

Effect of Fly Ash Fertilizer on Paddy Soil Quality and Rice Growth

Se Jin Oh · Hyun Soo Yun · Seung Min Oh · Sung Chul Kim · Rog Young Kim ·
Yung Ho Seo · Kee Suk Lee · Yong Sik Ok · Jae E. Yang*

비산재로 제조한 비료가 논토양 질과 벼 생육에 미치는 영향

오세진 · 윤현수 · 오승민 · 김성철 · 김록영 · 서영호 · 이기석 · 육용식 · 양재의*

Received: 8 April 2013 / Accepted: 23 July 2013 / Published Online: 31 December 2013
© The Korean Society for Applied Biological Chemistry 2013

Abstract Coal ash can be added to agricultural soils to increase the chemical properties of soil such as pH, cation exchange capacity and nutrient availability of - B, Ca, Mo etc-. Therefore, the main purpose of this study was to evaluate the feasibility of fly ash as a soil amendment in paddy soils. Selected fly ash was mixed with bentonite and calcium hydroxide at the ratio of 80:15:5 (w/w) and manufactured as a pellet type at the size of 10 mm. Field experiments were conducted to evaluate the effects of fly ash fertilizer on the soil quality and crop growth compare to the control (no fertilizer) and, - traditional fertilizer. Results showed that soil pH and organic matter in paddy soils after applying the manufactured fly ash fertilizer were not increased compared to the other two treatments. However, the concentration of available phosphate and silicate in paddy soils were higher than those of the control and traditional fertilization. With regard to crop growth, no significant difference was observed between three different treatments. However, the content of protein in the rice grain cultivated with the fly ash fertilizer was higher than in the

rice cultivated by other two treatments. Overall, fly ash fertilizer could increase the concentration of available silicate and phosphate in the paddy soil and improve the rice quality. In conclusion, fly ash can be utilized in agricultural soils as soil amendment, especially in the rice paddy soil.

Keywords amendment · coal ash · fertilizer · paddy soil · rice

서 론

전세계적으로 전력생산은 대부분 석탄을 연료로 하는 화력발전에 크게 의존하고 있으며, 그로 인해 지속적으로 석탄연소재를 발생시키고 있다. 발생한 석탄연소재는 주로 매립되고 있으나 매립지의 용량이 한계에 달해 재활용 방안의 확대가 시급한 실정에 있다(Singh 등, 1997; Matsi와 Keramidas, 1999; Ziemkiewicz 와 Skousen, 2000; Gupta 등, 2007; Haynes, 2009). 발생 석탄연소재의 재활용률은 국외의 경우 독일 85%, 덴마크 73%, 프랑스 60%, 폴란드 50%, 미국 32%, 중국 25% 이상, 국내의 경우 70% 미만으로 보고되고 있고, 재활용은 대부분 콘크리트, 시멘트, 벽돌, 도로기반재 등 토목, 건축분야에서 이루어지고 있다(Iyer, 2002; Rai 등, 2004; Pandey 등, 2009; Karmakar 등, 2010). 하지만, 농업분야 대한 적용은 미국 0.7%, 유럽 1% 수준으로 미비하고, 국내의 경우 법적으로 폐기물로 지정되어 활용이 어려운 실정이다(Lee, 2011).

화력발전소에서 발생하는 석탄연소재는 lime (CaO), silicon dioxide (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), iron oxide (Fe_2O_3)의 구성비에 의해 대부분 class F (pozzolanic)와 class C (pozzolanic, cementitious)로 구분된다. 구성비에 의한 분류는 Class F의 경우 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 합이 약 70%, CaO 10% 미만이고, Class C는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 합이 약 50%, CaO 10% 이

S. J. Oh · H. S. Yun · S. M. Oh · R. Y. Kim · Y. S. Ok · J. E. Yang
Department of Biological Environment, Kangwon National University,
Chuncheon 200-701, Republic of Korea

S. C. Kim
Department of Bioenvironmental Chemistry, Chungnam National University,
Daejeon 305-764, Republic of Korea

Y. H. Seo
Agricultural Environment Research Section, Gangwondo Agricultural
Research and Extension Services, Chuncheon 200-939, Republic of Korea

K.S. Lee
Korea South East Power Co. Ltd, Seoul 135-280, Republic of Korea

*Corresponding author (J. E. Yang: yangjay@kangwon.ac.kr)

