

상토 및 육묘 포트의 개발을 위한 제지 슬러지의 이용(제2 보)

- 제지슬러지 및 첨가제의 최적 혼합을 통한 인공 상토 제조 -

김경윤 · 김철환[†] · 신태기 · 정호경 · 이영민 · 송대빈^{*1} · 허무룡^{*2}

(2007년 6월 20일 접수: 2007년 10월 26일 채택)

Utilization of Paper Sludges for Developing Bed Soils and Seedling Pots (II)

- Manufacture of artificial bed soils by optimum mixing of paper sludges and additives -

Gyeong-Yun Kim, Chul-Hwan Kim[†], Tae-Gi Sin, Ho-Gyeong Jung, Young-Min Lee,
Dae-Bin Song^{*1} and Moo-Ryong Huh^{*2}

(Received June 20, 2007: Accepted October 26, 2007)

ABSTRACT

In order to supplement insufficient nutrients of paper sludges, additional materials such as saw dust and rice husk were added during preparation of bed soils. Rice husk was more finely ground, compared to saw dust. The fine particles of the rice husk prevented their flow in a barrel of the expander. The mixed additives with paper sludges could be used to control the quantity of required nutrients for raising plants. That is, except for potassium and manganese, most of nutrients were decreased with adding the additives to paper sludge. The acidity of the paper sludges mixed with the saw dust or the rice husk was a little decreased with the increased amount of the additives. Differently from the bulk density of the paper sludges, the moisture content and the water absorption rate of the paper sludges were incremented with increasing the additives.

Keywords : *paper sludge, bed soils, saw dust, rice husk, nutrients,*

• 본 논문은 2006년 농촌진흥청 현장협력기술개발과제의 지원으로 수행되었습니다.

• 경상대학교 임산공학과/농업생명과학연구원(Dept. of Forest Sciences/IALS, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea)

*1 경상대학교 생물산업기계공학과/농업생명과학연구원 (Dept. of Bio-Industrial Machinery Engineering, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea)

*2 경상대학교 원예학과/농업생명과학연구원 (Dept. of Horticulture, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea)

† 주저자(Corresponding author) : E-mail: jameskim@gnu.ac.kr

1. 서론

현재 우리나라는 대기, 수질, 폐기물 등 전반적인 환경 분야에서 여러 문제에 대한 심각성이 고려되어지고 있다. 그 중 폐기물 분야는 발생하는 양이 방대해짐에 따라 많은 문제점을 야기하고 있는 실정이다. 폐기물의 처리 방법중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것이 매립 방법이지만 무계획적인 매립으로 인해 침출수 발생, 악취 발생, 매립지의 지반 침하, 매립지 부족 현상 등으로 매립위주의 폐기물처리법은 타당성을 잃어가고 있다. 따라서 국내에서는 폐기물 문제를 폐기물의 감량화, 재활용, 소각, 매립의 순서로 폐기물을 관리하여 최종적으로 처분되는 매립의 양을 최소화시키는 방안으로 종합적 폐기물 관리체계(Integrated Wastes Management)로 전환하고 있다.¹⁾

제지슬러지의 발생량은 2002년 기준 약 160만톤으로 추정되고 있다. 제지슬러지는 회사들의 지속적인 증설 및 종이 시장의 증가로 인하여 그 발생량은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다.^{2,3)} 그 중에서 유해성분 및 중금속함량이 적은 판지와 백상지는 40만톤으로 제지슬러지 전체 발생량의 33%를 차지하고 있는 실정이다.

