

## 활성탄으로 코팅된 집진전극의 BTEX 흡착특성

### Adsorption Characteristics of BTEX on Dust Collecting Electrode Coated with Activated Carbon

남 상 철 · 김 현 정 · 김 광 수\*

한국건설기술연구원 수자원환경본부

(2013년 10월 21일 접수, 2013년 11월 11일 수정, 2013년 11월 11일 채택)

Sangchul Nam, Hyun Jung Kim and Kwang Soo Kim\*

Water Resource and Environment Research Department,

Korea Institute of Construction Technology

(Received 21 October 2013, revised 11 November 2013, accepted 11 November 2013)

#### Abstract

This study was performed to provide the basic data for the function of BTEX removal for compact electrostatic precipitator which are applicable to indoor environment (or closed spaces). For this purpose, the adsorption equilibrium test was conducted for BTEX of activated carbon sheet (ACS) and activated carbon (AC), and the adsorption characteristics of AC and ACS were evaluated using the Langmuir constant which was obtained from the adsorption characteristics, adsorption capacity and regression calculation. The surface area and adsorption pore volume of ACS reduced by 70% and 86%, respectively, as compared to those of AC, and the adsorption capacities of BTEX also showed a similar level. Thus, it is considered that ACS applied electrostatic precipitator is able to remove dust and BTEX simultaneously.

**Key words** : Dust collecting Electrode, Activate carbon sheet, BTEX removal, BTEX, Adsorption isotherm

#### 1. 서 론

최근 환경성 질환이 급속하게 증가됨에 따라 다중 이용시설과 같은 실내와 도로터널 등의 공기질은 인간의 건강문제와 직접적으로 연계되는 중요한 환경요소로 인식되고 있다 (KICT, 2012; Ataka *et al.*, 2004). 인간 활동의 90% 이상은 가정, 사무실, 지하시

설물 및 자동차 등의 실내에서 이뤄지고 있으며, 이러한 공간 내에서의 오염물질 수준은 실외에 비하여 2~5배 높고 때로는 100배 이상 높게 나타날 수 있다고 보고되고 있다 (Jeon *et al.*, 2008; EPA 1987). 밀폐된 공간에서의 오염물질에는 분진 외에도 부유세균 및 휘발성유기화합물 등의 입자상 및 가스상 오염물질이 공존하고 있다. 특히 천식, 아토피 등의 유발 원인으로 주목받고 있는 대표적 휘발성유기화합물인 BTEX 중 벤젠은 US EPA 물질분류 범주에 따라 발암물질로 분류되며, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌은 현재 비발암물질로 분류되어 있으나 현재 자료로는

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-910-0299, Email : kskim@kict.re.kr

인체발암성에 대해 분류할 수 없어 위해성에 대한 추가 평가가 이뤄지고 있다(Yang *et al.*, 2008).

전기집진기는 입자상오염물질의 배출 저감을 위해 시멘트소성로, 발전소, 용광로, 도로터널 등의 산업분진 및 폐가스집진을 위해 가장 널리 사용된다. 집진설비는 다양한 크기를 갖는 입자상 오염물질 저감에 탁월한 성능을 나타내며, 광범위한 온도범위에서의 설계가 가능한 장점을 가지고 있다(Shin *et al.*, 2010; Park and Park, 2000; Kim *et al.*, 1994). 그러나 고전압의 코로나방전에 의해 분진 하전을 통한 집진방식은 고 비저항(resistivity) 분진 및 역전리의 영향과 부식성 입자의 집진판 표면 부착에 따른 집진판 부식, 접촉성 입자 탈진 어려움 등이 단점으로 남아있어(Song *et al.*, 2009), 이를 개선하기 위한 Electrohydrodynamic 유동 연구(Jeong and Kim, 1998), 역 코로나현상(Chang and Bai, 1999) 및 집진판 형상 변화 등에 대한 연구가 이뤄져 왔다(Park and Park, 2000). 최근에는 약 50 kV급의 고전압장치가 필요한 산업분야 연구를 벗어나 생활과 밀접한 다중이용시설 등의 실내공기질이나 도로터널 등의 밀폐공간에 대한 관심이 증가함에 따라 3~5 kV의 저전압 소형전기집진장치에 대한 연구도 이뤄지고 있다(KICT, 2012; Seo *et al.*, 2006). 그러나 실내공기질 적용을 위한 전기집진장치나(Seo *et al.*, 2006), NO<sub>x</sub> 등의 2차 오염물질을 야기하는 코로나방전을 배제한 전기집진장치(KICT, 2012)는 여전히 분진제거에 초점이 맞춰져 있어 포름알데하이드나 VOCs 등의 가스상오염물질에 대한 저감능력에 대해서는 보고된 바가 전혀 없다.