상이다(Ziemkiewicz와 Skousen, 2000; Pourkhoshidi 등, 2010). 석탄灰는 친수성 표면과 다공성의 특성으로 다양한 이온을 함유하여 침전, 이온교환 등의 반응으로 중금속 안정화, 자체적으로 함유한 B, Ca, Mo 등의 식물영양소를 활용한 토양의 화학적 개량과 용적밀도, 수분보유력 등의 물리적 특성 개선 용도로 자주 사용되고 있다(Ziemkiewicz와 Skousen, 2000; Bi 등, 2003; Alinnor, 2007; Pourkhoshidi 등, 2010). 석탄연소재의 토양 개량제로의 활용에 관한 연구는 다음과 같이 1) 광산 인근 토양의 개량 목적(Hetrick 등, 1994; Daniels 등, 2002), 2) 농경지 토양의 물리적 개량을 위한 목적(Chang 등, 1997; Ziemkiewicz와 Skousen, 2000; Adriano and Weber, 2001), 3) 농경지 토양의 유기물함량, 양이온교환용량 등 화학적 개량 또는 Ca, B, Mo 등 비효 제공을 위한 목적(Rios 등, 2008; Manoharan 등, 2010; Patra 등, Roy와 Joy, 2011; 2012) 연구가 진행되었다. 문헌 연구에서와 같이 석탄연소재는 농경지 토양에 적용할 경우 농업환경에 다양한 이점을 제공할 수 있는 잠재력을 갖는 물질로 판단된다.

본 연구는 석탄연소재 중 비산재의 자원 재활용을 위한 방안으로 토양 개량재 대체물질로의 모색을 위해 가교물질(binder material)을 혼합하여 과립(pellet) 형태로 제조한 물질을 실제 농토양에 처리하였을 때 토양과 농작물에 미치는 영향을 평가하였다.

재료 및 방법

비산재와 논토양 특성분석. 비료 제조에 사용한 비산재는 국내 10개 화력발전소 중 동해화력발전소를 제외한 9개 화력발전소에서 발생하는 것을 이용하였고, 제조한 비료의 재배시험을 위한 논은 강원도 춘천시 신북읍 유포리에 위치한 강원도농업기술원(N37°56'13.30" E127°45'51.96") 소유 부지에서 수행하였다. 동해화력발전소의 비산재는 석탄 연소과정에 탈황 및 탈질을 위해 석회를 함께 연소시키는 유동충순환방식으로 발생되는 비산재의 특성이 pH 12.69 수준으로 타 발전소의 비산재보다 최대 pH가 4.0 높았으며, EC는 8.50 dS m⁻¹로 작물 생육이 어려운 4.0 dS m⁻¹ 이상으로 타 발전소에 비해 최대 8.0 dS m⁻¹ 높은 수준으로 나타났다(Table 1). 시험에 사용한 비산재와 논토양의 화학적 특성 분석은 RDA(2000)에 준하여, 유해중금속 함량은 토양오염공정시험방법(ME, 2010)에 준하여 수행하였다(Table 2).

공시비료의 제조. 비료의 제조는 비산재, 가교물질(bentonite)과 결합력 증대를 위한 소석회[Ca(OH)₂]를 80:15:5% (w w⁻¹)의 비로 혼합(PT150U; PM tech)로 균일하게 혼합한 것을 사용하였다. 또한 N, P, K의 첨가를 위해 요소(urea; N source), 용과

Table 1 pH and EC in fly ashes from 10 different thermal power stations

	pH (H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)
Yeongheung	10.79±0.07	1.08±0.01
Samcheonpo	11.09±0.04	1.48±0.02
Yeongdong	9.32±0.05	0.48±0.02
Boryeong	11.90±0.02	1.71±0.03
Seocheon	10.56±0.02	0.34±0.00
Dangjin	11.50±0.04	1.90±0.03
Donghae	12.69±0.03	8.50±0.09
Honam	11.03±0.05	0.54±0.02
Hadong	11.04±0.32	1.34±0.11
Taean	8.68±0.03	1.39±0.01

린(superphosphate; P source), 황산가리(potassium sulfate; K source)를 황산 및 구연산에 녹여 수용액상태로 반죽(수분함량 25%)하여 사용하였고, 비료에 투입된 N, P, K의 첨가량은 5%, 1%, 2%였다. 반죽상태의 혼합물은 Fig. 1과 같이 제형기(PT6015A; PM tech)를 이용하여 10 mm 과립형태로 제작 후 회전식 건조기(PT36; PM tech)에서 1차 건조 및 구형으로 제작하고, 건조기 60°C에서 2차 건조하여 제작하였다.

재배 시험구 구성 및 모니터링. 재배시험을 위한 논은 252 m²의 면적에 처리구당 21 m²의 면적으로 3반복 시험을 수행하였고, 난괴법(randomized block design)으로 시험구를 배치하였다. 시험에 사용한 처리내역은 Table 3과 같이 대조구를 포함하여 시비의 종류 및 방법에 따라 무비구(control, C), 관행시비구(traditional fertilization, TF), 비산재 비료 시비방법 2종(fly ash fertilizer A, FFA; fly ash fertilizer B, FFB)으로 4개의 처리구로 구성하였다. 현장 처리구에 식재한 품종은 자포니카 계열의 ‘대안벼’로 2012년 5월 15일에 재식거리 30cmx15cm의 간격으로 하였고, 10월 18일까지 5개월간 농촌진흥청 표준재배기술에 준하여 재배하였다(Choi 등, 1995; Ryuk 등, 2004). 시험구의 모니터링은 토양의 경우 초기와 재배 후 토양의 화학적 특성 변화를 평가하였고, 농작물은 수확시 초장, 분열수 등의 생육을 현장에서 조사하였고, 백미 중 영양원소의 함량은 실내에서 분석하여 처리구간 함량을 비교하였다. 채취한 토양은 암 조건에서 풍건하여 체거를 후 2 mm 이하의 시료를 대상으로 pH, EC 및 화학적 특성을 분석하였고, 150 μm 이하의 시료를 중금속함량 분석에 사용하였다(ME, 2010; RDA, 2000). 쌀의 경우 실내에서 건조하여 백미로 도정한 시료를 분쇄 후 RDA(2000)의 분석방법에 준하여 습식분해하여 영양원소, 중금속 함량 등을 정량하였다.