국내의 상토산업은 '90년대의 원예 산업과 시설재배의 연중화에 따른 비닐하우스 영농이 활발하게 진행되면서 보급되었다. 국내 상토 사용비율은 2000년 10%선, 2003년에는 40%선으로 500여억원 이상의 큰 시장을 형성하고 있다. 또한 선진 농업국의 경우 80%선인 점을 감안한다면 성장세는 계속될 전망이다.⁴⁾ 또한, 상토 시장의 80%를 몇개 주요업체들이 점유하고 있는 실정이다.⁵⁾

본 연구에서는 제지 슬러지를 경제적이거나 환경친화적으로 재활용하기 위하여 굴참나무 목분 및 왕겨 첨가제 혼입을 통한 인공상토를 제조하였으며, 팽연 및 성형화장치를 이용하여 펠릿 형태의 인공상토를 제조하였고 제조된 인공상토의 성형특성, 물리·화학적 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 제지 슬러지

인공상토 개발을 위해 사용된 제지 슬러지는 상질지 및 고급 아트지를 생산하는 M 회사의 시료를 이용하였다. 시료는 제지 회사의 폐수처리장에 발생하는 탈수 케이크 형태 슬러지 더미에서 간격 40 cm 지점마다 골고루 채취하고 채취한 슬러지를 혼합하여 실험에 이용하였다. 인공 상토를 제조 시 사용될 제지슬러지는 제지 회사에서 발생하는 탈수 케이크 형태의 슬러지를 채취하여 바로 이용하였으며 물리·화학적 분석에는 대기 중에 풍건시킨 슬러지 시료를 이용하였다.

2.1.2 목분, 왕겨 첨가제

혼입 조건에 따른 상토의 특성을 알아보기 위해 사용된 첨가제는 경남 고성군 배둔면에서 채취한 왕겨 및 전남 남원시 Y회사에서 생산된 굴참나무 목분을 사용하였다. 제지슬러지와 균일한 혼합 및 인공 상토의 제조를 위한 성형 및 팽연 장치에서 유체 흐름을 높이기 위하여 첨가제의 미분화를 위한 전처리 과정을 실시하였다. 그리고 Wonder Blender (WB-08, Sanplatec corp., Japan)를 이용하여 굴참나무(*Quercus variabilis*) 목분은 약 120 g, 1분간 분쇄하였으며 왕겨는 약 70 g, 30 초간 과도한 벌크 상태를 줄여 2차 분쇄 효율을 증대하기 위하여 1차 분쇄를 하고 약 120 g을 1분간 분쇄하였다.

목분, 왕겨 첨가제는 전건중량 대비 10%, 20%, 30%, 40% 및 50% 투입하였으며 파쇄 및 혼합 장치를 이용하여 제지슬러지와 첨가제를 균일하게 혼합하여 사용하였다.

2.2 인공 상토의 제조를 위한 성형 및 팽연장치

첨가제와 혼합된 제지슬러지 인공상토는 성형 및 팽연장치를 이용하여 제조하였다. Fig. 1의 성형 및 팽연장치는 100 rpm의 스크루 회전 속도로 가동하였으며 공급부(feeder)에서 균일한 속도로 원료를 공급하였으며 배럴부(barrel)를 통과하여 다이부(die)의 직경 3 mm 천공을 통하여 펠릿(pellet)화된 인공상토를 제조하였다.

2.3 첨가제 및 제조된 인공 상토의 물리·화학적 분석

목분 및 왕겨 첨가제의 분쇄 전·후 입자형상 관찰과 입자크기 분포를 알아보기 위하여 10배율 및 20배율의

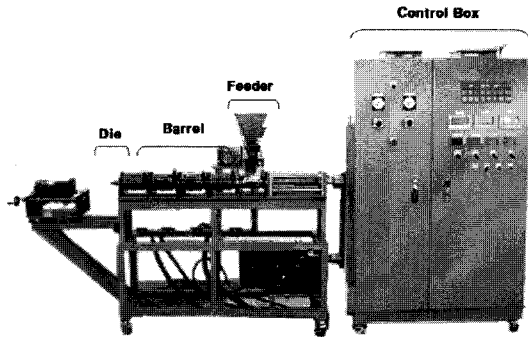


Fig. 1. Pilot forming and expanding apparatus.

