

## 폐수처리 슬러지와 퇴비 및 목탄의 화학적 특성과 구조에 관한 연구

임기표<sup>†</sup> · 위승곤<sup>†</sup>

(2002년 11월 26일 접수; 2003년 2월 5일 채택)

## A Study on the Chemical Composition and Structure of Sludge, Compost and Charcoal

Kie-Pyo Lim,<sup>†</sup> and Seong-Gon Wi<sup>†</sup>

(Received on November 26, 2002; Accepted on February 5, 2003)

### ABSTRACTS

To understand the chemical structure of sewer sludge in comparison with commercial compost and charcoal used as a soil improver, it was carried out to analyse their ash contents and metal ions, and to elucidate the chemical structure of their residuals after a sequential treatment of alcohol-benzene(1:2) extraction in Soxhlet, 3% HCl reflux and 79% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hydrolysis, using CHNS analyzer and solid C-13 NMR spectrometer.

The results obtained were as follows:

1. Ash content of sludge was about 46% that is higher than those of compost (17%) and charcoal (4%).
2. The residual of sludge after a sequential treatment of HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hydrolyses had high ash content about 23%, too.
3. The sludge seems to be suitable to the soil improver because the content of heavy metal ions in sludge was near the compost and below the organic fertilizer standard .
4. Elemental composition of sludge residual after HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hydrolyses was C<sub>56</sub>H<sub>91</sub>O<sub>12</sub>N<sub>2</sub>S = (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>2</sub>(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>7</sub>C<sub>2</sub>H<sub>43</sub>O<sub>2</sub>N<sub>2</sub>S, similar to C<sub>103</sub>H<sub>122</sub>O<sub>33</sub>N<sub>6</sub>S = (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>6</sub>(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>10</sub>C<sub>7</sub>H<sub>22</sub>O<sub>3</sub>N<sub>6</sub>S of compost.
5. The sludge residual had proved to have both considerable aliphatic and aromatic groups, but the compost residual to have mainly aliphatic groups and the charcoal to have mainly aromatic groups, through the peak analysis of solid C-13 NMR charts.

• 이 논문은 2001년도 전남대학교 연구년 교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This study was financially supported by Chonnam National University in his sabbatical year of 2001).

† 전남대학교 농업과학기술연구소 산림자원조경학부(Faculty of Forest Resources and Landscape Architecture, Inst. of Ag. & Tech., College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University)

6. So, the sewer sludge is proved to have a considerable amount of aromaticity like in woody biomass containing lignin.

**Keywords :** *compost, sludge, charcoal, solvent extraction, black carbon, soil, humus, elemental analysis, solid C-13 NMR, lignin, PAH (polyaromatic hydrocarbon),*

## 1. 서론

Little(1999)에 따르면 미국의 오하이오주는 슬러지 중에 함유된 상당량의 비료성분(N, P, K)과 유기탄소 자원 때문에 제한된 작물과 지역에 하수슬러지의 농경지 적용을 권장하고, 텍사스 주립 수자원연구소(2002)에 따르면 벼와 목화 및 땅콩재배에 사용하기도 하지만 주로 초지와 사료작물에 사용한다고 한다.

그러나 미국 농무성의 환경위킵그룹(1998)은 유기농장에 유기질 비료로 하수슬러지를 사용하는 것은 극미량이지만 하수슬러지에 포함된 각종 중금속과 농약 성분 및 산업용 유기용매성분 때문에 식량과 각종 농산물 소비자가 거부하기 때문에 조금이라도 사용하는 것을 금지하여야 한다고 주장하고, 스웨덴의 Renner(2000)는 국가적 및 국제적 맑은 물 규정에 따라 하수슬러지의 해양투기 금지가 처음으로 시작된 1980년대 이래 소각하지 않으면 광범한 매립지를 갖추어야 하기 때문에 대부분의 경우 현재로서는 문제가 되지 않는 수준이기 때문에 하수 슬러지에 함유된 비료성분(N, P, K)과 유기질 탄소를 이용하기 위하여 농경지에 적용하는 것을 주장하고 있으나 미래의 환경위험과 생태계에 대한 영향을 고려하여 반대하고 있다.

