

轉爐슬래그 施用의 土壤改良 및 作物의 收量增大 效果

李 忠 一

浦項産業科學研究院 環境保全研究팀

Basic Oxygen Furnace Slag as a Liming Agent for Paddy and Upland Field Soils

Choong Il Lee

*Environmental Conservation Research Team,
Pohang Research Institute of Industrial Science and Technology*

요 약

분말도 2.0 mm 이하인 전로슬래그는 토양산도 중화능이 CaCO_3 의 1/3 수준이지만 Ca와 Mg를 함유하고 있어 CaMgCO_3 를 대체할 수 있는 토양산도 중화제이며 이의 liming 효과는 속효성이면서 지속적이었다. 우리나라 일반 농경지 토양을 작물생육의 적정 토양산도인 pH 6.5로 개량하기 위한 전로슬래그 사용량은 $7\sim 8\text{Mgha}^{-1}$ 이었다. 농경지 토양에 전로슬래그를 사용하였을 때 토양 pH 상승과 Ca, Mg, P, Fe, Si 함량이 유의적으로 증가하였으며 전로슬래그 처리구에서 제배한 벼의 엽조직체내에는 Ca, P, Fe, Si 함량이 그리고 콩 조직체내에는 P 함량이 대조구에서 보다 높았다. 수량 증가효과는 전로슬래그 8Mgha^{-1} 사용시 벼와 콩 모두 가장 높았으며 증수율은 간척지답에서 14.2%, 추락답에서 6.9%, 그리고 보통답에서는 4.3%이었으며 콩의 경우에는 36.6%로 벼 증수율보다 훨씬 높았다.

ABSTRACT

Basic oxygen furnace (BOF) slag, a by-product of the iron and steelmaking industry produced in large quantities in Korea, poses a substantial disposal challenge. The BOF slag used in this study was 1/3 CaCO_3 in total neutralizing power and application of $7\sim 8\text{Mgha}^{-1}$ was needed to bring soil pH to 6.5 from pH 5.0~5.5 in silty clay or clay loam soil contained about 10% organic matter. A field assay was conducted to study whether BOF slag could be used as a dolomitic liming agent for agricultural soils. Four slag rates (0, 4, 8, 12Mgha^{-1}) were investigated for their effect on soil properties, mineral concentrations in leaf tissues of rice and soybean, and yield of the crops. Slag application at 8Mgha^{-1} rate in paddy field increased pH, Ca, Mg, P, Si and Fe content in soil and rice yield by 4.3~14.2% depending on the soil type. In upland field the 8Mgha^{-1} rate increased pH, Ca and Fe content in soil and soybean yield by 36.6%. Thus, BOF slag appears to be a useful liming material for correcting soil acidity on both paddy and upland field soils and for increasing Ca, Mg, P, Si, and Fe concentration in plants.

Key words: BOF slag, liming, rice, soybean.

1. 서 론

철강산업에서 선철의 불순물을 제거하여 강철로 제조할 때에 부생되는 슬래그를 제강슬래그라고 하며 LD 전로 제강법의 경우 조강톤당 약 150 kg의 전로슬래그가 발생된다. 이처럼 대량으로 생성되는 전로슬래그를 외국에서는 시멘트 원료, 토목공사용 골재, 비료 및 토양개량제 등으로 재

활용하고 있다. 전로슬래그는 주로 calcium silicates와 CaO, MgO, FeO, MnO 등과 융합된 aluminoferrites로 구성되어 있으며 5~7%의 free lime(CaO)과 2~4%의 P_2O_5 도 함유되어 있다.¹⁾

제강슬래그를 처음으로 농업에 이용하기 시작한 것은 선철에 포함하는 P_2O_5 를 1877년 S. C. Thomas와 P. C. Gilchrist가 분리하는 기술을 고안한 후 부터이다. 즉, 선철에

포함된 P_2O_5 를 석회와 규사로 결합시켜 광재(구인산 석회, $Ca_3P_2O_8 \cdot CaSiO_3$)로 분리한 후 미분말로 만들어 인산질 비료로 사용하고 있는데 이를 Thomas 인비(Thomas phosphate)라고 한다. 토마스 인비는 인광석이나 과인산 석회보다 비효가 우수하며 전로슬래그에 함유되어 있어 Ca, Si, Mg, Mn 등의 부수적인 효과도 크다고 하였다.^{11,12,13)}

전로슬래그는 주성분인 CaO이기 때문에 Ca비료로 사용하기도 한다. Igbokw 등¹⁷⁾은 pH 6.4의 토양에서 sweet pepper의 수량증대와 Ca 결핍에 의한 배꼽썩이병 발생 방지를 위한 전로슬래그의 적정 사용량은 3790 kg/ha이며 석회질 비료로 대체할 수 있다고 보고하였다.

