

Bio필터를 이용한 VOC 가스 중 Toluene 제거율과 필터특성 연구

강신묵 · 하상안*

동의공업대학 환경공학과 · 독일파더른 대학교 공정공학과*

A Study on Toluene Removal of VOC and Characteristics of Material Using Biofilter

Shin-Mook Kang · Sang-An Ha*

Department of Environmental Engineering Dongeui Institute of Technology

*Department of mechanical process Engineering, Paderborn University, Germany**

Abstract

This study was investigated the application of biofiltration using cometabolic process to remediate gaseous toluene that are highly recalcitrant to adsorption, absorption and biodegradation.

The investigation was conducted using specially built stainless steel columns packed with granular activated carbon for removal of toluene and G.A.C. was also coated with *Pseudomonas putida* microorganisms by addition of KH_2PO_4 .

The biofilter unit was operated in the condition of dry and 27.5% moisture content at gas loading rate of 12.5 l/min. Gaseous toluene taken from tedlar bag was analyzed by the use of G.C. equipped with F.I.D. detector.

The removal efficiency of gaseous toluene was 85% at average inlet concentration of 970 ppm during dry operating condition. For gaseous toluene, 91% removal efficiency was obtained at the filter material with moisture content and 97% removal efficiency was obtained with *Pseudomonas putida* microorganisms at gas loading rate of 12.5 l/min.

Key Word: Toluene, Biofilter, Activated Carbon, Gas Chromatography, Removal Efficiency

I. 서 론

인간활동으로부터 생성되는 유기화합물질들의 대기화학적 역할과 중요성은 이미 50여년 전에 스모그에 대한 여러 연구에서 탄화수소의 산화과정이나 광화학적 반응에 의해서 성층권내의 오존층 파괴의 주요인으로 밝혀졌다¹⁾. 이와 같이 환경대

기 중에 존재하는 유기화합물질들은 그 종류와 발생원의 복잡다양함이나 측정 분석방법과 관련된 어려움 등으로 인하여, 아황산가스나 먼지와 같은 일반적인 대기오염물질들에 비해 적절한 관리의 수행이 힘든 항목으로 인식되어 왔다^{2,3)}. 오존과 같은 옥시탄트에 대한 환경기준이 마련되어 있는 한, 그 전구물질(precursor)인 탄화수소에 대한 환

경기준의 필요성과 타당성은 오랫동안 논란의 대상이 되어온 사항이다. 산업활동과 생활수준의 증가에 따라 다양하게 배출되는 유기화합물을 총탄화수소와 비메탄계 탄화수소로 총괄하여 규정짓는 환경기준이 최근의 국제적인 연구추세는 아직 부분적이지만 극미량의 유기물질을 포집 분석하는 방법들이 급속하게 발달함으로써, 총괄적인 개념보다 부분적인 유기물질에 대한 관리와 연구를 선호하는 경향이다³⁾. 이들의 국제적인 추세에 따라 VOCs는 모든 도심지역이나 산업지역의 대기 중 지표면 수준에서 주로 발견되는 중요한 오염물질 그룹 중의 하나에 속한다. VOCs의 영역에는 헤아릴 수 없을 정도로 많은 화합물이 포함되어 있으며, 아직까지는 국제적으로 통일된 정의나 대상물질의 범주가 마련되어 있지는 않다. 따라서 현실적으로 행정적 혹은 법적인 규제대상으로 분류되는 VOCs에 대한 정의나 범위는 VOCs 규제의 배경 및 대기 중 오존오염 정도에 따라 국가 및 지역에 따라 조금씩 다르게 적용되고 있다.