이에 본 연구는 실내공기 및 터널 등의 밀폐된 공간 내 적용 가능한 소형전기집진장치의 휘발성유기화합물 제거기능성 확보를 위한 기초자료 제공을 목적으로 활성탄으로 코팅된 활성탄박판전극의 BTEX 흡착특성을 Langmuir 흡착등온식을 통하여 평가하고, 이를 활성탄박판의 원료인 활성탄 실험결과와 비교하였다.

## 2. 연구 재료 및 방법

### 2.1 활성탄박판전극

집진전극은 전기집진장치의 핵심부품으로서 알루미늄

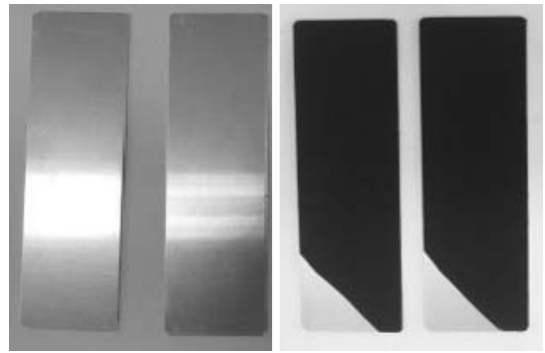


Fig. 1. Aluminium plate electrodes (left) and the electrodes coated with the activated carbon sheet (right).

미늄 판이 주로 사용된다. 본 연구에서는 가스상오염물질인 BTEX 흡착 기능을 부여하기 위한 활성탄(Charcoal activated powder, Yakuri Pure Chemicals Co. LTD, Japan)을 주원료로 하고 전기전도도 향상을 위한 블랙카본(Carbon Black, Fisher Scientific Inc., USA)을 첨가한 활성탄박판을 전극에 코팅하는 형태로 활성탄박판을 제조하였다. 활성탄박판은 재료들의 배합을 위하여 바인더제로 polyvinylalcohol(PVA)을 사용하였고, 이 때 활성탄, 블랙카본 및 PVA는 질량비가 10:2:3이 되도록 혼합하였다. PVA는 점도가 높아 쉽게 묻쳐지기 때문에 박판의 두께 증가로 전기집진장치의 기본 목적인 분진제거효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 활성탄 세공의 막힘을 최소화하고 균일한 두께로 코팅하기 위하여 PVA 점도를 낮출 수 있는 유기용매인 메탄올을 추가 혼합하여 점도가 낮은 슬러리 상태의 시료를 알루미늄 판에 코팅하여 상온 및 고온에서 건조하는 방법을 사용하였다. 메탄올은 활성탄 10g 당 약 20 mL을 혼합하였으나, 활성탄박판 제조 및 건조에 의해 모두 휘발되어 활성탄박판 원료 혼합비에는 영향을 미치지 않았다. 통상의 활성탄에는 금속이온이 함유되어 있으므로 전극에 불균일한 저항이 발생할 수 있어 전처리를 하였다. 전처리 방법은 활성탄의 타르성분을 제거하기 위하여 100°C의 물에 세척 후 1N 염산용액에서 끓이고 다시 증류수로 세척하여 건조시키는 방법을 사용하였다(KICT, 2012). 그림 1에는 제조된 활성탄박판전극의 사진을 나타냈다.

