

토양개량제로서 가축분연소바닥재의 처리에 의한 퍼레니얼 라이그래스의 생육 특성

김영선*, 임승재

Growth of Perennial Ryegrass in the Root Zone Blending with Bottom Ash Produced after Combusting Dry Livestock Manure as Soil Amendment

Young-Sun Kim * and Seung-Jae Lim

대구대학교 원예학과

Department of Horticultural Science, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

* Correspondence: im0sunkim@daegu.ac.kr

Abstract: This study was conducted to evaluate the effects on growth and turfgrass quality of perennial ryegrass in the sandy soil blended with bottom ash produced after combusting dry livestock manure (BAL). Treatments were designed as follows; No-fertilizer (NF, 100% sand), Control [3 N active ingredient (a.i.) g/m², 100% sand], 3%BAL (3N a.i. g/m², 3%BAL+97% sand), 5% BAL (3N a.i. g/m², 5%BAL+95% sand), 7% BAL (3N a.i. g/m², 7%BAL+93% sand) and 10% BAL (3N a.i. g/m², 10%BAL+90% sand). Compared to NF and the control, BAL treatments increased soil pH, electrical conductivity (EC), available phosphate (Av-P₂O₅), and exchangeable potassium (Ex-K). There were no significant differences in turf color index, chlorophyll content, shoot length, clipping yield, or shoot dry weight between BAL treatments and the control. However, root dry weight, P and K concentrations, and nutrient uptake were higher in the BAL treatments compared to the control. The BAL application rate was positively correlated with root growth and nutrient uptake ($p \leq 0.05$). These results indicated that the application of BAL as a soil amendment improved root growth and nutrient uptake by supplying phosphate and potassium in the sandy soil.

Keywords: Bottom ash, Nutrient uptake of root, Perennial ryegrass, Root growth, Soil amendment

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.07>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 72-81

Received: July 31, 2024

Revised: August 7, 2024

Accepted: August 13, 2024

Published: August 27, 2024

Online ISSN: 1233-4173

Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 언

삶의 질의 향상으로 육류소비가 증가하면서 가축사육두수가 증가하고 있으며, 이와 더불어 가축분뇨 발생량도 증가하고 있다. 2021년 환경부 조사에 따르면 한우, 양돈 및 가금류가 각각 360만 두, 1,196만 두 및 21,826만 두 정도이며, 국내 가축분뇨 발생량은 5,189만 톤으로 추산된다. 가축분뇨의 처리 형태는 자가처리와 위탁처리가 각각 80.5%와 19.5%를 나타내어 자가 처리비율이 높고, 그중에서도 퇴

비화가 70.6%로 가장 높고, 액비화가 4.7%를 나타내어 2021년 자원재활용화 비율은 약 75.3% 정도를 나타냈다.

가축분뇨의 자원화 중 가장 높은 비율을 차지하는 퇴비는 식물 안전성을 확인한 후 작물 재배에 이용한다[1]. 가축분퇴비는 가축분의 종류에 따라 다소 차이는 있으나 퇴비화 후 질소 함량에 비해 인산 함량이 상대적으로 높게 나타나며, 식물생장 주요 성분인 질소를 기준으로 시비하는 경우 토양 내 유효인산이 증가하기도 한다[2]. 퇴비는 양분 공급 능력 외에도 토양 내 유기물을 공급하여 토양 공극을 개선함으로써 작물의 지하부 생육을 개선하는 것으로 잘 알려져 있다[3]. 농경지에서 퇴비의 사용은 토양의 물리화학적 특성을 개선하고, 작물 생육에 필요한 양분을 공급한다는 긍정적인 측면도 있으나 과도한 사용은 토양 내 유기물과 인산 함량을 증대시키는 원인이 된다[4]. 비록 단기간 동안의 연구에서 침출수에 의한 토양 및 지하수의 오염은 확인하기 어려웠으나 토양 표면에서 인산 함량이 증대될 수 있었고[4], 이는 토양 침식에 의해 수계로 유입되는 경우 2차 환경오염의 원인이 될 수 있으므로 농경지 사용에서 주의가 필요하다[5].

퇴비는 대부분 수분과 유기물로 이뤄져 있어 토양 내 유기물 공급 능력이 우수한 것이 특징이지만 퇴비화 과정이나 토양 처리 후 온실가스를 배출하므로 가축분의 새로운 자원화 방안이 요구되고 있다[6,7]. 가축분의 새로운 자원화 방안으로 가축분바이오차를 생산하여 농업 활동에서 발생한 탄소원을 토양에 격리하거나[8] 퇴비를 건조하여 농업용 난방 연료로 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다[9]. 축성재배를 이용한 과채류의 시설재배 시 동절기 보온 및 난방 등의 조치가 필요하며, 농가의 농산물 생산비를 절감하기 위해서는 난방 에너지 비용을 낮추는 것이 중요하다[10]. 가축분 및 가축분퇴비를 난방 연료로 이용하는 것은 농가에 축열장치를 통해 재배시설 내 난방에너지로 이용할 수 있다[11]. 일반적으로 농가에서 사용하는 화목보일러의 난방 연료는 목재펠릿이나[12], 최근에는 가축분을 연료로 활용하는 연구가 진행되었고, 가축분은 유기성 질소원(단백질원)을 포함하고 있어 연소과정에서 질산화물과 황산화물들이 발생하기 때문에 탈질 및 탈황 시설이 필요하다[13]. 정화 과정을 거친 연소배가스는 주로 이산화탄소로 구성되므로[13] 시설 내부로 재순환하는 경우 동절기 환기 불량으로 대기 중 부족할 수 있는 이산화탄소를 시비함으로써 작물의 생육과 품질을 개선시킬 수 있다[14,15]. 가축분을 농업용 고형연료로 활용하는 기술은 가축분을 처리하고 자원화하는 새로운 기술이지만 연소 과정에서도 가축분바닥재와 비산재 및 산화물 등이 폐기물로 발생하므로 이들에 대한 자원화 기술 연구가 필요하다.