전세계적으로 VOCs규제는 광화학반응성이 에탄보다 큰 318종과 진증기압이 1.5 psia 이상인 석유화학제품 및 유기용제 등이 규제대상에 해당한다. 미국과는 달리 유럽연합에서는 주로 자동차로부터 발생하는 VOCs의 배출량을 저감하기 위해 연료로서 사용되는 휘발유에 초점을 두고 있다⁴⁾. 일본의 경우, 탄소화합물 가운데 일산화탄소, 탄산등을 제외한 유기화합물질이 규제대상이며 원유, 가솔린, 납사 및 항공터빈유 4호 및 위의 물질 이외에 단일물질의 경우는 끓는점이 1기압에서 150°C 이하, 혼합물질인 경우는 1기압에서 5% 유출점이 150°C 이하인 것으로 규정되어 있다³⁾.

국내의 규제대상 VOCs의 범위는 대기환경지역과 대기특별지역으로 크게 구분하여 달리 적용되고 있다. 대기환경보전법 시행령 제 39조 VOCs규

제에 의하면 탄화수소류 중 레이드증기압이 27.6 kPa 이상인 물질로 규정하고 있다. 이들물질 규제의 국지적인 동향은 오존의 생성과 관련 있는 전구물질로써 뿐만 아니라 직접적으로 인체에 유해한 영향을 줄수 있는 발암물질로써 더욱 관심을 끌게 되었다. 이들 추세에 따라 VOCs를 효율적으로 통제하고, 제어하는 시스템의 연구가 절실히 요구되어지고 있는 추세이다⁴⁾. VOCs물질의 저감은 규제를 통한 저감과 배출저감 기술의 개발에 의해 통제되어진다. VOCs를 규제에 따라 통제하기 위해서는 저공해차, 증발연료 및 급유연료증기의 규제 관리가 요구되어진다. 배출저감 기술개발에 의한 통제는 이동오염원의 통제를 위한 기술개발은 촉매기술, 배기처리 기술, 연료 분사기술, 증발장치 및 급유 연료 증기장치, 천연 및 메탄올차량 개발, 전기 및 수소자동차개발과 청정연료 사용 등에 의해서 할 수 있다. VOCs배출 방지기술로써는 소각, 열소각, 촉매소각, 불꽃 연소법, 흡착, 흡수, 응축, 생물여상 등이 있다^{3,5,6)}. 본 연구는 Bio필터 공장에서 건조한 상태와 습한상태의 운전조건에 따른 톨루엔 가스의 처리효율 및 필터재질의 특성과 영향 인자를 규명하고자 함이 주 목적이다.

II. 실험재료 및 실험방법

1. 필터의 재질

Bio-필터공정에 사용되는 재료는 자연부식토, 이탄재, 활성탄, 호기성처리된 폐기물, 나무톱밥, 어패류 껍질 등이 널리 사용된다. VOCs 가스를 제거하기 위한 재질의 특성은 높은 미생물의 균체밀도, 최적조건외의 함수율, 미생물 적용에 적당한 물질, 가벼운 필터저항, 좋은 흡수성, 저렴한 가격 등의 조건을 만족해야된다. 이러한 특성의 성질을 가진 필터재질은 폐기혼합물, 이탄재, 활성탄, 등이다⁷⁾.

Table 1. Physical properties of activated carbon

Particle size(mesh)	Shape	Real Density g/cm ³	Packed Density g/cm ³	Specific Surface m ² /g	Total Pore Volume cm ³ /g	Average Pore Radius (A)	Packed mass(g)
40-65	Granular	0.4-0.65	0.52-0.54	650-1450	0.45-1.0	10-25	3620-3650

