



ORIGINAL PAPER

원저

## 매립폐기물의 호기성 안정화 평가를 위한 AT<sub>4</sub> 실험의 영향인자에 관한 연구

윤석표<sup>†</sup>, 김형욱, 이남훈\*, 김경\*, 이병선\*\*

세명대학교 바이오환경공학과, 안양대학교 환경공학과\*, (주)포스벨\*\*  
(2011년 11월 19일 접수, 2011년 12월 26일 수정, 2011년 12월 27일 채택)

## A study on influencing factors of AT<sub>4</sub> experiment for the assessment of biological stability of landfilled waste

Seok-Pyo Yoon<sup>†</sup>, Hyung-Wook Kim, Nam-Hoon Lee\*, Kyung Kim\*, Byung-Sun Lee\*\*

Department of Environmental Engineering, Semyung University,  
Department of Environmental Engineering,

### ABSTRACT

In this study, as a tool of evaluating biological stability of landfilled waste, influencing factors of AT<sub>4</sub> method was studied for standardizing the method. As influencing factors, initial lag time, exchanging period of CO<sub>2</sub> absorbing agent, and interval of pressure measurement were discussed, and also the relationship between content of dried food waste and AT<sub>4</sub> value were compared. Considering heterogeneity of landfilled waste and statistical error range of measurement, authors suggest that the criteria of stabilized landfill waste is 10 mg O<sub>2</sub>/g DM by AT<sub>4</sub> method.

Keywords : landfilled waste, AT<sub>4</sub>, respiration index, biological stability, standard deviation

### 초 록

본 연구에서는 AT<sub>4</sub> 방법으로 매립 폐기물의 생물학적 안정화도를 평가하는데 있어서, 실험자가 상이함에 따라 결과가 달라지는 것을 방지하기 위해 표준화된 실험을 위한 실험조건을 제시하고자 하였다. AT<sub>4</sub> 실험에 있어서 초기 지연시간, CO<sub>2</sub> 흡수제의 교체시기, 산소소모량 측정 주기, 유기성 폐기물 함량에 따른 AT<sub>4</sub> 측정값 변화 추이 등을 살펴보고, 각각에 따른 영향인자에 대해 논의하였다. 매립폐기물의 불균질성과 측정상의 오차범위를 감안할 때 매립폐기물의 안정화 기준치는 AT<sub>4</sub> 기준으로 10 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 제시하였다.

핵심용어 : 매립폐기물, AT<sub>4</sub>, 호흡률, 생물학적 안정화, 표준편차

<sup>†</sup>Corresponding author(yoonsp@semyung.ac.kr)

## 1. 서론

생활폐기물 매립지를 신규로 설치하는 것은 NIMBY 현상으로 인해 무척 어려운 실정이며, 이의 대안으로 기존의 폐기물 매립지를 반영구적으로 활용하는 순환형 매립지 조성 사업이 최근 시도되고 있다<sup>1)</sup>. 기존의 비위생매립지 정비사업에서는 매립연한이 오래되어 생분해성 폐기물이 대부분 안정화된 폐기물이 대상이었으며, 이에 따라 민원 발생 방지의 측면에서 매립지 굴착 전에 약 2주간의 악취안정화 기술을 적용하였으나, 순환형 매립지 조성의 경우 보다 적극적으로 매립된 폐기물을 현장에서 조기 안정화 기술을 적용하여 안정화시킨 후 굴착/선별한다는 점에서 차이가 난다. 따라서 호기성 매립지 운영이나 침출수 재순환 등의 방법으로 매립폐기물을 조기에 분해시킨 후, 매립된 폐기물이 충분히 안정화되었는지 이를 평가하는 지표의 설정이 필요하다.

매립폐기물이나 퇴비의 생물학적 안정화 평가 방법으로는 AT<sub>4</sub>나 GB<sub>21</sub>과 같은 방법들이 널리 알려져 있으며, 이들 지표를 활용한 안정화 기준도 유럽 등지에서는 설정되어 있다<sup>2)~10)</sup>.

호기성 안정화 평가 방법인 AT<sub>4</sub>와 혐기성 안정화 평가 방법인 GB<sub>21</sub>은 상호간에 상관관계가 높은 것으로 알려져 있어, 비교적 평가기간이 짧은 AT<sub>4</sub>를 이용하는 것이 매립폐기물의 생물학적 안정화도를 평가하는데 효과적이다<sup>10)~13)</sup>.

