

# 나노 은입자가 침착된 활성탄의 포름알데히드 제거특성 Removals of Formaldehyde by Silver Nano Particles Attached on the Surface of Activated Carbon

신승규 · 강정희 · 송지현<sup>†</sup>  
SeungKyu Shin, JeongHee Kang JiHyeon Song<sup>†</sup>

세종대학교 토목환경공학과  
Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

(2010년 9월 18일 접수, 2010년 10월 22일 채택)

**Abstract :** This study was conducted to investigate formaldehyde removals by silver nano-particles attached on the surface of granular activated carbon (Ag-AC) and to compare the results to those obtained with ordinary activated carbon (AC). The BET analysis showed that the overall surface area and the fraction of micropores (less than 20Å diameter) of the Ag-AC were significantly decreased because the silver particles blocked the small pores on the surface of the Ag-AC. The formaldehyde removal capacity of the Ag-AC determined using the Freundlich isotherm was higher than that of AC. Despite the decreased BET surface area and micropore volume, the Ag-AC had the increased removal capacity for formaldehyde, presumably due to catalytic oxidation by silver nano-particles. In contrast, the adsorption intensity of the Ag-AC, estimated by 1/n in the Freundlich isotherm equation, was similar to that of the ordinary AC, indicating that the surface modification using silver nano-particles did not affect the adsorption characteristics of AC. In a column experiment, the Ag-AC also showed a longer breakthrough time than that of the AC. Simulation results using the homogeneous surface diffusion model (HSDM) were well fitted to the breakthrough curve of formaldehyde for the ordinary AC, but the predictions showed substantial deviations from the experimental data for the Ag-AC. The discrepancy was due to the catalytic oxidation of silver nano-particles that was not incorporated in the HSDM. Consequently, a new numerical model that takes the catalytic oxidation into accounts needs to be developed to predict the combined oxidation and adsorption process more accurately.

**Key Words :** Formaldehyde, Silver Nano-particle, Activated Carbon, Catalytic Oxidation, Breakthrough Curve

**요약 :** 본 연구에서는 나노 사이즈의 은입자가 침착된 입상활성탄을 적용하여 기체상 포름알데히드의 흡착특성을 확인하고 실험결과를 수치해석 결과와 비교 평가하였다. 나노 은입자 침착활성탄에 대해 BET분석 결과, 나노 은입자가 활성탄 표면의 미세기공을 막아 활성탄의 비표면적이 다소 감소하였으며, 특히 20Å 이하 micropore의 총 부피가 크게 감소한 것을 확인하였다. 포름알데히드에 대한 등온흡착실험 결과, 최대 겉보기 흡착능은 나노 은입자 침착활성탄의 값이 일반활성탄에 비해 높았다. BET 표면적이나 미세기공의 감소에도 불구하고 나노 은입자 침착활성탄이 향상된 포름알데히드 제거능을 나타낸 것은 은입자 침착활성탄에서 흡착 외에 추가적인 포름알데히드의 촉매산화가 이루어지고 있기 때문으로 판단된다. 흡착강도를 의미하는 1/n은 두 가지 활성탄에 대해 모두 비슷한 기울기를 보여 활성탄의 표면 개질에 의해 활성탄 고유의 물리 화학적 흡착 성능은 영향을 받지 않은 것으로 판단된다. 연속유입 실험 결과에서도 나노 은입자 침착활성탄이 일반활성탄보다 높은 포름알데히드 제거능을 나타내어 포름알데히드 산화효과를 확인하였다. 활성탄의 연속유입 실험결과를 수치해석 결과와 비교했을 때 나노 은입자 침착활성탄에 대해서는 나노 은입자에 의한 산화효과를 반영하지 않고 있지 않아 실험결과와 거의 일치하지 않았다. 따라서 금속물질로 표면 개질된 활성탄 컬럼 설계에 수치해석 모델을 활용하고자 한다면 흡착뿐만이 아니라 촉매산화 효과가 반영된 새로운 수치모델의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

**주제어 :** 포름알데히드, 나노 은입자, 활성탄, 촉매산화, 파과곡선

## 1. 서론

하루의 80% 이상을 실내에서 생활하고 있는 현대인들은 실내공기 오염에 의해 심각한 건강상의 위협을 받고 있다. 특히 에너지 절감을 위한 건축물의 밀폐화가 이루어져 실내공기의 정제 및 오염물질의 축적에 의한 오염도는 심각한 상태에 이르고 있다. 더욱이 삶의 질에 대한 욕구가 증대되고 있어, 실내공기 오염에 따른 현기증, 메스꺼움, 두통, 눈의 자극 등을 유발하는 새집증후군이나 빌딩증후군과 같은 질병은 사회적 이슈가 되고 있다.<sup>1-3)</sup>