**Table 1. Molecular weight and concentrations of mixed BTEX gas.**

	Molecular weight	Conc. (ppm)	Conc. (µg/L)
Benzene	78.0	5.1	17.9
Toluene	92.1	4.9	20.2
Ethylbenzene	106.2	5.0	23.8
m-xylene	106.2	5.0	23.5

**2. 2 흡착평형실험 및 최대흡착용량**

흡착평형실험을 기반으로 하는 흡착특성 평가는 흡착등온식 (adsorption isotherm)을 이용하여 평가하며, 흡착특성 규명을 위해 개발된 모델 가운데 Langmuir 식을 적용하였다 (Langmuir, 1918). Langmuir 흡착등온선의 상수는 흡착질 및 흡착제에 따른 흡착용량 (adsorption capacity) 및 친화도 (affinity)를 알 수 있어 흡착평형실험 해석에 주로 이용되고 있다 (Jeppu and Clement, 2012).

활성탄박판과 활성탄박판의 결과 비교를 위한 활성탄은 제조 후 100°C에서 건조된 상태로 사용하였으며, 흡착질은 대표적 휘발성유기화합물인 벤젠 (Benzene), 톨루엔 (Toluene), 에틸벤젠 (Ethylbenzene) 및 m-자일렌 (Xylene) 네 종류를 혼합한 표준가스를 사용하였다. 본 연구의 흡착평형실험방법에서는 무게를 단계별로 조절한 활성탄 및 활성탄박판 (2, 4, 6, 8, 10 mg)을 흡착제로, BTEX 표준가스 (2L)를 흡착질로 하여 온도를 30°C로 유지한 3L 용량 테들러백 (CEL Scientific Corporation, USA)에서 수행하였다. BTEX 각각의 농도는 약 5 ppm으로 이 때의 오염물질 농도는 표 1에 나타난 바와 같으며, 주입량인 2L를 감안하였을 때 총 오염물질 부하량은 130.8 µg으로 계산되었다.

**2. 3 분석방법**

활성탄과 활성탄박판의 물성 변화는 비표면적, 세공부피 및 세공크기의 변화를 통하여 관찰하였고, 이들의 분석은 Tristar II 3020 (Micromerictis Co., USA)를 이용하였다.

테들러백 내 BTEX 가스의 흡착평형농도는 가스 크로마토그래피 (GC, gas chromatography)로 분석하였으며, 검출기는 MSD (Mass selective detector)를 이용하였다. 분석 시 시료는 GC용 가스주사기로 0.2 mL를 직접 주입하는 방법을 사용하였고, GC-MS의 세

**Table 2. Operating conditions of the GC-MS system.**

System	Model	Thermo DSQ II
Column	Model	Restek-1MS
	Specifications	30 m (L), 0.25 mm (ID), 0.25 µm (film)
Oven	Temperature	40°C for 5 minutes, 20°C per minute to 150°C, where it was held for 15 minutes
		Temp
Inlet parameters	Pressure	46 kPa
	Gas volume	1 mL/min (constant)
	Split ratio	10 : 1
	Gas type	helium
	Injection volume	0.2 mL

부 분석조건은 표 2에 나타내었다. BTEX 정량을 위한 검량선은 VOCs 표준가스를 테들러백 내에서 질소가스로 농도별로 희석하여 측정하였다 (Namkoong et al., 2000). BTEX 흡착용량 평가를 위하여 물질별 농도가 5 ppm인 표준가스를 질소가스로 1, 2, 2.5, 5 ppm으로 희석하여 검량선을 작성하였을 때의 결정계수 (R<sup>2</sup>)는 BTEX 순서로 0.995, 0.993, 0.996, 0.993으로 나타났다. 따라서 테들러백 표면 또는 밸브 등의 재질에 흡착손실되거나, 반대로 VOCs 농도가 증가하는 등의 오차는 없는 것을 확인하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3. 1 활성탄 및 활성탄박판 물성 평가**