AT<sub>4</sub> 평가시 산소소모량의 측정은 산소농도의 저감을 평가하거나, 산소소모에 의해 발생한 이산화탄소의 생성량을 평가하는 방법이 이용되고 있다.

비교적 낮은 비용으로 산소소모량을 측정하기 위해서는 발생된 이산화탄소를 NaOH 등의 강알칼리 용액에 흡수시키고, 이때 흡수된 가스에 의해 기체상의 분압이 음압이 되면 이로부터 발생된 이산화탄소, 다시 말하면 소모된 산소소모량을 산정하는 방법을 흔히 사용하고 있다.

본 연구에서는 매립폐기물의 생물학적 안정화도 평가를 위해서 AT<sub>4</sub> 방법으로 유기성 폐기물의 안정화도를 평가하는데 있어서, 실험자가 상

이함에 따라 결과가 달라지는 것을 방지하기 위해 표준화된 실험방법 제시를 위해 명시하여야 할 실험조건을 제시하고자 하였다. 이를 위해서 AT<sub>4</sub> 실험에 있어서 초기 지연시간, CO<sub>2</sub> 흡수제의 교체시기, 산소소모량 측정 주기, 유기성 폐기물 함량에 따른 AT<sub>4</sub> 측정값 변화 추이 등을 살펴보고, 각각에 따른 영향인자에 대해 논의하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 AT<sub>4</sub> 실험방법

AT<sub>4</sub>는 폐기물의 순간적인 산소소모를 평가하는 것으로 건조시료 g당 96 시간동안 미생물의 활동에 의해 소모되는 산소소모량으로 나타낸다<sup>2)</sup>. AT<sub>4</sub>를 분석하기 위해 [Fig. 1]과 같이 회분식 실험장치를 제작하였으며, 실험장치의 온도를 20 °C로 유지하기 위해 BOD incubator 내에 AT<sub>4</sub> 분석장치를 설치하였다.

대상 폐기물 300 g에 수돗물 300 ml를 넣은 후 진공흡입장치를 이용하여 30분간 여과하여 폐기물의 수분함량을 최대 수분 보유능(field capacity)의 50~70%가 되도록 함수율을 조절하였다. 그리고 폐기물 시료 40 g을 제작한 반응기에 넣어 20±1 °C에서 4일 동안 AT<sub>4</sub>를 측정하였다. 이때 4일간의 측정기간은 초기 지연시간은 제외한 시간이며, 주간에는 매시간 압력차를 측정하였으며, 야간은 이산화탄소 흡수 경향을 보면서 가장 산소소모가 큰 날의 경우에는 야간에도 매시간 압력차를 측정하고, 그 외에는 측정하지 않았다.

압력차를 측정된 후에는 manometer의 압력차를 해소하고, 반응용기 내에 산소를 보충해 주기 위해 반응용기와 manometer 사이에 설치된 삼방코크를 5분간 open하여 대기 중에 노출시켰다.

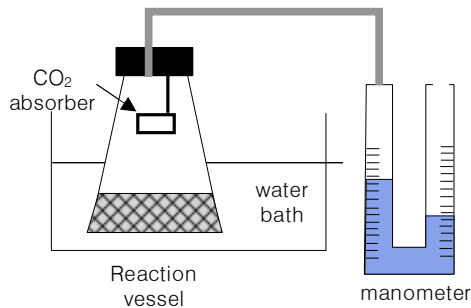
호기성 미생물에 의해 생성된 이산화탄소를 NaOH에 흡수시켜 감소된 압력을 측정하고, 이를 이상기체방정식에 대입하여 소모된 산소량을 측정하였다. 압력은 U-Tube와 well-type의 manometer를 사용하여 측정하였다.

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (1)$$

여기서,  $n$  : 소모된 산소의 몰수(mol)  
 $P$  : 측정된 압력차(atm)  
 $V$  : 반응기의 부피(L)  
 $R$  : 기체상수 (0.0821 atm·L·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)  
 $T$  : 측정온도 (20°C = 293°K)

$$\text{산소소모량} = \frac{32,000 \times n}{w} \quad (2)$$

여기서,  $n$  : (1)에서 계산한 소모된 산소의 몰수(mol)  
 32,000 : O<sub>2</sub>의 분자량 (mg)  
 $w$  : 실험에 사용한 건조기준 시료의 무게 (40 g)



[Fig. 1] AT<sub>4</sub> experiment apparatus.