한편 미국의 Nikiforoff (1938)에 따르면 전통적으로 사용하는 퇴비는 목질바이오메스 중 1/3을 점유하는 리그닌(lignin)과 미생물이 사멸한 유기체 덩이로서 토양중에 부식질(humus)로 잔유하여 C-14의 탄소 동위원소로 분석한 결과 깊이에 따라 다르나 한대에서는 수 1,000년간 잔유하고, 온대에서는 수 100년간 잔유한 것으로 알려져 있다.

또한 스위스의 Schmidt(2001)는 지구촌의 탄소사이클에 밝혀지지 않은 미싱카본(missing carbon)을 카운팅하기 위하여 토양중의 탄소함량 변화를 분석하기도 하였고, McCarl & Callway(1993)는 기후변화 원인물질인 대기중의 탄소를 장기간 고정하여 저장하기 위한 방법으로 농경지에 임목을 조림함에 따라 발생하는 경제 사회적 잇점을 제시하면서 유기농법으로 증가된 농업 토양중의 고정탄소에 대한 탄소세 지원의

필요성을 경제학적으로 분석하기도 하였다.

그리고 1997년 일본 교토에서 개최된 UN의 기후변화 기본협약(FCCC : Framework Convention on Climate Change) 제3차 당사자회의 (COP-3 : Third Conference of the Parties)에서는 교토 의정서(Kyoto Protocol)가 통과되어 국가별 탄산가스 순방출량에 대한 탄소세 부과에서 토양중의 탄소 고정효과를 피할 예정으로 연구되고 있다.

또한 최근에는 우리 나라와 일본등지에서 농사용 비료 소요량이 감소되고, 병충해 저항성이 높아져 농약 사용량이 감소되는 효과 때문에 퇴비와함께 목탄을 토양 개량제로 사용하기도 한다.

따라서 본 연구는 생분해성의 목질 바이오메스가 화학적 처리를 거쳐 농업토양에 투입되는 퇴비와 목탄의 물리화학적 특성과 하수 슬러지의 특성을 비교 분석하고, 그의 화학적 구조변화를 추리하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

#### 2.1.1 퇴비

농가에서 유기질 비료로 시판되고 있는 유기질 비료를 2002년 봄 시료로 채취하여 그늘에서 건조한 다음 8 mesh 통과분을 시료로 사용하였다.

#### 2.1.2 하수 슬러지

하수종말처리장에서 폐기물로 발생하는 하수 슬러지 일부를 2002년 봄에 채취하여 그늘에서 건조한 다음 8 mesh 통과분을 시료로 사용하였다.

### 2.1.3 목탄

농가에 토양 개량제로 시판되고 있는 목탄 일부를 2002년 봄에 채취하여 그늘에서 건조한 다음 8mesh 통과분을 시료로 사용하였다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 원료 분석

#### 1) 원료시료의 화학적 특성 분석

공시시료는 TAPPI 규격(TAPPI Test Methods, 1989)에 따라 105℃에서 1주야 건조하여 함수율(T208-om-84)을 측정하고, 알코올-벤젠(1:2) 용액으로 추출한 잔사(T204-om-88)를 측정하였으며, 알코올-벤젠추출 잔사중의 hemicellulose와 lignin함량은 농촌진흥청 토양화학 분석법(1988), 따라 추출물과 분해산물을 제거한 다음 잔사 무게를 측정하여 투입원료에 대한 잔사를 뺀 나머지를 각 성분으로 추정하였다.

