

발효소멸기를 이용한 음식물 쓰레기의 감량 및 악취제거

고래현 · 이강형 · 유진수¹ · 송홍규*

강원대학교 자연과학대학 생명과학부, ¹(주)미생물나라

음식물 쓰레기의 효과적인 처리를 위해 발효소멸기를 제작하고 유기물 분해능이 우수한 균주들을 접종하여 음식물 쓰레기의 감량과 악취제거능을 조사하였다. 먼저 *Bacillus subtilis* (cellulase 생성), *Bacillus cereus* (amylase 생성), *Sphingobacterium faecium* (protease 생성)를 분리하여 효소의 활성을 조사한 결과 각각 최대 153, 219, 412 unit/ml의 우수한 활성을 나타냈다. 미생물에 의한 음식물 쓰레기의 처리효과를 확인하기 위해 먼저 간헐적 통기 시의 감량효율을 검토한 결과 15일 후 접종시료가 약 11%, 비접종시료가 3.4%의 분해율을 나타냈다. 간헐적 통기 시 pH가 급격히 낮아지면서 처리효율이 낮아지는 문제를 해결하기 위해 지속적으로 통기시키면서 음식물 쓰레기 처리 효율을 측정한 결과 간헐적 통기에서의 처리 효율에 비해 약 10% 정도 분해율이 증가했고, 교반기 내부의 pH가 5~7 수준에서 유지되었다. 음식물 쓰레기 처리에 가장 적합한 조건을 찾기 위해 pH와 온도를 조절하면서 분해효율을 조사한 결과 pH 7, 30°C에서 15일 후 가장 우수한 35%의 분해효율을 나타냈다. 한편 음식물 쓰레기가 분해되면서 발생하는 악취를 저감시키기 위해 biofilter를 제작, 장착함으로써 제어하고자 하였다. 황 화합물을 산화시키는 홍색비유황세균을 함유한 biofilter를 장착함으로써 5~6배 정도로 복합악취를 저감시킬 수 있었으며, 악취 원인물질 중 중요한 황 화합물인 methylmercaptan은 213 µg/L에서 158.6 µg/L으로, hydrogen sulfide 또한 2473.8 µg/L에서 1262 µg/L로 크게 감소하였다. 이 연구 결과는 음식물 쓰레기의 효율적인 처리 및 악취제거에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 음식물 쓰레기 처리에 이용할 수 있는 미생물자원의 확보 측면에서도 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

Key words □ biofilter, food garbage, malodor, purple nonsulfur bacteria

인구의 증가와 생활수준 향상으로 인하여 폐기물이 대량으로 발생하고, 특히 처리시설이나 처분장소가 부족한 대도시의 경우에는 음식물쓰레기 문제가 날로 심각해지고 있다. 2002년 기준 우리나라의 생활폐기물 쓰레기 발생량은 하루 49,902 톤이며, 그 중 음식물 쓰레기는 하루 11,397 톤을 차지하고 있다(17). 이제까지는 발생된 음식물 쓰레기의 대부분이 매립과 소각에 의해 처리되고 있는 실정이었다. 그러나 2005년부터 매립 시에도 소멸화, 퇴비화 등의 전처리가 이루어지고 남은 것에 대해서만 매립이 가능하도록 법제화되어 있으므로 음식물 쓰레기의 처리는 중요한 문제가 아닐 수 없게 되었다(16). 또한 일반 소각시에는 음식물 쓰레기에 포함된 수분 때문에 소각로의 온도가 낮아져서 다이옥신류(dioxin과 dibenzofuran)의 유해 가스가 발생하는 문제점이 있다(21).

우리나라에서 음식물 쓰레기를 처리하는데 연간 12조원의 비용이 필요할 것이라는 예측이 나오고 있는 상황에서 가정용 음식물 쓰레기의 감량을 위한 기기들이 출시되고 있다. 현재 우리나라에서 주로 생산되는 제품들은 건조 압축방식과 발효 소멸방식의 2종으로 구분되는데, 건조 압축방식은 음식물 쓰레기의 75%를 차지하는 수분을 가열 등으로 건조시킨 후 물리적으로

압축하여 그 부피를 줄이는 방식인데 유기물들이 그대로 남아있기 때문에 매립 후에 다시 환경오염을 유발하는 문제점이 발생하고 있다. 발효 소멸장치는 교반과 미생물의 분해 능력을 이용하여 쓰레기 내의 유기물질을 물과 이산화탄소로 분해하는 방식으로 최근에 관심이 증가하고 있는 방식인데 소멸화 촉진제로 유기물의 분해활성이 우수한 미생물을 이용하면 음식물 쓰레기 처리 시 발생하는 문제점의 해결을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 최근까지 다양한 미생물학적 접근이 시도되고 있지만(3, 10, 14) 확실한 처리 방법이 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 가정용 음식물 쓰레기의 처리 시 문제가 되고 있는 것이 악취의 발생이다(3). 기존에 개발된 기기들은 이러한 문제를 해결하기 위해 에어커튼을 치는 등 물리적 방법들을 이용하였으나 과도한 전기 사용의 문제점을 갖고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 biofilter의 개념이 도입되고는 있지만 확실한 효과를 보이는 연구 결과들은 거의 보고되고 있지 않는 실정이다. 본 연구에서는 음식물 쓰레기의 효과적인 처리를 위하여 섬유소, 전분 및 단백질 분해능이 우수한 균주들을 혼합 적용하고 최적의 처리조건을 확립하여 음식물 쓰레기 처리효율을 극대화하는 한편, 악취를 제거하고(15) 유해물질을 제거하는 등 환경개선에 다양한 역할을 한다고 알려져 있는 홍색비유황세균(12)을 함유한 biofilter를 장착하여 효과적으로 악취를 제거할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다.