전로슬래그를 인산질 비료와 석회질 비료로 재활용하는 것 이외에도 최근에는 산성토양개량제(liming agent)로서의 평가에 대한 연구가 많이 보고되고 있다. 전로슬래그는 평균 29% Ca와 5%의 Mg가 함유되어 있는데 이는 생석회와 소석회의 Ca 함량보다는 약간 낮지만 다른 석회화합물에 비하면 높은 편이다. 따라서 전로슬래그는 탄산석회($CaCO_3$)를 대체하는 토양산도 중화제로 사용되기 시작하였다. Norman²³⁾은 전로슬래그의 전체 Ca함량이 30% 이상이 되면 $CaCO_3$ 와 동일한 토양산도 중화능이 있다고 하였다. Jokinen¹⁸⁾은 pH 4.8인 토양산도를 중화시키기 위하여 전로슬래그 $CaCO_3$ 또는 $CaMgCO_3$ 를 사용한 결과 모든 처리에서 pH증가, ECEC(effective cation exchange capacity)증가, 치환성 Al 농도저하, Ca 농도증가 결과를 가져왔고 토양 Mg의 농도는 전로슬래그 처리구가 $CaCO_3$ 처리구보다 유의적으로 높았으며 순무유체의 수량이 증가되어 전로슬래그는 석회보다 liming agent로서 우수하다고 보고하였다. Hartikinen¹⁹⁾도 전로슬래그의 토양산도 중화능은 탄산석회나 탄산석회고토 보다 약간 낮으나 peat ash 보다는 높았으며 전로슬래그를 사용했을 때 토양의 가용성 P와 Si 농도가 높아져 이들 원소들의 식물흡수가 높아졌고 따라서 작물의 수량이 증가되었다고 보고하였다. Rodriguez 등²⁴⁾은 토양 pH가 4.8인 초지 1 ha에 전로슬래그 7.5 ton을 살포한 결과 3개월 후에 토양 pH가 6.3으로 증가되었고 치환성 Al이 독성피해 수준인 10% 이하로 감소되었으며 토양에는 Ca, Mg, P 함량이 높아져 사료작물인 ryegrass, cocksfoot, 크로바의 수량(건물)이 41%가 증가되었다고 하였다. 전로슬래그는 산림토양의 산도중화제로도 효과가 크다. Formoso 등¹⁶⁾은 eucalyptus 나무 재배지에 나무(株)당 315 g의 전로슬래그를 사용하였을 때 토양의 식생특성(edaphology)이 크게 향상되었고 사용후 2년 후에 나무 생장율을 측정한 결과 32%가 증가되었다고 발표하였다. Pirce²⁵⁾도 전로슬래그 살포는 토양 pH증가로 인하여 코시칸 소나무(*Pinus nigra*)와 포플러

(*Populus deltoides-trichocarpa*)의 이식후 활착율과 생장을 증가 효과를 보고하였다.

일반적으로 산성토양을 개량할 때에는 주로 탄산석회를 사용하고 있으나 과도한 석회시용은 Ca:Mg 비율을 저하시켜 Mg 결핍을 초래할 수 있으나^{15,25)}전로슬래그는 Ca 뿐만 아니라 Mg가 5% 이상 포함되어 있어 석회보다 우수한 산성토양개량제이며 dolomitic limestone의 효과를 기대할 수 있다. 또한 전로슬래그의 Ca는 free CaO와 $CaSiO_3$ 형태로 존재하기 때문에 전로슬래그의 liming 효과는 속효성인 (CaO)반면에 완효성($CaSiO_3$)이기도 하다.⁴⁾

전로슬래그는 SiO_2 가 평균 14.8% 함유되어 있어 Si 비료로도 사용한다. Hartikiner¹⁶⁾은 전로슬래그 시용은 토양 Si함량을 증가시켰다고 보고하였으며 Wutscher²⁶⁾은 Orange 나무에 전로슬래그를 사용한 결과 SiO_2 흡수증가로 인하여 Zn 축적이 억제되어 괴저병 발생을 방지할 수 있었다고 하였다. 또한 Anderson 등⁵⁾은 20Mg/ha⁴⁾의 광재 $CaSiO_3$ 슬래그를 사용한 결과 사탕무엽 조직체 내의 Si 농도가 1.5%에서 3.0%로 증가되었고 수량은 39%, 당분함량은 50% 높아졌다고 보고하였다.