#### 2) 원료시료의 회분과 무기 원소 함량 분석

시료중의 무기물은 농촌진흥청 토양비료 분석법(1988)과 TAPPI 규격(T211-om-80)를 고려하여 575℃와 900℃에서 회화하고, 원소함량은 575℃에서 회화한 기건 시료 1 g를 250 ml의 Kjeldahl flask에 취한 후 15 ml의 분해액 ( $H_2O_2$ /  $HClO_2$ /  $H_2SO_4$  = 125 ml/ 225 ml/ 50 ml)을 후라스크 기벽을 닦아내면서 시료에 고루 묻게 가한 다음, 이것을 가열 분해대에 놓고, 150℃에서 30분, 250℃에서 30분간 가열한 후 375℃에서 분해액이 맑아질 때까지 가열 분해한다. 분해가 끝나면 여과지 No.6로 여과하고, 증류수를 가하여 50 ml가 되도록 정량으로 만든 다음, 이 수용액을 전남대학교 농업생명과학 대학 공동기기 센터가 보유하고 있는 미국 Thermo Karrell사의 이온 크로마토그래프인 ICP(Inducible Coupling Plasma : IRIS/AP)로 분석하였다

### 2.2.2 염산-황산 분해잔사 제조와 구조분석

#### 1) 염산-황산 추출잔사 조제:

알코올-벤젠추출된 잔사를 농촌진흥청 농업기술연구소의 토양화학분석법(1988)중 유기물 분별정량법에 따라 전건시료 10 g정도에 3%HCL를 충분히 가하여

5 hr이상 reflux하여 hemicellulose를 분해시킨 후, Whatman No 542로 여과분리하여 중성이 될 때까지 충분히 세척한 다음 105℃에서 충분히 건조한 다음 무게를 측정하고, 이어서 염산분해된 시료 2 g정도에 50 ml의 79% $H_2SO_4$ 를 가하여 13℃정도에서 2.5 hr 맹운시킨 다음 1 L의 후라스크에 옮기고, 875 ml의 증류수를 가한 다음 5 hr이상 reflux 한 다음 냉각시켜 Whatman No 542에서 여과/분리하고, 이를 중성이 될 때까지 세척하여 전건시킨 후 원소 및 NMR 측정용 시료로 이용하고, 일부를 이용하여 황산추출후 잔사중에 잔유한 회분을 측정하였다.

#### 2) 원소분석 및 고체 C-13 NMR 분석

상기와 같이 제조된 시료를 한국 기초과학지원연구원에 의뢰하여 서울 분소에서 분해추출 잔사의 유기물 구성원소인 C, H, N, S, O를 분석하고, 대전 분소에서는 400MHz 고체 C-13 NMR 분광분석기에 의하여 분해 추출잔사의 방향족 함량을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 퇴비, 슬러지 및 목탄의 화학 특성과 무기 원소구성

#### 1) 원료 퇴비와 슬러지 및 목탄의 화학적 특성

토양개량제로 사용되는 유기질 퇴비와 목탄의에 폐기되는 하수 슬러지를 목재화학분석법과 유사한 토양 분석법을 이용하여 알코올-벤젠 추출후 3% 염산으로 환류시켜 hemicellulose를 가수분해하고, 이어서 79%황산으로 팽윤 후 3%로 희석한 후 환류시켜 cellulose를 가수분해한 다음 잔사를 연소시켜 회분을 분석하고, 이를 원료 투입량으로 환산한 결과 Table 1과 같았다.