## 2.2 실험재료

본 실험에서는 화훼용 퇴비와 음식물 건조사료를 시료로 사용하였으며, 이들의 혼합비율을 달리하면서 각 시료의 구성에 따른 AT<sub>4</sub> 값의 변화 추이를 비교하였다. 즉, 건조사료의 함량을 100%에서부터 50%, 25%, 10%, 5%, 0%로 줄여가면서 이를 화훼용 퇴비로 대체하였다. 실험에 사용된 폐기물의 배합비와 이들의 물리화학적 특성은 [Table 1]과 같다.

시료를 넣지 않은 blank 1개와 동일한 배합비의 4개 시료에 대하여 동시에 AT<sub>4</sub>를 측정하였으며, 측정된 값의 평균과 표준편차를 구하고, 이로부터 아래와 같이 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 구하였다.

$$\text{변동계수}(CV) = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \times 100\% \quad (3)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 초기 지연시간

AT<sub>4</sub>는 96시간 동안의 폐기물의 생분해에 따른 산소소모량을 측정하는 시험방법이나, 실제 시험 시간은 초기 지연시간을 감안하면 약 120시간이 소요되었다. 대상폐기물에 따라 산소 소모가 발생하는 시기는 약간의 차이는 있으나, 대략 20시간 정도의 초기 지연시간을 감안할 필요가 있다.

[Table 1] Sample Used for AT<sub>4</sub> Experiment

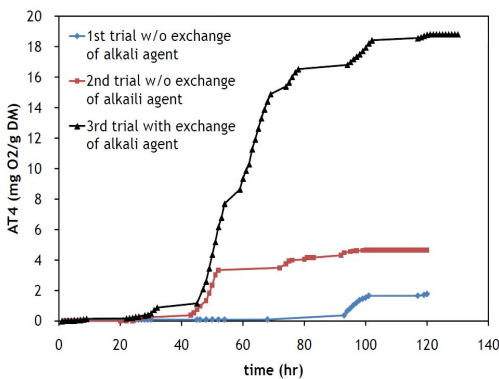
type of waste	organic carbon (%)	TKN (mg/kg)	pH
Dried food waste (F100)	28.3	29400	4.4
F50+C50	10.1	10010	5.8
F25+C75	8.09	3733	5.5
F10+C90	7.74	2240	6.4
F5+C95	7.09	2870	6.3
Compost (C100)	5.74	1418	7.2

\* F : dried food waste, C : compost.

특히 이산화탄소 흡수량을 수동으로 측정하는 경우 야간측정이 곤란할 수 있으므로 이를 감안하는 경우 24시간 정도의 지연시간은 감안하여야 한다. 하지만, 산소공급이 연속식이 아니고, 수동으로 산소를 공급하는 경우에 있어서는 비록 지연시간 기간이어도 지속적으로 매시간 새로운 공기를 교체해주는 작업은 필수적이다.

### 3.2 CO<sub>2</sub> 흡수제 교체시기

AT<sub>4</sub> 실험 장치에서 산소소모량은 산소소모에 따라 생성되는 이산화탄소를 강알칼리성 흡수제에 흡수시킴으로써 실험장치의 기체상 부분의 분압이 음압이 되었을 때의 값을 측정함으로써 간접적으로 측정하였다. 이때 최초에는 CO<sub>2</sub> 흡수제를 실험기간 동안 교체하지 않고 약 5일간 실험하였다. 4개 시료 평균값은 [Fig. 2]와 같이 4.66 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 나타내었는데, 실험에 사용한 시료가 음식물 건조사료임을 감안할 때 이는 지나치게 낮은 값이라 판단되었고, 그 원인을 CO<sub>2</sub> 흡수제로 보고, 이후 매일 1회씩 CO<sub>2</sub> 흡수제를 교체하였다. 매일 CO<sub>2</sub> 흡수제를 교체한 경우에 있어서 동일한 시료에 대한 AT<sub>4</sub> 측정값이 18.8 mg O<sub>2</sub>/g DM으로 나타나 약 4배의 차이가 나타났다.



[Fig. 2] AT<sub>4</sub> value for dried food waste with or without exchange of alkali agent.

