

가축분바닥재 처리 후 상추와 배추의 발아 및 육묘 특성

김영선*, 김효근

Seedling Growth of Lettuce and Chinese Cabbage in Substrates Blending Bottom Ash Derived after Combusting a Livestock Compost

Young-Sun Kim * and Hyo-Geun Kim 

대구대학교 스마트원예학과

Department of Smart Horticulture, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

* Correspondence: im0sunkim@daegu.ac.kr

Abstract: This study was conducted to evaluate the effects of mixture of commercial substrate (CS) and bottom ash derived after combusting a livestock compost (BA). Treatments were as follows. Control (CS 100%), 4% (CS 96% + BA 4%), and 6% (CS 94% + BA 6%). Compared to control, pH and EC in the mixtures of both CS and BA were increased, and bulk density not significantly different. The germination rates of lettuce and Chinese cabbage in the BA mixtures treatments were 95.0-96.7% and 90.7-95.0%, respectively, and they not significantly different by BA rate. On 28 days after sowing in the mixtures, chlorophyll content, number of leaves, leaf length, leaf width, and dry weight of lettuces were not significantly different, and while chlorophyll content, number of leaves, leaf length, and leaf width of Chinese cabbage were not significantly different, its dry weight was increased. The root length of lettuce and Chinese cabbage was positively correlated to BA amount in the mixture ($p < 0.05$). These results indicated that the application of horticultural substrates blending with BA improved root growth of leafy seedling such as lettuce and Chinese cabbage.

Keywords: Bottom ash derived after combusting a livestock compost (BA), Chinese cabbage, Germination rate, Lettuce, Seedling

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.25>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 239-245

Received: June 24, 2025

Revised: July 24, 2025

Accepted: August 12, 2025

Published: August 29, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



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

농산물 생산이 주년화되면서 채소작물의 작형이 다양화되고 있고, 동계 축성재 배는 플라스틱필름하우스나 유리온실 등의 시설 안에서 작물 재배 형태로 이뤄진다[1]. 동계에 작물의 생육온도를 유지하기 위해 재배시설에서 난방연료로 이용하고 있으나 최근 연료의 비용의 증가로 농가의 농업생산성이 감소하므로 난방비 절감은 중요한 이슈가 되고 있다[2].

일반적으로 가축분퇴비는 유기물과 부식물질 및 다양한 양분 등을 함유하고 있어 토양개량 및 식물생육에 필요한 양분으로 공급되어 왔으나 최근 시설재배 시 난방 연료원으로 활용하고자 하는 연구가 수행되고 있다[3]. 가축분퇴비는 탄소 외

에도 질소와 황 등을 함유하고 있어 난방연료원으로 사용 시 연소배가스가 발생하며, 연소 후 발생하는 바닥재(가축분배설, bottom ash derived from livestock compost; BA)를 처리해야하는 문제점 등이 발생한다. Kim et al. [4] 은 가축분퇴비 연소 후 발생한 바닥재가 다양한 무기염류를 함유하고 있으며, 토양개량제로 활용이 가능하다고 보고한 바 있다.

농업에서 사용되는 토양개량제는 주로 피트모스, 코코피트, 펄라이트 등 주로 상토원료로 사용되는 물질을 사용하고 있다[5]. 입도가 2~4 mm인 가축분배설을 토양개량제로 처리하는 경우 토양의 물리적 개량효과는 나타나나 가축분배설에 함유된 무기염류에 의해 토양 염류가 증대되므로 사용에 주의가 필요하다[4]. 가축분배설에는 다양한 무기염류가 포함되어 있으며 그 중에서도 인산 함량이 높아 인산질비료로서 활용이 가능하다. 인산은 식물의 세포분열과 뿌리 성장 및 결실에 중요한 역할을 하므로 육묘 시 상토에 함유되는 경우 묘목의 초기 생육과 육묘에 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