즉 알코올-벤젠추출물은 퇴비의 경우 37%에 달하나 슬러지는 13%에 불과하고, 목탄은 11%에 달하여 발효로 생분해된 저분자 성분이 상당량 잔존함을 보여 주었고, hemicellulose에 해당하는 염산가수분해량은 퇴비의 경우 32%에 달하고, 슬러지는 46%에 달하였으나 목탄은 13%에 불과하였으며, cellulose에 해당하는 황산 가수 분해량은 퇴비의 경우 10%달하고, 슬러지의 경우 10%에 달하여 유사함을 보여주나 목탄은 7%에 불과하였으며, 마지막의 황산처리후 잔유물에서 회분함량을 뺀 나머지를 불용성 리그닌 잔유물로 간주

**Table 1. Chemical properties of compost, sludge and charcoal**

(unit : % dry base per each treating step)

		Ash in raw	Residual after Alc- Benz.(1:2) extraction	Residual after 3%HCL reflux	Residual after 79% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hydrolysis	Residual after 575℃ Ashing
Compost	% in each step	17.19	62.83	48.94	67.91	37.18
	% in raw material	17.19	62.83	30.75	20.88	7.77
Sludge	% in each step	46.54	86.96	47.16	75.75	73.78
	% in raw material	46.54	86.96	41.01	31.07	22.92
Charcoal	% in each step	4.08	88.48	85.67	90.29	1.89
	% in raw material	4.08	88.48	75.80	68.44	1.29

할 때 퇴비의 경우 13%에 달하나 슬러지는 8%에 불과하고, 목탄은 67%에 달하였다.

#### 2) 원료 퇴비와 슬러지 및 목탄의 중금속 함량

한편 원료 퇴비와 슬러지 및 목탄을 산화분해시켜 잔유한 인(P)성분과 무기이온을 ICP로 분석한 결과 Table 2와 같았다. 특히 대량 비료성분인 카리 성분은 퇴비에 많으나 인산 함량은 슬러지에 많았으며, 미량 성분인 칼슘과 마그네슘은 퇴비에 많았으며, 중금속 이온은 모두 비료규격에는 합격하였으나 환경부가 목표하는 농경지의 토양오염 우려 지역 기준보다는 많

아 지속적인 사용에서는 토양오염이 우려된다고 사료되며, 또한 작물이 흡수한 중금속에 대한 분석도 지속적으로 모니터링되어야 할 것으로 생각된다.

### 3.2 염산-황산 추출 잔사의 원소 조성 과 화학적 구조

#### 1) 염산-황산 추출 잔사의 원소 구성

퇴비와 슬러지 및 목탄의 리그닌구조를 파악하기 위

**Table 2. Phosphorus and metal ion contents of compost, sludge and charcoal**

(Unit : ppm)

Element	Compost	Sludge	Charcoal	Remarks (Standard)	
				Fertilizer Processing (RDO)	Soil pollution - arable land (MOE)
Ca	24,438.54	14,068.04	19,460.00		
K	43,85.31	4,924.41	3,977.62		
Mg	7,214.33	3,757.60	1,893.83		
Na	5,289.04	575.67	144.92		
P	1,255.05	16,784.32	661.36		
AL	11,812.69	19,112.52	76.94		
Fe	10,190.28	8,917.57	158.14		
Se	139.61	134.27	76.58		
As	4.14	8.97	0.18	< 50 ppm	< 6 ppm
Hg	0.00	0.00	0.16	< 2 ppm	< 4 ppm
Cr	23.35	22.99	14.77	< 300 ppm	< 4 ppm
Cu	74.48	179.74	2.52	< 300 ppm	< 50 ppm
Pb	65.61	47.96	1.65	< 150 ppm	< 100 ppm
Cd	0.00	0.02	0.00	< 5 ppm	< 1.5 ppm
Ni	--	--	--	< 50 pm	
Zn	--	--	--	< 900 ppm	
(total)	(64,892.43)	(68,534.08)	(26,468.67)		
(함수율)	(15%)	(14%)	(17%)		

**Table 3. Carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur contents of compost, sludge and charcoal** (unit : %)