일본에서는 전로슬래그를 이용하여 H_2S 발생으로 인하여 수량이 떨어지는 추락담의 토양개량제로 사용하고 있는데 전로슬래그에 함유된 Fe가 H_2S 를 FeS 로 전환시키기 때문이다.⁹⁾

전로슬래그를 유기물과 혼합하여 논에 사용했을 때에는 대기중의 질소고정(N-fixation)을 증가시켜 벼의 질소흡수가 높아져 C:N 비율을 감소시키는 효과도 있다. 전로슬래그 사용으로 작물의 질소(N)흡수가 높아지고 따라서 수량이 증가하는 효과는 전로슬래그가 단순한 Ca 공급원과 토양산도 중화제에 그치지 않고 '복합비료'의 역할을 한다는 것을 알 수 있다. Bailey⁹⁾의 연구결과에 의하면 토양질소가 가용성(N mineralization)일 때 Ca 공급에 의한 토양 pH증가는 토양생물과 식물뿌리의 활력증가로 이어져 토양의 유기질소 함량을 증가시키는 결과를 가지울 뿐 아니라 토양 질소가 불용화(N immobilization)되는 과정에서 뿌리주위에 Ca농도 증가는 작물의 N 흡수능력을 증가시켜 결국 Ca농도 증가와 토양 pH 상승은 토양질소를 식물이 효과적으로 흡수할 수 있는 조건을 제공한다. 이러한 사실은 직물체배를 통한 전로슬래그 평가 실험에서 전로슬래그만 사용했을 때와 전로슬래그에 질소(N), 인산(P), 가리(K)의 복합비료를 함께 사용했을 때 수량증가에 차이가 없었다는 연구결과로 확인할 수 있다. 이 밖에도 전로슬래그를 토양과 혼합하게 되면 Ca^{++} 와 Mg^{++} 농도가 Na^+ 농도보다 상대적으로 높아져 Na-흡착율(SAR, sodium adsorption ratio)이 감소되어 Na 함

량이 높은 간척지나 매립지 토양에서 Na^+ 피해를 예방할 수 있다. 또한 전로슬래그를 살포하게 되면 토양교질(colloids)에 흡착되어 있는 Na^+ 가 Ca^{2+} 와 치환되어 배수축진 효과를 기대할 수 있으며 점질토양인 경우 토양입자가 입단화되어 통기성이 향상된다. 그러므로 전로슬래그는 각종 불량한 토양의 물리화학적 특성을 개량하여 작물의 수량증가와 품질향상을 기할 수 있는 토양개량제로서 활용할 수 있다. 일본에서는 1981년 전로슬래그를 특수비료로 공인화하여 산성토양 및 추락담 개량제로 이용하고 있으며 사용량이 지속적으로 증가되어 현재 일본 총생산량의 20%가 규산석회질 비료 및 토양개량제로 재사용되고 있다.^{6,7,23} 지금까지 서술한 바와 같이 전로슬래그의 토양 사용은 1) 토양 pH 증가 2) 토양 가용성 P, Ca, Mg, Si 등의 농도증가 및 이에 따른 수량과 품질증가 3) 토양 미량원소 함량 증가 4) 질소 고정능 증가 5) 피저병 예방 및 치유 그리고 6) 염해지 토양의 Na^+ 이온 피해경감 및 투수속도 증가 등으로 알려져 있다. 그러나 우리나라에서는 전로슬래그의 농업적 이용에 대한 연구가 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 전로슬래그의 Ca, Mg, Si, Fe 비료 또는 산성 토양개량제로서의 효과를 검증하기 위하여 간척지담, 추락담 그리고 보통담과 보통전에서 전로슬래그 사용량에 따른 벼와 콩의 생육 및 수량에 대한 효과와 전로슬래그 사용량에 따른 식물체 및 토양에서의 P, K, Ca, Fe, Mg, Si 함량, 토양 pH 등의 경시적 변이를 포장시험을 통하여 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 이용한 전로슬래그는 광양제철소 제강슬래그 처리업체인(주)부국산업에서 자력선광후 비자작물로 분

류된 것으로 무기화학 성분은 Table 1과 같으며 분말도는 2.0 mm 이하 그리고 Kondo 등¹⁹⁾의 방법으로 측정된 유리 CaO (free CaO)함량은 3.5%이었다

2.1. 전로슬래그의 산성토양 중화능

토양 pH와 유기물 함량이 상이한 농경지 토양과 산림토양을 채취하여 토양 pH를 6.5로 증가시키는데 필요한 전로슬래그량(lime requirement)을 Shoemaker, McLean, and Pratt의 single-buffer method¹⁰⁾로 측정하였다.

2.2. 작물 재배실험을 통한 전로슬래그의 토양개량 효과

농 토양특성에 따른 전로슬래그 사용(施用)효과를 평가하기 위하여 보통담, 간척지담, 그리고 추락담에 시험포장을 설치하였다. 밭의 경우에는 보통밭을 택하여 대두(콩)재배 실험을 하였다. 실험구의 크기는 5×3 m이었으며 난괴법 3반복으로 실험을 수행하였다. 전로슬래그 사용은 기비로 사용하였고 사용수준은 0, 1, 4, 8, 12 Mgha⁻¹이었으며 석회질 비료와 비교하기 위하여 CaCO_3 , 2Mgha⁻¹를 처리에 포함하였다. 벼(품종: 동진)는 1997년 4월 25일에 파종하여 1997년 6월 1일에 기계로 이앙하였으며 재식밀도는 평당 80-90주였다. 콩(품종: 은하콩)은 1997년 6월 2일에 직파하였으며 재식거리 10×60 cm이었다. 비료시비와 잡초방제 등은 농촌진흥청 권장방법에 따랐으며 1997년 9월 29일에 수확하였다.