하지만, 1일이 지난 흡수제의 경우에서도 흡수

제의 pH를 측정한 결과 pH 12 부근의 강알칼리성을 나타내어 실제로 CO<sub>2</sub>에 의한 중화로 pH가 낮아져서 CO<sub>2</sub> 흡수량이 감소했다기 보다는 [Fig. 3]과 같이 흡수제 표면에 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 결정에 의한 얇은 막이 형성되어 추가적으로 CO<sub>2</sub>가 용해되는 것을 방해한 것으로 보이며, 매시간 분압 측정시 CO<sub>2</sub> 흡수제를 흔들어서 교반해 준 경우 CO<sub>2</sub> 흡수제를 교반하지 않은 경우보다 CO<sub>2</sub> 흡수량이 크게 나타남을 볼 수 있었다.



[Fig. 3] Crystal formed at the CO<sub>2</sub> absorber during AT<sub>4</sub> measurement.

따라서 향후 매립폐기물의 생분해도 평가에 있어서 AT<sub>4</sub> 방법을 사용하는 경우에는 자동화된 장치의 경우 24시간 매시간 산소소모량을 측정하고, 공기를 보충해 주며, 수동으로 측정하는 경우 낮 시간(8시간) 동안 매시간 산소소모량을 측정하며, CO<sub>2</sub> 흡수제는 매일 교체하여 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 결정에 의한 피막 형성을 방지하는 것이 바람직할 것이다.

### 3.3 생분해성 폐기물 조성에 따른 AT<sub>4</sub> 측정값의 변화

AT<sub>4</sub> 실험은 공기를 연속적으로 공급하는 dynamic 방식이 아니고, 간헐적으로 공급하는 static 방식이다<sup>7)</sup>. 따라서 dynamic 방식에 비하여 산소공급이 제한적이며, 이에 따라 산소 호흡률이 작게 나타나는 단점이 있다.

본 절에서는 폐기물의 배합을 [Table 1]과 같

이 각기 달리한 경우에 있어서 AT<sub>4</sub>를 비교하였다. 실험 결과를 요약한 [Table 2]를 살펴보면 AT<sub>4</sub> 값은 생분해성이 큰 음식물 건조사료의 함량에 비례하지 않음을 볼 수 있다. 즉, 퇴비의 경우 AT<sub>4</sub> 값이 2.66 mg O<sub>2</sub>/g DM의 낮은 값을 보였고, 음식물 건조사료가 100 %인 경우 18.8 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 보였으나, 이들이 혼합된 경우에는 퇴비 함량이 증가해도 이에 반비례하여 감소하는 경향을 보이지 않았다. 도리어 음식물 함량이 낮은 F25+C75와 F10+C90의 경우가 100 % 음식물 건조사료의 경우(F100)보다 더 높은 값을 보였다. 이는 AT<sub>4</sub> 실험 방법이 간헐적으로 공기를 공급하는 Static 방식인 관계로 생분해성 폐기물이 많은 경우 산소부족에 의해 생분해가 제한됨에 따른 결과로 보이며, 퇴비가 포함된 경우 퇴비 내에 존재하는 미생물에 의해 유기물을 분해할 수 있는 미생물 개체수가 초기에 많은 데에도 기인하는 것으로 보인다.

음식물 건조사료가 단지 5 % 만 포함된 경우에 있어서도 AT<sub>4</sub> 값은 음식물 건조사료가 100 %인 경우와 별로 차이가 나지 않는 값을 보이고 있음에도 주목할 필요가 있다.

따라서 AT<sub>4</sub> 실험 방법은 생분해성 폐기물의 안정화를 평가하는데 있어서 안정화 여부를 판정하는 기준치로만 의미가 있으며, AT<sub>4</sub> 실험결과에 근거하여 향후 안정화에 도달하는데 걸리는 시간을 판정하는 용도로 활용할 수는 없다. 이는 특히 4일간의 산소 호흡률 측정 후에도 다시 산

소소모량이 증가하는 현상이 발견되는 것에서도 알 수 있다.

