

상토 및 육묘 포트의 개발을 위한 제지 슬러지의 이용 (제1보)

- 제지 슬러지의 물리·화학적 분석 -

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 (I)

- Physico-chemical analysis of paper sludges -

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

Paper sludges collected from three different paper mills were physico-chemically analyzed in order to use them as raw materials for making bed soils and seedling pots. The sludge from a fine paper mill contained lots of inorganic pigment particles used for coating, as those from a newsprint mill and a tissue mill had not. It was clearly through XRD analysis confirmed that all sludges included calcium carbonate. The paper sludge from the tissue mill contained the greatest amount of particles, which would contribute to water absorption and nutrient storage. The sludge from the fine paper mill had the highest density due to many inorganic elements. While the ash content and the total nitrogen content were the highest in the sludge from the fine paper mill, the C/N ratio was the lowest in the fine paper mill sludge. All sludges seemed to have insufficient contents of potassium. The sludges from the newsprint mill and the tissue mill showed more silicon contents than that from the fine paper mill. It was concluded that the sludge from the fine paper mill would be able to be the most efficient raw materials for making bed soils and seedling pots and the other two sludges would be more efficient for intensive culture for crops such as

• 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

rice and grain with additional supplement of nitrogen and other nutrients.

Keywords : paper sludge, physico-chemical analysis, bed soils, seedling-pot, plant nutrition, heavy metals

1. 서론

현재 국내에서는 여러 제지회사에서 신문용지, 인쇄용지, 크라프트지, 화장지 벽지 등 다양한 지종이 생산되고 있으며, 이들 제지공장에서 발생하는 제지슬러지(paper mill sludge)의 양은 2002년 기준 약 160만톤으로 추정되고 있다. 제지슬러지는 제지회사들의 지속적인 증설 및 종이 시장의 증가로 인하여 그 발생량은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 현재 대부분의 제지슬러지는 해양투기, 매립, 소각 등의 방법으로 처리되고 있으며 각 처리방법별로 27.6%, 19.6%, 11.8% 비율로 처리되어지고 있으며 해양투기 처리가 가장 높은 비중을 차지하고 있다.^{1,2)}

한편 정부는 2002년 이후부터 유기성 슬러지의 직매립 금지 및 해양환경개선부담금제의 도입으로 인하여 제지회사들의 슬러지 처리 비용에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 그러나 제지 슬러지가 갖는 높은 함수율과 이로 인한 연소의 어려움으로 인하여 해양투기 및 매립비용(20,000~30,000원/ton)의 2배인 약 55,000원/ton에 이르는 처리비용을 요구하는 소각 처리방식에 차지하는 비중이 높아지고 있다.^{3,4)} 현재 제지슬러지의 처리를 위해 해양투기 및 매립 등의 처리 방법이 일반적으로 사용되고 있으나 점차 매립지에 반입되는 폐기물의 규제 강화, 매립장으로 이용가능한 부지의 감소, 지역주민의 반대에 따른 매립장 선정 및 부지 확보의 어려움, 그리고 매립장 건설 및 운영비용 등의 상승으로 슬러지 처리를 위한 다각적인 노력과 장기적인 대안이 절실한 실정이다.⁵⁾

많은 공장에서 배출하는 폐기물 처리에 관한 어려움은 세계적인 현상이다. 이와 관련하여 1992년 6월에 UN은 환경과 개발에 관한 리우선언에서 채택한 의제 21을 통하여 지구의 환경보호 차원에서 이들 폐기물에 대한 적절한 처리방안을 제시하였다. 의제 중 21의 14장에서는 폐기물 자원의 합리적 보전, 관리 및 이용을 위하여 농업적으로 유용한 유기 및 무기성 폐자원을 적

극적으로 재활용할 것을 권장하고 있다.⁶⁾ 따라서 버려두면 공해가 될 유기성 부산물 및 폐기물들을 효과적으로 재활용하는 것은 재생 불가능한 자원을 절약하게 함으로써 농업의 지속성을 높이며 환경을 보존하는 효과까지 갖는다.⁷⁾

