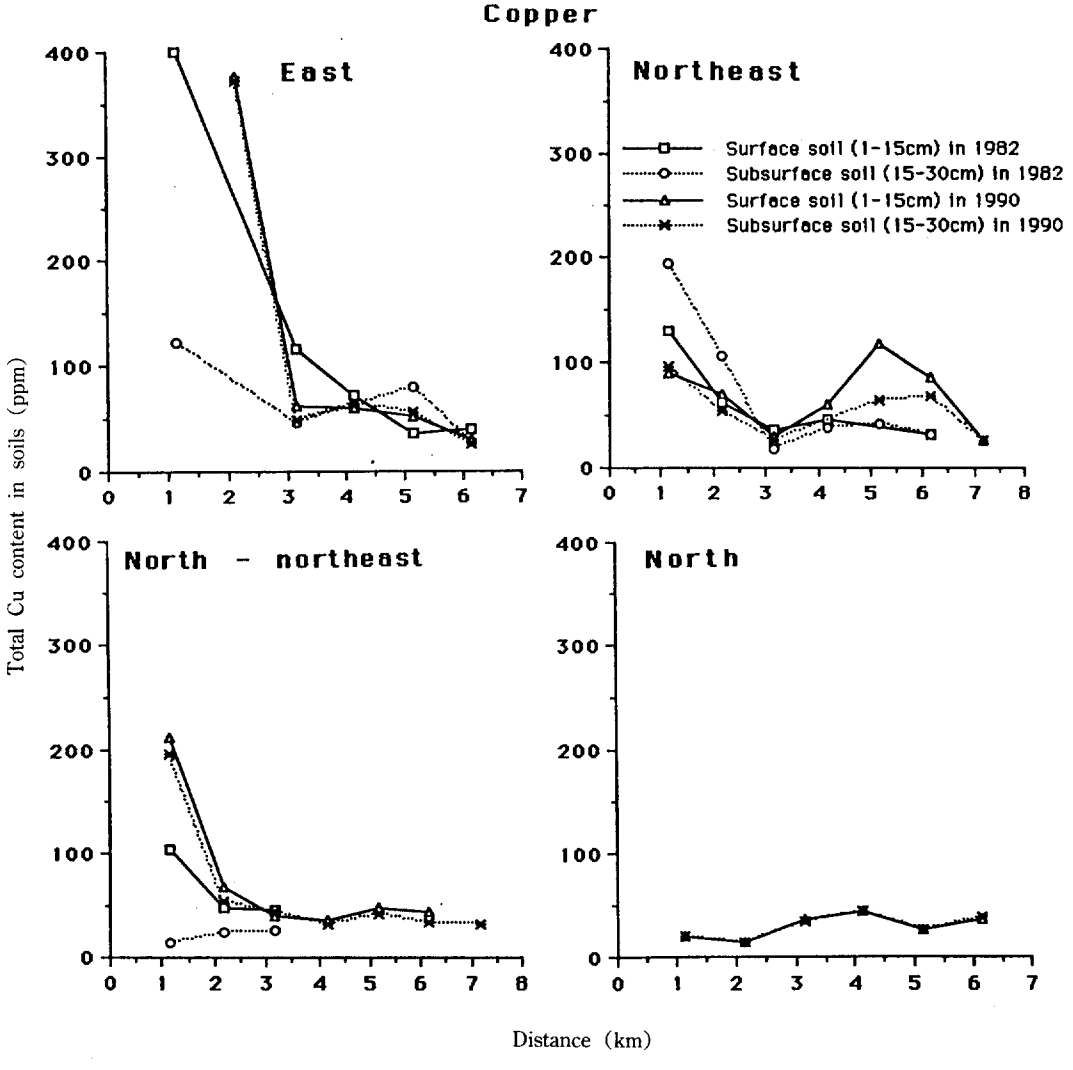

Fig. 2. Variation of copper content in soils with directions, soil depths and distances from the Janghang Smelter in 1982 and 1990.

