유기성폐기물자원화
제 3 권 제 2 호, 47~57, 1995

Journal of KOWREC
Vol. 3, No. 2, 47~57, 1995

교반강도가 퇴비화에 미치는 영향

황선숙, 황의영, 남궁 완

건국대학교 공과대학 환경공학과

Effect of Mechanical Mixing Intensity on Composting

Seon-Suk Hwang, Eui-Young Hwang, Wan Namkoong

Department of Environmental Engineering,
College of Engineering Kon-Kuk University, Seoul 143-701, Korea

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effect of mechanical mixing intensity on composting. The major parameters investigated were the mixing intensity and initial moisture content. Laboratory scale composting reactors with mixing equipment were used in this study. Wastes used for the study were raw nightsoil sludge, nightsoil sludge after vacuum evaporation treatment and pig manure. When moisture contents were 60% and 63%, amount of organic material degraded in the continuous mixing reactors was higher than that in the intermittent mixing reactors.

Compost produced from reactors with continuous mixing had better texture than that obtained from reactors with intermittent mixing. When moisture content was 68%, organic waste was kneaded rather than mixed in the continuous mixing reactors.

Amount of organic material degraded in the continuous mixing reactors also was lower than that in the intermittent mixing reactors.

Key words: Composting, Mixing intensity, Nightsoil sludge, Pig manure

초 록

본 연구의 목적은 유기성폐기물 퇴비화시 교반강도가 퇴비화공정에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이다. 주된 연구지표는 교반강도와 초기수분함량이었다. 본 연구를 위하여 기계식 교반장치를 갖춘 실험실규모의 퇴비화반응조가 이용되었다. 실험대상폐기물은 생분뇨슬러지와 감압증발처리공정을 거

친 분뇨슬러지, 그리고 돈분을 이용하였다. 초기수분함량이 60%와 63%인 경우 연속교반시 간헐교반보다 유기물분해율이 더 높게 나타났다. 또한 시료의 물리적 성상도 연속교반이 간헐교반보다 더 균등질의 양호한 상태를 나타내었다. 한편 초기 수분함량 68%인 경우는 혼합되기 보다는 시료 일부가 반죽상태를 형성하는 문제가 발생하였으며 유기물분해율도 연속교반의 경우가 간헐교반보다 더 낮게 나타났다.

핵심 용어 : 퇴비화, 교반강도, 유기물분해율, 수분함량, 분뇨슬러지, 돈분

1. 서 론

최근 사회적으로 많은 관심의 대상이 되고 있는 폐기물문제의 해결을 위해서는 매립위주의 처분방법에서 재활용 및 자원화를 위한 노력이 필요하다. 특히 주방폐기물이나 분뇨슬러지, 축산폐기물과 같은 유기성 폐기물은 퇴비화, 메탄발효, 사료화 등의 기술을 이용하여 효과적으로 자원화할 수 있다. 이 중에서도 퇴비화방법은 폐기물을 호기성 조건 하에서 생물학적으로 안정화시키며 또한 폐기물 내에 존재하는 병원균을 사멸시키고 수분함량을 감소시켜 부식질과 같은 유용한 퇴비를 생성하는 장점을 가진다.

퇴비화방법은 크게 퇴비단식과 기계식 방법으로 나누어 볼 수 있다. 퇴비단식은 뒤집기식 퇴비단공법과 공기주입식 퇴비단공법으로 나누어 볼 수 있고 기계식방법에는 수직형과 수평형이 있다. 퇴비단 공법의 최근 동향을 살펴보면 미국의 경우 거의 모든 플랜트에서 공기주입식 퇴비단 공법을 채택하고 있다. 한편 미국과는 달리 넓은 부지를 확보하기 어렵고 주거지역과 퇴비화시설이 인접해 있는 일본이나 유럽에서는 기계식 방법을 개발하여 이용하고 있다. 기계식 방법은 퇴비단식 보다 초기투자비와 건설비용이 많이 소요되기는 하지만 부지소요면적이 적고 퇴비화영향인자를 인위적으로 제어할 수 있어 퇴비화기간을 단축할 수 있으며 가장 문제가 되는 악취문제를 쉽게 해결할 수 있다는 장점이 있다. 우리나라와 같이 국토면적이 좁고 인구가 많은 현실을 고려할 때 기계식 방법이 적합한 퇴비화방법이라고 생각된다. 그러나 아직 기계식 퇴비화방법에 대한 많은 연구자료가 부족한 실정이므로 본 연구에서는 이러한 기계식방법의 기초연구로서 기계식 교반장치를 이용하여 교반강도가 퇴비화반응에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 교반은 혼합물 내에 산소공급을 원활히 하며 분해속도를 증가시킬 수 있고 공기의 단회로 흐름을 방지할 수 있다(Haug 등, 1992). 또한 교반의 적정 강도는 대상폐기물의 수분함량과 종류에 의해 크게 좌우된다. 그러므로 대상폐기물의 초기수분함량과 교반빈도는 실제 실험이나 경험을 통하여 결정하는 것이 바람직하다.