실체현미경(SZ61, Olympus)을 이용하였으며 화상분석프로그램(Carl Zeiss, Axiovision 4.4)을 이용하여 이진화 영상을 획득하여 입자직경의 분포 정도를 살펴보았다. 식물체에 있어야 할 필수영양소 및 다량영양소를 함유량을 알아보기 위하여 Wonder Blender (WB-08, Sanplatec corp., Japan)를 이용하여 20초간 분쇄한 시료 1g을 습식분해액($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HClO}_4 = 10 : 1 : 4$) 25 mL로 분해시킨 후 No. 2 여지를 이용하여 잔사를 분리하고 여액은 희석하여 ICP spectrometer (Atomscan25, TJA)로 분석하였으며 유기물 등에 포함되어 있는 C, H,

N, S는 연소법에 의한 원소분석기(CHNS-932, Leco)를 이용하였다. pH는 시료와 물의 비율을 1:5로 하여 pH-미터(Istek 735p)로 측정하였으며 가밀도는 100 mL core에 시료를 채워 시료와 core의 전중량을 측정 한 후 수분함량을 감안하여 보정하여 측정하였다.^{6, 7)} 흡수율은 분석시료의 공극 내에 어느 정도의 수분이 흡수되어질 수 있는가를 알아보기 위하여 중량수분함량 (gravimetric water content)을 기초로 하도록 하였으며 코어(core)에 시료를 넣고 24시간동안 물에 침지한 후 1시간 동안 와이어 하부로 시료 주변의 중력수를 제거 하고 시료의 흡수된 수분무게(Mw)를 건조한 시료입자의 무게(Ms)로 나누어 계산하였다.^{8, 9)}

3. 결과 및 고찰

3.1 목분, 왕겨 첨가제의 현미경 관찰 및 입자 크기 분포

Fig. 2는 굴참나무 목분 및 왕겨를 Wonder Blender 를 이용한 전처리 과정을 거친 분쇄 전후의 입자이며 실체현미경(SZ61, Olympus)의 10배율 및 20배율로 관찰한 사진이다. 분쇄 전 목분 및 왕겨의 입자 크기는 분

<p>Before grinding (x10)</p>		
<p>After grinding (x20)</p>		
	<p>Sawdust</p>	<p>Rice husk</p>

Fig. 2. Microscopic analysis on particles of saw dust and rice husk.

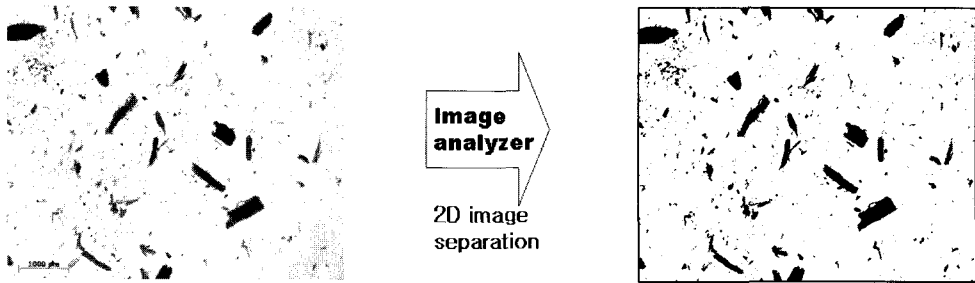


Fig. 3. Binary processing by an image analysis for measuring a size of the ground particles of sawdust ($\times 20$ magnification).