*To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-33-250-8545, Fax: 82-33-251-3990
E-mail: hgsong@kangwon.ac.kr

재료 및 방법

균주의 분리, 동정 및 혼합균주의 준비

음식물 쓰레기의 효과적 처리를 위한 균주는 현재 우리나라 음식물 쓰레기의 주된 성분인 섬유소와 전분, 그리고 단백질 분해효소의 활성이 우수한 균주를 분리하여 실험에 사용하였다.

- Cellulase 생산 균주의 분리

Cellulase 생산 균주는 토양 1 g을 증류수 100 ml에 넣고 160 rpm에서 30분간 교반한 뒤 희석하여 CMC medium [carboxymethyl cellulose (CMC) 5 g, peptone 5 g, KH_2PO_4 5 g, yeast extract 0.5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, agar 15 g, pH 7.0 per 1.0 liter D.W.]에 도말한 뒤 30°C에서 이틀간 배양하여 나타난 집락을 대상으로 0.5% Congo red 시약을 1 ml 처리하여 가장 큰 황색환이 나타난 균주를 선별하였다(22). 황색환이 큰 균주를 nutrient broth medium (Difco Lab., USA) 40 ml에 접종하여 24 시간 배양한 뒤, 이 배양액 0.4 ml를 CMC broth 40 ml에 접종하여 시간에 따른 cellulase 활성을 측정하였다. 효소활성 측정을 위해 배양액을 12,000×g에서 15분간 원심분리하여 얻은 상등액 0.5 ml과 1×6 cm의 filter paper 및 1 M phosphate buffer (pH 8.0) 1 ml를 혼합한 후 50°C의 항온수조에서 한 시간 동안 반응을 시킨 후 DNS reagent (dinitrosalicylic acid 10.6 g, phenol 7.6 ml, NaCl 8.3 g, rochelle salt 306 g, NaOH 19.8 g, D.W. 1416 ml)를 3 ml 첨가한 뒤 15분 동안 끓는 물에 중탕하여 상온까지 냉각 시킨 후 분광분석기(Shimadzu Co., Japan)를 이용하여 550 nm에서의 흡광도를 측정하였고, 정량은 glucose standard를 이용하여 환산하였으며, 1 unit은 1분 동안 1 μmole의 glucose를 생성하는 효소의 양으로 하였다(2, 19).

- Amylase 생산 균주의 분리

Amylase 생산 균주는 토양 1 g을 증류수 100 ml에 넣고 160 rpm에서 30분간 교반한 뒤 희석하여 starch nutrient agar medium (starch 10 g, nutrient broth 8 g per D.W. 1 liter)에 도말한 다음 30°C에서 이틀간 배양 후 나타난 집락을 분리하여 얻었다. 균주의 집락에 Gram's iodine solution (iodine 1 g, iodine phosphate 2 g, D.W. 300 ml)을 1 ml 처리하여 투명환이 가장 큰 균주를 대상으로 cellulase와 같은 방법으로 amylase 활성을 측정하였다(3, 20).

- Protease 생산 균주의 분리

Protease 생산 균주는 토양에서 분리하였으며, 선별배지로는 1% skim-milk agar medium (skim-milk 10 g, nutrient broth 8 g per D.W. 1 liter)을 사용하였다. 선별배지에서 투명환을 보이는 균주를 선별하여 protease 활성을 측정하였다. 활성측정은 배양 상등액 0.5 ml과 1% casein을 100 mM Tris-HCl (pH 8.0)에 녹인 기질 0.5 ml을 혼합한 후 30°C 항온수조에서 1시간 반응시킨 후 20% trichloroacetic acid 0.5 ml을 첨가하여 반응을 정지시킨다. 혼합용액을 15분간 실온에서 방치시킨 후 16,600×g로 원심 분리한 후 280 nm에서 흡광도를 측정하였다. 반응산물은 tyrosine standard를 통해 환산, 정량하였으며, 효소활성 1 unit은 1분당 1 μg의 tyrosine을 생성하는 효소의 양으로 하였다(18).

- 홍색비유향세균과 분해균주의 준비

각각의 분리 균주를 30°C에서 50시간 동안 1% CMC, 1% starch, 1% skim-milk broth에서 진탕배양하였고, 홍색비유향세균은 (주)미생물나라에서 분리하여 상품화된 *Rhodobacter* sp.와 *Rhodospirillum* sp. 혼합균주를 사용하였는데 30°C, 혐기성, 명조 건 (3000 Lux)에서 7일간 배양한 후 각각 10^7 cell/g이 되도록 보정하여 접종하였다. 접종 균주는 각각 100 ml씩 진탕배양한 배양액을 5000×g, 50분간 원심분리하여 pellet을 증류수에 세척한 다음, 각각 25 ml씩 혼합하여 교반기에 접종되는 균주의 부피가 100 ml로 모두 동일하게 준비하여 접종하였다.