실내대기오염의 대표적인 화학물질로는 가구나 내장재에서 배출되는 포름알데히드를 들 수 있다. 포름알데히드는 자극적인 냄새를 가지는 가연성 기체로서 1 ppm 이상의 농도에 단기적으로 노출 시 점막 자극, 두통, 어지러움 및 목, 코 등에 이상 증상을 초래하며, 장기 노출 시 피부염, 기침, 천식 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 또한 포름알데히드는 새집증후군(Sick house syndrome), 빌딩증후군(Sick building syndrome), 화학물질과민증(multiple chemical syndrome)의 주요 원인 물질로도 알려져 있다.<sup>4)</sup> 이러한 위험성 때문에 세계보건기구(WHO)에서는 30분 동안 80 ppb,

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: songjh@sejong.ac.kr Tel: 02-3408-3819 Fax: 02-3408-4332

홍콩에서는 8시간 기준 24 ppb를 실내공기질 기준으로 설정하고 있고, 국내에서는 노동부에서 사무실 8시간 기준 100 ppb, 환경부에서는 다중이용시설 실내 농도 기준 100 ppb로 제한하고 있다.

포름알데히드와 같은 휘발성유기화합물의 일반적인 처리 방법에는 흡착, 세정, 고도산화 등이 적용되고 있으며, 그 중에서도 활성탄을 이용한 흡착 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다.<sup>7)</sup> 활성탄은 내부에 다수의 세공(pore)을 보유하여 보통 800~1,500 m<sup>2</sup>/g의 넓은 비표면적을 가지고 있는 것이 특징이다. 활성탄에 의한 흡착은 기공내부로의 확산, 모세관 응축 등의 메커니즘을 통해 오염물질을 흡착 및 보전할 수 있다. 그러나 활성탄의 흡착능력이 탁월하기는 하나 포름알데히드와 같은 극성 물질의 흡착은 상대적으로 어렵다. 특히 흡착능이 높은 비극성 물질과 극성 물질이 동시에 활성탄 흡착층에 유입될 경우 흡착능의 차이로 인해 기 흡착된 극성 물질이 탈착(desorption)되어 2차 오염을 야기시킬 수도 있다. 이를 개선하기 위해 다양한 방법을 이용한 활성탄 표면 개질에 대한 연구가 이루어지고 있다. 활성탄의 표면개질은 주로 나노 사이즈의 전이금속이나 화학적 첨가물을 활성탄 표면에 부착시켜 화학적 반응을 통해 특정 오염물질에 대한 선택적인 흡착능을 향상시키거나 전이금속에 의한 오염물질의 산화를 통해 추가적인 오염물질의 제거를 유도한다.

최근 은(silver)을 다양한 방법으로 활성탄 표면에 부착시켜 활성탄 표면 개질에 사용하고 있다. 은은 귀금속으로 인류의 역사에서 오랫동안 사용되어 왔으며 현대에는 귀금속으로서의 용도 뿐 만아니라 화학, 생명공학 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 특히 나노 테크놀로지의 발달로 나노 사이즈의 은을 의약품 및 화장품에 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며 메탄올의 부분산화를 통한 포름알데히드의 제조 공정에서도 촉매로서 사용되고 있다.<sup>11)</sup>

나노 은입자에 의한 산화효과는 입자표면의 활성산소에 기인한다. 일반적으로 금속 표면에는 산소나 질소 등 무기 기체가 흡착되는데 흡착 여부나 흡착 세기는 금속의 전자적 성질에 따라 크게 달라진다. 금속 박막에 대한 기체의 화학 흡착 여부에 따라 금속을 그룹 별로 분류할 수 있는데, 은(Ag)이 속한 그룹의 금속들은 다른 기체의 흡착은 거의 나타나지 않으나 O<sub>2</sub>는 강하게 흡착되는 특성을 가지고 있다. 금속 표면에 흡착된 산소 분자는 전자를 주고받아 활성산소로 전환되며 금속 표면 주위의 물질들을 산화시킨다. 따라서 은입자의 구조는 활성산소를 안정적으로 보유할 수 있는 구조로 되어 있으며 표면의 활성산소에 의해 유기물질 산화가 이루어진다.<sup>12)</sup> 결과적으로 미세결정을 이루고 있는 은입자의 표면은 활성산소와 결합되어 있어 미생물이나 바이러스, 유기물 등을 산화시킬 수 있다. 나노 은입자를 활용할 경우 나노 크기의 넓은 금속표면적을 이용하여 다양한 오염물질의 촉매산화 효과도 기대할 수 있다.