묘목을 본포에 정식 시 뿌리 생장 특성이 초기 활착과 이 후 생육에 영향을 미치게 되므로 발근 후 뿌리 생장을 개선하기 위한 연구가 필요하다. 이와 관련하여 인산질비료는 뿌리 생장에 중요한 역할을 하며, 지상부보다 지하부에서 높은 함량을 나타내는 경향을 나타낸다. 상추(*Lactuca sativa*)와 배추(*Brassica rapa*)는 대표적인 엽채류 작물이지만 재배환경에서 건전한 생육을 위해서는 양분과 수분을 흡수하기 위한 뿌리의 생육이 중요하므로 묘목 정식 시 뿌리의 생육 개선은 본포에서 초기 활착을 결정하는 중요한 요인이 된다. 이들 작물은 단축경으로 묘목의 생육에서 줄기 생장에 따른 차이가 적고, 육묘기간이 과채류에 비해 상대적으로 짧아 가축분배설을 상토원료로 사용 시 육묘 후 지상부와 지하부의 생육변화를 평가하기에 적합하였다. 따라서 본 연구는 가축분배설을 처리한 상토에서 상추와 배추 파종 후 발아 및 묘목의 초기생육을 조사하여 가축분배설의 상토원료로서 활용가능성을 평가하였다.

결과 및 고찰

상토특성

가축분배설이 처리된 상토의 이화학적 특성을 조사하였다(Table 1). 가축분배설이 함유된 상토의 산도, 전기전도도 (electrical conductivity, EC) 및 용적밀도는 각각 pH 6.85~7.18, 0.70~1.59 dS/m 및 0.37~0.38 g/cm³의 범위를 나타냈다. BA 처리 시 pH와 EC는 증대되었고, BA 처리량과 정의 상관관계($p < 0.05$)를 나타냈다. 이는 BA의 이화학적 특성이 상토와 혼합 시 혼합물에 영향을 미쳤기 때문이다[4]. 일반적으로 BA는 알칼리성을 나타냈고, EC 값이 높았기 때문이다[4]. 상기 결과를 종합할 때, BA는 상토원료로 활용 시 상토의 pH나 EC와 같은 상토의 화학성 변화에 영향을 미치나 용적밀도의 변화는 미미하여 상토의 물리성 변화에는 영향을 미치지 않았다.

Table 1. Physicochemical properties of substrates blending BA

Treatments ¹⁾	pH (1:5)	EC (dS/m)	Bulk density (g/cm ³)
Control	6.85b ²⁾	0.70b	0.38a
4% BA	7.06ab	1.48a	0.37a
6% BA	7.18a	1.59a	0.37a
Correlation ³⁾	0.765*	0.928**	-0.143 ^{NS}

¹⁾ Treatments were as follows; Control (commercial substrate 100%; CS 100%), 4% BA (CS 94% + BA 6%), 6% BA (CS 96% + BA 4%).

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

³⁾ NS represent not significance by correlation coefficient which was between BA application and each physicochemical factor of substrates containing BA, respectively.

종자발아특성

가축분배설을 처리 후 상추와 배추 종자의 발아율 및 발아특성을 조사하였다(Table 2). 상추의 발아특성 변화는 파종 후 2일 경과 후부터 발아하기 시작하여 36.7~43.3%를 나타냈고, 4일 경과 시 최대 발아율을 나타냈으며 최종 발아율은 95.0~96.7%를 나타냈다. 배추 발아율은 파종 후 3일 후 5.0~15.0%의 범위를 나타냈고, 4일차에 36.7~58.3%, 5일차에 63.3~78.3%, 6일차에

50.0~90.0%, 그리고 7일차에 최종 발아율은 90.0~95.0%를 나타냈다. 가축분바닥재를 상토와 혼합한 후 상추와 배추의 발아율은 처리구에 따라 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않아 가축분바닥재 처리에 따른 효과를 나타내지 않았다.

