

염기성용액으로 침착시킨 활성탄의 물성분석 및 H₂S 흡착특성

H₂S Adsorption Characteristics and Property Analyses of Activated Carbon Adsorbent Impregnated with Basic Solutions

이석기* · 임창선** · 박영성[†]
Suk-ki Lee* · Chang-Sun Yim** · Yeong-Seong Park[†]

*대전시 서구청 · **대전시청 · 대전대학교 환경공학과
*Seo-Gu Daejeon District · **Daejeon Metropolitan City
Department of Environmental Engineering, Daejeon University

(2010년 2월 16일 접수, 2010년 11월 17일 채택)

Abstract : The H₂S adsorption characteristics and property analyses of granular activated carbon adsorbent impregnated with basic solution such as NaOH, KOH, and (CH₂CH₂OH)₂NH were investigated. The concentrations of NaOH and KOH reagent ranged over 1 to 5 M, The concentration of (CH₂CH₂OH)₂NH was in the range of 0.1 to 1 M. Adsorption temperature(25~45°C) and adsorbate (H₂S) concentration (18.23 mg/L) were applied. The experimental results showed that the BET surface area of activated carbon impregnated with KOH decreases from 1,050 m²/g to 750 m²/g, and the acidity of activated carbon impregnated with NaOH decreases from 0.541 meq/g-AC to 0 meq/g-AC, as the concentration of basic solution increases, while the pH of impregnated activated carbon increased from 9.54 to 10.94 for three basic solutions. It was also found that the H₂S adsorption equilibrium capacity of activated carbon impregnated with NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH increased with increasing temperature and H₂S adsorption equilibrium capacity of the activated carbon impregnated with diethanolamine was much higher than other cases. At adsorption temperature of 45°C, the H₂S adsorption equilibrium capacity of impregnated activated carbon was 2.0~3.3 times larger than that of pure activated carbon.

Key Words : Impregnated Activated Carbon, Adsorption Equilibrium Capacity, H₂S, NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH

요약 : 본 연구에서는 NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH 등의 염기성용액으로 침착(함침)시킨 활성탄의 물리·화학적 특성을 분석하고 H₂S 흡착특성을 고찰하였다. 실험변수로는 흡착온도(25~45°C), 흡착질인 황화수소 가스농도(18.23 mg/L) 등이 적용되었다. 침착시약으로 사용된 NaOH, KOH 용액의 농도는 1~5 M, (CH₂CH₂OH)₂NH 용액의 농도는 0.1~1 M 범위내에서 적용되었다. 실험결과, 침착액의 농도가 증가할수록 KOH로 함침시킨 활성탄의 BET 표면적은 1,050 m²/g에서 750 m²/g로 감소하였고, NaOH로 함침시킨 활성탄의 표면산도는 0.541 meq/g-AC에서 0 meq/g-AC으로 감소한 반면, pH는 9.54에서 10.94로 증가하는 것으로 밝혀졌다. 또한 침착활성탄의 H₂S 평형흡착능은 디에탄올아민으로 침착시킨 경우에 가장 높았으며, 평형흡착능은 흡착온도에 비례함을 보였다. 흡착온도가 45°C일 때 비침착활성탄에 비해 2.0~3.3배 높은 수준의 H₂S 평형흡착능을 보여 주었다.

주제어 : 침착활성탄, 평형흡착능, 황화수소, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 디에탄올아민

1. 서론

고도의 산업발달과 그에 따른 경제규모의 팽창은 방대한 양에 달하는 각종 유해물질의 발생을 가져왔으며, 결국 이에 대한 처리능력의 한계와 함께 심각한 환경오염 문제를 야기하게 되었고, 이의 효율적인 처리방안 모색이 시급한 과제가 되고 있다.

지금까지 침전법, 흡수법, 막분리법, 흡착법 등 서로 다른 원리를 갖는 여러 가지 처리 방법이 제시된 바 있으나, 침전법은 분리된 가스의 액화에 필요한 동력비의 과다로 경제성이 취약한 편이며, 흡수법의 경우도 장기간 운전에서 따른 흡수액의 손실, 성능저하 및 재료의 부식문제가 아직 완전히 해결되지 못한 상태이며, 막분리법은 분리를 목적으로 하는 성분에 대한 선택성, 분리속도 및 내구성에 대한 개선이 뒷받침되어야 하는 것으로 밝혀져 있다.¹⁻³⁾