한편 대부분의 퇴비화공법의 경우 초기수분함량조절과 공극개량 목적으로 톱밥이나 나무조각과 같은 공극개량제의 혼합이 필수적이다. 그러나 톱밥이나 나무조각과 같은 공극개량제는 분해속도가 느리고 지속적인 공급이 현실적으로 어려운 상황이며 유지관리비용도 상당히 소요되는 문제점이 있다. 이에 본 실험에서는 톱밥과 같은 공극개량제를 혼합하지 않고 공정에서 생산된 퇴비만을 반송하여 교반강도에 따른 퇴비화반응을 비교해 보고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2. 1 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 그림 1과 같으며 크게 퇴비화반응조, 교반장치, 공기공급장치, 항온실로 구성되어 있다. 반응조는 수직형의 원통형태로 내경 16cm, 높이 24cm, 유효용적 6.4L이다. 반응조 바닥에는 공기공급을 위하여 다공판을 설치하고 다공판 위에 망을 부착하여 시료가 밑바닥으로 떨어지는 것을 방지하였다. 공기공급은 어항용 기포발생기를 이용하여 일정량 주입하였다. 반응조 중앙부에는 내부온도를 모니터링하기 위하여 온도계를 설치하고 반응조 상부에는 발생가스 배출구를 설치하였다.

교반장치는 스테인레스재질로 길이 40cm의 축에 가로방향으로 3개의 17cm 길이의 봉을 90° 각도로 부착하였으며 각 봉에는 4개의 패들을 설치하였다. 각 봉에 설치된 패들은 가로 2cm, 세로 4cm, 두께 2mm의 스테인레스판으로 봉에 45° 각도로 부착하였다. 또한 벽면에 붙는 시료를 제거하기 위하여 상단가로봉 끝에 반응조 깊이방향으로 7cm길이의 패들을 부착하였다. 교반에 이용된 모터는 Panasonic사의 AC 40W용량에 1800대 1로 감속시킨 기어모터로서 최대회전수는 3rpm이며 속도조절기와 타이머를 부착하여 회전수와 교반조건을 조절하였다.

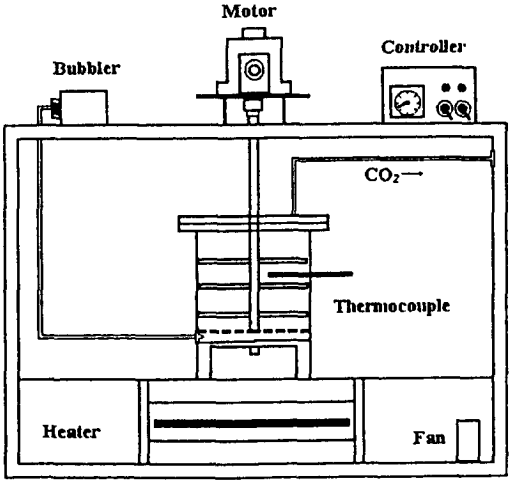

Fig. 1. Experimental set-up schematic

2. 2 실험재료

본 실험에 사용된 유기성폐기물은 오산시 위생처리장에서 채택하고 있는 감압증발처리공정 전후 슬러지와 돈분이었다. 슬러지는 모두 벨트프레스로 탈수시킨 후 이용하였다. 각 대상폐기물의 성상은 아래의 Table 1과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 감압증발처리 전 및 처리 후 슬러지의 커다란 특성차이는 없었으며 단지 처리 후 슬러지의 TKN이 약간 감소하여 결과적으로 C/N비가 다소 증가하게 되었다.

Table 1. Physicochemical characteristics of waste materials for composting.

