

Research Article



CrossMark

Open Access

우사의 수분조절능력 향상을 위한 깔짚소재별 수분흡수속도 평가

노준석¹, 이재훈¹, 이수림¹, 박종환², 서동철^{3*}

¹경상국립대학교 응용생명과학부, ²동아대학교 생명자원산업학과, ³경상국립대학교 환경생명화학과 & 농업생명과학연구원

Evaluation of Water Absorption Speed for Litter Materials to Improve the Water Control Ability of Livestock Litter

Jun-Suk Rho¹, Jae-Hoon Lee¹, Su-Lim Lee¹, Jong-Hwan Park² and Dong-Cheol Seo^{3*} (¹Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, ²Department of Life Resources Industry, Dong-A University, Busan 49315, Korea, ³Department of Applied Life Chemistry & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea)

Received: 20 February 2022/ Revised: 16 March 2022/ Accepted: 21 March 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

ORCID

Jun-Suk Rho

<https://orcid.org/0000-0003-2100-5903>

Jae-Hoon Lee

<https://orcid.org/0000-0002-5517-8987>

Su-Lim Lee

<https://orcid.org/0000-0001-8857-2895>

Jong-Hwan Park

<https://orcid.org/0000-0001-7296-0439>

Dong-Cheol Seo

<https://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

Abstract

BACKGROUND: The most common litter materials used in South Korea are sawdust, rice husk, etc. Recently, the cost of litter has been steadily rising, and the maturity test has been strengthened. For this reason, new litter materials are needed for better water control ability to solve the problems. The object of this study was to evaluate the water absorption properties for litter materials.

METHODS AND RESULTS: The volumetric water capacity according to the addition of cow manure was investigated to calculate the water absorption speed of litter materials (sawdust, peatmoss, cocopeat, and biochar). The water absorption speed constant (-K) in the first stage was high in the order of cocopeat (0.1190), sawdust (0.0961), biochar (0.0762), and peatmoss (0.0523). The

optimal period of the litter use was in the following order: peatmoss (48d), biochar (42d), sawdust (30d), and cocopeat (24d). The water absorption rate (%) of the used litters was high in the order of biochar ≈ cocopeat, sawdust, and peatmoss, which was significantly correlated with the water absorption speed of the first stage.

CONCLUSION(S): Considering the water absorption speed and water absorption rate, biochar and peatmoss were found to be the best and optimal litter materials among the tested materials. These litter materials can be used as water control agents in livestock facilities.

Key words: Ammonia, Ammonia emission factor, Chinese cabbage cultivation, Fine particles, Urea

서론

현재 우리나라의 한육우사육두수는 2010년 275만두에서 2019년 331만두로 최근 10년간 20%가 증가하였으며, 이로

* Corresponding author: Dong-Cheol Seo
Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;
E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

인해 가축분뇨 발생량도 증가하여 453백톤/일로 보고되었다. 한옥우 사육두수의 증가로 인해 축사 내 깔짚의 소비량은 2018년 톱밥 기준으로 6.4만톤이었다[1]. 하지만 2021년 3월에 시행된 가축분 퇴비 부속도 검사 의무화 제도에 따른 부속도미충족가축분 퇴비가 늘어남에 따라 다양한 깔짚소재의 수요도 증가하고 있는 실정이다.

현재 톱밥깔짚을 사용하는 한옥우 사육농가에서는 부속도 만족을 위한 퇴비 발효기간이 더 소요되고 있고, 깔짚의 단가 상승으로 운영상의 문제가 발생되고 있다. 우분뇨의 퇴비화는 축사 바닥에 수분함량이 낮은 깔짚을 깔아 분과 뇨를 흡수 및 혼합되게 하고, 분뇨로 인해 깔짚이 수분을 더 이상 흡수하지 못하게 되면 이를 수거하여 축사열 퇴비시설에 더미형으로 야적하여 퇴비화하는 방향으로 처리되고 있다[2]. 특히 우분뇨의 수분함량은 대략 70%~85% 정도로서 발효의 적정수분인 55%~65% 수준을 초과하게 되며, 이는 퇴비더미 내부의 공극이 축소되어 발효에 필요한 산소의 공급이 현저하게 감소하게 됨에 따라 원활한 퇴비화를 기대할 수 없다. 또한 함수율 85% 이상에서는 호기성 퇴비화가 중지되고 혐기성 상태가 됨에 따라 악취가 발생하며 산 생성균의 활동에 따른 pH저하로 퇴비화를 이룰 수 없는 반면에 함수율이 40% 이하에서는 퇴비화 미생물의 활성저하로 발효시간이 길어지게 된다. 따라서 초기 단계에서의 적정 수분 조절은 퇴비화에 있어 매우 중요한 요소이다[3].

현재 사용중인 톱밥깔짚은 국내 수급이 매우 불안정하고 수분 흡수 품질도 불규칙하여 수입품이 주로 유통되고 있으며, 가격상승과 수급 상황에 따라 대패밥과 MDF 톱밥까지 사용하고 있는 실정이다. 이들 톱밥은 수분흡수능이 우수하고, 초기 퇴비화 과정에서 악취 원인물질의 흡착과 같은 장점과 모양에 보습력과 지속성, 통기성 등의 장점이 있으나 최근 퇴비용 톱밥에 1군 발암물질인 포름알데하이드(CH₂O)가 검출되고, 수입 톱밥에 사용되는 훈증제인 브롬화메탄(CH₃Br) 등에 의한 환경문제까지 유발하고 있는 실정이다[4-6].