한편, 활성탄을 이용한 흡착법은 흡착제의 표면과 흡착질(처리대상 가스)이 물리적 또는 화학적으로 결합하는 현상을 통해 혼합된 흡착질로부터 일정 성분을 선택적으로 분리 또는 정제할 때에 이용되는 방법으로서 흡수법에 비하여 재료의 부식, 동력비의 부담이 없어 상용화 공정에 많이 적용되고 있다. 그러나 산업공정에서 발생하는 다양한 오염물질을 더욱 효과적으로 분리·제거하기 위해서는 기존 활성탄의 흡착성능을 증가하는 새로운 흡착제의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 최근에는 활성탄을 다기능성 여과재질로 활용하기 위해 기존의 활성탄에 금속 또는 금속축매가 처리된 활성탄을 개발하고, 이를 오염물질처리용 흡착제로 응용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁴⁻⁷⁾

특히, 침착활성탄은 기공이 잘 발달된 일반활성탄 표면에 특정한 화학물질을 함침시켜 화학적 활성을 높인 흡착제로서 분자와 분자 사이에 서로 응집력을 갖는 dipole moment

에 의해 야기되는 Van Der Waals 힘과 전자의 재배열에 의한 강한 이온결합이나 공유결합을 통해 다양한 유해물질을 제거할 수 있는 잇점이 있다.

본 연구에서는 기존 일반활성탄에 대하여 NaOH, KOH, 디에탄올아민((CH₂CH₂OH)₂NH) 등의 염기성용액으로 침착시킨 활성탄을 제조하고, 이 제조된 시료에 대하여 BET 표면적분석, 주사전자현미경(SEM)분석, 열칭칭분석(Thermogravimetric analyzer, TGA), pH, 중화적정, 원소분석 등 다양한 분석기법으로 물리·화학적 특성을 조사하였으며, 아울러 제조된 침착활성탄의 H₂S 흡착특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 침착활성탄 제조

실험에 사용한 침착액은 세가지 종류의 염기성물질(NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH)을 증류수로 희석하거나 용해하여 사용하였으며, 침착에 사용된 흡착제로는 동양탄소(주) 제품으로 야자각으로 제조한 입자의 크기가 8×30 mesh, 비표면적 약 1,050 m²/g, 충전밀도 0.43~0.47 g/cc, 세공용적 0.6~0.8 cc/g, 그리고 세공직경 13~20(Å)의 물리적 특성을 갖고 있는 입상활성탄을 사용하였다.

Fig. 1에 나타난 침착활성탄의 제조과정을 살펴보면 제일 먼저 일반활성탄 내의 불순물을 제거하기 위해서 증류수로 수차례 세척한 후 150℃ 건조기에서 24시간 이상 건조하고 데시게이터에 보관한 후 사용하였다.

세척, 건조된 활성탄에 염기성 용액을 침착시키기 위하여 제일 먼저 증류수로 희석한 침착액(250 mL)에 150℃ 건조기에서 24시간 이상 건조후 데시게이터에 보관중인 활성탄(10 g)을 넣고, 교반기로 4시간 동안 교반시킨다. 충분히 진탕된 활성탄-침착액 혼합슬러리를 진공펌프와 여과지를 이용하여 수차례 세척, 여과시킨다. 세척·여과된 활성탄을 150℃에서 24시간 건조시킨 후, 초기 활성탄무게와 침착후

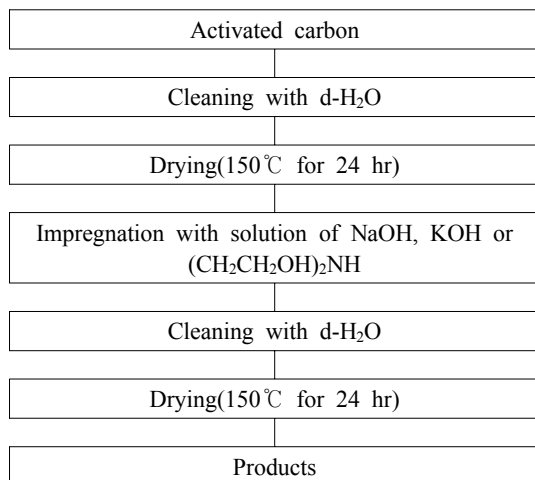


Fig. 1. Flow sheet of activated carbon adsorbent impregnated with basic solution.