본 연구에서는 실내대기오염의 원인물질인 포름알데히드의 제거를 위해 표면에 나노 크기의 은입자를 부착시킨 활

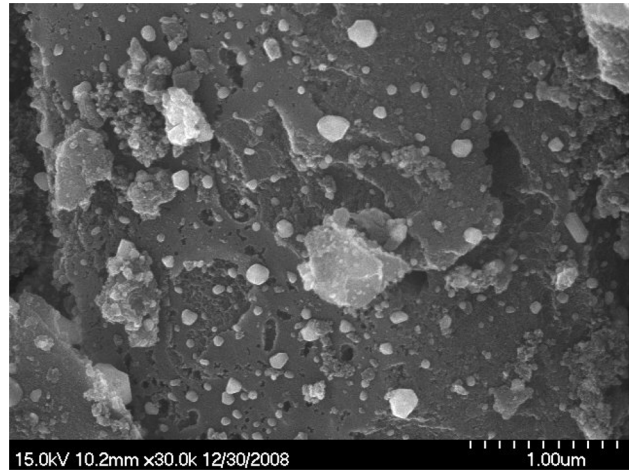


Fig. 1. SEM image of nano-silver particles on the surface of granular activated carbon.

성탄을 적용하였으며, 등온흡착실험 및 column 연속유입실험을 통해 흡착특성을 확인하고 수치해석을 통해 실험결과와 비교하였다. 이를 통해 얻어진 일련의 결과를 나노 은 침착활성탄 흡착층 설계의 기초자료로 사용하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험재료

본 연구에서는 진공 증착 방법인 스퍼터링(sputtering)을 이용하여 입상활성탄(Granular Activated Carbon, Calgon, BPL 8×30 mesh) 표면에 나노 금속입자를 부착시켜 제조한 나노 은 침착활성탄을 실험에 사용하였다. Fig. 1은 나노 은입자 침착활성탄의 표면을 주사전자현미경(Scanning Electronic Microscope, SEM)으로 촬영한 사진이다. SEM 사진에서 확인할 수 있듯이 둥그랗고 하얀 나노 은입자가 활성탄 표면에 고르게 분포하고 있으며 대부분의 나노 은입자의 입경은 20~50 nm이었다. 활성탄 표면에 침착된 나노 은입자의 농도는 1,000 mg/kg으로 제조하였다.

### 2.2. 등온흡착 실험

활성탄의 흡착능력을 비교평가하기 위하여 기상 포름알데히드에 대한 등온흡착 실험을 수행하였다. 실험은 250 mL 크기의 유리병에 0~0.3 g 범위에서 활성탄을 임의의 무게로 채우고 10~100 ppm 농도범위의 포름알데히드를 유리병 입구의 Teflon septa를 통해 주입하였다. 기상 포름알데히드와 활성탄이 채워진 유리병을 온도 25℃의 교반기에서 흔들며 흡착실험을 진행하였으며, 24시간이 지난 후 유리병 내부의 잔류 포름알데히드의 농도를 측정하였다. 포름알데히드의 평형 농도와 활성탄 흡착량을 Freundlich식에 적용하여 등온흡착곡선과 흡착상수 값을 추정하였다.

$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (1)$$

여기서,  $q_e$ 는 평형 흡착량(mg/g),  $C_e$ 는 평형 농도(mg/L),  $K$ 는 흡착능,  $1/n$ 은 흡착 강도를 나타낸다.

### 2.3. 연속유입 실험 및 흡착량 계산

Fig. 2는 포름알데히드 연속 유입 실험장치를 나타내고 있다. 포름알데히드가 채워져 있는 탱크에 일정량의 공기를 보내 기포를 발생시킴으로써 가스 상태의 증기가 발생하며, 이 공기 유량을 조절하여 일정한 농도의 포름알데히드 오염기체를 생성하였다. 유량 조절은 질량유량조절기(mass flow controller)와 컴프레서(Compressor)를 이용하였다. 포름알데히드는 시약급을 사용하였으며 포름알데히드에 오염된 공기는 원하는 농도가 유지되었을 때 활성탄이 채워진 컬럼(Column)으로 통과시켜 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 포름알데히드의 최종 출구농도( $C_e$ )가 유입농도( $C_0$ )의 10%가 되는 순간( $C_e/C_0 = 0.1$ )을 파과점(breakthrough point)으로 정의하였으며, 출구농도가 유입농도와 같은 수준( $C/C_0 = 1$ )이 되었을 때를 흡착 평형으로 간주하고 흡착실험을 종료하였다. 흡착량은 활성탄의 파과곡선에서 흡착질의 농도가 허용한계 이상이 되는 시간까지 흡착층에 흡착된 흡착질의 양을 의미하며 다음 식을 이용해 흡착량을 계산할 수 있다.