이러한 문제를 해결하기 위한 목편, 수피, 볏짚 및 땅콩껍질 등 15여종의 톱밥 대체소재들의 현장 적용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만 아직까지 톱밥과 일부 왕겨에 의존하고 있는 실정이다[7-9]. 따라서 한옥우 사육농가에서 경제성, 수분조절의 효율성 및 퇴비 부속도를 만족하기 위한 신규 깔짚 소재의 개발이 필요한 실정이다. 현재 수분흡수율이 우수한 톱밥의 대체제를 선별하기 위한 가장 중요한 인자는 수

분조절능력이지만 현재까지 대부분의 깔짚 수분흡수율은 깔짚에 가축에서 배출되는 양에 해당하는 물을 넣어 일정시간 정지하다가 남아 있는 물을 따라 내어 그 양을 측정하는 방법으로 진행하여 실제 투입된 물과 분뇨내 수분의 흡수특성과는 현실적으로 차이가 발생할 수 있을 것으로 판단된다[10].

최근 들어 수분조절능력과 퇴비화 및 토양개량효과가 있는 바이오차, 피트모스, 코코피트 등의 소재들의 깔짚화 연구가 몇몇 연구진에 의해 시도되고 있지만 대부분 체계적인 연구보다는 악취저감 등의 효과검증 연구가 주로 이루어지고 있다[11]. 특히 다양한 깔짚소재가한옥우 사육농가에 투입된 이후 수분이 포화되는 시점에만 초점을 두고 진행되어 한옥우 사육농가에 적합한 깔짚을 선정하기에는 기초자료가 매우 부족한 실정에 있다. 이에 한우사에 투입된 깔짚 종류별로 수분조절능력을 평가할 때 단순 수분흡수율외에 실제 우분뇨 배출에 따른 수분흡수속도 변화를 고려한다면 좀 더 나은 깔짚 소재를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 깔짚의 수분 흡수속도를 이용하여 깔짚의 수분흡수패턴과 사용기간을 규명하기 위해 톱밥, 바이오차, 피트모스 및 코코피트에 실제 우분뇨를 투입하여 수분흡수속도를 평가하여 기존 수분흡수율과 비교를 통해 각 깔짚소재의 수분흡수패턴을 조사하였다.

재료 및 방법

공시 재료

본 연구에 사용된 공시재료는 깔짚소재로 사용될 수 있는 톱밥과 피트모스, 코코피트 및 바이오차 4종을 대상으로 하였다. 톱밥은 (주)한농에서 구매하였고, 피트모스, 코코피트는(주)부농에서 구입하여 사용하였고, 바이오차는 (주)한국남동발전영동화력에서 발생된 바이오차를 사용하였다.

이들 공시재료의 물리화학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 톱밥의 pH는 8.0으로 약 알칼리성을 나타내었고, 수분함량이 약 20.9%정도로 일반적인 톱밥의 성상과 유사하였다. 바이오차의 pH는 9.3으로 알칼리성이었으며, 수분함량은 20%정도이었고 다른 깔짚과 달리 유기물함량이 약 61%정도로 낮은 특성을 보였다. 피트모스와 코코피트의 수분함량은 35-37%정도이었고, 피트모스의 경우 pH가 산성인 4.5정도이었고, 코코피트의 경우 중성에 가까웠다. 사용된 소재의 입경분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 톱밥, 바이오차,

Table 1. Physicochemical properties of litter used

Litter	pH	EC	T-N	K	Ca	Mg	Na	WC	Bulk density
	(1:25H ₂ O)	(dS m ⁻¹)	----- (mg/kg) -----			-----			(%)
Sawdust	8.0±0.2	0.53±0.02	350±5	1.1±0.1	0.9±0.2	0.2±0.1	1.55±0.08	20.1±1.6	0.13±0.03
Biochar	9.3±0.1	4.01±0.30	1580±7	18.0±0.3	105.9±4.6	19.1±0.9	5.76±0.11	8.6±0.4	0.31±0.01
Peatmoss	4.5±0.2	1.17±0.03	700±6	0.4±0.1	1.6±0.1	2.1±0.2	1.34±0.05	37.4±2.9	0.14±0.02
Cocopeat	6.7±0.2	2.80±0.05	180±7	32.9±0.1	17.4±0.6	2.1±0.1	7.14±0.23	35.4±2.1	0.12±0.02

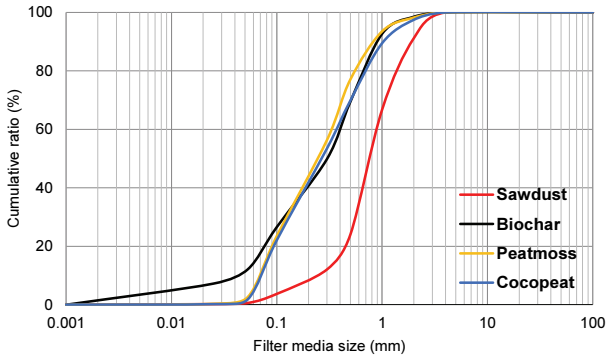


Fig. 1. Particle distribution of the litter materials.

