

# 생분해성 폐기물 입경이 MBT시스템과 연계된 호기성안정화반응에 미치는 영향

## Effect of Biodegradable Waste Particle Size on Aerobic Stabilization Reactions in MBT System

권상혁 · 반종섭 · 김수진 · 배재근<sup>†</sup>  
Sang-Hagk Kwon · Jong-Sub Ban · Su-Jin Kim · Chae-Gun Phae<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(2011년 1월 14일 접수, 2011년 7월 26일 채택)

**Abstract :** This study has been performed to examine the influence of the size of particles on the stabilization in the aerobic stabilization equipment connected with MBT system. The biodegradable waste inside the reactor (60% of food waste, 25% of paper waste, 2% of wood waste and 5% of compost) has been charged in same composition. The degree of stabilization was compared and analyzed after charging with adjustment of particle size in 5 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm, 100 mm and state of no separation. The experiment revealed that highest temperature beyond 65°C was shown in the particle size of less than 50 mm in change of temperature and the highest temperature was about 50°C in reactor of 100 mm and no separation. The proportionality between generated quantity of CO<sub>2</sub> and particle size was not observed, even the highest in generated quantity was shown in over 100 mm. The weight changes based on wet and dry conditions in the reaction process showed the 30% and 46% of reduction in the smallest particle size of 5 mm and it showed the trend of the lower reduction rate at the bigger particle size. The water soluble COD<sub>Cr</sub> and TOC showed the reduction rate of 60% in reactor of particle size in 100 mm and no separation while the reduction rate comparing to the initial stage of reaction in the reactor of less than 50 mm was 80%. Such result derived the conclusion of acceleration in the decomposing stabilization of biodegradable material due to the decomposing rate of organic substance as the particle size of biodegradable waste gets smaller. It is concluded as necessary to react in adjustment under 50 mm of particle size as much as possible.

**Key Words :** Particle Size, Municipal Solid Waste, Biodegradable Waste, Aerobic Stabilization Equipment, Mechanical Biological Treatment

**요약 :** 본 연구는 MBT시스템과 연계된 호기성안정화장치에서 입경 크기가 안정화에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시되었다. 반응기내 생분해성 폐기물(음식물류 폐기물 60%, 종이류 폐기물 25%, 목재류 폐기물 2% 및 퇴비 5%)을 동일한 조성으로 충전하고, 각각의 입경을 5 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm, 100 mm 및 미선별 등으로 조절하여 충전한 후에 안정화 정도를 비교분석하였다. 실험결과 온도변화에서는 50 mm 이하의 입경에서 최고 온도가 65°C 이상을 보였으며, 100 mm와 미선별 반응기에서는 최고온도가 약 50°C를 보였다. CO<sub>2</sub> 가스의 발생량은 입경의 크기에 따라 발생량이 비례하는 현상이 관찰되지 않고, 오히려 100 mm 이상에서 높은 발생량을 보였다. 반응과정중 습윤 및 건조기중의 무게변화는 입경 크기가 가장 작은 5 mm에서 각각 30% 및 46%의 감소율을 보였으며, 입경이 클수록 감소율이 낮아지는 경향을 보였다. 물용출 COD<sub>Cr</sub> 및 TOC는 입경 크기가 50 mm 이하인 반응기에서는 반응초기 대비 감소율이 약 80%로 나타난 반면 입경이 100 mm 및 미선별 반응기에서는 약 60%의 감소율을 나타내었다. 이러한 결과로부터 생분해성 폐기물의 입경이 작을수록 유기물의 분해율이 높아져 생분해성 물질의 분해 안정화가 촉진되는 것으로 나타났으며, 가능한 50 mm 이하로 입경을 조절하여 반응시키는 것이 필요한 것으로 나타났다.

**주제어 :** 입경, 생활폐기물, 생분해성폐기물, 호기성안정화장치, 생활폐기물 전처리시설(MBT)

## 1. 서론

음식물류 폐기물, 재활용성의 분리수거가 철저히 이루어지는 종량제봉투 내에는 대부분의 폐기물이 가연성폐기물이며, 포장폐기물을 위주로 한 플라스틱 필름류, 용기류, 종이류가 대부분이다. 이러한 가연성 폐기물은 발열량이 높으며, 재선별 및 재가공을 통하여 재활용하거나 고품연료로서 이용하는 것이 가능하다. 그러나 현실적으로 종량제 봉투 내에 버려지는 폐기물의 성상을 분석해 보면, 분리수거가 완벽하게 이루어지지 않고 있으며, 음식물류 폐기물

등이 부분적으로 혼재되어 수분함량이 30~40% 전후를 보여준다. 이러한 폐기물에서 재활용성 및 가연성을 선별할 경우에 상당량의 생분해성에 기인하는 혐잡물이 발생한다. 이러한 혐잡물은 수분함량이 높고 부패성이 강한 것으로부터 에너지재활용에도 한계가 있을 수 있다.

