

퇴비 및 규산칼슘계 다공성 바이오필터의 벤젠휘발가스 처리

김순아* · 남궁완** · 박준석[†] · 박영구 · 이노섭**

국립환경연구원, *건국대학교 환경공학과, **삼척대학교 환경공학과
(2004년 11월 15일 접수 ; 2005년 1월 14일 채택)

Treatment of Benzene Vapor Gas with Compost and Calcium Silicate Porous Biofilters

SuNa Kim* · Wan Namkoong** · Joon-Seok Park[†] · Young-Goo Park · Noh-Sup Lee**

Dept. of Env. Eng., Samcheok National University, Samcheok 245-711, Korea

**National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea*

***Dept. of Env. Eng., Konkuk University, Seoul 143-701, Korea*

(Received November 15, 2004 ; Accepted January 14, 2005)

Abstract : This study was conducted to evaluate the biofiltration treatment characteristic for benzene vapor gas. Compost and calcium silicate porous material were used as biofilter fillers. Gas velocity and empty bed retention time were 15 m/hr and 4 min, respectively. Benzene gas removal efficiency of P-Bio (calcium silicate porous material with inoculation) was the highest and maintained in over 98%. After shock input of benzene gas, the removal efficiency of P-Bio biofilter was recovered within 2 days, while 5 days were taken in CP-Bio (compost + calcium silicate porous material mixture with inoculation) and CP (compost + calcium silicate porous material mixture without inoculation) biofilters. The removal efficiency of P-Bio biofilter was near 100% in the loading rate of $85 \text{ g/m}^3\text{(filling material)/hr}$. It was shown that the maximum elimination capacities of P-Bio, CP-Bio, and CP biofilters were 95, 69, and 66 $\text{g/m}^3\text{(filling material)/hr}</math>, respectively. Microbial number of P-Bio, which the number was the lowest at start-up, was 3 orders increased on operational day 48. CO_2 was generated greatly in order of P-Bio, CP-Bio, and CP biofilters.$

Keywords : biofiltration, compost, calcium silicate porous material, benzene vapor gas.

1. 서론

국내에서 가장 많은 양의 VOC (volatile organic compounds)를 배출하는 오염원은 자동차 배기가스(45%)와 도장 및 인쇄 산업분야

(40.4%)이며, VOC 배출량은 지속적인 증가추세로 2005년에는 1994년의 약 2배 가량 증가할 것으로 추정하고 있다[1]. VOC 중에서 벤젠은 주로 석유정제 과정을 통해 생산되며 휘발류의 옥탄가를 증가시키기 위한 첨가제와 합성고무, 합성수지, 도료, 의약품, 추출용제, 페인트, 래커, 합성세제 원료 등에 이용된다. 현재 국내 도장

[†] 주저자 (e-mail : wan5155@samcheok.ac.kr)

시설에서의 도로사용은 불가피하며 필름형성체를 용해하여 도장할 때 건조속도를 조절하여 작업성을 좋게 하거나 또는 도막에 유동성을 주기 위한 목적으로 벤젠과 같은 유기용제가 쓰이고 있다[2]. BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene) 화합물 중에서도 벤젠은 가장 독성이 강하여 사람이 고농도의 벤젠에 단기간이라도 노출될 경우에 흥분, 구토, 두통, 졸음, 혼수상태 등을 유발하며 심할 경우에는 사망에 이르게도 한다. 벤젠은 휘발성이 강하기 때문에 수증기나 토양보다는 공기 중에 많이 분포하고 있다. 벤젠은 산업체 작업장 실내공기 중에서도 많이 검출되고 있으며, 벤젠 오염도양의 SVE (soil vapor extraction) 정화 시에도 발생된다. 벤젠은 작업자가 1일 8시간으로 1주일에 40시간을 근무하면서 매일 반복적으로 노출되어도 건강에 지장을 초래하지 않는 농도인 TLV-TWA (threshold limit value - time weighted average)가 15 mg/m^3 으로 낮으며[3], 사람이 2,000 ppm에 노출될 경우에는 생명이나 건강에 치명적 위험을 유발시킨다[4]. 그러므로 벤젠을 많이 사용하는 공정에서는 작업자의 건강을 보호하기 위하여 벤젠 농도의 규제 및 처리방법을 강구하여야 한다. 또한 SVE가 적용된 벤젠 오염토양에서도 토양에서 추출한 벤젠 휘발가스는 적절 처리 후 대기 중으로 방출하여야 한다.