Table 2. Change of germination rate of lettuce and Chinese cabbage grown in substrates blending BA

Treatments ¹⁾	Accumulated gemination rate (%)						
	1 DAT ²⁾	2 DAT	3 DAT	4 DAT	5 DAT	6 DAT	7 DAT
Lettuce							
Control	0.0a ³⁾	40.0a	85.0a	95.0a	95.0a	95.0a	95.0a
4% BA	0.0a	36.7a	68.3a	95.0a	95.0a	95.0a	95.0a
6% BA	0.0a	43.3a	78.3a	96.7a	96.7a	96.7a	96.7a
Chinese cabbage							
Control	0.0a	0.0a	15.0a	58.3a	78.3a	90.0a	95.0a
4% BA	0.0a	0.0a	5.0a	36.7a	63.3a	80.0a	91.7a
6% BA	0.0a	0.0a	7.5a	45.0a	70.0a	82.5a	90.0a

¹⁾ Treatments were as follows; Control (commercial substrate 100%; CS 100%), 4% BA (CS 94% + BA 6%), 6% BA (CS 96% + BA 4%). Two leafy vegetables seed was sown on April 30, 2025.

²⁾ DAT means a day after treatment.

³⁾ Means with same letters within a column are not significantly different by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$ level.

BA 처리구별 평균종자발아율을 이용하여 변화를 함수화하고, 50% 발아율을 나타내는 발아세를 조사하였다. 상추에서 대조구, 4% BA 및 6% BA 처리구의 50% 종자발아율은 각각 2.20일, 2.44일, 2.24일을 나타냈고, 배추에서는 각각 4.34일, 4.32일, 4.49일을 나타내어 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않아 BA 처리 시 묘목의 발아특성에 영향을 미치지 않았다. 종자가 발아하는 과정에서 수분, 온도, 산소는 발아정도에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 상토에서 종자발아는 상토의 공극에 의해 영향을 받게 된다[6]. 상토에서 종자발아에 필요한 수분과 산소의 공급량은 토양 공극에 의해 결정된다. 상토의 주원료로 사용하고 있는 코코피트나 피트모스는 공극률이 높고, 보수력과 통기성이 우수한 자재로 알려져 있다[8]. 본 연구에 사용한 상토는 BA의 처리량에 따라 pH와 EC와 같은 화학성에 변화가 있으나 용적밀도와 같은 물리성에는 변화를 나타내지 않았기 때문에 상추와 배추의 종자발아에 미치는 BA의 영향은 미미했던 것으로 판단된다(Table 1) [7,8]. 가축분바닥재는 입자의 크기에 따라 상토의 특성에 영향을 미치며, 수분보유능력이 코코피트나 피트모스에 비해 부족하여 통기성에 영향을 미치게 된다[4]. 가축분바닥재의 상토원료로 사용 시 종자발아 및 발아특성에 미치는 영향은 미미하므로 가축분바닥재의 처리에 의한 비효는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

상추 및 배추의 유효 생육 조사

가축분바닥재 처리 후 상추와 배추의 묘목에서 지상부 생육에 대해 조사하였다(Table 3). 상추와 배추에서 엽록소, 엽수, 엽장, 엽폭 및 건물중 조사 결과 대조구와 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았고, 가축분바닥재 처리량과 상추의 생육요인간 상관관계에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 가축분바닥재 처리량과 상추와 배추의 생육요인 간의 상관관계조사에서 엽록소, 엽수, 엽장 및 엽폭은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았으나 배추의 건물중은 정의 상관관계($p < 0.01$)를 나타냈다. 이는 가축분바닥재를 상토원료로 처리 시 작물별 차이는 있으나 작물의 초기 생육에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

가축분바닥재 처리 후 상추와 배추의 묘목에서 시험종료 시 지하부 생육에 대해 조사하였다(Table 4). 상추에서 뿌리길이와 뿌리건물중은 각각 7.70~8.43 cm와 0.0181~0.0187 g/plant를 나타낸다. 대조구와 비교할 때, 뿌리길이는 6% 처리구에서 증대되었고, 뿌리건물중은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 가축분바닥재 처리량과 상추의 지하부 생장 요인 중에서 뿌리길이는 정의 상관관계($p < 0.05$)를 나타냈고, 뿌리건물중은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다.

