한국환경과학회지 제8권(제4호), 473~477, 1999
J. of the Korean Environmental Sciences Society

실험실 규모에서 고온 섬유 여과재를 이용한 방향족 유기화합물 제거 특성 조사

이 학 성 · 강 병 욱* · 이 상 권** · 한 영 욱*** · 한 범***
서원대학교 환경과학과 · *국립청주과학대학 환경공업과
한국외국어대학교 환경학과 · *(주)이우테크
(*1998*년 *12*월 *28*일 접수)

Removal Efficiency Study of Aromatic Hydrocarbons Using a High-Temperature Fiber Filter on a Laboratory Scale

Hak-Sung Lee, Byung-Wook Kang*, Sang-Kwun Lee, Young-Wook Han***, and Bum Han*****
Dept. of Environmental Science, Seowon University
**Dept. of Environmental Industry, ChongJu National College of Science and Technology*
***Dept. of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*
****Ewoo Tech Co., LTD.*
(Manuscript received 28 December, 1998)

The purpose of this study was to investigate the characteristics of removal efficiency for aromatic hydrocarbons using a high-temperature fiber filter on a laboratory scale. The main elemental compositions of a high-temperature fiber filter are aluminium and silica, which can act as the catalysts. Benzene, toluene and o-xylene among aromatic hydrocarbons were used in this experiment. For 3cm thickness of fiber filter, these compounds were removed more than 90% at the face velocities of 3cm/sec and 5cm/sec above 450℃. For 4cm thickness of it, the removal efficiencies of these compounds were almost 90% from 400℃ at the same face velocities, suggesting that it may be due to increasing the contact time between the fiber filter and aromatic hydrocarbons. The pressure drop ranged from 22 to 48mmH_2O for 3cm thickness of fiber filter. However, for 4cm thickness of it, it was about two times(41~89mmH_2O) higher than that for 3cm fiber thickness.

Key words : high-temperature fiber filter, removal efficiency, benzene, toluene, o-xylene

1. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOC)은 대기 중에서 광화학 반응에 의하여 오존(O_3) 형성에 중요한 역할을 하고 있고, VOC 성분 중에는 암을 유발하는 성분들(예 : Benzene, 1,3-Butadiene, Chlorform, Formaldehyde, Trichloroethylene, Polycyclic aromatic hydrocarbons 등)이 있어서[1,2] 점차 VOC에 대한 규제를 강화하고 있다. 환경부에서는 고정 배출원에 대한 VOC 관리방안으로 1995년 12월 개정된 대기환경보전법에 'VOC의 규제' 규정을 신설하였고, 1999년 3월 31일부터 휘발성 유기화합물질의 배출시설의 종류, 시설의 규모, 배출억제 방지시설의 설치 등에 관한 규정을 제정하여 시행하고 있다.[3] VOC 제거기술은 열소각법, 촉매연소법, 농축법, 흡착법, Biofilter 기술법, 막분리법, 자외선 산화법, 코로나 분해법 및 플라즈마 기술법 등 다양하다. 이러한 기술들은 발생원의 종류 및 VOC의 특성, 배기가스 유량, VOC 농도 등의 조건에 따라 적절하게 선택되고 활용된다.[4] 특히 열소각법은 VOC 농도나 종류에 따라 영향을 받지 않아서 오랫동안 사용되어 온 방법인데, 고온(700℃ 이상)에서 운전되기 때문에 질소산화물, 다이옥신과 같은 2차 유해성분들이 발생하므로 촉매(예 : Pt, Pd, Cr_2O_3, CuO, TiO_2, V_2O_5 등)를 사용하여 저온(200-400℃)에서도 VOC를 제거하는 방법들이 소개되고 있다.[4~6] 본 연구의 목적은 이러한 기술을 국내에서 개발하고자 소각시설 및 산업체에서 배출되는 폐가스와 폐분진을 동시에 처리할 수 있고, 촉매 역할을 할 수 있는 알루미늄과 규소가 주성분이고, 1000℃ 이상에서도 견딜 수 있는 고온 섬유 여과재를 이용하여 산화에 의한 방향족 유기화합물 제거에 대한 특성을 조사하는 데 있다. 고온 섬유 여과재는 용융상태의 기본 소재(aluminum과

silica)를 고온증기로 분사하고, 동시에 금속염류 용액이나 산화금속 혼합물의 미세분말을 기본소재에 분사하고, 냉각과정을 거쳐 직물형태로 제조된다. 고온 섬유 여과재의 수명은 5년 이상으로 알려져 있다.

