

## 석탄회부착활성탄의 제조 및 중금속제거에 관한 연구

문옥란 · 신대윤 · 고춘남\*

조선대학교 환경공학과 · 동강대학 환경위생과\*

### A Study on the Preparation of the Fly ash Adhesion-Activated Carbon and on the Removal of Heavy Metals

Ok-Ran Moon · Dae-Yewn Shin · Choon-Nam Koh

*Dept. of Environmental Engineering, Chosun University*

*Dept. of Environmental Sanitary Science, Dong Gang College\**

#### Abstract

This study was aimed ultimately to develop an adsorption process treating heavy metal wastewater by utilizing activated carbon using flyash. The affecting factors in adsorption process on heavy metal by flyash adhesion-activated carbon are as follows. Factors such as pH, and quality of activated carbon, and reaction time made batch adsorption isotherm described adsorption capacity was made use of the investigation to evaluate adsorptive possibility of heavy metal.

As the results of this study,  $H^+$  ion has influence on adsorption of heavy metal if pH is low. As reaction time is transformed, factors such as optimum reaction time is taken into consideration an adsorptive process of heavy metal because an adsorption and a reduction process occur. Adsorption isotherm of adhesion-activated carbon was generally obeyed to Freundlich formular than Langmuir formular and Freundlich constant,  $1/n$  were obtained in the range of 0.1~0.5.

#### I. 서 론

산업이 발달함에 따라 오염물질의 종류가 다양해지고 또 산업폐수의 양도 점차 증가하는 추세이다. 특히 산업폐수중의 중금속성분은 생체내에 축적되며, 인간 생존을 위협하는 공해물질이다. 이와 같은 중금속성분을 제거하는 방법은 용존이온을 수산화물 등으로 응집침전시키는 응집침전법, 흡착법, 이온교환법 등이 있다<sup>1)</sup>. 응집침전법은 슬러지

생성량이 많고<sup>2)</sup>, 이온교환법 또는 흡착법의 경우 고가의 이온교환수지와 흡착제가 사용되는 단점이 있다.

활성탄은 가격이 비싼 반면, 중금속뿐만 아니라 여러 가지 오염물을 흡착하는 능력이 우수하여 수처리제로서의 사용량이 증가하고 있다<sup>3)</sup>.

본 연구는 산업폐기물중의 하나인 석탄회<sup>4, 5, 6)</sup>를 소성시켜 활성탄을 부착시킬 수 있는 지지체를 만들고, 여기에 활성탄을 부착시켜 부착활성탄을 제

조하여 중금속흡착특성을 조사하고자 한다. 통수성, 교체작업의 편리성, column내 손실수두의 감소 및 역세척의 간편성 기대할 수 있는 부착활성탄을 만들어 보고자 한다. 석탄회부착활성탄의 제조, 제조된 부착활성탄을 이용한 중금속 제거 및 흡착에 적용된 평형흡착식을 모색하고자 한다. 석탄회부착활성탄의 흡착능을 알아보기 위하여 pH, 활성탄양, 반응시간을 변수로 하여 그 특성을 조사하였다.

## II. 실험내용 및 방법

### 1. 석탄회를 이용한 담체제작

#### (1) 재료 및 기기

실험에 사용된 시료는 보령화력발전소에서 발생하는 석탄회를 일정량 취하여 화학분석을 하고, X-선 회절(230-71107232), SEM(JSN-840A)을 통한 석탄회의 성분과 표면구조를 조사하였다.

#### (2) 실험방법

##### a. 담체의 제작

석탄회와 점토를 105℃에서 건조시킨후 원료의 조합을 무게비로 25wt.%씩 배합하여, 24시간 습식 혼합을 하였다. 실온에서 24시간 건조한 후 10×10×5mm mould를 사용하여 성형체를 제작하였다. 조성비는 Table 1과 같으며, Fig. 1의 과정에 따라 소성시킨 후 기공률, 흡수율, 내마모성, 내화학성을 측정하여 물성을 조사하고, 용출시험을 거쳐 수처리시 중금속의 영향을 알아보았다. 소성시 온도조건은 200℃에서는 자유수분, 600℃는 결정수, 80

0℃는 탄소분을 제거하기 위하여 각각 2시간씩 유지시켰다. 1100℃에서 3시간씩 유지 한 후 노냉하였으며, 승온속도는 최고 온도까지 각각 14시간이 걸렸다.