Table 3. Shoot growth of lettuce and Chinese cabbage grown in substrates blending BA

Treatments ¹⁾	Chlorophyll content (mg/100cm ²)	Number of leaves (ea/plant)	Leaf length (cm)	Leaf width	Dry weight (g/plant)
Lettuce					
Control	1.22a ²⁾	4.7a	7.31a	3.58a	0.0173a
4% BA	1.22a	4.3a	7.33a	3.59a	0.0174a
6% BA	1.23a	4.7a	7.21a	3.61a	0.0175a
Correlation ³⁾	0.208 ^{NS}	-0.036 ^{NS}	-0.127 ^{NS}	0.239 ^{NS}	0.047 ^{NS}
Chinese cabbage					
Control	1.83a	8.0a	8.09a	3.40a	0.0148b
4% BA	1.85a	7.0a	8.04a	3.32a	0.0173a
6% BA	1.85a	7.7a	8.02a	3.40a	0.0191a
Correlation	0.267 ^{NS}	-0.250 ^{NS}	-0.102 ^{NS}	-0.094 ^{NS}	0.864**

¹⁾ Treatments were as follows; Control (commercial substrate 100%; CS 100%), 4% BA (CS 94% + BA 6%), 6% BA (CS 96% + BA 4%). Two leafy vegetables seeds were sown on April 30, 2025, and they investigated on May 21, 2025.

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

³⁾ NS represent not significance by correlation coefficient which was between BA application and each growth factor of seedling shoot, respectively.

Table 4. Root growth of lettuce and Chinese cabbage grown in substrates blending BA

Treatments ¹⁾	Root length (cm)	Root dry weight (g/plant)
Lettuce		
Control	7.70b ²⁾	0.0181a
4% BA	8.13ab	0.0182a
6% BA	8.43a	0.0187a
Correlation ³⁾	0.742*	0.223 ^{NS}
Chinese cabbage		
Control	9.47b	0.0114c
4% BA	9.90ab	0.0134b
6% BA	10.10a	0.0166a
Correlation	0.744*	0.863**

¹⁾ Treatments were as follows; Control (commercial substrate 100%; CS 100%), 4% BA (CS 94% + BA 6%), 6% BA (CS 96% + BA 4%). Two leafy vegetables seeds were sown on April 30, 2025, and they investigated on May 21, 2025.

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

³⁾ NS represent not significance by correlation coefficient which was between BA application and each growth factor of seedling root, respectively.

배추에서 뿌리길리와 뿌리건물중은 각각 9.47~10.10 cm와 0.0114~0.0166 g/plant를 나타낸다. 대조구와 비교할 때, 뿌리길리는 6% 처리구에서 증대되었고, 뿌리건물중은 가축분바닥재처리구(4% BA 처리구, 6% BA 처리구)에서 증대되었다. 가축분바닥재 처리량과 배추의 지하부 생장 요인 중에서 뿌리길리와 뿌리건물중은 정의 상관관계($p_{\text{root length}} < 0.05$; $p_{\text{root dry weight}} < 0.05$)를 나타냈다.

육묘에서 뿌리 생육은 상토의 특성, 기상환경 및 관리특성에 의해 영향을 미치게 된다[9]. 육묘 시 묘목의 뿌리 생육은 작물의 정식 후 초기 활착에서 매우 중요하다[9]. 따라서 육묘에서 지상부의 생육과 관리도 중요하지만 발근은 묘 소질을 결정하는 중요하며, 특히 육묘 과정에서 적당한 근량을 갖는 것은 묘목의 근괴형성에 중요한 역할을 하기 때문이다[9]. 육묘과정에서 종자의 발아는 종자 중 양분을 이용하지만 발아 및 발근 후 묘목의 생육은 적절한 양분 공급을 통해 이뤄지게 된다. 국내 상토의 경우 약간의 비료 성분을 함유하고 있어 포트의 크기가 큰 경우 묘목의 생장이 증대되고, 시비 시 뿌리 생육이 증대된다[9].