일치되었으며, 이는 토양 중 Cu함량이 제련소 배연이 지속되면 높아 질 수 있음을 보여주는 결과로 Driscoll들[15]이 보고한 결과와 유사하였다.

그림 2는 제련소 인근 토양 중 Cu 함량의 변화를 배연연돌을 중심으로 채취 년도를 달리하여 거리별, 토심별 및 방향별로 나타낸 것이다.

제련소 배연의 영향에 의한 토양 중의 Cu함량은 제련소의 동쪽방면에서 그 함량변화가 뚜렷하였고, 각 방향별 Cu함량은 표토의 Cu가 심토 보다 높고 제련소에서 부터 거리별 Cu함량변화는 동쪽 및 북북동쪽 방면에서 오염원으로 부터 거리가 멀 수록 토양 중 Cu 함량이 낮아지는 현상이 비교적 잘 나타내고 있었다. 이러한 결과는 배연에 의한 오염반경을 동쪽은 5km, 북북동과 북동쪽이 3km였으며, 북쪽의 경우는 오염반경이 뚜렷하지 않았다. 따라서 Cu도 다른 중금속들과 마찬가지로 동제련시에 배연을 통한 대기오염물질의 하나로 토양 중 Cu 함량을 높일 수 있다고 생각된다.

표 3은 토양 중의 Cu 함량과 시료채취 년도별, 토양의 깊이에 따른 상관관계를 조사한 것이다.

년도 별 토심 별 Cu 함량의 변화는 년도 간의 경우 고도의 유의성있는 정의 상관이 인정되었으며, 토심 간에는 1982년도의 경우 표·심토에서는 유의성을 인정할 수 없었으나 1990년도의 표·심토 간에 고도의 유의성있는 상관관계를 나타내었다. 이는 장항제련소 배연 중에 존재하는 Cu가 년도가 경과함에따라 토양에 축적되어 Cu함량 증가의 요인이 되는 것으로 생각되었다.

Table 3. Correlation coefficient between copper contents in soils with the soil depths and with the year at the Janghang Smelter area.

Heavy metal	Year	Soil depth (cm)	1982		1990	
			0-15	15-30	0-15	15-30(cm)
Cu	1982	0-15	1.000			
		15-30	0.525	1.000		
	1990	0-15	0.690**	0.356	1.000	
		15-30	0.719**	0.425	0.993**	1.000

* : P<0.05, ** : P<0.01

2. Cu의 토양 중 잔류와 토양 특성과의 관계

토양의 몇가지 물리화학적 성질과 토양 중 Cu 함량과의 상관관계를 나타낸 것은 표 4와 같다.

토양의 특성과의 Cu함량과의 관계를 보면 1982년도 토양의 경우 유효규산, 치환성 Ca^{++} 및 Na^{+} 함량과 고도의 유의성 있는 상관을, 그리고 유효규산, 치환성 Mg^{++} 함량과는 유의성 있는 상관을 나타냈으나, 1990년도 토양에서는 유효인산만 유의성 있는 정상관을 보였다.

토양 중에서 Cu함량과 다른 중금속과의 상관관계를 나타낸 것은 표 5이다.

토양 중 Cu의 함량이 많으면 표층토의 Cd 및 표·심토중 Zn 및 Pb 의 함량이 많아지는 고도의 유의성 있는 정의 상관관계를 보이고 있었는데, 양

Table 4. Correlation Coefficient(r) between copper contents in soils and soil properties at the Janghang Smelter area.

Heavy metal	Year	Soil depth (cm)	OM[a]	Ap[b]	As[c]	Exchangeable cation			
						Ca	Na	K	Mg
Cu	1982	0-15	0.482	0.492*	0.769**	0.644**	0.865**	-0.084	-0.543*
		15-30	0.050	-0.195	-0.156	-0.044	0.634*	0.064	0.362
	1990	0-15	0.128	0.302	0.059	0.153	-0.225	0.061	-0.158
		15-30	-0.007	0.488*	0.231	0.135	-0.141	0.176	0.039

a : Organic Matter(%), b:Available phosphate(ppm), c:Available silicate(ppm)
* : P<0.05, ** : P<0.01

Table 5. Correlation coefficient between copper content and contents of heavy metals of soil depth in different years at the Janghang Smelter area.