이러한 생분해성물질은 호기성 혹은 혐기성 방법으로 분해 안정화 후에 매립 처리해야한다. 현재 유럽지역을 위주로 한 MBT시설에서 대부분 호기성 방법을 사용하고 있는 실정이며, 2000년대에 들어와 MBT시스템에 대한 많은 연구가 진행되어왔다.<sup>1-3)</sup> 도시에서 발생하는 폐기물을 MBT

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: phae@snut.ac.kr Tel: 02-970-6617 Fax: 02-971-5776

시스템에서 처리하기 위하여 프로세스 설계가 이루어져 왔고, 이들 분해과정을 물질수지로서 증명하기도 했다.<sup>4,5)</sup> 또한 최근에는 MBT 처리 후에 최종적으로 생성되는 호기성 안정화물을 매립지의 복토재로서 사용하면서 메탄을 산화하는 매체로서 사용 가능성을 검토하기도 하였다.<sup>6)</sup> 국내에서도 음식물쓰레기의 함량을 변화시키거나,<sup>7)</sup> 미생물자체산화열에 의하여 유지되는 온도를 공기제어에 의하여 제어하는 방법 등에 의하여 분해안정화정도 및 조건 등<sup>8)</sup>에 대하여 검토해 왔다.

종량제봉투내에 가연성 폐기물은 포장재 등이 그대로 투입되어 있으므로 50~80 mm 입도가 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 불연분의 경우 30~50 mm가 가장 많은 것으로 보고되고 있다.<sup>9)</sup> 현재 설치가 예정되어 있는 대부분은 MBT 시설은 자원화가 가능한 물질을 선별하기 위하여 파쇄와 동시에 트로멜에 의하여 입경별로 물질을 선별하고 있다.<sup>3)</sup> 일반적으로 가연성의 물질은 입자 큰 상태에서 분리되며, 생분해성 물질은 입자가 적은 상태에서 분리되고 있다.

지금까지 MBT 시스템에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으나, 호기성 안정화에 있어서 분해대상 물질이 분해에 미치는 영향에 대한 검토가 이루어진 적이 없는 것으로부터 본 연구는 MBT 처리시스템과 연계되는 호기성안정화반응에 있어서 파쇄입경이 안정화에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시되었다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험장치

실험에 사용된 장치는 생활폐기물중 생분해성 폐기물에 대한 호기성안정화정도를 분석하기 위하여 지름 35 cm, 높이가 85 cm 인 60 L 용량의 보온 및 외부히팅이 가능한 스테인레스 재질의 원통으로 구성되어 있다. 실험장치의 상부에는 충전물의 균질화를 위해 교반모터를 장착하였으며, 충전물의 호기성반응에 의해 발생하는 가스의 포집 및 배출을 위하여 가스 배출구를 장착하였다. 반응기 측면에는 호기성반응에 따른 온도변화를 분석하기 위하여 온도센서를 반응기 하단으로부터 각각 40 cm, 50 cm 위치에 설치하였으며, 인위적인 가온을 통하여 충전물의 정상변화를 분석할 수 있도록 실험장치 외벽에는 열선센서, 컨트롤러 및 온도기록계를 장착하여 온도조절 및 측정이 가능하도록 하였다. 장치 내부에는 충전물의 원활한 교반을 위하여 스크류방식의 교반기를 장착하였으며, 교반기 날개는 마디마디가 분리되도록 하여 교반이 보다 용이하도록 하였다. 장치내의 충분한 호기성 조건 유지를 위해 상향류식으로 공기가 하부에서 상부로 흐르도록 장치하단부에 공기주입구를 장착하였으며, 공기유입량의 조절이 가능하도록 공기유량계를 설치하였다.<sup>7,8)</sup>

### 2.2. 실험방법

**Table 1.** Experimental conditions of aerobic stabilization reactors

Run	Food waste	Paper waste	Wood waste	Compost	Water	Total	Smash size
LB-1							5 mm
LB-2							10 mm
LB-3	12 kg	5 kg	0.4 kg	1 kg	1.6 kg	20 kg	20 mm
LB-4	(60%)	(25%)	(2%)	(5%)	(8%)	(100%)	50 mm
LB-5							100 mm
LB-6							No smash

