

麥酒 및 糞尿슬러지 混合物의 堆肥化에 關한 研究 I - 混合 및 攪拌週期가 堆肥化에 미치는 影響 -

朴鍾赫* · 金東洙

*全南大學校 環境研究所, 光州廣域市 保健環境研究院

A Study on the Composting of the Brewery and Nightsoil Mixed Sludge I - Influence of mixing ratio and agitation period in composting

朴 Jong-Hyuk Park* and Dong-Soo Kim

*Environmental Research Center, Chonnam National University
Health and Environment Institute of Kwangju

요 약

높은 유기성분을 가지고 있으나 주로 매립에 의존하고 있는 맥주폐수 슬러지와 분뇨처리슬러지의 재자원화를 위한 이들 혼합물의 퇴비화에 관한 연구를 수행하였다. 분뇨슬러지와 맥주폐수 슬러지의 적정 혼합비는 1:1로 나타났으며 초기 시료의 pH는 퇴비내 미생물의 활동을 위한 온도상승에 큰 영향은 미치지 않았다. 또한 혼합비가 1:1인 시료의 퇴비화시 C/N 비는 10-15를 유지하여 약간 낮게 나타났으나 pH의 상승없이 퇴비화가 잘 이루어짐을 알 수 있었고 주 1회 뒤집기를 수행하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

주제어: 맥주 및 분뇨슬러지, 퇴비화 혼합비, 교반주기, 재자원화

ABSTRACTS

Nightsoil and brewery sludges usually contain a high concentration of organic matters. A composting study using reactors was carried out for the recycle of brewery wastewater sludge and nightsoil treatment sludge, which have been landfilled. A good composting process was obtained with a sludge mixing ratio of 1:1 and initial pH had no effect on temperature increase related to microbial activity. The initial C/N ratio of approximately 15 decreased to 13 without the increase in pH. It was found that agitation of one time a week provided the most effective composting process.

Key words: brewery wastewater sludge, nightsoil treatment sludge, composting, agitation period, recycling

1. 서 론

최근 환경의 질에 대한 국민의 욕구가 급격히 증대되고 반대로 발생된 폐기물은 대부분 매립에 의존하여 왔는데, NIMBY현상에 의한 매립지 확보가 어렵게 되어 폐기물 처리는 가장 시급하고 어려운 환경문제중의 하나가 되고 있다. 1990년대에 들어와서 미국·일본·독

일 등지에서는 유기성 폐기물의 재자원화에 대한 사회적 요구에 부응하여 퇴비화 기술이 활성화되고 있으며, 각종 유기성폐기물을 혼합시켜 퇴비를 제조하는 방법이 선진각국에서 폭 넓게 받아들여 지고 있다.

1980년 이후 국제적으로 환경문제가 대두되고 발생폐기물의 처리문제가 심각해졌는데 유기성폐기물을 퇴비화시켜 산성화된 토지를 환원하는 유기농법이 활발히 이루어지고 있다. 이에 따라 퇴비화의 대상물도 다양화 되고 있다. 또한 퇴비화에 대한 거동과 반응에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구는 Merkel¹⁾, Gonzalez-

* 1999년 3월 31일 접수, 1999년 7월 12일 수리

† E-mail: jhp@chonnam.chonnam.ac.kr

Vila²⁾, Bertoldi³⁾ 등에 의하여 연구가 진행되고 있고 국내에서 서⁴⁾는 퇴비화 과정에서 물질변화에 대하여, 송 등⁵⁾은 도시하수슬러지의 퇴비화에 대한 연구를 수행하였으며 최 등⁶⁾은 음식쓰레기의 퇴비화에 대하여 김 등⁷⁾은 분뇨의 퇴비화시 첨가제로 연탄재를 이용한 연구를 수행하여 퇴비화의 기초적인 연구로부터 종류 및 첨가제의 선정과 역할에 대한 연구도 진행되고 있다.

