

논토양에서 석탄회시용에 따른 중금속 축적가능성 평가

홍창오¹⁾ · 이창훈¹⁾ · 이협³⁾ · 이용복⁴⁾ · 김필주^{1,2)*}

¹⁾경상대학교 응용생명과학부, ²⁾경상대학교 농업생명과학원, ³⁾진주산업대학교 작물생명과학과, ⁴⁾오하이오 주립대학교
(2006년 12월 1일 접수, 2006년 12월 21일 수리)

Evaluating Possibility of Heavy Metal Accumulation by Fly Ash Application in Rice Paddy Soils

Chang Oh Hong¹⁾, Chang Hoon Lee¹⁾, Hyup Lee³⁾, Yong Bok Lee⁴⁾, and Pil Joo Kim^{1,2)} (¹⁾Division of Applied Life Science, Graduate School, Gyeongsang National University, ²⁾Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, ³⁾Department of Crops Biotechnology, Jinju National University, ⁴⁾School of Environment and Natural Resources, The Ohio State University)

ABSTRACT: Coal combustion fly ash, which has a high available Si content and alkaline pH, was selected as a potential source of soil amendment in this study. Two field experiments were carried out to evaluate the possibility of heavy metal accumulation in silt loam (*Pyeongtaeg* series) and loamy sand (*Nagdong* series) of rice (*Oryza sativa*) paddy soils to which 0, 40, 80, and 120 Mg ha⁻¹ of fly ash were added. Rice yields increased significantly with fly ash application and the highest rice yields were achieved following the addition of around 90 Mg ha⁻¹ fly ash. Fly ash increased the soil pH but did not increase heavy metal uptakes of rice and heavy metal concentration in soils, due to very low concentration of heavy metals in the selected fly ash. Labile fraction of heavy metals (exchangeable + acidic fraction) was scarcely contained and most of them were stable and unavailable form (oxidizable and residual fraction). In conclusion, fly ash could be a good supplement to an inorganic soil amendments without heavy metal contamination in paddy soils.

Key Words: Fly ash, Heavy metals, Heavy metal fraction, Paddy soil

서론

우리나라에서 화력발전소의 부산물로 발생된 석탄회의 양은 1997년에 연간 약 3.7 백만 톤이었으며 향후 2010년에는 6 백만 톤에 달할 것으로 예상하고 있다¹⁾. 석탄회가 환경에 미치는 부정적 영향에도 불구하고 석탄이 우리나라의 주요 에너지원이기 때문에 석탄회의 발생량은 계속 증가될 전망이며 석탄회의 폐기처리는 심각한 문제가 되고 있다. 시멘트와 콘트리트의 제조에 석탄회가 일부 사용되고 있어 석탄회 폐기처리의 부담이 다소 줄기는 하였으나 다른 분야에서의 환경친화적인 사용이 요구되고 있다.

석탄회를 농업적으로 재활용하는 것은 석탄회의 폐기문제를 해결할 뿐만 아니라 작물의 생산성 또한 증대시킬 수 있을 것이다. 일반적으로 석탄회의 pH는 9 이상으로¹⁾ 산성토양을 개량하여 농사에 적합하도록 할 수 있으며²⁾ 토양 내 Si, Na, K, Ca, Mg, B, S와 다른 미량원소의 유효도를 증대시킨다³⁻⁶⁾. 그러나 석탄회는 As, B, Cd, Se 등의 식물과 토양 및 지하수에 악영향을 미칠 수 있는 원소들을 포함하고 있어 우리나라 이외 대부분의 나라에서도 일반적으로 비료로서 사용되고 못하고 있다⁷⁻⁹⁾.

이전의 연구에서 본 연구팀은 벼 재배기간 동안 토양 내 석탄회를 사용하였을 때 토양 및 벼 체내 유해물질의 축적 없이 벼 수량을 증수시킬 수 있다고 보고했다¹¹⁾. 그러나 무엇보다도 석탄회와 같은 산업폐기물을 농업적으로 활용하는데 있어 가장 민감하고 세심한 주의를 요하는 부분이 중금속과

*연락처:

Tel: 055-751-5466 Fax: 055-757-0178

E-mail: pjkim@nongae.gsnu.ac.kr

같은 유해물질의 혼입에 따른 토양 및 작물의 오염에 대한 우려일 것이다. 현재까지 석탄회 시용이 작물 생육 및 토양의 이화학적 특성 변화에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나, 석탄회를 토양에 사용하였을 때 중금속의 동태 및 작물에 대한 이용도에 관한 연구는 많이 이루어져 있지 못한 실정이다. 토양 내 중금속의 반응성 및 작물에 대한 이용도는 토양의 pH, CEC, 유기물 및 점도함량 등과 같은 이화학적 특성에 직접적 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