또한 일부의 제지슬러지는 유기물과 식물영양성분의 함량이 높고 중금속 함량이 낮아 농업적 이용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.^{8,9)} 뿐만 아니라 잡초의 발생을 억제하고 토양의 침식을 방지하는 등 다양한 농업 분야에서의 유용성이 알려져 있다.¹⁰⁾

본 연구에서는 제지 슬러지를 경제적 및 환경친화적으로 재활용하기 위하여 인공 상토 및 육묘포트로 제조하기 위한 기초 원료로 사용하고자 하였다. 상토 및 생분해성 육묘 포트에 사용되는 기초 원료로서의 적합성을 분석하기 위하여 상이한 지종을 생산하는 제지회사에서 발생하는 슬러지를 수집하여 이들 슬러지의 물리·화학적 분석을 하였다. 이를 통해 식물 생육에 필요한 필수 영양성분의 존재 유무, 유해 중금속의 함유 여부를 분석하여 상토 및 생분해성 육묘 포트 제조를 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

시료는 생산 지종이 각기 다른 제지 회사의 폐수처리장에 발생하는 탈수 케이크(dewatered cake) 형태 슬러지 더미에서 간격 40cm 지점마다 골고루 채취하고 채취한 슬러지를 혼합하여 이용하였다. 슬러지는 Table 1

Table 1. Sludges collected from different paper mills

Mill type	Sample types
Wood-free paper mill	A
Newsprint mill	B
Tissue mill	C

과 같이 상이한 지종을 생산하는 세 곳의 공장에서 수집하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 상질지 및 고급 아트지를 생산하는 회사의 시료를 A, 탈목된 재생펄프를 사용하여 신문용지를 전문적으로 생산하는 회사의 시료를 B, 그리고 카톤 폐지를 사용하며 화장지를 생산하는 회사의 시료를 C로 명명하였고, 이들 슬러지를 이용하여 각각의 물리·화학적 특성을 분석하였다. 채취된 시료는 부패 방지 및 보관을 위하여 그늘에서 깨끗한 비닐 위에 얇게 펴서 대기 중의 이물질이 혼입되지 않도록 각별히 유의하여 서서히 건조시켰다.

2.2 제지 슬러지의 물리·화학적 분석

제지슬러지의 현미경적 구조를 관찰하기 위하여 주사전자현미경(JSM-6400, JEOL)을 이용하였으며, 제지슬러지를 구성하는 성분들의 결정 패턴의 차이를 알아보기 위하여 X선 회절분석법(XRD: D8 DISCOVER with GADDS, Bruker AXS)을 이용하였다. 회사별 제지슬러지의 입도분석은 Pipette법을 이용하여 온도에 따른 하강시간이 지난 후 25 mL를 Pipette으로 취하여 0.02 mm (20 μm)와 0.002 mm (2 μm) 입자의 함량을 알아 보았으며,¹¹⁾ 입자밀도(specific gravity, particle density)는 mass flask를 이용하여 제지슬러지 입자에 의해 대체되는 물의 부피로 제지슬러지의 무게를 나누어서 계

산하였다. 제지슬러지의 pH는 시료와 물의 비율을 1:5로 하여 pH 측정기(Istek 735p)로 측정하였으며, 전질소(Total Nitrogen content)는 Kjeldahl법을 이용하였다. 회분함량(Ash content)은 TAPPI T-211에 의거하여 525±25℃에서 슬러지 종류별로 3~4시간 연소시킨 후 분석하였다. 유기물 등에 포함되어 있는 C, H, N, S는 연소법에 의한 원소분석기(CHNS-932, Leco)를 이용하였다. 식물체에 있어야 할 필수영양소 및 다량영양소를 함유량과 토양에 유해하여 토양을 오염시킬 수 있는 중금속의 함량을 알아보기 위하여 Wonder Blender (WB-08, Sanplatec corp., Japan)를 이용하여 20초간 분쇄한 시료 1 g을 습식분해액(HNO₃: H₂SO₄:HClO₄ = 10:1:4) 25 mL로 분해시킨 후 No.2 여과지를 이용하여 잔사를 분리하고 여액은 희석하여 ICP spectrometer (Atomscan25, TJA)로 함유된 원소의 함량을 정량하였고,¹²⁾ 여지상의 잔사는 후드 내의 열판에서 1차 탄화시킨 후 600℃ 전기로에서 2시간정도 태워 조규산(%)을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제지 슬러지의 육안·광학적 관찰