실험실에서 고온 섬유 여과재를 이용하여 방향족 유기화합물 제거 특성을 평가하기 위해서 우선적으로 고려해야 할 것은 방향족 유기화합물 중 어떤 유기화합물을 대상물질로 선정할 것인지가 무엇보다도 중요하다고 생각한다. 선정과정에서 고려한 점은 첫 번째 고온 섬유 여과재를 적용할 수 있는 분야에서 많이 배출되는 물질이 우선 고려되었으며, 두 번째로는 인체에 미치는 영향을 고려하여 선정하였고, 세 번째로 보다 쉽게 실험실에서 측정 · 분석이 용이한 항목들이 고려되었다. 본 연구과제에서 우선적으로 적용하고자 하는 분야가 소각로, 제철관련분야, 석유화학시설로서, 이들 업체에서 배출되는 주요한 VOC 성분들 중에서는 Benzene, Toluene, o-Xylene(이하 BTX) 등이 포함되는 것으로 알려져 있다.[7] 또한 Benzene은 발암물질로 알려져 있으며, Toluene과 o-Xylene은 유해성물질로 알려져 있어서,[2] 이러한 물질이 대기 중으로 배출될 경우 인체에 많은 악 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 BTX는 현재 국내에서 규제대상물질로 환경부에서 규정되어[3] 있기 때문에 배출원에서 반드시 제거되어야 할 물질이기 때문에 본 실험에 사용할 대상물질로 선정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 고온 섬유 여과재 제거 특성 실험에 대한 설계 인자

고온 섬유 여과재의 성능시험을 위한 장치의 설계 조건은 고온을 유지하기 위한 구조로 설계하였으며, 구체적인 설계 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of test conditions

Apparatus material	Stainless steel (D 5cm x L 260cm)
Operating temperature	300 ~ 600℃
Pressure drop range	0 ~ 600mmH_2O
Ceramic electronic heater	Maximum to 1000℃
Density of fiber filter	200kg/m^3
Fiber filter thickness	3cm, 4cm
Face velocity	3cm/sec, 5cm/sec, 7cm/sec

실험실에서 고온 섬유 여과재의 방향족 유기화합물 제거 특성을 조사하기 위하여 직경 5cm의 스테인레스 스틸관에 방향족 화합물과의 반응시간을 고려하여 두께 3cm와 4cm의 고온 섬유 여과재를 사용하였다. 온도는 상온에서 최대 600℃를 유지할 수 있도록 세라믹 원형 전기히타를 이용하였으며, 보온을 위하여 1000℃까지 견딜 수 있는 석면으로 씌우고, 또 석면을 점토로 얇게 발라서 석면이 실험실 안에서 비산되는 것을 방지하였다. 실험온도를 370℃, 400℃, 450℃, 470℃으로 변화시키면서 제거효율을 조사하였다. 고온 여과재 전 · 후의 압력 측정은 0~600mmH_2O까지 측정할 수 있는 차압계(manometer)를 사용하였다. 실험용 고온 여과재의 충전밀도는 방향족 유기화합물과의 접촉시간을 고려하여 200kg/m^3으로 충진하였으며, 충전방법은 여과재의 무게를 칭량한 후 여과재 충전 장치에 일정한 밀도를 유지하기 위하여 시료를 작은 조각으로 조각낸 후 손으로 충전하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 고온 섬유 여과재의 원소 성분을 조사하기 위하여 PIXE(proton induced x-ray emission)방법으로 원소분석을 전문적으로 하는 EAC (Element analysis corporation, USA)사에 의뢰를 하였는데, 주된 원소는 aluminium(58%)과 silica (38%)이었으며, chrome, potassium, titanium, iron, calcium 등이 미량으로 함유되어 있었다(Fig. 1).