##### b. 담체의 물성실험

###### 1) 흡수율 및 기공률

소성된 시편을 Drying Oven에서 105℃로 건조한 건조무게를 W<sub>1</sub>으로 하고, 시편을 물에 넣고 3시간 이상을 1mm이하의 철사로 물속에 매단 채로 재어 물속에서의 무게 W<sub>2</sub>로 하고 시편을 물에서 꺼내어 표면을 닦고 칭량하여 시편의 무게를 W<sub>3</sub>으로 한다.

다음 식으로부터 흡수율 및 기공률 계산하였다.

$$\text{겉보기 기공률} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100$$

$$\text{흡수율} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100$$

###### 2) 내마모성

시편을 깨끗이 한 후 건조기에서 105℃, 3시간 건조 후 데시케이터 안에서 상온으로 냉각한 시편을 측정 시료로 하였다. 시편의 무게를 재고, 1kg 하중으로 SiC 연삭재C의 입도 60번에 50rpm으로 1분간 회전한 후 무게를 재어, 무게의 감량으로 내마모성을 계산하였다.

$$\text{내마모성(\%)} = \frac{\text{시편의 무게} - \text{마모후의 무게}}{\text{시편의 무게}} \times 100$$

##### c. 용출실험

소성체를 비이커에 넣고, 증류수를 pH3과 pH10으로 조절하여 24시간동안 교반한 후 그 여액을 걸러내어 ICP(Jobin yvon 70+)로 분석하였다.

## 2. 흡착실험

### (1) 시 약

본 흡착실험의 피흡착제로 사용한 시약은 특급 시약인 日本 순정화학(株)제품이며 CuCl<sub>2</sub> in 1N-

Table 1. Preparation condition of fly ash-clay body

Substituted Ash (w.%)	Substituted Clay (w.%)	Firing Temp. (°C)
100	0	1100℃
75	25	
50	50	
25	75	

HCl, factor (at 20°C) = 0.98, MnCl<sub>2</sub> in 1N-HCl, factor (at 20°C) = 0.99, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> in 0.02N-HCl, factor (at 20°C) = 0.98, Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> in 1N-HNO<sub>3</sub>, factor (at 20°C) = 1.00과 CdCl<sub>2</sub> in 1N-HCl, factor (at 20°C) = 0.99을 Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>의 흡착실험에 피흡착제로 사용하였다. 위의 표준시약 1,000ppm 20ml를 Hole pipet로 취하여 1ℓ Mass flask에 넣고 전체를 1ℓ로 하여 각각의 이온농도를 20ppm으로 한 후, 적당량을 취하여 pH의 변화, 흡착량의 변화, 반응시간에 따른 변화를 알아보기 위하여 사용하였다.

**(2) 실험방법**

실험은 300ml Beaker에 Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>이온 20ppm용액 100ml를 각각 취하여 일정량의 활성탄을 첨가한 후 NH<sub>4</sub>Cl완충용액과 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>용액으로 pH를 조절하여, pH, 활성탄양, 반응시간을 변수로 하여 각각의 조건에서 각 반응을 완료시켜 정량용 여과지(5중 A)로 여과하여 처음 20ml는 버리고 시료 20ml를 취하여 ICP(Jobin yvon 70+)으로 잔류이온 농도를 측정하였다.

**a. pH 변화에 따른 중금속 흡착**

각 이온의 활성탄 흡착에 대한 적정 pH변화를 관찰하기 위하여 이온농도 20ppm용액 100 ml에 일정량의 활성탄을 넣은 후, NH<sub>4</sub>Cl 완충용액과 0.1N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 각 용액의 pH를 조절한 후 150 rpm으로 30분간 교반하여 반응을 완료시켜 농도를 측정하였다.