본 실험에 이용한 생활폐기물중의 생분해성 폐기물은 이전에 실험을 통하여 최적의 혼합비율로서 알려진 음식물류 폐기물 60%, 종이류 폐기물 25%, 목재류 폐기물 2%, 퇴비 5% 및 수분 8%로 혼합하여 실험을 실시하였다.<sup>10)</sup> 폐기물의 종류별 입경은 5 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm, 100 mm 및 미선별로 하여 각각의 반응기에 충전하였으며, 음식물류 폐기물과 퇴비는 시료 자체를 충전하여 실험을 실시하였다(Table 1). 각 반응기에는 2 L/min의 공기가 투입되도록 하였으며, 교반주기는 1 min/3 hr로 설정하여 10 rpm의 속도로 교반되도록 하였다.

운전에 따른 성상의 변화를 분석하기 위하여 온도변화 측정용 장치는 온도센서와 컨트롤러 온도기록계를 연결시켜 온도측정이 가능하도록 하였으며, 장치상부에 배출되는 가스를 분석하기 위하여 가스 이동관에 수분포집기 및 실리카튜브를 설치하여 배출되는 가스내 수분을 제거된 후 가스분석기(LMSx, Gas Data Co., UK)에 의해 측정이 가능하도록 하였다. 충전물질에 대한 화학적 변화를 알아보기 위하여 원소분석기(Elementary Analyzer, Leco)를 이용하여 분석하였으며, 충전물질에 대한 무게변화는 전자저울(DB-1, 150A)을 통하여 측정하였다. 삼성분 및 pH, EC, COD<sub>Cr</sub>은 폐기물공정시험법 및 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였고, TOC 분석은 총유기탄소분석기(1010 TOC Analyzer, O.I. ANALYTICAL)를 이용하였다.

반응기에 충전된 폐기물에 대한 초기성상에 대해 Table 2에 나타내었다. 투입된 각각의 폐기물에 대한 삼성분을 분석한 결과 음식물류 폐기물의 수분이 가장 높은 것으로 나타났다. 목재류 폐기물과 종이류 폐기물의 가연분 함량

**Table 2.** Physicochemical characteristics of raw materials

Item	Korean proximate analysis (%)			C/N ratio	Water soluble (20:1)			
	Moisture content	Volatile solids	Ash		COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	TOC (mg/L)	pH	EC (mS/cm)
Food waste	78.3	20.5	1.2	14.1	2,680	1,316	4.5	1.4
Wood waste	10.6	88.5	0.9	9.7	814	407	6.1	0.2
Paper waste	8.7	80.8	10.5	40.3	1,518	655	7.8	0.2
Compost	25.5	57.3	17.2	5.9	6,887	2,722	7.3	4.2

이 80% 이상으로 나타나 타 폐기물에 비하여 높은 것으로 나타났다. 물용출 COD<sub>Cr</sub>과 TOC 분석결과는 퇴비의 물용출 COD<sub>Cr</sub>이 6,887 mg/L, 물용출 TOC가 2,722 mg/L으로 충전된 폐기물중 가장 높게 나타났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 온도변화

폐기물 입경에 따른 온도의 경시변화를 분석한 결과, 반응초기에는 모든 반응기의 온도가 22℃로 동일하게 시작되었으며, 이후 25시간 동안은 큰 폭으로 온도가 상승하여 45℃를 보였다. 이후 온도가 부분적으로 감소하는 경향이 나타났으나 전체적으로 온도가 상승하였다. 그러나 입경이 100 mm인 LB-5와 입경을 분류하지 않은 LB-6은 실험실시 이후 약 100시간 후에 최고 온도인 50℃를 보인 이후 약 100시간 동안 일정수준을 유지하였다. 실험이 실시된 200시간 이후에는 온도가 점차적으로 감소하였다. 상대적으로

입경의 분포가 작은 LB-1~LB-4는 비슷한 온도변화를 보여 약 80시간 이후부터 급격한 온도상승이 일어나 약 120시간 이후에는 최고온도인 65℃를 보인 후 약 100시간 동안 일정한 온도를 보였으나 이후 200시간과 250시간 사이에 급격하게 온도가 낮아져 35~45℃까지 낮아졌다. 이는 입경이 큰 폐기물의 경우에는 미생물에 의한 분해가 상대적으로 어렵기 때문에 미생물에 의한 자체 산화열이 상대적으로 적어 온도의 유지나, 상승에 한계가 있는 것으로 나타났다.