국내에서 대부분의 토양 내 중금속 분포는 0.1 N HCl 용액으로 단순 침출방식으로 조사되어 왔다. 단순침출방식으로 조사된 중금속의 농도만으로 토양 내 중금속의 존재형태나 식물체로의 전이가능성을 평가하기에는 다소 한계가 있었다. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 침출용액의 pH를 달리 하여 연속침출기법(sequential extraction)으로 중금속의 존재형태를 조사하고 주변 환경에 대한 영향을 평가한 간접 평가하는 기법이 연구되어 활용되어오고 있다. 중금속의 연속 침출법은 침출순서나 용액의 농도 및 pH 등의 차이에 따라 분획특성이 다소간 차이가 있으나, 일반적으로 연속침출법에서 중금속은 치환성 및 carbonate 결합태(Exchangeable + Acidic phase), Fe/Mn oxide 결합태(Reducible phase), 유기물 결합태(Oxidizable phase)와 광물 내 고정태(Residual phase)의 4가지 유형으로 크게 분류하고 있다¹³⁻¹⁵⁾.

석탄회의 농업적 활용가능성을 증대시키기 위해서는 석탄회의 시용에 따른 토양 및 작물의 중금속오염 가능성에 대한 정확한 평가가 이루어져야 할 것이다. 그래서 본 연구에서는 이화학적 특성이 다른 두 논토양에서 석탄회의 시용에 따른 벼 체내 중금속 흡수 특성 및 토양 내 중금속의 총 함량과 분획특성을 조사하여 중금속에 의한 환경오염 가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

공시 석탄회와 공시토양

공시재료인 석탄회는 경남 하동에 위치한 화력발전소에서 채취되었다 (Table 1). 공시토양으로 경남 진주시 정촌면 예하리의 논토양(Pyeongtaje series, SiL)과 대곡면의 논토양(Nagdong series, LS)을 선택하였다. 예하리 토양과 대곡 토양의 pH는 각각 5.5와 5.8로 두 토양 모두 산성토양이었으며, 양이온치환용량은 각각 13.1 cmol_c kg⁻¹과 9.2 cmol_c kg⁻¹로 예하리 토양이 대곡 토양 보다 큰 양이온치환용량을 갖고 있었다. 유효인산의 함량은 예하리 토양이 25 mg kg⁻¹ 이었고 대곡 토양이 227 mg kg⁻¹로 예하리 토양 보다 대곡 토양 내 인산이 많이 집적되어 있었다(Table 2). 1998년 6월 5일에 예하리와 대곡에 각각 동진벼와 화산벼를 이앙하고 같은 해 10월 16일에 수확하였다. 처리구는 석탄회 0, 40, 80, 120 Mg ha⁻¹의 4개 처리 설정하여 3반복으로 수행되었다. 이 때 화학비료로서 N-P₂O₅-K₂O를 120-48-80 kg ha⁻¹으로

Table 1. Chemical properties of fly ash used in the experiment

Parameter	Mean	Standard deviation
pH (1:5 with H ₂ O)	10.1	0.3
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	1341	92
Available SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	1100	145
Exchangeable cations (mg kg ⁻¹)		
K	0.16	0.06
Ca	2015	167
Mg	0.42	0.05
0.1 N HCl extractable (mg kg ⁻¹)		
As	1.19	0.09
Cd	0.28	0.05
Cr	0.52	0.04
Cu	8.02	0.53
Mn	20.1	2.19
Ni	2.45	0.21
Pb	1.53	0.19
Zn	6.19	0.29

벼 생육시기별로 분시하였다.