쇄 후 보다 매우 큰 입자 크기를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 분쇄 전 목분의 입자는 조대 입자와 미세 입자가 혼재되어 입자 크기 범위가 매우 넓다는 것을 확인할 수 있었다. 목분 및 왕겨의 분쇄 후 입자 크기는 분쇄 전과 비교하여 미분화되었으나 분쇄 전 목분의 입자와 유사하게 입자 크기 범위가 넓다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 실체현미경을 이용하여 촬영한 이미지를 바탕으로 정량적으로 입자 크기를 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 화상분석프로그램에 의하여 이진화 영상으로 분리하였으며 검은색 영역이 입자의 직경에 해당하는 면적이므로 이를 화상분석 프로그램에 의하여 입자의 직경을 분석 및 계산하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 화상분석프로그램에 의하여 분리된 이진화 영상을 바탕으로 하여 분석한 목분과 왕겨의

분쇄 전후 입자 크기 분포를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에 나타난 목분의 분쇄 전후 입자 크기 분포 그래프를 살펴보면, 분쇄 전에는 $50 \sim 1000 \mu\text{m}$ 범위에서 높은 함량을 나타내었으며 다양한 크기의 입자 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 분쇄 후에는 $400 \mu\text{m}$ 이상의 입자는 거의 존재하지 않게 되었으며 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 입자들이 다량 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에서 왕겨의 분쇄 전후 입자 크기에서 분쇄 전에 모든 왕겨 입자는 $1000 \mu\text{m}$ 이상의 입자 크기를 나타내었으며 분쇄 후에는 $500 \mu\text{m}$ 이하의 입자를 나타내었다. 또한 분쇄 후의 입자를 살펴보면 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 입자 함량이 40%에 해당하며 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 입자가 다량 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

분쇄 후 입자 크기 분포를 서로 비교하면 목분 입자는 $10 \mu\text{m}$ 에서 17.30%, $20 \mu\text{m}$ 에서 34.79%를 나타내었으

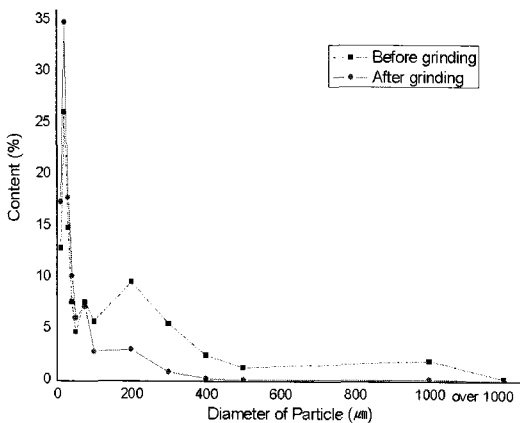


Fig. 4. Particle size distribution before and after grinding sawdust.

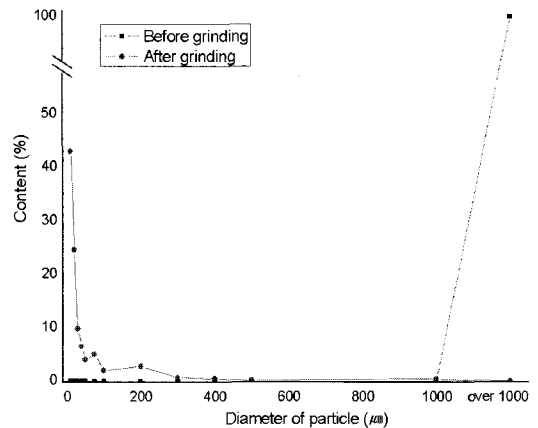


Fig. 5. Particle size distribution before and after grinding rice husks.

며, 왕겨 입자는 10 μm 에서 34.02%, 20 μm 에서 24.68%를 나타내었다. 이는 분쇄 전 왕겨입자의 크기가 목분 입자보다 조대함에 따라 분쇄시간을 길게 하였기 때문에 분쇄 시간에 따라 분쇄효율이 보다 높았으며 보다 많은 미세 입자가 발생한 것으로 판단된다. 또한 미세 입자가 많이 발생한 왕겨 입자는 혼합 비율에 따른 인공상토 제조 시 성형 및 팽연장치의 배럴부를 통과하는 원료의 유체흐름 저항 및 친공을 가진 다이부에서 발생하는 부하를 감소시킬 것으로 예상할 수 있었다.

