제지슬러지 및 첨가제의 최적 혼합을 통한 인공 상토 개발

Development of Artificial Bed Soils by Optimum Mixing of Sludge and Additives

김경윤[1] · 김철환[1] · 신태기[1] · 백경길[1] · 정호경[1] · 이영민[1] · 박종열[1]

[1]경상대학교 임산공학과

1. 서 론

제지 슬러지는 국내 제지 공장의 폐수 처리장을 거친 후 대량으로 발생되는 유기성 산업폐기물 중의 하나로 연간 150만톤 이상을 배출하고 있으며, 지속적인 지류 생산량의 증가로 인하여 매년 그 발생량이 증가하고 있는 추세이다. 현재 대부분의 제지슬러지는 해양투기 및 매립을 통하여 처리되고 있는 실정이며 정부의 유기성 슬러지 직매립 금지 및 해양환경개선 부담금제 실시가 예상되고 있기 때문에 제지 슬러지를 처리하는 어려움은 더욱 가중될 전망이다. 본 연구에서는 제지 슬러지를 경제적이며 환경친화적으로 재활용하기 위하여 굴참나무 목분 및 왕겨 첨가재 혼입을 통한 인공상토를 제조하고자 한다. 팽연 및 성형화 장치를 이용하여 펠릿 형태의 인공상토를 제조하였으며 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 여러 지점을 골고루 채취하여 실험에 이용하였다. 인공 상토를 제조 시 사용될 제지슬러지는 제지 회사에서 발생되는 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. 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 3mm 천공을 통하여 펠릿(pellet)화된 인공상토를 제조하였다.

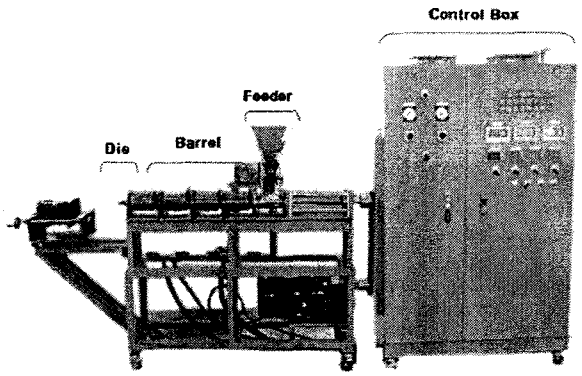


Fig. 1. Pilot forming and expanding apparatus.

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 실체현미경(SZ61, Olympus)을 이용하였으며 화상분석프로그램(Carl Zeiss, Axiovision 4.4)을 이용하여 이진화 영상을 획득하여 입자직경의 분포정도를 살펴보았다. 식물체에 있어야 할 필수영양소 및 다량영양소를 함유량을 알아보기 위하여 Wonder Blender (WB-08, Sanplatec corp., Japan)를 이용하여 20초간 분쇄한 시료 0.2 g을 습식분해액(HNO_3 : H_2SO_4 : $HClO_4$ = 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 측정한 후 수분함량을 감안하여 보정하여 측정하였다. 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 제거하고 시료의 흡수된 수분무게(Mw)를 건조한 시료입자의 무게(Ms)로 나누어 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 목분, 왕겨 첨가제의 현미경 관찰 및 입자크기 분포

Fig. 2는 굴참나무 목분 및 왕겨를 Wonder Blender를 이용한 전처리 과정을 거친 분쇄 전후의 입자이며 실체현미경(SZ61, Olympus)의 10배율 및 20배율로 관찰한 사진이다. 분쇄 전 목분 및 왕겨의 입자 크기는 분쇄 후 보다 매우 큰 입자 크기를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 분쇄 전 목분의 입자는 조대 입자와 미세 입자가 혼재되어 입자크기 범위가 매우 넓다는 것을 확인할 수 있었다. 목분 및 왕겨의 분쇄 후 입자크기는 분쇄 전과 비교하여 미분화되었으나 분쇄 전 목분의 입자와 유사하게 입자 크기 범위가 넓다는 것을 확인할 수 있었다.