- 분리균주의 16S rDNA 염기서열 분석

분리된 균주들 동정하기 위해 16S rDNA 염기서열 분석을 실시하였다. PCR primer는 universal primer 27F; 5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3'와 1492R; 5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3'을 사용하였고, sequencing 결과는 BLAST program을 이용하여 비교하였다.

교반장치 및 운전조건

본 연구에서는 음식물 쓰레기의 효과적인 처리에 적합한 교반기를 제작하였고(부피; 8.6 l, 직경; 21 cm, 길이; 15 cm)(Fig. 1), 교반기의 공기의 주입과 pH, 그리고 온도에 따른 음식물 쓰레기 처리 정도를 분석하기 위하여 15일간 1일 1회 공기공급 및 지속적인 통기 조건에서의 처리 결과를 조사하였다. 1일 1회 공기공급은 30분간 유입, 유출구를 열어 자연적으로 통기시켰으며, 지속적인 통기 조건은 2 L/min으로 공기를 공급하였다. 실험에 사용한 음식물 쓰레기는 실험의 정확도를 높이기 위해 밥(30%), 야채(40%), 고기(15%), 김치(10%), 기타(5%)로 구성하여 매 실험시 균일하게 첨가하였다. 실험을 시작할 때 500 g을 투입하고 매일 100 g씩 첨가하였다. 원활한 공기 공급을 위한 증량제(bulking agent)로는 삼나무 재질로 된 3~5 mm 크기의 우드칩(wood chip)을 사용하였는데, 이는 cellulose: 50~60%, lignin: 25~35%, hemicellulose: 10~20%로 구성되어 있다. 미생물에 의한

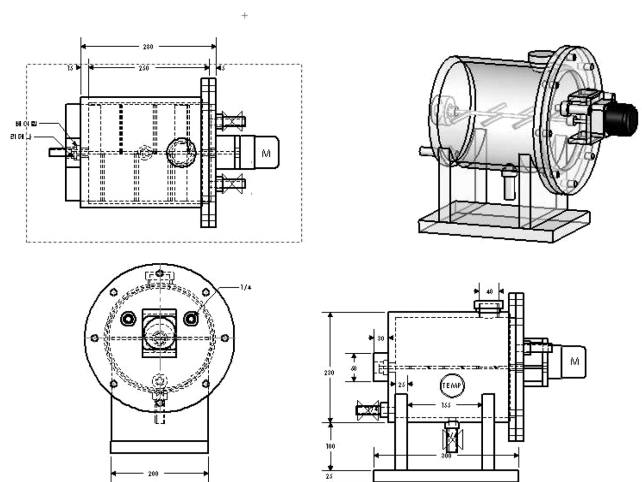


Fig. 1. A schematic diagram of food waste decomposing equipment.

음식물 쓰레기의 처리 시 수분 함유량은 그 처리 효율을 결정하는데 매우 큰 영향을 미치기 때문에 55-65%의 수분 함유량을 유지하는 것이 바람직하며(8), 통기 시 수분의 증발량이 매우 크기 때문에 적정 수준의 수분함량을 유지하기 위해 하루에 100 ml의 증류수를 보충하였다.

지속적 통기 하에 교반기 내의 pH와 온도의 영향을 조사하기 위해 pH를 5, 6, 7, 8로 일정하게 유지시키고, 또한 온도를 20, 30, 40, 50°C가 되도록 유지하여 15일간의 음식물 쓰레기 감량을 조사하였다. 공통적으로 10 rpm의 교반 속도를 유지하였으며, 15일 동안 매 15분간 교반하고 45분간 정지 상태가 반복되는 조건 하에 실험을 실시하였다.

미생물에 의한 감량효율은 음식물 쓰레기 시료를 건조기에서 90°C의 온도로 완전히 건조시킨 후 무게를 달아서 그 효과를 분석하였다. 감량율은 음식물 쓰레기의 총 투입무게와 최종 남은 무게로부터 계산하였다.

Biofilter에 의한 복합악취 및 황 화합물의 저감

담체로 사용할 스펀지 (0.3×0.3×0.3 mm)를 증류수에 넣고 멸균하여 1 liter 병에 가득 넣고, 홍색비유허세균의 생장을 위한 mineral salts acetate broth 배지 400 ml과 홍색비유허세균 배양액 100 ml을 혼합하여 30°C 명조건에서 7일간 배양하였다. 세균 함유 담체 20 g을 유리컬럼에 넣어 biofilter를 만든 후 음식물 쓰레기 처리에 사용되는 교반기의 공기배출구에 설치하였다. 대조구는 멸균한 담체를 사용하였다.

