



## 가솔린휘발가스 제거를 위한 퇴비 바이오필터의 체류시간 및 충전깊이의 영향

남궁완, 박준석

건국대학교 공과대학 환경공학과  
(2000년 6월 30일 접수, 2000년 8월 13일 채택)

### Effects of Gas Retention Time and Filling Depth of a Compost Biofilter on Removal of Vapor Phase Gasoline

Wan Namkoong, Joon-Seok Park

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University

#### ABSTRACT

This study was conducted to evaluate effects of gas retention time and filling depth of a compost-based biofilter on removal of vapor phase gasoline and to suggest operational improving method. Gas empty bed retention times (EBRTs) were 4, 10, and 20 minutes, respectively. EBRT of over 10 minutes was required in both cases of TPH (total petroleum hydrocarbons) and BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene). Filling depths were 25, 50, 75, and 100cm, respectively. To treat gasoline TPH effectively, controlling other operational parameters including EBRT and gas loading rate was more important than increasing filling depth simply. 1m filling depth was sufficient in treating BTEX without controlling other operational parameters greatly.

Key Words : biofilter, TPH, BTEX, empty bed retention time, filling depth

#### 초 록

본 연구는 가솔린 휘발가스를 퇴비 바이오필터로 처리시 공정조절 인자인 체류시간과 충전깊이의 영향을 살펴 보고 공정개선방안을 제시하고자 실시하였다. 체류시간을 4, 10, 그리고 20분으로 변화하여 실시한 결과 TPH의 효율적 제거를 위해서는 10분 이상의 EBRT가 요구되었으며  $40\text{g}/\text{m}^3$ (충전물질)/hr 미만의 부하로 운전하는 것이 효과적이었다. BTEX는 체류시간 4분에서는 부하량이 약  $1.5\text{g}/\text{m}^3$ (충전물질)/hr 이상으로 증가하자 더 이상 제거 능력이 증가하지 않았으며, 체류시간 10분에서는 약  $5.3\text{g}/\text{m}^3$ (충전물질)/hr의 부하량에서  $4.5\text{g}/\text{m}^3$ (충전물질)/hr 이상이 제거되었다. 이로써 안정적인 제거를 위해서는 BTEX도 10분 이상의 체류시간이 필요하였다. 충전깊이는 25, 50, 75, 그리고 100cm로 하였다. TPH 제거량을 증가시키기 위해서는 단순히 충전깊이를 증가시키는 것보다 가스체류시간 및 유입부하량 등 다른 공정인자들을 제어하는 것이 더욱 효과적이었다. BTEX의 경우에는 다른 공정인자의 조절도 중요하지만 충전깊이를 1m 정도로 하면 다른 공정인자의 조절에 큰 어려움 없이도 제거효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