토양과 식물체 이화학적 특성 및 중금속 함량 조사

벼 수확 후 토양을 채취하여 자연건조 후 사분(<2 mm)하여 중금속과 이화학적특성조사에 이용하였다. 1차적으로 토양 내 0.1N HCl 가용성 중금속과 왕수분해에 의해 중금속 총 함량을 조사하였다. 그리고 중금속 형태별 함량은 연속추출법에 의해 조사하였다(Fig. 1)¹⁶⁾. 토양에 0.11M acetic acid를 가하여 치환성 및 carbonate 결합태 중금속을 침출하였다. 이어서 0.1M NH₂OH·HCl을 가하여 Fe/Mn oxide 결합태 중금속을 침출하였다. 침출 후 남은 토양에 30% H₂O₂를 가하여 85°C에서 분해 후 1M NH₄OAc용액을 가하여 유기물 결합태 중금속을 침출하였다. 광물내 고정태 중금속은 중금속 총 함량에서 위의 4가지 형태의 중금속 함량을 감하여 구하였다^{13,17)}. 각 형태의 중금속을 침출 후 상등액을 0.2 μm cellulose acetate membrane filter로 여과 후 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Absorption Emission Spectrophotometer, GBC model X-100, Australia)로 중금속 함량을 측정하였다. 토양 pH는 토양과 물의 비율을 1:5로 하였고, 유기물은 Tyurin법으로, 유효인산 함량은 Lancaster법으로 각각을 분석하였다. 치환성양이온은 1N-NH₄OAc용액으로 침출하여 ICP-AES로 분석하였다. 양이온 치환용량은 1N-NH₄OAc로 포화한 후 80% 에틸알코올로 세척한 후 토양을 켈달증류장치에 의해 NH₄⁺함량을 정량하여 산출하였다. 벼 백미 중 중금속 함량은 백미를 70

Table 2. Chemical properties of the soils used in field tests before the experiments

Parameters	Pyeongtaeg series (SiL)		Nagdong series (LS)	
	Mean	SD	Mean	SD
pH (1:5 with H ₂ O)	5.5	0.4	5.8	0.6
OM (g kg ⁻¹)	16.6	3.2	22.2	4.1
Total N (g kg ⁻¹)	1.7	0.2	2.4	0.2
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	25	6.5	227	17
Available SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	86	7.5	53	4.8
Ex. cations (cmol _c kg ⁻¹)				
Ca	4.3	0.3	4.6	0.5
Mg	1.96	0.11	0.37	0.03
K	0.33	0.02	0.25	0.03
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	13.1	2.6	9.2	1.8
0.1N HCl extractable (mg kg ⁻¹)				
Cr	0.48	0.05	0.47	0.05
Cu	3.54	0.38	3.48	0.38
Mn	127	13	36	3.96
Ni	0.81	0.08	0.82	0.09
Pb	5.66	0.62	2.45	0.26
Zn	3.99	0.43	3.66	0.4

OM; organic matter, Ex. cations; exchangeable cations, CEC; cation exchange capacity, SD; standard deviation.

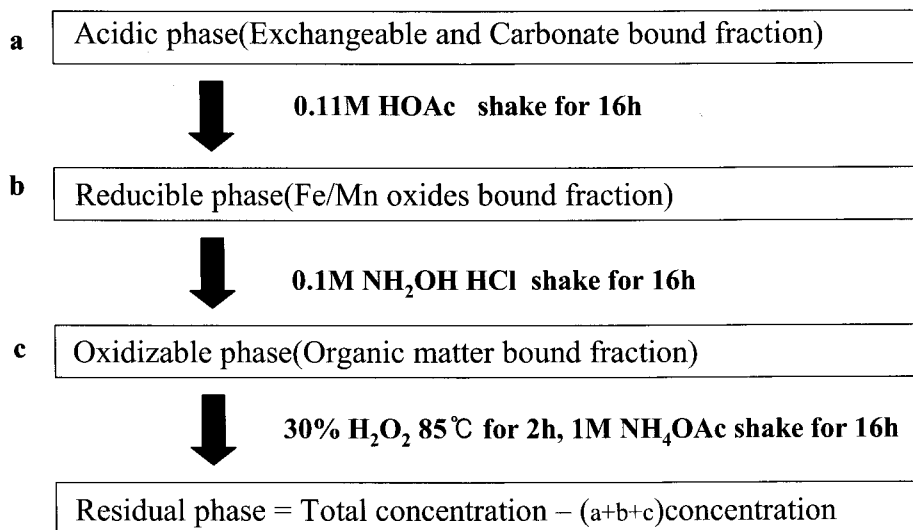


Fig. 1. Procedure for sequential extraction of heavy metals in soil. (Note: Total concentration of heavy metals was determined by digestion of aqua regia solution and residual phase was calculated by the difference from total and the sum (a+b+c)).

℃에서 72 시간동안 건조 후 분쇄하여 Ternary solution으로 강열 분해하여 여과 후 ICP-AES로 측정하였다.