벤젠과 같은 VOC 가스를 처리하기 위한 방법으로는 활성탄 흡착이나 소각과 같은 물리화학적 또는 열적 처리방법이 있으며, 활성탄 흡착은 폐활성탄의 처리문제가 발생하고 소각은 비용이 고가여서 저농도로 발생하는 오염가스를 처리하기에는 경제적으로 매우 불리하다. 그러므로 최근에는 바이오필터와 같은 생물학적 처리방법이 많이 시도되고 있으나, 바이오필터는 오염물질과 충전물질의 특성 그리고 운전조건에 따라 제거효율이 많이 변화하게 된다. 이러한 현실에서, 본 연구는 퇴비 및 규산칼슘계 다공성 재료를 충전물질로 사용하여 바이오필터로 처리하였을 때 충전물질의 벤젠가스 제거특성을 평가하기 위하여 실시하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

연구에 사용된 실험장치는 벤젠용액 저장조, 감압펌프(GAST Vacuum Pumps, DOAP104AA, USA), 습윤장치, 그리고 바이오필터 반응기로 구성되어 있다(Fig. 1). 바이오필터 반응기는 내경 5 cm, 높이 25 cm의 투명아크릴을 4개 연결하여 총 100 cm 높이로 하였으며, 충전(filling)물질의 시료채취를 위하여 해체가 가능하도록 하였다. 바이오필터 충전물질로는 난지도 퇴비화시설에서 생산된 퇴비와 인공제조된 규산칼슘계 다공성 재료를 사용하였다. 퇴비는 2개월 간 숙성된 것으로 충전물질로 사용하기 전에 2 mm 체로 거름하여 통과한 것만을 사용하였다. 퇴비의 휘발성고형물(VS)과 총유기탄소(TOC)는 각각 67%와 41%였으며, C/N 비는 약 12이었다(Table 1). 충전물질의 수분함량은 수분보유능력(water holding capacity)의 약 60~80%로 조절하였다. 규산칼슘계 다공성 재료는 다음과 같이 제조하였다. 0.3%(질량기준)의 식물성 기포제를 40%의 물과 혼합하여 기포발생 교반기에서 3-8 m/sec의 선속도로 1차 교반한 후, 응결시간이 20-40분으로 조절된 시멘트 23%, 생석회 2%, 규산질 원료 25%, 석고 4%와 제올라이트와 펄프(또는 녹말)를 첨가한 후 2차 교반하였다. 이를 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 24시간 습공 경화하여 그린케이크를 제조하고 180°C , 10기압에서 양생하였다. 규산칼슘계 다공성 재료의 기공률은 약 78%이며, 물리화학적 특성을 Table 2에 나타내었다. 미생물접종은 난지도 하수처리장에서 발생된 활성슬러지를 2일간 공복시킨 후 4시간 동안 자연침강시키고 침강된 농축액을 충전물질과 혼합하였다. 첨가된 슬러지의 MLSS (mixed liquor suspended solids)는 11,058 mg/L이었다.

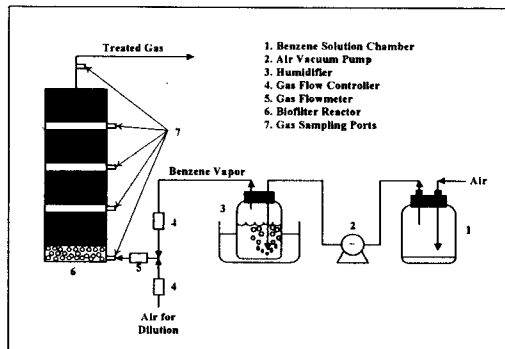


Fig. 1. Schematic of biofiltration system.