식물이 생육과 대사과정에 필요한 물질을 흡수하고 이용하는 현상을 식물영양(plant nutrition)이라 하고, 이에 필요한 물질을 영양소(nutrient)라 한다. 식물이 정상적으로 성장하고 생명현상을 유지하는데 꼭 필요한 원소를 필수식물영양소라고 하며 현재 16가지로 밝혀져 있다. 식물체 중의 전형적인 필수영양소의 함량 P와 K는 식물체에 다량으로 필요한 일차 영양소이며 Ca와 Mg는 이차영양소, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo 및 B는 미량 영양소이다. 식물체 중의 전형적인 필수영양소의 함량을 Table 1에 나타내도록 하였다.¹⁰⁾

각 영양 원소들 중 칼륨(potassium, K)은 식물체 내에 존재하는 함량은 3.0% 정도이며 지각에 0.5~2.5% 정도 함유되어 있으나 식물이 직접적으로 이용할 수 없는 형태가 대부분이다. 칼륨의 기능은 식물체의 생리·생화학적인 기능을 담당하며 식물체 내에서 NO^3 이나 SO_4^{2-} 과 대응하여 이온균형을 유지하는 중요한 역할을 한다. 인(phosphor, P)은 토양 중 함량은 0.005~0.15%

Table 1. Normal contents of plant nutrients¹⁰⁾

Macronutrient (%)		Micronutrient (mg/kg)	
O	45~50	Cl	50~200
C	40~45	Fe	30~150
H	5.0~6.0	Mn	15~100
N	0.5~5.0	Zn	10~50
K	1.0~3.0	B	5~50
Ca	0.2~3.0	Cu	5~15
Mg	0.1~1.0	Mo	1~5
P	0.1~0.4		
S	0.1~0.2		

이며 식물에서는 0.1~0.4% 함량을 가지고 있다. 곡류 작물의 경우 인 함량이 0.2% 이하가 되면 현저한 생육 저해나 수량감소가 초래된다. 인의 기능은 식물의 광합성을 통하여 얻어진 에너지를 저장하고 전달하는 기능을 한다. 칼슘(Calcium, Ca)은 토양의 대개 0.1~5.0% 함량을 차지하며 식물에서는 0.2~3.0%의 함량을 가지고 있다. 칼슘은 식물의 성장과 대사활동에 있어서 필수적인 영양원소이다. 또한 토양의 풍화작용에 의해 산성화될수록 칼슘 함량은 감소하게 되며 산성화된 토양에서 칼슘의 요구도가 높은 편이다. 마그네슘(magnesium, Mg)은 지각 중에 2% 함유되어 있으며 식물에서는 0.1~1.0%을 가지고 있다. 마그네슘은 광합성에 관여하는 엽록소 분자의 구성원소이며 인산화작용을 활성화시키는 효소들의 보조인자의 역할을 한다.

Table 2는 목분 및 왕겨 첨가제와 물리·화학적 분석

Table 2. Concentration of plant nutrients by different mixing ratios of additives and paper sludge

	Macronutrient (%)				Micronutrient (mg/kg)						
	K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo	
Sludge	0.11	12.78	2.88	0.18	10211.2	34.05	N.D.	95.81	N.D.	29.48	
Saw dust	10%	0.09	13.17	2.83	0.16	9420.6	27.82	N.D.	11.77	N.D.	29.96
	20%	0.10	10.94	2.23	0.14	7995.0	17.65	N.D.	15.51	N.D.	24.88
	30%	0.09	9.30	1.86	0.13	6863.8	8.05	N.D.	5.63	N.D.	22.53
	40%	0.09	8.85	1.85	0.11	6102.8	12.32	N.D.	25.18	N.D.	22.77
	50%	0.10	7.49	1.59	0.10	5505.6	6.15	N.D.	6.15	N.D.	17.90
Rice husk	10%	0.16	13.35	2.76	0.17	9700.1	59.71	N.D.	74.43	N.D.	30.25
	20%	0.19	7.66	2.49	0.17	9006.1	74.89	N.D.	47.88	N.D.	25.95
	30%	0.27	9.52	2.29	0.15	8520.7	123.10	N.D.	51.11	N.D.	26.23
	40%	0.30	7.87	2.05	0.13	6951.8	145.00	N.D.	28.73	N.D.	21.48
	50%	0.39	6.14	1.55	0.11	5195.3	195.81	N.D.	25.72	N.D.	18.75

