

# 암모니아 가스 제거용 개질 활성탄의 표면특성

## Surface Properties of Modified Activated Carbon for Ammonia Gas Removal

이성우 · 오길용 · 김리나 · 김대근\*

서울과학기술대학교 환경공학과 폐자원바이오매스에너지화센터  
(2013년 4월 29일 접수, 2013년 5월 22일 수정, 2013년 5월 22일 채택)

Seongwoo Lee, Gilyong Oh, Rina Kim and Daekeun Kim\*  
*Waste-resource Biomass Energy Center, Department of Environmental Engineering,  
Seoul National University of Science and Technology*

(Received 29 April 2013, revised 22 May 2013, accepted 22 May 2013)

### Abstract

This research assessed the surface properties of modified activated carbons with three different acids and five different metals for ammonia gas removal. Raw bituminous coal-based activated carbon (4 × 8 mesh) had low adsorption capacity of 0.72 mg NH<sub>3</sub>/g based on the analysis in the column adsorption experiment. Adsorption capacities of carbons modified with CH<sub>3</sub>COOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> increased up to 3.34, 21.00, and 35.21 mg NH<sub>3</sub>/g, respectively. Those of carbons with Cu, Zn, Zr, Fe, and Sn were 9.63, 9.13, 7.09, 25.12 and 15.03 mg NH<sub>3</sub>/g. Ammonia adsorption was enhanced by the presence of surface oxygen groups on carbon materials, which influenced pH of carbon surface. BET surface area of raw carbon was analyzed to be 1087 m<sup>2</sup>/g, but it decreased by carbon surface modification. Fe-impregnated carbon showed 503.02 m<sup>2</sup>/g of surface area. These observations were mostly caused by chemical adsorption.

**Key words** : Activated carbon, Ammonia, Impregnation, Adsorption capacity

## 1. 서 론

국민의 소득수준이 향상되면서 쾌적한 환경을 원하는 욕구가 증대되어 악취공해가 새로운 환경문제로 부상하였다. 정부는 악취문제를 해결하기 위하여

2005년부터 악취방지법을 시행하고 있다. 하지만 악취 민원은 2005년 4,302건에서 2011년도 8,372건으로 지속적인 증가추세를 보이고 있다(Korea Ministry of Environment, 2012).

암모니아는 악취를 유발하는 질소계 악취물질이며, 환경기초시설 및 산업시설 등의 다양한 경로를 통하여 대기 중으로 배출된다. 환경기초시설 중 하수처리장에서는 수 ppm 범위에서 발생하며(Lee *et al.*, 2012), 생활폐기물 자동집하시설에서는 1.8~10.8 ppm범위

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)2-970-6606, E-mail : kimd@seoultech.ac.kr

로 발생하는 것으로 보고되었다(Yoon and Kim, 2012). 또한 생활폐기물 매립지에서는 0.063~7.17 ppm의 암모니아가 발생하는 것으로 조사되었다(Son *et al.*, 2007). 산업시설 중 도금시설과 주물시설 등에서는 약 1 ppm범위에서 발생된 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2011).

암모니아는 흡착공정, 흡수공정, 생물공정 등으로 처리 가능하며, 이 중 흡착공정은 실리카겔, 제올라이트, 활성 알루미늄, 활성탄 등이 흡착제로 이용된다. 흡착제 중 활성탄은 다목적 흡착제로서 많이 사용되는 재질로 알려져 있으며 활성탄 흡착 공정을 이용한 응용은 산업공정에서 발생하는 가스 제어뿐만 아니라 실내공기 정화, 가스 정제에도 이용된다(Banasala and Goyal, 2005).

활성탄은 원재료 종류에 따라 아자계와 석탄계 등으로 구분되며 고온의 상태에서 제조되어 비표면적이 500~1500 m<sup>2</sup>/g으로 형성되는 것으로 알려져 있다. 하지만 암모니아와 황화수소 등과 같이 분자량이 상대적으로 작거나 극성을 가진 물질에는 활성탄의 표면이 일반적으로 비극성이기 때문에 가스흡착에 불리한 것으로 알려져 있다. 활성탄 흡착은 일반적으로 물리적 흡착에 기초하고 있으며, 활성탄 표면을 개질함으로써 화학적 흡착을 도모할 수 있다. 활성탄의 화학적 흡착을 위해서는 표면에 산소와 수소, 질소 등을 포함한 작용기(Functional group)가 필요하다. 산소를 포함한 작용기에는 카르보닐기(-C=O), 카르복실기(-COOH), 페놀릭기(ArOH) 등이 있으며 물리적 흡착에 취약한 물질들을 산화시킬 수 있는 장점이 있다(Banasal and Goyal, 2005; Kim *et al.*, 2005).