### 3.4 안정화 기준치로서의 AT<sub>4</sub> 값에 대한 고찰

환경부의 「매립지 순환이용 정비사업 업무지침」에서 제시하고 있는 매립지 사전안정화 평가 기준 중의 생분해도에서는 AT<sub>4</sub> 기준을 25 mg O<sub>2</sub>/g DM로 하고 있다<sup>14)</sup>. 매립폐기물이 불균질함에 따라 측정값의 편차가 클 수 있다는 것을 감안한다고 해도 매립지 사전안정화 기준치로서는 다소 높게 설정되어 있음을 알 수 있다. 독일과 오스트리아의 기계적·생물학적 전처리 후의 매립지 반입기준은 5 mg O<sub>2</sub>/g DM 이하의 AT<sub>4</sub> 값을 규정하고 있다. 김 등<sup>13)</sup>은 폐기물 매립지 생물학적 안정화도 기준으로 4 mg O<sub>2</sub>/g DM 이하의 AT<sub>4</sub> 값을 제안하였다. 본 연구와 김 등<sup>13)</sup>의 연구에서 퇴비나 부엽토의 경우 AT<sub>4</sub> 값이 3 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 나타내었으나, 본 연구의 [Table 2]에서 보는 바와 같이 생분해성 폐기물이 5 % 수준으로 포함된 경우에도 AT<sub>4</sub> 값이 급증하는 것을 볼 수 있다.

[Table 2]에서 동일한 시료에 대한 측정값의 분포가 정규분포를 이룬다고 가정할 때, 음식물 건조사료가 포함된 시료의 경우 95 % 신뢰범위의 하한치에 해당하는<sup>15)</sup> (평균값 - 2×표준편차)의 최소값은 음식물과 퇴비가 각각 50 % 포함된 F50+C50의 경우로서 12.85 mg O<sub>2</sub>/g DM

[Table 2] Comparison of AT<sub>4</sub> Value with Different Ratio of Dried Food Waste

type of waste	AT <sub>4</sub> (mgO <sub>2</sub> /gDM)	standard deviation	coefficient of variation
dried food waste (F100)	18.8	2.88	15.3 %
F50+C50	16.55	1.85	11.1 %
F25+C75	24.95	4.76	19.1 %
F10+C90	31.17	2.56	8.2 %
F5+C95	18.25	2.20	12.0 %
Compost (C100)	2.66	0.64	24.2 %

\* coeff. of variation = (standard deviation/average) × 100

의 값을 보였다. 한편, 퇴비의 경우 95 % 신뢰 범위에서 측정값의 상한치는 (평균값 + 2×표준편차)로부터 계산할 때 3.94 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 보였다.

이상의 결과로부터 유기성 폐기물의 안정화 기준치는 매립폐기물의 불균질성과 통계적인 오차발생 가능성을 감안할 때 10 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 채택하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

하지만, 불균질한 폐기물 매립지에서 사전안정화 작업을 하였을 때 많은 양의 매립폐기물 중 시료량 40 g으로 매립지가 안정화되었는지를 평가하는 것은 신중할 필요가 있다. 따라서 최근 진행되고 있는 매립지 순환이용 시범사업의 조사 결과로부터 AT<sub>4</sub> 이외에 침출수질, 매립지 가스 농도, 매립지 침하속도 등을 종합적으로 평가하여 이에 따른 우리나라 실정에 맞는 기준치를 제시할 필요가 있다. 다만, 이때 AT<sub>4</sub> 실험에 있어서는 앞서 논의한 바와 같이 산소소모율 측정 방법에 대한 구체적인 공정시험방법이 정립되어 전국적으로 동일한 방법에서 측정이 진행될 수 있도록 통일할 필요가 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 매립폐기물을 호기성으로 안정화시킨 경우에 있어서 생물학적 안정화도를 평가하기 위해 호기성 조건의 AT<sub>4</sub> 방법을 적용하였을 때 실험결과에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대하여 논의하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AT<sub>4</sub> 실험에 있어서 초기 지연시간이 나타나므로, 초기지연시간을 제외하고 96시간의 산소 호흡률을 측정하여야 하는데, 이를 감안하면 통상 120시간 정도의 측정시간이 소요되었다.
2. 산소소모에 따라 생성되는 이산화탄소 흡수량으로부터 산소소모율을 측정하는 경우 흡수제 표면에 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 결정에 의한 얇은 막이 형성되어 CO<sub>2</sub> 용해를 방해하는 현상이 발견되므로,

CO<sub>2</sub> 흡수제는 매일 교체하여 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 결정에 의한 피막 형성을 방지하는 것이 바람직하다.