(1) 토양조사

모든 실험단위에 대하여 재배기간 동안 7회에 걸쳐 처리당 임의의 5곳의 표토를 표본채취하여 토양 pH, P, K, Ca, Mg, Si 함량을 조사하였는데 분석방법은 농촌진흥청 조사기준에 의거하였다.

(2) 생육 및 수량조사

이앙(벼)또는 파종(콩)후 15일 간격으로 5회에 걸쳐 5주 임의표본을 통해 초장, 지상부 건물중, 엽면적을 측정하고 잎조직체내의 N, P, K, Fe, Ca, Mg, Si 함량을 조사하였다. 수량은 수확시 논과 밭 각각 2평의 넓이를 수확하여 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 전로슬래그의 산성토양 중화능

전로슬래그의 산성토양 중화능을 규명하기 위하여 전남 광영, 순천, 지진도 지역의 농경지 토양과 여천과 백운대 산림토양, 그리고 객토용 산흙을 채취하여 실험자료로 사용하였다. Table 2에서 보는바와 같이 토양 pH를 6.5로 증가시

Table 1. Chemical composition of BOF slag

Element	Conc.(g kg ⁻¹)
Ca	283
Fe	218
Mg	53
Si	83.2
Mn	25.7
Al	13.4
P	9.5
Ni	0.07
Cr	0.68
Ti	3.4
Na	0.53
K	0.33

Table 2. Amount of BOF slag needed per ha of 10 cm deep soils to raise pH 6.5

Soil	Present pH	Silt & Clay (%)	O.M (%)	BOF slag (Mgha ⁻¹)
Yochun	4.0	77.4	14.3	23.3
Sunchun	4.7	65.6	10.0	13.7
Jizindo	5.3	56.1	11.0	9.9
Kwangyong	5.5	59.7	7.7	4.5
Sungwhang	5.7	47.9	8.2	2.5
Mineral soil	5.2	22.9	4.1	2.1

키는데 필요한 전로슬래그량은 토양별로 차이가 큰데 유기물이 많고 점토와 미사함량이 높은 여천토양과 순천토양의 경우 10 cm 작토일 경우 평균 13.7 Mgha⁻¹의 전로슬래그를 살포하여야 토양의 산도가 pH 6.5 수준으로 개량할 수 있었다. 그러나 성황지역의 농경지 토양은 사질토양이고 유기질 함량이 낮아 토양산도 중화에 필요한 전로슬래그 살포량도 평균 2.5 Mgha⁻¹으로 크게 낮았다. 외국의 연구자들에 의하면 토양의 pH가 5.3인 초지에 7.5 Mgha⁻¹을 살포하여 pH를 6.5로 증가시켰다고 하며²⁰Jokinen¹⁸은 18 cm 깊이의 작토에 12 Mgha⁻¹의 전로슬래그를 살포하여 토양을 개량하였다고 발표한 바 있다. 본 연구의 재배실험 결과 순천, 보성 및 나주지역의 논에 8 Mgha⁻¹을 살포하고 경운하였을 때 벼 생육과 수량이 가장 크게 증가하였다. 이러한 결과를 종합해 보면 지역 토양의 토성, 유기물 함량, 그리고 양이온치환용량(CEC)에 따라 차이는 있지만 일반적으로 우리나라 농경지 토양은 약 7~8 Mgha⁻¹의 전로슬래그를 살포하면 작물생육의 적정 산도인 6.5 이상으로 개량할 수 있음을 알 수 있다.

전로슬래그의 토양산도 중화능을 CaCO₃의 산도중화능과 비교한 결과를 Table 3에 제시하였다. 여천토양의 경우 토양 100 cc를 pH 6.5로 중화하는 데에 CaCO₃는 0.56g이 필요하였으며 전로슬래그는 2.3g이 소요되었는데 이는 CaCO₃ 사용량의 약 4.1배가 된다. 석회 요구도(lime requirement)가 낮은 산흙의 경우 100 cc 토양의 pH를 6.5로 증가시키는데 필요한 CaCO₃량과 전로슬래그의 량은 각각 0.08 g과 0.25 g으로서 전로슬래그 사용량이 약 3.1배가 높았다. 다른 토양의 경우에도 비슷한 경향을 보여 전로슬래그를 사용하여 토양산도를 중화할 경우에 CaCO₃를 사용할 때 보다 사용량이 평균 3.4배가 많아야 됨을 알 수 있다.