#### 3.2. CO<sub>2</sub> 가스변화

호기성안정화의 정도를 판단하는 인자로서 전술한 온도변화도 중요한 인자이나, CO<sub>2</sub> 가스변화도 중요한 판단인자인 것으로부터 가스성분 중 CO<sub>2</sub> 가스량에 대하여 분석하였다. 반응초기 입경이 5 mm로 가장 작은 LB-1의 CO<sub>2</sub> 가스발생량이 약 30시간이 지났을 때 4%로 나타나 초기 반응중 높은 것으로 나타났다. 이후 일부 CO<sub>2</sub> 가스발생량이 감소하는 경향이 나타났으나 점차적으로 증가하는 경향을 나타내어 150시간에는 5%를 나타내어 가장 높은 가스발생

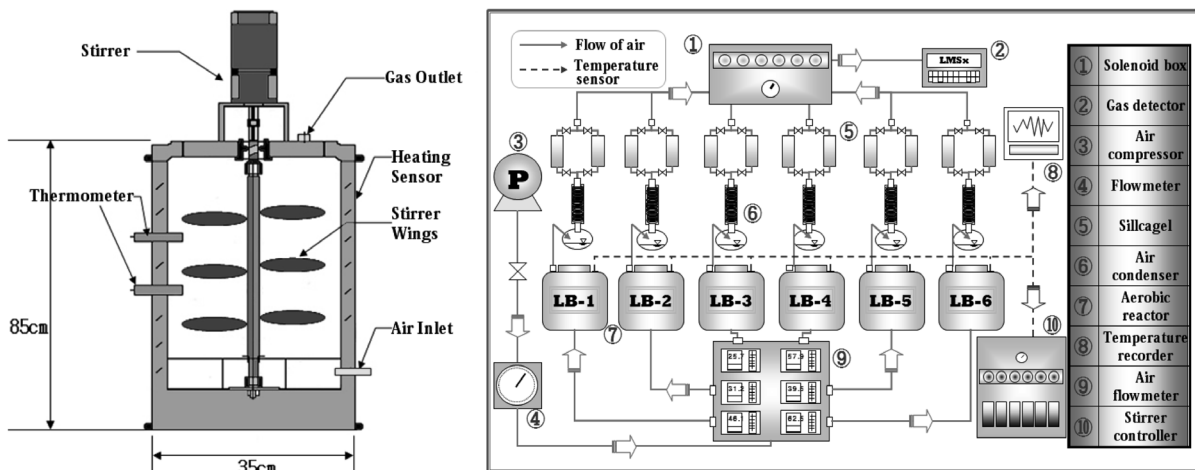


Fig. 1. Schematic diagram of an aerobic stabilization reactor.

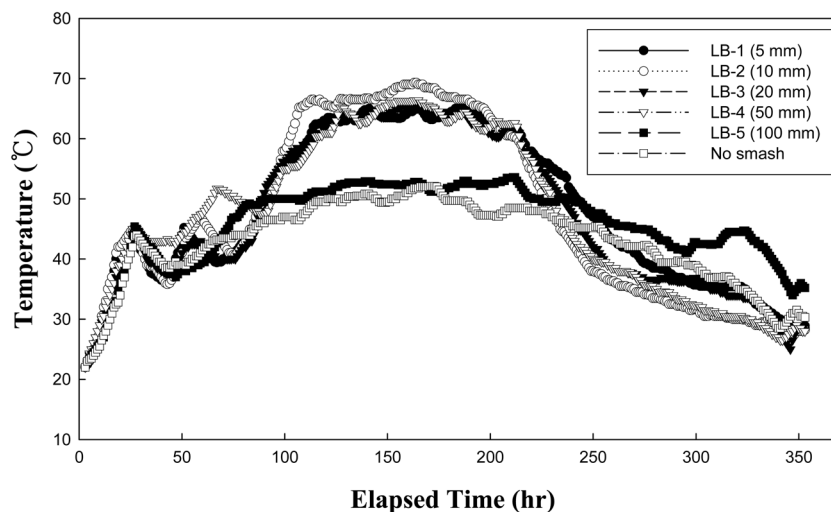


Fig. 2. Change of temperature according to the elapsed time.