Metal	Year	Soil depth (cm)	Heavy metals in soil		
			Cd	Zn	Pb
Cu	1982	0−15	0.926**	0.930**	0.903**
		15−30	0.395	0.938	0.746*
	1990	0−15	0.877**	0.887**	0.974**
		16−30	0.037	0.814**	0.958**

* : P<0.05, ** : P<0.01

적인 차이에도 불구하고 이들 중 어느 한 중금속의 토양의 오염은 다른 중금속도 같이 오염되었음을 보여주는 결과라고 생각된다.

3. 수도체 중 Cu 함량

1990년도 수도체에 대하여 방향에 따른 부위별 Cu 함량의 범위, 평균값을 나타낸 결과는 표 6과 같다.

수도체 중 Cu의 함량은 수도체 부위 간의 함량 차이가 크고, 수도체 중의 줄기, 엽신 및 왕겨에서 높았고, 현미 중 농도가 가장 낮았다. 실제로 현미 중 Cu함량 범위는 0.4-3.6 mg kg^{-1}인데 대하여, 왕겨 중 농도는 7.2-32.7 mg kg^{-1}로 방향에 따라서는 현미 중 평균 농도의 13.75배가 축적되는 경우도 있었다. 이것은 대기중 Cu로 인한 토양중 Cu가 수도체에 흡수될 경우 현미에로의 이동성이 작은 것으로 볼 수 있다.

4. 토양 중 중금속 함량과 수도체 중 Cu 함량과의 관계

토양 중 중금속함량과 수도체 부위별 흡수된 Cu 함량과의 상관관계를 조사한 결과는 표 7과 같다.

토양 중 Cd, Zn, Cu 및 Pb의 증가는 수도체의 엽신, 줄기 및 왕겨에서 Cu함량을 높이는 정의 상관관계를 나타내었으며, 토양에 존재하는 중금속 종류 및 함량의 차이로 중금속간의 상호작용 양상이

Table 6. Copper content in rice plant in various direction of Janghang Smelter area in 1990.

Directions	Part of Plant	Cu contents in rice plant	
		Range	Mean
		(mg kg^{-1})	
E	Leaf blade	4.5− 8.4	6.80 (7.82)*
	Leaf sheath	1.2− 3.2	2.23 (2.56)
	Stem	9.5−13.0	11.16 (12.83)
	Panicle axis	5.1− 6.3	5.53 (6.34)
	Rice bran	7.2− 8.7	8.17 (9.39)
	Brown rice	0.6− 1.1	0.87 (1.00)
NE	Leaf blade	4.8−10.9	8.08 (4.42)
	Leaf sheath	0.9− 5.0	2.41 (1.32)
	Stem	3.6−13.7	8.99 (4.91)
	Panicle axis	3.7− 6.7	5.00 (2.73)
	Rice bran	10.1−19.5	13.73 (7.50)
	Brown rice	0.4− 2.9	1.83 (1.00)
NNE	Leaf blade	5.2−21.5	10.70 (5.88)
	Leaf sheath	4.8−11.4	7.62 (4.19)
	Stem	6.1−17.2	11.53 (6.34)
	Panicle axis	3.8− 8.9	6.18 (3.40)
	Rice bran	18.1−32.7	25.02 (13.75)
	Brown rice	0.9− 3.6	1.82 (1.00)
N	Leaf blade	3.9− 8.8	6.03 (4.53)
	Leaf sheath	9.6−12.6	11.23 (8.44)
	Stem	4.0− 9.6	7.08 (5.32)
	Panicle axis	4.3−11.0	7.10 (5.34)
	Rice bran	13.6−16.7	15.23 (11.45)
	Brown rice	0.7− 2.3	1.33 (1.00)

* ( ) : Values in parethesis indicate the relative value based on Cu content in brown rice.