3.2. 전로슬래그의 토양개량 및 작물 수량증대 효과

3.2.1 토양 무기성분 함량

전로슬래그 사용후 재배기간(5개월)동안 논과 밭의 토양

Table 3. Amount of lime or BOF slag to bring Yochun soils to pH 6.5

Liming agent (g/100cc soil)	Soil pH	
	CaCO ₃	BOF slag
0.00	4.0	4.0
0.23	5.0	4.3
0.34	5.5	4.5
0.41	6.0	4.7
0.56	6.5	4.8
1.00	-	5.5
2.30	-	6.5

pH는 전로슬래그 사용량이 증가할 수록 유의적으로 증가하였는데 증가폭은 전로슬래그 사용량이 8 Mgha⁻¹일 때 pH 1 unit이었다. 석회사용도 토양 pH를 증가시켰는데 증가효과는 석회 2 Mgha⁻¹이 전로슬래그 4 Mgha⁻¹ 사용할 때와 비슷하였다(Table 4). 토양의 석회요구도 측정결과(Table 2)에 의하면 CaCO₃의 중화값은 전로슬래그 보다 약 4배가 높으므로 CaCO₃ 2 Mgha⁻¹의 처리효과는 전로슬래그 8 Mgha⁻¹ 사용효과와 동일하다. 그러나 포장실험 결과 전로슬래그의 토양 pH 상승효과가 석회요구도 보다 2배 가량 높은 점과 또 pH 상승효과가 5개월에 걸치는 재배기간 동안 계속 유지되는 결과는 전로슬래그에 의한 pH 증가는 전로슬래그가 유리 CaO 이외에 CaSiO₃로 구성되어 있기 때문으로 사료된다. 칼슘규산염(CaSiO₃)은 CaCO₃ 보다는 느리지만 서서히 토양 H⁺를 중화시키며¹⁹전로슬래그 사용효과는 3년 동안 지속된다고 보고되고 있다²¹그러므로 전로슬래그는 속효성이며 또한 완효성인 토양산도 중화제라고 할 수 있다. 한편 전로슬래그에는 28.3%의 Ca와 5.3%의 Mg가 포함되어 있어 Ca:Mg 비율이 5:1로서 최소비율인 20:1 보다 훨씬 높으므로 전로슬래그는 CaCO₃ 과다 사용시 유발되는 Mg 결핍피해를 예방할 수 있는 CaMgCO₃와 유사한 효과를 나타내는 토양산도개량제라고 할 수 있다.

전로슬래그 사용은 토양 pH 증가 뿐만 아니라 토양 Ca 함량을 크게 증가시켰다. 모든 시험구에서 전로슬래그를 4, 8, 12 Mgha⁻¹ 사용하였을 때 토양 Ca 농도증가는 토양 1 kg 당 각각 0.8, 1.9, 3.5 cmol.kg⁻¹로서 거의 직선적이었다. 토양 Mg의 경우는 전로슬래그 사용에 따른 증가폭이 Ca와 같이 뚜렷하지는 않으나 추락담과 보통담에서 전로슬래그를 8 Mgha⁻¹와 12 Mgha⁻¹ 처리하였을 때 토양 1 kg당 평균 토양 Mg농도 증가는 각각 0.2와 0.28 cmol.kg⁻¹이었으며 간척지답에서 유의적인 차이가 없는 것은 간척지답 자체에 Mg가 10.3 cmol.kg⁻¹으로서 보통담의 3.8배 그리고 추락담의 14배 이상 많이 함유되어 있기 때문이다.

토양 Si 함량은 전로슬래그 시용으로 크게 증가되었는데 증가폭은 논 토양에 따라 차이가 컸다. 전로슬래그 12 Mgha⁻¹ 시용시 간척지답과 추락답에서는 Si가 34-54 ppm 그리고 보통답의 경우에는 206 ppm이 증가되었다. 전로슬래그 시용에 의한 토양 Si 함량 증가는 전로슬래그에 약 9%의 유효 SiO₂가 함유되어 있기 때문에 토양별 증가폭의 차이는 토양의 pH가 각기 다르기 때문이다. 토양 SiO₂는 pH가 6.5 이상 일때 부터 식물이 흡수할 수 있는 유효 SiO₂ 형태로 바뀐다.⁵⁾ Table 4에서 보는 바와 같이 전로슬래그 12 Mgha⁻¹ 시용시 보통답의 경우 pH값이 6.9로 증가되었고 Si함량 증가는 82.8 ppm인데 추락답에서는 pH값이 6.03이었으며 유효 Si 함량증가는 54.4 ppm에 그쳤다. 유효규산 함량은 비 재배에 필수적이며 비의 수량증대를 위해서는 유효 SiO₂ 함량이 130 ppm 이상으로 알려져 있다. 그러나 우리나라 논토양의 유효 SiO₂ 함량은 평균 90 ppm으로 기준치 이하이어서 수량증대를 위한 규산의 시용이 강조되고 있는 실정이므로²⁾ 전로슬래그 시용은 유효 SiO₂의 직접적인 공급원이 될 뿐만 아니라 토양 pH 증가에 의한 토양 SiO₂가 유효 SiO₂로 전환되어 수도의 경우 수량증대를 위한 토양개량효과가 크다고 할 수 있다. 이러한 결과는 논토양의 Si 공급원으로 전로슬래그의 효과가 규회석보다 3.7배 높다고 발표한 연구결과와 일치한다.²⁾