	C	H	O	N	S	Remarks
Compost	49.37	4.89	21.09	1.89	1.32	$C_{103}H_{122}O_{33}N_6S = (C_6H_{10}O_5)_6(C_6H_4)_{10}C_7H_{22}O_3N_6S$
Sludge	40.16	5.46	11.73	1.86	1.95	$C_{56}H_{91}O_{12}N_2S = (C_6H_{10}O_5)_2(C_6H_4)_7C_2H_4O_2N_2S$
Charcoal	76.19	2.15	6.66	0.85	0.10	$C_{105}H_{36}O_7N = (C_6H_{10}O_5)(C_6H_4)_6C_6H_2O_2N$

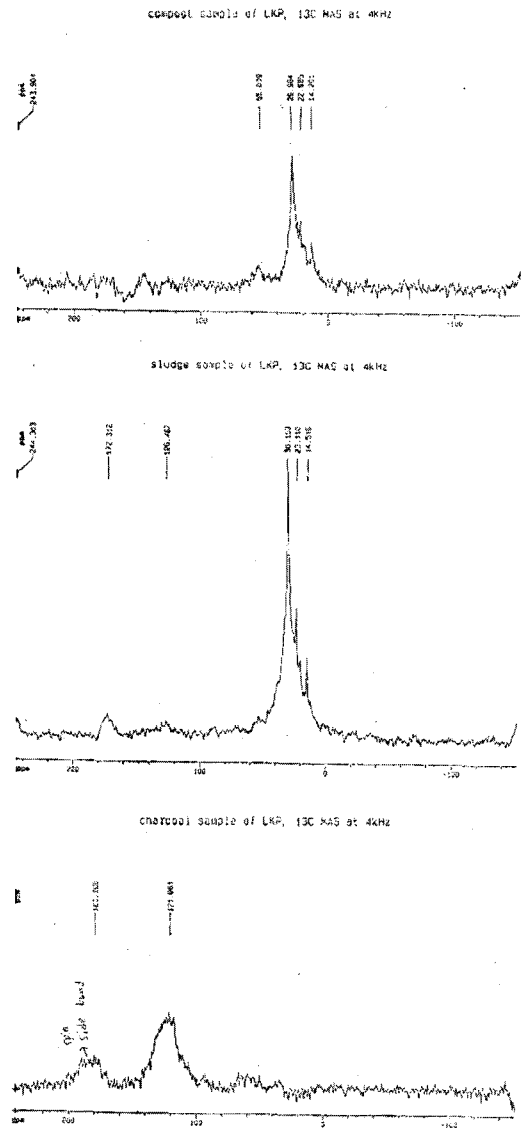
하여 알코올-벤젠 추출 후 염산과 황산으로 가수분해한 후 여과 잔사를 건조하여 한국 기초과학지원연구원에 의뢰하여 구성원소를 분석한 결과 Table 3과 같았다.

즉 퇴비와 슬러지에는 질소와 유황이 상당량 존재하여 생명체 성분이 상당량 존재함을 보여주나 목탄은 예상한대로 유황함량이 극히 낮아 생명체가 없음을 나타내고, 무수글루코오스( $C_6H_{10}O_5$ )와 벤젠의 para 유도체( $C_6H_4$ )를 기준하여 계산하면 퇴비는 글루코오스 함량이 많은데 비하여 슬러지는 방향족 함량이 증가하였으며, 목탄은 탄소함량이 과도하게 남아 방향족의 탄소-탄소 결합이 증가함을 보였다. 또한 이를 제외한 C/H/O의 몰비를 보아도 퇴비와 슬러지는 탄소에 대한 산소와 질소 및 유황함량이 많으나 목탄은 탄소함량이 많아 대부분의 탄소가 탄소-탄소결합임을 암시하여 주었다.

특히 환경공학에서 경험적으로 원소조성에 따라 미생물을 호기성 박테리아는  $C_5H_7O_2N$ 이고, 혐기성 박테리아는  $C_5H_9O_3N$ 이며, 조류는  $C_5H_8O_2N$ 이고, 원생동물이  $C_7H_{14}O_3N$ 이라는 점을 고려할 때 폐기물의 경우도 원소분석을 통하여 화학적 변화정도를 평가할 수 있다고 생각된다.

