

하수슬러지를 이용한 음식물쓰레기 소멸화 가능성 평가

폐기물공학팀

배일상 · 정 권 · 전은미 · 유병태 · 김민영

Possibility Estimation of the on-site Garbage Composting by sewage sludge

Waste Engineering Team

Il-sang Bae, Kweon Jung, Eun-mi Jeon, Byong-tae Yu, and Min-young Kim

Abstract

This study was performed to evaluate efficiency of sewage sludge as microbial inoculator for active composting of food waste. In addition, possibility estimation as microbial inoculator and the effect of seeding in the process of composting were investigated. Food waste samples collected from a refectory were analyzed for physical-chemical properties. The samples were seeded with microbial inoculator of 2.85kg by the weight in each reactor. *Bacillus sp.* of facultative bacteria that predominated in sewage sludge was dominant species and in addition, *Micrococcus*, *Nitrobator*, *Nitrosomonas*, *Achromobactor Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Beggiatoand*, *Streptomyces*, *Actinomyces* and yeast was showed in sewage sludge. Total wet weight reduction was the highest in RUN 4(seeded sewage sludge and soil as bulking agent) and wet weight reduction rate was 75% in RUN 4. During the process of composting, the highest temperatures were 71.6°C in RUN 3(seeded sewage sludge and saw dust as bulking agent) after 15 days. First order kinetic constants of vanishing velocity calculated by $-d[A]/dt=k[A]^n$ were 0.673, 0.635, 1.107, 1.430g⁻¹ · day⁻¹ in RUN 1, RUN 2, RUN 3, and RUN 4 reactor, respectively. The effects of inoculation on composting of food waste were higher in sewage sludge reactor than in control reactor

Key words : garbage composting, sewage sludge, microbial inoculator

서론

하수·오수·분뇨 등의 유기성 폐수를 기존의 생물학적 공법으로 정화 처리하는데에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 최근에는 특수미생물을 이용한 하수처리공법이 실용화되고 있다. 이 공법은 생물학적 처리공정 내에 미생물 배양조를 설치하고 배양조 내에 자연계의 임의성 토양균을 형성시키는데 가장 적합한 환경조

건이 될 수 있도록 부식토, 토탄, 이탄 또는 토양성 미생물균의 생성작용으로 얻어지는 슬러지 결정체와 규산질이 함유된 다공질의 경석, 제오라이트 또는 맥반석 계통의 채석으로 충전된 반응기(Bio-Reactor)를 이용하여 임의성 토양 미생물을 활성 배양한다. 이와 같이 배양된 미생물들을 원수 유입조, 침사조, 유량조정조 및 포기조(반응조) 등에 일정량을 반송시켜 유기물질을 제거하며, 탈수된 cake는 2차분해가 일어나지 않아 토양개량제로

활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 탈수 cake는 불균일한 유기물 덩어리를 형성하고 있으며, 우점미생물은 세균으로, 균류나 방선균도 존재하며¹⁾, 혐기성세균과 탈질균도 많은 것이 특징이다. 또한 cake내에는 암모니아화균과 탈질균이 있어 산화반응인 질화와 환원반응인 탈질이 동시에 진행된다.

그러므로 하수처리시 필연적으로 발생하게 되는 cake를 매립처분하는데 2차적인 비용이 소요되며, 슬러지에는 각종 입성의 미생물이 포함되어 있으므로 재활용적인 측면에서 검토가 필요하다.

한편 소멸화 공정이란 발효과정의 원리와 마찬가지로 퇴비화 원리를 기초로하여 호기성상태에서 유기물이 퇴비화 미생물에 의하여 CO₂나 H₂O로 분해되는 개념이다.^{2),3)} 다만 한정된 반응기에서 일정 기간에 유기물을 분해시키기 위하여 상품화된 미생물제제를 첨가하여 반응을 가속화하며, 매일 음식물쓰레기를 일정량씩 투입하여 양적인 증감 없이 분해시키는 원리이다.⁴⁾ 즉 완전히 분해시키는 소멸이 아닌 소멸화라는 용어로 정의할 수 있다.