Fig. 1은 각각 생산 지종이 상이한 제지회사에서 수

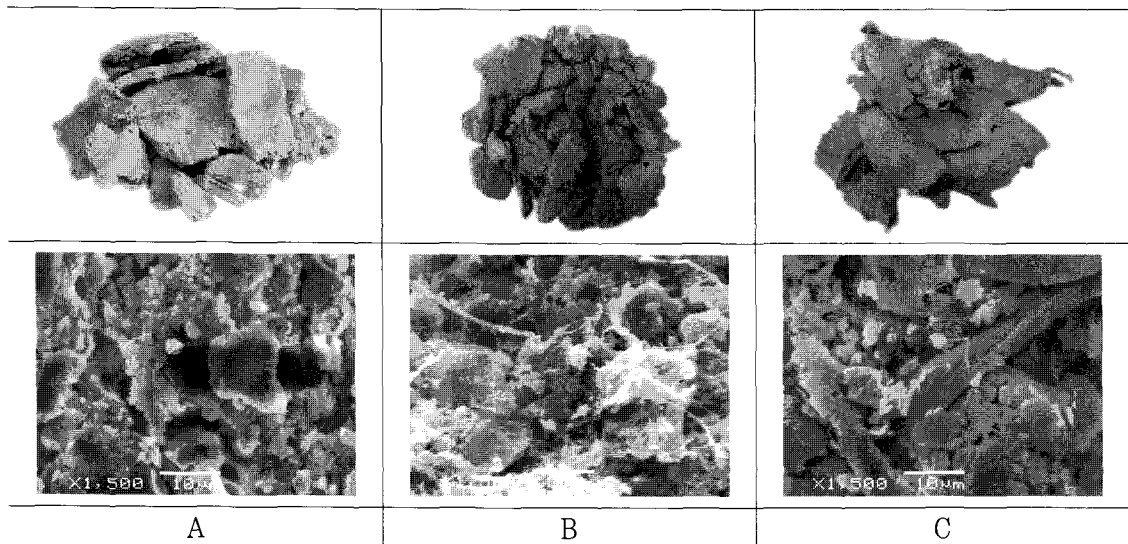


Fig. 1. Paper sludges collected from different paper mills.

집된 제지슬러지의 형상을 육안적 및 광학적으로 관찰한 사진이다. 육안적으로 살펴보면 시료 A는 슬러지 표면에서 붉은색을 띠며 시료 B는 회청색을, 그리고 시료 C는 밝은 회백색을 나타내고 있다. 이는 시료 A에서는 산화철 형태인 Fe³⁺가 많이 존재하는 것으로 사료되며 시료 B는 리사이클링 처리시 발생하는 잉크 및 환원형태의 Fe²⁺이 많이 존재함에 따라 회청색을 나타내는 것으로 판단되어진다. 그리고 시료 C는 회분의 함량이 낮은 대신 천연펄프 섬유가 다량 함유된 슬러지이기 때문에 철 원소가 많이 포함되지 않아 밝은 계통의 회백색을 나타낸 것으로 판단된다.

제지 슬러지의 내부 단면을 관찰한 주사전자현미경 사진에서는 시료 A가 섬유질을 많이 함유하고 있지 않으며 클레이 혹은 탄산칼슘 등과 같은 무기계 안료 입자들이 많이 존재하는 것으로 추정된다. 이는 상질지 및 고급 아트지를 제조할 때 사용되는 충전제 혹은 안료들을 사용하기 때문에 이들이 최종적으로 배출되는 제지 슬러지에 다량 함유된 것으로 판단되어진다. 시료 B에서는 시료 A보다는 많은 섬유질들을 볼 수 있으나 섬유 자체가 많이 손상되어있는 것을 알 수 있다. 이는 재생 섬유를 많이 사용하는 신문용지공장에서 발생하는 제지 슬러지이기 때문이다. 시료 C에서는 섬유들의 상태가 가장 양호한 것을 알 수 있으며 무기 안료 입자보다 섬유를 많이 함유하고 있음을 알 수 있다. 이는 화장지 제품을 생산하는 경우에는 천연펄프에 가까운 밀크 카톤 폐지를 사용하기 때문이다.