Table 1. Characteristics of Compost

Bulk density (kg/m ³)	229.0	
Moisture content (%)	20.5	
Field capacity (%)	69.5	
Electrical conductivity (mmhos/cm)	4.7	
Cation exchange capacity (meq/100g, dry basis)	49.6	
pH	8.8	
VS (%)	69.5	
TOC (%)	41.9	
TKN (%)	1.6	
Heavy metals (mg/kg)	Pb	139.7
	Zn	168.5
	Cu	70.3
	Ni	Not Detected
	Cr	38.0
	Cd	13.3

Table 2. Characteristics of Calcium Silicate Porous Media

Item	Value
Porosity (%)	78
Average porous size (μm)	17
Compressive strength (kg/cm ²)	40
Bulk density (g/cm ³)	0.42-0.53
Major component	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO

2.2. 운전방법

벤젠용액 저장조에 감압펌프를 연결하여 가동시킨 후 휘발되는 벤젠가스를 유량조절기로 대기공기와 혼합한 후 처리에 적합한 적정 농도로 희석시켜서 반응기에 유입시켰다(Fig. 1). 건조 가스 유입시 충전물질의 수분이 손실되는 것을 방지하기 위하여 가스유입 전에 습윤기(humidifier)를 통과시켜 상대습도를 98% 이상으로 유지하였다. 수분을 포화시킨 후 적정 농도로 조절된 휘발가스는 상향류식(upflow mode)으로 반응기에 주입시켰다. 본 연구의 실

험조건을 Table 3에 나타내었다. CP-Bio와 CP는 퇴비와 다공성 세라믹을 부피비로 1 : 1 혼합하여 충전한 것이며, CP-Bio에는 하수처리장 슬러지로 미생물 접종을 하였다. P-Bio는 규산칼슘계 다공성 재료만을 충전하여 동일한 슬러지로 미생물 접종을 하였다. 규산칼슘계 다공성 재료의 pH는 모두 8.2 이상을 나타내었다. 세 반응기 모두 가스유입속도는 15 m/hr로 하였으며, 이를 체류시간(empty bed retention time)으로 환산하면 4분이 된다.

2.3. 분석방법

벤젠가스는 핸드샘플러(handy sampler)로 흡인하여 활성탄칼럼(Cat. No. 226-01, SKC Inc., Valley View Road, Pennsylvania)에 흡착시켰다[5]. 시료흡착 후 활성탄을 분리하여 바이알에 넣은 다음 methylene chloride 1 mL를 넣어 30분간 방치하여 벤젠 성분을 탈착하였다. 탈착용매는 불꽃이온화검출기가 장착된 가스크로마토그래피(Hewlett Packard 5890 II, USA)로 분석하였다. 벤젠 표준용액은 본 실험에 사용된 재료와 동일한 벤젠을 이용하여 무게비로 조제하였다. 충전물질의 pH와 함수율은 폐기물공정 시험방법에 따라 분석하였다. 생물학적 반응에 의하여 생성된 이산화탄소는 4N NaOH 25 mL이 들어 있는 포집병을 통과시켜 포집한 후 분석하였다[6]. 먼저 이산화탄소 포집액에 3N BaCl₂를 1 mL정도 첨가하여 BaCO₃로 흰색침전이 생기도록 하였다. 여기에 페놀프탈레인 지시약을 3-4방울 첨가한 후 1N HCl로 적정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제거효율

반응기는 충전물질 조건별로 모두 3개를 운전하였으며(Table 3 참조), 운전시간에 따른 벤젠가스의 유입농도와 유출농도, 그리고 제거효율을 각각 Fig. 2와 3에 나타내었다. 운전초기부터 약 20일 동안 벤젠가스 농도는 약 2,000 mg/m³으로 주입하였으며, 22일 경에는 벤젠가스 농도를 5배가량 증가시켜 충격부하를 주었다(Fig. 2). 가스의 유입선속도와 체류시간은 모두 15 m/hr와 4분으로 동일하게 유지하였다. 벤젠가스 주입 직후부터 벤젠가스의 제거효율은 초기 30%에서 90% 이상까지 증가하였다(Fig. 3).

Table 3. Experimental Conditions for This Study

Column	Media	pH	Gas velocity (m/hr)	EBRT (min)	Microbial inoculation
CP-Bio	Compost + Porous ceramic (1 : 1, vol. basis)	8.62	15	4	Yes
CP	Compost + Porous ceramic (1 : 1, vol. basis)	8.23	15	4	No
P-Bio	Porous ceramic	8.92	15	4	Yes

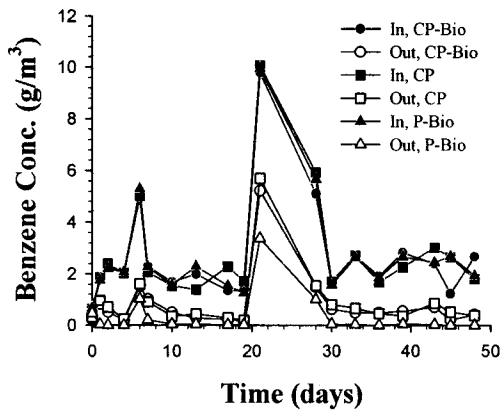


Fig. 2. Benzene gas concentrations in biofilter reactors with time.