달라져 수도체로 흡수되는 Cu량이 차이가 있는 것으로 볼 수 있었다. 이러한 결과는 토양 중 Cu형태 및 식물체의 종류에 따라 상관성에 차이를 보였던 Taylor등[22]의 연구와 유사한 것으로 생각되었다.

적 요

대기오염에 따른 Cu의 함량변화 차이를 구명하기 위하여 대기형 오염물질 방출지역으로 장항제련소

Table 7. Correlation coefficient between copper content in parts of paddy rice grown on and contents of heavy metals in soil of the Janghang Smelter area in 1990.

Heavy Metals in soil	Soil depth (cm)	Cu in parts of plant					
		Leaf blade	Leaf sheath	Stem	Panicle axis	Rice bran	Brown rice
Cd	0−15	0.620**	0.208	0.638**	0.119	0.415	0.279
	16−30	0.539*	−0.160	0.108	0.112	0.154	0.508*
Zn	0−15	0.810**	0.065	0.518*	0.292	0.557*	0.374
	16−30	0.817**	0.025	0.518*	0.296	0.557*	0.377
Cu	0−15	0.780**	−0.136	0.650**	0.186	0.459*	0.356
	16−30	0.796**	−0.034	0.675**	0.219	0.497*	0.345
Pb	0−15	0.784**	0.051	0.592**	0.263	0.479*	0.373
	16−30	0.777**	0.080	0.577**	0.268	0.496*	0.335

* : $P<0.05$, ** : $P<0.01$

인근지역의 논 토양을 중심으로 1982년도에 표·심토로 구분 채취한 것과 1990년도에 채취한 토양시료, 그리고 1990년에 토양시료 채취지역에서 재배된 수도체 중의 Cu 함량을 분석하여 그 변화 요인을 추적 분석하였다.

제련소 인근지역의 토양 중 Cu함량은 5.1-391.0 mg kg^{-1} 였고, 평균함량이 1990년 토양이 1982년도 토양 보다 높았으며, 1982년도 표토 중 Cu함량은 1990년도 표·심토 간 Cu함량과 유의성 있는 상관을 나타냈다. 배연의 중심으로부터 동쪽방향에서 거리별 Cu함량변화가 뚜렷하였고, 그 정도는 동쪽>북북동=북동>북쪽 순으로 작아졌다. 배연에 의한 오염반경은 동쪽 5km, 북북동과 북동이 3km였으며, 1982년도 토양 중 Cu함량은 유효인산, 유효규산, 치환성 Ca^{++}과 Na^{+} 양과 유의한 상관성을 나타내었다. 이 지역 수도체의 엽초, 줄기, 현미중 Cu함량은 토양 중 Cd, Zn, Cu 및 Pb함량과 유의성 있는 상관관계를 나타내었고, 현미 중의 Cu 함량은 0.4−3.6 mg kg^{-1} 이었으며 수도체의 부위에 따라서는 현미 중 Cu 함량의 13.75배까지 축적되는 경우도 있었다.

대기오염에 의한 토양 중 Cu 함량은 토양 중 Zn 및 Pb함량과도 유의한 상관관계를 나타내고 있어서 이들 금속들이 오염물질로서 함께 유입되고 있음을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. Chambers, J. C. and Sidle R. C. (1991) : Fate of heavy metals in an abandoned lead-zinc tailings pond: I.Vegetation. *J. Environ. Qual.* **20,** 745-751.
2. 유순호, 서윤수. (1990) : 우리나라 농업용수의 수질과 토양오염실태. *환경오염과 농업에 관한 국제 심포지엄* : 96-111.
3. 김동호, 임수길, 권오경. (1989) : 사과 과수원 토양과 그 잎중의 중금속 함량과의 관계에 관한 연구. *한국환경농학회지* **8,** 1-6.
4. Rhoads, F. M., Olson, S. M. and Manning. A. (1989) : Copper toxicity in tomato plants. *J. Environ. Qual.* **18,** 195-197.
5. Kim, S. J., Chang, A. C., Page, A. L. and Warneke, J. E. (1988) : Relative concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food

plants grown on sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* **17,** 568-573.