우리나라의 분뇨 발생량은 전국 199개 분뇨 처리장에서 1일 45,887 m³에 이르고 있으며, 이 가운데 분뇨 처리 시설에서 21,051 m³/day(68%), 해양 투기 3,719 m³/day(12%), 부숙탱크 187 m³/day(1%), 기타 2,011 m³/day(6%)가 처리되고 있으며 미처리될 양이 3,949 m³/day(13%)에 이른다⁸⁾ 이 중 처리된 분뇨 중에서 연간 216.4 kt의 슬러지 cake가 발생되며 이 중 8%가 농지로 환원되어 사용되고 나머지는 매립과 같은 방법에 의해서 처분되고 있다. 한편 맥주 폐수 처리장에서 발생하는 슬러지는 유기물 성분이 상당히 높음에도 불구하고 퇴비화 후 농지토의 환원 등 재활용에 의한 처분 방식은 전혀 사용되고 있지 않으며 전량 매립에 의해서 처분되고 있다.

따라서 본 연구에서는 지원회수 및 재활용의 일환으로 생활수준의 향상 및 산업 활동의 발전에 의하여 그 배출량이 날로 증가하고 있는 맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리장에서 발생하는 슬러지의 혼합물에 대한 퇴비화에 대하여 연구하였는데, Lab-scale 실험을 통하여 맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리 슬러지의 적정 혼합비를 결정하고 슬러지의 교반시기가 퇴비화에 미치는 영향에 대한 연구를 통하여 분뇨 및 맥주폐수 슬러지를 이용한 재자원화 기술의 기초적 연구를 수행하였으며 이 결과를 현장 크기의 반응조 실험에 적용한 유기성 폐기물 슬러지의 기계적 퇴비화 방법에 기초자료로 이용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Lab-scale 규모(38 L)의 반응조를 제작하여 실험을 실시하였는데 Turning Window 방식⁹⁾에 의해서 맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리 슬러지의 혼합비를 습윤중량비로 0:1, 1:1, 1:2, 1:0의 4가지로 설정하고 이들 슬러지가 고함수율인 점을 감안, 퇴비화의 적정 함수비인 50~65%¹⁰⁾로 조절하기 위하여 Bulking agent량을 전체중량의 20%로 하여 적

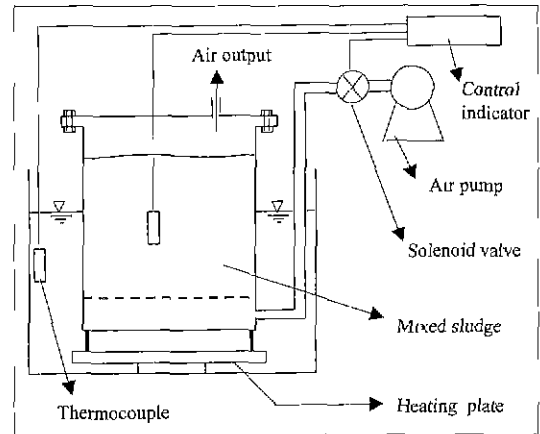


Fig. 1. Schematic diagram of the lab-scale reactor.

정 혼합비를 결정하였으며 결정된 최적 혼합비로 혼합한 시료를 이용하여 퇴비화 교반 주기에 따른 퇴비화 지표인자들의 변화, 기질의 분해율 정도, 각 대사 가스 변화량에 따른 유기물 감소율을 비교하였다. 반응조 내부에서 발생된 반응열의 단열문제를 해결하기 위해 반응조 내부온도 변화에 따라 반응조 외부의 온도가 자동 조절 될 수 있도록 온도연동장치를 부착하였는데 반응조 외부에 수조를 설치하여 반응조 내부의 온도변화에 따라 수조내의 온도를 연동적으로 변화시켜 반응조 내부 온도와 수조의 수온을 일치하도록 하였다.