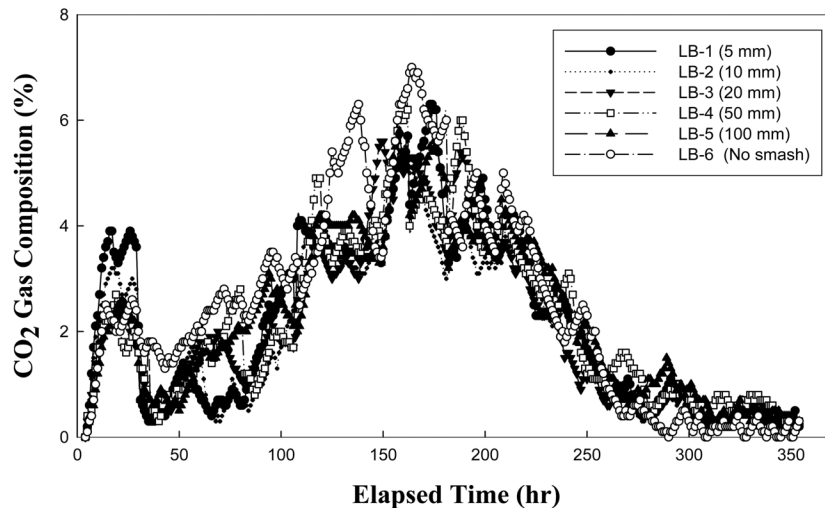


Fig. 3. Change of CO<sub>2</sub> gas composition according to the elapsed time.

Table 3. Comparative analysis of materials according to before and after the reaction

Run	Size of filling material	Wet weight reduction ratio (%)	Dry weight reduction ratio (%)	C/N reduction ratio (%)	Water soluble (20:1)			CO <sub>2</sub> gas accumulation emissions (L)
					pH of after reaction	COD <sub>Cr</sub> reduction ratio (%)	TOC reduction ratio (%)	
LB-1	5 mm	30.9	46.8	31.7	9.0	82.0	81.4	926.8
LB-2	10 mm	25.8	43.0	20.0	9.0	81.4	81.2	828.8
LB-3	20 mm	26.3	32.9	16.4	9.0	79.2	80.9	877.7
LB-4	50 mm	22.2	35.6	25.5	9.0	81.5	83.1	943.8
LB-5	100 mm	19.0	32.5	11.7	7.6	60.1	73.6	957.1
LB-6	No smash	22.8	37.6	10.7	7.3	56.2	73.6	1,061.2

량을 나타내었으나 이를 기점으로 감소추세가 뚜렷하게 나타났다. 이밖에 LB-2~LB-5의 CO<sub>2</sub> 가스 발생분포 역시 LB-1과 큰 차이점을 나타내지 않았으며, 비슷한 경향으로 발생되는 것으로 나타났다. 하지만 입경을 분류하지 않은 LB-6의 CO<sub>2</sub> 가스 발생은 반응초기에는 CO<sub>2</sub> 가스 발생량이 높지 않았으나 30시간이 경과한 이후 타 반응기와 비교하였을 때 CO<sub>2</sub> 가스의 발생량이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다으며, 약 170시간이 경과한 이후에는 최고 발생량인 7%를 나타내었다.

CO<sub>2</sub> 가스농도변화를 통하여 전체 반응기의 활성화정도를 비교평가하기 위하여 단위시간당 농도(%)를 전체반응기간(350시간)으로 적산하여 비교하였다. 그 결과 Table 3에 나타난 것과 같은 결과가 얻어 졌으며, LB 6 > LB 5 > LB 1 > LB 4 > LB 3 > LB 2와 같은 결과가 얻어졌다. 온도의 경향에서 보여주었던 결과와 반대로 LB 5 및 LB 6의 가스발생량이 상대적으로 많은 것으로 계산되었다.

### 3.3. 무게변화

호기성안정화가 이루어지면서 미생물에 의한 분해작용이 활발히 이루어져 산화열이 발생, 온도가 올라가 수분이 증발되거나, 유기물이 분해되어 감량화가 일어나게 된다. 각각의 반응기내 충진물 무게를 20 kg으로 동일하게 설정하

여, 안정화가 진행됨에 따라 무게의 변화를 습윤, 건윤기준으로 분석하였다.