3.2 제지 슬러지의 XRD, 입도 및 입자밀도 분석

제지슬러지의 결정을 이루는 성분을 X선 회절분석기를 사용하여 분석하였으며, 이때 제지슬러지에 대하

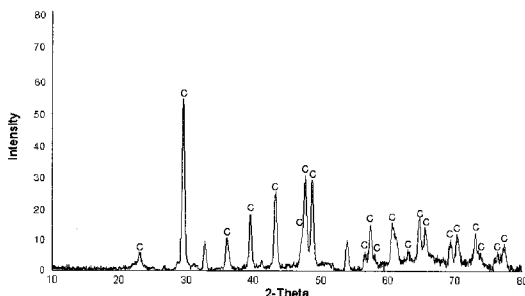


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of paper sludge.

여 10~80°, 회절각 2θ로 하였으며 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 제지 슬러지내에서 탄산칼슘(C: CaCO₃) 성분을 나타내었다. Fig. 2는 시료 A에 대한 XRD 패턴이며 대부분의 피크가 CaCO₃을 나타내었으나 32.9°와 53.7°에서는 방향성을 가지는 결정구조를 이루고 있어 구조성분을 확인하기가 어려웠다.

Fig. 3은 제지 슬러지의 입도 분포를 나타낸 그래프이다. 시료 C가 2 μm 이하 입자의 함유량이 가장 높았으며 그 다음으로 시료 A, 시료 B 순으로 나타내었다. 따라서 2 μm 이하 및 2~20 μm 입자의 함유량이 가장 적은 시료 B는 수분보유능력 및 양분저장능력이 현저하게 떨어질 것으로 판단된다. 2 μm 이하 입자들은 교질의 특성과 함께 표면전하를 가지기 때문에 수분과 양분을 흡착할 수 있는 능력이 우수하여 이들 입자들은 토양 내에서는 화학적 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 그러나 이들 입자간 공극은 매우 작기 때문에 이들 함유량이 많을 경우에는 수분과 공기의 유통을 느리게 만들 수 있다.

입자 밀도(particle density)는 유기물을 포함하는 시료의 고형 입자 자체의 밀도를 의미한다. Fig. 4는 제지 슬러지의 입자밀도를 나타낸 그래프이다. 시료 A가 가장 높은 밀도를 나타내었으며, 시료 B, 그리고 C 순으로 나타내었다. 입자밀도는 물질의 고유한 특성이지만 철망간 등과 중금속이 함유되어진 시료의 입자 밀도는 다른 시료에 비하여 상대적으로 높은 수치를 나타내게 된다. 반면에 유기물이 많이 함유되어 있는 토양은 유기

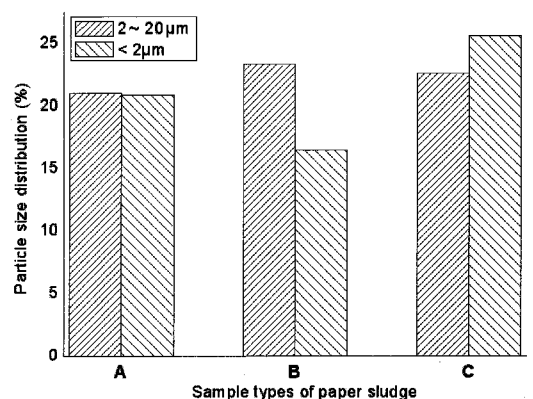


Fig. 3. Particle size distribution of different paper sludges.