주제어 : 바이오필터, TPH, BTEX, 체류시간, 충전깊이

## 1. 서론

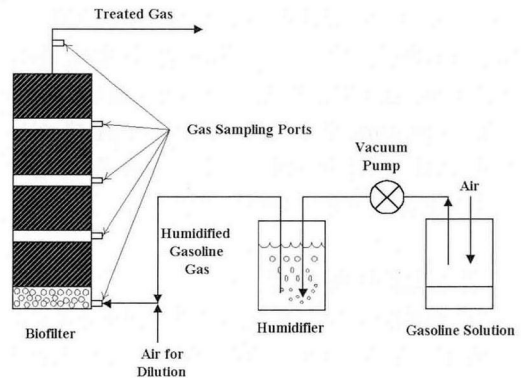
최근까지 바이오필터는  $1\text{g}/\text{m}^3$  이하의 저농도 또는  $50\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$  이하의 저부하 유기화합물에 적용되어 왔다<sup>1)</sup>. 현재에는 적용범위가 확대되어 분해가 어려운 복합 유기화합물과 고농도의 유해성 유기화합물까지 적용되고 있다. 이러한 화합물 중에는 기존에는 바이오필터의 적용이 불가능한 것으로 인식되었던 염소계 화합물들도 포함되어 있다<sup>2)</sup>. 새로운 화합물을 바이오필터로 처리하기 위해서는 문헌연구 및 대상오염가스를 파악하기 위한 기초 실험을 실시하여야 하며 다음으로는 부하율, 수분조절방법, 온도의 영향 등에 대한 연구를 수행하여야 한다<sup>3)</sup>. 바이오필터로 처리가능한 물질로 판단될 경우 여러 가지 공정조절 인자에 대한 개별 연구를 실시하여 최적의 조건에서 가장 경제적으로 운전할 수 있도록 하여야 한다. 공정조절 인자 중에서 충전깊이나 체류시간 등은 매우 중요하다. 오염물질 종류에 따라 충전깊이를 아무리 증가시켜도 제거효율이 증가하지 않는 경우에는 압력손실을 줄이고 송풍기 용량을 감소시키기 위하여 낮은 충전깊이로 운전하면서 다른 공정인자를 조절하는 것이 유리하다. 체류시간을 조절하는 방법으로는 충전깊이를 조절하는 방법과 유입유량을 변화시키는 방법이 있으며 이에 대한 연구도 충전깊이와 동시에 실시할 필요가 있다.

본 연구는 가솔린휘발가스를 퇴비 바이오필터로 처리할 경우 체류시간 및 충전깊이의 영향을 검토하고 공정조절 인자의 개선방안을 제시하고자 실시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

(Fig. 1)은 본 연구에서 사용한 실험장치의 모식도이다. 먼저 테프론 뚜껑이 달린 약 4L(1 갤런)의 유리병에 가솔린 용액을 담은 후에 진공흡인펌프(GAST Vacuum Pumps, DOAP104AA)로 내부를 감압시켜 가솔린을 휘발시켰다. 휘발된 가솔린 가스는 수분을 포화시키기 위하여 증류수병을 통과시켰다. 가솔린 휘발가스는 고농도이므로 생물학적 처리가 가능한 농도로 조절하기 위하여 공기와 혼합한 후 바이오필터 반응기 내부로 유입시켰다. 반응기는 내경이 5cm, 높



(Fig. 1) Experimental schematic used in this study

이가 100cm인 원통형 아크릴로 제작하였으며, 충전물질 깊이의 영향을 검토할 수 있도록 각 25cm 높이마다 시료채취구를 설치하였다.

### 2.2 실험재료 및 성상

바이오필터 충전재료로는 난지도 퇴비화시범시설에서 생산된 퇴비를 사용하였다. 이 퇴비는 음식쓰레기에 폐목재(공극개량제)를 혼합하여 생산한 것이며, 퇴비를 2mm 체로 거름을 하여 헝겍물을 제거한 후 통과한 것만을 사용하였다. 퇴비의 용적밀도는 약  $770\text{kg}/\text{m}^3$ , 수분보유능력은 73%, pH는 8.8, VS는 67% 정도이었으며, 중금속 분석결과 모든 성분이 부산물비료의 공정규격 기준치미만이었다. 입자의 균등계수는 약 5이었다. Wright 등(1997)<sup>4)</sup>은  $400\text{mg}/\text{TPH}/\text{m}^3$ 의 가솔린 휘발가스 처리시 퇴비를 사용하는 것이 타당성이 있다고 하였다.