결과 및 고찰

석탄회의 시용에 따른 비 수확량은 전보¹¹⁾에서 보고한 바

Table 3. Chemical and physical properties of soils after rice harvest

Soil Series	Fly ash application (Mg ha ⁻¹)	pH (1:5 H ₂ O)	OM (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Ex. cations (cmol _c kg ⁻¹)		
							Ca	Mg	K
Pyeongtaeg (SiL)	0	5.2	16.2	1.7	47	59	4.2	1.15	0.26
	40	5.4	17.8	1.9	75	88	4.1	1.40	0.24
	80	5.5	15.9	1.6	79	90	4.5	1.38	0.23
	120	5.6	17.8	1.8	86	109	4.9	1.33	0.27
	LSD _{0.05}	0.3	2.8	0.2	25	26	0.33	0.15	0.03
Nagdong (LS)	0	5.7	21.2	2.3	290	37	3.3	0.44	0.29
	40	5.9	24.0	2.6	338	81	4.0	0.50	0.27
	80	6.1	24.5	2.4	367	93	3.6	0.54	0.27
	120	6.1	23.3	2.2	385	119	4.0	0.62	0.32
	LSD _{0.05}	0.4	3.7	0.3	31	45	0.82	0.07	0.05

OM; organic matter, T-N; total nitrogen, Av. P₂O₅; available P₂O₅, Av. SiO₂; available SiO₂, Ex. cations; exchangeable cations, LSD_{0.05}; least significant deviation ($p < 0.05$).

와 같이 수량 반응식을 이용하여 벼 수량은 석탄회 시용량 (FA)과 다음과 같은 관계가 있었다.

$$\text{예하리 토양의 벼 수량} = 4124 + 33.6 \text{ FA} - 0.187 \text{ FA}^2$$

(model $R^2 = 0.761^{**}$)

$$\text{대곡 토양의 벼 수량} = 5946 + 28.7 \text{ FA} - 0.152 \text{ FA}^2$$

(model $R^2 = 0.600^{**}$)

벼 수량은 석탄회가 약 90 Mg ha⁻¹까지 시용량이 증가함에 따라 증가되는 경향을 보였으며, 그 이상의 시용수준에서는 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 수량반응식을 이용하여 벼 최고수량을 산정하여 본 결과, 동진벼의 경우 석탄회 89 Mg ha⁻¹ 시용시 5631 kg ha⁻¹이었고, 반면 화산벼의 경우 석탄회 94 Mg ha⁻¹ 시용시 7293 kg ha⁻¹이었다. 이와 같은 수량증대의 원인은 석탄회 시용에 따라 토양의 pH 상승 및 벼 생육에 필요한 토양 내 유효규산, 유효인산 및 양이온 등의 유효도 증대에 기인된 것으로 판단된다 (Table 3). 우리나라의 기후는 벼 생육 기간인 여름철에 강우량이 많고 잦은 태풍이 발생하여 도복이 벼의 수량감소에 중요한 요인이 되고 있다. 일반적으로 규산은 벼의 도복과 병원균 감염에 대한 저항성을 증가시킨다^{18,19}).

벼 수확 후 조사된 예하리와 대곡 토양 내 0.1N HCl 가용성 중금속 함량을 조사한 결과, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn은 검출되었으나 나머지 As, Hg, Cd 등의 중금속은 검출되지 않았다. 예하리와 대곡 토양 내 석탄회의 시용량을 증가시키면 따라 중금속 총 함량의 뚜렷한 증가는 발생되지 않았다 (Table 4). 두 논토양 내 Cr, Pb, Zn의 총 함량은 석탄회의 시용량이 증가함에 따라 오히려 감소되는 결과를 보였으며, 이는 공시재료인 석탄회가 소량의 중금속을 포함하고 있기 때문으로 판단된다. 특히 석탄회 내 Cr, Pb, Zn은 각각 0.52,

1.53, 6.19 mg kg⁻¹으로 다른 중금속에 비해 소량으로 포함되어있었다(Table 1). 또한 본 시험에서 석탄회를 과량(120 Mg ha⁻¹)으로 시용함에 따른 토양의 희석효과로 인해 중금속의 총 함량이 다소 감소되었던 것으로 판단된다.