한편 우리나라 음식물쓰레기의 재활용율은 '99년 기준으로 33.9%로서 사료화, 퇴비화, 메탄화 등으로 처리를 하고 있으며, 음식물쓰레기 중 퇴비화는 10.8%정도⁵⁾에 불과하다. 음식물 쓰레기 처리는 안전성 면에서 퇴비화가 사료화에 비해 훨씬 유리하므로 본 실험에서는 퇴비화를 이용한 소멸화에 대해서 실험을 하였다.

본 연구는 하수처리시 발생하는 탈수된 슬러지와 각 가정에서 발생하는 소량의 음식물쓰레기를 동시에 처리함으로써 2차적인 처리비용을 절감하며, 유용한 자원으로 활용될 수 있도록 탈수 슬러지를 미생물제제로써의 활용 가능성과 이를 음식물쓰레기에 적용하여 소멸화 가능성을 평가하고자 한다.

실험재료 및 방법

1. 실험장치 및 재료

본 실험에서 사용된 용기의 크기는 길이 25cm, 폭 25cm, 높이 20cm의 스티로폼로 제작하였다. 기계적인 공기공급은 하지 않았으며, 반응조 상단에는 직경3.5cm의 구멍을 4개와 하단에 1개를 만들어 반응열에 의한 수분 증발과 자연적인 공기공급이 되도록 하였다. 대상시

료는 구내식당에서 발생하는 음식물쓰레기를 대상으로 하였으며, 실험에 이용된 탈수 슬러지는 담양군 환경사업소에서 발생하는 슬러지를 이용하였으며, 하수와 축산 폐수, 그리고 분뇨를 연계처리하는 산화구법에서 발생하는 슬러지를 이용했다. 슬러지를 미생물제제로서 가능성 평가를 위해서 대조군으로 미생물제제인 휴누룩의 원리를 이용한 발효도와 산에서 채취한 흙을 사용하였다. Table 1은 대상원료인 음식물쓰레기와 발효토, 산흙, 슬러지, 그리고 톱밥의 일반적인 성상을 나타냈다.

2. 실험방법

각 반응조의 초기 운전조건은 Table 2와 같으며, 각 반응조에는 음식물을 소멸화시키기 위한 미생물제제를 2.85kg 투입하였으며, 음식물쓰레기는 4인 가족기준 일

Table 1. Properties of food waste, sewage sludge, fermentation soil, soil and saw dust

Sample Component	Food waste	Sewage Sludge	Fermentation soil	Soil	Saw dust
pH	6.22	7.75	6.60	6.06	4.18
M.C(%)	71.21	80.32	25.27	10.65	9.70
TS(%)	28.79	19.68	74.73	89.35	64.6
O.M(%)	84.92	64.98	33.69	10.25	96.1
EC(ms/cm)	1.89	1.77	1.83	0.03	0.69
Salinity(%)	0.45	0.14	0.10	0.08	0.01
T-C(%)	45.10	25.49	21.85	3.30	48.9
T-N(%)	3.72	4.60	1.53	0.23	0.11
C/N Ratio	12.12	5.54	14.28	14.35	444.5

All data are mean values(n:3), M.C: Moisture Content
O.M: Organic Matter, EC: Electronic Conductivity

Table 2. Initial experiment condition of each reactor (RUN1, RUN2, RUN3, RUN4)

Reactor Component	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
pH	6.71	5.43	6.61	6.24
M.C(%)	43.13	31.28	59.23	51.99
O.M(%)	42.36	17.92	89.04	31.40
EC(ms/cm)	2.57	0.77	1.56	1.35
Salinity(%)	0.41	0.07	0.22	0.03
T-C(%)	34.41	6.60	40.09	12.35
T-N(%)	3.27	0.53	1.95	1.27
C/N Ratio	10.52	12.45	20.56	9.72
Food waste/ Inoculum(w/w)	1.2/2.85	1.2/2.85	1.2/2.85	1.2/2.85

일 발생량을 0.3kg/일·인으로 해서 일주일에 한번씩 1.2kg을 투입하였다. 반응조 RUN1, RUN2, RUN3, RUN4는 각각 발효토, 일반흙, 수분조절제로 톱밥을 넣은 슬러지, 수분조절제로 일반흙을 넣은 하수슬러지로 되어있으며, 미생물제제는 초기에만 투입하였으며, 계속적으로 일주일에 한번 씩 음식물쓰레기를 투입하여 21일 동안 실온에서 연속실험을 실시하였다. 슬러지의 수분함유율이 약 80% 정도로 높기 때문에 RUN3와 RUN4에 별도로 수분조절제를 넣었다. 기타 반응조에는 별도로 수분조절제를 첨가하지 않았다. 각 반응조에 pH는 조정하지 않았으며, 기계적인 공기 공급 없이 하루에 한번씩 뒤집어 줌으로써 공기 공급을 하였다.