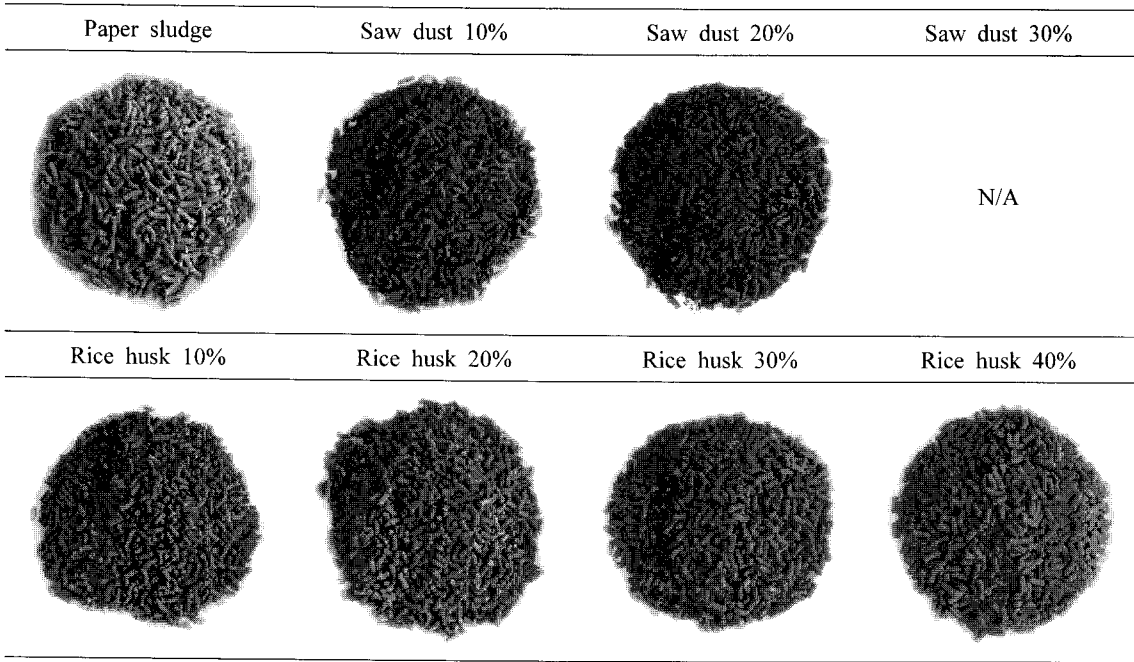


Fig. 6. Visual observation on manufactured bed soils (Dia.: 3 mm, length: 10 mm).

용 제지슬러지를 혼합한 인공 상토 원료의 필수 영양원소 함유량을 나타내었다. 굴참나무 목분 및 왕겨 첨가제를 혼합 비율을 증가시키에 따라 대부분의 영양원소 함유량이 감소하였으며 다만 왕겨 첨가제의 혼합비율이 증가함에 따라 K, Mn의 원소 함유량이 증가하였다. 식물체의 전형적인 필수 영양원소의 함량을 바탕으로 Table 2를 검토하면 제지슬러지의 미흡한 K 함량을 왕겨 첨가제를 혼합함에 따라 식물체의 다량으로 요구되는 K(0.1-3.0%) 함량에 준하는 수준까지 보완할 수 있으며 과량으로 포함하고 있는 Ca의 함량을 식물체 및 지각에 포함된 Ca(0.2~3%, 0.1~5%) 함량 수준으로 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Mg(0.1~1.0%), P(0.1~0.4%) 함량도 왕겨 첨가제의 혼합에 따라 과량 존재하는 영양원소의 함량을 적정 수준으로 조절이 가능할 것이다.