전로슬래그 시용은 토양의 Fe 함량을 증가시키는데 증가량은 Si의 경우와 같이 토양에 따라 차이가 크다(Table 4). 전로슬래그 8 Mgha⁻¹ 시용시 추락답과 보통답에서는 Fe가

242~262 ppm 증가되었는데 보통답에서는 378.5 ppm이 증가되어 전로슬래그는 Fe 공급원이 되기도 하였다. 농경지 토양에서 Fe 결핍문제는 심각하지 않으나 토양 pH가 7.0 이상인 경우와 H₂S 발생이 심한 추락답에서는 전로슬래그 시용효과가 클 것으로 기대된다. 일본에서는 전로슬래그를 이용하여 추락답을 개량하고 있는데⁶⁾ 그 이유는 전로슬래그에 함유된 Fe가 H₂S와 반응하여 FeS로 전환되기 때문에 유해한 H₂S의 축적을 방지할 수 있기 때문으로 알려져 있다.

3.2.2. 생육 및 수량

생육 및 식물조직체내 무기성분 함량: 전로슬래그를 사용한 시험구에서 재배한 비의 엽조직체에는 P, Ca, Mg, Si, Fe 그리고 콩의 엽조직에는 P함량이 대조구에 비하여 높은 결과를 보였다(Table 5). 이러한 결과는 전로슬래그에 함유된 무기성분들이 토양에 용출되어 작물에 흡수되었기 때문이다. 그러나 P의 흡수증가는 토양에 함유되어 있는 불용성인 P가 pH 증가로 인하여 가용성 P형태로 전환되었기 때문이므로 전로슬래그 시용의 간접적인 효과라고 할 수 있다. 토양중의 무기 P(inorganic phosphate)의 용해도는 토양 pH에 크게 좌우되는데 산성토양에서는 P가 Fe, Al, Mn 등에 흡착되며 알카리 토양에서는 Ca와 반응하여 불용성(phosphate fixation)이 되며 가용성인 H₂PO₄⁻나 HPO₄²⁻ 형태로 가장 많이 존재할 때는 토양 pH가 6.5일 때이다.²¹⁾ 전로슬래그 시용에 따른 식물체내 무기물함량 증가효과는 Rodriguez등²⁰⁾도 유사한 결과를 발표하였다. 즉 ryegrass 재배에서 전로슬래그 7.5 Mgha⁻¹ 시용시 식물체 조직내에

Table 4. Effect of BOF slag applications on the mineral element contents in paddy and upland field soil

Soil	BOF slag (Mgha ⁻¹)	pH (1:5)	cmolckg ⁻¹			ppm		
			K	Ca	Mg	P ₂ O ₅	Fe	SiO ₂
Reclaimed Paddy Field	0	7.4	2.02	4.8	10.3	111.4	1066.7	109.5
	4	7.6	2.10	5.5	10.1	154.2	1058.2	126.5
	8	7.9	2.06	6.2	9.6	114.8	1309.3	126.4
	12	8.1	2.26	8.4	9.3	167.2	1124.6	143.6
Degraded Paddy Field	0	5.3	0.57	2.7	0.7	224.1	1120.8	45.5
	4	5.7	0.49	3.7	0.8	242.9	1327.9	64.4
	8	5.9	0.47	4.6	0.8	234.1	1383.0	82.8
	12	6.0	0.46	5.6	0.9	200.3	1701.7	99.9
Normal Paddy Field	0	5.6	0.44	3.3	2.7	62.6	413.5	110.8
	4	6.1	0.42	4.1	2.7	61.3	726.1	193.6
	8	6.8	0.46	5.4	3.0	71.1	792.0	305.1
	12	6.9	0.47	7.1	3.1	60.9	881.7	317.1
Upland Field	0	6.5	0.71	4.8	2.8	148.2	444.4	-
	4	7.1	0.77	5.7	2.7	155.9	805.9	-
	8	7.5	0.73	6.8	2.7	148.6	1097.3	-
	12	7.7	0.74	8.5	2.6	142.1	1422.3	-

Table 5. Effect of BOF slag application on the mineral content in the leaf tissues of rice and soybean plant