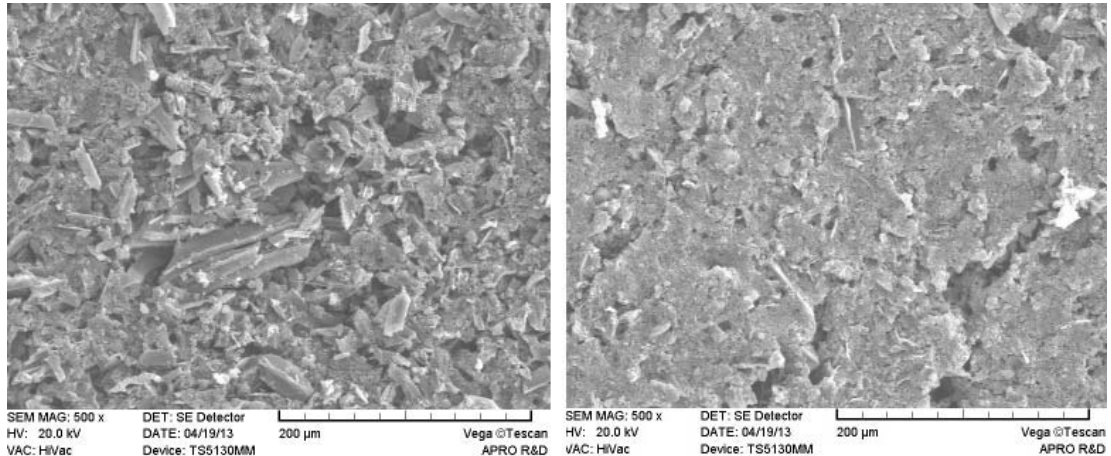
표 3에는 활성탄, 블랙카본 및 활성탄박판의 물성 분석결과를 나타냈다. 활성탄박판 제조 시 변화된 물성 비교를 위하여 원료물질로 활성탄 및 블랙카본의 결과를 함께 나타냈다. 흡착역할을 하는 활성탄의 비표면적은 1,144 m<sup>2</sup>/g으로 나타났고, 활성탄박판은 529 m<sup>2</sup>/g의 비표면적을 나타내었다.

블랙카본의 비표면적은 33 m<sup>2</sup>/g으로 활성탄에 비해 매우 낮고, 평균 평균세공크기 또한 15.14 nm로 매우 크기 때문에 BTEX 흡착에 관여하지 않고 전도체 역할만 수행될 것으로 판단하여 결과 해석 시 고려하지 않았다.

활성탄박판은 그림 2와 같이 메탄올에 의한 용매 처리 후에도 블랙카본 및 PVA 혼합 후 활성탄의 미

**Table 3. BET results of activated carbon and activated carbon sheet.**

	Activated carbon (AC)	Black carbon (BC)	Activated carbon sheet (ACS)
Surface area (m <sup>2</sup> /g)	1,144	33	529
Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.33	0.13	0.19
Average pore width (nm)	4.04	15.14	4.75

**Fig. 2. SEM images of the activated carbon sheet, before (left) and after (right) solvent treatment.**

세공이 막히면서 비표면적과 세공부피는 감소하고 세공의 크기는 증가하였다. 활성탄박판의 비표면적은 활성탄의 54% 수준으로 감소하였으며, 활성탄 박판 내 활성탄의 무게비율이 약 3분의 2임을 감안하였을 때에는 활성탄 비표면적의 약 70% 수준이 유지된 것으로 판단할 수 있다. 세공부피의 경우에도 활성탄 박판은 활성탄의 세공부피인 0.33 cm<sup>3</sup>/g에서 0.19 cm<sup>3</sup>/g로 감소하여, 활성탄 함량 비율로는 86% 수준으로 나타났다. 활성탄박판의 평균 세공크기의 경우에는 4.75 nm로 활성탄(4.04 nm)에 비하여 다소 증가했다. 블랙카본은 미세한 분말상태이긴 하지만 나노미터 단위의 세공을 막기에는 무리가 있으므로, 이러한 물성 저하원인은 PVA에 의한 것으로 판단된다.

한편 메탄올은 PVA의 점성을 감소시키고, 열건조 시 휘발에 의해 활성탄제조 공정 중 활성화(activation)와 유사한 역할을 통해 세공이 막힘을 방지하는 것으로 보고된 바 있다(KICT, 2012). 즉, 비표면적 등의 변화가 70% 및 86% 수준으로 양호하게 유지할 수 있었던 것은 메탄올에 의한 것으로 판단

할 수 있었다.