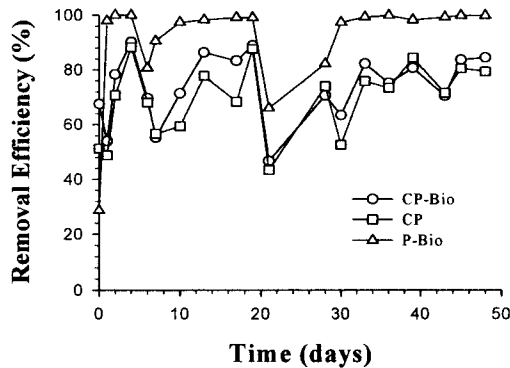


Fig. 3. Removal efficiencies of benzene gas in biofilter reactors with time.

특히 규산칼슘계 다공성 재료에 미생물을 접종한 경우(P-Bio)의 제거효율은 1일 이후부터 98% 이상으로 높게 나타내었으며, 농도가 높았던 5일차와 21일차를 제외하고는 안정한 제거효

율을 보였다. 초기보다 농도를 약 5배 가량 증가시켜 10,000 mg/m³으로 주입한 21일 차에도 제거효율이 60% 이상을 나타내었으며, 이후 유입농도를 감소시키자 제거효율이 다시 상승하여 안정한 상태를 보였다. 충격부하 직후 농도를 감소시키면서 제거효율의 빠른 회복을 나타내었으므로, 미생물이 접종된 규산칼슘계 다공성 제재는 충격부하에 대한 완충능력이 큰 것으로 판단된다.

퇴비와 규산칼슘계 다공성 재료를 1 : 1 (부피비)로 혼합하여 미생물을 접종한 CP-Bio와 접종하지 않은 CP에서는 5일이 지나서야 제거효율이 약 90%에 도달하였다. 특히 미생물을 접종하지 않은 CP의 경우 전반적으로 CP-Bio보다 낮은 제거효율을 나타내고 있었다. CP-Bio와 CP는 미생물을 접종한 세라믹 바이오필터(P-Bio)가 98% 이상의 제거효율을 나타낸 것과 비교하면 약 10% 정도의 효율차이가 있었다. 또한 22일차에 고농도(10,000 mg/m³)를 주입한 후 제거효율이 회복되는데 소요되는 기간도 CP-Bio와 CP가 P-Bio보다 3일 정도 더 길게 소요되었다. 또한 P-Bio는 안정화 단계에서의 벤젠가스 제거효율이 거의 일정하게 유지된 반면에 CP-Bio와 CP는 약 10% 이상의 변동(fluctuation)이 발생하였다. 이로써 미생물을 접종한 규산칼슘계 다공성 재료(P-Bio)가 퇴비와 혼합하여 미생물을 접종한 CP-Bio나 미생물을 접종하지 않은 CP 보다 벤젠휘발가스 처리에 더 효과적이었다. 다른 연구자들의 결과를 살펴보면 충전물질로는 주로 퇴비와 GAC (granular activated carbon)를 사용하였으며, 벤젠가스 유입농도는 0.01-0.70 mg/m³이었다 (Table 4)[7-10]. 이러한 조건에서 평균 제거효율은 80-96% 정도를 나타내었다.