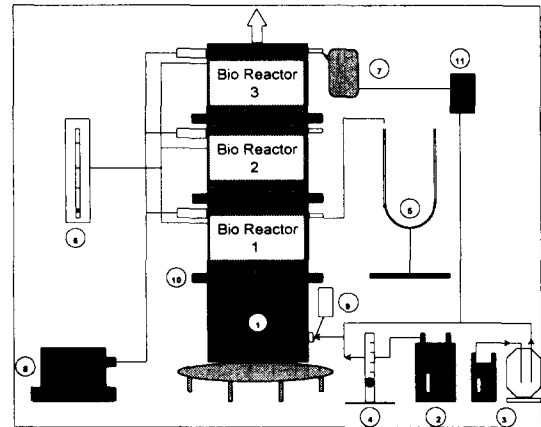
Bio필터의 충전재질로서 실험한 재료는 Table 1.에 나타낸 물리학적 특성을 가진 활성탄을 사용하였다. 시료의 조제는 35℃의 향량 조건에서 건조한 후 표준체를 이용하여 분류한 40~65 mesh 크기의 활성탄 입자를 물에 세척한 후에 110℃에서 건조하여 사용하였다. 장치내의 흐름관계나 체류시간은 필터재질의 수분함량, 입자크기, 충전밀도, 필터재질의 구조적 변화의 특성에 영향을 미친다. 필터장치를 사용하기 전에 이와같은 재료의 특성을 충분히 관찰하여 적절하게 선별되어졌다.

산업공정에 이들의 재질을 사용하기 위해서는 흐름저항관계에 따라 충전제의 분포밀도, 함수율을 적절히 조절하여 적용 할 수 있다. 수분량의 측정에는 표준체로 분류한 활성탄을 건조한후 장치에 충전한 량 m_p 와 수분을 포함한 전체량 $m_p + m_n$ 의 관계에 따라 계산되어진다. 전체량 $m_p + m_n$ 에서 수분량을 계산하기 위해서 dry oven에서 105℃로 향량이 될 때까지 건조한 후 데시케이터에서 방냉시켜 측정하였다. 충전제의 진밀도 ρ_p 는 필터재질인 활성탄을 건조 한후에 Picnometer 법에 의해 측정하였으며 칼럼의 충전밀도 ρ_s 는 실험장치에 충전한 재료의 질량과 칼럼의 용적비와의 관계에 따라 계산되었다. 또 각 실험마다 동일한 운전상태가 유지되도록 유의하였다.

실제적으로 필터공정에 적용된 재료의 구조적 안전성과 표면적의 변화와 흐름의 저항력은 함수율과 함께 공극율에 큰 영향을 미친다. 공극율 ϵ 는 전체체적 V 와 빈공간의 체적 V_{II} 으로 계산할 수 있다. 본 연구에서 사용된 활성탄의 공극율을 측정하기 위해 50ml, 100ml, 250ml 비이커에 활성탄을 충전한 후의 질량 $m_{k,s}$ 와 빈공간에 충전된 물량 $m_{f,s}$ 를 각각 10번 측정한 결과로 계산되었다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 전체높이가 1.5m, 직경이 11.5cm, 충전층의 높이는 25cm로 3단으로 설치되었다. Bio필터의 Reactor 재질은 stainless-steel을 사용하였다. 물은 분사노즐을 통해서 공급하였고, 온도는 반응조에 전자식온도조절장치를 부착하여 조절하였다. 실험장치는 Fig. 1.에 나타내었다.



1. Bio-Reactor 2. Air Supplier 3. Gas Generator
4. Flow Meter 5. U type manometer
6. Temperature Controller
7. Sampling Port (tedlar bag) 8. Water Pump
9. Gas detector tube 10. Supporting Plate
11. Gas Chromatography