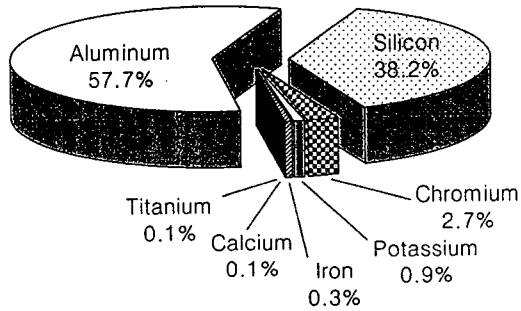

Fig. 1. Elemental compositions of a high-temperature fiber filter.

2.2. 방향족 유기화합물 제거효율 성능 시험 장치

방향족 유기화합물 제거 효율을 평가하기 위한 장치는 Fig. 2와 같다. 장치는 직경 5cm의 스테인레스 스틸관을 사용하였으며, 크게 여섯 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째(Fig. 2의 1st) 부분은 여과재를 고온으로 올리기 위한 전단계(예열) 부분인데, 고온으로 올리기 위하여 관내에 활성탄을 집어 넣고 관의 바깥 부분에는 1000℃로 가열할 수 있는 가열기를 설치하였고, 온도를 감지하기 위하여 온도센서(thermocouple)를 맨 뒤쪽에 설치하여 control box에 연결하여 적정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다.

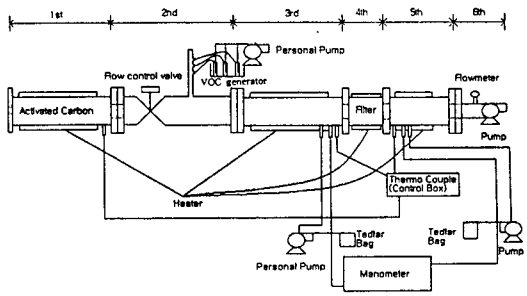

Fig. 2. Schematic of experimental apparatus.

두 번째 부분(그림 2의 2nd)은 가열된 기류에 유량 조절 밸브를 설치하여 유량을 조절할 수 있도록 하였으며, 방향족 유기화합물 시료를 일정 농도로 투입할 수 있는 장치이다. 시료의 농도는 Benzene, Toluene, o-Xylene 원액을 각각 흡수병에 적당량을 넣고, personal air pump (Gilian)를 이용하여 수백 ppm이 되도록 발생시켰으며, 투입구에서 혼합이 되도록 하였다. 세 번째 부분(Fig. 2의 3rd)은 이들 화합물들을 포함한 기류가 고온으로 유지되도록 가열하기 위하여 1000℃로 가열할 수 있는 가열기를 설치하고, 고온 여과재의 유입농도를 측정할 수 있는 sampling port, 온도를 감지하는 온도계, 고온 여과재 전·후의 압력을 측정하기 위한 manometer를 이용한 차압게이지 port등을 설치하였다. 네 번째 부분(Fig. 2의 4th)은 여과재를 수시로 교체, 장착할 수 있도록 하였고, 여과재의 온도를 고온으로 유지하기 위하여 밴드히터(400℃용량)도 사용하였다. 고온 여과재의 뒷부분(Fig. 2의 5th)은 여과재의 온도 하락을 방지하기 위하여 여과재가 있는 부분에 장착한 것과 같은 밴드히터를 설치하였고, 고온 여과재를 통과한 유출농도를 측정하기 위한 sampling port, 차압측정 port, 온도를 감지하는 온도계를 설치하였다. 맨 마지막(Fig. 2의 6th)에는 적당한 여과속도(face velocity)의 기류가 흐르도록 용량 20L/min의 vacuum pump(URG)를 이용하여 흡인하였으며, 펌프의 바로 앞에 유량계(rotameter)를 설치하여 정확한 유량을 측정할 수 있도록 하였다.