피트모스 및 코코피트의 유효입경(d_{10})은 각각 0.2, 0.04, 0.07 및 0.07 mm 이었고, 균등계수(d_{60}/d_{10})는 각각 4.5, 10, 5.1 및 5.6으로 깔짚소재의 입자는 균질한 것으로 판단되었다.

연구에 사용된 우분뇨는 경상남도 진주시에 위치한 한우 농가(35°14'23.6"N 128°11'14.3"E)에서 발생한 한우 분뇨를 수거하여 사용하였으며 수분함량은 약 72% 정도였고, 우분뇨의 물리화학적 특성은 환경부에서 발표한 일반적인 우분뇨의 성상과 유사하였다[1].

실험방법

깔짚소재의 수분흡수능력 시험은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 소재별 4개조를 3반복하여 총 12개조를 제작하였으며, 각 조의 크기는 각각 가로 25 cm × 세로 25 cm × 높이 25 cm 로 두께 5 mm의 플라스틱판을 사용하여 용량이 15,625 cm³ 되게 제작하였다. 제작된 각 조에 농립수산식품부에서 제시한 우사 깔짚 권장 높이인 5 cm 높이로 톱밥, 바이오차, 코코피트 및 피트모스를 깔고, 용적수분함량 측정을 위해 토양수분 센서(5TE, Decagon device, USA)를 꽂고, 데이터로거(ZL6, C&Y, KOR)로 수분함량을 기록하였다[2].

일반적인 우분뇨 투입량은 한육우 한 마리 권장 사육 면적 인 7 m²를 기준으로 발생하는 1일 분뇨량인 13.7 kg을 기준으로 하였으며 본 실험에서는 각 처리구에 단위면적당 1일 발생량에 해당하는 우분뇨 1.96 kg m⁻²(625 cm² 기준 122.5 g day⁻¹)를 매일 1회씩 투입한 후 실제 측사와 유사한 환경을 모사하기 위해 깔짚을 섞어준 후 용적수분함량을 3일 간격으로 10분씩 측정하여 일정 수치로 안정화된 값을 기록하였다 [2]. 소재별 수분흡수특성을 파악하기 위해 75일까지 용적수분함량을 조사하였다.

이들 결과를 이용하여 깔짚소재의 수분흡수속도를 산출하기 위해 $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하여 분석하였다. 깔짚의 공극내 수분 흡수속도를 1차 반응으로 가정하여 $V = KC$ 로 정의하여 이를 Seo 등[12]에 의해 정리된 식(1)을 이용하여 수분 흡수속도인 직선식의 기울기 상수(K)를 구하였다. 본 반응속도식에 의해 기울기의 양(+)의 값이 커질수록 수분 흡수속도(-K)가 빨라지는 것을 의미하며, 기울기가 "0"에 가까울수록 수분 흡수속도(-K)가 늦다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 수분흡수 속도상수를 "-K"로 표현하였다.

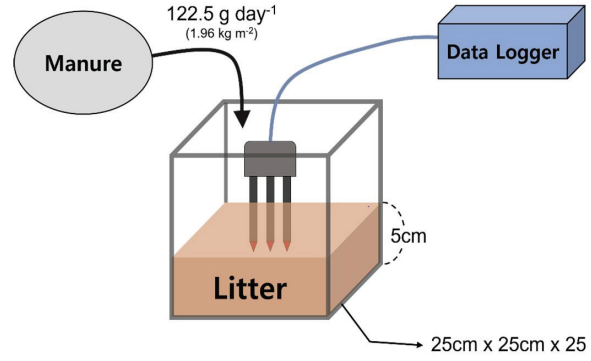


Fig. 2. Diagrams of small-scale apparatus for monitoring volumetric water capacity.

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{C} dC = -K \int_0^t dt \tag{1}$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -Kt$$

C_0 : 초기($t=0$) 농도,

C : 나중(t 시간 후) 농도,

K : 속도상수(time^{-1}),

t : 반응시간 (time).

수분흡수율 실험은 깔짚 종류별로 600 mL되게 정량하여 1,000 mL 비이커에 넣고 한육우 1마리의 10일 배출량에 해당하는 분뇨의 수분량인 165 mL를 증류수로 대체하여 주입한 뒤 30분 동안 정치한 후 남아 있는 물을 따라내어 그 양을 측정하였다[10].

분석 방법

깔짚 소재의 물리화학적 분석항목은 pH, EC, T-N, 양이온 및 수분을 분석하였다. pH는 깔짚 소재를 증류수와 1:25 (W/V)로 혼합하여 30분간 교반한 후 pH meter(Orion 2 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, EC는 pH 측정 후 소재 용액을 #6 여과지로 여과 후 EC meter(COM-100, HM digital, USA)를 이용하여 측정하였다. T-N과 양이온 함량은 습식분해 후 각각 Kjeldahl법과 ICP-OES(Optima 8300, PerkinElmer, USA)를 이용하여 분석했다. 용적수분함량은 토양수분센서(5TE, Decagon device, USA)를 꽂고, 데이터로거(ZL6, C&Y, KOR)로 수분함량을 기록하였다.