$$q = \frac{1}{W_{ad}} C_0 Q (t_T - \frac{1}{C_0} \int_0^{t_r} C_i dt) \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 평형흡착량(mg/g),  $C_0$ 와  $C_i$ 는 각각 유입농도와 임의시간에 출구에서의 농도(ppm),  $W_{ad}$ 는 흡착제 총진량(g),  $t_r$ 는 흡착제가 더 이상 흡착하지 않고 포화에 이른 시간(min),  $Q$ 는 유입되는 포름알데히드 함유 가스의 유량(L/min)을 의미한다.<sup>5)</sup>

### 2.4. 분석방법

등온흡착 실험에서 포름알데히드의 농도는 gas-tight syringe (Hamilton, USA)로 0.5 mL을 채취하여 즉시 GC/FID(HP 6890, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였다. 연속유입실험에서는 전기화학방식의 측정기(MultiRAE plus, RAE sys-

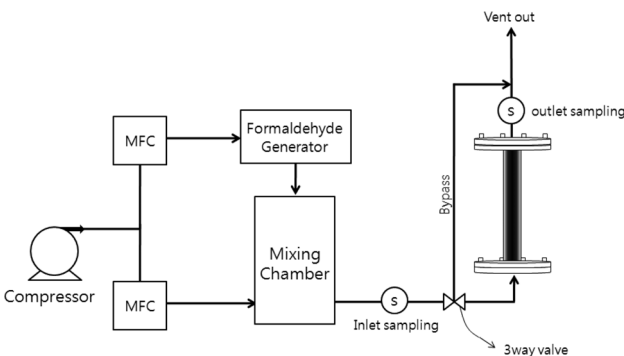


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup used in this study.

tem, USA)을 이용하여 포름알데히드의 농도변화에 대한 연속 data를 얻었으며, GC/FID 측정치와 비교하여 연속 측정 결과의 신뢰도를 확보하였다. 활성탄의 비표면적은 BET 비표면적측정기(Micromeritics, ASAP-2020, USA)를 이용하여 77K에서 질소( $N_2$ ) 흡착에 의한 활성탄 비표면적과 세공 부피를 측정하였다.

### 2.5. 흡착층의 수치해석

활성탄 흡착층의 설계에 수치해석을 통한 가상 모델링을 실시하는데 본 연구에서는 Homogeneous Surface Diffusion Model(HSDM)을 이용하였다. HSDM에서는 원통형 활성탄 컬럼(column)으로 유입된 오염물질(formaldehyde)이 분산(dispersion), 이류(advection) 및 흡착(adsorption) 과정을 거치면서 제거되는 흡착층의 모델로서 활성탄 내부로의 흡착과, 기상과 고체상에서의 오염물질 물질전달만을 고려하게 된다. 수치해석의 가정 사항은 다음과 같다.

- 필터 내에서 큰 규모의 난류(turbulence)는 없다.
- 여재의 구성은 균질하다(e.g.:공극률, 함수율, 활성탄 층의 두께)
- 촉매(Nano-silver) 표면과 bulk에서의 물질전달시 이류와 확산은 무시한다.
- 날개 활성탄 입자는 균일/균질하여 모든 영역에 걸쳐 일정하게 흡착이 이루어진다.

활성탄 입자 내부로의 오염물질 확산은 Flux(Fick's law)를 이용해 나타내었으며, 이를 고려한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{Column} : \frac{\partial C}{\partial t} = -V_s \frac{\partial C}{\partial z} - k_f(C - C_s) \frac{3(1-\varepsilon)}{r} \quad (3)$$

$$\text{Activated carbon} : \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial q}{\partial r}) \quad (4)$$

$$\text{Freundlich isotherm} : q_e = KC_e^{1/n} \quad (5)$$

여기서  $C$ 는 기상오염물질 농도(mg/L),  $C_s$ 는 gas/GAC 표면에서의 표화농도(mg/L),  $\varepsilon$ 는 공극율(-),  $V_s$ 는 공극에서의 기체 유속(cm/s),  $k_f$ 는 film transfer coefficient (cm/s),  $q$ 는 활성탄 흡착량 (mg-chemical/g-GAC),  $D_s$ 는 활성탄 표면 확산계수( $cm^2/s$ ).