**b. 활성탄의 중금속 흡착능**

각 이온에 대한 활성탄양의 변화에 대한 흡착영향을 실험하기 위하여 이온농도 20ppm 용액 100 ml에 활성탄 0.3~1.77g을 넣어 150rpm으로 1hr교반한 후 정량용 여과지(5중A)로 여과하여 처음 20ml는 버리고 시료 20ml를 취하여 잔류이온 농도를 측정하여 Freundlich 등온흡착식에 적용시켰다.

**c. 반응시간 변화에 따른 중금속 흡착**

각 이온에 대한 활성탄 반응시간에 대한 흡착영향을 실험하기 위하여 이온농도 20ppm용액 200ml

에 활성탄을 각각 1g씩을 넣고, 각 이온의 최적 pH를 조절하여 150rpm으로 1hr교반시키면서 일정시간 간격으로 15ml씩 채취하여 농도를 측정하였다.

**d. 공존금속에 의한 흡착특성**

폐수속에는 단일 성분의 금속이온만 존재하는 것이 아니기 때문에 여러 금속이온의 공존시의 영향을 알아보기 위해, 각각의 이온농도 20 ppm이 시료 10ml씩 취하여 전체액량 50ml로 하고 활성탄 양 2.6g씩 넣어 2hr동안 교반시킨 후 여과시켜 여액의 잔류이온농도를 측정하였다.

**e. 탈착실험**

평형흡착이 이루어진 활성탄에 0.1N-HCl용액을 100ml 150rpm으로 2hr동안 교반시킨후 잔류이온농도를 측정하여 탈착률을 알아보았다.

**Ⅲ. 결과 및 고찰**

**1. 석탄회의 성분 분석**

**(1) Fly ash의 성분분석**

실험에 사용한 석탄회와 점토의 화학분석결과는 Table 2와 같다. 주성분은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이며, 이외에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 알칼리 성분들이 포함되어있다. 석탄회

Table 2. Chemical analysis of fly ash and clay (단위 : %)

성분	fly ash	clay
SiO <sub>2</sub>	57.90	69.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.00	20.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.76	0.40
CaO	3.19	7.55
MgO	1.25	0.20
K <sub>2</sub> O	0.97	-
Na <sub>2</sub> O	0.73	-
TiO <sub>2</sub>	1.27	-
SO <sub>3</sub>	3.00	-
미연탄소분	3.93	2.25
계	100	100

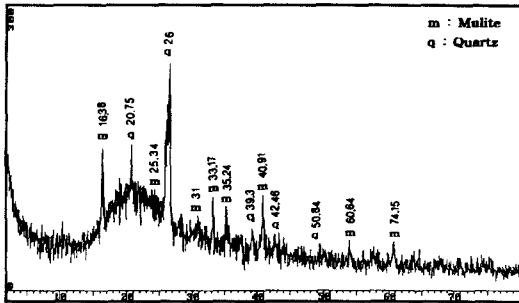


Fig. 1. X-ray diffraction analysis of fly ash

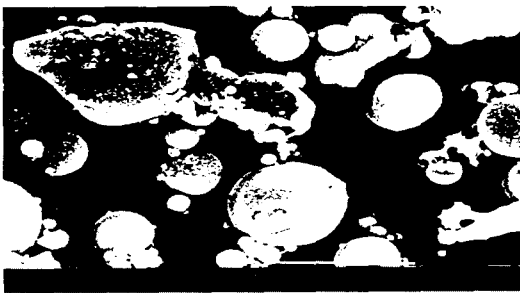


Fig. 2. SEM photography of fly ash

는 미연탄소분이 3.93%로 아직 연소되지 않은 탄소의 수분등이 존재하고 있음을 알 수 있다.

(2) XRD분석

Fig. 1.은 XRD 분석 결과이다. 석탄화는 mullite와 quartz의 두결정상이 주광물을 이루고 있음을 확인할 수 있었고, 나머지 결정상은 불순물 형태로 존재하여 XRD분석이 불가능하였다.