활성탄의 화학적 흡착을 유도하기 위하여 산 또는 중금속을 침착(添着)하여 활성탄 표면을 개질하는 연구가 진행 중에 있다. Huang *et al.* (2008)의 연구에서는 12 N 질산을 활성탄에 침착한 후 10,000 ppm의 암모니아 가스 흡착 실험을 수행한 결과 흡착능이 일반 활성탄에 비하여 8.2배 증가하였다고 보고하였다. Somy *et al.* (2009)의 연구에서는 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, ZnCO<sub>3</sub>·Zn(OH)<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 이용한 침착 활성탄으로 CO<sub>2</sub> 가스 흡착 실험을 통해 흡착능이 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구는 산과 중금속으로 표면을 개질한 활성탄을 이용하여 암모니아 가스를 흡착 처리하고자 하였다. 석탄계 입자활성탄으로 컬럼흡착 실험을 구성하

여 암모니아 흡착능을 우선적으로 산출하였으며, 활성탄의 표면특성(표면산소함량, 표면 pH, BET 및 SEM 분석)을 분석하여 흡착능과의 상관관계를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 침착 활성탄 제조

본 연구에 사용된 활성탄은 4×8 mesh 크기의 석탄계 활성탄(JCG-20, 자연과학산업(주))이며, 모든 실험에서 증류수로 3회 세척 후 완전 건조하여 사용하였다. 침착 활성탄을 제조하기 위하여 선정된 산 침착 물질은 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), 아세트산(CH<sub>3</sub>COOH)이며 5 wt% 용액으로 제조하였다. 중금속 침착 물질은 구리(CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 염화제이구리 이수화물), 아연(ZnOCl<sub>2</sub>, 염화주석), 지르코늄(ZrOCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O, 염화지르코닐), 철(FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, 염화제이철), 주석(SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 염화제이주석)으로 산 침착 용액과 동일한 농도로 제조하였다. 세척·건조된 일반 활성탄을 제조된 용액에 함침시킨 후 원활한 침착을 위하여 1시간 동안 초음파를 가하였다. 이후 활성탄만을 용기에 담아 110°C로 유지되는 항온조에 24시간 동안 건조하고 보관하였다.

### 2.2 파과실험 장치

본 연구의 파과실험에는 아크릴 재질의 원통반응기가 사용되었으며, 반응기의 전체 부피는 184 mL이었다(내부직경 30 mm, 높이 260 mm). 모든 실험에서 반응기에 충전된 활성탄의 높이는 30 mm이었다. 암모니아(N<sub>2</sub> balance, Air Korea Inc., Korea)의 유입농도는 300 ppm(질량부하량, 0.64 mg/cm<sup>3</sup>/hr)이었으며, 1 L/min의 유량으로 반응기에 유입되었다. 암모니아 가스의 공탑체류시간은 12초였다.

### 2.3 분석방법

암모니아 가스의 유출 농도는 광이온화방식(PID)의 센서(TG-501, Graywolf Sensing Solution, US)를 사용하여 실시간 측정되었으며, 유입농도의 10% 이상의 가스가 유출될 때까지 측정하였다.

활성탄 표면의 특정 성분을 알기 위하여 EDS(Energy dispersive X-ray Spectroscopy, Voyager, Noran Instruments, Inc)을 사용하였으며 20 kV조건에서 분

석되었다. 활성탄의 기공분포특성을 파악하기 위하여 표면특성분석장치 (ASAP-2010, Micromeritics Inc.)를 사용하였으며, 분석온도는 77 K (질소의 끓는점)이었다. 활성탄의 표면구조를 관찰하기 위하여 SEM (JSM-6700F, JEOL Co.)을 10kV, ×1,000배의 조건으로 사용하였다. 활성탄 표면의 pH를 측정하기 위하여 0.4 g의 활성탄을 20 mL의 증류수에 넣어 2시간동안 교반 후 pH를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 파과실험결과

그림 1은 실험에서 사용된 산과 중금속 침착 활성탄의 암모니아 가스 제거 파과곡선을 보여주고 있다.