2.3. 방향족 유기화합물 제거효율 성능 검사를 위한 측정 및 분석

온도와 여과속도 변화에 따른 BTX 시료의 제거효율을 평가하기 위하여 고온 여과재 전·후에서 이 시료들과 반응성이 가장 적은 것으로 알려진[8] 5리터 용량의 Tedlar Bag(SKC Inc.)을 이용하였고, 시료 포집량은 200ml/min으로 10분간 시료를 채취하여 2L를 포집하였다. 고온 여과재에 촉매(예 : CuO, TiO_2, V_2O_5 등)를 코딩하면 산화에 의한 VOC를 제거할 수 있는 온도는 320-400℃로 알려져 있다.[5] 본 연구에 사용된 고온 여과재는 촉매를 코딩하지 않았지만, 고온 여과재에 함유된 원소 중 촉매 역할을 할 수 있는 것으로 알려진 aluminium과 silica[6](Fig. 1)가 포함되어 있어서, 온도는 370℃, 400℃, 450℃, 470℃으로 변화시키면서 제거 효율을 조사하였다. 여과지 선택시 중요하게 고려되어야 할 항목 중에는 여과속도(face velocity)와 압력에 대한 특성조사가 선행되어야 한다.[9] 고온 섬유 여과재를 통과하는 여과속도는 3cm/sec, 5cm/sec, 7cm/sec로 변화시키면서 제거 특성을 조사하였는데, 이는 여과재에 포집된 먼지를 제거하는 Reverse-air, Shaker, Pulse-jet 방식에서 적용되는 여과속도 범주 내에 포함되는 값이다.[10] 여과재 전·후에서의 압력도 온도와 여과속도 변화에 따라 측정되어졌다. 측정한 후에는 Tedlar Bag의 저장능력을 감안하여 즉시 분석하였다. BTX의 농도는 가스 크로마토그래프(Hewlett Packard, Model 5890 Series Ⅱ)를 이용하여 FID 검출기로 분석하였으며, 분석 조건은 Table 2와 같다. 사용된 시료 채취용 Tedlar bag은 한번 사용한 후 99.999%의 질소가스를 이용하여 세 번에 걸쳐서 세척하여 연속 사용하였고, 세척된 Tedlar bag에는 본 연구에서 측정하는 어떤 성분들도 검출되지 않았다.

Table 2. Chromatographic conditions

Column	FFAP (50m x 0.32mm x 0.52㎛)
Column Flow	1㎖/min
Oven Temperature	110℃
Injector Temperature	200℃
Detector Temperature	220℃
Injection volume	200㎕
Split ratio	1 : 20

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온 여과재 두께, 여과속도 및 온도에 따른 압력손실 변화

고온 여과재의 두께, 온도, 여과속도에 따른 압력손실의 변화는 표 3과 그림3 ~4에 나타내었다. 두께 3cm 여과재의 온도 및 여과속도의 증가에 따른 압력손실 범위는 22~48mmH_2O이었으며, 여과속도가 증가함에 따라서 압력손실은 같은 온도에서 8~12mmH_2O정도로 증가하는 경향을 나타났으며, 같은 여과속도에서 온도에 따른 압력손실의 증가는 2~4mmH_2O정도로 소폭으로 증가하였다. 두께 4cm 여과재의 온도 및 여과속도의 변화에 따른 압력손실의 범위는 41~89mmH_2O를 나타났으며, 여과속도 증가에 따른 압력손실의 증가는 3cm 여과재 두께에서의 증가량보다 2배 정도 커지는 경향을 나타내었고, 온도에 따른 증가폭은 3cm 여과재 두께의 경우와 유사한 경향을 보였다. 참고적으로 여과지에 포집된 먼지를 제거하는 방식인 Reverse-air에서 생기는 압력은 90~230mmH_2O, Shaker방식에서는 100~250mmH_2O, Pulse-jet방식에서는 150~250mmH_2O으로 알려졌다.[11] 따라서 본 연구에서 사용된 여과재의 두께, 여과속도와 온도에 따른 압력손실은 앞에서 언급한 세 가지의 여과지에 포집된 먼지를 제거하는 방식들 보다 낮게 나타났다.