오염대상가스로는 국내에서 시판되고 있는 가솔린 중의 하나를 선택하여 휘발시켜 사용하였다. 가솔린 성분은 파라핀류, 올레핀류, 나프텐류, 그리고 방향족류로 대별할 수 있으며 탄소수에 따라 분류하면 C3에서 C12까지이다. 국내 5개 정유사에서 생산된 가솔린의 화학적 성분을 살펴보면 발암성물질로 알려진 방향족류가 약 40~55%로 가장 높은 비율이었으며, 다음으로 파라핀류가 약 35%에 이른다<sup>5)</sup>. 방향족류의 주성분인 BTEX의 물리화학적 특성을 파라핀류의 하나인 n-pentane과 비교하여 보았다<sup>6,7)</sup>. 공기에 대한 상대적인 밀도 값은 큰 차이가 없었다. n-Pentane이 휘발되는데 소요되는 시간을 1로 할 경우 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 그리고 자일렌의 상대적인 값은 각각

2.6, 4.6, 10.9, 그리고 11.5로 높아 BTEX가 n-pentane보다는 휘발성이 낮음을 알 수 있다. 물에 대한 용해도는 BTEX가 1.5~22.8mol/m<sup>3</sup>(at 20℃)으로 n-pentane의 0.5mol/m<sup>3</sup>보다 높았는데 이는 바이오필터 충전물질내의 공극수에 쉽게 흡수, 흡착될 수 있음을 의미하는 것이다.

### 2.3 실험조건 및 방법

모든 실험은 외부온도에 의한 영향을 배제하고 결과의 해석을 명확히 하기 위하여 20℃로 설정된 항온조 내에서 실시하였다. 초기수분함량은 수분보유능력(field capacity)의 60~80%로 조절하였다. 가스주입모드는 하부에서 상부로 주입하는 상향류식으로 하였다. 가스체류시간(EBRT)의 영향을 살펴보기 위하여 가스유입유량을 0.1L/min, 0.2L/min, 그리고 0.5L/min으로 변화시켰다. 이때의 충전깊이는 100cm로 하였다. 유량별 가스체류시간은 다음과 같이 구할 수 있다. 바이오필터 반응기의 지름이 5cm, 높이가 1m이므로 충전물질 부피는  $(2.5\text{cm})^2 \times \pi \times 100\text{cm} = 1963.5\text{cm}^3 \approx 2\text{L}$ 가 된다. 충전물질이 없을 경우의 가스체류시간인 EBRT(Empty Bed Retention Time)는 충전물질 부피를 가스유입유량으로 나누어주면 구할 수 있다. 0.1L/min 유량의 경우 가스체류시간은 2L/(0.1L/min)에 의하여 약 20분이 된다. 같은 방법으로 0.2L/min과 0.5L/min인 경우의 EBRT를 계산하면 각각 10분과 4분이 된다. 일반적인 가스체류시간은 0.5~1분으로 알려져 왔으나<sup>8,9,10</sup> 최근에는 바이오필터의 적용범위가 난분해성 유기물질에 까지도 확대되고 있으므로 체류시간을 1분으로 제한하는 것은 바람직하지 못하다. 충전깊이의 영향을 살펴보기 위하여 가스주입구로부터 25cm, 50cm, 75cm, 그리고 100cm 지점에서 시료를 채취, 분석하였다.

### 2.3 실험조건 및 방법

모든 실험은 외부온도에 의한 영향을 배제하고 결과의 해석을 명확히 하기 위하여 20℃로 설정된 항온조 내에서 실시하였다. 초기수분함량은 수분보유능력(field capacity)의 60~80%로 조절하였다. 가스주입모드는 하부에서 상부로 주입하는 상향류식으로 하였다. 가스체류시간(EBRT)의 영향을 살펴보기 위하