상추와 배추의 유묘에서 지상부와 지하부의 비율(TR ratio, TR율)을 조사한 결과 상추에서 대조구, 4% BA 및 6% BA 처리구의 TR율은 각각 1.17, 1.00 및 0.92를, 배추에서는 각각 1.60, 1.37, 1.13을 나타냈다. 대조구와 비교 시 상추와 배추 모두 6% 처리구에서 TR율이 낮게 나타나 뿌리 생장량이 BA 처리에 의해 증가한 것을 확인할 수 있었다. BA 처리량과 TR율과의 상관관

계를 조사할 때, 상추($r=-0.803$, $p<0.01$)와 배추($r=-0.709$, $p<0.01$)에서 모두 부의 상관성을 나타냈다. 상기 결과를 종합할 때 BA의 처리는 묘목의 지하부 생장을 개선하는 것으로 판단된다. 다만, BA 처리 후 묘목의 뿌리 성장량 차이는 배추에서만 확인되었다. 본 연구에 사용한 상추와 배추의 육묘는 4주 정도의 짧은 기간동안 이뤄졌고, 종자 파종 후 약 7일이 경과한 후 발아 및 발근이 이뤄진 점을 고려한다면 상토에서 작물의 생육기간은 20일 이내로 작물에서의 생장을 확인하기에는 짧은 시간이었다. 따라서 BA의 처리 후 작물의 생장을 확인하기 위해서는 육묘기간이 긴 과채류나 작물을 정식 후 생육의 변화를 조사하는 것이 필요하였다.

육묘 시 뿌리의 생육에 영향을 미치는 주요 성분은 인산이며, 칼륨과 더불어 발근과 지하부 생육을 개선하는 주요 원소이다 [10]. 토마토(*Solanum lycopersicum*)에서 뿌리 중 인산의 함량이 높은 경우 뿌리의 생육이 증대되며, 뿌리의 생육 증대는 작물의 생육과 생산량에 영향을 미친다[10]. 가축분바닥재는 인산, 칼슘, 칼리, 고토 및 규산 등을 다량으로 함유하고 있으며 크리핑 벤트그래스(*Agrostis palustris*)에서 엽록소와 지상부 생장에 미치는 영향은 미미하나 지하부의 생육 및 생장을 증대시키는 것으로 알려져 있다[4]. 가축분바닥재는 토양개량제로 처리하는 경우 토양 중에서 공극을 개선하고, 잔디에 인산과 칼리의 공급원이 될 수 있다[4]. 따라서 가축분바닥재의 육묘용 상토로 활용하는 경우 토양의 공극을 개선하고, 지하부에 인산 및 칼리를 공급하여 묘목의 성장과 품질을 개선하는 것으로 판단된다.

상기 결과를 종합할 때, 가축분바닥재는 육묘용 상토원료로 활용이 가능하며, 육묘 시 필요한 인산과 칼리의 공급원으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 가축분바닥재를 상토원료로 활용하기 위해서는 가축분을 농가의 난방원료로 활용하고, 난방 후 발생한 부산물인 바닥재의 다양한 특성 및 발생량에 대한 조사가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 가축분바닥재를 활용하기 위해서는 농업원료로 활용하기 위한 선행연구 및 비료공정규격 설정 등 행정적 조치도 필요하다.