2.2. 재료의 선택 및 분석방법

실험에 사용된 재료 가운데 분뇨 처리 슬러지는 전남 함평군 소재 위생 처리장에서 배출되는 액상부식 슬러지를 이용하였고 광주광역시 양산동 소재 맥주 공장의 맥주 폐수 슬러지를 사용하였다. 슬러지 및 Bulking agent의 초기 성분분석 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같은데 탄소원 및 Bulking agent로 폐신문지는 분쇄기를 사용하여 2cm 이하로 작게 파쇄하여 혼합하였으며, 톱밥은 제재소에서 배출된 것을 #10체에 통과시켜 사용하여 왕겨와 함께 수분조절을 위하여 사용하였는데 그 혼합비는 각 실험에 공히 종이, 톱밥, 왕겨의 비를 각각 전체의 11.7, 5.0, 3.3%로 하였으며 반응을 촉진시키기 위하여 열량이 높은 계분을 전체 중량의 약 3%를 첨가하였다. 또한 반응조에 공기 공급은 강제 통기 방식으로 Solenoid valve를 이용하여 공기를 115 L/m³·min으로 주입하고 반응 온도가 60°C를 넘지 않도록 제어하였다.

Table 1. Physico-chemical composition of raw material and bulking agents

Materials	W (%)	VS (%)	pH	BDM ¹ (%)	C (%)	N (%)	C/N
Nightsoil sludge	75-80	50-65	4.1-5.4	55-61	27-36	1.384-4.207	8.9-26
Brewery sludge	75-85	55-67	5.6-6.5	51-65	31-37	1.12-2.453	15-31.6
Papcr	5-8	91-95	5.1-5.6	94-98	51-53	0.426-0.98	70-234
Sawdust	20-35	87-94	4.1-5.1	51-74	48-52	0.093-0.124	212-561
Fowl droppings	40-55	58-77	8.2-8.9	50-58	32-43	1.181-2.104	32-74
Field solids	6-20	40-52	5.9-6.7	10-34	22-31	0.159-0.436	71-138

¹ BDM: Biodegradable matter

Table 2. Characteristics of the raw materials in the lab scale experiment

	A	B	C	D	R1	R2	R3
Mixing ratio	0:1	1:1	1:2	1:0	1:1	1:1	1:1
Water content(%)	65	64	65	67	65.8	67.4	66.2
pH	4.2	5.7	4.8	5.4	5.31	6.3	7.02
VS(%)	64	59	62	49	62	63	62
C/N	-	-	-	-	13.0	13.4	13.5

Table 3. Analytical methods

Experiment	Content
Water content(W)	Standard methods ⁽¹⁾
Volatile solids(VS)	Standard methods
BDM	EAWAG ⁽²⁾
pH	pH meter
Temperature	Copper constantan thermocouple
Total carbon	VS/1.8 ⁽¹⁰⁾
Total nitrogen	Standard methods

Table 2에 반응조에 투입된 시료의 성상을 나타내었으며 본 실험에서 시료의 분석을 위한 측정항목 및 분석방법은 Table 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적 혼합비 실험

맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리 슬러지를 퇴비화 대상 물질로 하여 적정 혼합비를 결정하기 위해 Lab-scale 반응조에 각각 0.1(A), 1:1(B), 1:2(C), 1:0(D)로 하고, Bulking agent는 습윤 중량당 20%를 첨가하여 충분히 혼합한 후 8일째 되는 날에 1회 뒤집기를 실시하였다.

Fig. 2는 각각의 혼합비별 실험에 대한 온도의 변화를 나타낸 것인데 분뇨 처리 슬러지만을 운전한 결과인 A의 경우 시간대별 반응 최고 온도가 반응기간동안

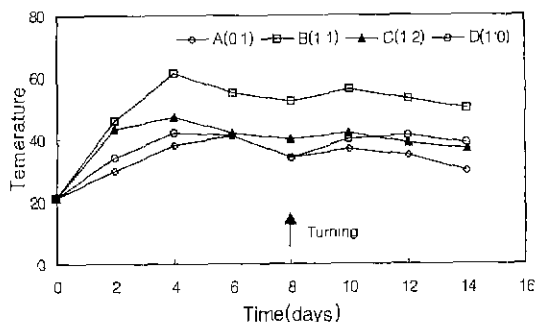


Fig. 2. Temperature variation according to mixing ratio.