	Nightsoil Sludge after vacuum evaporation	Raw Nightsoil Sludge	Pig manure
moisture content(%)	71～72	72～76.5	71～73
pH	8.3～9.2	7.2～8.0	8.0～8.5
VS(%)	70～75	66～79	68～75
TOC(%)	49～54	48～50	38～45
TKN(%)	3.3～4.0	3.5～5.7	2.8～3.2
C/N ratio	13～15	8～14	12～16

2. 3 실험조건 및 방법

대상폐기물과 반송퇴비를 적절히 혼합하여 수분함량을 조절하였으며 반송퇴비는 퇴비화실험 후 생성된 퇴비를 일주일 정도 더 안정화시킨 다음 수분함량을 40%로 조절하여 사용하였다. 각 실험조건과 혼합물의 성상을 Table 2에 나타내었다. 교반조건은 두가지, 즉 3회전/일과 3회전/시간으로 선정하였다. 본문 중에는 3회전/일을

Table 2. Experimental Condition and Characteristics of Mixtures for Each Experiments.

Experiment*	Moisture Content(%)	Mix ratio** (Waste:Recycled compost)	VS*** (%)	TOC*** (%)	TKN*** (%)	C/N***
A60M	60	1 : 0.5	66.7	47.2	3.67	12.9
A60CM	60	1 : 0.5	66.7	47.2	3.67	12.9
P63M	63	1 : 0.3	55.4	38.8	2.59	15.0
P63CM	63	1 : 0.3	55.4	38.8	2.59	15.0
B68M	68	1 : 0.1	78.0	47.2	5.56	8.5
B68CM	68	1 : 0.1	78.0	47.2	5.56	8.5

* A : nightsoil sludge AFTER vacuum evaporation treatment
B : nightsoil sludge BEFORE vacuum evaporation treatment (raw nightsoil sludge)
P : Pig manure
M : Intermittent mixing (3cycle/day)
CM : Continuous mixing (3cycle/hour)
** : Wet weight basis
*** : Dry weight basis

간헐교반(Intermittent mixing), 3회전/시간을 연속교반(Continuous mixing)이라 하였다. 실험에 사용된 반응조는 소규모이므로 열손실을 고려하여 항온조 내에 설치하고 내부온도를 40 ±1℃로 유지하였다. 공기공급량은 예비실험결과 600mL/min으로 운전하였다. 퇴비화기간은 총 15일로 하였다.

시료는 퇴비반응조 중앙에 위치한 시료채취구를 통하여 3일마다 채취하였다. 반응기간 동안의 온도와 CO_2는 하루에 두번씩 오전, 오후로 나누어 모니터링하였으며 CO_2는 오르자트분석기를 이용하여 Standard Method(APHA, 1992)에 따라 측정하였다. 수분함량과 VS는 3일에 한번씩 채취한 시료를 이용하여 분석하였는데 각각 폐기물공정시험법(환경처, 1991)과 Standard Method에 따랐다. TOC, TKN, pH 또한 동일한 시료를 이용하였으며 TOC와 TKN은 토양화학분석법(농업기술연구소, 1988)의 Walkly black법과 환원증류법을 따랐고 pH는 폐기물공정시험법에 의해 고형물과 증류수의 비를 1:5로 하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 교반강도에 따른 퇴비화반응

(1) 감압증발후 슬러지

감압증발후 슬러지는 초기수분함량을 60%로 조절하여 실험하였다. Fig. 2는 감압증발후 슬러지의 반응기간 동안 온도와 CO_2변화를 나타낸 것이다. 온도는 반응 12시간 만에 급속히 증가하여 1일째에 피크치를 기록한 후 8일째까지 감소하다가 항온조 온도와 유사하게 유지되었으며 교반강도에 따른 온도변화차이는 거의 볼 수 없었다. CO_2변화는 온도변화의 경향과 동일하였으며 연속교반(A60CM)에서 CO_2발생량이 더 높게 나타났다. 이는 반응물질의 잦은 교반을 통해 고형물과 산소의 접촉효율이 증가하여 유기물의 분해가 용이하였기 때문이라 보여진다(Bach 등, 1985).