3. 분석방법

시료채취는 시료를 균질화 시킨 후 1일 1회 채취하였다. pH, 함수율, 고형물함량, 유기물질, 염분, 전기전도도 등을 측정했으며, 반응기내의 온도 및 가스상물질 등은 하루에 한번 측정을 원칙으로 했으며, 필요시 수시로 측정을 하였다. 무게 변화는 습중량을 기준으로 전자저울로 측정을 했으며, C/N비는 원소분석기(Fison EA 1108)를 이용하여 건조된 시료로 분석을 하였다. pH와 EC는 시료 10g에 대해 증류수 50ml를 가하여 그 여액을 측정시료로 하였으며, 수분함량은 105℃에서 항량이 될 때까지 건조하여 측정했다. 유기물함량은 시료를 전기로에서 600℃정도로 2시간 가열하여 냉각 후 측정하였다. 반응기내의 온도 및 CO₂농도와 O₂농도는 24시간격으로 가스분석기(Geotechnical Instruments Model GA94)를 사용하여 측정 하였다.

결과 및 고찰

1. 슬러지의 미생물학적 분석

유기물은 주로 세균, 방성균 및 곰팡이 등에 의해서 분해된다. 분해에 중추적 역할은 하는 것은 세균이다. 본 실험에서 하수 슬러지 역시 세균이 우점하고 있었으며, 특히 세균 중에서 *Bacillus*(31종속)종이 우점종으로 나타났으며, 이외에도 *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Achromobactor* 등이 분석되었다.

Fig. 1과 2는 현미경으로 관찰한 *Bacillus sp.*와

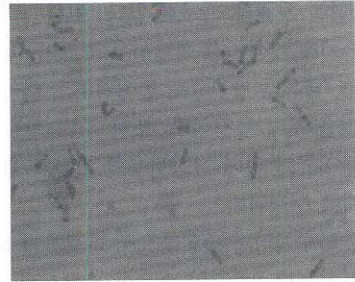


Fig. 1. *Bacillus sp.* (It was grow in the Nutrient Broth medium × 1000)



Fig. 2. *Actinomyces sp. 1* (It was grow in the CC medium × 1000)

*Actinomyces sp.*의 균체사진이다.

2. 소멸화 진행에 따른 특성변화

1) 총습중량 무게 변화

소멸화에 의한 유기물질의 감소를 간접적으로 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 습중량 무게변화를 연속운전 조건별로 평가하였다.

시간이 경과에 따른 습중량 무게감소는 계속적으로 RUN4가 가장 우수했으며, 대조군으로 흙을 첨가한

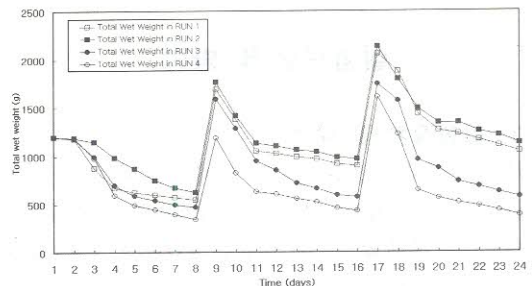


Fig. 3. Changes of total weight with time during each reactor(RUN 1, RUN 2, RUN 3, RUN 4)

RUN 2 반응조가 가장 무게 감소가 낮았다. 일주일마다 음식을 투입하였기 때문에 음식을 투입하는 시점에서 무게 증가가 나타났다. 초기무게가 각각 1200g으로서 3주 후에는 반응조에 잔존하는 총습중량무게는 RUN 1, RUN 2, RUN3, RUN4가 각각 1047g, 1130g, 576g, 385g이었으며, 이론적으로 음식물 쓰레기 분석결과 총량대비 4.3%가 난분해성물질이므로 3주 후에는 154.8g이 이론적으로 남아야 한다.

그러나 셀룰로즈(Cellulose)와 리그닌(Lignin)과 같은 성분의 분해가 느리기 때문에 이론 값 보다 실제 잔존 무게가 더 높게 나타났다.