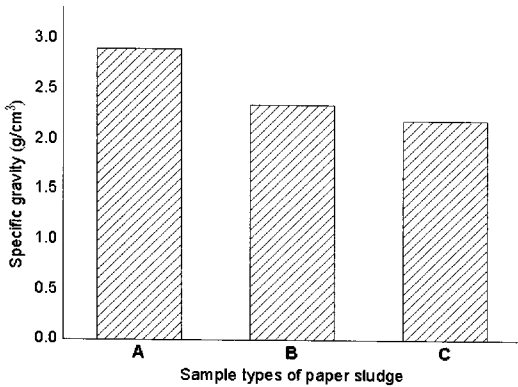


Fig. 4. Particle density of different paper sludges.

물의 낮은 밀도 때문에 입자 밀도의 값이 낮아지게 된다. 따라서 시료 A 및 B는 철과 같은 무기 원소를 다소 많이 함유할 것으로 판단되어지며 시료 C에서는 SEM 사진에서 나타났듯이 유기물 성분인 섬유질을 많이 가지고 있을 것으로 사료된다.

3.3 제지슬러지의 물리·화학적 특성

Table 2에서는 제지슬러지의 물리·화학적 특성을 나타내었다. 회분함량은 시료 A가 가장 높으며 시료 C가 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 Fig. 1의 현미경 사진과 Fig. 4의 입자 밀도에서 살펴본 바와 같이 시료 C가 가장 많은 섬유질을 가지고 있다는 것을 의미한다. 토양 내에서 산도(pH)는 pH 5.5~7일 때 토양 미생물의 활성 및 영양성분의 이온흡착이 가장 용이하게 되며, pH가 4~5로 강산성이 되면 일반적으로 식물에 대하여 독성을 나타낼 수 있는 가용성 금속의 농도가 높아진다.^{13, 14)} 제지슬러지에 존재하는 CaCO₃의 탄산이온(CO₃²⁻)은 토양내로 녹아들어 pH를 상승시키는 작용을 한다. 그러므로 과도한 산성 토양에 산도 개선제로서의 역할을 할 수 있을 것으로 사료되었다.

질소(Nitrogen, N)는 식물의 생장에 가장 많이 요구되는 필수 무기영양소이며 식물의 영양 생식에 많은

양이 흡수되며, 만약 질소가 결핍되게 되면 식물의 생장이 지연되고 최종적으로는 잎의 황화현상이 발생하여 괴사하게 된다. 따라서 전질소 함량이 높은 시료 A를 이용하여 육묘포트를 제조하게 된다면 다른 시료들에 비하여 육묘의 영양 생식에 고른 성장을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

토양 내에 유기물이 가해지면 탄소의 일부는 에너지원으로 사용되어 CO₂로 배출되고, 일부는 부식을 형성한다. 미생물의 유기물 분해와 관련된 중요한 요인 중 하나가 탄소와 질소의 비율인 탄질률(C/N ratio)이다. 탄질률이 큰 유기물은 탄질률이 작은 유기물보다 분해 속도가 훨씬 느리며 탄질률이 20~30보다 높은 유기물이 토양에 가해지면 유기물의 분해 과정동안에 필요한 질소가 부족하여 질소기아현상(nitrogen starvation)을 나타낸다.¹⁵⁾ 따라서 탄질률이 20보다 낮은 시료 A가 상토 제조에 이용되는 것이 보다 적절하며 유기물의 분해를 촉진할 것으로 판단되며 질소 함량이 낮아 탄질률이 높아진 시료 B 및 C는 질소 성분을 첨가해 주어야 할 필요가 있다.