유기물의 분해정도를 알아보기 위하여 측정한 TOC농도의 감소율은 Fig. 3과 같다. 간헐교반(A60M)보다는 연속교반(A60CM)에서 전반적으로 더 높은 TOC감소율을 보였으며 최종감소

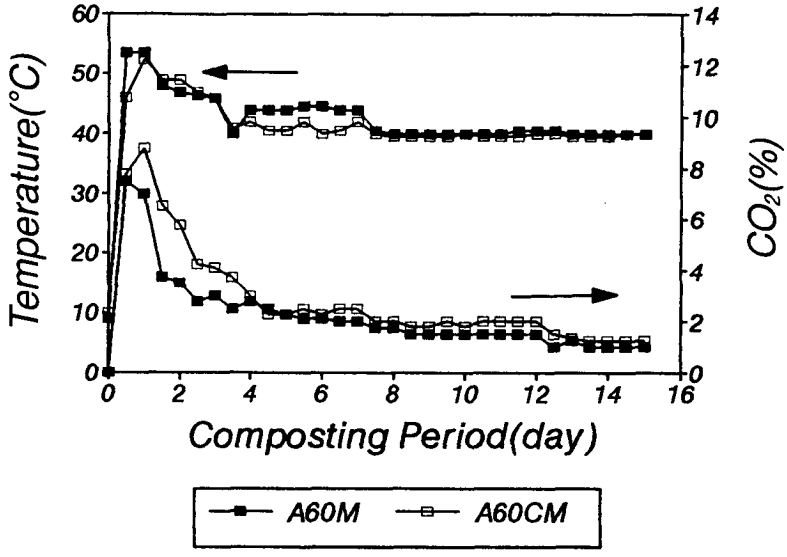

Fig. 2. Change of Temperature and CO_2 Concentration for Experiments A60M and A60CM.

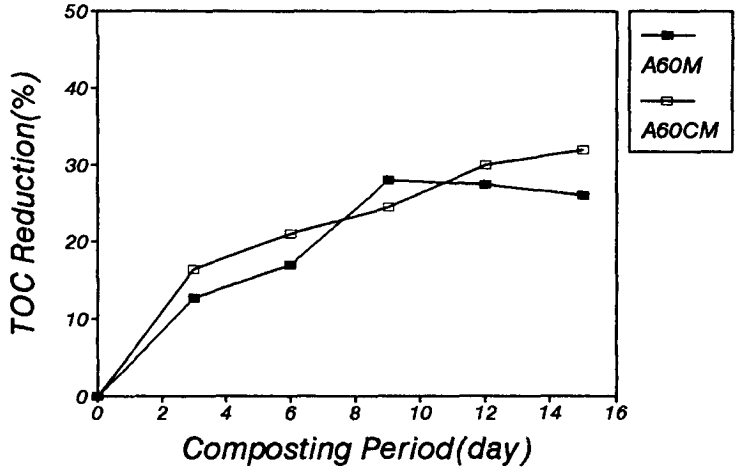

Fig. 3. TOC Reduction for Experiments A60M and A60CM.

율의 경우 연속교반이 간헐교반보다 5% 높게 나타났다. 이와 같은 TOC함량의 측정은 폐기물의 반응과 안정화 정도를 판단하는 지표로 흔히 이용된다(Harada 등, 1981).

pH변화는 초기 pH 9내외에서 반응기간 동안 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 큰 변화는 보이지 않았다. TKN은 초기에 약간 감소한 후 불규칙한 변화를 보였다. C/N비는 Fig. 4에서와 같이 TKN의 불규칙한 변화로 뚜렷한 감소 경향을 보이지 않았다. 일반적인 생분뇨의 C/N비는 5~10정도이나(Gotaas, 1976) 본 시료는 감압증발공정을 거친 것으로 초기 C/N비가 13이었다. 퇴비화반응에 적합한 C/N비는 보통 25~40정도이나 대상물질의 특성에 따라 상당한

차이를 보이며 반응완료 후 C/N비 역시 같은 경향을 나타낸다[Gotaas, 1976]. 이러한 결과에 비추어볼 때 본 연구에 사용된 감압증발처리 후 슬러지의 경우 C/N비 변화에 의하여 퇴비화 반응정도를 판단하는 것은 바람직하지 않은 것으로 사료된다.