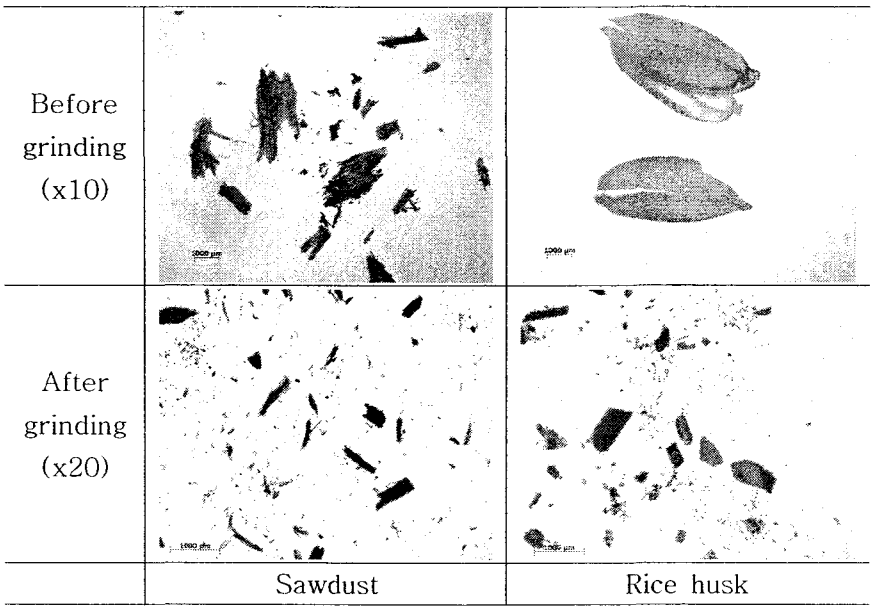


Fig. 2. Microscopic analysis on particles of sawdust and rice husk.

Fig. 2와 같이 실체현미경을 이용하여 획득한 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.

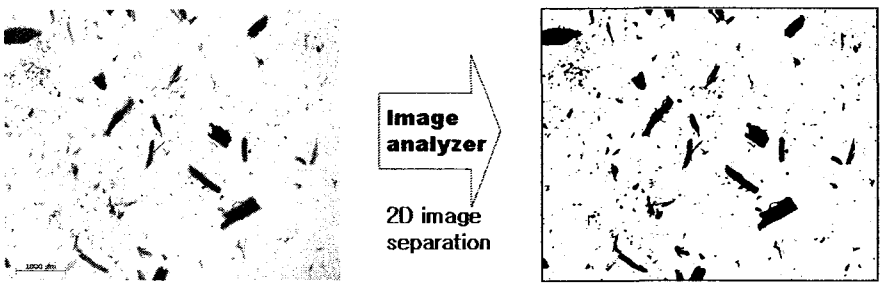


Fig. 3. Separated 2D image by an image analyzer on ground particles of

sawdust (×20 magnification).

Fig. 4와 5는 화상분석프로그램에 의하여 분리된 이진화 영상을 바탕으로 하여 분석한 목분과 왕겨의 분쇄 전후 입자크기 분포를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에 나타난 목분의 분쇄 전후 입자 크기 분포 그래프를 살펴보면, 분쇄 전에는 50-1000 ㎛ 범위에서 높은 함량을 나타내며 다양한 크기의 입자 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 분쇄 후에는 400 ㎛ 이상의 입자는 거의 존재하지 않게 되었으며 10-50 ㎛의 입자들이 다량 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에서 왕겨의 분쇄 전후 입자 크기에서 분쇄 전에 모든 왕겨 입자는 1000 ㎛ 이상의 입자 크기를 나타내었으며 분쇄 후에는 500 ㎛ 이하의 입자를 나타내었다. 또한 분쇄 후의 입자를 살펴보면 10-50 ㎛의 입자 함량이 40%에 해당하며 50-100 ㎛ 입자가 다량 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

분쇄 후 입자크기 분포를 서로 비교하면 목분 입자는 10 ㎛에서 17.30%, 20 ㎛에서 34.79%를 나타내며 왕겨 입자는 10 ㎛에서 34.02%, 20 ㎛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 제조시 성형 및 팽연장치의 Barrel 부를 통과하는 원료의 유체흐름 저항 및 천공을 가진 다이부 판넬에서 발생하는 부하를 감소시킬 것으로 판단된다.

before and after grinding sawdust.