이들 분석결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타냈으며, 또한 전체적인 감소량을 적산하여 Table 3에 나타냈다. 습윤무게 변화에 대한 분석결과 입경이 5 mm로 가장 작은 LB-1의 무게 감소율이 30%로 나타나 가장 높은 감소효율을 나타낸 반면 입경의 크기가 100 mm와 입경의 크기로 분류하지

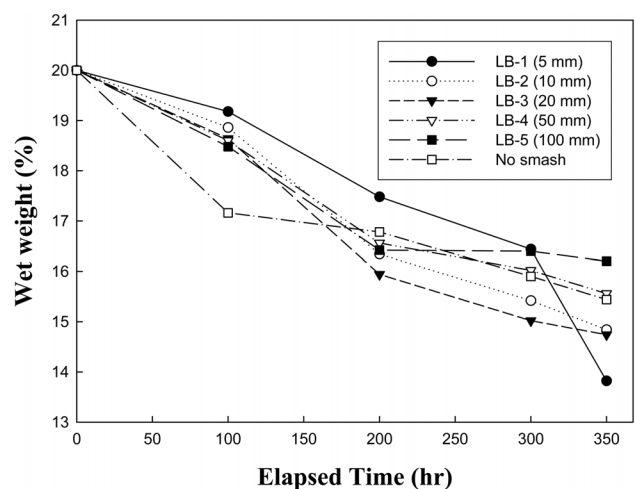


Fig. 4. Change of wet weight according to the elapsed time.

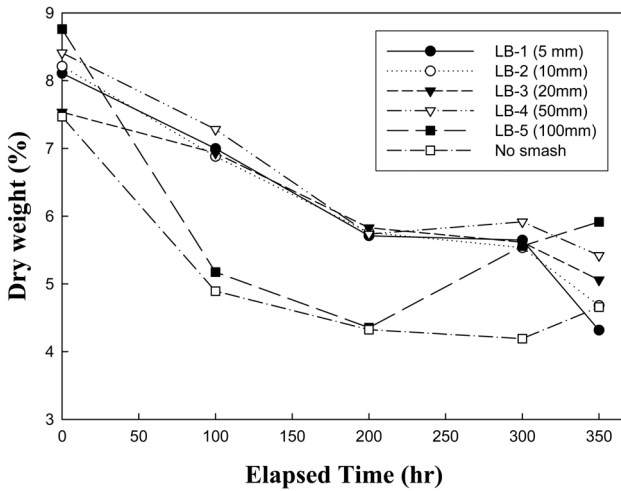


Fig. 5. Change of dry weight according to the elapsed time.

않고 원형폐기물이 투입된 LB-5와 LB-6의 무게 감소율은 약 20%로 나타나 가장 낮은 무게 감소율을 나타내었다. 건윤기준 무게 감소율은 LB-1 약 46% 및 LB-2 약 43%의 감

소율을 나타낸 반면 LB-3~LB-6은 약 35% 수준으로 나타났다. 무게 감량에서는 습윤기준과 건윤기준이 거의 같은 경향을 보였다. 이러한 결과에서는 입경이 작은 물질이 충전된 반응기내에 미생물의 활성이 높아, 수분의 증발 및 유기물의 감량이 활발히 이루어진 것으로 판단된다.

### 3.4. 밀도변화

350여 시간의 운전기간동안 밀도변화에 대해 Fig. 6에 나타내었다. LB-1의 초기밀도는 0.8 kg/L였으나 반응이 끝난 후의 밀도는 1.1 kg/L으로 나타나 0.3 kg/L 증가한 것으로 나타났으며, 타 반응기 역시 LB-1과 비슷한 증가수치를 나타내었다. 일반적으로 호기성 미생물에 의하여 유기물이 분해되고 내부 교반기에 의하여 일정한 혼합이 이루어질 시에 내부물질은 입자가 적어지게 되며, 수분함량의 정도에 따라 뭉치거나 흩어지게 되며 이를 통하여 부피의 변화와 밀도의 변화는 일어난다.<sup>8)</sup> 하지만 폐기물 입경에 따른 밀도의 변화는 전술한 결과와 같이 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

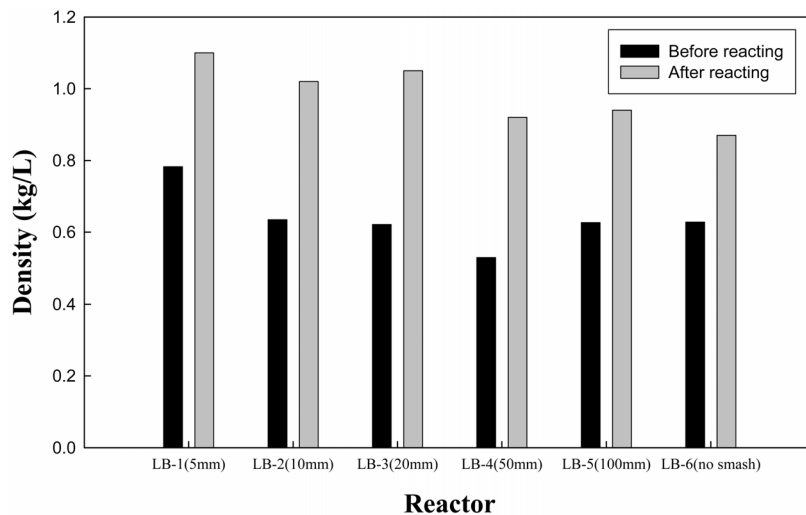


Fig. 6. Change of density according to before and after the reaction.