여 가스유입유량을 0.1L/min, 0.2L/min, 그리고 0.5L/min으로 변화시켰다. 이때의 충전깊이는 100cm로 하였다. 유량별 가스체류시간은 다음과 같이 구할 수 있다. 바이오필터 반응기의 지름이 5cm, 높이가 1m이므로 충전물질 부피는  $(2.5\text{cm})^2 \times \pi \times 100\text{cm} = 1963.5\text{cm}^3 \approx 2\text{L}$ 가 된다. 충전물질이 없을 경우의 가스체류시간인 EBRT(Empty Bed Retention Time)는 충전물질 부피를 가스유입유량으로 나누어주면 구할 수 있다. 0.1L/min 유량의 경우 가스체류시간은 2L/(0.1L/min)에 의하여 약 20분이 된다. 같은 방법으로 0.2L/min과 0.5L/min인 경우의 EBRT를 계산하면 각각 10분과 4분이 된다. 일반적인 가스체류시간은 0.5~1분으로 알려져 왔으나 8,9,10). 최근에는 바이오필터의 적용범위가 난분해성 유기물질에 까지도 확대되고 있으므로 체류시간을 1분으로 제한하는 것은 바람직하지 못하다. 충전깊이의 영향을 살펴보기 위하여 가스주입구로부터 25cm, 50cm, 75cm, 그리고 100cm 지점에서 시료를 채취, 분석하였다.

### 2.4 분석방법

가솔린 휘발가스는 핸드샘플러(handy sampler)로 흡인하여 활성탄칼럼(SK, Cat. No. 226-01)에 흡착시켰다. 활성탄칼럼은 길이 7cm, 외경 6cm, 내경 4mm의 크기이며 BTEX를 포함한 유기화합물에 대한 흡착능력이 우수한 코코넛활성탄이 들어 있다. 시료흡착 후 활성탄은 분리하여 바이알에 넣은 다음 methylene chloride를 1mL 넣어 30분간 방치하여 탈착하였다. 탈착용매는 불꽃이온화검출기가 장착된 가스크로마토그래프(Hewlett Packard 5890 II)로 분석하였다. TPH 표준용액의 경우 본 실험에 사용된 재료와 동일한 가솔린을 이용하여 무게비로 조제하였으며, GROs(Gasoline Range Organics)표준물질은 Supelco회사의 Modified GRO Mix(Catalog No. 4-8167)제품을 사용하였다.

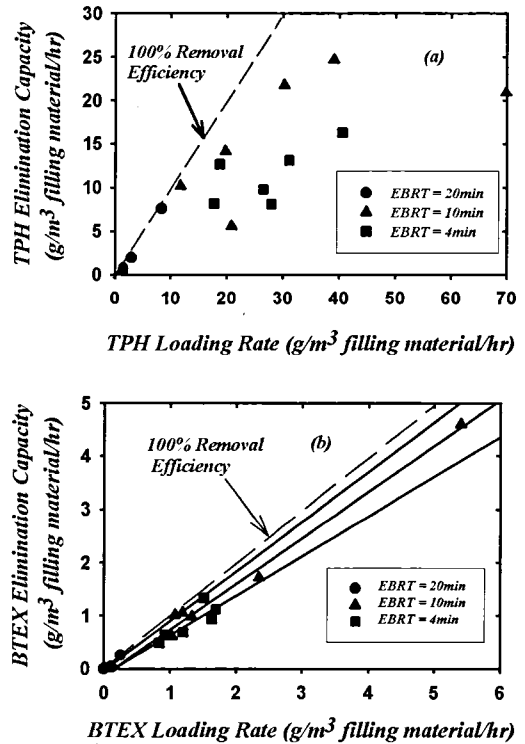
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 가스 체류시간의 영향