활성탄의 무게변화로부터 침착율(wt%)을 산출하고 데시게이트내에 보관한다. 주어진 시약에 대한 활성탄 침착율(wt%) 변화는 침착액의 농도조절을 통해 이루어졌다.^{8,9)}

2.2. 침착활성탄의 물리적 특성

일반활성탄 및 침착활성탄의 비표면적은 BET (Brunauer, Emmet, Teller) 질소 흡·탈착력을 이용한 M-P (Multi-Point) 법으로 측정하였으며, 분석기로는 미국 Quanta Chromer Co.의 Autosorb-1을 사용하였다. 활성탄의 침착 전·후 입자의 표면구조 특성조사는 SEM (scanning electron microscope) 측정을 통하여 이루어졌으며, 측정기구로는 Philips XL-30을 사용하였다. 침착활성탄의 열적인 변화특성을 조사하기 위해 열칭칭(Du-pont, 2050)을 사용하여 승온·탈착 실험을 수행하였다. 실험은 활성탄 시료를 질소가스 분위기 하에서 10℃/min로 가열하고, 373 K에서 1시간을 유지한 후 다시 1,273 K까지 10℃/min 속도로 승온시키면서, 탄소표면에 존재하는 산소그룹이 분해되어 이산화탄소와 이산화탄소로 분출될 때 수반되는 질량감소특성을 조사하였다.¹⁰⁾

2.3. 침착활성탄의 화학적 특성

침착조건에 따른 pH변화를 조사하기 위하여 침착활성탄 시료 0.5 g을 증류수 20 mL가 담긴 50 mL pyrex 용기에 넣고 12시간 동안 진탕한 후 membrane filter (4.5 μm nylon filter)로 여과하여 pH측정기(HM-30V)로 상등액의 pH를 측정하였다. 또한 침착활성탄 표면의 산성관능기 특성을 살펴보기 위해 중화적정분석(Boehm method)을 실시하였으며, 실험은 침착활성탄 1 g을 강도가 다른 세 종류의 0.1 N 염기성용액(NaHCO₃, Na₂CO₃, NaOH) 100 mL와 혼합하여 48시간 동안 기계적 진탕 후, 활성탄을 침강시켜 얻어진 맑은 용액 10 mL를 pH 측정장치가 부착된 적정장치(Metrohm Titroprocessor Model 682)를 사용하여 탄소표면에 존재하는 산성관능기의 양을 측정하였다.^{11,12)} 침착과정에서 일어나는 원소조성 변화특성을 파악하기 위하여 원소분석기 C,H,N-1000 Elemental Analyzer (LECO. Co. U.S.A.)를 사용하여 원소분석을 실시하였다.

2.4. 흡착평형실험

2.4.1. 실험장치

Fig. 2는 흡착평형 실험장치를 나타낸 것이다. 흡착제와 흡착질 가스를 충전할 수 있도록 내부 총부피가 1,680 mL [832 mL+848 mL]에 달하는 2개의 원통형 chamber(내경 7 cm, 길이 25 cm)로 구성되어 있으며, 이들은 ball valve가 달린 2개의 관(외경 2.2 cm)으로 연결되어 있다.

그리고 연결관에는 흡착이 진행되는 동안 밀폐공간의 압력변화를 측정할 수 있도록 압력변환기(pressure transducer)가 설치되어 있으며, 흡착과정중 내부의 압력변화에 따른 압력변환기의 출력을 3 pen recorder에 기록되도록 하였다. 측정된 압력으로 가스의 분압과 물분율이 산출되며, 이를 토대로 시료가스의 농도가 환산된다.

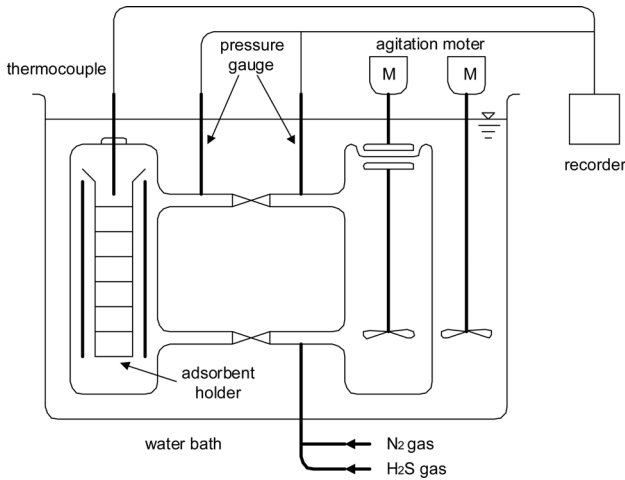


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for adsorption equilibrium.

또한 원통형 chamber내의 흡착온도 변화를 감지하기 위하여 흡착제 일정량을 충전한 흡착제 받침대의 공간상단부에 T-형 열전대가 설치되어 있다. 흡착질가스가 주입되는 밀폐공간 내부에는 가스의 혼합을 돕기 위하여 영구자석이 부착되어 있는 임펠러를 설치하여 회전시킬 수 있도록 하였다. 또한 전체 실험설비는 등온에서의 흡착평형실험을 위하여 온도조절이 가능한 수조내에 배치되도록 하였다. 침착활성탄이 충전되어 있는 왼쪽 chamber 공간은 가장자리에 스테인레스망으로 제작된 sample pan 7개를 세로 등간격으로 고정시킨 받침대(holder)를 제작하여 약 3 g 정도의 침착활성탄을 담을 수 있도록 하였다.