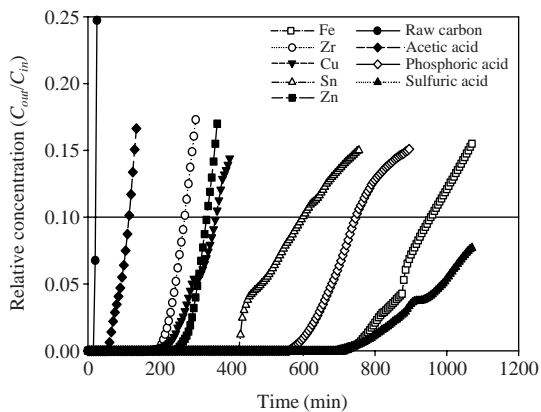


Fig. 1. Breakthrough curves of modified activated carbons with metal and acid based materials.

파과점 도달시간을 암모니아 유입농도의 10%가 유출되는 시점으로 볼 경우, 각 활성탄에 의한 암모니아 흡착량과 흡착능은 식(1)과 식(2)로 계산된다.

$$M_{ads} = Q C_0 \int_0^t \left(1 - \frac{C_{out}}{C_i}\right) dt \quad (1)$$

$C_i$ 와  $C_{out}$ 은 암모니아 가스의 유입농도와 유출농도 (mg/L),  $t$ 는 흡착시간 (min),  $Q$ 는 유량 (L/min),  $M_{ads}$ 는 흡착된 량 (mg)이다.

$$W = \frac{M_{ads}}{M_L} \quad (2)$$

$M_L$ 은 흡착에 사용된 활성탄의 양이며  $W$ 는 흡착능 (mg/g)으로 표현된다. 계산된 파과시간과 흡착능은 표 1에 제시되었다.

표 1에 제시된 결과로부터 산 또는 중금속 침착 활성탄이 일반 활성탄보다 높은 흡착능을 확인할 수 있으며, 황산 > 철 > 인산 > 주석 > 구리 > 아연 > 지르코늄 > 아세트산 순으로 높은 암모니아 흡착능을 보이고 있다. 일반 활성탄의 경우 분자량이 상대적으로 작고 극성 물질인 암모니아 가스에 대해 물리적 흡착력이 낮았다. 침착 활성탄의 경우 산 또는 중금속 침착에 의한 화학적 흡착이 흡착능을 향상시킨 것으로 보인다. 또한 산 또는 금속의 침착에 의해 활성탄 표면의 특성 변화가 흡착능에 영향을 미친 것으로 판단된다. Huang et al. (2008)의 연구에서는 1,000 ppm의 암모니아 가스 유량을 800 mL/min으로 실험한 결과 12 N 질산으로 침착된 활성탄의 흡착능이 29.80 mg NH<sub>3</sub>/g으로 일반 활성탄보다 28.1배 증가한 것으로 보고하였다.

Table 1. Adsorption capacity and breakthrough time of modified activated carbon with metal and acid based materials.

	Samples	Used activated carbon mass (g)	Adsorption capacity (mg NH <sub>3</sub> /g)	Breakthrough time (min)
Raw carbon	AC	6.160	0.72 (1) <sup>a</sup>	33 (1) <sup>a</sup>
Acid-modified carbons	CH <sub>3</sub> COOH-AC	6.863	3.43 (4.76)	115 (3.48)
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -AC	7.280	21.00 (29.17)	746 (22.61)
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -AC	6.809	35.21 (48.90)	1170 (35.45)
Metal-modified carbons	Cu-AC	7.570	9.63 (13.38)	356 (10.79)
	Zn-AC	7.431	9.13 (12.68)	331 (10.03)
	Zr-AC	7.772	7.09 (9.85)	269 (8.15)
	Fe-AC	7.789	25.12 (34.89)	955 (28.94)
	Sn-AC	8.166	15.03 (20.88)	599 (18.15)

<sup>a</sup>Relative value between modified activated carbon and raw carbon

### 3.2 활성탄 표면의 산소함량

표 2는 침착 활성탄의 성분분석 결과를 보여주고 있다. 일반 활성탄은 침착처리가 되지 않은 상태에서 2.09%의 산소를 포함하고 있었다. 침착 활성탄은 일반 활성탄에 비하여 산소가 증가하는 경향을 보여주고 있다.