연소과정에서 가장 많이 발생하는 부산물인 바닥재의 자원화 연구는 석탄발전소에서 발생하는 바닥재를 자원화하는 방안을 중심으로 진행되었다. 석탄바닥재의 주요 성분은 산화규산과 산화알루미늄 등으로 시멘트와 유사한 특성을 나타내기 때문에 인공경량골조를 제조하는 연구가 수행되었다[16]. 또한, 석탄바닥재는 토양의 화학적 구성과 유사하므로 농업적 활용에 대한 연구가 진행되었고, 대표적인 연구로서 골프장의 토양개량제로 활용하거나[17] 토양 중에서 미생물 담체로서 활용하기 위한 연구[18] 등이 진행된 바 있다. 하지만 가축분의 연소과정에서 발생하는 가축분바닥재에 대한 연구는 거의 진행된 바 없으며, 가축분을 난방연료로 사용하기 위해서는 가축분바닥재의 특성을 파악하고 자원화를 위한 연구가 필요하다. 특히, 골프장의 잔디는 스포츠시설이나 공원 등에서 사용하는 대표적인 지피식물로서[19] 식재 후에는 경운이나 쇄토 등을 통한 토양 물리성 개량이 어려우므로 생육과 품질이 유지되고 답압 피해를 줄이기 위해 모래토양에 식재하고 있으며[20], 토양개량제를 처리하여 모래토양의 물리화학적 특성을 개선하고 있다[20]. 따라서 본 연구는 가축분바닥재를 토양개량제로 처리한 모래토양에서 퍼레니얼 라이그래스(*Lolium perenne* L.)의 초기생육 및 품질의 변화를 조사하여 토양개량제로서의 활용가능성을 조사하고 수행하였다.

재료 및 방법

공시 재료

본 연구는 대구대학교 부속농장에 위치한 유리온실에서 2023년 9월부터 2024년 3월까지 약 7개월 동안 수행되었다. 공시 잔디는 퍼레니얼 라이그래스(*L. perenne* L.)를 이용하였고, 품종은 'Gray Fox'을 A사로부터 공여받아 사용하였고, 공시 토양은 미국골프협회(United State Golf Association; USGA)의 모래 입경분포 규격에 적합한 모래를 사용하였다(Table 1). 공시 비료는 복합비료(compound fertilizer; CF, N-P₂O₅-K₂O=21-17-17, Namhae Chemical Co., Ltd., Yeosu, Korea)를 이용하였다. 가축분바닥재(bottom ash produced after combusting dry livestock manure; BAL)는 경북 청송군 소재의 파프리카(*Capsicum annuum* L. var. *angulosum*) 농장으로 부터 공여받아 사용하였으며, 이화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1. Particle size distribution of sand used in this study

Item	Particle size (mm)						
	> 4.00	2.00~4.00	1.00~2.00	0.50~1.00	0.25~0.50	0.15~0.25	0.15~0.053
Sand	0%	19.3%	38.4%	28.7%	9.2%	3.7%	0.7%
USGA standard	0%	10% below	60% over		20% over		10% below

USGA: United States Golf Association

Table 2. Physicochemical properties of BAL

pH	EC	CEC	Bulk density	T-N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O
(1:5)	(dS/m)	(cmol _c /kg)	(g/cm ³)		(g/kg)	
10.03	10.12	1.15	0.91	0.1	141	27.9

BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure, and its particle size was 2.0-4.0 mm.

처리구 설정

시험 처리구는 BAL 처리량에 따라 무처리구(No-fertilizer, 100% sand), 대조구(Control, 100% sand), 3% BAL 처리구(3%BAL; 3%BAL+97% sand), 5% BAL 처리구(5%BAL; 5%BAL+95% sand), 7% BAL 처리구(7%BAL; 7%BAL+93% sand) 및 10% BAL 처리구(10%BAL; 10%BAL+90% sand)로 설정하였다. BAL 처리구별 모래상토를 혼합 후 시험용 플라스틱 포트[직경 12.7 cm (5인치), 깊이 13 cm]에 공시 모래를 충전한 후 수돗물을 관수하여 물다짐 후 중력수를 제거하고 페레니얼 라이그래스 종자 40 g/m²를 2023년 9월 23일에 종자를 파종하여 약 50일 동안 관리하였다. 생육 기간 중 잔디 생육에 필요한 양분을 공급하기 위해 CF (3N a.i. g/m²)를 수돗물로 희석하여 희석액 1,000 mL/m²를 휴대용 압축 분무기(Trigger sprayer 700, Apollo Industrial Co., Ltd., Siheung, Korea)를 이용하여 경엽에 관주시비하였으며, 완전임의배치법 5반복으로 처리구를 배치하였다. 비료의 시비는 11월 10일(파종 후 49일 경과), 12월 8일(파종 후 77일 경과), 1월 12일(파종 후 112일 경과), 2월 9일(파종 후 140일 경과)에 총 4회 처리하였다. 시험 기간 동안 병해충은 발생하지 않아 살충제 및 살균제 처리하지 않았고, 잔디 생육 정도를 고려하여 매일 1~2회 관수하였다. 재배 기간 중 평균 온도 범위는 10~32°C였고, 70~80%의 상대습도를 나타냈다.