오염가스는 충전물질 표면의 바이오필름(biofilm)과의 충분한 접촉이 있어야만 이류, 확산, 흡착/흡수

등이 일어나며, 이들은 생물학적 분해단계를 거치면서 제거가 된다. 그러므로 적정 유입가스속도를 찾아내는 것도 중요한 연구인자가 될 수 있다. 유입가스속도는 충전물질의 수분손실과도 밀접한 관계가 있다<sup>9)</sup>. 가스체류시간이 감소할수록 유입속도는 증가하며 유입속도가 증가할수록 수분손실도 증가한다. 본 연구에서는 가스체류시간이 제거효율에 미치는 영향을 알아보고 적정 체류시간을 선정하고자 체류시간(EBRT, empty bed retention time)을 4분, 10분, 그리고 20분으로 변화시켜 보았다. 이 때의 체류시간은 빈 반응기를 통과하는데 소요되는 시간을 의미한다. 퇴비를 충전재로 사용한 다른 연구자들의 공극률을 검토한 결과 약 50%이었으므로<sup>11,12,13)</sup> 본 연구에서 이 공극률을 적용할 경우 실제 체류시간은 2분, 4분, 그리고 10분이 된다. 그러나 이는 정확한 공극률이 아니므로 본 연구에서는 많은 연구자들이 사용하고 있는 EBRT를 기준으로 검토하였다. 가솔린의 유입농도는 시간에 따라 변화가 심하였다. 이를 시간축으로 나타내는 것은 체류시간의 영향을 검토하기가 용이하지 않았으므로 체류시간에 따른 부하량과 제거량과의 관계로 제시하였다. 충전물질(퇴비)당 부하량은 유입농도와 유량을 곱한 후 충전물질 부피로 나누어주면 구할 수 있다. 이 때에 충전물질부피는 일정하므로 부하량을 조절하는 인자들은 유입농도와 유량이 된다. 유량을 증가시키면 가스유입속도가 증가하므로 체류시간은 짧아진다. [Fig. 2(a)]는 TPH 제거에 대한 체류시간의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 유입되는 가스가 100% 제거되는 선을 의미한다. 먼저 TPH에 대하여 살펴보면 체류시간 20분에서는 100% 가까이 제거되었다. 10분일 경우 40g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 이상의 유입부하량에서는 제거능력이 감소하였으며 최대제거능력은 25g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr이었다. 가장 체류시간이 짧았던 4분에서는 40g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 부하량에서 15g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 최대제거능력을 보였다. TPH의 효율적 제거를 위해서는 10분 이상의 EBRT가 요구되었으며 40g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 미만의 부하로 운전하는 것이 효과적이었다.

다음으로 BTEX에 대하여 살펴보았다. BTEX는 가솔린휘발가스(TPH) 중의 BTEX성분만을 모니터링한 것이다. TPH보다는 결과들이 100% 제거효율 직선에 가깝게 존재하고 있음을 볼 수 있다[Fig. 2(b)].



(Fig. 2) Elimination capacities of gasoline TPH and BTEX at the depth of 100cm as a function of empty bed retention time

이는 체류시간이 감소할 경우에도 TPH와는 달리 BTEX성분이 잘 제거되고 있음을 의미하는 것이다. 이러한 결과는 BTEX의 물용해도가 TPH보다 높아 바이오필터에 쉽게 흡수, 흡착될 수 있었기 때문이다. 가스체류시간을 감소시킬 경우 BTEX는 TPH보다도 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 BTEX도 체류시간 4분에서는 부하량이 약 1.5g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 이상으로 증가하자 제거능력이 증가하지 않았으나 체류시간 10분에서는 약 5.3g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 부하량에서 4.5g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 이상이 제거되었다. 이로써 안정적인 제거를 위해서는 BTEX도 10분 이상의 체류시간이 필요한 것으로 판단되었다. Leson 등(1997)<sup>14)</sup>의 연구에서는 체류시간 1분일 때에 15gC/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 부하에서 10gC/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 최대제거능력을 나타내었으며, 체류시간이 3배 증가하였을 때에는 65gC/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 부하에서 최대제거능력이 35gC/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr이었다.

Lith 등(1997)9)은 유입가스의 탄소농도가 500mg/m<sup>3</sup>이고 유입가스속도가 1.7m/min일 경우 충전물질의 수분손실은 12g/m<sup>2</sup>/hr라고 보고한 바 있다. Wright 등(1997)4)은 퇴비를 이용하여 가솔린휘발가스 처리시 2분이상의 체류시간과 1m<sup>3</sup>(가스부피)/m<sup>2</sup>(충전물질 단면적)/hr미만의 가스유입속도가 필요하다고 하였다.