본 연구에서는 HSDM을 이용한 흡착층 수치해석 프로그램인 AdDesigns™을 사용하였다. AdDesigns™에서는 편미분방정식으로 표현된 지배방정식들을 직교배열법(orthogonal collocation method)을 사용하여 상미분방정식으로 차분하여 근사해를 구한다. HSDM을 풀기 위해서는 흡착제의 일반적인 특성인 밀도와 반경, 그리고 등온흡착 실험에 의해서 구해지는 흡착계수  $K$ 와  $1/n$ 값이 필요하다. 이외에 포름알

데히드의 물질전달계수(surface diffusion coefficient,  $k_f$  (cm/s))와 표면확산계수(surface diffusion coefficient,  $D_s$  (cm<sup>2</sup>/s))가 필요하다. 특히 물질전달계수와 표면확산계수는 등온흡착 실험에 의해 구해지는 흡착계수( $K$ ,  $1/n$ )와는 달리 실제 흡착동역학 실험결과와 비교 평가하여 최종값을 선정하게 된다. 결론적으로 6개의 인자가 모두 구해지면 원하는 주어진 농도와 활성탄 투입량에서 흡착동역학 실험결과를 얻을 수 있게 된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. BET 분석

Table 1에는 본 연구에서 사용한 일반 입상활성탄과 나노 은입자 침착활성탄에 대한 BET 분석 결과를 나타내었다. 먼저 일반 입상활성탄이 나노 은입자 침착활성탄 보다 높은 비표면적을 나타내었으며, 이는 나노 은입자가 활성탄 표면의 미세기공을 막아 활성탄의 비표면적이 다소 감소한 것으로 보인다. 특히 나노 은입자 활성탄에서는 전체 세공(pore) 중 흡착에 주로 관여하는 직경 20Å 이하의 미세공(micropore)의 총 부피가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 세공 분포 특성을 실험한 결과를 살펴보면, 본 연구에서 사용된 일반 입상활성탄과 나노 은입자 침착활성탄의 전체 pore 부피는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 나노 은입자에 의해 영향을 받은 pore는 주로 micropore이며, 나노 입자 침착이 전체 pore volume의 감소에는 많은 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 전체 pore volume 중에서 micropore의 비율을 확인한 결과 전체 기공 부피 중 약 10% 수준의 micropore 부피가 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 흡착에 영향을 미치는 micropore가 감소하였으며 이는 활성탄의 고유 능력인 흡착능의 감소를 의미한다고 할 수 있다. Lee 등에 의하면 비표면적이 활성탄의 흡착능을 대표하지만 특히 직경 20Å 이하의 micropore가 활성탄의 흡착능에 주로 관여하며 같은 비표면적을 소유한 활성탄이더라도 미세기공의 분포에 따라 파과시간 등의 흡착 특성에 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.<sup>9,10)</sup>

#### 3.2. 등온흡착 실험

Fig. 3은 포름알데히드에 대한 일반 입상활성탄 및 나노 은입자 침착활성탄의 등온흡착실험 결과를 나타내고 있다. 활성탄의 비표면적 확인 결과 흡착에 관여하는 micropore가 감소했으므로 나노 은입자 침착활성탄의 포름알데히드

Table 1. Analytical result of activated carbon for surface area and pore distribution

	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (V <sub>T</sub> )	Micropore volume (V <sub>M</sub> )	V <sub>M</sub> /V <sub>T</sub>
AC	859.8	10.12	6.94	0.69
Ag-AC	636.9	10.04	5.61	0.55

흡착제거량이 일반 입상활성탄에 비하여 감소할 것으로 예상되지만, 등온흡착 실험결과에서는 나노 은 침착활성탄이 오히려 향상된 흡착 제거량을 나타내고 있다. 이는 나노 은 입자 침착활성탄에서 미세기공에 의한 흡착 외에 추가적인 포름알데히드의 제거가 이루어지고 있음을 의미한다. Table 2는 등온흡착실험으로부터 추정된 Freundlich 등온흡착식의 계수들을 나타낸다. 최대 겉보기 흡착능을 나타내는 K 값의 경우 나노 은입자 침착활성탄에서의 값이 일반 입상활성탄에 비해 약 25% 증가하였다. 이 결과들은 나노 은입자에 의한 포름알데히드의 산화에 기인하여 은입자 침착활성탄의 제거능이 증가한 것으로 판단된다. 즉 활성탄에 흡착된 포름알데히드가 은입자 표면에서 형성되는 활성산소에 의해 산화되고, 결과적으로 K값이 증가한 것으로 사료된다. 다시 말하면 실제 활성탄에 의한 포름알데히드 흡착량은 감소하였으나, 흡착 및 산화에 의한 포름알데히드의 총 제거율은 증가했다고 할 수 있다. 흡착강도를 의미하는

Table 2. Freundlich isotherm parameters determined in this study

Temperature @25°C	Activated carbon	Ag-activated carbon
$K$	13.5	17.9
$1/n$	0.60	0.58
$R^2$	0.932	0.958