조사 내용

잔디 생육 조사는 엽색지수, 엽록소 함량, 초장 및 예지물을 조사하였다. 엽색지수는 turf color meter (TCM 500, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA)을 이용하여 11월 10일부터 1주 간격으로 총 17회 조사하였고, 월별로 평균하였다. 잔디 초장, 예지물 및 엽록소 함량은 시비 후 4주 간격으로 총 5회 조사하였고, 분석 및 조사를 위해 지표면으로부터 30 mm 높이로 소독된 가위를 이용하여 잔디 예지물은 채취하였다. 채취된 잔디 경엽 중 일부를 Kim and Kim [21]의 방법으로 엽록소 함량을 분석하였고, 나머지 예지물은 70°C 건조기(Thermostable OF-W155, Daihan Scientific Co., Ltd., Wonju, Korea)에서 48시간 건조하여 건물중을 조사하였다. 시험 종료 후 BAL 처리 후 잔디의 지상부와 지하부 생육을 조사하기 위해 2024년 3월 13일 포트에서 잔디 시료를 채취하였고, 흐르는 수돗물로 세척하여 이물질을 제거한 후 식물체를 70°C 건조기에서 48시간 건조하여 건물중을 조사하였다.

비료 처리 후 토양 분석은 시험 전(9월 1일)과 시험 종료 후(3월 13일)에 채취된 토양 시료를 음지에서 풍건한 후 2 mm 체를 통과시킨 후 실시하였다. 토양화학성은 토양 산도(pH), 전기전도도(electrical conductivity, EC), 유기물(organic matter, OM), 전질소(total nitrogen, T-N), 유효인산(available phosphate, Av-P₂O₅), 치환성 칼륨(exchangeable potassium, Ex-K) 등을 농촌진흥청의 토양화학분석법에 준하여 분석하였다. 잔디 식물체 분석을 위해 전 생육 기간 동안 수집된 예지물을 혼합하여 분석에 이용하였다. 잔디 식물체 중 함유된 양분의 농도는 잔디 건물중(0.2 g)을 Kjeldahl법(황산 20 mL과 과염소산 1 mL 첨가)으로 분해하여 질소, 인 및 칼륨을 농촌진흥청의 식물체분석법에 준하여 실시하였다. 질소는 Kjeldahl 증류법으로, 인은 바나드몰리브덴산법으로, 칼륨은 원자흡광법으로 각각 분석하였다. 건물중과 잔디 식물체 분석 결과를 이용하여 잔디 조직 중 흡수된 양분량을 산정하였다.

통계분석

통계 처리는 SPSS (ver. 27, IBM, NY, USA)를 이용하여 Duncan 다중검정을 통해 처리구간 평균값과 상관관계의 유의차를 검정하였다.

결과 및 고찰

토양화학성 분석 결과

BAL 처리 전과 후 토양화학성의 변화를 조사하였다(Table 3). 시험 전과 후의 토양 분석 결과 NF와 대조구는 pH가 증가하여 시험 전과 후의 잔디 생육에 따른 토양 산도의 변화를 제외하고 토양화학성의 변화는 나타나지 않았다. 토양 pH는 시비나 토양 환경의 변화에 의해 나타나기 때문으로 판단된다[22]. 시험 종료 후 NF나 대조구와 비교할 때, BAL 처리구는 pH, EC, Av-P₂O₅ 및 Ex-K에서 증가하였고, BAL 처리량과 정의 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). 이는 일반적으로 바닥재가 알칼리성을 나타내며 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 및 아연 등을 다량으로 함유하고 있기 때문으로[18] 본 연구에서도 BAL의 pH가 알칼리성을 나타내고 EC, T-P₂O₅ 및 T-K₂O 함량이 높았기 때문으로 판단된다(Table 2). 토양 중 Av-P₂O₅은 pH 변화 및 시비에 따라 철(Fe)이나 알루미늄(Al) 및 칼슘(Ca) 등과 결합하여 불용화되기도 하므로 BAL을 토양개량제로 처리하는 경우 지속적인 모니터링이 필요하다[23]. 특히, 골프장은 설계 시 토양에서 배수되는 수분이 연못으로 집수되므로 인산의 용탈에 의해 연못물이 부영양화되기도 하므로 토양 뿐 아니라 수질의 모니터링도 필요하다[17,24].