### 3.2 활성탄 및 활성탄박판의 BTEX 흡착용량 평가

흡착평형실험 결과에 의한 평형흡착량  $q_e$ , Langmuir 상수 및  $R_L$ 을 도출하기 위한 식을 표 4에 나타냈다. 평형흡착량 식에서  $C_0$ 는 초기농도(mg/L),  $C_e$ 는 평형농도(mg/L),  $V$ 는 부피(L),  $W$ 는 흡착제 질량(g)을 의미한다. Langmuir 식은 흡착결합력이 작용하는 것을 단분자층의 두께로 보고 그 이상 분리된 층에서는 흡착이 일어나지 않는다는 모델을 기초로 하고 있으며,  $Q$ 와  $b$ 는 흡착용량(capacity)과 흡착속도와 관련된 Langmuir 상수이다. 한편, Langmuir형 등온식은  $C_e$ 와  $b$ 의 관계에 의해 정의되는 무차원 분리계수  $R_L$ 에 의해 등온선의 모양이 흡착에 적합(favourable)한지 부적합(unfavourable)한지 구분할 수가 있다. 무차원분배계수의 범위가  $0 < R_L < 1$  일 때, 0에 가까울수록 Langmuir 흡착등온식에 적합하며, 1 이상에서는 부적합한 것으로 알려져 있다(Ahmad *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011; Gupta *et al.*, 2005).

**Table 4. Equation for amount of adsorption equilibrium, Langmuir isotherm, and Dimensionless constant.**

Amount of adsorption equilibrium	Langmuir isotherm	Dimensionless constant
$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q \cdot b} + \frac{C_e}{Q}$	$R_L = \frac{1}{(1 + C_e \cdot b)}$

**Table 5. Langmuir isotherm parameters and correlation coefficient for adsorption of BTEX mixed gas on an activated carbon and the activated carbon sheet.**

Adsorbents	Adsorbates	Parameters of Langmuir isotherm		
		Q (mg/g)	R <sub>L</sub>	R <sup>2</sup>
AC	Benzene	9.74	0.08	0.808
	Toluene	15.48	0.02	0.995
	Ethylbenzene	22.12	0.01	0.992
	Xylene	26.81	0.06	0.890
ACS	Benzene	0.52	0.29	0.824
	Toluene	0.71	0.24	0.766
	Ethylbenzene	3.54	0.13	0.841
	Xylene	4.21	0.12	0.816

표 5에는 활성탄과 활성탄박판의 BTEX 흡착평형 실험 결과를 회귀계산을 이용하여 도출한 Langmuir 상수 값들을 나타냈다. 활성탄의 BTEX에 대한 무차원 분리계수는 0.01~0.08로 Langmuir 흡착에 적합한 범위였으며, 결정계수(R<sup>2</sup>) 또한 높게 나타났다. Langmuir isotherm에 의한 흡착용량 Q의 범위(9.74~26.81 mg/g)는 3.2의 실험에 의한 흡착용량 결과 값과 매우 유사하였으며, 특히 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.99 이상으로 높게 나타난 톨루엔과 에틸벤젠의 실험적 흡착용량 값과 이론값인 Langmuir 상수 Q값과의 차이는 4% 이내로 계산되어 활성탄의 BTEX 흡착은 Langmuir 흡착에 매우 높은 상관도를 나타냄을 알 수 있었다. 한편 활성탄박판의 무차원 분리계수는 0.12~0.29로 0과 1 사이의 범위 내에 속하였으므로 Langmuir 흡착 이론에 적합한 것으로 판단되었다. 그러나 활성탄의 무차원분리계수(0.01~0.08) 및 결정계수와 비교하였을 때 활성탄보다는 활성탄박판의 Langmuir 흡착등온식과의 상관도가 다소 낮은 것으로 판단된다.