Table 4. Biofiltration Characteristics for Benzene from Literature

Filter media	Inlet conc. (g/m ³)	Loading rate (g/m ³ /hr)	Average removal Rate (%)	Elimination capacity (g/m ³ /hr)	Remark
Compost	0.05-0.63	3.1-55.9	NA ^{a)}	NA	[7]
GAC	0.11-0.70	NA	96	78	[8]
Sugarcane bagasse	0.01-0.05	0.2-7.8	80	7.6	[9]
Compost + GAC	0.26	3.0-25.0	90	9	[10]

^{a)}NA = Not Available

3.2. 최대제거능력

충전물질 단위용적당 부하되는 벤젠의 질량과 제거효율과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 가장 제거효율이 높았던 미생물을 집중한 P-Bio에서는 약 85 g/m³(충전물질)/hr까지는 100%에 가까운 제거효율을 나타내었다. 그러나 이 이상의 부하량에서는 제거효율이 점차 감소하기 시작하여 약 150 g/m³(충전물질)/hr에서는 80% 미만으로 저하하였다. 퇴비와 규산칼슘계 다공성 재료를 혼합한 후 미생물을 집중한 CP-Bio에서는 40 g/m³(충전물질)/hr 이하의 부하량에서도 제거효율이 50-90%까지 안정적이지 못하였으며, 퇴비와 규산칼슘계 다공성 재료를 혼합한 후 미생물을 집중하지 않은 CP 반응기에서도 유사한 결과를 나타내었다. 이로써 98% 이상의 안정적인 제거효율을 얻기 위해서는 규산칼슘계 다공성 재료를 충전물질로 하여 벤젠휘발가스 부하량을 약 85 g/m³(충전물질)/hr 미만으로 하여 주입하여야 함을 알 수 있었다.

유입부하량과 제거능력과의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 제거효율이 가장 우수하였던 P-Bio에서는 주입부하량이 150 g/m³(충전물질)/hr 일 때 95 g/m³(충전물질)/hr의 최대제거능력을 나타내었다. P-Bio에서는 최대제거능력이 95 g/m³(충전물질)/hr인 것으로 나타났으며, CP-Bio와 CP에서는 각각 69와 66 g/m³(충전물질)/hr이었다. 미생물을 집중한 규산칼슘계 다공성 제재인 P-Bio가 퇴비와 혼합한 CP-Bio와 CP 보다 벤젠휘발가스 최대제거능력에서도 약 30 g/m³(충전물질)/hr 정도 높았다. Martin 등 (1996)을 비롯한 다른 연구자들은 벤젠휘발가스를 처리하기 위하여 부하량을 0.2-55.9 g/m³(충

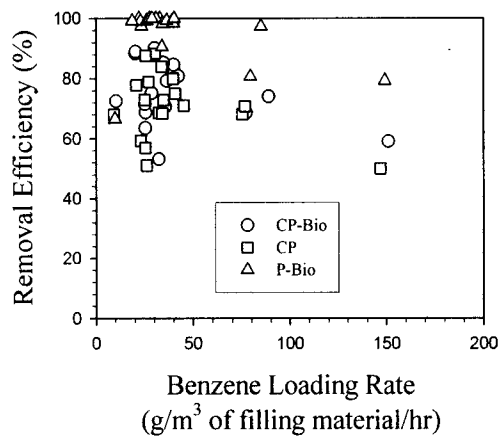


Fig. 4. Relationship between benzene loading rate and removal efficiency.

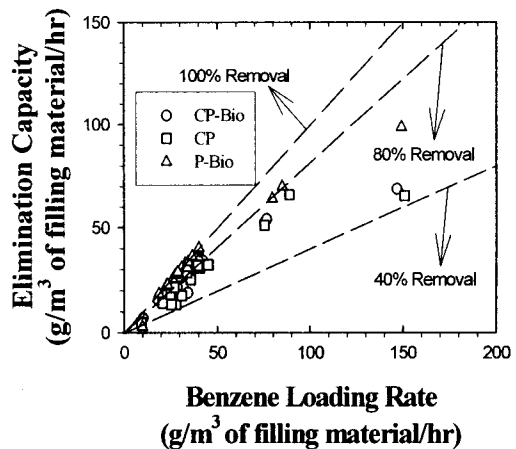


Fig. 5. Relationship between benzene loading rate and elimination capacity.

전물질)/hr까지 다양한 범위로 실시하였으며 [7-10], 최대제거능력은 7.6-78.0 g/m³(충전물질)/hr으로 본 연구결과 보다 낮게 나타났다. 이는 Fig. 3에서 설명하였듯이 규산칼슘계 다공성 재제가 벤젠휘발가스의 충격부하에 강하여 고부하 주입 후에도 처리가 가능하였기 때문에 판단된다.