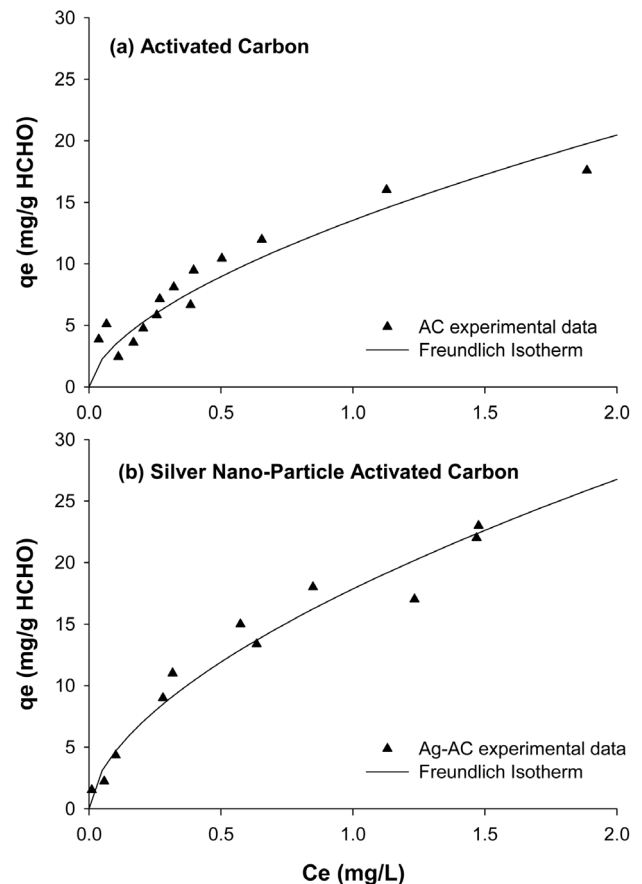


Fig. 3. Freundlich isotherm curves for formaldehyde.

1/n은 두 경우 모두 비슷한 기울기(slope)를 가지는 것으로 확인되었는데 이는 활성탄의 표면 개질에 의해 비표면적은 감소하였으나 활성탄 고유의 물리 화학적 흡착 성능은 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

### 3.3. 연속유입 실험

Fig. 4는 포름알데히드에 대한 일반활성탄 및 나노 은입자 침착활성탄의 컬럼 연속유입실험 결과를 나타낸다. 기체의 체류시간에 따른 흡착 특성을 확인하기 위하여 체류시간을 0.125, 0.25초로 변화시켜 실험을 진행하였다. 그림에서 보듯이 체류시간이 증가함에 따라 유입농도의 10%가 검출되는 파과시간(breakthrough time)이 일반 입상활성탄의 경우 156분에서 360분으로, 나노 은입자 침착활성탄의 경우는 304분에서 528분으로 증가함을 확인하였다. 일반적으로 체류시간의 증가는 유량 또는 유속의 감소를 의미하게 되는데 유속의 감소는 Re수를 감소시켜 컬럼 층의 물질 전달영역(mass transfer zone)을 감소시키고 흡착속도를 증가시키기 때문에 파과시간이 증가하는 원인이 된다.<sup>6-8)</sup>

활성탄에 의한 포름알데히드 제거량을 계산한 결과, 일반 입상활성탄에 비하여 나노 은입자 침착활성탄이 약 20~21%의 향상된 제거량을 보여준다. 활성탄의 흡착에 직접적인 연관이 있는 비표면적 또는 미세기공이 감소하였음에도 불구하고 활성탄의 포름알데히드 총 제거량이 증가한 것은 활성탄 표면의 나노 은입자에 의한 포름알데히드 산화효과 때문으로 사료된다. 결론적으로 활성탄에 의한 포름알데히드 흡착량은 감소하였지만 나노 은입자에 의한 포름알데히드 산화에 의해 총 제거량은 증가한 것이라고 할 수 있다.

### 3.4. HSDM 예측

Fig. 5(a)는 기체 체류시간 0.125초에서의 실험결과와 수치해석 프로그램을 이용한 예측결과를 비교한 그래프이며, 점(dot)은 실험결과 값을 점선(middle dash)은 수치해석 결과를 나타내고 있다. 수치해석에는 등온흡착실험에서 구한 Freundlich 상수(K, 1/n)를 적용하였다. 수치해석 결과에서 유출농도가 유입농도의 10%가 검출되는 파과시간은 173(Q<sub>t</sub>/V = 83296)분으로 예측되었으며, 대체적으로 일반 입상활성탄에 대한 컬럼 실험결과와 부합하는 경향을 나타내었다. 또한 그래프의 파과진행 양상(즉, 파과 상승점의 기울기)에서도 일반 입상활성탄에 대한 실험결과와 일치하는 경향을 나타내었다. 결론적으로 HSDM은 일반 입상활성탄에 대한 흡착동역학 실험결과를 잘 모사할 수 있으며 이를 활성탄 흡착탑 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 나노 은입자 침착활성탄의 포름알데히드 제거특성을 HSDM으로 예측하면, 실험결과와 예측결과가 크게 차이가 난다. 실제 실험으로 측정된 10%검출 파과시간(Fig. 5(b) (●) Q<sub>t</sub>/V = 145920)과 예측된 모델의 파과시간(Fig. 5(b) (---) Q<sub>t</sub>/V = 127547)이 12% 이상 차이가 나며, 특히 실