잔디 생육 및 품질 변화

BAL을 토양개량제로 처리 후 시기별 퍼레니얼 라이그래스의 엽색지수를 조사하였다(Table 4). NF는 시험 기간 동안 시비가 진행되지 않아 생육이 불량하였고 엽색지수는 점차 감소하였다. 비료의 시비가 수행된 BAL 처리구 및 대조구는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않아 BAL 처리가 퍼레니얼 라이그래스의 생육장해는 발생하지 않는 것으로 판단되었다. BAL 처리량과 엽색지수의 상관관계 조사에서 통계적 유의차를 나타내지 않아 토양개량제로서 BAL의 처리가 엽색지수와 같은 잔디 품질에 미치는 영향은 미미하였다.

BAL 처리 후 퍼레니얼 라이그래스에서 엽록소 함량(chlorophyll a+b)은 731~1,554 µg/g의 범위를 나타냈다(Table 5). NF는 1월 12일까지 총 3회만 예지물이 채취되어 분석되었고, 2월 9일과 3월 13일 조사에서는 3 cm 이상의 예지물을 수거할 수 없어

Table 3. The chemical properties of soil blending BAL in the perennial ryegrass

Treatments ¹⁾	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (%)	T-N	Av-P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex-K (cmol _c /kg)	CEC
Before	7.45c ²⁾	0.23b	0.60a	0.006a	39e	0.10f	1.34a
NF	7.54b	0.24b	0.60a	0.008a	39e	0.10f	1.40a
Control	7.55b	0.26b	0.57a	0.010a	57e	0.12e	1.44a
3% BAL	7.60b	0.30a	0.60a	0.011a	204d	0.21d	1.45a
5% BAL	7.61b	0.31a	0.60a	0.010a	276c	0.27c	1.41a
7% BAL	7.73a	0.32a	0.59a	0.011a	352b	0.29b	1.47a
10% BAL	7.79a	0.31a	0.60a	0.011a	417a	0.34a	1.45a
Correlation ³⁾	0.9197**	0.6697*	0.0827 ^{NS}	0.2750 ^{NS}	0.9824**	0.9771**	0.0949 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF (v/v), 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs).

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS, * and ** represent not significance, a significance at the 0.05 and 0.01 probability level by correlation coefficient between blending ratio of BAL and soil chemical factor, respectively.

Table 4. Turf color index of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	November	December	January	February	March	Mean
NF	5.97b ²⁾	5.44b	4.85b	4.45b	4.19b	4.99a
Control	6.17a	6.46a	6.68a	6.65a	6.18a	6.46a
3% BAL	6.14a	6.45a	6.67a	6.66a	6.28a	6.46a
5% BAL	6.20a	6.42a	6.66a	6.60a	6.26a	6.45a
7% BAL	6.16a	6.51a	6.63a	6.67a	6.31a	6.48a
10% BAL	6.17a	6.48a	6.66a	6.61a	6.22a	6.46a
Correlation ³⁾	0.0305 ^{NS}	0.1864 ^{NS}	-0.2512 ^{NS}	-0.2172 ^{NS}	0.1710 ^{NS}	0.0582 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs).

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS represents not significance by correlation coefficient between blending ratio of BAL and turf color index, respectively.

Table 5. Chlorophyll (a+b) content of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	Nov 10	Dec 8	Jan 12	Feb 9	Mar 13
	(µg/g in the fresh weight)				
NF	799b ²⁾	758b	731b	-	-
Control	873a	944a	1,383a	1,554a	1,462a
3% BAL	871a	923a	1,335a	1,498a	1,390a
5% BAL	887a	958a	1,343a	1,488a	1,394a
7% BAL	885a	927a	1,339a	1,502a	1,421a
10% BAL	876a	930a	1,370a	1,511a	1,398a
Correlation ³⁾	0.0752 ^{NS}	-0.1037 ^{NS}	-0.0779 ^{NS}	-0.3826 ^{NS}	0.3730 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the perennial ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs).

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS represents not significance by correlation coefficient between blending ratio of BAL and chlorophyll content, respectively.

분석할 수 없었다. NF와 비교할 때 대조구 및 BAL 처리구의 엽록소 함량이 증가하였고, 대조구와 비교할 때 BAL 처리구들은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BAL 처리량과 엽록소 함량과의 상관관계는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 일반적으로 엽록소 함량은 주요 구성 원소인 질소의 공급 및 흡수에 의해 영향을 받기 때문으로[25] 본 연구에 사용한 BAL은 가축분의 연소 과정에서 분해된 질소 성분들이 연소배가스로 손실되어 BAL 중 질소 성분이 거의 없었기 때문에 (Table 2) 식물체 중 엽록소 함량 변화에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다[26].

BAL을 토양개량제로 처리한 퍼레니얼 라이그래스에서 시비 30일 경과 후 초장의 변화를 조사하였다(Table 6). BAL 처리구들은 NF보다 초장이 증가하였고, 대조구와는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. NF는 11월 10일, 12월 8일 및 1월 12일 조사에서는 3 cm 이상으로 예지물이 있었으나 2월 9일과 3월 13일에는 3 cm 미만으로 채취가 어려웠다. BAL 처리량과 잔디 초장 간 상관관계에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않아 BAL의 처리 후 토양개량이 잔디 경엽의 신장에 미치는 영향은 미미하였다.