(2) 돈분

돈분을 반송퇴비와 혼합하여 초기수분함량 63%로 조절하여 퇴비화할 때 온도와 CO_2발생량의 변화는 Fig. 5와 같다. 온도는 반응 12시간만에 급속히 증가하여 피크치를 기록한 후 반응 6일째까지 감소하다가 반응조 온도와 유사하게

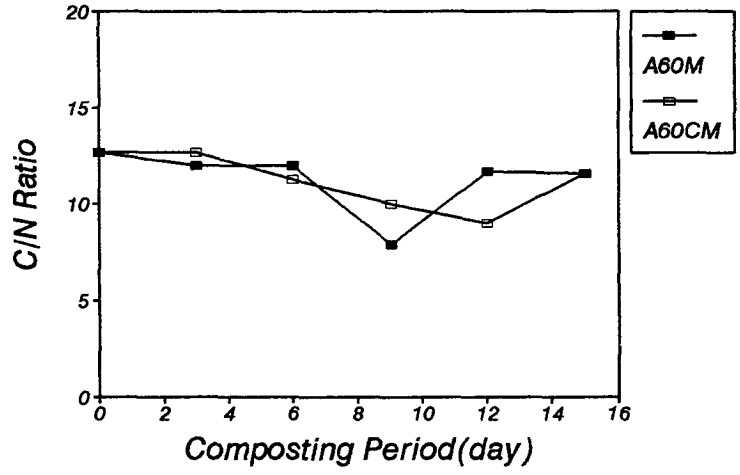

Fig. 4. Change of C/N ratio for Experiments AR50M, AR50CM.

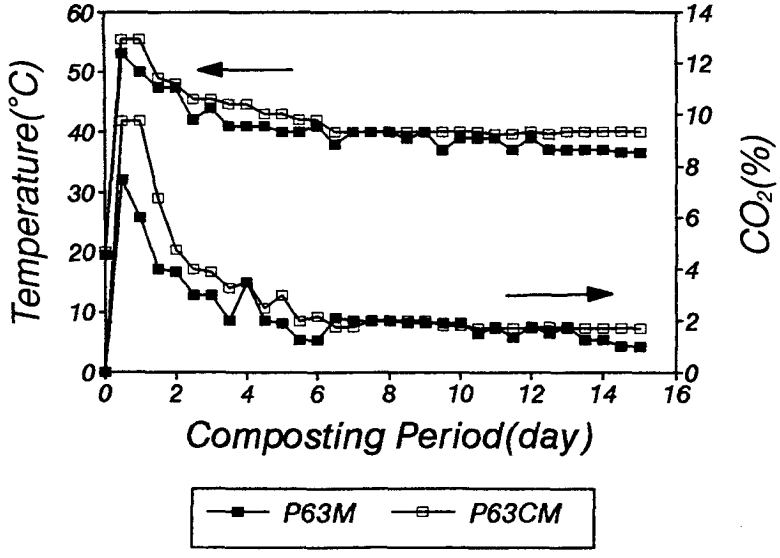

Fig. 5. Change of Temperature and CO_2 Concentration for Experiments P63M and P63CM.

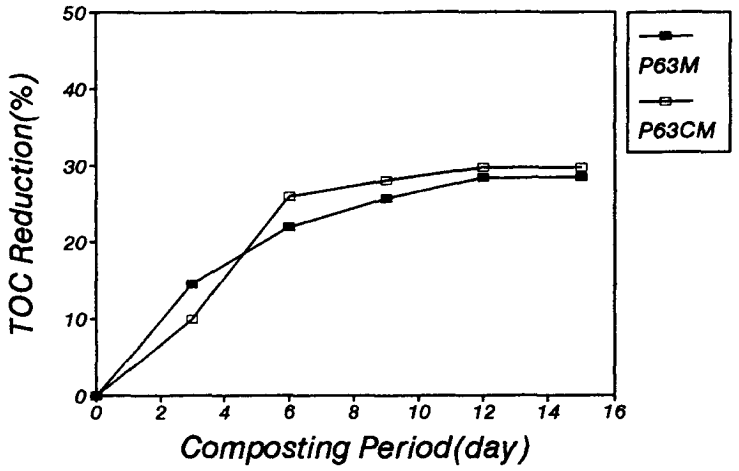

Fig. 6. TOC Reduction for Experiments P63M and P63CM.

유지되었으며 감압증발후 슬러지 경우와 마찬가지로 교반강도에 따른 차이를 보이지 않았다. CO_2발생량 변화도 온도의 변화와 유사하였으며 반응초기의 경우 간헐교반(P63M)보다 연속교반(P63CM)에서 CO_2 발생농도가 더 높게 나타났다.