공기배출구와 biofilter를 통해 나오는 복합 악취는 Handheld Odor Meter (Shinyei, Japan)를 이용하여 각각의 조건에 따른 상대적인 복합 악취를 측정, 비교분석하였다. Biofilter의 길이에 따른 악취 감소율을 분석하기 위해 각각 4×20 cm, 4×40 cm, 4×60 cm 크기의 biofilter를 사용하였고, 교반기에서 악취의 측정은 직접 나오는 공기와 대조구 biofilter, 그리고 홍색비유허세균을 넣은 biofilter를 통과하는 공기를 측정하여, 각각의 상대적인 복합 악취 정도를 비교, 분석하였다. 복합악취에 대한 정량적 접근을 위해 황화수소를 대상으로 검량선을 작성하였고 100 unit은 0.1 mg/L로 결정하였다.

교반기 내의 황 화합물의 분석은 시료채취 주머니(5 L aluminum polyester bag)에 배출 가스를 포집한 후 실험실로 이동하여 gas chromatography로 분석하였다. GS-Q (30 m×0.53 mm I.D.×2.65 µm film) 컬럼과, 황 화합물에 선택적 감응이 뛰어난 FPD (flame photometric detector)를 사용하였으며, carrier gas는 helium 10 ml/min, injection temperature 250°C, concentration temperature -197°C, desorption temperature 145°C, oven

temperature 50°C (4 min) -20°C/min -210°C (8 min)의 분석조건으로 분석하였고, 표준가스의 분석을 통해 얻은 검량선으로부터 농도를 계산하였다.

결과 및 고찰

균주의 분리 및 효소 활성

분리된 균주들 중 cellulase, amylase와 protease의 활성이 가장 우수한 균주를 선별하였고, 동정을 위해서 16S rDNA sequence 분석을 실시하였다. 그 결과 A1016, E-11와 YA32Y 균주가 각각 *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Sphingobacterium faecium*과 99.3%, 99.5%, 98.5%가 일치하는 유사도를 나타냈다 (Table 1). 종 수준까지의 정확한 동정을 위해서는 다양한 생화학적 시험이 필요하다.

우리나라 음식물 쓰레기 구성성분 중 큰 비중을 차지하는 채소류의 섬유소를 효과적으로 분해하기 위해서 기존에 분리한 황색환이 큰 균주들 중 섬유소 분해 효소의 활성을 측정한 결과 A1016 균주가 배양 48시간에서 최대 153 unit/ml의 섬유소 분해 활성을 보였고, 이는 배 등(9)이 보고한 *Fibrobacter succinogenes* 서의 42.7 unit/ml 보다 3배, 권과 정(2)이 보고한 *Cellulomonas* sp.의 80 unit/ml과 비교해서 2배 가까이 높은 결과로서, 이 분리 균주를 이용함으로써 음식물 쓰레기에 포함되어 있는 섬유소를 빠른 시간 내에 효과적으로 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 섬유소 분해효소의 온도(20, 30, 40, 50°C)와 pH (pH 5, 6, 7, 8)에 따른 효소 활성을 측정한 결과 이 범위 내에서 온도와 pH에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다(결과 미제시).

음식물 쓰레기의 또 다른 중요 성분인 전분을 효과적으로 처리하고 곡류의 첨가로 음식물 쓰레기 간의 응집현상이 발생하여 미생물의 접근이 제한되는 문제점을 극복하기 위해서 전분 가수분해 효소를 분비하는 균주를 분리하여 그 효소 활성을 측정하였다. Starch agar 배지에서 가장 큰 투명대를 보인 E-11 균주가 24시간에서 최대 활성(219 unit/ml)을 나타냈으며, 이는 Emtiazi and Nahvi (20)가 보고한 *Cellulomonas* 의 80 unit/ml보다 약 3 배가량 높은 결과로 음식물 쓰레기의 곡류성분을 빠르게 분해할 수 있을 것으로 판단된다. pH에 의한 영향은 pH 5, 6에서 약간 저하가 되었지만 큰 차이를 보이지는 않았고, 배양 중 최대 활성을 나타내는 시간은 같은 경향을 보였다(결과 미제시).

마지막으로 음식물 쓰레기의 3대 구성성분인 단백질의 처리를 위해 단백질 가수분해 효소의 활성이 우수한 균주를 분리하여 실험에 이용하였다. 단백질 가수분해 효소의 활성이 가장 우수한 균주 YA32Y의 효소 활성을 측정한 결과 48시간에서 최대 47

Table 1. Identification of isolated bacteria for treatment of food garbage

Strain	Sampling site	Gram staining	Accession number	Taxon
A1016	Rotted wood	+	DQ198162	<i>Bacillus subtilis</i> (99.3%) ^a
E-11	Compost	+	DQ207729	<i>Bacillus cereus</i> (99.5%)
YA32Y	Compost	-	AJ438176	<i>Sphingobacterium faecium</i> (98.5%)

^aAccording to sequence identities (%) at NCBI

unit/ml의 활성을 나타냈다. 김 등(4)이 보고한 현미 발효 미생물인 *Bacillus*의 23.67 unit/ml과 비교하여 2배 이상 높은 결과로 음식물 쓰레기의 처리에 매우 효과적일 것이라 판단된다.