(3) 표면관찰

Fig. 2는 석탄화의 SEM사진으로서 석탄화의 구성은 주로 유리상의 구형모양의 결정을 형성하고 있으며 또한 비정질광물들이 주변에 분포되어 있음을 볼 수 있다.

2. 담체의 물성

(1) 흡수율 및 기공률

석탄화의 첨가량에 따른 흡수율을 Fig. 3에 나타내었다. fly ash 100%로 제작하였을 때 기공율

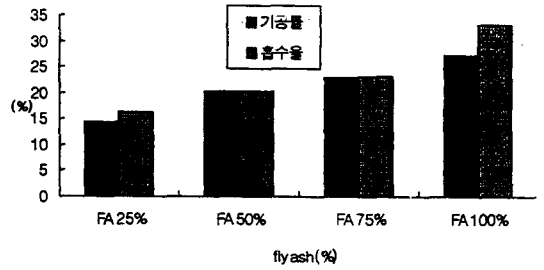


Fig. 3. Amounts of water adsorption and apparent porosity by fly-ash.

27.2%, 흡수율 33.2%로 가장 높았으며 25%함유시 기공율 14.4%, 흡수율 16.2%로 가장 낮게 나타났다.

fly ash의 함량이 높을수록 기공율 및 흡수율이 높은것을 볼 수 있으며, 이는 fly ash의 다공성을 나타내는 결과라고 볼 수 있다. 점토성분과 fly ash 내의 알칼리 성분등이 액상으로 되면서 기공을 적당히 메꾸어 기공의 크기가 적어지고, 기공분포 또한 적어지는 것으로 예상된다(22,23). fly ash 함량이 증가할수록 석탄화중의 미연탄소분이 발열에 의한 실제 온도를 높여준다는 연구보고가 있다(24). 이러한 연구결과에 비추어 볼 때 1100°C에서 소성을 하였지만 실제로는 더 높은 온도에서 소성이 되면서 액상이 생성되어 기공을 메꾸면서 치밀화가 이루어져 기공의 분포에 영향을 줄 것으로 사료된다.

(2) 용출실험

석탄화로 제조한 담체를 사용하였을 때 수용액 상태에서 유해 중금속의 용출여부를 관찰하기 위해 중금속 용출실험을 하였다. 용출실험의 결과는 Table 3.에 나타내었다. 분석결과 문제시되는 유해

Table 3. Extraction test of samples

(단위 : mg/ℓ)

중금속 Samples	Cu	Mn	Hg	Cr	Pb	Cd	Fe	Zn
F.A 25%	-	-	-	-	-	-	0.002	-
F.A 50%	-	-	-	-	-	-	0.004	-
F.A 75%	-	-	-	-	-	-	0.015	0.01
F.A 100%	-	-	-	-	-	-	0.036	0.06

중금속의 성분은 전혀 검출되지 않았으며, Fe와 Zn성분이 소량 검출되었다. 따라서 미량원소가 환경에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 생각되며, Fe은 HGMS선별방법에 의해 철 산물을 제거함으로써 용출량은 보다 감소시킬 수 있으므로 용출실험결과 석탄회로 만들어진 담체가 실제 폐수 흡착공정에 이용하여도 2차오염 문제는 없을 것으로 판단된다.

### (3) 흡착실험 결과

소성시킨 담체와 활성탄을 105℃에서 항량 건조시킨 후 방냉하여 건조된 상태로 담체에 접착제를 이용하여 부착활성탄을 만들어 흡착실험을 행하였다.

실험은 300ml Beaker에  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ 이온 20ppm용액 100ml를 각각 취하여 일정량의 활성탄을 첨가한 후  $NH_4Cl$  완충용액과  $H_2SO_4$  용액으로 pH를 조절하여 pH, 활성탄양, 반응시간을 변수로하여 각각의 조건에서 각 반응을 완료시켜 정량용 여과지(5종 A)로 여과하여 처음 20ml는 버리고 시료 20ml를 취하여 ICP로 잔류이온 농도를 측정된 결과는 다음과 같다.