석탄회의 시용량 증가에 따른 토양 내 0.1 N HCl 가용성 중금속 함량의 증가는 없었다(Table 4). 국내에서 많이 이용되었던 0.1 N HCl 가용성 중금속 함량은 중금속 총 함량에 비해 훨씬 작은 양으로 검출되었으며 0.1 N HCl 가용성 Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn의 함량은 각각 총 함량의 약 1.7, 28, 20, 45, 55, 7.3 %가 침출되었다(Table 4). 이처럼, 0.1 N HCl 용액으로 침출된 중금속의 함량은 왕수 분해법에 의해 침출된 중금속 총 함량과는 많은 차이가 있어 토양 내 중금속 함량을 대표하는 데는 다소 한계가 있었다. 밭 토양에서 Kim et al²⁰은 과량의 석탄회를 시용하였을 때 배추를 재배한 토양 내 Cr과 Pb가 다소 축적되는 반면 다른 중금속 함량의 유의한 증가는 없었다고 보고했다. 콩 재배 밭 토양에서 연속적으로 석탄회를 90 Mg ha⁻¹을 시용했을 때 Cd와 Cr의 함량은 다소 증가되었으나 다른 중금속의 함량 증가는 없었다²¹. 담수되어진 논토양에서는 석탄회를 과량(120 Mg ha⁻¹)으로 시용하였을 때도 중금속의 축적은 발견되지 않았다²².

중금속의 연속추출법에 의해 분획된 4가지 유형의 중금속 성분(Fig. 1) 중 치환성 및 carbonate 결합태 중금속 성분은 식물에 의해 비교적 쉽게 흡수될 수 있는 형태로 분류되고 있다¹⁷. 중금속 성분의 분획특성은 pH에 대단히 의존적이어서 토양 pH의 변화에 따라 결합형태가 변화할 수 있다. 대부분의 양이온성 중금속들은 토양의 pH가 상승하게 되면 토양 내 상대 음이온과 침전하거나 토양 격자 내 결합된 형태로 전환되어 식물에 의해 이용되기 힘든 형태로 전환된다^{17,23}.

벼 수확 후 석탄회의 시용에 따른 Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn의 분획특성 변화를 조사한 결과(Fig. 2), 두 논토양 내

Table 4. Changes of heavy metal concentrations in soils amended fly ash with different level after rice harvest

Fractions	Soil Series	Fly ash application (Mg ha ⁻¹)	Concentration (mg kg ⁻¹)					
			Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Total	Pyeongtaeg (SiL)	0	25.6	13.1	286	17.2	15.7	57.8
		40	25.2	12.7	287	16.9	14.9	56.1
		80	24.0	12.6	320	16.4	14.6	53.8
		120	24.0	12.8	286	16.4	15.3	54.2
		LSD _{0.05}	1.59	ns	ns	ns	0.76	3.14
	Nagdong (LS)	0	22.5	11.2	204	14.9	8.9	57.7
		40	21.7	11.9	228	14.9	8.8	58.7
		80	22.1	13.1	210	15.9	9.4	61.6
		120	22.9	11.0	241	16.1	8.1	55.6
		LSD _{0.05}	ns	ns	ns	ns	1.22	ns
0.1N HCl extractable	Pyeongtaeg (SiL)	0	0.43	3.67	127	0.77	8.64	4.20
		40	0.41	3.17	105	0.92	7.23	3.42
		80	0.41	3.75	127	0.93	6.26	4.41
		120	0.33	3.43	120	0.92	5.57	4.09
		LSD _{0.05}	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Nagdong (LS)	0	0.45	3.67	35.0	0.88	2.70	3.13
		40	0.48	4.21	43.7	0.92	2.15	4.21
		80	0.49	3.48	52.9	0.93	1.98	4.56
		120	0.66	4.56	74.0	0.96	2.06	6.18
		LSD _{0.05}	ns	ns	ns	ns	ns	ns

LSD_{0.05}; least significant deviation ($p < 0.05$), ns; not significant.