Fig. 1. Schematic diagram of the biofilter unit

실험에 사용된 톨루엔 가스는 가스발생 장치에 톨루엔(日本 Junsei 社. 제품의 특급시약)을 유리용기에 넣고 공기를 주입하여 발생시켰다. 공기는 탄소필터에 통과시켜 수분과 불순물을 제거하여 장치에 공급하였다. 운전조건중 온도는 전자식온도조절기를 통하여 25℃~35℃ 범위로 일정하게 조절하였다. 먼저 건조한 필터층에 톨루엔 가스가 흡착되는 관계를 실험하였고, 필터재질에 수분이 함유된 운전조건에서 흡수과정에 따라 제거되는 량을 실험하여 비교하였다. 수분이 함유된 필터의 조건에서 20일 동안 연속적으로 운전한 후 미생물 활성도가 감소하는 지점에서 영양물질인 KH_2PO_4 를 주입시켜 줌으로써, 미생물의 활성도의 증가에 따른 제거율을 측정하여 비교하였다. 필터재질의 공극율이 일정한 조건에서 함수율의 변화는 0~27.5%까지 변화시켜 실험하였고, 톨루엔 유입농도의 변화는 일정한 공기공급의 조건에서 890~1200 ppm 범위가 되도록 하였다. 그리고 연속적인 운전조건에서는 유입농도가 평균 970 ppm이 되도록 일정하게 공급하였다. 가스농도의 측정은 유입과 유출 가스를 tedlar bag에 포집하여 검지관을 통해서 농도를 정성분석하였고, FID검출기와 길이 30 cm, 내경

0.53 mm인 HP-INNOWAX Capillary칼럼이 장착된 HP-6890 G.C.를 이용하여 정량분석하여 비교하였다. Carrier gas는 수소를 사용하였고, 100°C의 oven온도에서 등은 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 필터층의 저항관계

Bio필터장치내에서 흐름관계는 Hagen-Poiseuille 모델관계에서 보면 압력손실의 값은 흐름속도, 필터층의 높이에 비례적으로 증가하고, 필터재질의 입자크기에는 반비례한다⁷⁾. 본 연구 실험에서 재질의 특성을 연구하기 위해서 재질의 공극율 $\epsilon = 0.46$, 충전량, $m_p = 3620-3650$, 가스공급량 $Q = 12.5$ l/min의 운전조건에서 압력손실은 필터층에 함유한 수분량과 충전높이에 큰 영향을 미쳤다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 필터층내에 수분량의 증가에 따라 압력손실은 높게 나타났고, 이들의 압력손실이 큰 이유는 수분량이 증가할수록 필터층의 공극에 수분이 충전되므로써, channeling의 발생을 방해하게 되므로 더욱 압력손실이 증가하게 된다. Hagen-Poiseuille모델을 적용한 관계식을 이용해서 실험된 값을 직선 Regression 관계로 나타내면 필터층의 충전고에 따른 압력손실 변화를 효과적으로 추측할 수 있다.

Bio필터장치내의 압력손실은 Hagen-Poiseuille 모델의 관계식을 적용하면 공급되는 부하량과 속

도에 비례적으로 영향을 미친다^{7,8)}. 압력손실은 입구와 출구를 비롯하여 각 단마다 U자형마노메타를 이용하여 측정하였다. 여기에서 충전밀도, 충전량, 공극율, 함수율의 조건이 일정한 상태에서 실험결과 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 가스부하량의 증가에 따라 비례적으로 증가하였고, Fig. 3의 결과에서 충전높이에 따라 압력손실의 값이 증가함을 볼 수 있다. 압력손실과 가스부하량의 관계를 Hagen-Poiseuille모델을 적용하여 실험된 값을 직선 Regression 관계로 나타내면 가스부하량과 압력손실관계는 비례적임을 증명할 수 있다.

Bio필터공정에 사용되는 충전제는 유기성물질이 다양한 재질이 사용되어지고, 이들의 재료는 미생물학적 활성도가 높기 때문에 악취물질이나 가스상 물질을 제거하기 위해서 효과적으로 사용된다. 필터재료는 이론적으로 생물학적 활성도가 풍부한 물질을 사용하는 것이 가스 분해율이 좋으며, 이들의 충전제내에 미생물이 적용되어지기 위한 조건은 적절한 수분량, 온도, pH값이다⁹⁾.