BAL을 토양개량제로 처리 후 퍼레니얼 라이그래스의 예지물량을 조사한 결과 7.1~156.7 g/m²를 나타냈다(Table 7). BAL 처리구들은 NF보다 예지물량이 증가했고, 대조구와는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BAL 처리량과 예지물량과의 상관관계 조사에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 이는 잔디의 지상부 생육이 질소의 시비 및 흡수에 주로 영향을 받기 때문이며[27], 인산과 칼륨의 영향은 미미하기 때문이다[28]. BAL은 인산과 칼륨을 함유하는 물질로서 잔디 생육에 필요한 주요 성분이나 인산과 칼륨의 흡수에 영향을 주는 비료 성분은 질소이기 때문으로 알려져 있다[28]. 잔디는 생장점이

Table 6. Shoot length of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	Nov 10	Dec 8	Jan 12	Feb 9	Mar 13
	(cm)				
NF	4.43b ²⁾	3.40b	3.23b	2.92b	2.96b
Control	5.56a	6.07a	9.86a	8.87a	7.03a
3% BAL	5.57a	5.86a	9.58a	8.65a	7.09a
5% BAL	5.55a	6.14a	9.74a	8.54a	7.13a
7% BAL	5.57a	5.89a	9.76a	8.67a	7.05a
10% BAL	5.54a	6.02a	9.74a	8.27a	7.13a
Correlation ³⁾	-0.0797 ^{NS}	-0.0358 ^{NS}	-0.0496 ^{NS}	-0.4701 ^{NS}	0.2087 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the perennial ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs).

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS represents not significance by correlation coefficient between blending ratio of BAL and shoot length, respectively.

Table 7. Clipping yield of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	Nov 10	Dec 8	Jan 12	Feb 9	Mar 13	Total
	(g/m ²)					
NF	4.0b ²⁾	2.1b	1.1b	-	-	7.1b
Control	16.6a	17.6a	36.1a	41.9a	39.8a	151.9a
3% BAL	22.6a	18.7a	35.3a	40.3a	44.5a	156.2a
5% BAL	20.3a	20.3a	41.1a	35.6a	48.7a	156.7a
7% BAL	17.9a	15.8a	31.6a	37.7a	45.6a	155.1a
10% BAL	17.6a	16.1a	24.5a	33.7a	38.7a	151.9a
Correlation ³⁾	-0.0690 ^{NS}	-0.1924 ^{NS}	-0.3790 ^{NS}	-0.3076 ^{NS}	-0.0295 ^{NS}	-0.0121 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the perennial ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs).

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS represents not significance by correlation coefficient between blending ratio of BAL and clipping yield, respectively.

근권부에 존재하는 단축경 식물이므로 잔디 생육 정도를 나타내는 예지물량은 경엽의 신장 정도와 비례하고 있으며[21], 본 연구에서도 잔디 총예지물과 평균 초장은 정의 상관관계를 나타낸다($r=0.9767^{**}$, $p \leq 0.01$).

시험 종료 후 퍼레니얼 라이그래스의 지상부와 지하부 생육 조사 결과, 각각 91.5~260.8 g/m²와 175.7~363.5 g/m²를 나타냈다(Table 8). NF와 비교할 때, BAL 처리구의 지상부와 지하부의 생육은 증가했고, 대조구와 비교할 때 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BAL 처리량과 지상부 및 지하부의 생육을 비교할 때, 지상부는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았고, 지하부는 정의 상관관계를 나타냈다($p \leq 0.05$). 이는 BAL의 입자가 2~4 mm로 토양개량제로 처리 시 토양 내 공극을 개선함으로써 잔디 뿌리 생육이 개선된 것으로 판단된다[29]. 또한, 잔디의 지하부 생육에 있어 인산과 칼륨의 공급은 뿌리 생장과 밀접한 관계를 나타내는 것으로 알려져 있으며[30], 본 연구에서도 인산과 칼륨 함량이 높은 BAL를 토양개량제로 처리하는 경우 잔디의 지하부 생장이 증대되었다(Table 8). 잔디 지하부 생육은 양·수분의 흡수와 밀접한 관계가 있으므로 장기간 조사하는 경우 잔디의 지상부 생육도 향상될 것으로 판단된다[29]. 잔디 뿌리의 생육은 토양 공극 개선에 의해서도 생장이 증대될 수 있으며[30] 2~4 mm 입경의 BAL를 처리한 모래토양에서 모세관 공극이 증대되어 토양 중 유효수분이 증대되었다(자료는 제시하지 않음).

BAL 처리 후 퍼레니얼 라이그래스의 지상부와 지하부의 양분 함량 및 흡수를 조사하였다(Table 9). BAL 처리구들의 지상부 경엽 중 함유된 질소, 인 및 칼륨 함량은 각각 2.57~3.85%, 0.12~0.14%, 0.74~1.06%를 나타냈고, BAL 처리량과 양분 함량은

Table 8. The dry weight of shoot and root of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	Shoot	Root	T/R ratio
	dry weight g/m ²		(g/g)
NF	91.5b ²⁾	175.7c	0.52b
Control	256.0a	330.6b	0.78a
3% BAL	255.2a	340.2b	0.75a
5% BAL	254.4a	359.5a	0.71a
7% BAL	257.6a	361.1a	0.71a
10% BAL	260.8a	363.5a	0.72a
Correlation ³⁾	0.0479 ^{NS}	0.7739*	-0.2353 ^{NS}

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. The dry weight of shoot root of the perennial ryegrass was investigated on March 15, 2024. CF in the perennial ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs). It was sampled on March 13, 2024 for measuring dry weight of shoot and root of turfgrass.