돈분의 유기물분해정도를 알아보기 위한 TOC농도의 변화는 Fig. 6과 같다. TOC농도는 반응 6일째까지 두가지 교반조건에서 모두 급속한 감소를 나타낸 후 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 분해산물인 CO_2발생량의 변화와 일치되는 경향이었다. 교반강도에 따른 차이는 간헐교반(P63M)보다 연속교반(P63CM)에서 높은 유기물감소율을 보였다.

pH, TKN, C/N비의 변화는 반응기간 동안 불규칙한 증가와 감소를 되풀이 하였으며 이는 감압증발후 슬러지의 실험결과와 거의 동일한 경향이었다.

시료의 성상은 두가지 교반조건에서 모두 양호한 상태를 보였으며 잦은 간헐교반의 경우 이러한 현상이 더 두드러져 반응완료 후 균등질의 입자상태를 나타내었고 악취도 전혀 감지되지 않았다.

(3) 생슬러지

생슬러지는 퇴비를 10% 반송하여 초기수분함량을 68%로 조절하여 퇴비화하였으며 이때 온도와 CO_2발생량변화는 Fig. 7과 같았다. 온도와 CO_2발생량은 감압증발후 슬러지와 돈분의 경우와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 교반강도에 따른 차이도 거의 볼 수 없었다. 한편 유기물의 분해정도를 알아보기 위한 TOC농도 변화 실험결과를 Fig. 8에 제시하였다. 두가지 교반조건에서의 TOC감소율은 10% 미만으로 감압증발후 슬러지와 돈분의 유기물감소율이 평균 30%인데 비하여 상당히 낮았다. 또한 감압증발후 슬러지와 돈분에서는 연속교반에서 더 높은 TOC감소율을 보였으나 생슬러지의 경우는 간헐교반(B68M)보다 연속교반(B68CM)에서 더 낮은 감소율을 나타내었다.

시료의 성상도 연속교반의 경우 반응조내 시료 일부가 반죽상태를 형성하여 악취가 감지되는 문제점이 있었다. 이러한 결과는 생슬러지의 경우 초기 수분함량이 68%로 다소 높아 연속교반이 오히려 시료상태에 악영향을 미친 것으로 보인다. 일반적으로 퇴비화반응에서 최적수분함량은 45~60%(남궁 완 등, 1993; 남궁 은,

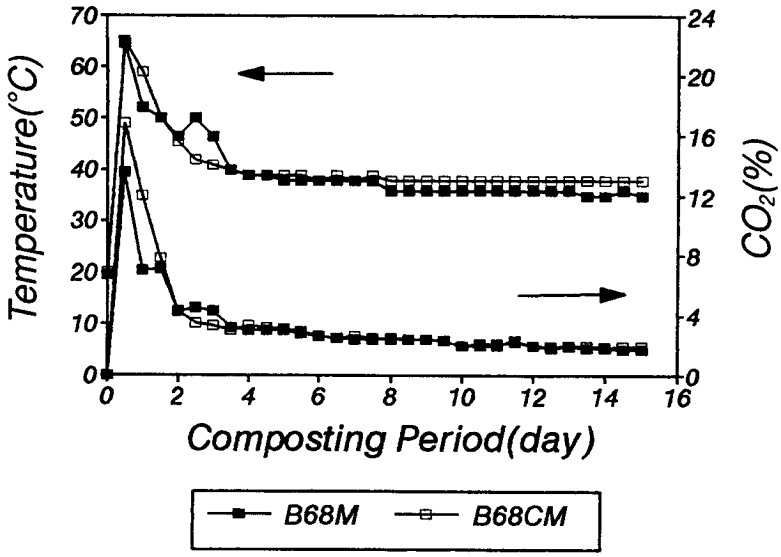

Fig. 7. Change of Temperature and CO_2 Concentration for Experiments B68M and B68CM.