그림 2는 산소함량과 흡착능과의 관계를 보여주고 있으며 산과 중금속을 침착한 활성탄의 기율기 차이가 확인된다. 산 침착 활성탄의 경우 아세트산 침착 활성탄은 산소함량이 2.66%이었으며 인산 8.29%, 황산 12.4%이었다. 산 침착 활성탄의 산소함량과 흡착능과의 결정계수는 0.999로 높은 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 반면에 중금속 침착 활성탄은 지르코늄이 2.95%, 구리 3.98%, 주석 15.03%, 아연 13.9%, 철 32.91%이었으며 산소함량과 흡착능과의 결정계수는 0.850을 나타냈다. 이와 같이 산소함량이

증가할수록 흡착능도 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 활성탄 표면에 산소함량이 증가한다는 것은 활성탄 개질을 통해 표면에 산소를 포함한 작용기가 생성되었음을 의미하며, 이로 인하여 화학적 흡착능이 향상된 것으로 유추해볼 수 있다 (Guo *et al.*, 2005). Li *et al.* (2011)의 연구에서도 EDS 분석을 통하여 활성탄 표면의 산소 함유량을 확인하였으며, Boehm 적정법을 통하여 페놀릭기 (ArOH), 락톤기 (-CO-O-(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>), 카복실기 (-COOH)의 농도를 확인하였다. 또한 이 작용기가 암모니아 가스를 산화시킴으로써 화학적 흡착능이 향상되었다고 보고하였다.

### 3.3 활성탄 표면 pH의 영향

그림 3은 산과 중금속을 침착한 활성탄의 표면 pH와 흡착능과의 관계를 보여주고 있다. 산과 중금속을 침착한 활성탄은 표면 pH가 낮을수록 암모니아 가

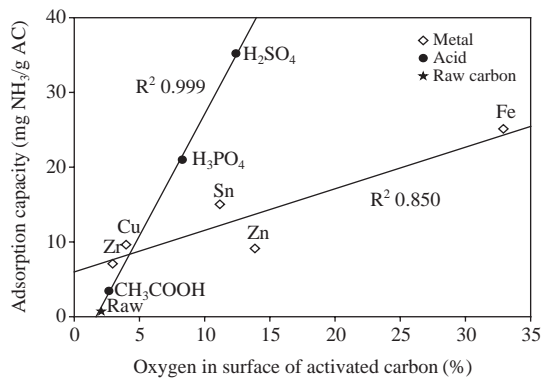


Fig. 2. Effect of oxygen content of carbon surface on ammonia adsorption.

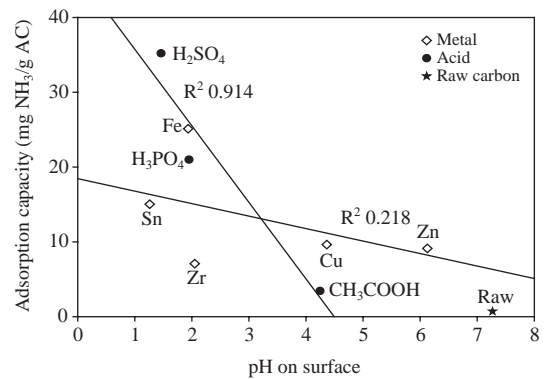


Fig. 3. Effect of surface pH of activated carbons on ammonia adsorption.

Table 2. Elemental analysis of activated carbon with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

Samples	C (wt.%)	O (wt.%)	Others (wt.%) <sup>a</sup>
Raw carbon	96.95	2.09	0.96
Acid-modified carbons			
CH <sub>3</sub> COOH-AC	95.91	2.66	1.43
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -AC	88.79	8.29	2.92
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -AC	81.42	12.42	6.16
Metal-modified carbons			
Cu-AC	85.46	3.98	10.56
Zn-AC	75.37	13.9	10.73
Zr-AC	88.38	2.95	8.67
Fe-AC	40.49	32.91	26.6
Sn-AC	68.54	11.17	20.29

<sup>a</sup>Mg, Al, Si, S, P etc.