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS and * represent not significance and a significance at the 0.05 probability level by correlation coefficient between blending ratio of BAL and dry weight of shoot and root, respectively.

Table 9. The nutrient content and uptake of the shoot and root of the perennial ryegrass grown in the soil blending BAL

Treatments ¹⁾	Nutrient content (%)			Nutrient uptake (g/m ²)			
	N	P	K	N	P	K	
Shoot	NF	2.57b ²⁾	0.12a	0.74b	2.49	0.01	0.05
	Control	3.62a	0.13a	1.02a	13.96	0.19	1.55
	3% BAL	3.73a	0.13a	0.98a	14.50	0.20	1.53
	5% BAL	3.62a	0.13a	1.02a	15.17	0.20	1.60
	7% BAL	3.85a	0.14a	1.04a	15.97	0.21	1.62
	10% BAL	3.62a	0.14a	1.06a	14.05	0.21	1.61
	Correlation ³⁾	0.0785 ^{NS}	0.2746 ^{NS}	0.3193 ^{NS}	0.1094 ^{NS}	0.2085 ^{NS}	0.1819 ^{NS}
Root	NF	2.10a ²⁾	0.12b	0.92b	3.63	0.20	1.58
	Control	2.45a	0.13b	0.95b	7.59	0.41	3.11
	3% BAL	2.33a	0.17ab	0.95b	7.99	0.55	3.11
	5% BAL	2.33a	0.18ab	1.01ab	8.24	0.63	3.58
	7% BAL	2.33a	0.20a	1.00ab	8.31	0.72	3.57
	10% BAL	2.45a	0.22a	1.12a	8.76	0.80	4.00
	Correlation ³⁾	0.1468 ^{NS}	0.7307**	0.6892*	0.6387**	0.7905**	0.7663**

¹⁾Treatments were as follows. NF: No-fertilizer in 100% sand; Control: 100% sand applying compound fertilizer (CF, 3N g/m²); 3%BAL: 3%BAL+97% sand applying CF, 5%BAL: 5%BAL+95% sand applying CF; 7%BAL: 7%BAL+93% sand applying CF; 10%BAL: 10%BAL+90% sand applying CF. BAL means a bottom ash produced after combusting dry livestock manure. CF in the perennial ryegrass pot was supplied on November 10 (49 DASs; days after seeding), December 8 (77 DASs), January 12 (112 DASs), and February 9 (140 DASs). Leaves and root of turfgrass to analyzing N, P, and K were sampled on March 13, 2024.

²⁾Means with same letters within column are not significantly different by Duncan's multiple range test $p \leq 0.05$ level.

³⁾NS, * and ** represent not significance, a significance at the 0.05 and 0.01 probability level by correlation coefficient between blending ratio of BAL and nutrient content or nutrient uptake, respectively.

통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BAL 처리 후 경엽으로 흡수된 질소, 인 및 칼륨의 흡수량은 각각 2.49~15.97 g/m², 0.01~0.21 g/m², 0.05~1.62 g/m²를 나타냈고, BAL 처리량과 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다.

BAL 처리 후 뿌리에서 질소, 인 및 칼륨의 함량은 각각 2.10~2.45%, 0.12~0.22%, 0.92~1.12%를 나타냈고, 뿌리 조직 내 인과 칼륨은 BAL 처리량과 정의 상관관계를 나타냈다($p \leq 0.05$). BAL 처리구의 뿌리 중 질소 함량은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았고, 인은 7%와 10% BAL 처리구에서, 칼륨은 10% BAL 처리에서 대조구보다 양분 함량이 증가하였다. BAL 처리량과 뿌리 중 질소, 인 및 칼륨의 흡수량은 각각 3.63~8.76 g/m², 0.20~0.80 g/m², 1.58~4.00 g/m²를 나타냈고, BAL 처리량과

질소, 인 및 칼륨의 흡수량은 정의 상관관계를 나타냈다($p \leq 0.01$). BAL 처리 후 퍼레니얼 라이그래스의 지하부 생육과 뿌리 중 인과 칼륨의 함량은 정의 상관관계를 나타내어($r_p=0.5867^{**}$, $p \leq 0.01$; $r_k=0.5426^*$, $p \leq 0.05$) BAL 내 인산과 칼리가 토양에 공급되어 뿌리로 흡수된 것으로 판단된다(Tables 2, 3). 토양 중 인산과 칼륨의 함량은 식물의 뿌리 성장을 개선하지만[31], 잔디의 지상부 생육은 미미한 것으로 알려져 있다[28]. 본 연구에서도 인산과 칼리의 함량이 높았던 BAL의 처리는 퍼레니얼 라이그래스의 지상부 생육이나 품질에 미치는 영향은 미미하였고, 지하부의 생육이 증대되었다. 이는 잔디의 지상부 성장과 품질은 주로 질소의 흡수에 의해 영향을 받기 때문이며[28], 본 연구에서는 처리구별 질소 시비량이 동일했기 때문으로 판단된다.