3.3. 생물학적 특성

바이오필터는 충전물질의 미생물막(biofilm)에 흡수, 흡착된 오염가스를 미생물의 분해활동에 의하여 제거하는 생물학적 공정이다. 본 연구에서는 바이오필터를 시작하기 전과 운전 후 48일 차에 충전물질을 시료채취하여 총미생물수를 측정하였다. 초기 미생물수는 퇴비와 다공성 세라믹을 혼합한 후 미생물을 접종한 CP-Bio에서 3.67×10⁶ cfu/g(건조질량)으로 가장 높았으며, 다공성 세라믹에 미생물을 첨가한 P-Bio에서는 8.51×10⁴ cfu/g(건조질량)으로 가장 낮게 나타났다(Table 5). 퇴비를 첨가한 경우 CP-Bio와 CP에서 초기에 높은 미생물수를 나타낸 것은 퇴비 재료 자체에 존재하는 미생물 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 퇴비는 10¹⁰ bacteria/g(건조질량)으로 높은 미생물함량을 가지고 있다[11]. 그러나 운전경과 후 48일 차에는 총미생물수가 벤젠가스 제거효율이 가장 높았던 P-Bio에서 7.21×10⁷ cfu/g(건조질량)으로 가장 높게 나타났다. 이는 초기에 미생물수가 가장 작았지만 미생물에 의한 벤젠분해와 동시에 대사작용의 산물로 미생물수의 증식이 이루어졌기 때문으로 사료된다. 일반적으로 벤젠은 카테콜(catechol)을 거쳐 피루빅산(pyruvic acid)과 아세트알데히드(acetaldehyde)로 최종분해되는 것으로 알려져 있다[12].

Table 5. Change of Microbial Amount in The Biofilter Media

Reactor	Microbial numbers (cfu/g)	
	Start-up	Day 48
CP-Bio	3.67×10 ⁶	2.45×10 ⁷
CP	2.98×10 ⁶	1.12×10 ⁷
P-Bio	8.51×10 ⁴	7.21×10 ⁷

바이오필터 처리공정에서 발생하는 이산화탄소는 오염물질이 분해되어 생성되는 부산물이다. 48일의 운전기간 동안 발생하는 이산화탄소를 누적하여 Fig. 6에 나타내었다. 이산화탄소 누적량은 20일차까지는 선형적으로 증가하다가 다소 정체되는 기간이 있음을 볼 수 있다. 이는 2,000 mg/m³으로 주입하던 농도를 약 5배가량 증가시켜 충격부하를 주었던 기간에 해당된다(Fig. 2 참조). 이 기간 동안의 제거효율은 60% 이하로 낮게 유지됨을 볼 수 있다. 반응기 종류별 이산화탄소 누적량을 살펴보면 제거효율이 가장 높게 나타났던 P-Bio에서 가장 많은 이산화탄소가 발생되었으며, 다음으로는 CP-Bio와 CP 순이었다. 이는 벤젠가스 제거효율과 일치함을 알 수 있었다.

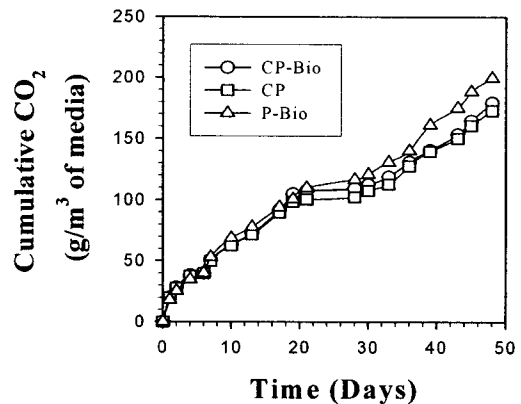


Fig. 6. Cumulative CO₂-evolved during biofilter operation.