**Table 3. Physical characteristics of modified activated carbon based on BET analysis.**

	Samples	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume <sup>a</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	Average pore diameter (nm)
Raw carbon	AC	1087.7	0.6361	2.3392
	CH <sub>3</sub> COOH-AC	1025.4	0.6381	2.4892
Acid-modified carbons	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -AC	1019.8	0.5981	2.3462
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -AC	980.62	0.5750	2.3454
Metal-modified carbons	Cu-AC	852.87	0.3899	1.8284
	Zn-AC	918.09	0.4248	1.8509
	Zr-AC	947.39	0.4340	1.8323
	Fe-AC	503.02	0.2331	1.8536
	Sn-AC	939.53	0.4253	1.8108

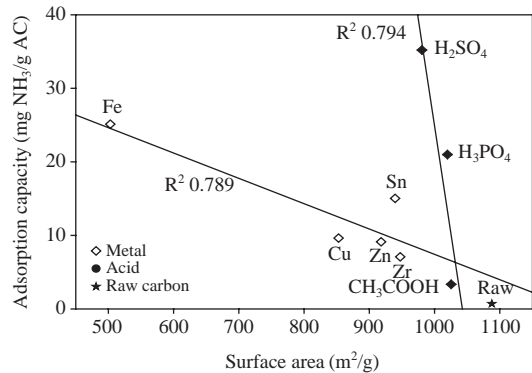
<sup>a</sup>p/po=0.995 for raw and metal-modified carbons; p/po=0.313 for metal-modified carbon

스 흡착능이 증가하였다. 산을 이용한 침착 활성탄의 경우 0.914의 결정계수로 음의 상관관계를 나타냈으며 중금속을 이용한 침착 활성탄의 경우 0.218의 음의 상관관계수를 보여 산성이 될수록 흡착능이 증가하는 경향은 산을 이용한 활성탄에서 뚜렷이 나타났다. Cui *et al.* (2008)와 Maraisa *et al.* (2011)의 연구에서도 pH가 낮을수록 흡착능이 증가하는 경향을 보고하였다. 산 또는 중금속을 활성탄 표면에 침착할 경우 다양한 작용기들이 존재한다는 것을 간접적으로 알려주고 있다(Boehm, 1994). pH가 산성이 되는 이유는 활성탄 표면에 산 기능기를 포함하고 있을 것으로 판단된다. 활성탄 표면에 존재하는 산 기능기는 카르복실기(-COOH), 카르보닐기(-C=O), 페놀릭기(ArOH) 등이 있다(Li *et al.* 2011; Bandosz and Petit, 2009; Boehm, 1994).

본 실험에서는 pH를 측정된 방법으로 기능기를 간접적으로 파악할 수 있었으나 이외에도 FT-IR (Fourier Transform-Infrared Spectroscopy)을 이용하여 각각의 기능기를 바로 파악할 수 있다. Bandosz and Petit (2009)의 연구에서는 중금속을 이용하여 침착된 활성탄의 FT-IR 분석을 통하여 카르복실기(-COOH)를 확인하였다. 또한 황산을 이용한 침착 활성탄에서 FT-IR 실험결과 주된 기능기는 카르복실기(-COOH)와 수산기(-OH)로 분석되었다(Huang *et al.*, 2008).

**3. 4 활성탄 표면의 물리적 특징**

표 3은 활성탄의 기공특성을 보여주고 있다. 일반 활성탄의 비표면적은 1087.7m<sup>2</sup>/g이었으며 침착한 활성탄은 그 이하를 나타냈다. 중금속을 침착한 활성탄



**Fig. 4. Effect of surface area of activated carbons on ammonia adsorption.**

이 산을 침착한 활성탄보다 비표면적의 감소 경향이 뚜렷하였으며 이 중 철을 침착한 활성탄은 비표면적이 503.02 m<sup>2</sup>/g으로 감소폭이 가장 컸다. 비표면적이 감소하는 이유는 침착과정 중 침착물질이 활성탄 표면으로 확산되었기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다(Huang *et al.*, 2010). Cui *et al.* (2008)의 연구에서도 동일한 경향이 나타났으며 앞서 논의한 것과 같은 추측을 하였다. 공극 부피와 공극 크기의 감소는 산 침착 활성탄보다 중금속 침착 활성탄에서 뚜렷이 나타났으며 이유는 금속의 입자가 활성탄의 공극을 차지했을 것으로 판단된다. Depci (2012)는 갈탄-활성탄을 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O를 침착하였을 때 마이크로 공극 부피와 메조 공극부피가 28.45%, 46.13%로 감소하였다고 보고하였다. Yang *et al.* (2008)은 왕겨 재질의 활성탄에 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>를 침착하였을때 철 나노입자가