Table 3. Variation of pressure drop by fiber filter thickness, face velocity and temperature

(Unit : mmH_2O)

Fiber filter thickness	Face velocity	Temperature (℃) 370	400	450	470
3cm	3cm/sec	22	24	26	28
	5cm/sec	30	34	36	40
	7cm/sec	38	40	44	48
4cm	3cm/sec	41	44	47	48
	5cm/sec	59	64	67	69
	7cm/sec	77	81	87	89

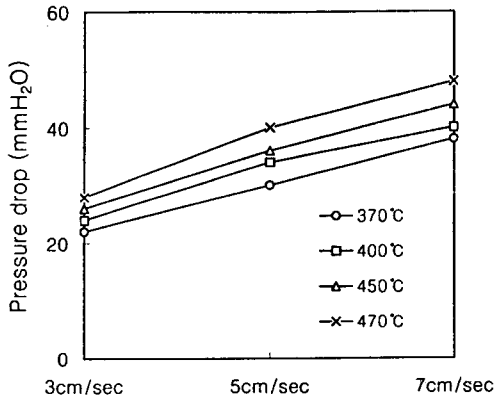

Fig. 3. Variation of pressure drop by face velocity and temperature for 3cm thickness of fiber filter.

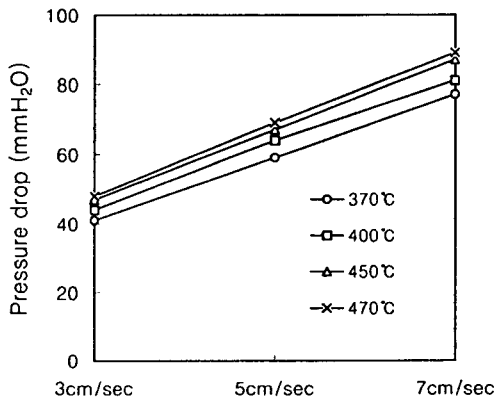

Fig. 4. Variation of pressure drop by face velocity and temperature for 4cm thickness of fiber filter.

3.2. 고온 여과재의 Benzene, Toluene, o-Xylene의 제거효율 특성

본 연구에 사용된 고온 여과재는 촉매를 코딩하지 않았지만, 촉매 역할을 할 수 있는 Al과 Si가 주성분이고, Cr과 Ti이 미량으로 존재하는(Fig. 1) 고온 여과재의 VOC 제거효율을 알아보았는데, Table 4에서는 여과재 두께, 온도, 여과속도 변화에 대한 BTX의 제거효율 특성을 보여주고 있다. 본 연구에서 얻어진 결과는 앞으로 고온 여과재에 대한 촉매코딩에 대한 중요한 기초자료로 사용될 수 있다고 사료된다. Fig. 5~6에서는 여과재 두께 3cm와 4cm에서 여과속도 3cm/sec에 대한 BTX의 제거효율 특성을 보여주고 있다.