40°C를 넘지 않았으며, B의 경우 운전 초기에 반응 온도가 급격히 상승하여 2일에 52°C, 4일에 최고 온도에도달되었으며, 그후 서서히 하강하는 모습을 보여주고 있다. C의 경우 시간대별 반응 온도가 45°C로 주반응 기간 동안 유해 미생물을 사멸하는 적정 온도인 50~60°C에 도달하지 못하고 하강 곡선을 보이고 있으며 D의 경우 C의 경우와 비슷한 양상의 곡선을 보이고 있으며 뒤집기를 실시한 7일 후부터 약간의 상승 곡선을 나타내다가 다시 하강함을 보여주고 있다. Fig 2의 결과로부터 맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리 슬러지의 혼합비가 1:1인 B의 경우가 다른 경우보다 초기의 빠른 온도상승 및 높은 발열량에 의한 퇴비화 온도유지기간을 보여 이를 최적 혼합비로 결정하고 이 혼합비를 이용하여 다음 실험을 수행하였다.

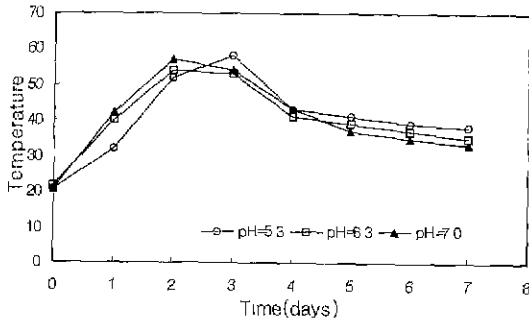


Fig. 3. Variation of temperature according to different initial pH.

3.2. 초기 pH가 온도 상승에 미치는 영향

퇴비화 하는데 혼합물의 분해 작용에 중요한 영향을 주는 요소의 하나인 초기 pH의 영향을 알아보았는데 적정혼합비로 선정된 맥주 폐수 슬러지와 분뇨 처리 슬러지의 혼합비 1:1인 시료를 인산염 완충 용액을 이용하여 초기 pH를 각각 5.3, 6.3, 7.0로 조절한 후 퇴비화 시킨 결과 Fig. 3과 같이 시간에 따른 온도 변화 곡선을 얻을 수 있었다.

그림에서와 같이 pH 6.3, 7.0의 온도는 급상승하여 2일만에 최고 온도에 도달한 후 하강하기 시작하여 상온에 가까워졌다. 그리고 pH 5.3에서는 하루 늦은 3일만에 최고 온도에 도달한 후 1차 분해 기간 동안 적정 온도를 유지하다가 상온에 가까워짐을 알 수 있다. 본 실험결과 pH의 영향으로 인해 최고 온도 도달시간이 1일의 지체 시간을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 그 온도차가 5°C 미만이고 최고 온도 도달 이후 초기 분해 기간 동안 온도 변화 곡선이 pH 6.3과 pH 7.0의 유사함을 볼 때 분뇨 처리 슬러지와 맥주 폐수 슬러지의 혼합 호기성 퇴비화에서 인산염에 의한 초기 pH 조절은 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

3.3. 교반주기에 따른 퇴비화

3.3.1 온도변화

교반 주기에 따른 측정 시간별 온도 변화는 Fig. 4와 같다. 반응조 Re. 1의 경우는 7일에 1회 교반을 실시하였으며 Re. 2는 3일에 1회, Re. 3의 경우는 온도 상승 후 하강하여 상온에 가까워졌을 때 교반을 실시하였다. Finstein¹³⁾와 Riffaldi¹⁴⁾는 각각 60°C, 55°C이상에서 미생물의 활성이 떨어진다고 보고하였는데 본 연구에서는 제 반응조 모두 60°C가 넘는 경우 공기 공급량을 증가시켜 반응 온도가 60°C를 넘지 않도록 하였

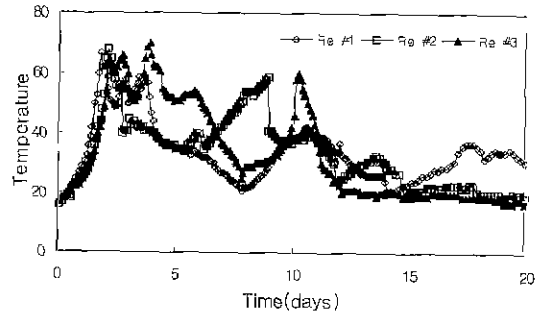


Fig. 4. Variation of temperature on the reactors.