필터층 내에 공급되는 가스물질은 일정한 체류시간을 가져야 하며, 이 체류시간은 기본적으로 충전제의 입자크기와 공극율에 따라 결정된다. 다양한 충전물의 재질 종류에 따라 공극의 크기가 다르고, 공극율에 따라 수분을 함유할 수 있는 한계는 다양하며, 생물학적 활성이 풍부하고, 가능한 최소의 압력손실을 유지하는 함수율 범위인 25% 정도에서 실험이 실행되었다⁷⁾.

본 연구의 실험결과는 건조상태의 운전조건에

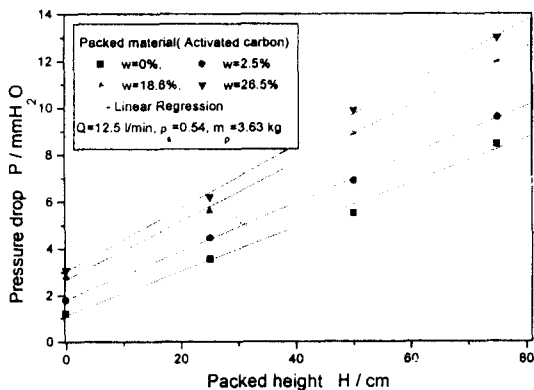


Fig. 2. Variation of pressure drop with packed height

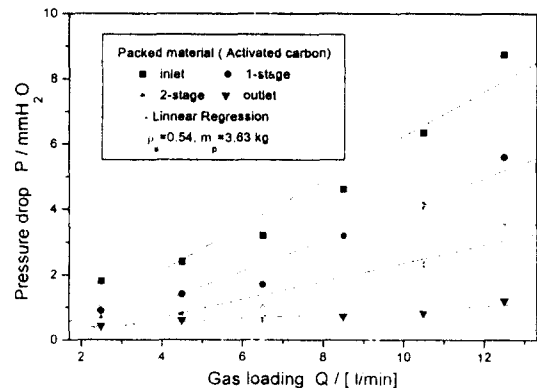


Fig. 3. Variation of pressure drop with gas loading rate

서 충전밀도 ρ_s 는 0.54, 충전량 m_p 는 3.63 kg /m³, 공극율 ϵ 는 0.46의 일정한 조건과 공기량 Q가 12.5 l/min로 공급되어졌을 때 유출부의 $\Delta P = 8.25/\text{mmH}_2\text{O}$ 이고, 필터재질의 수분함량이 27.5%일때 유출부의 $\Delta P = 13.25/\text{mmH}_2\text{O}$ 로 나타났다. 그리고 건조상태의 운전조건에서 유입부의 $\Delta P = 1.25/\text{mmH}_2\text{O}$ 이고, 수분함량이 27.5%인 운전조건에서 유출부의 $\Delta P = 2.25/\text{mmH}_2\text{O}$ 로 나타났다.

본 연구결과에서 필터층에 수분함량이 증가할 수록 압력손실은 증가되었다. 특히 압력손실은 공극율에 영향을 미치는데 수분량이 증가할수록 필터표면적에 가스가 통과할 수 있는 channeling 현상이 감소되므로 압력손실은 감소됨을 추측할 수 있다. Fig. 4.의 결과를 보면 수분량이 증가할수록 필터층내에 미치는 압력손실은 비례적으로 증가하였다.

2. Bio필터층의 건조상태 운전조건

건조상태의 Bio필터공정에서 흡착과정의 특성에 의해 톨루엔 가스가 제거되어진다. 이 공정에서는 장시간 걸쳐 가스상이 고체표면에 접촉하고, 가스상의 특정성분이 고체표면에 접촉되어져 가스상 내부의 농도가 다른 상태로 반응하게된다. 이때 가스상의 농도와 고체표면 농도의 관계가 양상의 화학 포텐셜이 알맞은 단계에서 흡착평형관계로 유지하게 된다. 가스를 흡착체에 투과시키면 처음에는 흡착율이 매우 높으나 투과시간이 진행