통계처리

각 처리조건별 용적수분함량과 수분흡수율 결과를 통계분석하기 위해서 SPSS(IBM SPSS Statistics 25) 프로그램을 사용하였다. 깔짚소재별 수분흡수속도는 선형회귀분석법에 의해 상관계수(r)와 유의성 (p-value)을 검정하였다.

결과 및 고찰

깔짚소재의 수분함량 변화

깔짚에 투입된 우분뇨량은 122.5 g day⁻¹(수분함량 72%) 이었고, 우분뇨 투입에 따른 깔짚에 첨가된 수분량은 88.2 mL day⁻¹로 75일 동안 총 6,615 mL 75day⁻¹의 수분이 첨가 되었다. 깔짚 종류별로 매일 일정한 우분뇨가 투입되었을 때 75일까지의 깔짚 용적수분함량 변화 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다.

깔짚 종류별 용적수분함량은 전반적으로 우분뇨 투입량이 증가함에 따라 초기에 급격하게 증가하는 경향을 보이다가 일정한 수분함량이 도달한 이후 더 이상 증가되지 않는 경향을 보였다. 바이오차는 우분뇨 투입량이 76 kg m⁻²부터 94 kg m⁻²까지 용적수분함량이 급격하게 증가한 이후 일정한 용적수분함량을 보였으며, 피트모스는 70 kg m⁻²부터 94 kg m⁻²까지 용적수분함량이 급격히 증가한 이후 용적수분함량이 100%에 도달하였다. 반면에 톱밥과 코코피트의 용적수분함량은 바이오차와 피트모스와 달리 두 깔짚 모두 분뇨투입량에 비례하여 용적수분이 비교적 일정하게 증가하는 패턴을 보이다가 분뇨투입량이 135 kg m⁻²이후 용적수분함량이 약 80%가 된 이후 일정하게 유지되었다. 깔짚 종류에 상관없이 전반적으로 우분뇨 투입량이 증가함에 따라 초기에 급격하게 증가하다가 일정한 수분함량에 도달한 이후 더 이상 증가하지 않는 경향은 Bang 등[13]과 Kwon 등[14]과의 결과와도 일치하였다. 축사의 수분조절제로서 바이오차와 톱밥을 비교한 연구는 없지만, Kim 등[8]의 연구에서 탄소로 구성된 석탄회를 톱밥에 섞어서 사용한 결과 수분조절능력이 증가한 결과가 보고된 바 있다.

깔짚종류별 수분흡수속도

우분뇨 투입에 따른 깔짚의 용적수분함량 변화 결과를 이용하여 깔짚에 처리된 우분뇨 처리일수에 따른 일차 수분흡수속도 방정식(Fig. 4 및 Table 2)과 구간별 수분흡수속도(Fig. 5)를 조사하였다. 톱밥을 깔짚으로 사용한 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 두 개의 구간으로 구분할 수 있었다. 첫 번째 구간(Stage 1)은 우분뇨가 투입된 후 30일까지로 $\ln(C/Co)=0.0961(t)-3.1882$ ($R^2=0.9049^{***}$, $P<0.001$)의 방정식을 보였으며, 처리일수와 $\ln(C/Co)$ 가 정의 상관관계를 보여 처리시일에 따른 수분흡수속도가 빠른 것으로 판단되었다. 우분뇨가 투입된 30일부터 75일까지는 $\ln(C/Co)=0.0107(t)-0.7747$ ($R^2=0.8097^{***}$, $P<0.001$)로 stage 2는 stage 1에 비해 기울기가 완만하여 수분흡수속도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. Stage 1의 수분흡수속도 상수(-K)는 0.0961로 stage 2의 0.0107에 비해 8.9배 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 이는 톱밥이 깔짚으로 사용되었을 때 30일을 기점으로 수분을 흡수하는 능력이 크게 떨어지는 것을 의미하여 실제 한우사에서 권장되는 적정 교체 주기인 30일과 일치하였다[2]. 그 동안 한우사 깔짚의 적정교체시기를 학술적으로 증명할 수 있는 자료가 거의 없었는데, 본 연구의 수분흡수속도 패턴변화를 활용한다면 깔짚의 적정 사용기간을 예측할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

바이오차는 2구간 패턴인 톱밥과 달리 3구간으로 수분흡수패턴이 구분되어졌다. Stage 1의 구간은 0일에서 24일까지였고, stage 2는 24~42일까지였으며, stage 3은 42~75일까지이었다. 구간별 수분흡수속도 방정식은 stage 1이 $\ln(C/Co)=0.0762(t)-1.0625$ ($R^2=0.8097^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2가 $\ln(C/Co)=0.0284(t)-1.1295$ ($R^2=0.8194^{***}$, $P<0.001$)이었으며, stage 3이 $\ln(C/Co)=0.0020(t)-0.1018$