#### 1. pH 변화에 따른 중금속 흡착

$Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ 이온의 pH변화에 의한 흡착영향을 관찰하기 위하여, 초기 이온농도를 각각 20ppm으로 하였으며, 활성탄양을 각각 1.00g을 취하여, pH를 3에서 11까지 영역에 대하여 변화시켰을 때 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.  $Cu^{2+}$ 는 pH 3에서 서서히 흡착이 이루어져 흡착량이 증가하기 시작하여 pH 5까지 증가하였으며, pH 7이상에서는 흡착이 평형에 도달하였다. pH 10에서 다시 잔류농도가 증가하는 곳으로 나타났으며 환원 현상이 일어나기 때문으로 사료된다.  $Mn^{2+}$ 은 산성영역보다는 알칼리성영역에서 더 많은 흡착량을 보였다.  $Cr^{6+}$ 은 pH 3과 pH 5부근에서 가장 높은 흡착량을 보이고, 그 이외의 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다.  $Cr^{6+}$ 은 산성영역에서 처리가 이루어져야 할 것으로 보이며, 이 결과는 pH 3.5 부근에서 크롬의 처리효율이 좋다는 최등<sup>38)</sup>의 연구결과와 흡사하다.  $Pb^{2+}$ 은 전영역에서 흡착이 잘

이루어지고 있음을 볼 수 있다.  $Cd^{2+}$ 은 pH 3에서부터 흡착이 이루어지기 시작하여, pH 4와 pH 9에서 흡착이 잘 이루어지고 있다. 이와 같은 결과는 강<sup>39)</sup>의 실험결과인 pH 8에서 흡착량이 급격히 증가하기 시작하여 pH 11에서 100%흡착을 이룬 결과치와 유사하다. 위의 실험결과 pH가 낮으면  $H^+$  이온이 많이 존재하여 활성탄에 강력하게 흡착되어 다른 이온의 흡착을 방해하기 때문에 pH가 낮을 때보다 pH가 높을 때 흡착이 용이하게 이루어지는 것을 알 수 있다. pH 2이하나 pH 10 이상인 강산, 강염기성에서는 활성탄의 표면에 황산물의 부착이 생성되어 실제폐수 처리시에는 곤란을 초래한다는 연구보고가 있다<sup>40)</sup>.

## 2. 활성탄의 중금속 흡착능

각 이온에 대한 활성탄양의 변화에 대한 흡착영향을 실험하여 등흡착식에 적용하여 보았다. 실험 결과는 Table 4, Table 5와 같다. 등흡착식은 Langmuir식, Freundlich식에 적용한 결과 액체-고체계의 흡착은 비교적 낮은 농도에서 잘 맞는 Freundlich식에 가까운 것을 볼수 있었다. 각 금속이온에 따른 등흡착식을 도시하면 Fig. 5, Fig. 6과 같이 나타났다. 일반적으로 1/n이 0.1~0.5일 때 흡착이 쉽게 일어나며, 1/n이 2이상인 물질은 난흡착성으로 흡착이 어렵다고 한다.  $Mn^{2+}$ 을 제외한 중금속이온은 부착활성탄에서 흡착이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

또한, 활성탄양이 증가할수록 흡착량이 증가하는 것을 알 수 있었으나, 일정한 농도의 용액에 대하여 0.3g의 3배량의 활성탄을 투입하여도 잔류이

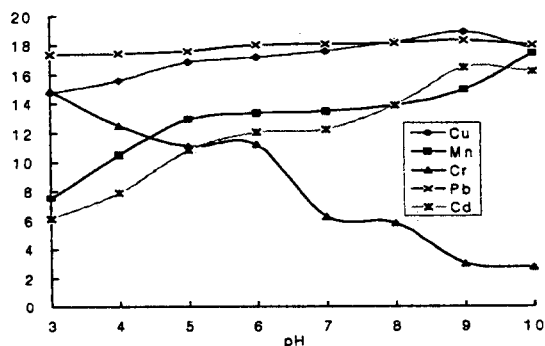


Fig. 4. The adsorption amounts of each heavy metal according to pH.