Cr, Cu, Ni, Zn의 치환성과 carbonate 결합태 중금속 성분 및 Fe/Mn oxide 결합태 중금속 성분은 거의 발견되지 않아 주변 환경으로 유출되거나 식물에 의해 흡수되는 축적가능성은 거의 없는 것으로 조사되었다. Cr, Cu, Ni, Zn의 전 함량 중 약 12~45 %가 유기물과 결합된 형태로 분포하였고 약 50~88 %가 광물 내 고정형태인 residual phase로 존재하였다. 예하리 토양과 대곡 토양 내 Pb은 전 함량 중 Fe/Mn oxide 결합태를 약 12% 내외로 포함하고 있었다. 그러나 석탄회의 시용량 증가에 따라 Fe/Mn oxide 결합태의 함량은 다소 감소하는 경향을 나타내었고 이에 반하여 광물 내 고정 형태인 residual phase의 함량은 유의하게 증가하는 경향을 나타내었다. 예하리 토양 내 Pb 총 함량 중 residual phase의 함량은 무처리외의 약 31%에서 석탄회를 120 Mg ha⁻¹ 시용시 약 50 %로 증가하였으며, 대곡 토양의 경우에도 residual phase의 함량이 무처리외의 약 11%에서 석탄회 120 Mg ha⁻¹ 시용시 약 50 %로 유의하게 증가하였다. Mn의 경우, 두 논토양 모두 전 함량 중 치환성과 carbonate 결합태를 약 25 % 내외를 포함하고 있어 토양 및 식물체 내 Mn의 축적가능성이 있을 것으로 생각되었으나 석탄회의 시용량 증가에 따른 치환성과 carbonate 결합태의 뚜렷한 함량 증가

는 나타나지 않았다.

이상과 같은 결과에 대한 원인 해석은 Table 3에서 보는 바와 같이 석탄회의 시용으로 토양 pH가 증대와 유효인산 함량의 증대에 의한 것으로 판단된다. 토양의 pH가 상승하면 토양의 음하전도는 증가하고 양이온성 중금속성분의 대부분은 토양교질에 더욱 강하게 흡착되어 불용화되는 것으로 알려져 있다²⁴⁾. 식물에 흡수될 수 있는 형태의 수용성과 치환성 및 탄산염 결합태 중금속성분은 석탄회의 시용량이 증가할수록 토양 pH가 증가하여 안정한 결합형태로 전환하게 된다. 그리고 토양에 인산이 첨가되면 토양교질에 특이적 흡착하여 음이온 기를 제공하면서 토양교질의 음하전도를 증대시켜 양이온성 중금속의 흡착능을 증대시키는 것으로 알려져 있다²⁴⁾. 중금속으로 오염된 토양에 pH를 높여 주고 인산과 같은 음이온 기를 제공하게 되면 양이온성 중금속은 쉽게 침전물을 형성하여 가용화율이 크게 저감될 수 있다²⁵⁾. 공시재료인 석탄회는 자체가 소량의 중금속을 포함하고 있고 강한 알칼리성 자재일 뿐만 아니라 유효인산을 약 1,341 mg kg⁻¹ 함유하고 있어(Table 1) 토양의 음하전을 증대시켜 양이온성 중금속의 토양 내 흡착량을 증대시키고, 양이온성 중금속에 상대 음이온으로 작용하여 불용성으로 침전되어 안정화되는

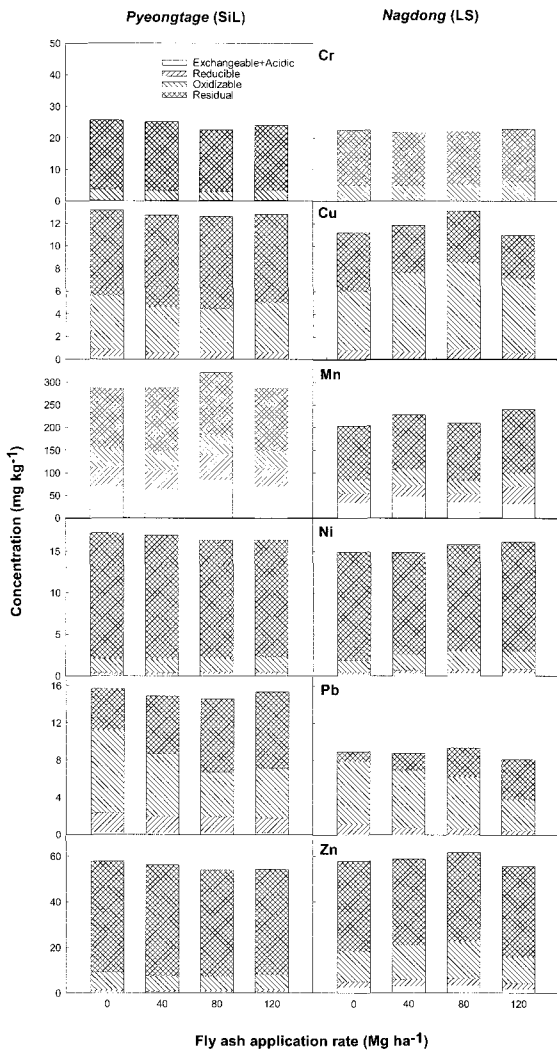


Fig. 2. Fractionation characteristics of heavy metals in soil amended fly ash with different levels at harvest time.