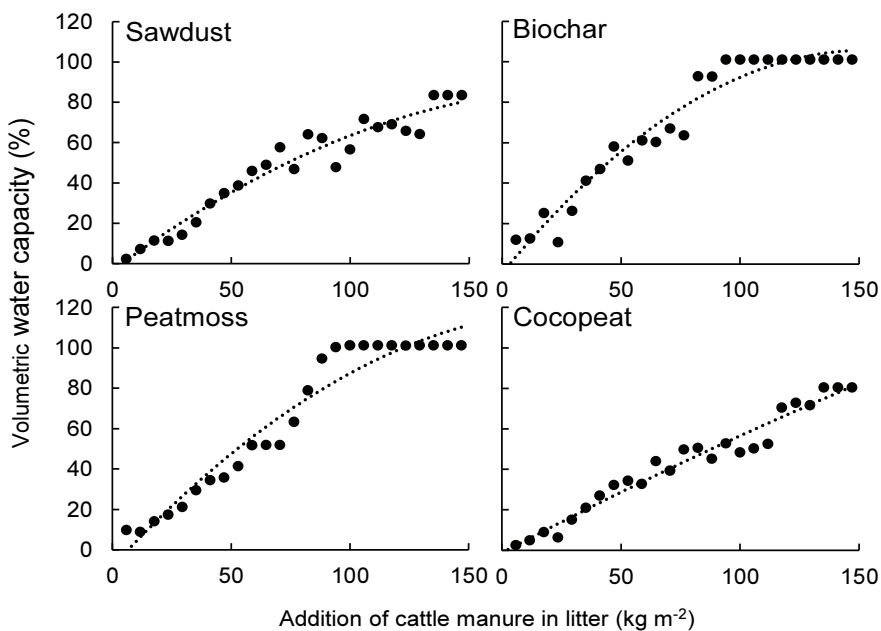


Fig. 3. Change of volumetric water capacity in litter under different cattle manure input.

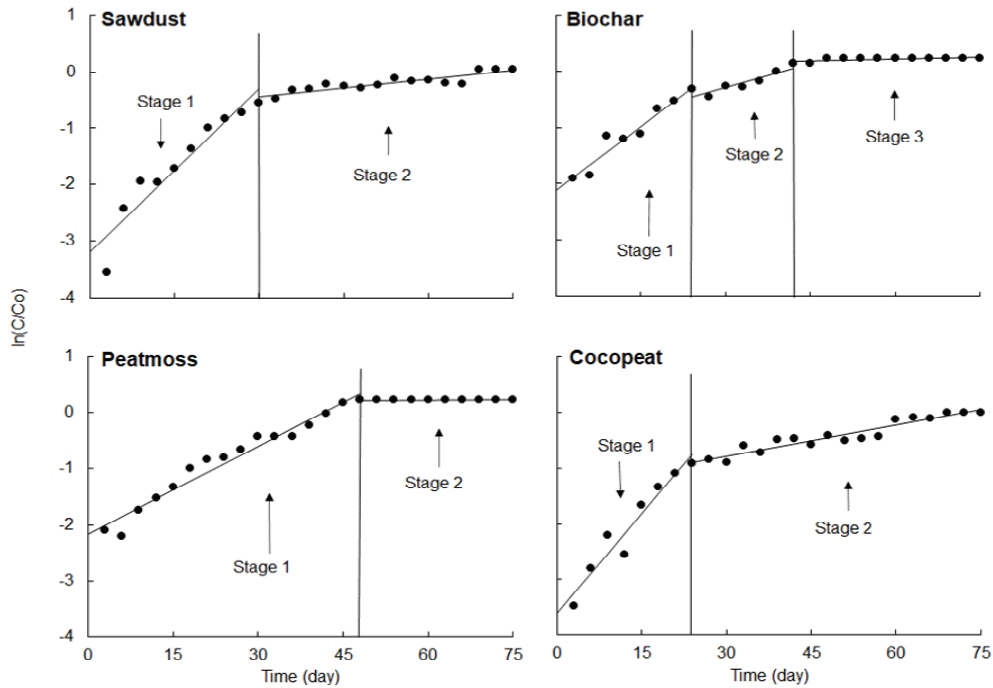


Fig. 4. Water absorption speed of litter according to cattle manure input.

Table 2. First-order reaction and absorption speed constant of litter according to cattle manure treatment

Litter		First-order reaction equation (R^2)	Water absorption speed (-K, day ⁻¹)
		$\ln \frac{c}{c_0} = -Kt$	
Sawdust	Stage 1	$y=0.0961x-3.1882$ ($R^2=0.9049^{***}, P<0.001$)	0.0961
	Stage 2	$y=0.0107x-0.7747$ ($R^2=0.8097^{***}, P<0.001$)	0.0107
Biochar	Stage 1	$y=0.0762x-1.0625$ ($R^2=0.9399^{***}, P<0.001$)	0.0762
	Stage 2	$y=0.0284x-1.1295$ ($R^2=0.8194^{***}, P<0.001$)	0.0284
	Stage 3	$y=0.0020x+0.1018$ ($R^2=0.4190^{**}, P<0.01$)	0.0020
Peatmoss	Stage 1	$y=0.0523x-2.1705$ ($R^2=0.9620^{***}, P<0.001$)	0.0523
	Stage 2	$y=0.0002x+0.2233$ ($R^2=0.2725^{**}, P<0.05$)	0.0002
Cocopeat	Stage 1	$y=0.1190x-3.1608$ ($R^2=0.9335^{***}, P<0.001$)	0.1190
	Stage 2	$y=0.0185x-1.3382$ ($R^2=0.9160^{***}, P<0.001$)	0.0185