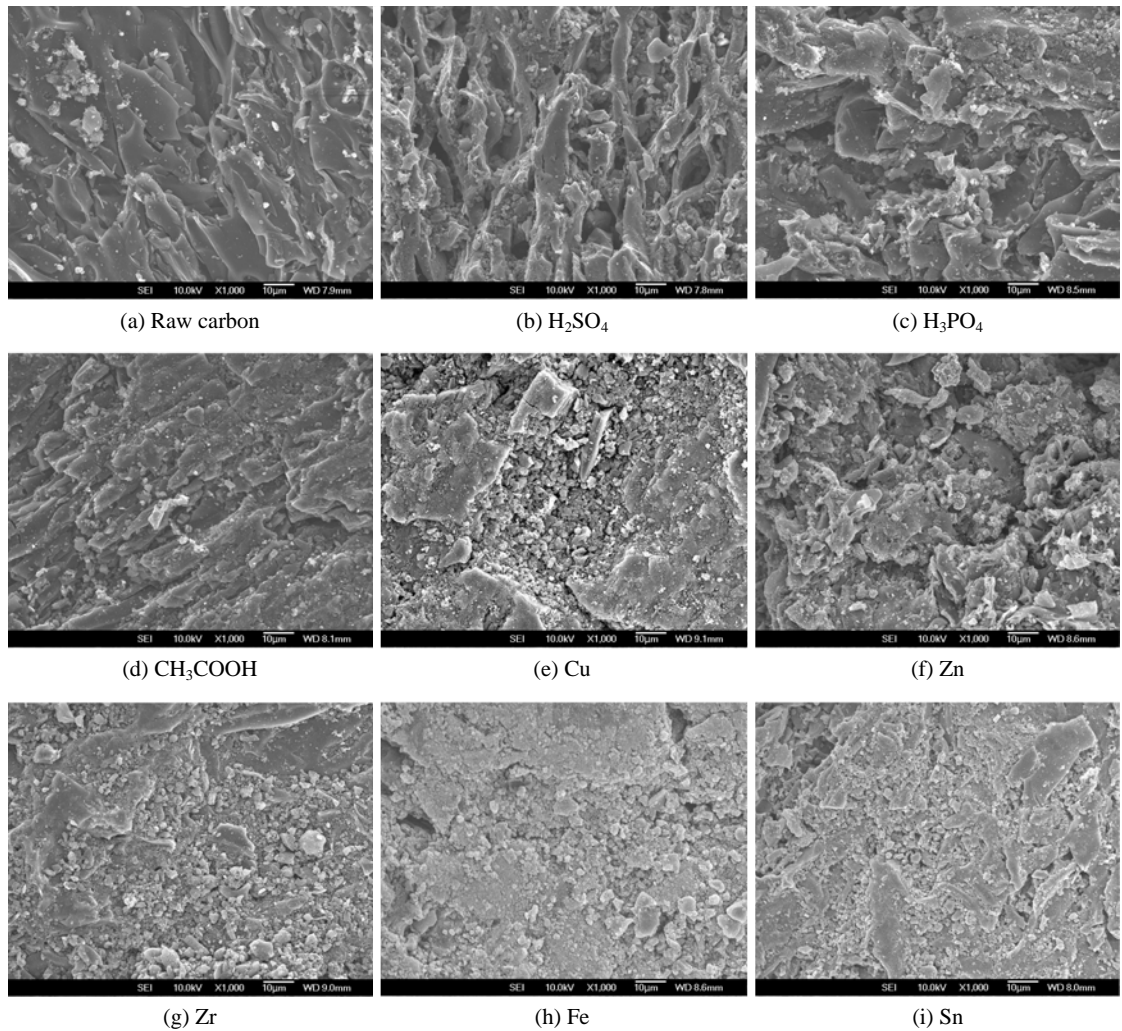


Fig. 5. Micrograph of modified activated carbons enlarged 1000 × .