Langmuir 흡착용량 Q에 대해서는 활성탄이 9.74~26.81 mg/g으로 총 BTEX 흡착용량은 약 74 mg/g으로 나타났으며, 활성탄박판은 0.52~4.21 mg/g의 범위로 총 흡착용량은 약 9 mg/g으로 나타났다. 두 흡

**Table 6. BTEX adsorption capacities of AC and ACS.**

	Adsorption capacity (mg/g)		ACS/AC (%)
	Activated carbon	Activated carbon sheet	
Benzene	11.9	10.7	89.5
Toluene	15.2	11.6	76.3
Ethylbenzene	21.3	15.8	74.4
Xylene	21.5	16.4	76.5

착용량을 비교하였을 때에는 74.4~89.5% 범위였던 실험값에 비하여 크게 낮은 5.3~16.0%의 수준인 것으로 나타났다. 따라서 활성탄박판의 Langmuir 상수는 활성탄박판 제조 시 PVA 등의 영향으로 실제 흡착능보다 낮게 판단될 수 있는 것으로 판단하였다.

한편 Daifullah and Girgis (2003)는 10 ppm의 BTEX로 흡착한 여러 흡착제의 흡착용량 범위가 18~36 mg/g로 보고한 바 있는데, 본 연구에 사용된 활성탄과 유사하거나 더 높은 비표면적을 가진 흡착제들보다도 약 3배 가량 낮았다. 그러나 200 ppm의 고농도 조건에서 연구한 No *et al.* (2008)의 톨루엔 흡착연구 결과에 비해서는 본 연구결과가 배 이상 정도 낮았다. 따라서 비표면적, 세공부피 및 BTEX 흡착에 관여하는 mesopore 사이즈의 세공크기 등의 흡착제 조건 외에도 흡착질의 오염물질 부하에 의한 영향이 있는 것으로 판단하였다.

이를 확인하기 위하여 BTEX 부하를 2L에서 4L로 증가시켜 흡착용량을 평가 한 결과 표 6과 같이 흡착용량이 변화함을 확인하였다. 활성탄은 BTEX 물질별로 11.9~21.5 mg/g의 흡착용량을 보여, 이전 결과와 유사하게 나타난 반면, 활성탄박판의 경우 10.7~16.4 mg/g의 범위로 Langmuir 흡착등온식의 이론적 흡착용량에 비하여 6 배나 높게 나타났다. 이 결과를 활성탄 대비 활성탄박판의 흡착용량은 74.4~89.5%의 범위인 것으로 계산되어, 활성탄 대비 활성탄박판의 비표면적(약 70%) 및 세공부피(86%)와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 소형전기집진장치를 이용한 실내공간 내 가스상 오염물질인 BTEX의 제거를 목적으로 활성탄박판의 BTEX 흡착용량을 활성탄박판의 원료인 활성탄의 흡착용량과 비교하고 Langmuir isotherm을 통하여 흡착특성을 비교하였다. 본 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 활성탄박판 제조 공정에 추가된 블랙카본 및 PVA에 의해 활성탄박판의 비표면적과 세공부피는 활성탄박판 주원료인 활성탄에 비하여 각각 70%, 86% 수준으로 감소하였다.
- (2) 무차원분배계수 및 선형 Langmuir 등온선의 회귀 결정계수에 의해 활성탄박판의 BTEX 흡착특성은 Langmuir 흡착이론에 수렴함을 알 수 있었으나, 활성탄박판의 이론적 흡착용량은 활성탄 흡착용량과 대비하여 5~16% 수준으로 나타났다.
- (3) 흡착질 부하를 증가시킨 조건에서 실험에 의한 활성탄 대비 활성탄박판의 흡착용량은 74.4~89.5%로 비표면적 및 세공부피 감소율과 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

따라서 본 연구결과를 토대로 활성탄박판으로 코팅된 활성탄박판전극은 활성탄의 BTEX 제거성능이 대부분 유지되므로, 이를 활용한 소형전기집진장치의 실내공간이나 도로터널 등의 밀폐된 공간 내에서 BTEX와 같은 가스상오염물질의 동시제거가 가능한 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유임무형사업 “(2013-0048) 폴리머 기반 경량 방음벽 및 활성탄 박판 전극을 이용한 분진 제거 기술 개발(2)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

Ahmad, A., A. Idris, and D. Mahmoud (2011) Equilibrium,

kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of basic dye by lowcost adsorbent, *J. Adv. Sci. Eng. Res.*, 1(4), 200-229.