다. Re. 1의 경우 1차 반응 기간 동안 40°C이상 유지 기간은 65시간이며, Re. 2의 경우는 64.5시간, 그리고 Re. 3의 경우 124시간으로, Re. 3의 경우가 미생물 활동에 적절한 온도를 가장 길게 유지함을 알 수 있었다.

Re. 1의 경우 통기를 시작한 지 1.5일 만에 45°C를 넘어 1.8일이 경과되면서 최고 온도인 62°C에 도달하였다. 4일까지 상승과 하강을 반복하다가 7일에 상온에 가까워졌고 교반 후 다시 45°C 부근까지 상승하면서 초기 반응 기간의 양상을 보였고, 14일째 뒤집기를 실시하였을 때 약간의 온도 상승을 보이다 하강하는 양상을 보이고 있다. Re. 2의 경우 1차 분해가 끝나기 전에 3일만에 뒤집기를 실시해 온도 상승 폭이 크며, 뒤집기 3회째인 9일경부터는 상승 폭이 둔화됨을 알 수 있다. Re. 3의 경우 8일만에 상온에 가까워져 이때 교반을 실시하였으며, 이후 60°C에 이르는 고온대를 다시 형성하였다가 2일만에 냉각되어 상온을 유지함을 알 수 있었다.

3.3.2. pH

액상 부식법으로 처리된 분뇨처리 슬러지의 특성으로 초기 시료의 pH는 5.3을 나타내었다. 전 실험의 결과 pH는 초기온도 상승에 영향을 미치지 않아 별다른 완충없이 실시하였다. 시간별 pH 변화는 Fig. 5와 같이 분해가 진행됨에 따라 증가되어 각각 7.6, 6.7, 7.7을 나타내었는데 Morel¹⁵⁾이 제안한 퇴비화 가능범위인 5.5~9.0을 유지하였다.

3.3.3. C/N비

C/N비는 퇴비화 과정이 진행됨에 따라 대체로 감소되는 경향을 보인다. Fig. 6은 C/N비의 변화를 나타낸 것으로 본 연구에서는 고온대에서 C/N비의 상승은 일어나지 않고 있다. 시간에 따른 변화 양상은 Re. 1이 초기 13에서 11.1(14.6%)로 감소하였으며, Re. 2가 13.4에서 11.8(11.9%), Re. 3이 13.5에서 10.9(19.3%)로 감

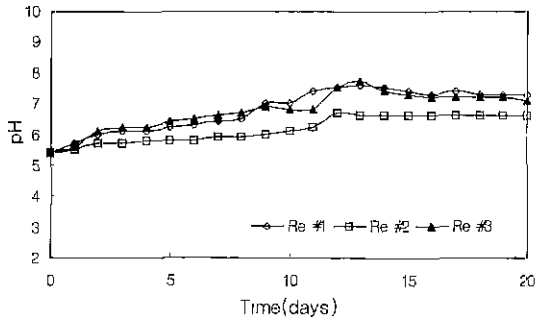


Fig. 5. Variation of pH according to composting periods.

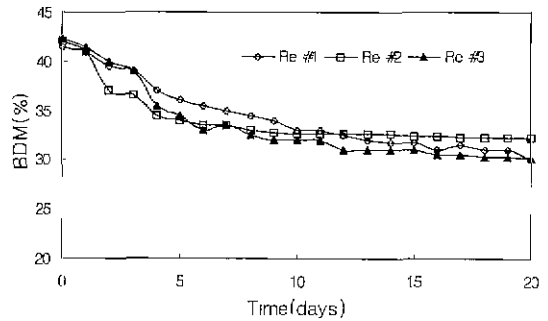


Fig. 7. Variation of Biodegradable matter on the reactors.

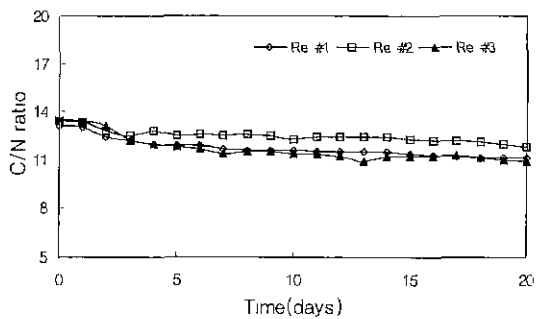


Fig. 6. Variation of C/N ratio on the reactors.