공극을 차지하여 활성탄의 공극 크기가 3.4 nm에서 3.1 nm로 감소하였다고 보고하였다. 침착 과정을 통하여 흡착제의 물리적 특징인 공극부피가 감소하지만, 화학적 흡착에 기인한 흡착능이 향상되는 것으로 판단된다.

그림 4는 활성탄의 비표면적과 흡착능과의 관계를 보여주고 있다. 산과 중금속을 침착한 활성탄은 비표면적이 감소함에 따라 흡착능이 증가하는 것으로 나타났다. 약 0.8의 결정계수에서 음의 상관관계를 보였다. Le Leuch and Bandosz (2007)의 연구에서 나무

재질의 활성탄에 금속염인 철(II), 코발트(II), 크롬(II)을 침착한 결과 비표면적이 감소하는 경향을 보였다. 본 실험에서도 철을 침착한 활성탄의 비표면적은 다른 활성탄에 비해 감소폭이 컸지만, 그림 1에서 볼 수 있듯이 높은 흡착능을 보였다. 이는 화학적 흡착능에 기인한 것으로 예상할 수 있다.

그림 5는 활성탄의 표면을 관찰한 SEM 결과를 보여주고 있다. 그림 5(a)의 일반 활성탄의 표면은 침착과정없이 증류수 세척과정만을 수행하였으므로 침착 활성탄에 비하여 매끄러운 표면 특성을 보였다.

하지만 침착활성탄의 표면에는 입자가 형성되어 있는 것을 관찰 할 수 있었으며 침착과정에 의한 표면 세공 특성의 변화가 발생한 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2012). 특히 황산을 침착한 활성탄은 표면의 입자들이 존재하면서도 활성탄의 공극은 그대로 존재하는 것으로 관찰되었다. 황산 침착 활성탄과 철 침착 활성탄은 비표면적의 감소가 있었지만 그림 1과 같이 본 실험에서 첫 번째와 두 번째로 파과시간이 길었던 침착 활성탄이었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 4×8 mesh 크기의 석탄계 활성탄을 산과 중금속으로 침착하여 BET분석과 SEM측정을 통하여 각 활성탄의 물리적인 특성을 파악하였다. 또한 암모니아 가스 파과실험 실험 후 흡착능 계산, 표면 pH실험, EDS를 통한 산소함량 분석으로 표면의 특성을 파악하고자 하였다. 본 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 일반 활성탄과 침착 활성탄의 파과실험에서는 일반 활성탄의 흡착능이 0.72 mg NH<sub>3</sub>/g으로 나타났으며 모든 침착 활성탄은 일반 활성탄보다 높은 흡착능을 보였다. 이 중 황산 및 인산을 침착한 활성탄은 각각 35.21과 21.00 mg NH<sub>3</sub>/g으로 나타났으며, 철을 침착한 활성탄은 25.12 mg NH<sub>3</sub>/g이었다.
- (2) 활성탄의 표면을 EDS를 사용하여 산소함량을 측정한 결과 일반 활성탄의 산소함량은 2.09%이었으며 상대적으로 높은 흡착능을 보인 황산 및 인산 침착 활성탄은 12.42, 8.29%를 나타냈다. 철 침착 활성탄은 32.91%로 가장 높은 산소함량을 나타냈다. 활성탄 표면의 산소함량은 암모니아 흡착능과 양의 상관관계를 보였으며, 활성탄 표면 pH와 흡착능과는 음의 상관관계를 보였다.
- (3) 일반 활성탄의 비표면적은 1087.7 m<sup>2</sup>/g이었으며 산과 중금속으로 침착된 활성탄은 비표면적이 감소하였다. 철을 침착한 활성탄은 비표면적이 503.02 m<sup>2</sup>/g로 다른 활성탄에 비하여 감소폭이 높았으나 화학적 흡착에 기인하여 높은 암모니아 흡착능을 가진 것으로 분석되었다.

- (4) 활성탄의 표면을 SEM으로 관찰한 결과 일반 활성탄은 침착 활성탄의 비하여 매끄러운 표면이 관찰되었다. 침착 활성탄의 경우 침착과정에 의한 표면의 세공특성에 변화가 발생한 것으로 관찰되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비의 일부 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

Banasal, R.C. and M. Goyal (2005) Activated Carbon Adsorption, CRC Press., U.S.A., pp. 52-60.