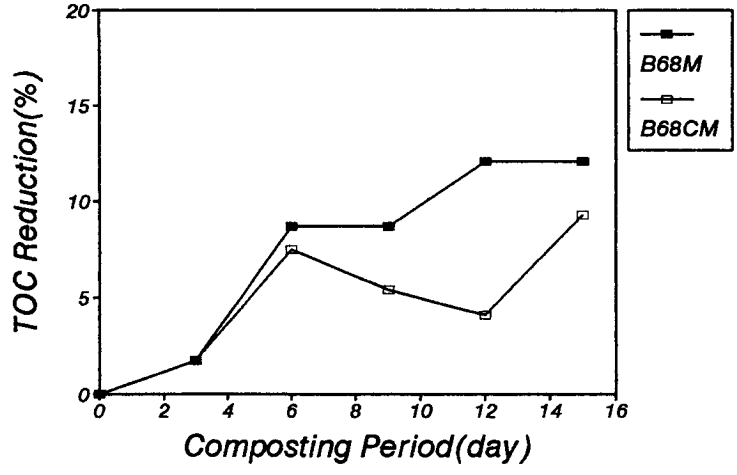

Fig. 8. TOC Reduction for Experiments B68M and B68CM.

1992)으로 수분함량이 60% 이상일 경우 공기공급이 원활하지 못하여 혐기성 상태가 되거나 침출수 발생문제를 고려하여야 한다(Poincelot, 1975). 본 실험에서 초기수분함량을 60%와 63%로 조절한 경우에는 이러한 문제가 발생하지 않았으나 초기수분함량을 68%로 한 경우에는 연속교반에 의하여 시료가 반죽상태로 되어 혐기성 화함으로써 악취도 발생하였다. 이에 초기수분함량이 높은 경우에는 연속교반보다 1일 3회전 정도의 간헐교반이 생슬러지의 퇴비화에 더 적합한 것으로 나타났다.

시료가 반죽상태를 형성한 것은 본 실험의 대상슬러지인 분뇨슬러지의 특성에 의한 것으로 보인다. 동일한 수분함량의 하수슬러지와 주방

폐기물을 대상으로 동일한 조건에서 실험해본 결과 이러한 현상은 나타나지 않았다.

3. 2 연속교반에서 초기수분함량의 차이에 따른 퇴비화반응 비교

연속교반조건에서 본 연구대상 세가지 폐기물의 TOC감소율을 Fig. 9에 나타내었다. 초기수분함량이 60%와 63%인 폐기물은 반응초기부터 6일경까지 높은 감소율을 보이다가 점차 완만해지는 경향을 보이며 반응 15일째에 약 30%의 높은 최종감소율을 나타내었으나, 초기수분함량 68%인 경우는 전체 반응기간 동안 뚜렷한 감소경향없이 10% 미만의 낮은 감소율을 보였다. 물론 폐기물의 성상차이에서 기인하는 부분도 있겠지만 감압증발 전후 슬러지의 TOC함량에 커다란 차이가 없음을 감안한다면(Table 1참

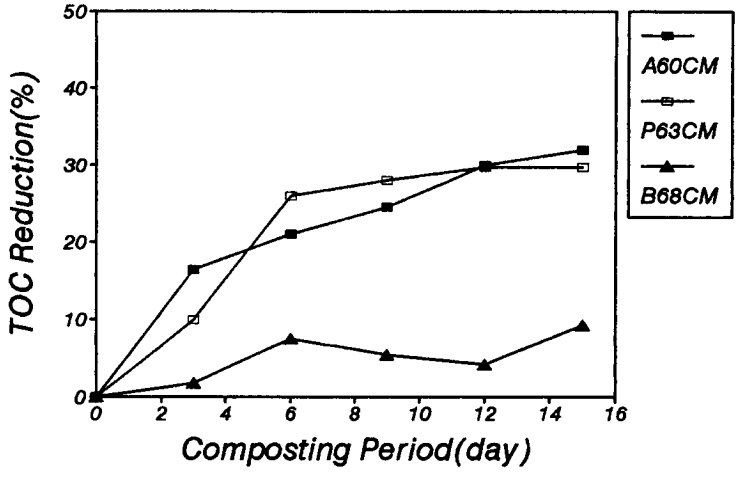

Fig. 9. Comparison of TOC Reduction for Experiments A60CM, P63CM and B68CM.