2.4.2. 실험방법

각 원통형 chamber를 연결하고 있는 상·하 2개의 valve가 차단된 상태에서 전처리된 일정량의 흡착제를 흡착제 받침대에 충전시킨다. 항온수조의 온도를 일정하게 유지시키고 흡착제가 충전되지 않은 chamber에 H₂S 표준가스(4.69%, N₂ balance)와 N₂ 가스 일정량을 주입한 후 상·하 2개의 valve를 열어 일정농도의 H₂S 가스를 흡착제가 들어 있는 공간으로 유입시켜 실험을 시작한다. 흡착이 이루어지는 동안 3 pen recorder에 표시되는 압력과 온도를 지속적으로 측정하게 되며, 충분한 시간이 경과하여 압력이 거의 균일하게 유지되면 흡착평형에 도달한 것으로 간주하고 실험을 종료했다. H₂S 흡착실험에 적용된 실험조건은 Table 1과 같다. 평형도달 후 초기치와의 압력차를 토대로 이상기체 상태방정식을 적용하여 평형흡착량을 산출하였다.

Table 1. Experimental parameter and application range

Parameter	Application
Adsorbent	Activated carbon
Adsorbate	H ₂ S gas
H ₂ S Concentration (mg/L)	18,23
Temperature condition (°C)	25~45
Impregnated solution	NaOH, KOH, (CH ₂ CH ₂ OH) ₂ NH

3. 결과 및 고찰

3.1. 침착활성탄의 침착율변화

Fig. 3은 NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 침착율(wt%) 변화를 나타낸 것이다. 침착액의 농도를 NaOH, KOH는 1~5 M, (CH₂CH₂OH)₂NH는 0.1~1 M 범위에서 변화시켰을 때 용액의 농도가 높아질수록 침착율(wt%)이 높아지는 것으로 나타났으며, 침착액으로 NaOH 용액이나 KOH 용액을 사용한 것보다는 (CH₂CH₂OH)₂NH 용액을 사용하였을 때 상대적으로 커다란 침착율(wt%)변화를 보이고 있다. 이는 분자량이 크고, 유기화합물의 특성을 지니는 (CH₂CH₂OH)₂NH가 분자량이 작고, 무기화합물인 NaOH, KOH보다 유기성의 활성탄에 대한 함침율이 높게 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

3.2. 침착활성탄의 물리적 특성

제조된 침착활성탄 중에서 KOH용액으로 침착시킨 활성탄과 일반활성탄의 비표면적을 비교하면, 일반활성탄 1,050 m²/g, 침착율 1.29%인 침착활성탄 775 m²/g, 침착율 5.6%인 침착활성탄의 경우 750 m²/g으로 측정되어 비표면적은 침착율(wt%)에 반비례하는 것으로 나타났다. 이는 침착용 시약에 의해 활성탄의 미세기공(micro pore)이 막히는 현상에 기인한 것으로 판단된다.¹³⁾

Fig. 4는 일반활성탄과 (CH₂CH₂OH)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 기공내부구조를 나타낸 전자주사현미경(SEM)자료로 10,000배 확대하여 측정된 것이다. Fig. 4의 (a)는 일반활성탄의 내부단면을 (b)는 침착활성탄의 내부단면을 나타내고 있다. 측정결과로부터 일반활성탄에 비하여 침착활성탄 내부의 미세기공이 조금 더 많이 막혀있음을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 위에서 측정된 침착활성탄의 BET 비표면적 감소특성과도 잘 일치한다.