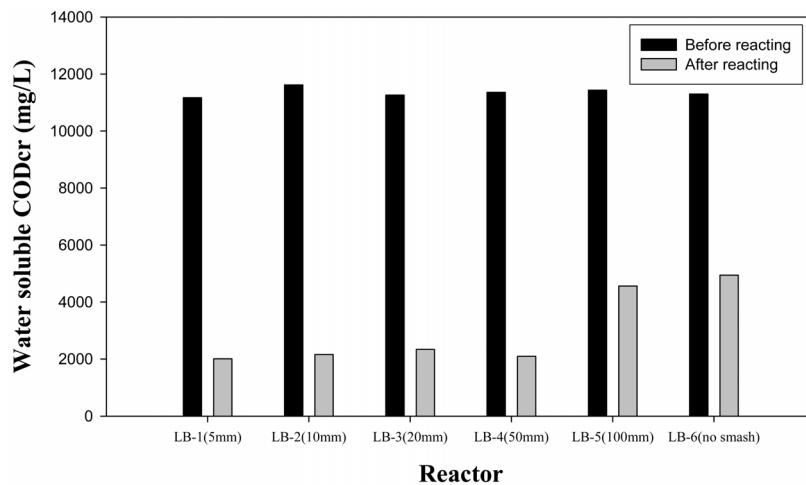


Fig. 7. Change of water soluble COD<sub>Cr</sub> according to before and after the reaction.

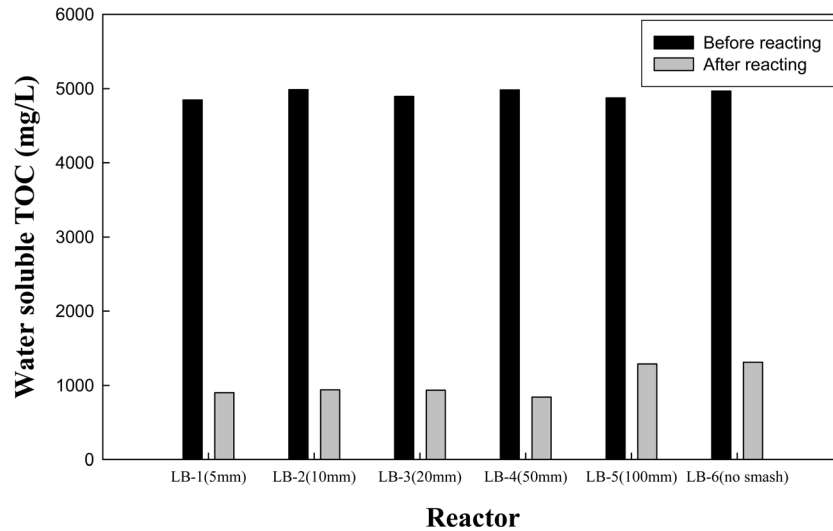


Fig. 8. Change of water soluble TOC according to before and after the reaction.