통계분석. 비산재로 제조한 비료를 논토양에 처리하였을 때 벼

Table 2 Analysis methods for physico-chemical properties of paddy soil and inorganic fertilizer

Contents	Methods	Instruments
Soil texture	Hydrometer	
pH	1:5 (solid : H ₂ O)	pH meter, Mettler toledo S20-K
EC	1:5 (solid : H ₂ O)	EC meter, Mettler toledo S30-K
Organic matter (OM)	Walkley-black	UV-Vis spectrophotometer, Shimadzu UV-2401PC
Available P ₂ O ₅	Ascorbic acid	UV-Vis spectrophotometer, Shimadzu UV-2401PC
Available SiO ₂	1N NaOAc (pH 4.0)	UV-Vis spectrophotometer, Shimadzu UV-2401PC
Exchangeable cation	1N NH ₄ OAc (pH 7.0)	Atomic adsorption spectrometer, Perkin elmer pinAAcle 900F
Total heavy metals	Aqua regia	Inductively Coupled Plasma, Thermo iCAP 6000 series



Fig. 1 Fertilizer manufacturing process using fly ash, bentonite and calcium hydroxide

의 생육 및 성분함량 변화 통계분석은 SAS (ver. 9.1)를 이용하였다. 처리구간 비교는 ANOVA 검정 후 Duncan's multiple range test (*p* value <0.05)로 유의성 검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

재배시험 전후 토양의 특성. 재배시험 전 토양의 특성은 RDA (2000)의 분석법을 이용하여 분석하였고, 화학적 특성은 Table 4와 같이 나타났다. 물리적 특성인 토성은 USDA 분류법으로 구분하였을 때, 모래 61.0%, 실트 29.2%, 점토 9.8%의 사양토 (sandy loam)로 나타났다.

비산재로 제조한 개량제 처리에 의한 논토양의 화학적 특성 변화는 Table 4와 같이 나타났다. pH는 무처리구의 경우 재배 전 5.45에서 재배 후 5.65로 0.2정도 상승하였고, 화학비료 및

개량재를 처리한 처리구는 CF 5.67, FFA 5.68, FFB 5.77로 큰 차이를 나타내지 않았다. 비산재 자체의 특성에 기인할 경우 토양의 pH 교정력이 높을 것으로 판단되었지만, 이에 상응하는 결과가 도출되지 않았던 것은 시험에 투입된 비산재 양 (처리량 180 kg 10a⁻¹, 경작 깊이 30 cm, 논-사양토 용적밀도 1.23 Mg m⁻³)을 질량으로 환산할 경우 0.04%의 수준으로 혼합량이 1% 이하로 처리될 경우 pH 교정력이 크게 증가하지 않았던 문헌 연구와 일치하였다(Pandey 등, 2009; Manoharan 등, 2010). 하지만 비산재를 2% 혼합할 경우 토양의 pH 교정력은 증가한다는 문헌 연구 결과에 따라 강산성 조건의 토양 개량용으로 사용할 경우 투입량을 조절하면 가능할 것으로 판단된다 (Singh 등, 1997; Matsu와 Keramidas, 1999; Bulusu 등, 2007; Yeheyis 등, 2009). EC나 유기물함량의 경우도 처리량이 적은 이유로 대조구와 처리구 간 차이는 없는 것으로 나타났다. 유효인산과 유효구산 함량의 경우 초기 대조구 토양(127 mg kg⁻¹, 23 mg kg⁻¹)에 비해 유효인산 CF (141 mg kg⁻¹) < FFA (142 mg kg⁻¹) < FFB (149 mg kg⁻¹), 유효구산 CF (25 mg kg⁻¹) < FFB (26 mg kg⁻¹) < FFA (27 mg kg⁻¹)의 순으로 증가하는 경향은 보였으나 통계적으로 유의성은 없었다. 문헌 연구에서 비산재의 처리가 토양 내 식물 이용 가능한 인산함량을 증가시킨다는 결과가 있는데(Bulusu 등, 2007; Matsu와 Keramidas, 1999; Pandey 등, 2009; Thind 등, 2012), 유효구산의 경우 토양과 유사한 광물로 구성되어 다량의 SiO₂를 함유한다는 것에 기인한 결과로 판단된다(Haering과 Daniels, 1991; Daniels 등, 2002). 또한 치환성 칼슘과 마그네슘이 대조구(1.18 cmol₊ kg⁻¹, 0.08 cmol₊ kg⁻¹)에 비해 개량제 처리구에서 FFA 1.28 cmol₊ kg⁻¹과 0.11 cmol₊ kg⁻¹, FFB 1.26 cmol₊ kg⁻¹과 0.11 cmol₊ kg⁻¹로 소폭 증가하는 경향을 보였다. 화학비료 및 비산재 개량제 처리에 따른 토양 내 중금속 함량 분석 결과는 Table 5와 같다. 대조구에 비해 모든 처리구에서 중금속 함량이 소폭 증가하였으나, 통계적 유의성은 없었다. 국내 토양환경보전법 상의 기준치를 초과하지 않아 작물에 대한 위해성은 없는 것으로 판단된다.