3. 수동으로 이산화탄소 흡수량을 측정하고, 공기를 새롭게 교체하는 경우 교체주기와 교체시 공기 공급량(밸브 open 시간, 반응기 부피 등)을 명확하고, 일정하게 통일할 필요가 있다.
4. AT<sub>4</sub> 방법은 간헐적으로 공기를 주입함에 따라 산소공급이 제한적이므로, 생분해성 폐기물의 함량이 높은 경우 산소소모량은 유기물 함량에 따라 비례하지 않았으며, 따라서 AT<sub>4</sub> 측정값으로부터 향후 생물학적 안정화에 도달하는데 필요한 시간이나 안정화 정도를 평가할 수 없으며, 단지 설정된 기준치의 초과 유무에 따라 생물학적 안정화도를 평가하는 목적에만 사용하여야 한다.
5. 매립폐기물에 대한 생물학적 안정화도 평가 기준은 매립폐기물이 불균질하여 원위치에서 완벽한 생물학적 안정화에 도달하지 못할 수 있는 점을 감안할 때, AT<sub>4</sub> 기준으로 10 mg O<sub>2</sub>/g DM의 값을 제안하였다. 향후 순환형 매립지 정비사업의 시행으로 보다 많은 자료가 축적되면 이를 근거로 생물학적 안정화 평가 기준값을 재설정할 필요가 있다.

#### 사사

본 연구는 환경부 차세대에코이노베이션기술개발사업인 “이동식 매립지 정비 및 선별 가연물 연료화 기술 실증”과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 이남훈, 순환형 매립지 정비사업 로드맵 구성연구, 환경부, pp. 429. (2009).
2. Ordinance Simplifying Landfill Law of 27 April 2009, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ordinance\\_simplifying\\_landfill\\_law.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ordinance_simplifying_landfill_law.pdf).

3. Adani, F., Lozzi, P. and Genevini, P., "Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products", *Compost Science & Utilization*, 9, pp. 163~178. (2001).
4. Adani, F., Gigliotti, G., Valentini, F. and Laraia, R., "Respiration index determination: a comparative study of different methods", *Compost Science & Utilization*, 11, pp. 144~151. (2003).
5. Adani, F., Confalonieri, R., and Tambone, F., "Dynamic Respiration Index as a descriptor of the biological stability of organic wastes", *J. Environ. Qual.*, 33, pp. 1866~1876. (2004).
6. Adani, F., Ubbiali, C, and Generini, P., "The determination of biological stability of composts using the Dynamic Respiration Index: The results of experience after two years", *Waste Management*, 26, pp. 41~48. (2006).
7. Gómez, R.B., Lima, F.V., and Ferrer, A.S., "The use of respiration indices in the composting process : a review", *Waste Manage. Res.*, 24, pp. 37~47. (2006).
8. Ponsa, S., Gea, T., Alerm, L, Cerezo, J., and Sanchez, A., "Comparison of aerobic and anaerobic stability indices through a MSW biological treatment process", *Waste Management*, 28, pp. 2735~2742. (2008).
9. Cossu, R. and Raga, R., "Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste", *Waste Management*, 28, pp. 381~388. (2008).
10. Heerenklage, J. and Stegmann, R., "Analytical methods for the determination of the biological stability of waste samples", *Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium* (2005).
11. 김혜진, 정새롬, 박진규, 김홍규, 이남훈, "폐기물의 생분해도 평가방법(II) : 호기성 미생물에 의한 방법", *한국폐기물학회지*, 26(2), pp. 183~189. (2009).
12. 김혜진, 정새롬, 박진규, 이남훈, "혐기성 및 호기성 방법에 의한 폐기물의 생분해성 유기물 측정방법의 재현성과 상관관계에 관한 연구", *한국폐기물학회지*, 26(2), pp. 1225~1236. (2009).
13. 김혜진, 정새롬, 박진규, 김홍규, 이남훈, "호기성( $AT_4$ ) 및 혐기성(GB21) 분석방법에 의한 매립폐기물의 생물학적 안정화 기준에 관한 연구", *한국폐기물자원순환학회지*, 28(42), pp. 378~384. (2011).
14. 환경부, 매립지 순환이용 정비사업 업무지침 (2010).
15. Scheaffer, R.L. and McClave J.T., *Probability and statistics for engineers*, 2nd Ed., Duxbury Press (1986). 