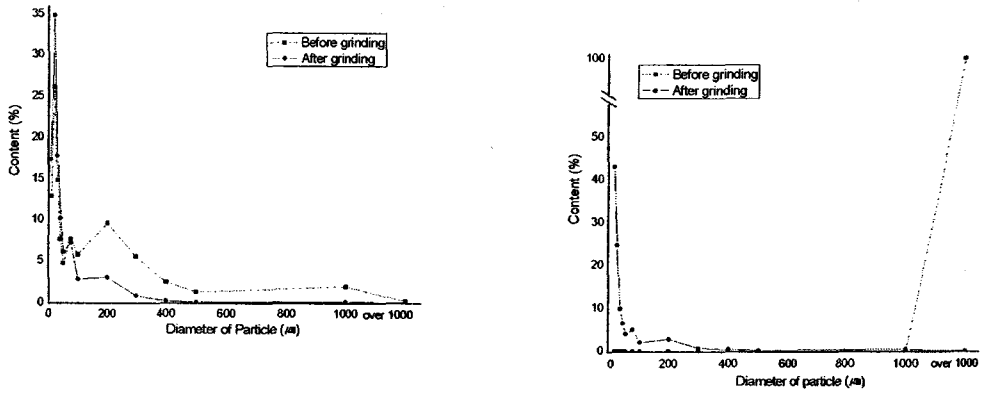


Fig. 4. Particle size distribution

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

식물이 생육과 대사과정에 필요한 물질을 흡수하고 이용하는 현상을 식물영양(plant nutrition)이라 하고 이에 필요한 물질을 영양소(nutrient)이라 한다. 식물이 정상적으로 성장하고 생명현상을 유지하는 데 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.

Table 1. Normal contents of plant nutrients

다량필수식물영양소(%)		미량필수식물영양소(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		

각 영양 원소들 중 칼륨(Kalium, 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%이며 식물에서는 0.1-0.4% 함량을 가지고 있다. 곡류작물의 경우 인 함량이 0.2% 이하가 되면 현저한 생육저해나 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 생장과 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 분석용 제지슬러지를 혼합한 인공상토 원료의 필수 영양원소 함유량을 나타내었다. 굴참나무 목분 및 왕겨 첨가제를 혼합 비율을 증가시킴에 따라 대부분의 영양 원소 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 적정 수준으로 조절이 가능할 것이다.

Table 2. Concentration of plant nutrients on a mixing rate of additives and sludge.

		K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
		(%)				(mg/kg)					
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. 6은 제지슬러지와 목분 및 왕겨 첨가제의 혼합비율에 따라 제조된 인공상토의 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 나빠지고 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 색상 짙은 갈색을 나타내었다. 왕겨 첨가제와 혼합한 상토에서는 혼합율에 따라 점차적으로 적색 계통의 색상을 나타내었다.

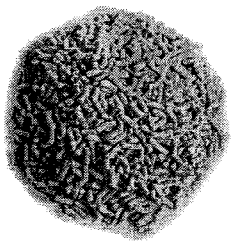
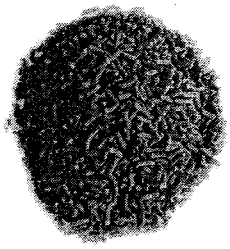
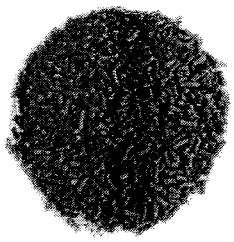
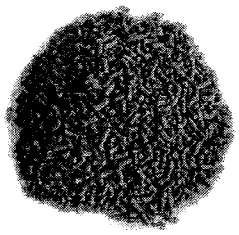
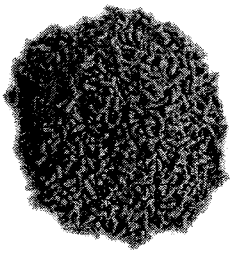
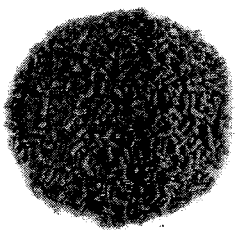
제지슬러지	목분 10%	목분 20%	목분 30%
			N/A
왕겨 10%	왕겨 20%	왕겨 30%	왕겨 40%
			