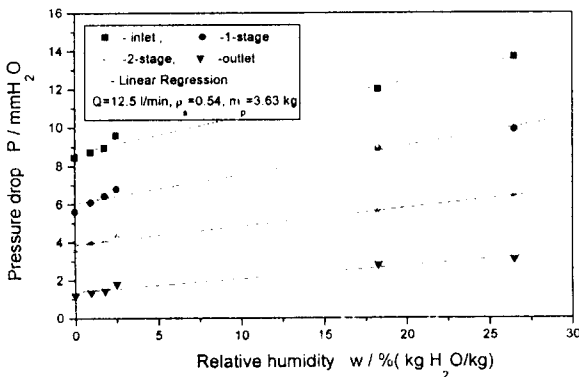


Fig. 4. Variation of pressure drop with moisture content in packing material

될수록 흡착율이 떨어져 흡착체가 보지점에 달하면 가스의 농도가 서서히 증가하는 점인 흡착의 파괴점(breakthrough point)을 기점으로 다시 포화점까지 농도는 증가된다^{10,11)}.

Fig. 5.의 결과에서 필터층의 높이의 증가에 따라 파괴점에 도달하는 시간을 보면 충전층이 25cm의 높이에서는 대략 12day⁻¹, 충전층의 높이가 50cm인 경우 27.5day⁻¹, 충전층의 높이가 75cm인 경우에서는 43day⁻¹로 나타났다.

실험을 시행한 후에 각 평형점이 유지되는 기간은 1단에서는 8시간에서 11일, 2단에서는 8시간에서 26day⁻¹, 3단에서는 8시간에서 39day⁻¹까지 평형상태를 유지했다.

평형점을 유지하는 운전기간 동안 톨루엔의 제거율은 거의 94%~99% 범위내에서 유지되다가, 파괴점을 지나면서 94%에서 마지막 운전기간인 60day⁻¹에서 거의 30%까지 감소되었다. 이 결과로 볼 때 건조상태의 운전조건에서는 흡착의 특성에 따라 기질의 분해가 진행되므로 장치내의 흡착제 재질의 종류, 공극율, 온도조건, 충전량에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 함수율을 가진 Bio필터의 운전조건

실제 필터층에서 가스가 제거되는 과정은 필터재질의 여러 가지 특성에 따라서 기질의 분해과정이 다양하게 실행되어진다. 필터층내에 함수율을 포함하고 있는 경우에는 필터층의 공극내에 수분이 탈착하므로써, 가스제거는 흡착실행이 진행된

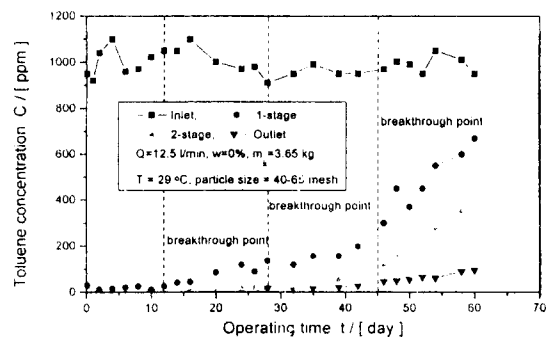


Fig. 5. Removal of toluene during dry operating condition

후에 함유된 수분에 가스가 접촉하여 흡수나 내부 확산 과정이 실행되어진다⁷⁾.

수분을 함유한 필터의 재질에서는 각 단의 필터층에 함유된 수분에 의해서 Fig. 5.의 결과에서 파과점이 나타나는 운전기간중 흡수와 내부확산과정이 일어나므로써 기질의 분해가 더 빠르게 진행되어 운전기간이 50day⁻¹에서 53day⁻¹까지 제거율이 일정한 상태로 증가되었다.