Table 3. Comparison of breakthrough time and adsorption/oxidation capacity

Residence Time (s)	Activated Carbon	T <sub>0.1</sub> at C=0.1C <sub>0</sub> (min)	T <sub>1</sub> at C=C <sub>0</sub> (min)	Observed q (mg/g)
0,125	AC	156	612	2256
	Ag-AC	304	756	2819
0,25	AC	360	1176	2204
	Ag-AC	528	1482	2795

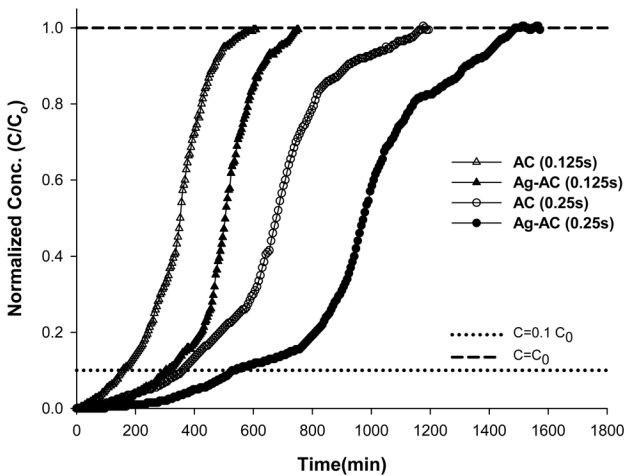


Fig. 4. Breakthrough curves of formaldehyde for activated carbon and Ag-activated carbon at different gas retention times.

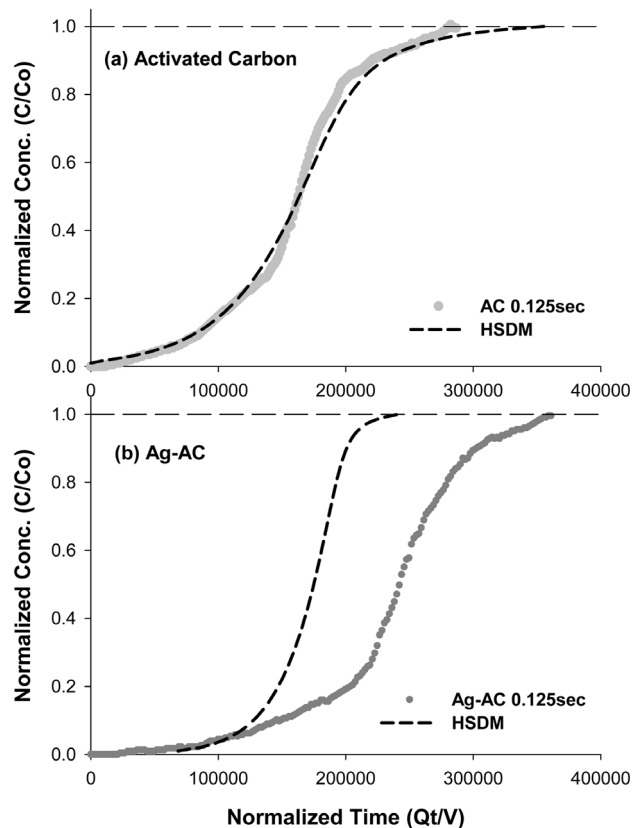


Fig. 5. Comparison of experimental data and numerical predictions using the HSDM model.

측한 파과점 상승 기울기가 명확하게 다르다. 이는 등은 흡착실험 결과에서 언급하였듯이, 나노 은입자에 의한 포름알데히드 산화효과에 의해 총 포름알데히드 제거량은 증가하였는데 HSDM에 근거하여 해석한 예측결과는 나노 은입자에 의한 산화효과가 고려되어 있지 않기 때문이다. 결과적으로 기존 활성탄 흡착 예측모델이 나노 은입자에 의한 산화효과를 반영하지 않고 있기 때문에, 금속 물질로 개질된 활성탄의 흡착 및 오염물질 제거 효율을 적절히 예측하기 위해서는 흡착뿐만이 아니라 촉매 산화 효과까지도 반영한 새로운 수치모델의 개발이 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구는 스퍼터링 방법을 이용해 제조된 나노 은입자 침착활성탄을 사용하여 포름알데히드 제거 성능을 일반 입상활성탄과 비교 평가하여 보았다. 또한 상용 수치해석 프로그램을 나노 은입자 침착활성탄의 설계에 적용할 수 있는지 수치해석 결과와 실험결과를 비교하였다. 일련의 실험 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 활성탄에 나노 은입자를 침착한 결과 BET표면적이 10% 가량 감소하였다. 특히 활성탄의 흡착성능에 직접 관여되어 있는 micropore의 부피 비율이 감소하여 나노 은입자 침착활성탄의 흡착성능이 다소 감소할 것으로 예상된다.