벼 생육 및 수량. 개량제 처리에 따른 벼의 생육과 관련된 결과는 Fig. 2, 생산량에 대한 결과는 Table 6에 도시하였다. 생육 평가를 위한 조사 수량은 처리구당 66주(22주 plot⁻¹ × 3반복

Table 3 Description of treatments for the rice cultivation in paddy soils

Treatment	Description
C [†]	No fertilizer
TF [‡]	Chemical fertilizer (N-P-K=9-3-3 kg 10a ⁻¹)
FFA [§]	2.1 (basal fertilization)-0.84 (topdressing at tillering stage)-0.84 (ear formation stage) kg plot ⁻¹
FFB [¶]	Only basal fertilization 3.78 kg plot ⁻¹ (180 kg 10a ⁻¹)

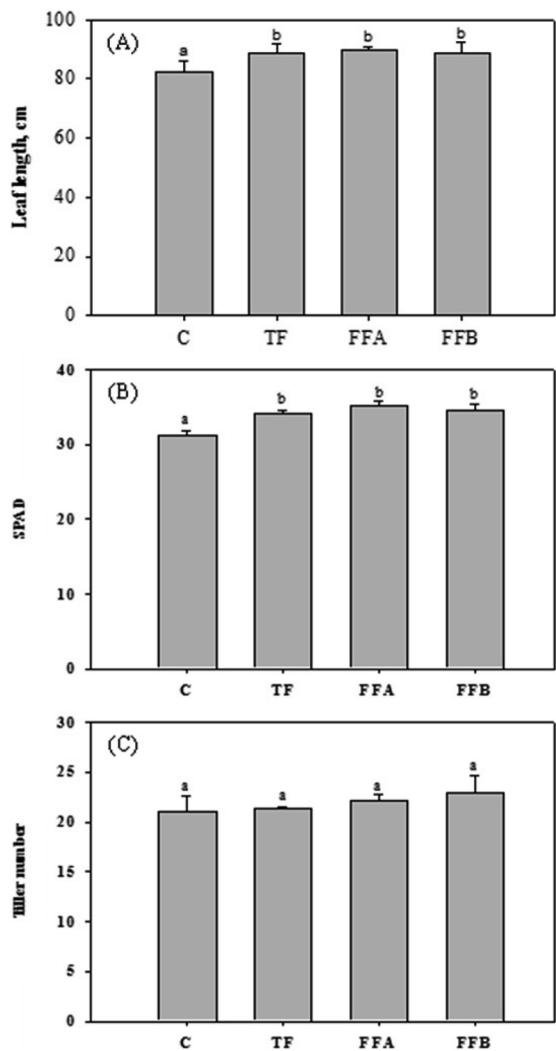
[†]: Control, [‡]: Traditional fertilization, [§]: Fly ash fertilizer A, [¶]: Fly ash fertilizer B

Table 4 Chemical properties of paddy soils after different fertilization treatments

Treatment	pH	EC	OM	Av. P ₂ O ₅	Av. SiO ₂	Ex. K	Ex. Ca	Ex. Mg
	H ₂ O	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			cmol ₊ kg ⁻¹	
Before	C	5.45±0.05	0.10±0.02	15.21±1.62	127.53±7.36	23.54±0.34	0.05±0.01	1.18±0.09
	C	5.65±0.06a	0.10±0.00b	15.46±2.04a	130.33±9.02a	24.67±2.08a	0.05±0.01b	1.20±0.18a
	TF	5.67±0.02a	0.11±0.02ab	14.70±1.37a	141.67±10.60a	25.33±8.50a	0.05±0.00b	1.16±0.10a
	FFA	5.68±0.08a	0.11±0.01ab	15.42±0.71a	142.33±17.62a	27.00±6.00a	0.05±0.01b	1.28±0.30a
After	FFB	5.77±0.13a	0.12±0.01a	15.57±1.51a	149.33±14.50a	26.00±5.57a	0.07±0.01a	1.26±0.12a

Table 5 Heavy metal concentrations (aqua regia digestion) of paddy soils after different fertilization treatments