톨루엔의 특성은 24시간 동안은 물에서 안정한 상태를 유지하나, 24시간이 지나면 물에 포화되어진다. 이들의 특성이 장시간의 운전조건에서는 큰 영향을 미치지 않았고, 수분이 공급된 운전조건에서는 제거율이 증가되었다. 그리고 50day⁻¹ 이후의 운전기간 중 필터층의 파과점과 필터층에 함유된 수분에 가스가 접촉하여 흡수나 내부확산이 도달되는점이 포화상태로 되어 다시 제거율이 감소되었다. 이 결과에서 필터층의 특성적인 조건에 있어서 건조상태의 조건보다는 일정하게 물이 공급되는 조건에서는 톨루엔의 제거가 효과적으로 실행되었다.

4. Bio필터층의 기질 분해효소를 첨가한 운전조건

필터층에서 일정한 공기량 공급조건에서 수분을 함유한 경우에는 기질의 분해는 흡착이 실행된 뒤에 흡수와 내부확산이 일어나고, 미생물이 적응할 수 있는 조건이 되면 시간의 경과에 따라 톨루엔과 반응할 수 있는 미생물이 가스와 반응하여 재생이 일어나게 된다¹²⁾. 이 과정에서 미생물재생

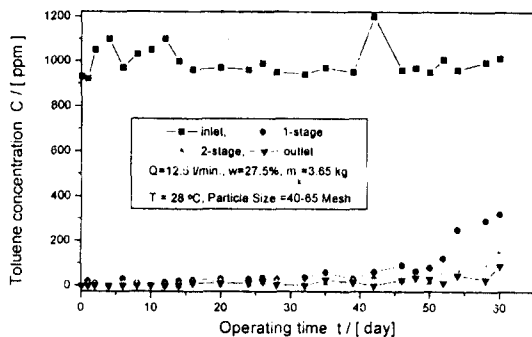


Fig. 6. Removal of toluene according to moisture content

을 위한 활성도를 증가시키기 위해서 기질의 분해효소인 영양물질을 첨가하면 반응이 더욱 진행되고¹³⁾, 톨루엔 가스는 효과적으로 분해된다. 미생물 재생과정은 액체필립막과 필터층 공급내의 전이가스 흐름에 의한 물질의 흡수과정과 필터층의 미생물에 의한 흡수물질이 생물학적으로 결합하여 기질이 분해되어진다¹⁴⁾.

본 연구에서는 기질의 분해를 증가시키기 위해서 흡수율을 25.7%로 공급하였고, 장치내에 공급되는 물속에 분해효소인 영양물질 KH₂PO₄를 14.5 g/l 농도로 주입하였다. Fig. 7.에 나타낸 결과에서 필터층에 수분만 함유한 것과 비교하면 수분에 KH₂PO₄를 첨가한 경우 기질의 분해율은 각단에 따라 큰 영향을 미치지 않았고, 기질의 분해가 포화되는 마지막 운전기간인 50-60day⁻¹ 사이에서도 톨루엔의 분해율이 높았다. 이 결과에서 톨루엔 제거율은 운전기간이 33day⁻¹까지 각단이 모두 제거율이 97% 이상이었다. 운전기간이 60day⁻¹을 경과했을 때 건조한 필터층 조건에서는 제거율이 30%로 감소되었으나 84.5%의 증가된 제거율을 나타냈다.

IV. 결 론

Bio필터공정을 이용하여 VOCs의 일종인 톨루엔 가스를 처리한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 건조한 필터층 조건에서 톨루엔 가스의 제거는 흡착의 특성으로 진행되었고, 유입부에서 주입된 공기량은 12.5 l/min이고, 공급된 톨루엔 가