Soil	BOF slag (Mgha ⁻¹)	Percent						ppm
		T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Fe
Paddy field	0	2.3	0.52	2.7	0.30	0.28	6.7	387.3
	4	2.1	0.65	2.8	0.36	0.28	7.2	690.7
	8	2.2	0.62	2.9	0.46	0.29	8.3	780.0
	12	2.0	0.62	2.6	0.61	0.30	8.8	860.0
Upland field	0	2.1	1.20	2.8	0.62	0.47	-	-
	4	2.1	1.60	2.9	0.68	0.45	-	-
	8	2.0	1.80	2.8	0.65	0.45	-	-
	12	2.2	1.20	2.8	0.67	0.48	-	-

Table 6. Effect of BOF slag application on the leaf and shoot dry weight of rice and soybean

BOF slag (Mgha ⁻¹)	g/plant	
	Rice	Soybean
0	32.7	20.3
4	31.2	29.5
8	34.7	33.1
12	32.4	32.4

Table 7. Effect of BOF slag application on the yield of rice and soybean

BOF slag (Mgha ⁻¹)	Yield (Mgha ⁻¹)			
	Rice A*	Rice B	Rice C	Soybean
0	4.88	6.57	7.27	0.90
4	5.51	6.94	6.55	1.11
8	5.57	7.01	7.59	1.23
12	5.34	6.70	7.16	1.11

* Rice A, B, C represents the yield in reclaimed, degraded, and normal paddy field, respectively.

Ca, Mg, P 함량이 증가하였고 반면에 K 함량은 감소하였다고 하였다. 그러나 본 실험에서는 K 함량에 변화가 없었는데 이는 실험토양 자체에 K 함량이 높기 때문인 것으로 사료된다. 토양에 Ca²⁺와 Mg²⁺ 이온농도가 높아지면 K⁺의 활성도비(K⁺ / √Ca²⁺+Mg²⁺)가 감소되어 K⁺ 흡수가 저하되는데 K⁺ 활성도비가 0.1 이하이면 K가 부족하게 되지만 본 실험에서는 전로슬래그를 12 Mgha⁻¹ 사용시에도 K⁺ 활성도비는 0.159로 높은 값을 유지하여 벼와 콩의 K⁺ 흡수에 문제가 없었던 것으로 해석된다.

전로슬래그 사용에 의한 작물체의 지상부(잎과 줄기)건물중은 벼에서는 대조구에 비하여 큰 차이가 없었다. 그러나 콩의 경우에는 대조구의 건물중이 20.3 g인데 전로슬래그 8 Mgha⁻¹ 사용구에서 채매한 경우에는 33.1 g으로 63% 이상 증가하였다. 이처럼 전로슬래그 효과가 큰 이유는 콩이 옥수수, 보리 등과 같이 호석회성 작물(好石灰性作物, lime-loving plant)이기 때문이며 또한 근권의 Ca 농도 증가에 따라 N 흡수율이 증가한데 기인하는 것으로 해석된다.

수량·전로슬래그 8 Mgha⁻¹ 사용한 답에서 벼의 정조수량이 가장 높았는데 증수율은 간척지답에서 14.2%, 추락답에서 6.9%, 그리고 보통답에서 4.3%이었다(Table 7). 간척지답은 토양 pH는 높았으나 Ca²⁺ 이온농도는 Na⁺와 Mg²⁺ 이온에 비하여 상대적으로 낮으며 배수가 불량한 토양이다. 전로슬래그 사용으로 벼의 수량이 증가한 것은 세포분열에 필수적인 Ca⁺⁺ 이온농도가 증가되었고 Na⁻교질의 토양이

Ca²⁺교질의 토양으로 바뀌어 투수속도가 증가되었기 때문으로 사료된다. 추락답과 보통답에서 수량이 증가한 것은 전로슬래그 사용으로 인하여 토양 pH가 5.3~5.6에서 6.0~6.8로 증가되었고 Ca, Mg, P, Fe 그리고 Si 함량이 높아지는 등 토양이 비옥해진 데에 기인한다. 전로슬래그 사용으로 인한 콩의 증수율은 36.6%로서 벼의 증수효과 보다 훨씬 높았다. 이러한 결과는 전로슬래그는 토양의 화학적인 특성을 개량할 뿐 아니라 호석회성 작물의 수량증대에 Ca 공급으로서의 직접적인 효과가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

전로슬래그의 토양개량효과와 전로슬래그 사용이 벼와 콩의 생육과 수량에 미치는 영향을 구명하기 위한 포장실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에 사용한 전로슬래그의 분말도는 2.0 mm 이하이며 알카리분은 45%, 구용성 고토는 2.4%, 그리고 가용성 규산은 8.9%이었다.
2. 전로슬래그의 토양산도 중화능은 CaCO₃의 1/3수준이었으며 전로슬래그는 Ca와 Mg을 동시에 공급하므로 산성토양개량제로서 CaCO₃ 보다 우수한 CaMgCO₃를 대체할 수 있었다.