Treatment	As	Cd	Cr(VI)	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	
	mg kg ⁻¹								
Before	C	0.50±0.05	ND	ND	8.47±0.28	6.62±0.34	8.01±0.68	30.98±1.64	0.02±0.00
After	C	0.40±0.15a	ND	ND	7.35±0.47a	6.23±0.33a	7.59±0.88a	33.51±2.73a	0.02±0.01a
	TF	0.51±0.16a	ND	ND	7.98±1.28a	6.10±0.99a	7.62±1.01a	34.16±4.68a	0.02±0.01a
	FFA	0.50±0.14a	ND	ND	7.65±1.41a	6.27±0.99a	7.71±1.63a	36.25±6.91a	0.02±0.01a
	FFB	0.46±0.08a	ND	ND	8.13±1.74a	6.32±0.61a	7.88±0.89a	36.99±6.29a	0.03±0.01a

**Fig. 2** (A) leaf length, (B) SPAD, (C) tiller number of rice plant

시험 처리구)에 대해 조사한 결과이다. 초장과 염색도는 C (82.5 cm, 31.2) < TF (88.5 cm, 34.2) < FFB (88.9 cm, 34.6) < FFA (89.7 cm, 35.1), 분蘖수 C (21.0개) < TF (21.4개) < FFA (22.1개) < FFB (22.9개)의 순으로 나타났다. 분蘖수의 경우 Yoon 등(2007)은 시비로 인한 영양성분의 보충은 벼의 영양생장을 왕성하게 하여 무효분蘖의 비율이 높아진다는 결과와 일치하는 것으로 판단된다. 또한 비산재의 처리는 다양한 영양원소의 공급 및 생물학적 질소고정으로 벼 등의 작물생육에 유익

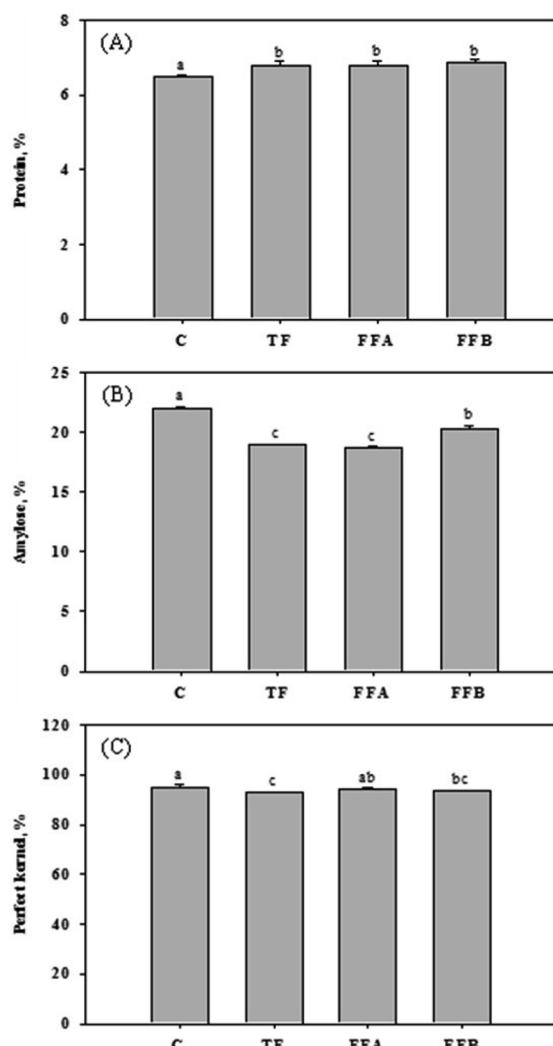
한 환경을 제공할 수 있다고 보고하는 문헌 연구와 일치하였다 (Mittra 등, 2005; Gupta 등, 2007; Pandey 등, 2009). 또한 Tripathi 등(2004)은 엽록소의 증가는 체내 단백질함량을 증가시켜 식물이 독성에 대처할 수 있는 방어 메커니즘으로 작용할 수 있다고 보고하였다. 현장시험을 통해 재배된 벼의 수량에 대한 조사 항목은 제현율(brown rice recovery), 등숙율(percent ripened grain), 천립중(thousand grain weight), 정조중(rough rice yield), 백미중(polished rice yield)에 대하여 실시하였고, 농촌진흥청의 연구조사분석기준에 준하여 평가하였다. 개량제 시비 시험결과 제현율은 대조구와 큰 차이가 없는 것으로 조사되었고, 등숙율의 경우 C (87.6%)에 비해 소폭 상승한 87.9–88.2%의 범위로 나타났다. 이는 화학비료와 개량제의 처리로 인해 토양의 영양성분 보충에 따른 결과로 판단되고, 화학비료나 미생물제제를 시비한 문헌 연구와 비슷하거나 상대적으로 높은 수준으로 나타났다(Bhuyan 등, 2006; Yoon 등, 2007). 천립중의 경우 본 연구의 처리구간 차이는 없었지만 Cho 등(2006)의 21.9–24.5 g, Choi 등(2006) 21.3–23.7 g, Lee 등(2005) 20.0–20.7 g, Yoon 등(2007) 20.4–21.7 g과 비슷하거나 높은 것으로 조사되었다. 정조중과 백미중은 대조구(597과 461 kg 10a⁻¹) 보다 개량제 처리구는 7%정도 증가한 FFA (637과 490 kg 10a⁻¹), FFB (630과 484 kg 10a⁻¹)로 조사되었고, 개량제 처리구는 관행 시비 처리구(628과 483 kg 10a⁻¹)와 비슷한 수준으로 조사되었다.