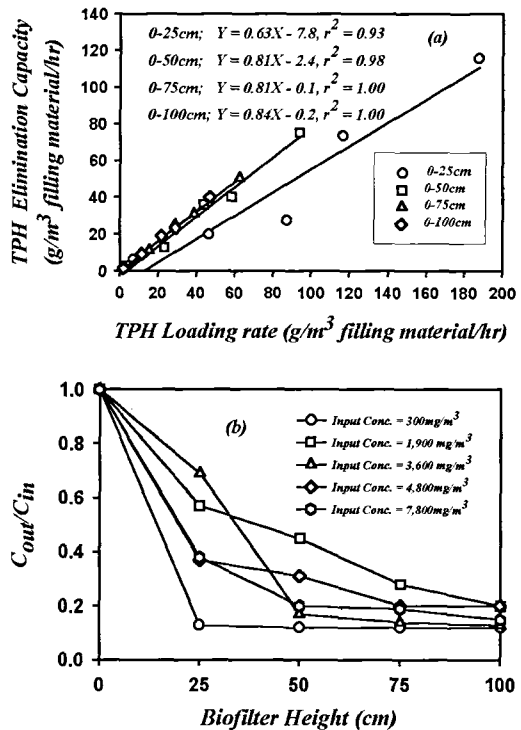
### 3.2 충전물질 깊이의 영향

[Fig. 3]는 충전깊이별로 가솔린 TPH의 제거능력 및 유출입농도의 비를 나타낸 것이다. 이때의 체류시간은 10분이었다. [Fig. 3(a)]는 충전물질 단위부피당 유입되는 부하량과 제거능력과의 관계이다. 충전깊이를 감소시킬수록 충전물질 단위부피당 유입되는 부하량은 증가하게 되는데 이는 가스주입구에 유입되는 부하량은 동일하지만 충전물질 부피가 상대적으로 감소하였기 때문이다. 충전깊이를 25cm로 하였을 경우에는 충전물질 단위부피당 부하량은 약 50~190g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr까지 변화하였다. 충전깊이를 2배, 3배, 4배로 증가시킬 경우 충전물질 단위부피당 부하량은 동일한 비율로 감소하게 된다. 부하량과 제거능력과의 관계를 1차직선으로 표현하면 25cm 충전깊이의 경우에는 제거효율의 기울기가 0.63을 나타내었으며 50, 75, 그리고 100cm에서는 0.81~0.84의 범위를 나타내었다. 이는 25cm로 충전할 경우 제거효율은 50cm로 충전한 경우 보다 낮았지만 충전물질 단위부피당 제거량은 다른 깊이의 경우보다 훨씬 높음을 의미하는 것이다. 그리고 약 90g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr이하의 부하량에서는 충전깊이를 50cm이상 충전하여도 기울기는 크게 증가하지 않는 것으로 보아 저부하량에서의 충전깊이는 50cm정도로 가능하였다. 결과적으로 TPH 제거량을 증가시키기 위해서는 충전깊이를 증가시키는 것보다 가스체류시간 및 유입부하량 등 다른 공정인자들을 제어하는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