미생물에 의한 음식물 쓰레기의 분해효율 평가

홍색비유허세균은 우수한 유기물 분해능과 악취제거 효율이 보고되고 있으며 특히 유기성 폐수, 돈분 폐수, 음식물 쓰레기의 처리 등에 많은 연구가 이루어지고 있다(6, 11, 15). 그러나 보다 효과적인 음식물 쓰레기의 처리를 위해 음식물 쓰레기의 주요 구성물질의 분해효소를 분비하는 3종의 미생물을 추가로 혼합하여 그 분해효율을 평가하였다.

간헐적 통기 조건 하에서 음식물 쓰레기의 감량율을 분석한 결과 15일까지 미생물을 처리하지 않은 시료는 3.4%의 감량을 보인 반면 미생물을 처리한 시료에서는 11%의 감량효과를 나타냈다. 이러한 결과는 간헐적 통기에 따른 산소고갈로 인한 무산소 조건 형성 시 발효에 의한 유기산과 이산화탄소가 축적되면서 pH가 급격히 매우 낮은 수준으로 떨어지면서 미생물들에 의한 분해 작용이 크게 저해를 받았기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 일정시간이 지나면서 떨어진 pH가 다시 올라가는 기존의 보고(15)와는 달리 초기에 크게 낮아진 pH가 계속 지속되는 경향을 나타냈고, 이는 음식물 쓰레기의 미생물학적 처리에서 큰 처리효과를 얻지 못하는 중요한 원인 중 하나이며, 교반기 내의 조건이 산성화가 되면 분리균주의 성장과 효소의 활성이 억제되어 음식물 쓰레기의 감량 효율에 큰 악영향을 미칠 것으로 판단할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 통기나 처리 중에 pH를 보정함으로써 해결이 가능할 것으로 생각되지만 후자는 계속적으로 pH를 측정, 관리를 필요로 하기 때문에 유기물의 신속한 호기성 분해를 위해서도 통기가 보다 현실적인 대안이 될 수 있을 것이다.

지속적 통기 시에는 15일까지 접종과 비접종 교반기에서 각각 18.8%와 13.8%가 감량되었는데, 간헐적 통기조건 실험에 비해 감량효율이 10% 정도 향상되었다. 이는 지속적 통기에 의한 급격한 pH의 변화가 상당부분 완화되었으며(Fig. 2), 그로 인해 분리균주의 교반기 내에서의 분해 효소 활성이 충분히 작용한 것으로 알 수 있다. 그러나 교반기 내에서의 분리균주의 활성을 최대한으로 높이기 위해서는 지속적 통기뿐만 아니라 인위적인 pH의 조절 또한 필요할 것으로 판단된다. 홍과 정(15)은 광합성 미생물을 단독으로 처리하여 27일간의 실험에서 46.5%의 감량결과를 보고하였는데 실험기간 및 음식물 쓰레기 조성 등의 차이에 따른 것이므로 절대적인 비교가 어렵다. 본 연구에서의 감량효과를 극대화시키기 위해서는 교반기 내부의 환경이 최적화가 필요하며 이러한 문제를 해결하기 위해서는 운전 중 접종 균주의 동향에 대한 분자생물학적 방법을 이용한 monitoring (7)이 필요할 것으로 판단된다.

음식물 쓰레기의 호기성 처리에서 pH의 재조정은 일부 과도한 유기산의 생성 및 반응속도의 저하를 현저히 억제시킬 수 있음을 확인한 결과가 보고된 바 있으므로(1), 지속적인 pH의 조정에 의한 음식물 쓰레기의 감량효율을 조사하고 비교하여 최적의 pH

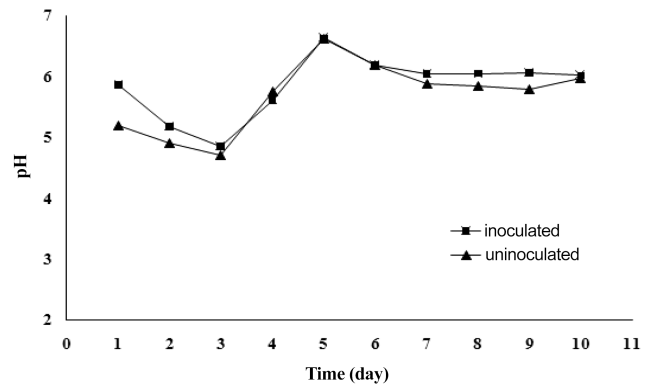


Fig. 2. pH change in the food waste samples treated under continuous aeration (■ ; inoculated, ▲ ; uninoculated).

를 결정하기 위해서 pH를 5, 6, 7, 8로 유지하면서 음식물 쓰레기의 감량효율을 측정하였다. 그 결과 pH에 따라 분해율이 큰 차이는 보이지 않았지만 pH 7에서 21.6%로 가장 높은 분해율을 나타냈다.