Table 4로부터 고온 여과재에 의한 BTX의 제거효율은 370℃에서는 3cm 여과재 두께에서 여과속도에 따라서 48~78%의 효율을 나타내었으며, 4cm 여과재 두께에서는 64~82%를 나타내어, 여과재의 두께가 증가하면 촉매와의 접촉시간이 증가하기 때문에 제거효율이 높아지는 경향을 보였다. 온도에 따른 제거효율의 변화는

Table 4. Removal efficiency of aromatic hydrocarbons by fiber filter thickness, face velocity and temperature

Fiber filter thickness	Face velocity	Species	Removal efficiency (%)			
			370℃	400℃	450℃	470℃
3cm	3cm/sec	Benzene	48	75	97	98
		Toluene	59	74	93	93
		o-Xylene	57	73	89	88
	5cm/sec	Benzene	70	74	98	98
		Toluene	78	85	97	96
		o-Xylene	74	82	85	84
	7cm/sec	Benzene	60	70	84	92
		Toluene	65	76	85	92
		o-Xylene	66	72	75	81
4cm	3cm/sec	Benzene	76	94	98	99
		Toluene	81	93	96	97
		o-Xylene	77	88	90	92
	5cm/sec	Benzene	68	83	93	99
		Toluene	78	89	95	98
		o-Xylene	82	90	-	93
	7cm/sec	Benzene	64	76	85	87
		Toluene	74	82	87	89
		o-Xylene	78	82	83	87

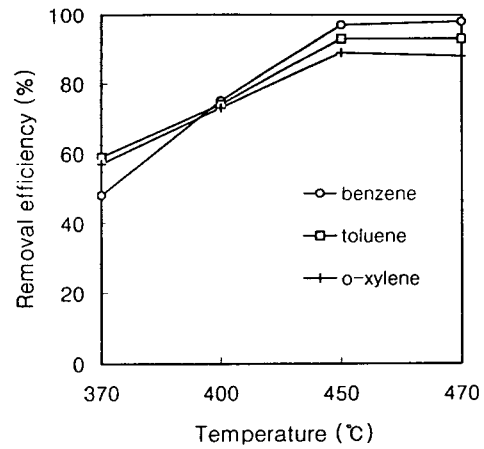

Fig. 5. Removal efficiency of Benzene, Toluene, o-Xylene by face velocity of 3cm/sec for 3cm thickness of fiber filter.

3cm 여과재 두께의 경우 450℃에서 급격한 증가를 나타내어 세 가지 성분이 거의 90%이상의 제거효율을 나타내었다. 그리고 470℃에서는 급격한 제거효율의 증가를 보이지 않았으나, 다만 여과속도가 7cm/sec인 경우에는 450℃에서의 제거효율이 3cm/sec와 5cm/sec에 비하여 낮게(75~85%) 나타내었으나, 470℃에서 급격한 제거효

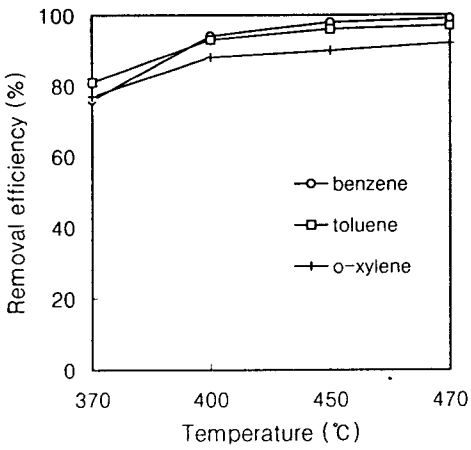

Fig. 6. Removal efficiency of Benzene, Toluene, o-Xylene by face velocity of 3cm/sec for 4cm thickness of fiber filter.

율 증가를 나타내었다. 4cm 여과재 두께에서는 3cm 여과재 두께에 비하여 제거효율이 낮은 온도에서도 높게 나타났다. 즉, 400℃에서 3cm/sec와 5cm/sec의 여과속도에 대하여 제거효율이 90%에 가깝게 나타내었는데, 이는 3cm 두께의 여과재에 비하여 촉매와의 접촉시간이 길기 때문에 나타난 현상으로 보여지며, 다만 여과속도가 7cm/sec의 경우에는 3cm 두께의 여과재와 마찬가지로 비교적 낮은 제거효율(75~85%)을 나타내었다. 따라서 여과재 두께, 온도, 여과속도와 경제성을 고려하면, 본 연구에서 약 90% 이상 BTX 제거효율에 대한 최적조건은 4cm 여과재 두께에서 온도 400℃와 여과속도 3cm/sec이다.