백미 품질과 영양원소 및 중금속 함량. 수확한 쌀의 품질에 관련된 분석은 단백질, 아밀로스와 완전립의 함량을 측정하였다 (Fig. 3). 단백질 함량은 무처리구(6.47%)에 비해 화학비료가 함유된 TF (6.80%), FFA (6.77%), FFB (6.87%) 처리구에서 높았으며, 이는 대조구에 비해 일정량의 질소원이 시비된 처리구에서 단백질함량이 증가한다는 Choi 등(2006)의 결과와 일치하였다. 또한 아밀로스 함량은 C (22.0%)가 TF (18.9%), FFA (18.7%), FFB (20.3%)로 단백질 함량과 음의 상관성을 보인다는 Choi 등(2006)의 결과와 일치하고, 자포니카형의 쌀은 아밀로스 함량이 20% 수준이라고 보고한 Kim 등(2001)의 결과와 일치하였다. 완전립의 경우 처리구간 큰 차이 없이 92.7–94.9%로 조사되었고, 이는 문헌 연구에서 제시된 Choi 등(2006)의 66.2–88.6% 보다 높고 Kim 등(2001)의 95.4–97.3% 보다는 낮은 함량으로 나타났다. 재배 후 쌀의 성분함량 분석결과 TF, FFA와 FFB에서 수확한 쌀에서는 CaO와 MgO의 함량은 대조구와 차이를 보이지 않았다(Table 7). 개량제가 처리된 처리구 (FFA, FFB)의 T-N, K₂O와 P₂O₅ 함량은 무처리구에 비해 증가하였고, 화학비료를 처리한 TF 처리구와 비슷한 수준의 함량을 갖는 것으로 나타났다. 이는 석탄회 자체적으로 함유한 양분이 온 및 개량제 제조에 첨가된 화학비료의 영향에 기인한 것으로 판단되고, Lee 등(2005)과 Mittra 등(2005)의 석탄회가 사용된 토양에서 수확한 작물의 N, P 및 K의 함량이 증가한다는 결과

Table 6 Harvest amount of rice grains in paddy soils

Treatment	BRR [†]	PRG [‡]	TGW [§]	RRY [¶]	PRY [#]
	%		g		kg 10a ⁻¹
C	84.0±0.3a	87.6±1.1a	23.6±0.1a	597.0±9.0a	461.0±7.0a
TF	83.6±0.4a	88.2±2.0a	23.6±0.1a	628.0±7.0b	483.0±5.0b
FFA	83.6±0.5a	87.9±3.6a	23.6±0.2a	637.0±5.0b	490.0±3.0b
FFB	83.4±0.4a	88.0±0.8a	23.6±0.3a	630.0±6.0b	484.0±3.0b

[†]Brown rice recovery, [‡]Percent ripened grain, [§]Thousand grain weight, [¶]Rough rice yield, [#]Polished rice yield

**Fig. 3** (A) protein, (B) amylose, (C) perfect kernel of rice grains

와 일치하였다. 쌀 중의 Cd, Cu, Pb 및 As 함량은 검출되지 않았고 Ni 0.9–1.0 mg kg⁻¹, Hg 0.01 mg kg⁻¹, Zn 22–24 mg kg⁻¹으로 처리구간 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 이는 논토양에 석탄회의 시용량을 증가시켜도 희석효과 및 담수조건 하에서 황화물과의 금속화합물 형성에 기인하여 무처리구 쌀 중의 중금속함량에 비해 증가하지 않는다는 문헌 연구 결과와 일치하였다(Lee 등, 2005; Hong 등, 2006).

위의 결과 및 문헌 연구 결과를 토대로 석탄회 단일 또는 비료나 개량제 형태로 제조하여 농업적으로 재활용할 경우 통계적인 유의성은 나타나지 않지만 무처리에 비해 토양의 화학적 개량 및 작물의 생육환경에 유익한 영향을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 그간 문제시되어온 석탄회에 함유된 유해중금속에 대한 문제도 비교적 안전할 것으로 판단된다.

초 록

석탄회는 B, Ca 등의 식물영양소를 함유하고 토양과 유사한 성분함량을 갖고 있어 농경지 토양의 비옥도 증가 및 개량을 위한 물질로 농업적으로 활용 가능성이 클 것으로 판단된다. 본 연구는 비산재를 과립형태로 제조하여 개량제로 시비하였을 때 논토양과 벼의 생육에 미치는 영향을 평가하였다. 시험구의 처리는 무처리구, 화학비료 처리구, 석탄회 시비구 2종으로 구성하였으며, 실제 농경지에 적용하였고, 벼 재배 후 토양의 특성변화와 농작물의 수량 및 품질을 분석하였다. 벼 재배 후 개량제를 처리한 토양의 화학적 특성은 pH, EC 및 유기물 함량이 대조구와 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 유효인산, 유효규산과 치환성 칼슘, 마그네슘의 함량은 대조구(127, 23 mg kg⁻¹; 1.18, 0.08 cmol₊ kg⁻¹)보다 증가하여 유효인산과 유효규산은 최대 149와 27 mg kg⁻¹, 치환성 양이온은 1.28과 0.11 cmol₊ kg⁻¹으로 관행시비와 비슷한 효율성을 나타냈다. 벼의 생육 측면에서 초장, 엽색도 분율수는 개량제를 처리한 처리구에서 가장 높은 것으로 나타났고, 생산량 측면에서 통계적으로 유의성은 없지만 등속률, 백미중이 개량제 처리에 따라 무비구에 비해 7% 수준 증가하였다. 또한 연구에서 사용한 화학적 첨가물을 함유