Ataka, Y., S. Kato, S. Murakami, Q. Zhu, K. Ito, and T. Yokota (2004) Study of effect of adsorptive building material on formaldehyde concentrations: development of measuring methods and modeling of adsorption phenomena, *Indoor Air*, 14(8), 51-64.

Chang, C.L. and H. Bai (1999) An experimental study on the performance of a single discharge wire-plate electrostatic precipitator with back corona, *J. Aerosol Sci.*, 30(3), 325-340.

Daifullah, A.A.M. and B.S. Girgis (2003) Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 214, 181-193.

EPA (1987) Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study, U.S. EPA, 600/S6-87/002.

Gupta, V.K., A. Mittal, and V. Gajbe (2005) Adsorption and desorption studies of a water soluble dye, quinoline yellow, using various materials, *J. Colloid Interface Sci.*, 284(1), 89-98.

Jeon, B.H., Y.K. Hwang, H.A. Kim, S.H. Lee, K.D. Ahn, and Y. Heo (2008) Indoor air concentration of particulate matter and endotoxin in public facilities, *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, 18(4), 262-270.

Jeong, S.H. and S.S. Kim (1998) A study on the electrohydrodynamic flow in a rectangular impactor with positive corona discharge, *Aerosol Sci. Tech.*, 29(1), 1-16.

Jeppu, G.P. and T.P. Clement (2012) A modified Langmuir-Freundlich isotherm model for simulating pH-dependent adsorption effects, *J. Contaminant Hydrology*, 129-130, 46-53.

Kim, Y.J., W.S. Hong, H.O. Choi, B.H. Ham, C.S. Min, and K.S. Yu (1994) Experimental and Finite Difference Method (FDM) analysis on collection characteristics of electrostatic precipitator, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 10(1), 49-56. (in Korean with English abstract)

Korea Institute of Construction Technology (2012) Technology development of noise and dust reduction for road environmental improvement, KICT 2012-149.

Langmuir, I. (1918) The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum, *J. Am. Chem. Soc.*, 40(9), 1361-1403.

Lee, J.J., J. Cho, and H.T. Kim (2011) Adsorption kinetic and thermodynamic studies of tricyclazole on granular

- activated carbon, *Environ. Eng. Research*, 33, 623-629.
- Namkoong, W., J.S. Park, K. Kim, and Y.J. Park (2000) Removal characteristics of a compost as filling material in biofiltering BTEX gases, *J. Korean Organ. Res. Recycl.*, 8(2), 53-59.
- No, S.Y., K.H. Kim, J.H. Choi, S.D. Han, I.S. Kil, D.H. Kim, and Y.W. Rhee (2008) Adsorption characteristics of VOCs in activated carbon beds, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(4), 455-469. (in Korean with English abstract)
- Park, S.H. and C.Y. Park (2000) Effects of the block distance of collecting plate and particle size on the particle deposition efficiency in the two-stage electrostatic precipitator, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 16(2), 165-177. (in Korean with English abstract)
- Seo, J.M., M.S. Jung, B.K. Jeon, K.C. Choi, J.W. Park, and J.H. Park (2006) A device performance measurement a small size electric precipitator for a indoor air purification, *Proceeding of the 43th Meeting of KOSAE* (2006).
- Shin, W.H., W.S. Hong, and D.K. Song (2010) Relationship between ICAC EP-7 and %RMS, standards for gas flow uniformity inside electrostatic precipitators, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(2), 234-240.
- Song, D.K., S.H. Jung, W.S. Hong, W.H. Shin, S.H. Shim, B.M. Han, H.J. Kim, and Y.J. Kim (2009) Removal efficiency of PM<sub>2.5</sub> using electrostatic precipitators, *Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE* (2009).
- Yang, J.Y., H.H. Kim, D.C. Shin, Y.S. Kim, J.R. Sohn, J.H. Kim, and Y.W. Lim (2008) Health risk assessment of occupants in the small scale public facilities for aldehydes and VOCs, *J. Environ. Sci.*, 17(1), 45-56.