### 3.5. 물용출 COD<sub>Cr</sub> 및 TOC 변화

입자의 크기에 따라 안정화를 진행하면서 반응기에서 시료를 채취, 증류수로 용출하여 COD<sub>Cr</sub> 및 TOC 농도변화를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에, 결과를 요약하여 전후의 감량비율을 계산하여 Table 3에 나타냈다. 반응 전 물용출 COD<sub>Cr</sub> 농도는 11,169~11,614 mg/L로 각 반응기 별로 큰 차이가 없었으나 350시간의 반응이 종료된 이후에는 입경이 50 mm 이하인 LB-1~LB-4의 물용출 COD<sub>Cr</sub> 농도는 2,010~2,342 mg/L로 나타나 초기농도와 비교하였을 때 약 80%의 농도가 감소하였다. 반면에 입경이 큰 LB-5 및 LB-6는 약 5,000 mg/L을 보여 약 60%의 농도가 감소하였다. 물용출 TOC 분석 결과에서도 물용출 COD<sub>Cr</sub>과 비슷한 결과를 보여주었으며, 폐기물 입경이 50 mm 이하로 투입된 반응기인 LB-1~LB-4에서는 반응초기 대비 반응후의 감소율이 80~83%를 나타낸 반면에 50 mm 이상이 투입된 LB-5 및 LB-6에서는 감소율이 약 73%로 나타나 투입된 폐기물 입경이 클수록 감소율이 낮은 값을 보였다. 이러한 결과로부터 입자의 크기가 작은 것을 충전시킨 반응기내에서 유기물의 분해가 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 MBT처리시스템과 연계되어진 호기성 안정화 장치에서 입경크기가 안정화에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시되었다. 실험은 교반장치가 장착되어 있는 6개의 회분식 장치에 생분해성물질(음식물류 폐기물, 종이류 폐기물, 목재류 폐기물의 혼합물)의 입경을 5, 10, 20, 50, 100 mm 및 미선별로 설정하여 실험하였다. 실험분석 결과 온도변화에서는 50 mm 이하의 입경에서 최고 온도가 65°C 이상을 보였으며, 100 mm 및 미선별 반응기에서는 최고온도가 약 50°C를 보였다. CO<sub>2</sub>가스의 발생량 변화는 입경의 크기

에 따라 발생량이 비례하는 현상이 관찰되지 않고, 오히려 100 mm 이상에서 높은 발생량을 보였다.

반응과정 중에 습윤 및 건윤기준의 무게변화는 입경의 크기가 가장 작은 5 mm에서 각각 30% 및 46%의 감소율을 보였으며, 입경이 적을수록 감소율이 높아지는 경향을 보였다. 물용출 COD<sub>Cr</sub>과 TOC에서는 입경의 크기가 50 mm 이하인 반응기에서는 반응초기 대비 감소율이 약 80%로 나타난 반면 입경이 100 mm 및 미선별 반응기에서는 약 60%의 감소율을 나타내었다. 이러한 결과로부터 생분해성 폐기물의 입경이 작을수록 유기물 분해율이 높아져 반응의 안정화가 촉진되는 것으로 결론지어졌으며, 가능한 50 mm 이하로 입경을 조정하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

**KSEE**

## 사사

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Lornage, R., Redon, E., Lagier, T., Hebe, I. and Carre, J., "Study of the biological treatment of size reduced MSW without mechanical sorting," *Waste Manage.*, **27**, 1755-1764 (2007).
- van praagh, M., Heerenklage, J., Smidt, E., Modin, H., Stegmann, R. and Persson, K. M., "Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes," *Waste Manage.*, **29**, 859-868(2009).
- Lornag, R., Redon, E., Lagier, T., Hebe, I. and Carre, J., "Performance of a low cost MBT prior to landfilling : Study of the biological treatment of size reduced MSW

- without mechanical sorting,” *Waste Manage.*, **27**, 1755~1764(2007).
4. Velis, C. A., Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R. and Pollard, S. J. T., “biodrying for mechanical-biological treatment of waste : A review of process science and engineering,” *Bioresour. Technol.*, **100**, 2747~2761(2009).
  5. De Araujo Morais, J., Ducom, G., Achour, F., Rouez, M. and Bayard, R., “Mass balance to assess the efficiency of a mechanical-biological treatment,” *Waste Manage.*, **28**, 1791~1800(2008).
  6. Einola, J. M., Karhu, A. E. and Rintala, J. A., “Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions,” *Waste Manage.*, **28**, 97~111(2008).
  7. 권상혁, 반중섭, 배재근, 김정대, “음식물류 폐기물함량이 MBT시스템과 연계된 호기성 안정화반응에 미치는 영향,” *한국폐기물학회지*, **26(1)**, 21~28(2009).
  8. 반중섭, 권상혁, 배재근, 김정대, “MBT시스템의 호기성안정화반응기 온도제어가 안정화에 미치는 영향,” *한국폐기물학회지*, **26(2)**, 105~112(2009).
  9. 박진규, 송상훈, 정새롬, 정민수, 이남훈, 이병철, “폐기물 전처리(MBT)시설 설계를 위한 생활폐기물의 입도분포 및 물리화학적 특성에 관한 연구,” *유기성자원학회지*, **16(1)**, 62~69(2008).
  10. 반중섭, 김수진, 권상혁, 배재근, 김정대, “도시고형폐기물(MSW) 중 생분해성폐기물의 호기성안정화 반응에서 종이류의 분류에 따른 영향,” *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, pp. 176~177(2009).