결 론

본 연구는 가축분바닥재(BA)와 상토(CS)와 혼합 후 혼합상토의 이화학적 특성과 상추와 배추의 파종 후 묘목의 발아 및 초기 생육을 조사하였다. 처리구는 대조구(control, CS 100%), 4% 처리구(4%, CS 96% + BA 4%), 그리고 6% 처리구(6%, CS 94% + BA 6%)로 설정하였다. BA 처리 후 혼합상토의 pH와 EC는 대조구보다 증대되었고, 용적밀도는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. BA 처리 후 혼합상토에서 상추와 배추의 발아율은 각각 95.0~96.7%와 90.7~95.0%를 나타냈고, BA 처리량에 따라 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 파종 후 28일 경과 시 상추의 생육은 엽록소, 엽수, 엽장, 엽폭 및 건물중은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 배추는 엽록소, 엽수, 엽장 및 엽폭은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았으나 건물중은 BA 처리구에서 증대되었다. 시험 종료 후 BA 처리량과 상추와 배추의 뿌리길이는 정의 상관관계를 나타냈다. 상기 결과들을 종합할 때, BA를 상토원료로 사용하는 경우 묘목의 뿌리 생육을 개선하여 지상부의 생육을 개선하는 것으로 확인하였다. BA를 상토 원료로 활용하기 위해서는 원료의 이화학적 특성이 균일하여야 하며, 상토의 비료공정규격에 적합한 원료 사용 비율을 정할 수 있을 것으로 판단된다. BA는 인산 함량이 상대적으로 높기 때문에 작물 재배 시 인산질 비료로 활용할 수 있을 것으로 판단되므로 향후 인산질비료로 적용하기 위한 연구가 필요하다. BA는 농산물 생산과정에서 발생하는 부산물이므로 상기 연구가 진행된다면 농자재로서 재활용함으로써 자원순환에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

공시 재료

본 연구는 대구대학교 유리온실에서 2025 4월부터 5월까지 약 2개월 동안 수행되었다. 공시 작물은 상추(*L. sativa*)와 배추(*B. rapa*)를 이용하였다. 공시토양은 원예용상토(commercial substrate: CS; Seoul Bio Co. Ltd., Seoul, Korea)를 구매하여 사용하였고, 가축분바닥재(BA)는 경상북도 청송군 소재 토마토 재배 농장으로부터 공여받아 사용하였다. BA는 pH 10.0으로 알칼리성을 나타냈고, 인산과 칼리는 각각 14.1%와 2.8%를 나타냈다[4]. 시험장소의 기온과 상대습도는 각각 $15.3\pm1.6^{\circ}\text{C}$ 와 $64.5\pm6.5\%$ 의 범위를 나타냈다.

가축분바닥재 처리구별 상토의 혼합

돈분퇴비 연소 후 수거된 BA는 구리와 아연의 함량이 높으므로 상토 규격에 적합한 BA 혼합 범위는 6% 이내로 조사되어 본 연구에서는 4%와 6%의 BA를 CS에 각 원료의 용적밀도를 고려하여 부피비로 균일하게 혼합하였다. 처리구는 대조구(control, CS 100%), 4% BA처리구(4%, CS 96% + BA 4%), 그리고 6% BA처리구(6%, CS 94% + BA 6%)로 구분하였다.

가축분바닥재 혼합 상토에서 파종 및 육묘

가축분바닥재 혼합상토를 셀트레이(105구)에 동일한 부피로 충전하고, 상추와 배추 종자를 1개의 셀에 종자 1개씩 파종하였다. 1처리구별 10개의 셀을 1반복으로 하였고, 각 처리구별 3반복하여 완전임의배치법으로 배치하였다. 재배관리는 2025년 4월 30일 종자를 파종하였고, 종자 출현을 7일간 지속적으로 조사하였고, 본엽 3엽이 발생한 2025년 5월 27일 수확하였다. 육묘기간 중 수분은 공급은 매일 1~2회 두상관수하여 수분을 공급하였다.

가축분바닥재 혼합상토의 이화학적 특성 및 육묘 작물의 생육 특성

가축분바닥재 혼합 상토의 이화학적 특성을 조사하기 위해 pH, 전기전도도(EC) 및 용적밀도를 상토의 표준분석법에 준하여 분석하였다.