6. 김성조, 양환승. (1985) : 제련소인근지역의 토양 및 수도체중 중금속 함량에 관한 조사연구. 한국토양비료학회지 18, 336-347.
7. Dean, J. G., Bosqui, F. L. and 6 Lanovette, K. H. (1972) : Removing heavy metals from wasted water. *Environ. Sci. Technol.* **6,** 518-522.
8. Culbard, E. B., Thornton, I., Watt, J., Wheatley, M., Moorcroft, S. and Thompson, M. (1988) : Metal contamination in British uban dusts and soils. *J. Environ. Qual.* **17,** 226-234.
9. Walsh, L. M., Erhardt, W. H. and Seibel, H. D. (1972) : Copper toxicity in snapbeans(Phaseolus vulgaris L.) *J. Environ. Qual.* **1,** 197-200.
10. Bremner, I. (1981) : Effects of disposal of copper-rich slurry on the health of grazing animals. pp 245-260. *In, P. L'Hermite and J. Dehandtschutter(eds) Copper in animal wastes and sewlage sludge.* Reidel Publ., Boston, MA.
11. Cunningham. J. D., Keeney, D. R. and Ryan, J. A. (1975) : Phytotoxicity and uptake of metals added to soils as inorganic salt's or in sewage sludge. *J. Environ. Qual.* **4,** 460-462.
12. King, L. D. (1988) : Retention of matals by several soils of the Southeastern United States. *J. Environ. Qual* 17, 239-245.
13. Logan, J. J., and Chaney. R. L. (1983) : Utilization of municipal wastewater and sludge on land metals. p235 - 323. In A. L. page et al (eds) *Utilization of municipal wastewater and sludge on land.* Univ. of Calif., Riverside, CA.
14. Page, A. L. (1974) : Fate and effects of trace elements in sewage sludge when applied to agricultural lands. *EPA-670/2-74-005.* USEPA, Washington, DC.
15. Driscoll, C. T., Fuller, R. D, and Simone, D. M. (1988) : Longitudinal variations in trace metal concentrations in a northern forested ecosystem. *J. Environ. Qual* **17,** 101-107.
16. Friedland, A. J., Johnson, A. H., and Siccama, T. G. (1986) : Zinc, Cu, Ni and Cd in the forest floor in the Northeastern United States. *Water Air Soil Pollut.* **29,** 233-243.
17. Grigal, D. F., and Ohmann, L. F. (1989) : Spatial Pattern in elemental concentrations of the forest floor across the North Central USA. *J. Environ. Qual.* **18,** 368-373.
18. Eary, L. E., Dhanpat Rai, Mattigod, S. V., and Ainsworth, C. C. (1990) : Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: II. Review of the minor elements. *J. Environ. Qual.* **19,** 202-214.
19. 한기학, 박준규, 정이근, 이춘수, 윤정희, 김원출, 이상규. (1988) : 토양 화학 분석법, *농업기술연구소*, 삼미인쇄사.
20. Cao, H., Chang, A. C., and Page, A. L. (1984) : Heavy metal contents of sludge-treated soils as determined by three extraction procedures. *J. Environ. Qual.* **13,** 632-634.
21. Ganje, T. J., and Page, A. L. (1974) : Rapid acid dissolution of plant tissue for cadmium determination by atomic absorption spectrophotometry. *At. Absorpt. Newsl.* **13,** 131-134.
22. Taylor, R. W., Ibeabuchi, I. O., Sistani, K. R., and Shuford, J. W. (1992) : Accumulation of some metals by legumes and theirextract-ability from acid mine spoils. *J. Environ. Qual.* **21,** 176-180.