2) 염산-황산 추출 잔사의 고체 C-13 NMR의 피크변화

또한 염산-황산처리후 잔사를 건조하여 한국 기초과학지원연구원에 의뢰하여 400MHz 고체 핵자기 공명을 분석한 결과는 Fig. 1과 같고, Dick 등(1999)의 방법으로 분석한 결과는 Table 4와 같았다. 즉 자연계에 존재하는 1%정도의 C-13를 기준으로 화학결합을 분석하는 C-13 NMR은 시료의 정제정도에 따라 다르므로 본 실험에서는 정량적으로 분석하기 어려우나 퇴비와 슬러지 및 목탄의 화학구조가 서로 다르다는 것을 보여준다. 그러나 Dick 등(1999)의 해석방법에 따라 화학결합 Peak의 구조적 특성을 정리하면 Table 4에 나타낸 바와 같다. 즉 전체 C-13 수에 대한 방향족 핵을 구성한 C-13 수의 상대적 비율에 따라 방향족 함량 peak 높이가 다르다고 가정하면 퇴비



**Fig. 1. Solid C-13 NMR charts of commercial compost, sewer sludge and charcoal residuals after HCL and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hydorlyses**

**Table 4. Aromaticity and solid C-13 NMR peaks of commercial compost, sludge and charcoal residuals after HCL and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hydrolysis**

C-13 NMR peak*	Compost	Sludge	Charcoal	Remarks
	243.904 ppm	244.303 ppm	--	
230~190 ppm	C-ketone	--	--	--
190~165 ppm	C-carboxyl	--	172.312 ppm	180.388 ppm
165~100 ppm	C-aromatic	--	126.467 ppm	121.061 ppm
100~65 ppm	CHn-O-R	--	--	--
65~0.0 ppm	CHn-C	29.964 ppm	30.153 ppm	--
(total)	(100.0%)	(100.0%)	(100.0%)	

\*Dick, D. P., Burba, P., & Herzog, H., 1999, Influence of Extractant and Soil Type on Molecular Characteristics of Humic Substances from Two Brazilian Soils, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 10(2): 140~145; 2000, [http://jbcs.sbq.org.br/jbcs/1999/vol10\\_n2/78.pdf](http://jbcs.sbq.org.br/jbcs/1999/vol10_n2/78.pdf)

는 지방족 핵은 많은데 반하여 방향족 핵이 거의 없고, 슬릿지는 상당량의 지방족 탄소와 방향족 탄소가 존재함을 나타내는 반하여 목탄은 지방족 탄소는 거의 없는데 반하여 다양한 방향족 핵구조가 다량 존재함을 보여 주었다.

따라서 시료로 사용한 퇴비와 슬릿지 및 목탄이 제조된 원료가 다르고, 처리과정이 다르지만 자연계에서 난분해성의 성분은 방향족 핵구조인 것을 보여주고, 화학적으로는 처리정도가 심할수록 난 분해성의 방향족 핵구조로 변함을 보여주고 있다.

특히 석탄 탄화과정에서 발생한 꼬름(soot)을 고체 C-13 NMR로 분석한 Hambly(1998)의 연구 결과와 비교하면 목재의 생분해는 난 분해성의 리그닌 함량에 따라 잔사 양이 작아지나 목재의 열분해에서도 그의 수율이 리그닌 함량에 작아질 것으로 예측된다. 따라서 탄화 수율이 높은 본 시료에서는 지방족 화합물이 남아 있지만 그의 수량이 적어 NMR 피크에 나타나지 않은 것으로 사료된다.

## 4. 결론

농가에서 토양 개량제로 사용하고 있는 퇴비와 목탄 외에 하수종말 처리장에서 발생하는 하수 슬릿지를 채취하여 그의 화학적 특성과 중금속 함량을 분석하고, HCL-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 가수분해시킨 다음 남은 잔사를 원소분석과 고체 C-13 NMR로 방향족 함량을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 슬릿지중의 회분함량은 46%로서 퇴비의 17%나 목탄의 4%보다 높았다.