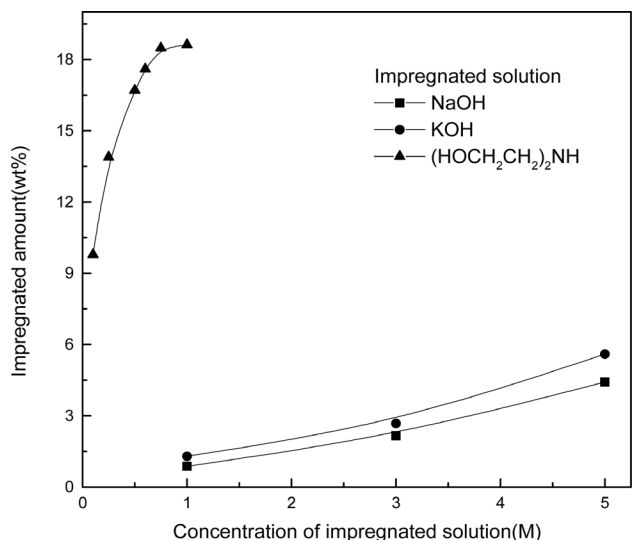
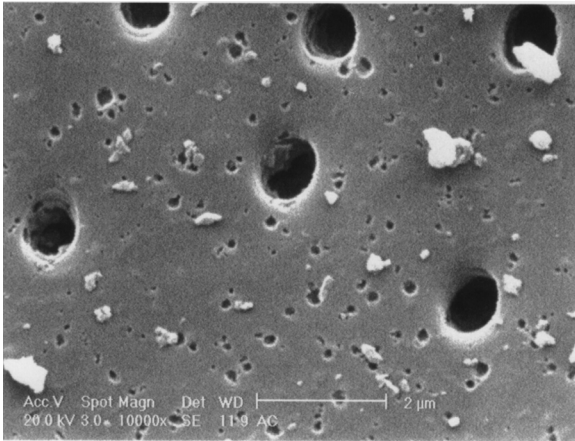
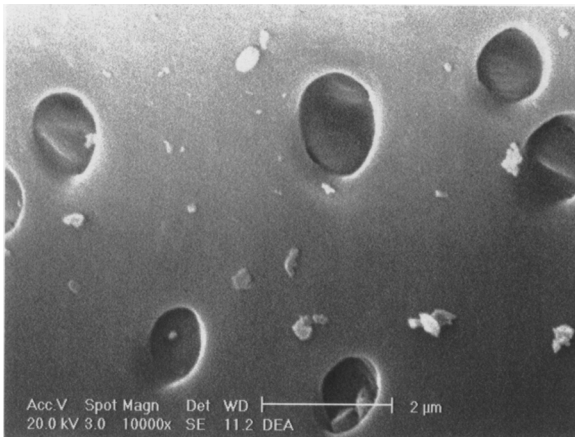


Fig. 3. Variation of impregnated amount ratio as a function concentration of impregnated solution.



(a) without impregnation



(b) with impregnation

Fig. 4. Scanning electron microscope (SEM) of pore structure for activated carbon ($\times 10,000$) (a) without impregnation (b) with impregnation.

Fig. 5는 질소분위기 아래에서 실시된 침착활성탄의 승온·탈착 실험결과를 나타낸 것이다. 침착액의 농도가 증가할수록 침착활성탄의 질량감소율(wt%)이 늘어나는 경향을

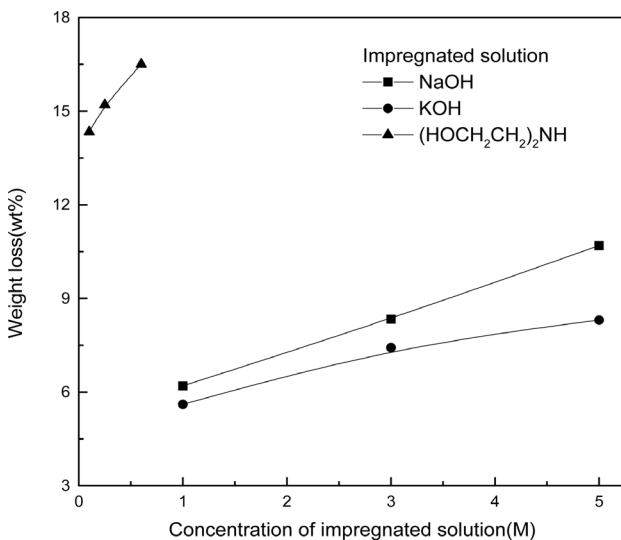


Fig. 5. Variation of weight loss as a function concentration of impregnated solution.

보이고 있으며, 침착액으로 NaOH 용액이나 KOH 용액을 사용한 것보다는 (CH₂CH₂OH)₂NH 용액을 침착액으로 사용한 경우에 특히 질량감소율(wt%)이 높게 나타났다. 승온·탈착에 의해 일어나는 질량감소는 산소와 탄소가 결합해서 여러 가지 조성의 화합물인 C_xO_y를 생성하게 되고, 이 화합물이 가열에 의해 CO와 CO₂의 혼합물로 급격하게 분해되는 것이라 생각된다.¹⁰⁾