2) 등온흡착 실험 결과 흡착에 관여하는 micropore가 감소했음에도 불구하고 나노 은입자 침착활성탄이 향상된 포름알데히드 제거 성능을 나타내어 나노 은 침착활성탄에서 미세기공에 의한 흡착 외에 나노 은입자에 의한 산화효과로 추가적인 포름알데히드의 제거가 이루어지고 있음을 확인하였다.

3) 등온흡착실험으로부터 추정된 Freundlich 등온흡착식의 계수값을 추정한 결과, 최대 흡착능을 나타내는 K값의 경우 나노 은입자 침착활성탄의 값이 일반활성탄에 비해 약 25%가 증가했다. 흡착강도를 의미하는  $1/n$ 은 두가지 활성탄에서 비슷한 수치를 나타내어 활성탄의 표면 개질에 의해 활성탄 고유의 물리 화학적 흡착 성능이 큰 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

4) 연속유입 실험결과 일반 입상활성탄에 비하여 나노 은입자 침착활성탄이 약 20~21%의 향상된 포름알데히드 제거량을 나타내어 연속유입 실험에서도 나노 은입자에 의한 포름알데히드 산화효과가 나타났다.

5) 활성탄의 흡착동역학 실험결과를 수치해석 결과와 비교했을 때 일반 활성탄에 대한 실험결과는 잘 모사할 수 있으나 나노 은입자 침착활성탄에 대해서는 은의 산화효과를 반영하지 않아 실험결과와 거의 일치 하지 않았다. 따라서 나노 은입자 침착활성탄 흡착층에 대한 수치해석 모델을 활용할 경우 흡착과 동시에 산화효과가 반영된 새로운 수치모델의 개발이 요구된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

KSEE

#### 참고문헌

- Kim, S. S., Kang, D. H., Choi, D. H., Yeo, M. S. and Kim, K. W., “Comparison of strategies to improve indoor air quality at the pre-occupancy stage in new apartment buildings,” *Building Environ.*, **43**(3), 320~328(2008).
- Jeffrey, P. O. and Lim, S. F., “Airborne Concentrations of bacteria in a hospital environment in singapore,” *Water Air Soil Pollution*, **144**(1/4), 333~341(2003).
- Thron, A., “Sick building syndrome: a diagnostic dilemma,” *Soc. Sci. Med.*, **47**(9), 1307~1312(1998).
- Lee, S. C., Guo, Hai., Li, W. and Chan, L “Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong,” *Atmos. Environ.*, **36**, 1929~1940(2002).
- Lim, J. K., Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, D. W. and Lee, M. G., “Adsorption characteristic of toluene vapor in fixed-bed activated carbon,” *J. Environ. Sci.*, **14**(1) 61~69(2005).
- 최원준, 정종현, “ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  및  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  침착활성탄을 이용한  $\text{CO}_2$ 제거,” 한국환경보건학회지, **34**(3), 240~246(2008).
- 임진관, 이송우, 감상규, 이동환, 이민규 “고정층 활성탄 흡착반응기에서 기상 톨루엔의 흡착특성,” 한국환경과학회지, **14**(1), 61~69(2005).
- 김한수, 박영성, 민병무 “고정 흡착층에서 벤젠의 흡착 특성,” 대한환경공학회지, **23**(12), 1979~1988(2001).
- Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S. and Song, S. K., “Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(6), 620~625(2005).
- Lee, S. W., Kwon, J. H., Kang, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S. and Song, S. K., “adsorption characteristics of toluene vapor according to pore size distribution of activated carbon,” *J. Environ. Sci.*, **15**(7), 695~699(2005).
- Gosheger, G., Harges, J., Ahrens, H., Streitburger, A., Buerger, H., Erren, M., Gunsels, A., Kemper, F. H., Winkelmann, W., and Von Eiff, C., “Silver-coated megaendoprostheses in a rabbit model - an analysis of the infection rate and toxicological side effects,” *Biomaterials*, **25**(24), 5547~5556(2004).
- Imamura, S., Imakubo, K., Furuyoshi, S. and Jindai, H., “Decomposition of dichlorodifluoromethane on boron phosphate ( $\text{BPO}_4$ ) catalyst,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**(10), 2355~2358(1991).