3. 농경지 토양에 전로슬래그를 사용하였을 때 토양 pH 상승과 Ca, Mg, P, Fe, Si 함량이 유의적으로 증가하였다.
4. 전로슬래그를 사용한 논에서 재배한 벼 엽조직체내에는 Ca, P, Fe, Si 함량이 그리고 콩 엽조직체내에는 P 함량이 대조구에서 보다 유의적으로 높았다. 수량증가 효과는 전로슬래그 8 Mgha⁻¹ 시용시 벼와 콩 모두 가장 높았으며 증수율은 간척지답에서 14.2%, 추락답에서 6.9%, 그리고 보통답에서는 4.3%이었으며 콩의 경우에는 36.6%이었다.

참고문헌

1. 김영희, 신영오. 식물영양학. 아카데미서적 (1987).
2. 박천서. 한국 논토양 가리흙의 유효규산함량과 규산질 비료의 효과와의 관계. 유효규산함량 분포 및 시용량에 관한 연구 농진시연보 (1970).
3. 신재성. 우리나라 토양특성과 석회. 환경보존 농업에서의 석회의 역할 심포지엄. 토양비료학회. 7-28 (1995).
4. 조성진. 1996. 삼정 비료학. 향문사.
5. 조성진, 박천서, 엄대익. 삼정 토양학. 향문사 (1997).
6. 伊達昇, 鹽崎尚郎. 肥料便覽. 農文協 (1997).
7. 安齊孝儀. 電氣爐 製鋼슬래그의 資源化의 現狀と 課題. 鐵鋼슬래그協會 (1995).
8. Anderson, D.L., G.H. Snyder, and F.G. Martin. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades histosols. *Agron. J.* 83, 870-874 (1991).
9. Bailey, I.S. Liming and nitrogen efficiency: Some effects of increased calcium and increased soil pH on nitrogen recovery by perennial ryegrass. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26, 1233-1246 (1995).
10. Carter, M.R. Soil Sampling and Methods of Analyeis. *Can. Soc. Soil Sci.* Ottawa (1993).
11. Collins, G.H. Commercial Fertilizers. The Blakiston Co. Philadelphia (1947)
12. Debnath, N.C. and Basak, R.K. Efficiencies of some rock-phosphates and basic slag as phosphatic fertilizers for rice, wheat and greengram in acid laterite soil of West Bengal. *Indian J. of Agricultural Science.* 54, 722-726 (1984).
13. Debnath, N.C. and Basak, R.K. Residual effect of rock-phosphates and basic slag on the yield of crops. *Indian J. of Agricultural Science.* 57, 52-54 (1987).
14. Formoso A., F.A. Lopez, F. Medina, and C. Trueba. Agronomic use of LD slag. ECSC Tech. Rep. 4. Convention 7210-XA/931. CENIM, Madrid, Spain (1991).
15. Grove, J.H. and M.E. Sumner. Lime induced magnesium stress in corn: Impact of magnesium and phosphorous availability. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49, 1192-1196 (1985).
16. Hartikainen, H. Peat ash and basic slag as substitutes for lime with reference to phosphorus uptake by turnip rape. *J. of Agricultural Science in Finland.* 56, 291-298 (1984).
17. Igbokwe, P.E. and Tiwari. S.C. Use basic slag in sweet pepper production. *J. of the Mississippi Academy of Science.* 30, 83-91 (1985).
18. Jokinen, R. The efficiency of dolomitic limestone, basic slag and peat ash as liming agents, and as calcium and magnesium sources for turnip rape. *J. of Scientific Agricultural Society of Finland.* 54, 371-383 (1982).
19. Kondo, R., M. Daimon, C.T. Song, and S. Jinawath. Effect of lime on the hydration of supersulfated slag cement. *Ceramic Bulletin.* 59, 848-851 (1980).
20. Lewis, D.W. Slag Utilization. In *Encyclopedia of Materials Science and Engineering.* Pergamon Press. Oxford (1986).
21. Miller, R.W. and R.L. Donahue. *Soils in Our Environment.* Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. (1995).
22. Norman, G. Slagger som kalkingsmedel Nordbr forskn. 60, 710-711 (1978).
23. Ozeki, S. Properties and usage of steel plant slag. *Steel for Sustainable Development.* Encosteel Stockholm. Sweden (1997).
24. Piret, J. Valorisation de la scorie LD en sylviculture. ECSC Tech. Rep. 1-6. Convention 7210-XA/204. CRM. Liege, Belgium (1991).
25. Rodriguez, M., F.A. Lopez, M. Pinto, N. Balcazar, and G. Besga. Basic Linz-Donawitz slag as a liming agent for pastureland. *Agro. J.* 86. 904-909 (1994).
26. Sumner, M.E., M.P.W. Farina, and V.J. Hurst. Magnesium fixation—A possible cause of negative yield response to lime applications. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 9, 995-1007 (1978)
27. Wutscher, H.K. Positive effect of basic slag application on citrus blight-affected "Hamlin" orange trees. *Proceedings of the annual meeting of the Florida State Horticulture Society.* 98, 1-3 (1986).