것으로 판단된다.

석탄회의 사용량을 증가시키기에 따라 백미 내 중금속 함량의 증가는 없었다(Table 5). 이러한 결과는 아마도 과량의 석탄회를 시용함에 따른 희석효과, 용탈 및 담수조건 하에서 금속산화물 형성등의 원인에 기인된 것으로 판단되나 구체적인 연구가 필요하다. 본 연구와 비슷한 결과로 Kim et al.²⁰⁾은 배추 재배 포트실험에서 석탄회를 토양 무게비 15 %로 처리하였을 때 배추 체내 중금속함량의 증가 없이 수량이 13~15% 까지 증수하였다고 보고하였다. 본 연구에서 동진벼와 화산벼 모두 생육기간 동안 생육장애는 관찰되지 않았다.

이상의 결과를 바탕으로 석탄회를 농업적으로 재활용하는데 있어 가장 문제시 되는 토양 및 작물에 대한 중금속오염 가능성 여부에 있어 석탄회는 비교적 안전한 토양 개량제로 분류할 수 있을 것으로 판단되었다.

요 약

우리나라의 석탄회 발생량은 매년 증가되고 있으나 재활용율이 낮아 석탄회의 폐기처리가 심각한 문제가 되고 있어 토양개량제로서 재활용하고자, 석탄회에 포함되어있는 중금속이 벼의 수량 및 중금속 흡수특성과 토양 내 중금속의 이동성에 미치는 영향을 조사하였다.

석탄회의 시용에 따른 토양 내 중금속 총 함량과 0.1 N HCl 가용성 함량의 증가는 발견할 수 없었다. 이러한 결과는 석탄회 자체가 소량의 중금속을 함유하고 있고 토양 내 과량의 석탄회를 시용함으로써 인한 토양의 희석효과에서 기인한 것으로 판단된다. 석탄회의 시용에 따라 토양 내 대부분의 중금속 성분은 생물체 흡수가 어려운 유기물 결합태(oxidizable phase)와 광물 내 고정된 중금속 형태(residual phase)로 존재하였다. 석탄회의 사용량 증가에 따른 벼 백미 내 중금속 흡수의 증가는 발견할 수 없었으며 생육기간 동안 생육장애는 나타나지 않았다. 이는 석탄회 시용에 따른 토양의 pH 증대와

Table 5. Heavy metal concentrations of white rice at the harvesting stage

Soil Series	Fly ash application (Mg ha ⁻¹)	Concentration (mg kg ⁻¹)					
		Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Pyeongtaeg (SiL)	0	0.24	1.52	21.7	2.2	0.71	4.6
	40	0.68	1.23	22.0	1.7	0.47	2.8
	80	0.71	1.42	19.9	1.6	0.87	12.3
	120	0.75	1.72	22.9	1.5	0.95	12.2
Nagdong (LS)	0	0.21	1.87	38.4	1.5	0.50	12.2
	40	0.22	1.99	27.4	2.9	0.49	11.5
	80	0.23	1.75	29.9	1.9	0.45	11.9
	120	0.23	1.78	34.7	2.5	0.50	13.7

* The heavy metal concentration of white rice were not significantly different ($p < 0.05$) among the treatments.

유효인산의 증대에서 기인한 것으로 판단되었다.