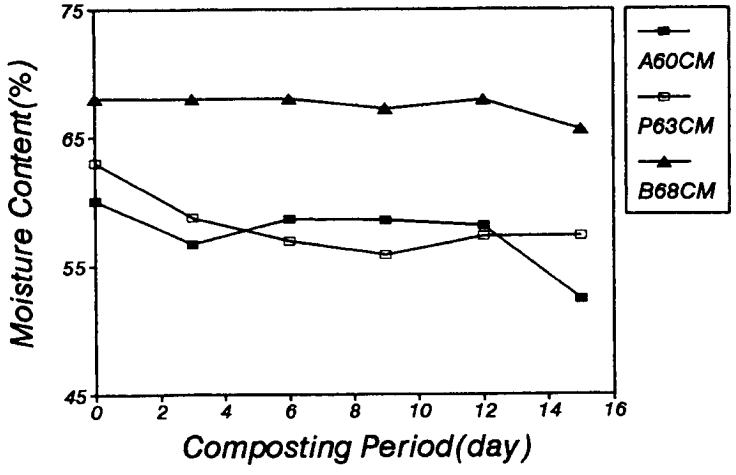

Fig. 10. Change of Moisture Content for Experiments A60CM, P63CM and B68CM.

조) 이러한 결과로 판단해볼 때 연속교반의 경우 초기수분함량이 퇴비화에 미치는 영향이 크다는 사실을 알 수 있다. 다시 말해서 교반효과는 본 실험에서와 같이 톱밥과 같은 공극개량제를 사용하지 않고 퇴비만을 반송하여 분뇨슬러지나 돈분을 퇴비화하는 경우 초기수분함량이 높은 조건에서는 높은 교반강도가 반응에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 이들 세가지 폐기물의 수분함량변화를 Fig. 10에 나타내었다. 수분함량변화는 초기수분함량이 60%와 63%인 경우는 반응완료시 수분함량이 52%와 57%로 감소하였으나 초기수분함량 68%인 경우는 반응기간 동안 거의 수분함량의 변화를 볼 수 없었다.

4. 결 론

퇴비만을 반송하여 초기수분함량을 조절한 세가지 폐기물을 대상으로 교반강도에 따른 퇴비화반응을 살펴보았다.

세가지 폐기물을 대상으로 퇴비만을 반송하여 교반장치가 있는 퇴비반응기에서 퇴비화한 결과 충분히 퇴비화가 가능함을 알 수 있었다. 또한 간헐교반과 연속교반의 두가지 교반강도에 따른 실험에서는 연속교반에서 간헐교반보다 유기물감소율이 더 높게 나타났으며, 시료의 성상도 균등질의 양호한 상태를 나타내었다. 그러나 초기수분함량이 68%인 생슬러지의 경우는 오히려 연속교반조건에서 더 낮은 유기물감소율을 나타내었으며 반응조 내 시료일부가 반죽상태를 형성하여 악취가 나는 문제점이 발생하였다.

연속교반에서 초기수분함량을 변화시켜 실험한 결과 초기수분함량이 60%와 63%인 경우에는 최종유기물분해율이 30%정도로 높았고 수분함량도 52%와 57%로 감소하였으나, 초기수분함량이 68%인 조건에서는 최종유기물분해율이 10% 미만으로 상당히 낮았으며 수분함량은 반응기간 동안 거의 감소되지 않았다.

5. 참 고 문 헌

남궁 완, 최정영(1993) "유기성폐기물 자원화기술", 유기성폐기물자원화협의회학회지, 제1권 제1호, pp 33~47

남궁 은(1992) "퇴비화공정의 설계기술", 유기성폐기물 자원화기술, 한국과학기술원 산학협동강좌, pp III69~III87

농업기술연구소(1988) 토양화학분석법

환경처(1991) 폐기물공정시험법

APHA, AWWA, WPCF(1992) Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed.

Bach, P.D., Shoda, M. and Kubota, H. (1985) "Composting reaction rate of sewage sludge in an autothermal packed bed reactor", J. Ferment. Technol., Vol. 63, No. 3, pp 271~278

Cassarino, C.J.(1987) "Municipal Organic Solid Waste Composting an Integrated Component of Recycling Center that Process Solid Waste", Compost: Production, Quality and Use, Elsevier Applied Science, pp 139~146

Gotaas, H.B.(1976) Composting, World Health Organization

Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. and Izawa, T.(1981) "Maturing Process of City Refuse Compost During Piling", Soil Sci. Plant Nutr., 27(3), pp 357~364

Haug, R.T., Kuchenrither, R.(1992) Municipal Sewage Sludge Management,

Technomic Publishing Co., Inc. pp 269~277, pp 516~528

Poincelot R.P.(1975) "The Biochemical and Methodology of Composting", Connecticut Agricultural Station Bulletin 754, Sep., pp 1~18