($R^2=0.4190^{**}, P<0.01$)으로 시간이 경과함에 따라 기울기가 점점 감소하는 경향을 보였다. 수분흡수속도 상수(-K)는 바이오차에 우분뇨 첨가가 시작된 stage 1에서 0.0762로 24일까지 수분흡수가 빠르게 진행되다 stage 2에서 0.0284로 2.7배 감소하였으며, 우분뇨 투입 42일이 경과하면서 0.0020으로 수분흡수가 거의 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 바이오차는 톱밥과 달리 3구간의 수분흡수패턴을 보이는 것은 바이오차의 비표면적과 공극에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 수분의 흡수는 수분조절제로 이동, 확산 및 수분조절제와 결합하는 3단계로 이루어지는데 바이오차의 경우 다른 수분조절제와 다른 흡수패턴을 보이는 것은 확산단계에서 공극크기에 따른 수분이동 속도차이에 기인하는 것으로 판단

된다[15]. 바이오차의 공극은 크게 macropore (500Å), mesopore (20-500Å), micropore(8-20Å), submicropore (<8Å)로 구분할 수 있는데, stage 1에서는 이동과 확산이 용이한 macropore와 mesopore의 흡수로 판단되며, macropore와 mesopore로 흡수된 수분이 다시 micropore와 submicropore로 이동하는 stage 2는 공극크기가 작아 상대적으로 확산이 용이하지 않기 때문에 수분흡수패턴의 차이는 것으로 판단된다[16-19]. Park 등[20]은 깔짚의 수분조절연구는 아니지만 수분보유능력 조사결과 바이오차의 비표면적과 공극구조가 발달되어 보수 및 보비 능력이 우수하다고 하였는데 본 실험도 유사한 결과가 나온 것으로 판단된다. 이는 바이오차의 비표면적과 공극구조가 발달되어 있기 때문

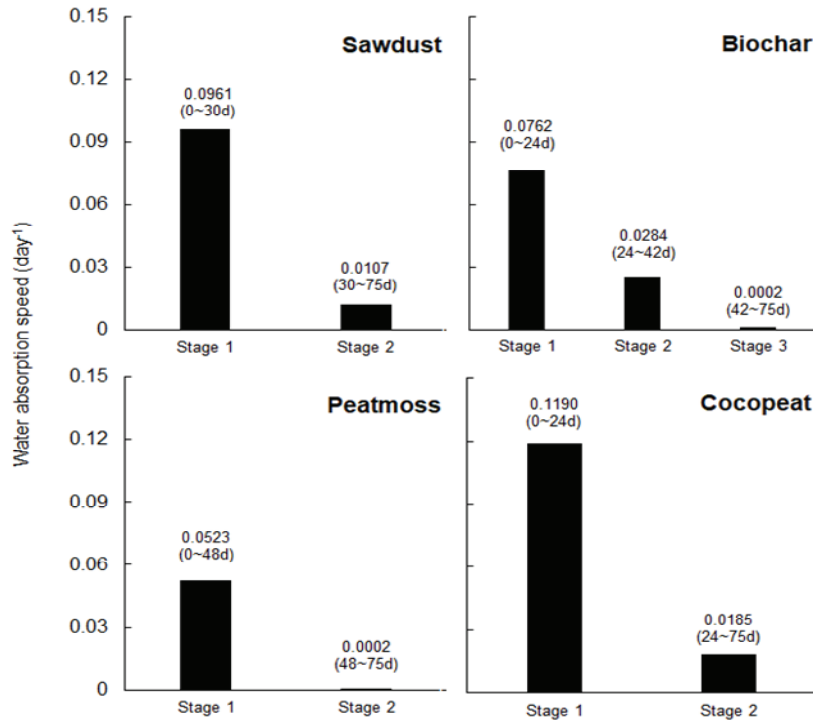


Fig. 5. Water absorption speed for each stage of the litter.

으로 판단된다[8, 15, 16, 18].

피트모스의 수분흡수패턴은 톱밥과 유사하게 두 단계로 구분되었지만 톱밥보다 수분흡수기간(Stage 1: 0~48일, Stage 2: 48~75일)이 좀 더 긴 것으로 나타났다. 피트모스의 경우 stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/C_0)=0.0523(t)-2.1705$ ($R^2=0.9620^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2는 $\ln(C/C_0)=0.0002(t)-0.2333$ ($R^2=0.2725^{**}$, $P<0.01$)로 우분뇨 투입 48일이 경과하면서 수분흡수속도가 급격하게 감소하였다. 일반적으로 피트모스는 무게에 비해 최대 6배까지 물을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있다[21]. 본 연구에서도 수분흡수기간은 다른 깔짚소재에 비해 가장 긴 특성을 보인 반면에 수분흡수속도는 가장 낮은 특성을 보였다.

톱밥과 비슷하게 코코피트의 수분흡수패턴은 두 단계로 구분되었으며, 수분흡수기간도 톱밥과 거의 유사한 것으로 나타났다. 우분뇨 투입 후 24일까지가 stage 1으로 구분되었으며 이때의 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/C_0)=0.1190(t)-3.1608$ ($R^2=0.9335^{***}$, $P<0.001$)이었고, 24~75일까지가 stage 2로 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/C_0)=0.0185(t)-1.3382$ ($R^2=0.9160^{***}$, $P<0.001$)이었다.