4. 결 론

고온 여과재를 이용한 실험실 규모에서 BTX의 제거특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 두께 3cm 여과재의 온도 및 여과속도의 증가에 따른 압력손실 범위는 22~48mmH_2O이었다. 두께 4cm 여과재의 온도 및 여과속도의 변화에 따른 압력손실의 범위는 41~89mmH_2O으로 나타났으며, 여과속도 증가에 따른 압력손실의 증가는 3cm 여과재 두께에서의 증가량보다 2배 정도 커지는 경향을 나타났고, 온도에 따른 증가폭은 3cm 여과재 두께의 경우와 유사한 경향을 보였다.

2. 온도에 따른 BTX의 제거효율 특성 변화는 3cm 두께의 고온 여과재의 경우 450℃에서 급격한 증가를 나타내어 3cm/sec, 5cm/sec의 여과속도에 대하여 이들 성분들이 약 90%이상의 제거효율을 나타내었다. 다만 여과속도가 7cm/sec인 경우에는 450℃에서의 제거효율이 3cm/sec와 5cm/sec에 비하여 낮게(약 80%) 나타내었다. 4cm두께의 고온 여과재에서는 3cm두께 여과재에 비하여 낮은 온도에서도 제거효율이 높게 나타났다. 즉, 400℃에서 3cm/sec와 5cm/sec의 여과속도에 대하여 3cm 여과재 두께에 대하여는 77%의 제거효율을 보였고, 4cm 여과재 두께에 대하여는 90%에 가까운 제거효율을 나타내었다.

3. 여과재 두께, 온도, 여과속도와 경제성을 고려하면, 본 연구에서 약 90% 이상 BTX 제거효율에 대한 최적조건은 4cm 여과재 두께에서 온도 400℃와 여과속도 3cm/sec이다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부에서 시행한 청정생산기술개발사업비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Byrne, M., S. Coons, M., Goyer, J. Harris, J. Perwak, P. Cruse, R. DeRosier, K. Moss, and S. Wendt, 1982, An exposure and risk assessment for Benzo(a)pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons : Volume III. Anthracene, Acenaphthylene, Fluoranthene, Fluorene, Phenanthrene and Pyrene, 4-29pp, EPA-440/4-85-020.
2) American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), 1998, Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices.
3) 대기환경보전법, 1996, 1999, 환경부.
4) 박상언, 장종산, 노현석, 전명원, 1998, VOCs 처리기술, 공기청정기술, 42, 100-113.
5) Zaitsev, V. A., A. G. Aryanian, K. A. Akhrameev, E. V. Kalinin, V. A. Kuznetsova, V. A. Prokhorov, and A. Yu. Suleimanov 1986, Thermocatalytic decontamination of polycyclic and polychlorinated aromatic compounds, Russian Chemical Industry, 26(6), 31~37.
6) Heck, R. M. and R. J. Farrauto, 1995, Catalytic air pollution control: Commercial technology, Van Nostrand Reinhold, 11~26pp and 147~159pp.
7) Lin, J., P. A. Scheff, and R. A. Wadden, 1993, Development of a two-phase receptor model for NMHC and PM_{10} air pollution sources in Chicago, Presentation at the 86th Annual Meeting of AWMA, Denver, Colorado 93-TP-58.03.
8) SKC, 1986, SKC comprehensive catalog & air sampling guide, SKC, 40~41pp.
9) Cushing K. M., R. L. Merritt, and R. L. Chang, 1990, Operating history and current status of fabric filters in the utility industry, J. Air Waste Manage. Assoc., 40(7), 1051~1058.
10) Cooper, C. D. and F. C. Alley, 1986, Air pollution control : a design approach, PWS Engineering, Boston, 157~188pp.
11) Carr, R. C., 1983, Second conference on fabric filter technology for coal-fired power plants : Conference summary, J. Air Poll. Control Assoc., 33(10), 949~954.