상기 결과들을 종합할 때, BAL (2~4 mm 입경)은 토양의 공극 개선으로 잔디 뿌리의 초기 생육을 촉진하여 토양개량제로 활용할 수 있으며, 토양개량제로 처리 시 토양 내에서 인산과 칼륨원으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, BAL은 가축분을 연소한 것으로서 계절의 변화에 따라 주요 성분이나 유해중금속의 함량이 변화하며[32], 유해중금속 중 구리와 아연은 가축용 사료에도 포함되어 있어[33] 가축분에서 함량이 증대될 수 있다[32]. 특히, 가축분을 연료로 사용하는 경우 연소과정에서 수분과 유기물이 소실되어 BAL 중 구리와 아연의 함량은 증대될 수 있으므로 BAL의 이화학적 특성 조사 및 비료공정규격에 대한 검토가 필요하다. 또한, BAL 중 인산 함량이 높으므로(Table 2) 토양개량제로 처리 시 토양 내 인산 축적이나 기타 토양이나 주변 환경오염에 관한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 가축분바닥재(BAL)를 토양개량제로 처리한 모래토양에서 퍼레니얼 라이그래스의 생육과 품질에 미치는 영향을 조사하고자 수행하였다. 처리구는 BAL 처리량에 따라 무처리구(No-fertilizer, 100% sand), 대조구(Control, 100% sand), 3% BAL 처리구(3%BAL; 3%BAL+97% sand), 5% BAL 처리구(5%BAL; 5%BAL+95% sand), 7% BAL 처리구(7%BAL; 7%BAL+93% sand) 및 10% BAL 처리구(10%BAL; 10%BAL+90% sand)로 설정하였다. 토양화학성 분석 결과, BAL 처리구는 pH, EC, Av-P₂O₅ 및 Ex-K가 대조구보다 증가하였다. 대조구와 비교할 때 BAL 처리구의 엽색지수, 엽록소 함량, 초장, 예지물량 및 지상부 건물중 등은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BAL 처리구의 지하부에서 건물중, 인과 칼륨 농도 및 양분 흡수가 증대되었다. BAL 처리량과 퍼레니얼 라이그래스의 뿌리 생육 및 지하부 양분 흡수는 정의 상관관계를 나타냈다($p \leq 0.05$). 상기 결과를 종합할 때, BAL의 토양개량제로 처리 시 토양 내 인산과 칼륨의 공급으로 잔디 뿌리의 양분 흡수 및 생육이 증대되는 것을 확인하였다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: Y.-S. Kim conceived and designed the research, led the growth experiment and wrote the first manuscript, provide critical feedback, and revised the manuscript; S.-J. Lim performed the statistical analysis and collected the data.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment: This research was supported by Korea Electric Power Corporation (Grant No. R23XO05-4).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.07>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Young-Sun Kim.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Oh TS, Kim CH (2009) Composting methods for pig sludge and the stabilized investigation of crop cultivation. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science*, 29(1), 51-62.
2. Chang KW, Cho SH, Kwak JH (1999) Changes of soil physico-chemical properties by repeated application of chicken and pig manure compost. *Journal of the Korea Organic Waste Recycling Council*, 7(1), 23-30.
3. Kim YS, Kim BT (2007) Effect of food-waste and poultry manure compost on the growth of young radish and the change of soil properties. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 15(1), 159-170.
4. Kwon SI, So KH, Hong SG, Kim GY, Lee JT, Seong KS, Kim KR, Lee DB, Jung KY (2009) The effect of continuous application of the food waste composts on the paddy field environment. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 17(3), 55-70.
5. Issaka S, Ashraf MA (2017) Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>.
6. Park CH, Yoon TH, Kim JH (2001) Measurement emission of greenhouse gases from composting process for pig slurry. *Journal of Livestock Housing and Environment*, 7(2), 111-118.
7. Choi MK, Yun SW, Yoon YC (2021) Greenhouse gases in compound fertilizer and livestock manure compost for crops cultivation. *Journal of Bio-environment Control*, 30(2), 95-100. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2021.30.2.095>.
8. Park DG, Lee JM, Choi EJ, Gwon HS (2022) Carbon mineralization in different soils cooperated with barely straw and livestock manure compost biochars. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 30(4), 67-83. <https://doi.org/10.17137/korrae.2022.30.4.67>.
9. Jeong KH, Lee DJ, Lee DH, Lee SH (2019) Combustion characteristic cow manure pellet as a solid fuel source. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 27(2), 31-40. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.2.31>.
10. Kwon JK, Kang SW, Paek Y, Moon JP, Jang JK, Oh SS (2019) Effects of local cooling and root pruning on budding and local heating on heating energy consumption in forcing cultivation of strawberry. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 28(1), 46-54. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2019.28.1.46>.
11. Jang ES, Song E, Yoon J, Kim YM (2020) Kinetic analysis for the pyrolysis of solid refuse fuel using livestock manure. *Applied Chemistry for Engineering*, 31(4), 443-451. <https://doi.org/10.14478/ace.2020.1047>.
12. Sh L, Kim SI, Lim H, Lee BH, Kim SM, Jeon CH (2016) Experimental investigation into the combustion characteristics on the co-firing of biomass with coal as a function of particle size blending ratio. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 40(1), 31-37. <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.1.031>.
13. Moon JH, Ryu KH (2023) Economic and environmental sustainability assessment of livestock manure gasification for fuel gas production. *Applied Chemistry for Engineering*, 34(3), 291-298. <https://doi.org/10.14478/ace.2023.1033>.
14. Kang YI, Lee SY, Kim HJ, Chun H, Jeong BR (2007) Effects of CO₂ enrichment concentration and duration on growth of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Bio-Environmental Control*, 16(4), 352-357.
15. Woo YH, Kim DE, Lee JW (2019) The effect of photosynthesis, stomatal conductivity, thermotolerance and growth on foliar fertilization of carbonated water at lettuce hydroponic cultivation. *Journal of Practical Agriculture and Fisheries Research*, 21(1), 115-122.
16. Kim K, Kang S (2012) Characterization of artificial aggregates of coal bottom ash-red clay system. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 22(6), 305-311. <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2012.22.6.305>.
17. Lee JY, Choi HY, Yang JE (2010) Physicochemical effects of bottom ash on the turfgrass growth media of sandy topsoil in golf course. *Korean Journal of Turfgrass Science*, 24(2), 199-204.
18. Kim MK, Islam SMA, Yun MG, Kim JM, Cho JJ, Kang TH, Yun HD (2011) Use of bottom ash of waste coal as an effective microbial carrier. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 75(11), 2264-2268. <https://doi.org/10.1271/bbb.110495>.
19. Smith LS, Fellowes MDE (2014) The grass-free lawn: Management and species choice for optimum ground cover and plant diversity. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(3), 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.008>.
20. Ok CH, Anderson SH, Ervin EH (2004) Amendment and construction system for improving the performance of sand-based putting greens. *Korean Journal of Turfgrass Science*, 18(3), 149-163.
21. Kim TW, Kim YS (2023) Enhancing seasonal growth and quality of Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) with trinexapac-ethyl and prohexadione-calcium. *Flower Research Journal*, 31(4), 204-210. <https://doi.org/10.11623/frj.2023.31.4.03>.
22. Duda FJ (2008) Suppression of turfgrass diseases through manipulation of soil pH. *Journal of Natural Resources and Life Science Education*, 37(1), 38-42. <https://doi.org/10.2134/jnrlse2008.37138x>.
23. Kim MS, Kim SC, Yun SG, Park SJ, Lee CH (2017) Change in available phosphate by application of phosphate fertilizer in long-term fertilization experiment for paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(3), 141-146. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.3.27>.
24. Cho KA, Ahn PK, Hong SG, Chung DO (1999) A study on characteristics of water quality and degradation rates of organic phosphates in Yong-San river. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 8(6), 691-697.