코코피트의 수분흡수속도 상수(-K)는 0.1190으로 톱밥의 0.0961보다도 더 빠른 것으로 판단되며, 상대적으로 1차 수분흡수속도가 감소하는 지점(24일)은 다른 깔짚소재보다 가장 빨랐다. 수분흡수속도 상수는 stage 1이 stage 2보다 6.4배 빨랐다. 코코피트의 수분흡수속도 상수가 급변하는 시점인 24일까지 다른 깔짚소재에 비해 가장 높은 수준의 수분흡수속도를 보이다가 이후 급격하게 감소된 수분흡수패턴을 보여 톱밥과 유사한 교체주기로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 깔짚 종류별 수분흡수속도는 초기의 경우 코코피트 > 톱밥 > 바이오차 > 피트모스 순으로 높았고, 깔짚의 적정 교체 주기로 판단되는 기간은 피트모스 > 바이오차 > 톱밥 > 코코피트 순으로 길었다. 코코피트 깔짚의 초기 수분흡수속도는 코코피트의 높은 수분흡수력에 의해 깔짚 중 가장 빨랐으나 교체주기가 24일로 가장 짧았다 [22]. 톱밥은 코코피트 다음으로 빠른 초기 흡수속도를 가졌으나 교체주기가 30일로 톱밥 다음으로 짧았다. 바이오차는 가장 짧은 구간의 초기 흡수속도 구간을 나타냈으나 이후 나타나는 추가적인 수분흡수로 인해 교체주기가 42일로 톱밥에 비해 길었다. 피트모스의 경우 가장 느린 초기 흡수속도를 보였으나 깔짚의 교체주기는 48일로 가장 긴 것으로 확인되었다. 깔짚의 적정 교체 주기와 수분흡수속도는 상반된 결과를 나타냈는데, 이는 깔짚의 특수성에 의한 것으로 깔짚의 사용 기간은 깔짚의 수분에 포화되는 시점에 의해 결정되는 것이 아닌, 수분을 일정한 수준의 속도로 흡수할 수 있는 기간에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

깔짚소재의 수분흡수율

깔짚 종류별 수분흡수율을 조사한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다. 깔짚종류별 수분흡수율은 바이오차 (100%) > 코코피트 (100%) > 톱밥 (70.1%) > 피트모스 (57.6%)이었다. 본 연구결과는 각 깔짚에 우분뇨 10일분에 해당하는 수분을 증류수로 대체하여 투입한 후 30분 후 배출되는 수분의 양을 측정하여 수분이 배출되지 않는 경우 수분흡수율이 100%로 산정될 수 있지만 수분투입량이 증가하면 수분흡수율이 떨어질 수 있어 특정조건에 대한 단순 깔짚간의 비교자료로

Table 3. Water absorption rate of used litter materials

Litter	Water input	Water output	Water absorption rate (%)
	----- (mL) -----		
Sawdust	165	48 ± 3	70.1 ± 1.0
Biochar	165	0 ± 0	100 ± 0.0
Peatmoss	165	70 ± 5	57.6 ± 3.1
Cocopeat	165	0 ± 0	100 ± 0.0

만 활용될 수 있다. 바이오차와 코코피트의 수분흡수율은 단순 수분흡수량 실험조건에서는 모든 수분을 흡수할 수 있었고, 반면에 톱밥과 피트모스는 30분간 흡수하였을 때 상대적인 수분흡수율이 바이오차와 코코피트에 비해 낮은 것으로 나타났다. 피트모스는 상기 수분흡수속도를 고려한 수분흡수기간이 가장 길었는데 수분흡수율은 낮아 초기수분에 대한 흡착력이 낮은 것으로 판단된다. Park 등[10]의 연구에서 톱밥의 수분흡수율이 62~79%였고 본 실험에 사용된 톱밥도 이와 유사하였다[23, 24]. 각 깔짚별 초기 수분흡수속도가 유지되는 기간 (stage 1)은 코코피트 > 바이오차 > 톱밥 > 피트모스 순으로 수분흡수율과 유사한 경향을 보였다. 이를 통해 깔짚의 수분흡수율과 수분흡수속도와의 상관성을 분석해보면, 전반적으로 수분흡수율이 높은 경우 깔짚의 초기 수분흡수속도 또한 높아지고 수분흡수기간은 상대적으로 단축되었으며, 수분흡수율이 낮은 경우 깔짚의 초기 수분흡수속도는 낮아지고 장기간 수분을 흡수할 수 있는 것으로 나타나 깔짚의 수분흡수율과 수분흡수기간 간에는 부의 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

예외적으로 비표면적과 공극구조가 발달되어 있는 바이오차는 수분흡수율과 초기 수분흡수속도가 높음에도 내부 미세공극으로의 수분확산(stage 2)으로 인해 장기간 수분을 흡수할 수 있는 것으로 나타났다[15, 16]. 바이오차와 같이 특이적인 입자형태를 가지는 소재는 흡수율 및 초기 수분흡수속도와 수분 흡수기간 간에 유의미한 상관관계가 나타나지 않을 수 있으므로 깔짚으로 사용될 소재는 입자형태의 조사를 통해 구조를 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다[15].