온도와 수분 함유량은 미생물에 의한 음식물 쓰레기의 소멸화 과정에서 미생물의 성장과 분해효소의 활성에 영향을 주는 요인으로 매우 중요하게 인식되고 있다. 그러나 음식물 쓰레기의 퇴비화 장치를 이용한 연구(10)에서는 수분을 추가적으로 공급하지 않았지만, 본 연구에서는 호기성 분해를 위한 공기공급을 실시하기 때문에 수분의 증발이 많아 시간이 지남에 따라 음식물 쓰레기가 분해되기에 적합하지 않은 수준으로 저하될 수 있으므로(8) 적정 수분을 유지시켜 주었으며, 접종 균주의 성장과 효소의 활성에 큰 영향을 미치는 온도에 따른 음식물 쓰레기의 감량율을 비교하기 위해서 pH를 7로 유지시키는 조건에서 온도별로 소멸화 실험을 진행하였다. 그 결과 30°C에서 가장 높은 감량율을 나타냈다. 음식물 쓰레기 소멸화의 최적 조건을 확립하기 위해 pH 7, 30°C의 조건에서 음식물 쓰레기의 감량효율을 확인하였다(Fig. 3). 간헐적 통기 시에는 교반기 내부에 혐기적 상태가 발생함으로써 생성되는 유기산과 이산화탄소의 축적으로 인해 pH가 급격히 저하되고 그 결과 미생물에 의한 소멸화 반응도 저해되어 11%의 낮은 분해 활성을 나타냈고, 이를 극복하기 위해 지속적 통기를 실시한 결과 pH의 급격한 저하가 발생하지 않고, 분해 효율도 18.8%로 증가하였다. 그러나 보다 신속하고 효과적으로 음식물 쓰레기를 소멸화시키기 위해서 음식물 쓰레기의 소멸화에서 중요한 요인인 온도와 pH를 최적의 상태로 조절해 줌으로써 가장 높은 35%의 감량효율을 달성할 수 있었다. 신과 황(10)은 65일 간 50%의 음식물 쓰레기 분해효과를 보고하였고, 홍 등(13)은 27일 간 33.3%의 소멸 효과를 보고하였으나, 본 연구에서는 15일간의 실험으로 35%의 분해효과를 입증하였으며, 이는 음식물 쓰레기의 분해에 적합한 조건을 유지시킴으로써 점증한 미생물들의 성장을 촉진시키고, 분해효소의 작용을 증가시킴으로써 나타나는 결과로 판단되며, 이 결과를 바탕으로 빠른 시간에 음식물 쓰레기를 처리할 수 있을 것이다.

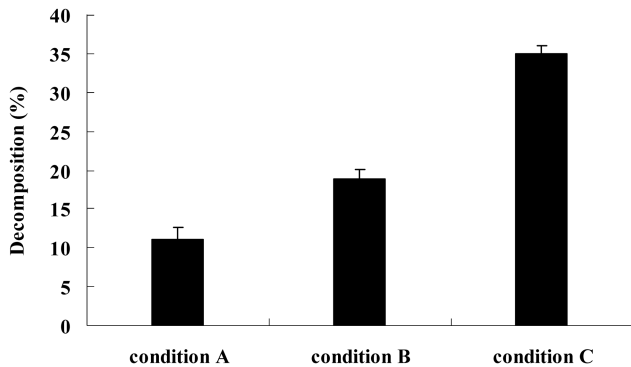


Fig. 3. Comparison of decomposing rates treated under various conditions [condition A; intermittent aeration (once in a day), condition B; continuous aeration at 35°C without pH control, condition C; continuous aeration at 30°C, pH 7].

Biofilter에 의한 복합악취 및 황 화합물의 저감

공기배출구와 biofilter를 통해 나오는 복합악취는 Handheld Odor Meter (Shinyei, Japan)를 이용하여 각각의 조건에 따라 상대적 정도를 측정, 비교분석하였다. 먼저 시간에 따른 복합 악취를 분석한 결과 biofilter를 거치지 않고 배출되는 기체의 악취가 biofilter를 거친 가스에 비해 5~6배 높게 유지되는 결과를 나타냈다(Fig. 4). 이 결과가 biofilter에 고정되어 있는 홍색비유허세균에 의한 작용인지 아니면 담체에 물리적으로 흡착되어 악취가 저감되는지를 확인하기 위해 증류수를 처리한 filter와 홍색비유허세균을 고정시킨 biofilter를 설치하고 그 결과를 비교하였는데 biofilter에서 약 58% 악취제거율이 증가하였고 홍색비유허세균에 의해 악취가 제거된다는 결론을 내릴 수 있었다. 따라서 적절한 담체를 사용하여 홍색비유허세균이 고정된 biofilter를 장착한다면 통기 시에 발생하는 악취문제를 생물학적 방법을 이용하여 보다 간편하고 저렴한 비용으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 biofilter의 길이에 따라 악취의 저감 정도를 측정해서 가장

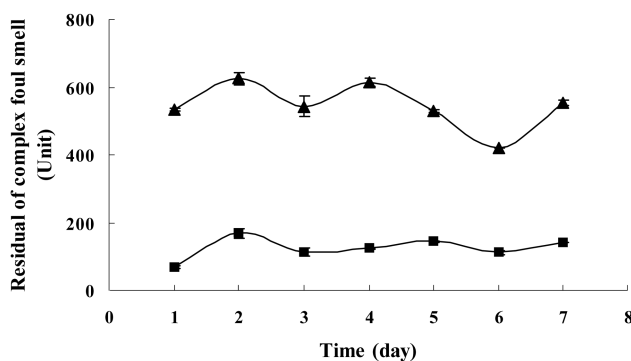


Fig. 4. Comparison of complex foul smell emitted from filter of each food decomposing reactor (■; packed with purple nonsulfur bacterial culture soaked media, ▲; packed with distilled water soaked media, 100 unit of complex smell corresponds to H_2S 0.1 mg/L).