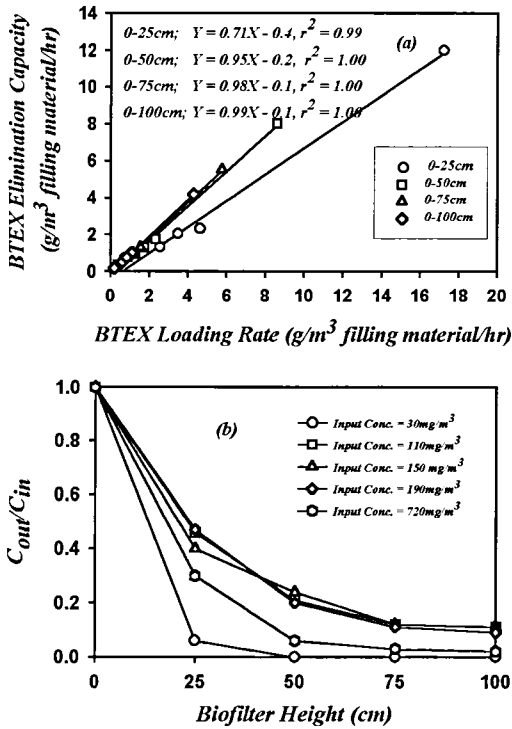
유입되는 TPH의 농도별로 충전깊이에 따른 유출농도의 비를 [Fig. 3(b)]에 나타내었다. [Fig. 3(a)]와 마찬가지로 0~25cm에서 유출농도가 급격히 감소하여 대부분 25cm미만에서 제거됨을 볼 수 있다. 가장 낮은 농도인 300mg/m<sup>3</sup>의 유입농도에서는 25cm이상으로 충전하여도 제거효율은 더 이상 증가하지 않

았다. 그러나 1,900mg/m<sup>3</sup>이상의 유입농도에서는 50cm 까지는 기울기가 급격히 감소하고 있으므로 고농도일 경우에는 최소한 50cm 이상의 충전깊이가 필요함을 보여주고 있다. 폐수처리의 경우 고농도 폐수는 유입구에서의 유기물부하율을 저감시키고 부하를 균등하게 하기 위하여 계단식 주입방법을 사용하고 있다<sup>15)</sup>. 유입되는 오염가스의 처리효율을 높이기 위해서는 폐수처리장의 계단식 주입방법과 유사하게 0cm와 50cm의 높이에서 균등하게 가스를 분배하여 주입하는 것을 고려하여 볼 수도 있다. 이러한 경우 총가스 제거량을 증가시킬 수 있을 것이다.

충전깊이에 따른 BTEX의 제거능력 및 유출입농도의 비는 [Fig. 4]에 나타내었다. [Fig. 4(a)]에서 볼 수 있듯이 충전깊이에 따른 제거능력 특성도 전체적으로는 TPH와 크게 다르지 않았다[Fig. 3(a) 참조]. 이를 1차직선으로 표현하였을 때에 25cm 이하에서는 기울기가 0.71로 전체 유입량의 약 70%가 제거되었다 [Fig. 4]. 충전깊이를 증가시킨 경우에는 기울기가 0.95이상으로 증가되었으나 제거량의 상대적인 면에서



[Fig. 3] Elimination capacities and removal characteristics of gasoline TPH at the depths of 25cm, 50cm, 75cm, and 100cm [EBRT = 10min]



(Fig. 4) Elimination capacities and removal characteristics of BTEX at the depths of 25cm, 50cm, 75cm, and 100cm [EBRT = 10min]