3.4 필수식물영양소 및 중금속 함량

Table 3은 제지슬러지 내에 존재하는 식물체의 필수 영양소 함유량을 나타내었다. P와 K는 식물체에 다량으로 필요한 일차 영양소이며 Ca와 Mg는 이차영양소, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo 및 B는 미량영양소이다. 각 영양원소들을 살펴보면 인(phosphor, P)은 식물의 광합성을 통하여 얻어진 에너지를 저장하고 전달하는 기능을 하며 토양 중 함량은 0.005~0.15%이며 전형적인 식물체는 약 0.1~0.4% 함량을 가지고 있다. 칼륨(potassium, K)은 식물체의 생리화학적 기능을 담당하며 식물체 내에 존재하는 함량은 1.0~3.0% 정도이며 지각에 0.5~2.5% 정도 함유하고 있다. 칼슘(calcium, Ca)은 식물의 생장과 대사활동에 필수적인 영양원소이며 토양의 대개 0.1~5.0% 함량을 차지하며 식물에서는 0.2~

Table 2. Physico-chemical properties of paper sludge

Sample name	pH (1:5)	Ash (%)	T-N (%)	Element contents (%)				C/N ratio
				C	H	N	S	
A	7.80	61.79	1.29	22.21	2.58	1.37	0.16	16.18
B	7.89	52.55	0.45	25.00	3.37	0.50	0.16	50.15
C	8.11	32.99	0.38	25.67	3.58	0.41	0.09	62.47

Table 3. Element analysis of paper sludges required for plant nutrition

Sample	Macronutrient (%)				Micronutrient (mg/kg)					
	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo	B
A	0.216	0.099	1.014	2.633	9429.3	6.91	0.89	61.95	61.30	9.87
B	0.041	0.039	0.828	0.810	13433.9	195.37	5.24	44.97	142.89	12.26
C	0.315	0.025	0.453	0.795	1716.7	49.31	5.30	35.21	67.80	8.48

3.0%의 함량을 가지고 있다.¹⁶⁾ 시료 A와 C는 적정 수준의 P, Ca, Mg 등을 함유하고 있으며 시료 B는 시료 A와 유사한 함량을 가지고 있으나 필수 영양소 P를 함유하지 못하여 인산질 성분을 첨가하여 사용할 필요성이 있다. 또한 모든 시료에서 Fe, Cu, Zn, Mn, Mo 및 B 등의 미량원소는 적정수준 포함되어져 있었으나 K의 함량이 미흡하므로 역시 보완할 필요가 있다.

규소(silicon, Si)는 잎이나 줄기의 피층세포에 축적되어 조직의 물리적 강도를 높여주어 벼, 밀, 보리 등과 같은 수생 화분과 식물의 경우에는 규소가 일부 필수원소로 인정되고 있다. 즉, 벼의 경우 규소가 부족하면 성장이 완료된 잎에서 괴사 및 위조현상이 나타나며 생장을 저해하게 된다. 또한 규소는 잎의 빛 흡수를 향상시켜 광합성 효율이 높아지며 병균의 감염을 방지하고 충해를 경감시킬 수 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 따라서 Table 4의 규소 함량이 높은 시료 B와 C를 벼 등의 밀식 재배되는 곡류작물을 위한 육묘포트 제조에 이용한다면 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5는 제지슬러지 내에 존재하는 중금속 함량을 나타낸 표이다. Ni, Co, Se, Cd, As, Hg 및 Pb 등의 중금속은 검출되지 않았으며 Cr은 모든 시료에서 미량 검출

되었다. 토양환경보전법령의 토양오염 우려기준(Cr: 4 mg/kg) 및 토양오염 대책기준(Cr: 10 mg/kg)에 비하여 미미한 수준이다.

4. 결론

제지 슬러지를 인공 상토 및 육묘포트로 제조하기 위한 기초 원료로 활용하고자 생산 지종이 다른 제지 회사에서 채취한 제지 슬러지의 물리·화학적 분석을 하였다. SEM 사진에서 시료 A는 고급 아트지에 사용되는 도공용 안료 입자들을 많이 함유하고 있으며 시료 B는 재생 고지 등의 손상된 섬유들을 확인하였으며 시료 C는 많은 양의 천연섬유를 확인 할 수 있었다. 모든 제지 슬러지의 XRD 패턴을 살펴본 결과, 모든 제지 슬러지에 CaCO₃ 성분이 분포한다는 것을 확인하였다. 입도 분포는 시료 C가 2 μm 이하 입자의 함유량이 가장 높다는 것을 확인하였으며 이는 수분보유능력 및 양분저장능력이 탁월하다는 것을 말한다. 입자 밀도는 시료 A가 가장 높은 밀도를 나타내었으며 이는 다량의 무기 원소를 포함하고 있기 때문이다. 회분 및 전질소 함량은 시료 A가 가장 높았으며 탄질물도 20보다 낮은 시료 A가 보다 나은 것을 알 수 있었다. 필수식물영양소는 시료 A 및 C가 적정 수준의 함량을 가졌으나 모든 시료에서 K의 함량이 미흡하였다. 규소 성분은 시료 B, C의 함량이 높았으며 모든 제지슬러지의 중금속함량은 미검출되거나 우려할 수준은 아니었다. 결론적으로 전질소 함량