Bandosz, T.J. and C. Petit (2009) On the reactive adsorption of ammonia on activated carbon modified by impregnation with inorganic compounds, *J. Colloid Interface Sci.*, 338, 329-345.

Boehm, H.P. (1994) Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons, *Carbon*, 32(5), 759-769.

Cui, H., S.Q. Turn, and M.A. Reese (2008) Adsorption removal of tetrahydrothiophene (THT) from synthetic natural gas on modified activated carbons, *Energ. Fuel.*, 22, 2250-2558.

Depci, T. (2012) Comparison of activated carbon and iron impregnated activated carbon derived from Golbasi lignite to remove cyanide from water, *Chem. Eng. J.*, 181-182, 467-478.

Guo, J., W.S. Xu, Y.L. Chen, and A.C. Lua (2005) Adsorption of NH<sub>3</sub> onto activated carbon prepared from palm shells impregnated with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, *J. Colloid Interface Sci.*, 281, 285-290.

Huang, C.C., H.M. Chen, C.H. Chen, and J.C. Huang (2010) Effect of surface oxides on hydrogen storage of activated carbon, *Sep. Purif. Technol.*, 70, 291-295.

Huang, C.C., G.S. Li, and C.H. Chen (2008) Effect of surface acidic oxides of activated carbon on adsorption of ammonia, *J. Hazard. Mater.*, 159, 523-527.

Kim, D.-J., S.-G. Seo, and S.-C. Kim (2005) Removal of odor-containing sulfur compound, methyl mercaptan using modified activated carbon with various acidic chemicals, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 21(2) 155-

160. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-E., Y.-K. Kwon, J.-K. Lee, and H.-S. Choi (2012) Influence of oxygen-/nitrogen-containing functional groups on the performance of electrical double-layer capacitor, *Korean Chem. Eng. Res.*, 50(6), 1043-1048. (in Korean with English abstract)
- Kim, N.-H., K.-S. Park, S.-H. Lee, S.-Y. Park, D.-S. Kim, D.-S. Kim, K.-S. Lee, K.-J. Paik, and Y.-W. Moon (2011) A study on the examination of odor substances generated from the painting, the casting the rubber manufacturing, and the used oil refining facilities in gwangju hanam industrial complex, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 10(2), 53-61. (in Korean with English abstract)
- Korea Ministry of Environment (2012), 2012 Policy direction to odor management, 2012 Advanced Odor Management Workshop.
- Le Leuch, L.M. and T.J. Badosz (2007) The role of water and surface acidity on the reactive adsorption of ammonia on modified activated carbons, *Carbon*, 45, 568-578.
- Lee, H.-D., D.-J. Kang, M.-H. Lee, D.-H. Kang, and K.-J. Oh (2012) Removal efficiency of the deodorization equipment and characteristics of malodor during the process in co-treatment of sewage and food waste of Su-young wastewater treatment plant in Busan, *Clean Technology*, 18(4), 379-389. (in Korean with English abstract)
- Li, L., S. Liu, and J. Liu (2011) Surface modification of coconut shell based activated carbon for the improvement of hydrophobic VOC removal, *J. Hazard. Mater.*, 192, 683-690.
- Maraisa, G., S.G. Laura, O.J. Erika, S.A. Joaquin, and R.R. Francisco (2011) Ammonia removal using activated carbons: Effect of the surface chemistry in dry and moist conditions, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 10605-10610.
- Somy, A., M.R. Mehrnia, H.D. Amrei, A. Ghanizadeh, and M. Safari (2009) Adsorption of carbon dioxide using impregnated activated carbon promoted by zinc, *Int. J. Greenh. Gas Control*, 3, 249-254.
- Son, Y.-S., J.-C. Kim, K.-H. Kim, B.-A. Lim, K.-N. Park, and W.-K. Lee (2007) The composition of odor compounds emitted from municipal solid waste landfill, *J. KOSAE*, 23(6), 666-674. (in Korean with English abstract)
- Yang, N., S. Zhu, D. Zhang, and S. Xu (2008) Synthesis and properties of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-activated carbon nanocomposite particles for dye removal, *Mater. Lett.*, 62, 645-647.
- Yoon, Y.-K. and D. Kim (2012) Emission characteristics of odor compounds from pneumatic waste collection plants, *Korean Society of Environmental Engineers*, 34(8), 541-548. (in Korean with English abstract)