결론적으로 석탄회 사용으로 인한 토양 및 벼 체내 중금속 축적 현상은 발견할 수 없었으며, 석탄회 사용량 증가에 따라 토양의 pH 개선 및 작물 수량증대에 효과가 있으므로 석탄회는 양질의 토양개량제로서 활용이 가능할 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Cha, D. W., Lee, H. S. and Jung, J. H. (1999) Production and composition of the power plant coal ash in Korea. *Proc. Symposium of Agricultural Utilization of Fly Ash*. 23 Apr. 1999. KEPOCO & Gyeongsang National University, p. 1-23, Gyeongsang National University in Chinju, Korea (in Korean with English summary).
2. Moliner, A. M. and Street, J. J. (1982) Effect of fly ash and lime on growth and composition of corn (*Zea mays* L.) on acid sandy soils. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 41, 217-220.
3. Elseewi, A. A., Grimm, S. R., Page, A. L. and Straughan, I. R. (1981) Boron enrichment of plants and soils treated with coal ash. *J. Plant Nutr.* 3, 409-427.
4. Druzina, V. D., Miroshchenko, E. D. and Chertov, O. D. (1983) Effect of industrial pollution on nitrogen and ash content in meadow phytocoenotic plants. *Bot. Zh.* 68, 1583-1591.
5. Wong, M. H. and Wong, J. W. C. (1989) Germination and seedling growth of vegetable crops in fly ash amended soils. *Agr. Ecosyst. Environ.* 26, 23-35.
6. Ko, B. G. (2000) Effects of fly ash and gypsum application on soil improvement and rice cultivation. Ph. D. Diss. Gyeongsang National University, Chinju (in Korean with English summary).
7. Adriano, D. C., Woodford, T. A. and Ciravolo, T. G. (1978) Growth and elemental composition of corn and bean seedlings as influenced by soil application of coal ash. *J. Environ. Qual.* 7, 416-421.
8. Adriano, D. C., Page, A. L., Elseewi, A. A., Chang, A. C. and Straughan, I. R. (1980) Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystem. A review. *J. Environ. Qual.* 9, 333-334.
9. Page, A. L., Elseewi, A. A. and Straughan, I. R. (1979) Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts. *Residue Rev.* 71, 83-120.
10. Anon (2002) The potential for beneficial reuse of coal fly ash in Southwest Virginia mining environments. *Virginia cooperative extension*. Pbu No. 460-134, January 2002.
11. Lee, H., Ha, H. S., Lee, C. H., Lee, Y. B. and Kim, P. K. (2006) Fly ash effect on improving soil properties and rice productivity in Korean paddy soils. *Bioresource Technology*. 97, 1490-1497.
12. Jo, S. J., Park, C. S. and Yeum, K. T. (2002) Sajeong soil science. *Hyangmoon press*. Seoul. p. 181-183.
13. Ariza, J. L. G., I. Giraldez., D. Sanchez-Rodas. and E. Morales. (2000) Comparison of the feasibility of three extraction procedures for trace metal partitioning in sediments from south-west Spain. *The Science of the total environment* 246, 271-283.
14. Aguilar, J., Dorransoro, C., Fernandez, E., Fernandez, J., Garcia, I., Martin, F. and Simon, M. (2004) Soil pollution by a pyrite mine spill in Spain: evolution in time. *Environmental Pollution* 132, 395-401.
15. Guibal, E. (2004) Interactions of metal ions with chitosan based sorbents: a review. *Separation and Purification Technology* 38, 43-74.
16. Ure, A. M., Quevauviller, Ph., Muntau, H. and Griepink, B. (1993) Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *In J Environ Anal Chem.* 51, 135-151.
17. Kaasalainen, M. and M. Yli-Halla. (2003) Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils. *Environmental Pollution* 126, 225-233.
18. Mengel, K. and Kirkby, E. A. (1987) Further elements of importance. *Principle of Plant Nutrition*, fourth ed. IPI Bern, Switzerland, p. 577-582, Chapter 19.
19. Deren, C. W., Datnoff, L. E., Snyder, G. H. and Marin, F. G. (1994) Silicon concentration, disease, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. *Crop Sci.* 34, 733-737.
20. Kim, B. J., Back, J. H., and Kim, Y. S. (1997) Effect

- of fly ash on the yield of Chinese cabbage and chemical properties of soil. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 30, 161-167 (in Korean with English summary).
21. Kim, B. Y., Jung, G. B., Lim, S. U. and Park, J. H., (1994b) Influence of fly ash application on content of heavy metals in the soil. II. Content change by the successive application. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 27, 72-77 (in Korean with English summary).
22. Kim, B. Y., Lim, S. U. and Park, J. H. (1994a) Influence of fly ash application on content of heavy metal in the soil. I. Content change by the application rate. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 27, 65-71 (in Korean with English summary).
23. McBride, M. B. (1994) Environmental chemistry of soils. *Oxford University Press*, chap 4, p. 158-164.
24. Bolan, N. S., Adriano, D. C., Duraisamy, P. and Mani, A. (2003) Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition. *Plant and Soil* 250, 83-94.
25. McBride, M. B. (1994) Environmental chemistry of soils. *Oxford University Press*, chap 4, p. 121-168.
-