25. Kim DS, Yoon YH, Shin JC, Kim JK, Kim SD (2002) Varietal difference in relationship between SPAD value and chlorophyll and nitrogen concentration in rice leaf. *Korean Journal of Crop Science*, 47(3), 263-267.
26. Jeong KH, Lee DJ, Lee DH, Lee SH (2019) Combustion characteristics of cow manure pellet as a solid fuel source. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(2), 31-40. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.2.31>.
27. Geng X, Guillard K, Morris TF (2013) Relating turfgrass growth and quality to frequently measured soil nitrate. *Crop Science*, 54, 366-382. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.03.0145>.
28. Kussow WR, Soldat DJ, Kreuser WC, Houlihan SM (2012) Evidence, regulation, and consequences of nitrogen-driven nutrient demand by turfgrass. *International Scholarly Research Network Agronomy*. <https://doi.org/10.5402/2012/359284>.
29. Gibberd MR, Gray JD, Cocks PS, Colmer TD (2001) Waterlogging tolerance among a diverse range of *Trifolium* accessions is related to root porosity, lateral root formation and 'aerotropic rooting'. *Annals of Botany*, 88(4), 579-589. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1506>.
30. Lee SY, Lee YB (2023) Effects of soilless substrate moisture content on quality and shelf life in potted *Kalanchoe blossfeldiana* 'Discodip' after distribution. *Flower Research Journal*, 31(1), 31-37. <https://doi.org/10.11623/frj.2023.31.1.04>.
31. Yousfi S, Marín J, Parra L, Lloret J, Mauri PV (2021) A rhizogenic biostimulant effect on soil fertility and roots growth of turfgrass. *Agronomy*, 11(3), 573. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030573>.
32. Kim MS, Kim SC, Park SJ, Lee CH (2018) Analysis of commercial organic compost manufactured with livestock manure. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 26(4), 21-29. <https://doi.org/10.17137/korrae.2018.26.4.21>.
33. Kang JM, Cho SM, Kim SK, Lee SS, Lee SK (2010) Contamination analysis of heavy metals in commercial feed for the production of safe-animal products. *Journal of Life Science*, 20(5), 717-722.