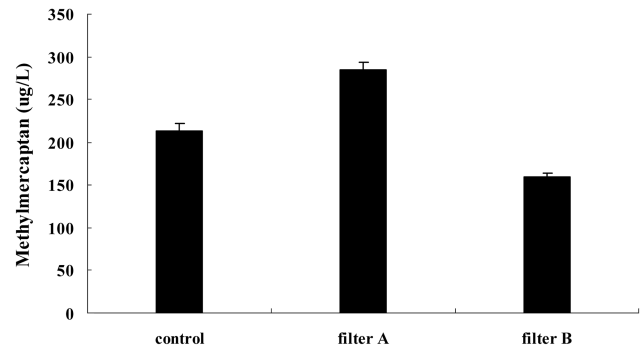


Fig. 5. Removal efficiencies of methylmercaptan by biofilter at various conditions (filter A; packed with distilled water soaked media, filter B; packed with purple nonsulfur bacterial culture soaked media).

합리적인 biofilter를 제작하기 위해서 biofilter의 길이를 증가시키면서 악취제거율을 측정한 결과 biofilter의 길이가 증가할수록 악취제거율도 증가하는 경향을 나타냈으며 6×40 cm 크기의 biofilter에서 가장 높은 84%의 악취제거율을 보였다. 이러한 수치는 관능적으로 거의 느끼지 못하는 수준으로 악취가 저감된 것으로서 이 이상의 길이증가는 비경제적인 것으로 사료된다.

음식물 쓰레기의 소멸화 과정에서는 많은 황 화합물들이 발생하고 그 물질들은 악취를 유발시키는 원인물질 중 매우 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 따라서 biofilter의 장착을 통해 특정 황 화합물의 제거가 가능한지 gas chromatography를 이용하여 분석하였다. Biofilter를 장착한 후 배출가스에 포함되어있는 황 화합물 중 대표적인 methylmercaptan과 hydrogen sulfide의 농도를 확인한 결과 methylmercaptan은 biofilter를 장착함으로써 213 $\mu\text{g/L}$ 에서 158.6 $\mu\text{g/L}$ 으로 25.5%가 감소하였다(Fig. 5). 그러나 증류수를 적신 담체를 함유한 filter에서 control보다 약간 높은 농도로 검출되었는데 이는 담체에 황 화합물을 이용할 수 있는 미생물이 고정되어 있지 않기 때문에 담체 내부에 흡착되어 있던 methylmercaptan이 용출되어 나왔기 때문인 것으로 생각된다. 황 화합수 또한 biofilter 장착 시 2473.8 $\mu\text{g/L}$ 에서 1262 $\mu\text{g/L}$ 로 크게 감소하였다. Yun (23)은 음식물 쓰레기에 *Bacillus cereus*를 처리함으로써 18%의 황화수소 제거효율을 보고하였는데, 이는 본 연구와는 다르게 음식물쓰레기를 채취하여 일정량의 음식물쓰레기를 대상으로 분석한 결과이므로 직접적인 비교는 어려우나 제거 효율 측면에서 본 연구가 더욱 우수할 것으로 판단되며, 이를 통해 복합악취 뿐만 아니라 독성이 있는 특정 악취물질인 황 화합물들에 대한 제어도 가능할 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

이 결과들을 통해 음식물 쓰레기 소멸화의 최적 조건을 알 수 있었으며, 음식물 쓰레기의 효율적이고 신속한 처리 및 악취제거 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 이 결과를 대규모 음식물 처리시설에서도 응용함으로써 경제적으로도 큰 도움이 될 수 있을 것이며 음식물 쓰레기 처리에 우수한 균주들을 확보함으로써 생물자원의 확보 측면에서도 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