3.3. 침착활성탄의 화학적 특성

Fig. 6은 침착활성탄에 대한 pH의 변화를 나타낸 것이다. 침착액의 농도를 NaOH, KOH는 1~5 M, (CH₂CH₂OH)₂NH는 0.1~1 M 범위에서 변화시켰을 때, NaOH 용액으로 침착시킨 활성탄의 경우 pH가 9.54에서 10.86으로, KOH 용액으로 침착시킨 활성탄의 경우 9.74에서 10.94로, (CH₂CH₂OH)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 경우 9.87에서 10.93으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 침착율(wt%)이 증가함에 따라서 알칼리성분의 활성탄표면 중화기능에 의해 표면의 산성관능기가 감소하게 되고, 이로 인해 pH값이 증가하게 되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 7은 침착활성탄의 산도를 조사하기 위해 Bohem이 제안한 방법에 따라 중화적정한 결과이다. NaOH 용액으로 침착시킨 활성탄의 침착율이 0.87~5.85 wt%로 증가하였을 때, NaHCO₃에 의해 적정된 강산성의 carboxyl group은 0~0.14 meq/g-AC, Na₂CO₃에 의해 적정된 carboxyl group과 약산성 carboxyl group인 lacton group은 0~0.341 meq/g-AC, NaOH에 의해 적정된 carboxyl group, lacton group 및 phenol group은 0~0.541 meq/g-AC 범위에서 침착율에 반비례하여 산도(acidity)가 변하는 것을 보여주고 있다. 이것은 침착율이 증가함에 따라서 산성관능기에 속하는 carboxyl group, lacton group, phenol group의 양이 감소하기 때문으로 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 NaOH 용액으로 침착시

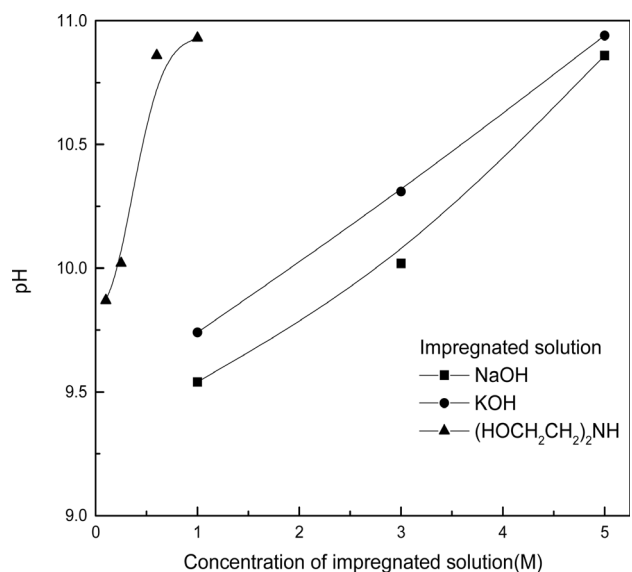


Fig. 6. Variation of pH as a function concentration of impregnated solution.

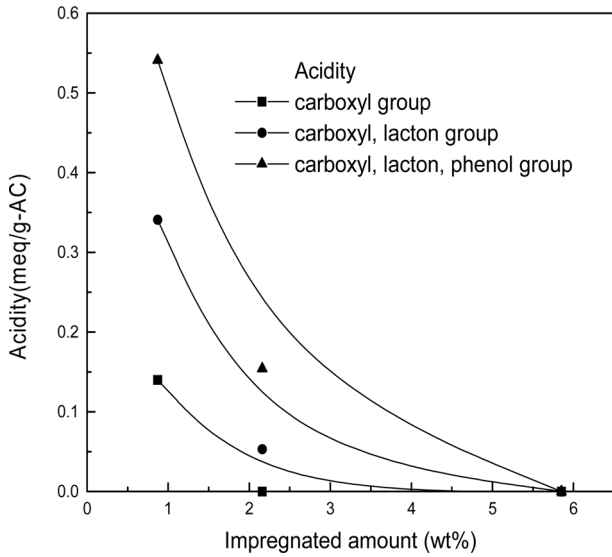


Fig. 7. Surface characteristics of AC by titration method.

킨 활성탄의 산도를 측정된 심 등¹¹⁾과 Polovina 등¹²⁾의 연구결과와 일치하는 것이다.