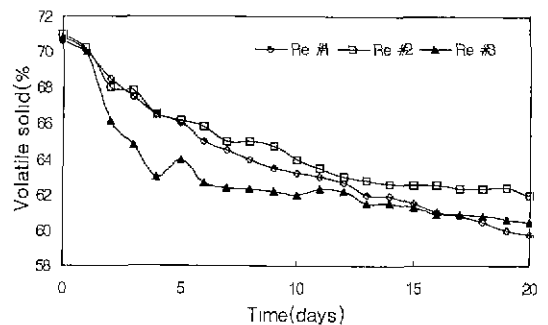


Fig. 8. Variation of volatile solids according to composting period.

소하여 Re. 3이 제일 높은 C/N비 감소를 보이고 있다. 일반적으로 C/N비가 높으면 질소가 부족하여 미생물의 증식이 억제되어 퇴비화 속도가 늦어지며, C/N비가 낮으면 질소가 암모니아로 변하여 pH가 상승하고 이에 따라 암모니아 가스가 발생한다. 퇴비화의 적정 C/N비는 20~25 범위로 발표되어 있지만¹⁵⁾ 본 연구에서는 10~15 범위에서도 pH의 상승없이 퇴비화가 잘 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

3.3.4. 기타 영향인자의 변화

유기물의 생물학적 분해 가능한 물질의 지표물 나타내는 BDM의 시간별 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 1차 반응 기간 7일 동안 감소율은 Re. 1의 경우 41.5%에서 35.1%로 24% 감소하였고, Re. 2의 경우 42%에서 33.1%로 21% 감소하였으며, Re. 3의 경우 교반시점인 8일에 42.3%에서 32.5%로 26.7% 만큼 감소한 것으로 나타났는데 이는 생물학적으로 분해 가능한 물질은 퇴비화 과정시 초기에 상당량 분해가 진행되고 있음을 알 수 있고 이 기간중의 분해 BDM량은 20일 분해량의 각각 56%, 71%, 81%가 분해되었음을 알 수 있었다.

총 유기물의 감소량을 나타내는 작열감량(Volatile

Solid)은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Re. 1이 초기 70.6%에서 59.4%로 가장 높은 분해율을 보이고 있다. Re. 3의 경우 초기 70.8%에서 1차 분해 기간 동안은 휘발성 고형물의 감소율이 Re. 1보다는 급속하게 진행되었다 그러나 8일을 경과한 후부터 고온유지에 따른 강제 통기량의 증가로 수분의 유출이 많아 반응조내 수분 함량이 낮아지고 미생물의 활성이 잘 이루어 지지 않아 2차 반응이 끝나는 21일에 휘발성 고형물량은 60.5%로 Re. 1의 15.0%보다 작은 14.5%에 해당하는 감소율을 보였다. Re. 2의 경우는 71%에서 60.5%의 분해율을 보이고 있는데 이는 너무 잦은 빈도의 교반으로 인해 열 손실, 곰팡이 균사의 끊김 등이 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

시간에 따른 총 유기물 감소량의 분해율을 역으로 나타내면 각 반응조의 1차 반응 기간까지의 분해율은 Re. 1이 총 분해율의 78%, Re. 2는 62%, Re. 3은 87%로 초기에 총 유기물의 감소는 Re 3이 가장 높았으며 Re. 1, Re. 2순으로 감소율을 나타내고 있다. 그러나 2차 반응 기간 동안 Re. 1의 분해율이 상승하여 퇴비화가 완료되는 21일의 분해율은 Re 1이 15.0%로 Re.