감사의 말

본 연구는 산학협동재단의 학술연구비 지원(2005년도)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 권성환, 권정안, 이동훈, 김태동. 2001. Fed-batch식 고속 발효공정에서 pH 재조정이 음식물쓰레기 처리효율에 미치는 영향. *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.* 18, 218-227.
- 권오진, 정영진. 1995. *Cellulomonas* sp. KL-6에 의한 섬유소 분해효소의 생산. *한국농화학회지* 38, 490-495.
- 김경철, 배영수, 김시욱, 김성준. 2003. 사상균 FM04에 의한 amylase 생산 및 음식물 쓰레기의 효소학적 가수분해. *한국생물공학회지* 18, 363-370.
- 김기연, 김희규, 송병철, 차창준. 2006. Amylase와 protease의 활성이 높은 현미 발효 미생물의 선별. *한국미생물학회지* 42, 160-163.
- 김동원, 정혜원, 이경석, 박형용, 이기영. 2005. 각종 미생물에 의한 음식물쓰레기 침출수의 악취저감 연구. *유기물자원화* 13, 91-97.
- 류중성, 임중기, 이재열. 1998. 광합성세균 *Rhodospseudomonas capsulata*에 의한 돈폐수 처리. *J. Environ. Sci.* 12, 29-42.
- 류희옥, 조경숙. 2005. Denaturing gradient gel electrophoresis를 이용한 음식물 쓰레기 퇴비화 세균 군집분석. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* 33, 226-230.
- 박석환. 1998. 염분도와 수분함량이 음식폐기물의 호기성 퇴비화에 미치는 영향. *한국환경위생학회지* 24, 120-131.
- 배귀석, 전광주, 이상석, 최종원, 박상엽, 장문백, 맹원재. 1998. 한국재래산양 반추위 내 주요 섬유소 분해 미생물에 의한 암모니아처리 벚짚의 발효특성에 관한 연구. *Kor. J. Dairy Sci.* 20, 9-20.
- 신항식, 황우주. 1998. 소규모 소멸식 음식물찌꺼기 퇴비화 장치의 운전 성능 평가. *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.* 16, 29-35.
- 오광근, 이철우, 전영중, 이재홍. 1996. 광합성세균 미생물막 반응기에 의한 유기성폐수의 처리특성. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 24, 738-742.
- 최경민, 박응로, 주홍신, 양재경, 이기영, 이성택, 이무춘. 1996. 광합성세균을 이용한 돈분 폐수처리에 관한 연구. *폐기물자원화* 4, 11-17.
- 홍정희, 안용근, 정진도. 2003. 음식물쓰레기 소멸제의 쓰레기 소멸특성에 관한 연구(I). *대한위생학회지* 18, 58-67.
- 홍정희, 정진도. 2003. 소멸제 첨가에 따른 음식물쓰레기 소멸 효과 분석. *대한환경공학회지* 25, 732-783.
- 홍정희, 정진도. 2005. 광합성세균 배양액이 음식물쓰레기에 미치는 영향. *한국폐기물학회지* 22, 113-119.
- 환경부. 1999. 폐기물 관리법 시행규칙 제 9조 제 2호.
- 환경부. 2003. 2002 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 107.
- Basma, G, S. K. Alya, and M. Nasri. 2003. Stability studies of protease from *Bacillus cereus* BG1. *Enz. Microb. Technol.* 32, 513-518.
- Breuil, C. and J.N. Saddler. 1985. Comparison of the 3,5-dinitrosalicylic acid and Zelson-Somogyi methods of assaying for reducing sugars and determining cellulase activity. *Enz. Microb. Technol.* 7, 327-332.
- Emtiazi, G. and I. Nahvi. 2004. Production of thermostable α -amylase and cellulase from *Cellulomonas* sp. *J. Microbiol. Biotechnol.* 14, 1196-1199.
- McKay, G. 2002. Dioxin characterization, formation and minimization during municipal solid waste (MSW) incineration: review. *Chem. Eng. J.* 86, 343-368.
- Ronald, M.T. and J.W. Peter. 1982. Use of congo red-polysaccharide interactions in enumeration and characterization of cellulolytic bacteria from the bovine rumen. *Appl. Environ. Microbiol.* 43, 777-780.
- Yun, S.I. 2003. Treatment of waste food using mixed microorganisms responsible for the degradation of malodor compounds. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* 31, 413-420.

(Received October 27, 2006/Accepted December 12, 2006)

ABSTRACT: Treatment of Food Garbage Using a Treatment Reactor and Microbial Consortium

Rae-Hyun Koh, Kang-Hyoung Lee, Jin-Soo Yoo¹, Hong-Gyu Song* (Division of Biological Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, ¹Microbial World Co., Ltd., Chuncheon 200-170, Korea)

Disposal of food garbage in most large cities is very troublesome task. To date, microbiological treatment has been received an attention as a garbage decomposition process. In this study, the inoculation effect of some cellulase, amylase and protease-producing bacteria and photosynthetic bacteria on food garbage treatment was examined. They were added into a treatment reactor specially designed in this study together with food garbage and incubated in various conditions for 15 days and the removals of food garbage and foul smell produced during the treatment were analyzed. Average decomposition percentages of the inoculated food garbage in treatment reactor were 11 and 18.8% under intermittent aeration (once in a day) and continuous aeration conditions (2 L/min), respectively, and these were higher than removal percentages in the corresponding uninoculated reactors, 3.4 and 13.8%. Optimal pH and temperature for food garbage decomposition by inoculated bacteria were

pH 7.0 and 30°C. Maximal decomposition percentage in the inoculated food garbage was 35% under the optimal condition (pH 7, 30°C, and continuous aeration). The malodor compounds generated from food garbage treatment such as complex foul smell and sulfur compounds were effectively reduced about 84% and 25.5%, respectively, with a biofilter composed of purple nonsulfur bacteria trapped in sponge. This decomposing capability of food garbage by these bacteria can be utilized for the rapid and efficient treatment of food garbage.