또한 Bohem 등의 연구에 의해 NaHCO₃는 강산성의 carboxyl group을, Na₂CO₃는 carboxyl group과 약산성 carboxyl group인 lacton group을 중화하고, NaOH는 carboxyl group, lacton group 및 phenol group을 중화하므로 NaOH에 의해 중화된 산도가 탄소의 총 표면산도를 나타내며 이들 관계로부터 각 산성관능기에 대한 정성·정량적인 분석이 가능함을 알 수 있다.¹⁴⁻¹⁷⁾

Fig. 8에서는 일반활성탄과 (HOCH₂CH₂)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 원소분석 결과를 보여주고 있다. 일반활성탄과 침착활성탄의 원소분석 결과를 비교하면 산소원자의 함량(wt%)이 22.45%에서 26.05%로 증가하였으며, 수소원자의 함량도 2.5%에서 2.56%로 증가하였다. 이처럼 침착과정을 통해 산소원자가 붙는 현상은 양 등¹⁵⁾과 Boehm 등¹⁶⁻¹⁸⁾의 결과와 일치하는 것이다.

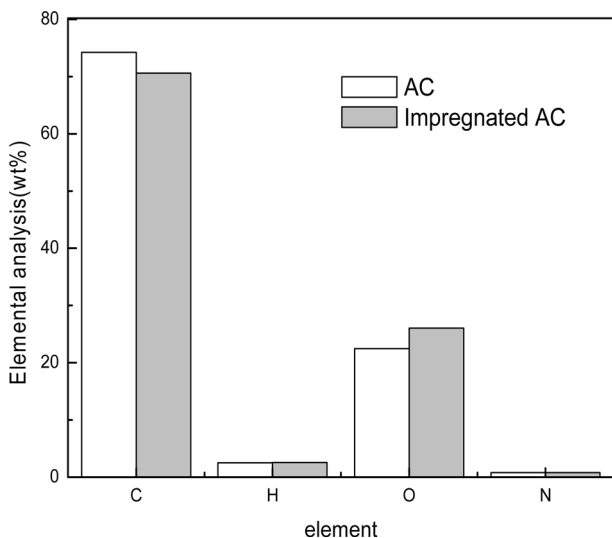


Fig. 8. Elemental analysis of AC and impregnated AC.

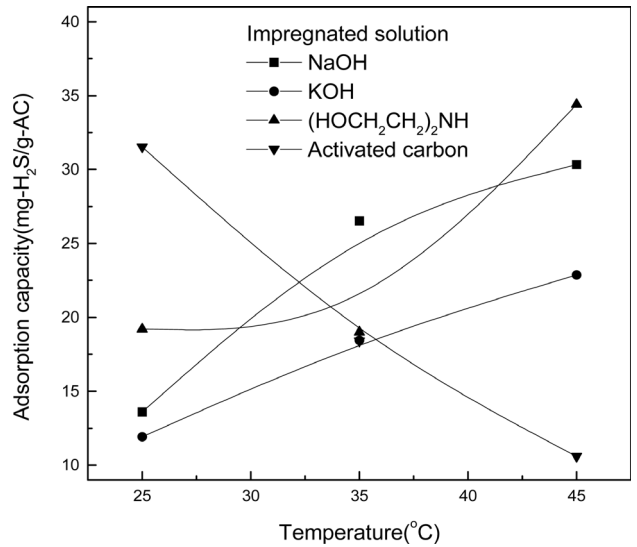


Fig. 9. Effect of temperature on adsorption of H₂S on virgin AC and impregnated AC.

3.4. 흡착평형실험

Fig. 9는 일반활성탄과 침착활성탄의 H₂S 평형흡착량을 나타낸 것이다. 흡착온도를 25°C에서 45°C로 증가시킬 경우, H₂S 농도가 18.23 mg/L일 때 H₂S 흡착량이 일반활성탄의 경우 31.52 mg/g-AC에서 10.59 mg/g-AC로 약 66% 감소하는데 비하여, NaOH, KOH 및 (CH₂CH₂OH)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 경우 13.6 mg/g-AC에서 30.34 mg/g-AC로, 11.92 mg/g-AC에서 22.86 mg/g-AC로, 19.2 mg/g-AC에서 34.4 mg/g-AC로 온도에 비례하여 증가하였으며, (CH₂CH₂OH)₂NH 용액으로 침착시킨 활성탄의 경우 다른 화합물로 침착시킨 활성탄에 비하여 우수한 흡착능력을 보여주고 있다.