한편 RUN 1과 RUN 2는 미생물에 의한 활발한 유기물 분해가 이루어지지 않아 유기물이 계속적으로 축적되는 것으로 판단되며, RUN3와 RUN4는 초기 무게에 비해 월등히 감소하였음을 알 수 있으나, 미량의 난분해성 유기물질이 축적된 것으로 판단된다. 그러므로 RUN 3와 RUN 4의 총습중량무게 감소결과로부터 슬러지를 미생물계재로서의 이용가능성을 확인해 주었다. 한편 이들 무게차를 측정하여 총습중량무게 감소율(r)의 평균을 Table 3에 나타내었다. 실험기간동안 습중량무게 감소율은 RUN 1과 RUN 2가 45%로 가장 낮았으며, 하수슬러지와 수분조절제로 흡을 이용한 RUN 4가 75%로 가장 높았다.

2) 온도 변화

시간에 따른 온도변화는 Fig. 4에 나타났다. 음식을 투입하고 하루만에 온도가 급등함을 알 수 있다. 즉 유기물질이 반응조에 유입되었을 때 미생물들의 작용에 의한 발생열 때문에 온도의 변화가 나타났으며, 분해가 대부분 완료되었을 때에는 온도가 저하되는 현상을 나타냈다. 초기 일주일 동안은 미생물들이 지체기(lag phase) 과정을 거치기 때문에 온도의 급격한 변화 없이 완만하게 상승했다. 실험 2주 제부터 음식을 투입한 다음날 온도가 최고 정점에 이르렀다.

실험 기간동안 RUN 3가 가장 높은 온도 패턴을 보여

Table 3. Variation of temperature with time in each reactor

Reactor	initial wet weight	final wet weight	reduction rate(%)
RUN 1	1200g	1047g	45%
RUN 2	1200g	1130g	45%
RUN3	1200g	576g	67%
RUN4	1200g	385g	75%

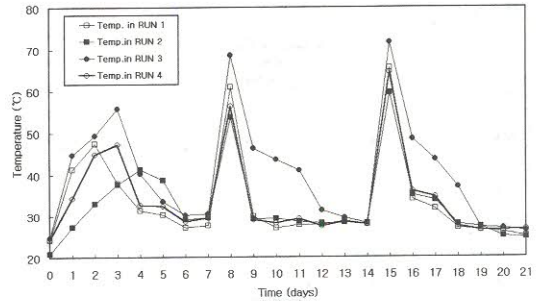


Fig. 4. Variation of temperature with time in each reactor (RUN 1, RUN 2, RUN 3, RUN 4)

주고 있으며, 최고 온도는 71.6°C이며, 최고점에서 온도 하강도 완만하게 하강하였다. 이는 미생물에 의한 유기물의 활발한 분해와 수분조절제로 투입된 톱밥의 영향일 것으로 판단된다. 초기에 RUN 3의 경우 톱밥의 영향으로 C/N비가 20.56으로 다른 반응조에 비해 높았다.

3) 소멸화 속도

소멸화 속도는 무게 변화를 측정해서 구할 수 있으며, 본 연구에서 이용한 속도식은 다음과 같다.

$$-d[A]/dt = k[A]^n$$

소멸화 반응에서 슬러지의 효율과 미생물의 활성도는 소멸화반응속도로부터 평가될 수 있다. 그러므로 7일 후의 최종 1차 소멸화 속도 상수는 각각의 반응조 RUN 1, RUN 2, RUN 3, RUN 4에서 0.673, 0.635, 1.107, 1.430 $g^{-1} \cdot day^{-1}$ 로서 RUN 4의 반응조가 가장 우수하였다. 또한 슬러지를 이용한 RUN 4 반응조가 가장 좋은 무게 감소율을 나타냈으므로 RUN 4 반응조에 대한 소멸화 속도식과 결정계수(R^2)는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 $Y=0.1922X+0.2428, R^2=0.8517$ 이다.