Table 7 Nutrient element and heavy metal concentrations in rice grains

Treatment	T-N	CaO	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
	g kg ⁻¹ dry weight						mg kg ⁻¹ dry weight					
C	11.1±0.7a	0.33±0.1a	2.37±0.6a	1.07±0.1a	5.37±0.3a	ND	ND	0.9±0.4a	ND	23.2±2.5a	ND	0.01±0.0a
TF	12.5±0.6a	0.33±0.1a	2.80±0.1a	1.07±0.1a	5.77±0.2a	ND	ND	0.9±0.3a	ND	22.6±1.3a	ND	0.01±0.0a
FFA	12.7±1.1a	0.33±0.1a	3.00±0.1a	1.07±0.1a	5.70±0.2a	ND	ND	1.0±0.4a	ND	21.9±1.6a	ND	0.01±0.0a
FFB	12.6±0.5a	0.33±0.1a	2.80±0.1a	1.10±0.2a	5.80±0.2a	ND	ND	1.0±0.5a	ND	24.0±1.1a	ND	0.01±0.0a

한 개량제의 처리는 백미 중의 성분함량 중 T-N, K₂O 및 P₂O₅ 함량을 증가시켰으며, 질소의 공급은 체내 단백질함량을 증가시키는데 도움을 준 것으로 나타났다. 토양 및 쌀 분석결과 유해 중금속의 함량은 대조구와 비슷한 수준으로 나타나 안전성이 검증되었다. 본 연구의 결과를 토대로 석탄회를 농업 측면에서 재활용할 경우 토양과 작물에 유익한 환경을 제공할 수 있고, 자원의 재활용 측면에서 연구가치가 높을 것으로 판단된다.