이와 같이 일반활성탄과 침착활성탄이 온도조건에 대하여 서로 상반된 결과를 보여주고 있는 것은 침착활성탄의 경우 주로 화학흡착에 의해 온도가 증가할수록 평형흡착능이 증가하는 것에 비하여 일반활성탄의 경우에는 온도가 증가할수록 흡착질가스의 휘발성이 증대되면서 물리적인 결합(physical bonding)을 방해하기 때문인 것으로 판단된다.¹⁹⁾

4. 결론

세가지 종류의 염기성용액(NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH)으로 함침시켜 침착활성탄을 제조하고, 침착활성탄에 대한 물리·화학적 특성분석과 흡착성능실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일반활성탄을 NaOH, KOH, (CH₂CH₂OH)₂NH의 염기성용액으로 함침시키면 침착액의 농도증가에 비례하여 함침율은 증가하나, 활성탄 내부 미세공의 폐쇄현상이 수반되어 BET 표면적이 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 열친칭 실험, pH 분석, 중화적정법 및 원소분석 등을 이용한 침착활성탄의 물리·화학적 특성분석을 통해 침착 현상에 대한 정성·정량적인 분석이 가능함을 알 수가 있었다.

3) 활성탄을 디에탄올아민으로 침착시킨 경우 가장 우수한 황화수소 평형흡착능을 보였으며, 침착활성탄의 H₂S 가스 평형흡착능은 비침착활성탄과 달리 온도에 비례함을 나타냈다. 흡착온도 45°C에서 비침착 조건에 비해 2.0~3.3배 높은 평형흡착능을 보임으로써 고온조건에서 유해가스 처리시 침착활성탄이 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

KSEE

참고문헌

1. 川井利長, “炭酸力,” (株)NTS, 日本(1991).
2. Kohl Arthur L. and Riesenfeld Fred C., “Gas Purification,” 4th Ed. Gulf Publishing Company, Huston Texas, U.S.A., (1985).
3. Koros W. J., “Adsorption/Desorption Technology,” Proceeding for Separation of Fluid Mixtures, The University of Texas at Austin, College of Engineering, Feb. 4-8th(1991).
4. 조기철, 임주원, 조상원, 송주석, 오광중, “Na₂CO₃ 침착활성탄을 이용한 H₂S 제거에 관한 연구(I),” 대한환경공학회지, **21**, 2003~2011(1999).
5. 유목련, 양재규, 장운영, “망간산화물이 침착된 활성탄에 의한 페놀흡착 및 비소(III) 산화,” 대한환경공학회지, **30**(4), 423~429(2008).
6. Reed, B. E., Vaughan, R. L. and Jiang, L., “As(III), As(V), Hg, Pb removal by Fe-oxide impregnated activated carbon,” *J. Environ. Eng.*, **126**(9), 869~873(2000).
7. Vaughan, R. L. and Reed, B. E., “Modeling As(V) removal by a iron oxide impregnated activated carbon using the surface complexation approach,” *Water Res.*, **39**(6), 1005~1014 (2005).
8. 이후근, “흡착제와 그의 활용에 관한 WORKSHOP(III),” 한국화학공학회, **3**, 203~235(1995).
9. 성주환, 이건홍, “산처리 활성탄을 이용한 암모니아의 흡착특성,” 화학공학의 이론과 응용, **3**, 2093~2096(1997).
10. 정상원, 김명수, 이중기, 박달근, “활성탄의 특성과 VOC 흡착과의 관계,” 화학공학의 이론과 응용, **3**, 1577~1580 (1997).
11. 심재운, 유승곤, “구리, 니켈의 흡착에 대한 활성탄소섬유 표면처리영향,” 화학공학, **36**, 903~907(1998).
12. Polovina, M., Basic, B., Kaluderovic, B. and Dekanski, A., “Surface Characterization of Oxidized Activated Carbon Cloth,” *Carbon*, **35**(8), 1047~1052(1997).
13. 심재운, 고경열, 김선영, 양범호, 유승곤, “산, 염기 처리 활성탄소섬유의 흡착특성,” *Theories and Application of Chem. Eng.*, **3**, 2097~2100(1997).
14. 고윤희, 서경원, 박달근, “O₂-NH₃ 처리로 인한 활성탄의 SO₂ 흡착능조사,” *Energy Eng. J.*, **4**, 76~84(1995).
15. 양범호, 김철규, 김지동, 유승곤, “오존처리된 활성탄소섬유의 표면화학적 특성 연구,” *Theories and Application of Chem. Eng.*, **4**, 2677~2680(1998).
16. Boehm. H. P. and Bewer, G., Proc. 4th Internat. London Carbon and Graphite Conf., 1974, Soc. Chem. Ind., London, pp. 344(1976).
17. Boehm. H. P., *Adv. Cat.*, **16**, 179~184(1966).
18. Boehm, H. P., “Some Aspects of The Surface Chemistry of Carbon Blacks and Other Carbons,” *Carbon*, **32**(5), 759~769(1994).
19. 김명숙, 송덕만, 조항대, 최원길, 이형근, “활성탄 고정층 반응기에서 BTX의 기상 흡착특성,” 화학공학의 이론과 응용, **3**, 2681~2684(1997).