Fig. 6은 제지슬러지와 목분 및 왕겨 첨가제의 혼합 비율에 따라 제조된 인공상토를 육안으로 관찰한 사진이다. 제지 슬러지의 전건중량 대비 10~50%의 첨가제 혼합비율로 제조하였으나 목분 첨가제 30~50%, 왕겨 첨가제 50%에서는 성형 및 팽연장치에서 스크루에 의해 배럴부를 통과하는 원료의 유체흐름이 나빠지

고 다이부 홀(hole)에서 발생하는 부하가 증가함에 따라 다이 홀(hole)의 입구를 막아 상토 제조가 불가능하였다.

제지슬러지로 제조된 인공상토는 제지슬러지 원료와 동일한 연한 갈색의 계통 색상을 나타내었으며 목분 첨가제를 혼합한 상토에는 혼합율이 증가함에 따라 목분 고유의 색상에 영향을 받아 짙은 갈색을 나타내었다. 왕겨 첨가제와 혼합한 상토에서는 혼합율에 따라 점차적으로 적색 계통의 색상을 나타내었다.

Table 3은 목분 및 왕겨 첨가제와 분석용 제지슬러지를 혼합한 인공 상토 원료의 원소 분석 및 제조된 인공 상토의 물리·화학적 특성을 나타내었다.

함수율(moisture content)을 살펴보면 첨가제의 함량이 증가할수록 함수율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 제지슬러지 인공상토보다 첨가제를 혼합한 인공 상토에 섬유 성분의 함량이 증가함에 따라 공기 중의 수분을 재흡수할 수 있는 능력이 높아졌기 때문이다.

가밀도(bulk density)에서는 제조된 인공 상토의 절단 길이 및 첨가제의 혼합비율이 증가함에 따라 가밀도의 수치가 낮아졌다. 이는 인공상토의 절단 길이가 증가함에 따라 단위 부피에 들어갈 수 있는 상토의 양이

Table 3. Physico-chemical properties on mixing ratios of additives and sludge

	pH (1:5)	M.C. (%)	B.D. (gr/cm ³)	W.A. (%)	Element content (%)				C/N ratio	
					C	H	N	S		
Sludge	5 mm		0.600	66.26						
	10 mm	7.90	1.85	0.592	55.28	21.34	2.59	1.40	0.15	15.29
	15 mm			0.452	51.35					
Saw dust	10%	7.74	4.80	0.664	61.71	23.65	2.52	1.59	0.17	14.92
	20%	7.50	6.00	0.501	84.88	23.49	2.96	2.03	0.16	11.56
	30%	N/A	N/A	N/A	N/A	26.38	3.36	4.64	0.13	5.69
	40%	N/A	N/A	N/A	N/A	29.55	3.80	4.75	0.10	6.23
	50%	N/A	N/A	N/A	N/A	33.43	4.53	4.63	0.09	7.23
Rice husk	10%	7.81	2.27	0.543	63.86	23.84	2.92	1.41	0.14	16.91
	20%	7.51	4.56	0.550	65.25	23.88	2.64	1.44	0.15	16.58
	30%	7.60	5.49	0.461	82.36	23.68	2.76	1.30	0.16	18.28
	40%	7.58	5.46	0.441	86.01	25.27	3.38	1.31	0.13	19.36
	50%	N/A	N/A	N/A	N/A	26.72	3.48	1.17	0.14	22.83

M.C. : Moisture content, B.D. : Bulk density

줄어든 것이며 첨가제 혼합비율의 증가에 따라 제조된 상토 알갱이의 무게가 감소하여 가밀도가 낮아진 것으로 판단된다.