3의 14.5% 보다 약간 상회하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 자원회수 및 재활용의 일환으로 맥주 폐수 슬러지와 분뇨처리 슬러지의 혼합물에 대한 퇴비화를 Lab-scale 실험을 실시하여 퇴비화에 대한 재자원화 기술의 기초적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 맥주 폐수 슬러지와 분뇨처리 슬러지의 혼합비를 각각 0:1, 1:1, 1:2, 1:0으로 하여 실험한 결과 혼합비가 1:1인 경우 가장 퇴비화 온도가 높게 유지됨을 알 수 있었다.
2. 혼합슬러지의 초기 pH를 조절하여 실험한 결과 초기 온도상승에 큰 영향을 미치지 않았다.
3. 혼합비가 1:1인 시료를 퇴비화 할 때 교반 주기를 달리한 결과 실험 실시 후 1.5~3일에 모두 60°C 이상의 고온을 유지하였으며 탄소/질소(C/N)비는 10~15를 유지하여 문헌상의 20~25보다 낮게 유지되었으나 pH의 상승없이 퇴비화가 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 교반주기의 영향은 초기에는 교반주기가 유동적인 No 3의 경우가 가장 분해율이 높았으나 전체적인 경향으로 볼 때 교반 주기는 주 1회의 경우인 Re 1의 경우가 적절한 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 pilot-scale의 실험을 위한 예비실험의 일환으로 실시하여 각종 인자의 영향을 살펴보았는 바, 그 결과로 미루어 주 1회의 뒤집기가 경제적으로 가장 유리함을 알 수 있었다

참고문헌

1. Metkel, J. A.: "Composting, In:Managing livestock waste" AVI Publishing Co., Westport, Connecticut, 306-324 (1981).
2. Gonzalez-Vila, F. J and Martin, F. "Chemical structural characteristics of humic acids extracted from composted municipal refuse", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 14(3/4), 267-278 (1985).
3. de Bertoldi, M., Rutli, A., Citterio, B., and Civilini, M.: "Composting Management: An new process control through O₂ feedback", *Waste Management and Research*, 6(3), 239-259 (1988).
4. 서정윤 : "폐기물의 퇴비화 과정에서 물질변화(탄소화합물의

변화)", *한국환경농학회지*, 7(2), 136-145 (1988).

5. 송재천, 유명진, 김동민 "도시하수 슬러지의 퇴비화에 대한 연구", *한국폐기물학회지* 3(2), 25-33 (1986).
6. 최정연 · "아케쓰레기의 효율적 퇴비화를 위한 운영조건" *한국유기성폐기물 자원화협의회*, 2(1) 19-29 (1994).
7. 김석구, 김병태, 김정욱. "연탄재를 이용한 분뇨퇴비화의 적정첨가제 선정에 관한 연구", *한국폐기물학회지* 5(2), 75-81 (1988).
8. 환경부 : "환경백서", 환경부 (1997).
9. Stutzenberger, F. J. : "Cellulolytic Activity in Municipal Refuse Composting", *Bacteriol. proce.*, 16 (1969).
10. Robert, R. : "On-Farm Composting Handbook", 6-40 (1992).
11. APHA-AWWA-WPCF · "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", 19th Ed., APHA (1995).
12. EAWAG: "Methods of Sampling and Analysis of Solid Wastes". Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung *Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Switzerland* (1970).
13. Finstem, M. S., Miller, F. C., Hogan, J. A., Storm, P. F.: "Analysis of EPA Guidance on Composting Sludge I. Biological Heat Generation and Temperature", *Bio Cycle*, 28, 20-26 (1987).
14. Riffaldi, R. Levi-Minzi, R. Saviozzi, A. "Humic Fractions of Organic Waste", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 10(4), 353-359 (1983).
15. Moirel, J. L. : "In Composting of Agriculture and Other Waste", J. K. R.Gasser(ed), Elsevier Applied Science, Brasenose College, Oxford (1984).

朴 鍾 赫



- 1988년 전남대학교 토목공학과 졸업
- 1991년 전남대학교 대학원 (공학석사)
- 1998년 전남대학교 대학원 (공학박사)
- 1996년 ~ 현재 전남대학교 환경연구소 전임연구원

金 東 洙

- 1984년 전남대학교 토목공학과 졸업
- 1986년 전남대학교 대학원 (공학석사)
- 1998년 전남대학교 대학원 (공학박사)
- 1991년 ~ 현재 광주광역시 보건환경연구원 환경과장