Keywords amendment · coal ash · fertilizer · paddy soil · rice

감사의 글 본 논문은 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “자원순환 및 산업에너지 기술개발보급사업” 연구 과제(No. 2010T100100611)입니다. 또한 시료분석에 사용된 분석장비는 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adriano CD and Weber JT (2001) Influence of fly ash on soil Physical properties and turfgrass establishment. *J Environ Quali* **30**, 596–601.
- Aliminor IJ (2007) Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel* **86**, 853–7.
- Bhuyan MKI, Rico CM, Mintah LO, Kim MK, Shon TK, Chung IK et al. (2006) Effects of biofertilizer on growth and yield of rice. *Korean J Crop Sci* **51**, 282–6.
- Bi YL, Li XL, Christie P, Hu ZQ, and Wong MH (2003) Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash. *Chemosphere* **50**, 863–9.
- Bulusu S, Aydilek AH, and Rustagi N (2007) CCB-based encapsulation of pyrite for remediation of acid mine drainage. *J Hazard Mater* **143**, 609–19.
- Chang AC, Lund LJ, Page AL, and Warneke (1997) Physical properties of fly ash-amended soils. *J Environ Quali* **6**, 267–70.
- Choi HC, Kim YK, Ahn SN, Moon HP, Cho SY, Shin YS et al. (1995) A new multi-disease resistant and high quality rice cultivar “Daeanbyeo”. *Korean J Breed* **27**, 448.
- Choi WY, Moon SH, Park HK, Choi MG, Kim SS, and Kim Ck (2006) Optimum planting density in low fertilizing culture of machine transplanting in rice. *Korean J Crop Sci* **51**, 379–85.
- Cho YS, Jeon WT, Park CY, Park KD, and Kang UG (2006) Study on nutrient uptake and physiological characteristics of rice by ¹⁵N and purified Si fertilization level in a transplanted pot experiment. *Korean J Crop Sci* **51**, 408–19.
- Daniels WL, Stewart B, Haering KC, and Zipper CE (2002) The potential for beneficial reuse of coal fly ash in Southwest Virginia mining environments. Virginia Cooperative Extension Publication, USA
- Gupta AK, Dwivedi S, Sinha S, Tripathi RD, Rai UN, and Singh SN (2007) Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus Vulgaris* grown in fly ash amended soil. *Bioresource Technol* **98**, 3404–7.
- Haering KC and Daniels WL (1991) Fly ash: characteristics and use in mined land reclamation-a literature review. *Virginia Coal & Energy J* **3**, 33–46.
- Haynes RJ (2009) Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites - Challenges and research needs. *J Hazard Mater* **90**, 43–53.
- Herrick BAD, Wilson GWT, and Figge DAH (1994) The influence of mycorrhizal symbiosis and fertilizer amendments on establishment of vegetation in heavy metal mine spoil. *Environ Pollut* **86**, 171–9.
- Hong CO, Lee CH, Lee H, Lee YB, and Kim PJ (2006) Evaluating possibility of heavy metal accumulation by fly ash application in rice paddy soils. *Korean J Environ Agric* **25**, 331–8.
- Iyer R (2002) The surface chemistry of leaching coal fly ash. *J Hazard Mater* **B93**, 321–9.
- Karmakar S, Mittra BN, and Ghosh BC (2010) Enriched coal ash utilization for augmenting production of rice under acid lateritic soil. *Coal Combust Gasif Prod* **2**, 45–50.
- Kim KJ, Kim SL, Song J, Son JR, Hwang HG, Shin JC et al. (2001) Physicochemical and milling characteristics of paddy rice with the harvesting times. *Korean J Soc Agric Chem Biotechnol* **44**, 179–84.
- Lee JY (2011) Assessment of bottom ash amendment on soil and turfgrass qualities in golf course. Ph.D Thesis, Kangwon national university, Korea.
- Lee YB, Ha HS, Lee CH, Lee H, Ha BH, and Kim PJ (2005) Improving rice productivity and soil quality by coal ash-phosphogypsum mixture application. *Korean J Soil Sci Fert* **38**, 45–51.
- Manoharan V, Yunusa IAM, Loganathan P, Lawrie R, Skilbeck CG, Burchett MD et al. (2010) Assessments of class F fly ashes for amelioration of soil acidity and their influence on growth and uptake of Mo and Se by canola. *Fuel* **89**, 3498–504.
- Matsi T and Keramidas VZ (1999) Fly Ash Application on Two Acid Soils and Its Effect on Soil Salinity, pH, B, P and on Ryegrass Growth and Composition. *Environ Pollut* **9**, 107–12.
- ME (Ministry of Environment) (2010) The Korean standard method of environmental pollutions for soil pollution. HMSO, Korea.
- Mittra BN, Karmakar S, Swain DK, and Ghosh BC (2005) Fly ash-a potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system. *Fuel* **84**, 1447–51.
- Pandey VC, Abhilash PC, Upadhyay RN, and Tewari DD (2009) Application of fly ash on the growth performance and translocation of toxic heavy metals within *Cajanus cajan* L.: implication for safe utilization of fly ash for agricultural production. *J Hazard Mater* **166**, 255–9.
- Patra KC, Rautray TR, and Nayak P (2012) Analysis of grains grown on fly ash treated soils. *Appl Radiat Isot* **70**, 1797–802.
- Pourkhorshidi AR, Najimi M, Parhizkar T, Jafarpour F, and Hillemeier B (2010) Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. *Cem Concr Comp* **32**, 794–800.
- Rai UN, Pandey K, Sinha S, Singh A, Saxena R, and Gupta DK (2004) Revegetating fly ash landfills with *prosopis juliflora* L.: impact of different amendments and *Rhizobium* inoculation. *Environ Int* **30**, 293–300.
- RDA (2000) Analyses of soil and plant. NIAST, Korea.
- Rios CA, Williams CD, and Roberts CL (2008) Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolite. *J Hazard Mater* **156**, 23–35.
- Roy G and Joy VC (2011) Dose-related effect of fly ash on edaphic properties in laterite cropland soil. *Ecot & Environ Safety* **74**, 769–75.
- Ryu JA, Choi CH, Kang HK, and Choi JE (2004) Gene analysis of resistance to bacterial blight, *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* in Korean six rice cultivars. *Korean J Res Plant Dis* **10**, 73–7.
- Singh SN, Kulshreshtha K, and Ahmad KJ (1997) Impact of Fly Ash Soil Amendment on Seed Germination, Seeding Growth and Metal Composition of *Vicia Faba* L.. *Ecol Eng* **9**, 203–8.
- Thind HS, Singh Y, Singh B, Singh V, Sharma S, Vashistha M et al. (2012) Land application of rice husk ash, bagasse ash and coal fly ash: effects on crop productivity and nutrient uptake in rice-wheat system on an alkaline loamy sand. *Field Crop Res* **135**, 137–44.
- Tripathi RD, Vajpayee P, Singh N, Rai UN, Kumar A, Ali MB et al. (2004) Efficacy of various amendments for amelioration of fly ash toxicity: growth performance and metal composition of *Cassia siamea* Lamk. *Chemosphere* **54**, 1581°C8.
- Yeheyis MB, Shang JQ, and Yanful EK (2009) Long-term evaluation of coal fly ash and mine tailings co-placement: a site-specific study. *J Environ Manage* **91**, 237–44.
- Yoon ST, Park SH, and Kim YW (2007) Study on environment-friendly rice production system by use of effective microorganism. *Korean J Org Agr* **15**, 207–18.
- Ziemkiewicz PF and Skousen J (2000) Use of coal combustion products for reclamation. *Greenland* **30**, 36–47.