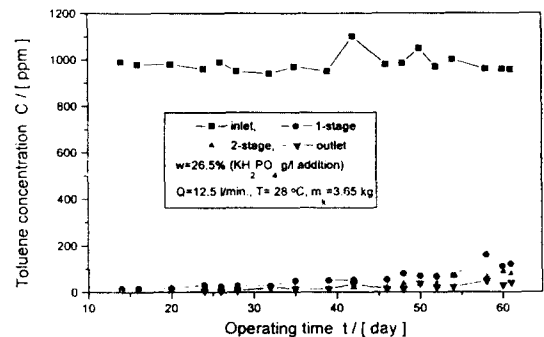


Fig. 7. Removal of toluene according to nutrient addition

- 스의 농도가 970 ppm일 때 유출부에서 측정된 결과 30day⁻¹까지는 평형상태를 유지하면서 제거율이 85%로 나타났고, 운전시간이 증가할수록 제거율이 감소되었다.
2. 필터층의 수분량이 평균 27.5%를 함유한 경우의 운전조건에서 필터재질의 공극내에 충전된 물이 필름막을 형성하여, 흡수와 내부확산이 진행되어졌다. 유입 톨루엔 가스농도가 평균 955ppm 일 때 건조한 필터층 운전조건과 결과와 비교하면 1단과 2단에서 필터흡착의 평형점을 벗어나는 지점에서 제거율이 감소되었지만, 이들의 조건에서 1단과 2단은 각각 10 day⁻¹과 30 day⁻¹ 운전기간이 경과되는 지점에서도 제거율이 일정하게 유지되었다.
 3. 필터층에 수분만 함유한 경우에는 40day⁻¹ 이상이 경과된 운전기간에서 톨루엔 가스 분해가 포화상태로 제거율이 감소하였지만, 기질의 생물학적 반응을 증가시키기 위해서 KH₂PO₄를 14.5g/l를 첨가하였을 때 생물학적으로 활성도가 증가되어 운전기간이 60day⁻¹ 이상이 경과된 지점에서도 각각 1단과 2단에서 90% 이상의 제거율을 나타냈고, 유출부에서 97% 이상의 제거효율을 보였다.

참 고 문 헌

1. A. J Haagen-Smit, C. E. Bradley, and M. M. Fox, :Ind. Eng Chem., Vol. 45, 2086-2096, 1953.
2. 한화진 : 대기오염물질 VOC대책 I Journal of Environmental Hi-Technology 1-29, 제4권 6호, 1996.
3. 한화진 : 대기오염물질 VOC대책 II Journal of Environmental Hi-Technology 2-29, 제5권 7호, 1997.
4. 한국대기보전학회 측정분석분과회 : 대기환경과 휘발성유기화합물질, 1-43, 5, 1998.
5. 한화진 외 : VOCs방지기술 현황 및 적용사례, 한국환경정책 평가연구원, 6-114, 1997.
6. 한양대학교 환경 및 산업의학연구소 : 휘발성유기화합물질 규제대상 설정 및 관리방안에 관한 연구, 환경부 최종보고서, 128-142, 1997.
7. M.H. Pahl, 하상안, 임경택 : 생물학적 대기오염제어공학, 지구문화사, 53-148, 1997.
8. C. Carman : Flow of gases through porous media, London, buterworths scientific publication, 1956.
9. A. J. Dragt, D.M. Zuidam and S.P Ottengraf : Biofiltration, A new Technology in air pollution control, Basel, 1985.
10. M. Suzuki : Adsorption Engineering, Kodan-sha-Elsevir, 1990.
11. 박영태 : 활성탄 기초와 이론, 동화기술, 1996.
12. K. Kirchner, G. Haug and H.J. Rehm : Exhaust gas purification using immobilized monocultures App., Microbiology and Biotechnology, Vol.26, 579-587, 1987.
13. S. P. Ottengraf, A. H. C. Van den Oever : Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biofilter, Biotechnology and Bioengineering, Vol.25, 3089-3102, 1983.
14. H. M. Tang, S. J. Hwang and S. C. Hwang : Waste gas treatment in biofilter, air & waste management association, vol. 46, 1996.