4. 결론

본 연구는 퇴비 및 규산칼슘계 다공성 재료를 충전물질로 사용하여 바이오필터 처리하였을 때 충전물질별 벤젠가스의 제거특성을 평가하기 위하여 실시하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 가스의 유입선속도와 체류시간을 모두 15 m/hr와 4분으로 동일하게 유지하였을 때 규산칼슘계 다공성 재료에 미생물을 접종한 경우(P-Bio)의 제거효율은 1일 이후부터 98% 이상으로 높게 나타내었으며, 충격부하를 주었던 5일차와 21일차를 제외하고는 안정한 제거효율을 보였다. 충격부하 주입 후 정상상태로 회복되는데 P-Bio는 2일이 소요되었으

- 며, CP-Bio와 CP는 5일이 소요되어 P-Bio보다 3일 정도 더 길었다.
2. P-Bio는 안정화 단계에서의 벤젠가스 제거효율이 98% 이상으로 거의 일정하게 유지된 반면에 CP-Bio와 CP는 제거효율 80%를 기준으로 약 10% 이상의 변동(fluctuation)이 발생하여, 미생물을 접종한 규산칼슘계 다공성 재료(P-Bio)가 퇴비와 혼합하여 미생물을 접종한 CP-Bio나 미생물을 접종하지 않은 CP 보다 벤젠휘발가스 처리에 더 효과적이었다.
 3. 퇴비와 규산칼슘계 다공성 재료를 혼합한 후 미생물을 접종한 CP-Bio와 접종하지 않은 CP에서는 40 g/m^3 (충전물질)/hr 이하의 부하량에서도 제거효율이 50-90%까지 안정적이지 못하였으나, P-Bio에서는 약 85 g/m^3 (충전물질)/hr까지는 100%에 가까운 제거효율을 보였다.
 4. P-Bio에서는 최대제거능력이 95 g/m^3 (충전물질)/hr로 CP-Bio와 CP의 69와 66 g/m^3 (충전물질)/hr보다 약 30 g/m^3 (충전물질)/hr 정도 높았다.
 5. 초기 미생물수는 P-Bio에서 가장 낮았으나 운전일수가 경과함에 따라 48일차에는 가장 높게 나타났다. 이는 초기에 미생물수가 가장 작았지만 미생물에 의한 벤젠분해와 동시에 미생물 대사작용의 산물로 미생물수의 증식이 이루어졌기 때문으로 판단된다.
 6. 제거효율이 가장 높게 나타났던 P-Bio에서 가장 많은 이산화탄소가 발생되었으며, 다음으로는 CP-Bio와 CP 순이었다. 이는 벤젠가스 제거효율과 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한국능률협회, VOC·악취에 관한 정책방향 및 제어기술 특별강좌 (1997).
2. 한국산업안전공단, 도로제조업의 화학물질 관리 요령, 기술자료 보건 99-28-367 (1999).
3. G. Massacci, Physico-Chemical Characteristics and Toxicology of Landfill Gas Components, In : T. H. Christensen, R. Cossu R., R. Stegmann R.(eds.), "Landfilling of Waste: Biogas", p. 73, E & FN SPON, London (1996).
4. I. Smallwood, "Solvent Recovery Handbook", p.214, Edward Arnold, London (1993).
5. W. Namkoong, J. S. Park, and J. S. VanderGheynst, Biofiltration of Gasoline Vapor by Compost Media, *Environmental Pollution*, **121**(2), 181 (2003).
6. G. Stotzky, Microbial Respiration, In : C. A. Black, D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. L. White, F. E. Clark, and R. C. Dinauer, "Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties", p. 1550, American Society of Agronomy, Inc., Madison (1979).
7. F. J. Martin and R. C. Loehr, Effect of Periods Non-Use on Biofilter Performance, *Air & Waste Management Association*, **46**, 539 (1996).
8. J. O. Kim, Degradation of Benzene and Ethylene in Biofilter, *Process Biochemistry*, **39**(4), 447 (2003).
9. L. Sene, A. Converti, M. G. A. Felipe, and M. Zilli, Sugarcane Bagasse as Alternative Packing Material for Biofiltration of Benzene Polluted Gaseous Streams : A Preliminary Study, *Bioresource Technology*, **83**, 153 (2002).
10. L. Zhu, J. Riyad, and M. Walter, Biofiltration of Benzene Contaminated Air Streams Using Compost-Activated Carbon Filter Media, *Environmental Progress*, **17**(3), 168 (1998).
11. 남궁완, 박준석, 이노섭, 바이오필터 기술의 원리와 적용에 관한 고찰, *한국유기성폐자원학회지*, **8**(1), 60 (2000).
12. Cookson, J. T., Jr., "Bioremediation Engineering : Design and Application", p. 108, McGraw-Hill, Inc., New York (1995).