4) 가스상 물질들의 변화

Fig. 6에서는 RUN 4 반응조의 온도, CO_2 그리고 O_2

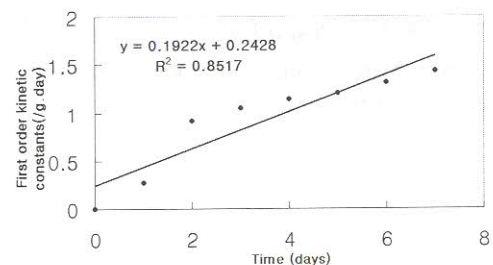


Fig. 5. Correlation of first order kinetic constants and time in RUN 4

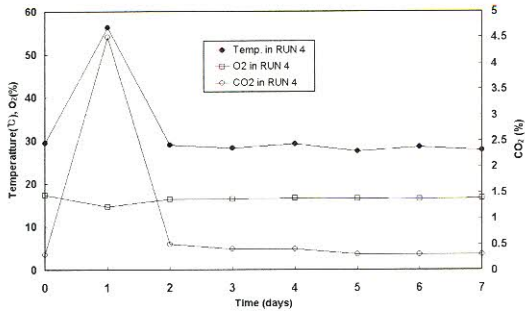


Fig. 6. Changes of temperature, CO₂ and O₂ with time in RUN4

의 변화를 나타낸 그래프이다. 음식물 투입 후 하루만에 온도가 최고에 도달했으며, 전분이나 당류의 분해에 의하여 온도와 CO₂는 최고에 달했다. 이때 미생물들이 산소를 최고로 많이 소비하게 되어 산소 농도는 최저에 달했다.

또한 H₂S의 농도는 음식물 투입 후 1일이 경과했을 때 조금 나타났으며, 2일째 부터는 거의 나타나지 않았다. 이는 슬리지 속에 우점종으로 점유하고 있는 혐의성 미생물 중 세균류인 *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Beggiato*류 등과 방사선 균류인 *Streptomyces*, *Actinomyces* 등과 효모 등의 미생물에 의하여 대부분의 악취가 제거된 것으로 판단된다.

결 론

하수처리 시 발생하는 탈수슬리지 내에는 소멸화 시 필요한 각종 미생물이 공존하고 있으므로 이를 이용한 미생물제제로서 이용가능성과 음식물쓰레기 소멸화 가능성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하수 슬리지내에는 세균이 우점하고 있었으며, 특히 세균 중에서 *Bacillus*(31종속)종이 우점종으로 나타났다. 이외에도 *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Nitrobator*, *Nitrosomonas*, *Achromobactor* 등이 나타나는 것으로 분석되었다.

2. 총 습중량 무게 감소는 하수슬리지와 수분조절제로 흡을 이용한 RUN 4 반응조가 가장 우수했으며, 습중량무게감소율은 75%였다.

3. 실험기간 중 최고 온도는 RUN 3(하수 슬리지와 수분조절제로 톱밥을 이용)가 71.6°C였으며, 최고점에서 온도 하강도 완만하게 하강하였다.

4. 7일 후의 최종 1차 소멸화 속도 상수는 각각의 반응조 RUN 1, RUN 2, RUN 3, RUN 4에서 0.673, 0.635, 1.107, 1.430 g⁻¹ · day⁻¹ 로서 RUN 4의 반응조가 가장 우수하였다.

5. 음식물 투입 후 하루만에 온도와 CO₂ 농도는 최고에 달했으며, H₂S 농도는 음식물 투입 후 2일째부터 거의 나타나지 않았다. 이는 슬리지 속에 우점종으로 점유하고 있는 혐의성 미생물 중 세균류인 *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Beggiato*류 등과 방사선 균류인 *Streptomyces*, *Actinomyces* 등과 효모 등의 미생물에 의하여 악취를 제거되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김응호: 환경정화를 위한 미생물학, 일진사(1995)
2. Nakasaki K., Yaguchi H., Sasaki Y. and Kubota H.: Effect of Oxygen C/N Ratio Thermophillic Composting of Gabage, J.Ferment Bioengineering, 73, pp.43/45.
3. Phae C.G., Shoda M. and Kubota H.: Suppressive effect of *Bacillus subtilis* and its products on Phytopathogenic Microorganisms, J.Ferment Bioeng., 69:1-7(1990)
4. Hoitink H.A.J., Kuter G.A. and Kuter C.E. and Kipp C.E.Jr.: Optimum process parameters for composting sludge, Ohio Report, 69(3):35-49(1984)
5. 환경부: 2000 음식물쓰레기감량·재활용정책 (2000)