이상의 결과에서 실험에 사용된 깔짚의 수분흡수율은 수분흡수속도와 다소 다른 경향을 보여 우사의 수분조절제 선정 시 두 인자를 모두 고려하여 선정할 필요가 있을 것으로 판단되며, 특히 깔짚의 사용기간 설정 시 수분흡수속도를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food,

Agriculture and Forestry(IPET) through Livestock Industrialization Technology Development Program funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA)(Project No. 121034-3)

References

- Kim MS, Koo N, Kim JG (2020) A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean Journal of Environmental Biology*, 38(1), 71-81.
- Ministry of Environment (2009) Standard blueprint for livestock manure recycling facility(commentary), pp. 10-89, Korea.
- Shin WS, Lee KS (1996) Changes of physico-chemical properties and microbial activity during the early stage of composting with pig and chicken manure. *Journal of Animal Environmental Science*, 2(2), 135-145.
- Kim SG, Park BK, An JS, Park MH, Ra CS, Shin JH (2012) Effects of bedding thickness of sawdust on environment of cowshed floor and productivity of Hanwoo. *Journal of Animal Environmental Science*, 18, 65-72.
- Kim JI, Choi GH, Kwon OK, Hong SM, Park YG, Ok YS, Kim JH (2012) Development of rapid detection method for volatilized formaldehyde from wood. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 55(1), 55-59. <https://doi.org/10.3839/jabc.2011.059>.
- Zhang W, McGiffen ME, Jr Becker JO, Ohr HD, Sims JJ, Campbell SD (1998) Effect of soil physical factors on methyl iodide and methyl bromide. *The Korean Society of Pesticide Science*, 53(1), 71-79.
- Ahn GC (2013) Studies on physical characteristics and availability of beddings for rearing cattle. Doctor Thesis, Konkuk University, Seoul, Korea.
- Kim YM, Kim JH, Kim SC, Ha HM, Koo YD (2000) Effect of substitute processed dustproof fly-ash as a bedding materials at pigpens. *Journal of Animal*

- Environmental Science, 6(3), 133-140.
9. Kang HS, Hong SK, Cho WM, Paek BH, Paek CH, Lee DS (1995) Effects of sawdust and rice hulls litter on the waste management of hanwoo (Korean native cattle). *Journal of Animal Environmental Science*, 1(1), 1-8.
 10. Park JS, Kim HJ, Lee MJ, Han JS (1999) Study for the ammonia concentration changing by the bedding types for the enrichment of laboratory animals. *Laboratory Animal Research*, 15(2), 221-226.
 11. Koo YD, Kin JH, Kim DH, Koo BD, Lee SC, LEE JC, Kim SC (1999) Technique for using fly ash as a bedding materials at livestock house. *Journal of Animal Environmental Science*, 5(1), 37-44.
 12. Seo DC, Cho JS, Lee HJ, Heo JS (2005) Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. *Water Research*, 39(11), 2445-2457. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.032>.
 13. Bang HT, KimDW, Hwangbo J, Na JC, Mushtaq M.M.H, Parvin R, Choi HC, Lee SB, Kang M, Kim JH (2013) Effect of various forms of floor system on performance of meat-type duck and environments of duck house. *Korean Journal of Poultry Science*, 40(3), 253-262. <https://doi.org/10.5536/KJPS.2013.40.3.253>.
 14. Kwon KS, Woo JS, Noh JH, Oh Si, Kim JB, Kim JK, Yang K, Jang D, Choi S (2021) Development and field-evaluation of automatic spreader for bedding materials in duck houses. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 63(1), 37-48. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2021.63.1.037>.
 15. Lehmann J (2007) A handful of carbon. *Nature*, 447, 143-144.
 16. Bagreev A, Badosz TJ, Locke DC (2001) Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. *Carbon*, 39(13), 1971-1979. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00026-4).
 17. Chen B, Zhou D, Zhu L. (2008) Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental Science & Technology*, 42(14), 5137-5143. <https://doi.org/10.1021/es8002684>.
 18. Chesworth W (2008) Encyclopedia of soil science. *Encyclopedia of Earth Sciences*, pp. 822-823, Springer, Netherlands.
 19. Haider G, Steffens D, Moser G, Müller C, Kammann CI (2017) Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.019>.
 20. Park JH, Kim HC, Kim YJ, Seo DC (2020) Adsorption characteristics of anionic dye by Fe-decorated biochar derived from fallen leaves. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 39(4), 289-296. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.4.34>.
 21. Kim EY (2003) Characteristics of coco peat and peat moss. *Soil and Fertilizer*, 13, 14-21.
 22. Nam YK, Rho AR, Shin SY, Yoon YM, Shang SH, Park CH (1999) Physical characteristic of artificial mixed soil in wick irrigation by C-channel system. *Horticultural Science and Technology*, 17(2), 256-256.
 23. Park JT, Kim SH (2012) Study on the Treatment performance of SCB-M with swine manure. *Journal of Biosystems Engineering*, 37(6), 365-372. <https://doi.org/10.5307/JBE.2012.37.6.365>.
 24. Kim JY, Lee GS, Lee CJ, Kim SH (2017) Investigation of heavy metals, residual pesticides and nutrient component from agricultural by-products imported as medium substrates for mushroom cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(3), 271-221. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.3.24>.