가축분바닥재 혼합상토에서 작물의 발아율은 종자 파종 후 발아된 종자를 계수하여 매일 발아율을 7일 동안 조사하였다. 시험 종료 후에는 육묘 작물의 엽록소, 엽수, 엽장, 엽폭, 지상부 건물중, 지하부 건물중 및 근장을 조사하였다. 엽록소는 엽록소 측정기(SPAD-501 plus, Minolta, Tokyo, Japan)로 측정한 후 계산식을 이용하여 엽록소 함량을 계산하였다. 엽수는 총 엽수를, 엽장과 엽폭은 가장 외곽 잎의 최장 길이와 폭을 조사하였다. 근장은 시험 종료 후 단근되지 않도록 수돗물을 이용하여 뿌리를 씻은 후 시험용 자를 이용하여 최장 길이를 측정하였다. 지상부와 지하부의 건물중은 시험 종료 후 수돗물을 이용하여 세척한 후 70°C로 셋팅된 건조기(OF-W155, Daihan Scientific, Daegu, Korea)에서 24시간 이상 건조 후 측정하였다.

통계분석

통계처리는 SPSS (ver. 27.0, IBM, NY, USA)를 이용하여 Duncan 다중검정을 통해 처리구간 평균값의 유의차를 검정하였고, BA 처리량과 조사항목별 변화는 Pearson 상관관계를 통해 검증하였다.

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, wrote the first manuscript, and revised the manuscript, provide critical feedback; H.-G. Kim led the growth experiment, collected the data, and performed the statistical analysis.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This research was supported by Korea Electric Power Corporation (Grant number: R23XO05-4).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.25>
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. Choi YH, Park KS, Kang NJ, Kim HL, Kwak YB, Kim HD, Goo DH, Cho MH (2010) Effects of greenhouse orientation on the greenhouse environment and the growth of tomato in forcing culture. *Journal of Bio-environment Control*, 19(1), 6-11.
2. Hong SG (2015) Strategies for increasing biomass energy utilization in rural areas – Focusing on heating for greenhouse cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(6), 9-20. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2015.57.6.009>.
3. Jeong KH, Lee DJ, Lee DH, Lee SH (2019) Combustion characteristics of cow manure pellet as a solid fuel source. *Korea Organic Resources Recycling Association* 27(2), 31-40. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.2.31>.
4. Kim YS, Lim SJ, Lee GJ (2025) Application of bottom ash derived from livestock manure combustion-improved soil physicochemical properties and nutrient uptake creeping bentgrass. *Horticulturae*, 11, 32. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010032>.
5. Byun HJ, Kim YS, Kim IS (2012) Effect of mixture rate of used media and perlite on physico-chemical of properties root media and seedling quality. *Journal of Bio-Environment Control*, 21(3), 213-219.
6. Lee JY, Lee JH, Ki GY, Kim ST, Han TH (2011) Improvement of seed germination in *Rosa rugosa*. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 29(4), 352-357.
7. Jayaranjan MLD, van Hullebusch ED, Annachatre AP (2014) Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 13(4), 467-486. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4>.
8. Kim YS, Lee SB, Ham SK, Lim HJ, Choi YC, Park KH (2014) Effects of soil amendment blended with soldier fly casts and coco peat on physicochemical properties of sand soil. *Weed and Turfgrass Science*, 3(2), 143-149. <https://doi.org/10.5660/WTS.2014.3.2.143>.
9. Seo TC, An SW, Kim SM, Nam CW, Chun H, Kim YC, Kang TK, Kim SW, Jeon SG, et al. (2017) Effect of the seedling difference in cylindrical paper pot trays on initial root growth and yield of pepper. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 26(4), 368-377. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2017.26.4.368>.
10. Rhee HC, Kang KH, Kweon KB, Choi YH (2001) Effect of root zone temperature during the night on the growth and yield of perlite cultured tomato in winter. *Journal of Bio-Environment Control*, 10(1), 30-35.