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

Table. 3은 목분 및 왕겨 첨가제와 분석용 제지슬러지를 혼합한 인공 상토 원료의

원소 분석 및 제조된 인공상토의 물리·화학적 특성을 나타내었다. 산도(pH)를 살펴보면 제지슬러지에 목분 및 왕겨 첨가제의 혼합량이 증가함에 따라 pH가 감소하는 것을 알 수 있다. 토양에서는 산도가 pH 5.5-7일 때 토양 미생물의 활성 및 영양성분의 이온흡착이 가장 용이하며, pH가 4-5로 강산성이 되면 일반적으로 식물에 대하여 독성을 나타낼 수 있는 가용성 금속의 농도가 높아진다. 제지슬러지에 존재하는 $CaCO_3$의 탄산이온($-CO_3^{2-}$)은 토양내로 녹아들어 pH가 상승한 것으로 판단된다. 그러므로 과도한 산성 토양에 산도 개선제로서의 역할을 할 수 있을 것이며 첨가제 함량을 통해 pH 조절이 가능 할 것이라 판단된다.

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

		pH (1:5)	M.C. (%)	B.D. (gr/㎤)	W.A. (%)	Element content (%)				C/N ratio
						C	H	N	S	
Sludge	5mm	7.90	1.85	0.600	66.26	21.34	2.59	1.40	0.15	15.29
	10mm			0.592	55.28					
	15mm			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

함수율(moisture content)을 살펴보면 첨가제의 함량이 증가할수록 함수율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 제지슬러지 인공상토보다 첨가제를 혼합한 인공상토에 섬유성분의 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 인공상토 절단 길이의 증가에 의해 단

위 부피에 들어갈 수 있는 상토의 양이 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 첨가제의 함량이 증가할수록 상토입자표면에 물 분자들을 흡착할 수 있는 표면력이 증가되었기 때문이다.

원소분석(element analysis)에서는 첨가제의 함량이 증가함에 따라 C, H 함량은 증가하며 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 증가하기 때문이며 섬유질은 D-글루코오스가 β-1, 4 결합으로 다수 중합되어진 셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$)이기 때문이다.

4. 결 론

굴참나무 목분 및 왕겨 첨가제는 Wonder Blender를 이용하여 미분화할 수 있었으며 화상분석프로그램을 이용하여 분쇄 전·후 입자크기 분포를 확인할 수 있었다. 입자크기 분포 그래프를 살펴본 결과 분쇄시간을 오래한 왕겨 입자가 목분 입자보다 미세하다는 것을 알 수 있었다. 목분 및 왕겨 첨가제와 제지 슬러지를 혼합하여 성형 및 팽연장치를 이용하여 목분 첨가제 10%, 20%와 왕겨 첨가제 10-40% 혼합한 펠릿 형태의 인공상토를 개발하였다. 또한 왕겨 입자가 더 미세하였기 때문에 성형 및 팽연장치에서 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

1. 임정남, 토양 및 식물체 분석법 - 물리·화학·미생물 -, 농업과학기술원, pp. 58-65, 2000.
2. 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp. 72-73, 2006.

3. Soil and plant analysis council, Inc., Soil analysis handbook of reference methods, CRC Press, pp. 219-214, 1999.
4. 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp. 202-210, 2006.
5. Paul R. Bloom, Soil pH and pH buffering, Malcolm E. Sumner, Handbook of soil science, CRC Press, pp. B-333~B-352, 2000.
6. 이민웅, 토양생물학, 동국대학교출판부, pp. 83-95. 2006.
7. Menachem Lewin and Irving S. Goldstein., Wood structure and composition, MARCEL DEKKER, INC., pp. 139-181, 1991.