흡수율(water adsorption rate)은 인공상토의 절단 길이가 증가할수록 수치가 낮아졌으며 목분 및 왕겨 첨가제의 함량이 증가함에 따라 흡수율은 증가하는 수치를 나타내었다. 이는 제조된 상토의 형태가 미세할수록, 그리고 첨가제의 함량이 증가할수록 상토입자표면에 물 분자를 흡착할 수 있는 능력이 증가되었기 때문이다.¹¹⁾

원소분석(element analysis)에서는 첨가제의 함량이 증가함에 따라 C, H 함량은 증가하였으며 S 함량의 변화에는 영향을 미치지 않았다. N 함량은 목분 함량의 증가에서만 증가하는 경향을 나타내었다. C, H 함량이 증가하는 이유는 첨가제의 함량 증가와 함께 목분 및 왕겨 내에 존재하는 섬유질의 양이 증가하였기 때문이다.¹²⁾

4. 결론

굴참나무 목분 및 왕겨 첨가제는 Wonder Blender를 이용하여 미분화할 수 있었으며 화상분석프로그램을 이용하여 분쇄 전·후 입자크기 분포를 확인할 수 있었

다. 입자크기 분포를 살펴본 결과 분쇄시간을 오래한 왕겨 입자가 목분 입자보다 미세하게 분쇄되었다. 목분 및 왕겨 첨가제와 제지 슬러지를 혼합하여 성형 및 펄연장치를 이용하여 목분 첨가제 10%, 20%와 왕겨 첨가제 10-40% 혼합한 펄릿 형태의 인공상토를 개발하였다. 또한 왕겨 입자가 더 미세하였기 때문에 성형 및 펄연장치에서 원료의 유체흐름 저항성 및 다이부 홀에서 발생하는 부하를 감소시켰을 것으로 판단되며 왕겨 첨가제가 혼합비율에 따른 인공상토 제조에 더욱 용이하다는 것을 알 수 있었다. 왕겨 첨가제의 혼합에 의해 식물체가 요구하는 필수영양소에 준할 수 있는 영양 원소 함량의 조절이 가능하다는 것을 확인하였다.

인용문헌

- 정광용, 21세기를 향한 비료발전과 정책방향 심포지움: 유기성폐자원화학회지, 1(1): 5-19 (1994).
- Shirato, M., Murase, T., Kato H. and Fukaya, S., Studies on the expression of slurries under constant pressure, Kagaku Kogaku, 31: 1125 (1967).
- Cho, J. H., Pulp and paper wastewater treatment technology, Kangwon national university press, pp. 9-11 (2000).
- 김원일, 정구복, 이종식, 김진호, 신중두, 윤순강, 시

- 판 원예용 상토의 중금속 함량, 한국환경농학회지 22(3):232-234 (2003).
5. 김이열, 안인, 우리나라 상토의 특성 및 유통, 토양과 비료, 한국토양비료학회 10: 17-33 (2002).
 6. 임정남, 토양 및 식물체 분석법 - 물리 · 화학 · 미생물 -, 농업과학기술원, pp. 58-65 (2000).
 7. Campbell, D. J. and Henshall, K., Bulk density, Soil analysis : Physical methods, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 329-366 (1991).
 8. 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp.72-73 (2006).
 9. Klute, A., Water retention: Laboratory methods, Method of soil analysis : Part 1. Physical and mineralogical methods, SSSA book series; No. 5, American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, pp. 635-662 (1982).
 10. 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp. 281-290 (2006).
 11. 이민웅, 토양생물학, 동국대학교출판부, pp. 83-95 (2006).
 12. Lewin, M. and Goldstein, I. S., Wood structure and composition, MARCEL DEKKER, INC., pp. 139-181 (1991).