2) 슬릿지중의 회분은 염산과 황산처리에도 용해하

지 않은 불용 성분이 23%에 이르렀다.

3) 슬릿지중의 중금속함량은 퇴비보다 약간 높거나 유사하나 유기질 비료기준에는 합격하였다.

4) 염산-황산 처리된 슬릿지 잔사의 원소조성은 C<sub>56</sub>H<sub>91</sub>O<sub>12</sub>N<sub>2</sub>S = (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>2</sub>(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>7</sub>C<sub>2</sub>H<sub>43</sub>O<sub>2</sub>N<sub>2</sub>S로서 퇴비의 C<sub>103</sub>H<sub>122</sub>O<sub>33</sub>N<sub>6</sub>S = (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>6</sub>(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>10</sub>C<sub>7</sub>H<sub>22</sub>O<sub>3</sub>N<sub>6</sub>S와 유사하나 탄소화물 분획이 적은 반면 방향족 핵분획이 많고, 질소함량은 낮은 것 같다

5) 염산-황산처리된 슬릿지 잔사의 고체 C-13 NMR 차트는 지방족 구조와 방향족 핵을 모두 보유하나 퇴비는 지방족 구조만 나타내고, 목탄은 방향족 핵만을 나타냈다.

6) 따라서 하수처리 슬릿지도 리그닌을 함유한 목질 바이오메스와 같이 상당량의 방향족 핵 구조를 함유하고 있는 것으로 판단된다.

## 인용문헌

- Dick, D. P., Burba, P., & Herzog, H., 1999, Influence of Exrant and Soil Type on Molecular Characteristics of Humic Substances from Two Brazilian Soils, *J, Braz. Chem. Soc.*, 10(2): 140~145; 2001, [http://jbcs.sbq.org.br/jbcs/1999/vol10\\_n2/78.pdf](http://jbcs.sbq.org.br/jbcs/1999/vol10_n2/78.pdf)
- Hambly, E.M., 1998, The Chemical Structure of Coal Tar and Char during Devolatilization, 2001, <http://www.et.byu.edu/~tom/Papers/Hambly-Thesis.pdf>
- Little, C., 1999, Biosolids Application to Agriculture - Utilizing Biosolids Analysis to Meet Crop Nutrient Needs; 2002, <http://ohioline.osu.edu/b879/index>.

- html
4. McCarl, B.A., & Callaway, J.M., 1993, Carbon Sequestration through Tree Planting on Agricultural Lands, 2001, <http://ageco.tamu.edu/faculty/mccarl/papers/507.pdf>
  5. Nikiforoff, C.C., 1938, U.S. Dep. Agric., Yearb. Agric., 929~939; Allison, F.E., 1973, Soil organic Matter and Its Role in Crop Production, Emservier Sci. Pub., Amsterdam, p95~119
  6. Renner, R., 2000, Sewage Sludge, Pros & Cons, Environmental Science & Technology, vol. 34(1): 19; <http://www.mindfully.org/Pesticide/Sewage-Sludge-Pros-Cons.htm>
  7. Schmidt, M.W.I., 2001, Black Carbon in Soils : Looking for the Missing Carbon; 2002, <http://www.research-projects.unizh.ch/math/unit70600/area695/p2880.htm>
  8. TAPPI (Techincal Association of Pulp and Paper Industry) Standards, 1989.
  9. Texas Water Resources Institute, 2002, <http://twri.tamu.edu/twripubs/WtrResc/v13n4/index.html>
  10. 농촌진흥청 농업기술연구소, 1988, 토양화학분석법, p25
  11. 농촌진흥청 고시, 2002, 비료규격 -II. 부산물비료
  12. 환경부, 1991, 환경정책 기본법 시행령, 환경법전