볼 때는 유입부분(0~25cm)에서 가장 많은 양이 제거되었다. 유입농도별로 충전깊이에 따른 유출입농도의 비를 살펴보았을 때에 30mg/m<sup>3</sup>의 농도에서는 50cm이하에서 거의 대부분이 제거되었다. 150mg/m<sup>3</sup>이상의 유입농도에서는 각 높이에서의 제거특성이 유사하여 충전깊이를 증가시킬수록 처리효율이 증가하여 충전깊이의 영향을 뚜렷이 볼 수 있었다. 이는 BTEX의 경우에는 다른 공정인자의 조절도 중요하지만 충전깊이를 1m 정도로 하면 다른 공정의 영향을 크게 받지 않고 제거효율을 향상시킬 수 있음을 의미하는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 가솔린휘발가스를 퇴비 바이오필터로 처리할 경우 체류시간 및 충전깊이의 영향을 검토하고 공정조절 인자의 개선방안을 제시하고자 실시하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. TPH의 효율적 제거를 위해서는 10분이상의 EBRT가 요구되었으며 40g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 미만의 부하로 운전하는 것이 효과적이었다.
2. BTEX는 체류시간 4분에서는 부하량이 약 1.5g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 이상으로 증가하자 제거능력이 증가하지 않았으며 체류시간 10분에서는 약 5.3g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr의 부하량에서 4.5g/m<sup>3</sup>(충전물질)/hr 이상이 제거되었다. 이로써 안정적인 제거를 위해서는 BTEX도 10분 이상의 체류시간이 필요하다.
3. TPH 제거량을 증가시키기 위해서는 충전깊이를 증가시키는 것보다 가스체류시간 및 유입부하량 등 다른 공정인자들을 제어하는 것이 효과적이다.
4. BTEX의 경우에는 충전깊이 증가에 따른 처리효율 증가현상이 뚜렷하게 나타났다. 이로써 BTEX는 다른 공정인자의 조절도 중요하지만 충전깊이를 1m 정도로 하면 다른 공정의 영향을 크게 받지 않고 제거효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

1. Deshusses, M., Johnson, C.T., and Leson, G., "Biofiltration of High Loads of Ethyl Acetate in the Presence of Toluene", Air & Waste Manag. Associ., Vol.49, Aug., pp.973-979(1999).
2. Lee, B.D., Apel, W.A., and Miller, A.R., "Removal of Low Concentration of Carbon Tetrachloride in Compost-Based Biofilters Operated under Methanogenic Conditions", Air & Waste Manag. Associ., Vol.49, Aug., pp.1068-1074(1999).
3. 남궁완, 박준석, 이노섭, "바이오필터 기술의 원리와 적용에 관한 고찰", 한국유기성폐자원학회지, 8(1), pp.60-68(2000).
4. Wright, W.F., Schroeder, E.D., Chang, D.P.Y. and Romstad, K., "Performance of a Pilot-Scale Compost Biofilter Treating Gasoline Vapor", Env. Eng., June, pp.547-555 (1997).

5. 국립환경연구원, "유해가스 배출량 산정에 관한 조사연구"(1995).
6. Smallwood, I., "Solvent Recovery Handbook", Edward Arnold, pp.214-225(1993).
7. Gustafson, J.B., Tell, J.G., and Orem, D., "Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Consideration", Vol.3, Amherst Scientific Publishing, pp.41-50(1996).
8. Leson, G. and Winer, A.M., "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology For VOC Emissions", Air & Waste Manag. Associ., 41(8), pp.1045-1054(1991).
9. Lith, C.V., Leson, G., and Michelsen, R., "Evaluating Design Options for Biofilters", Air & Waste Manag. Associ., Vol.47, Jan., pp.37-48(1997).
10. 남궁완, 박준석, 석철영, 이철효, "생물탈취상 재료로서의 매립지복토와 퇴비가 황화수소 제거효율에 미치는 영향", 한국폐기물학회, 15(6), pp.583-591(1998).
11. Pomeroy, R.D., "Biological Treatment of Odorous Air", WPCF, 54(12), pp.1541-1545(1982).
12. Deshusses, M.A., "Transient Behavior of Biofilters: Start-Up, Carbon Balances, and Interactions between Pollutants", Env. Eng., 123(6), June, pp.563-568(1997).
13. Deshusses, M.A. and Johnson, C.T., "Development and Validation of a Simple Protocol to Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOCs Treatment", Environ. Sci. Technol. 34(3), pp.461-467(2000).
14. Leson, G. and Smith, B.J., "Petroleum Environmental Research Forum Field Study on Biofilters for Control of Volatile Hydrocarbons", Env. Eng., 123(6), June, pp.556-562(1997).
15. Tchobanoglous, G. and Burton, R.L., "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse", 3rd ed., McGraw-Hill(1991). ㉔