Table 4. Silicon content of different paper sludges

	A	B	C
Silicon content (%)	11.21	22.56	21.89

Table 5. Concentration of heavy metals contained in different paper sludges

Sample (unit: mg/kg)	Ni	Co	Se	Cd	As	Hg	Pb	Cr
A	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.32
B	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.65
C	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.29

ND: not detected.

이 높으며 탄질물이 낮은 시료 A가 인공 상토 및 육묘포트 제조의 사용되는 것이 바람직하며 시료 B, C는 다수의 영양원소 및 질소 함량을 보완한다면 규소 성분이 높기 때문에 벼 등의 밀식 재배되는 곡류작물의 육묘포트로 이용될 수 있을 것이다.

인용문헌

- 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).
- 최용철, 하수슬러지 처리 정책 방향, 직매립금지에 따른 하수슬러지 처리를 위한 symposium, pp. 81-96 (2003).
- 산업자원부 산업환경과, 환경친화적 산업구조구축을 위한 비전과 발전전략 - 제지산업 - (2003).
- Thacker, W. E., Silvicultural land application of wastewater and sludge from the pulp and paper industry. In D. W. Cole, C.L. Henry, and W. L. Nutter (eds.). *The Forest Alternative for Treatment and Utilization of Municipal and Industrial Wastes*. University of Washington Press, Seattle and London: pp. 41-54 (1986).
- 신제성, 정이근, 한기학, 산업폐기물의 활용현황과 전망. 환경보전형 농업을 위한 토양관리 심포지엄, 한국토양비료학회, pp. 7-30 (1993).
- 홍종운, 유기자원의 활용현황과 전망; 유기농업을 중심으로, 환경보전형 농업을 위한 토양관리 심포지엄, 한국토양비료학회, pp. 31-67 (1993).
- 한기학, 유기질비료 자원으로서의 산업폐기물, 한국토양비료학회지, 11: 195-206 (1978).
- 정갑영, 신제성, 박영선, 한기학, 산업폐기물의 비료화에 관한 연구, 한국토양비료학회지, 14: 83-87 (1981).
- Edwards, J. H., Walker, E. A., Guertal, L. D. and Eason, J. T., Options for recycling organics on farm land. *BioCycle*, November, pp. 66-68 (1994).
- Gee, G. W. and Bauder, J. W., Particle-size analysis. *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. 383-411 (1982).
- Soil and plant analysis council, *Soil analysis handbook of reference methods*, St. Lucie Press, Washington, D. C., pp. 219-214 (1999).
- 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp. 202-210 (2006).
- Paul R. Bloom, Soil pH and pH buffering, Malcolm E. Sumner, *Handbook of soil science*, Sumner M. E., CRC Press, pp. B-333 ~ B-352 (2000).
- 이민웅, 토양생물학, 동국대학교출판부, pp. 141-145 (2006).
- 정종배, 양재의, 김길용 외 11명, 토양학, 향문사, pp. 281-333 (2006).
- Parry, D. W. and Smithson, F., Types of opaline silica deposition in the leaves of British grasses. *Ann. Bot.* 28:169-185 (1964).
- Lewin, J. and Reimann, B. E. F., Silicon and plant growth. *Annu. Rev. plant Physiol.*, 20: 289-304 (1969).
- Deren, C. W., Datnoff, L. E., Snyder, G. H. and Martin, F. G., Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic Histols. *Crop Sci.*, 34: 733-737 (1994).