Table 4. Adsorption isotherms of batch type experiment

Ions	M(g)	Initial conc. C <sub>0</sub> (mg/l)	Equilibrium conc. C (mg/l)	Adsorption quantity x (mg/l)
Cu	0.32	20	5.05	14.95
	0.64	20	5.83	14.17
	0.90	20	1.82	18.18
	1.17	20	0	20
	1.69	20	0	20
Mn	0.32	20	12.5	7.5
	0.73	20	9.5	10.5
	1.16	20	8.20	11.8
	1.28	20	7.38	12.62
	1.71	20	5.6	14.4
Cr	0.30	20	14.5	15.5
	0.60	20	9.35	10.65
	0.90	20	7.19	12.81
	1.10	20	6.69	13.31
	1.60	20	3.21	16.79
Pb	0.40	20	6.73	13.27
	0.76	20	5.81	14.19
	1.07	20	1.75	18.25
	1.24	20	1.73	18.27
	1.77	20	1.74	18.26
Cd	0.32	20	12.3	7.7
	0.71	20	8.44	11.56
	1.00	20	7.35	12.65
	1.28	20	3.48	16.52
	1.65	20	2.85	17.15

Table 5. Freundlich and Langmuir constants obtained from experiments

Metal ions	Freundlich		Langmuir	
	1/n	k	a	b
Cu	0.383	8.814	16.748	1.304
Mn	0.037	4.681	6.679	0.166
Cr	0.406	3.177	12.658	0.188
Pb	0.483	5.212	2.288	2.749
Cd	0.280	4.433	11.494	0.255

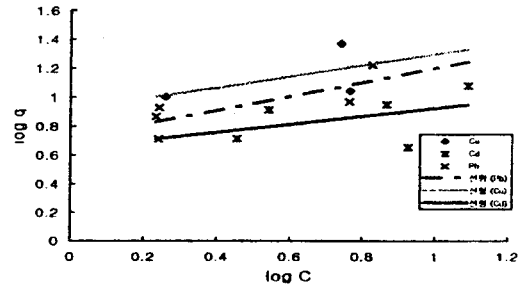


Fig. 5. Freundlich isotherm of Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>

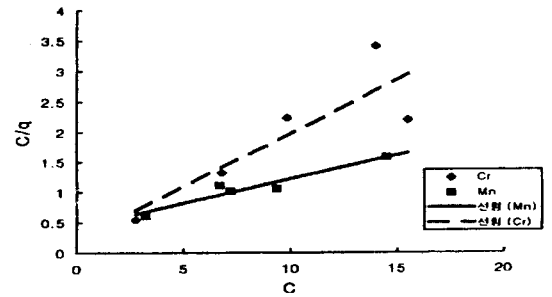


Fig. 6. Langmuir isotherm of Mn<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>

은 농도가 직선적으로 감소하는 것은 아니었다. 즉, 활성탄의 농도증가에 대한 흡착효과가 비례적으로 나타나지는 않았다. 따라서, 일정농도의 용액에 어떤 적정량의 활성탄을 사용하는 것이 효과적인지를 알 수 있었다.

### 3. 공존금속이온에 의한 흡착특성

Fig. 7~Fig. 9에 pH 4, pH 7, pH 10에서의 각 공존이온의 거동에 관하여 나타내었다. Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>은 pH 4에서 60분이면 평형에 도달하는 것을 볼 수 있으며, Mn<sup>2+</sup>과 Cd<sup>2+</sup>은 흡착이 잘 이루어지지 않은 것을 볼 수 있다. 단독으로 처리할 때보다 공존시 흡착이 잘 이루어지는 것을 볼 수 있으며, 이는 경쟁적으로 흡착을 하기때문으로 사료된다. 석탄회외의 특징상 Pb<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>같은 전이원소들은 Glass내에 농축하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.

pH 7에서는 Mn<sup>2+</sup>의 흡착이 pH 4보다는 흡착이 잘 이루어졌으며, 90분이 지난 후부터는 다시 환원

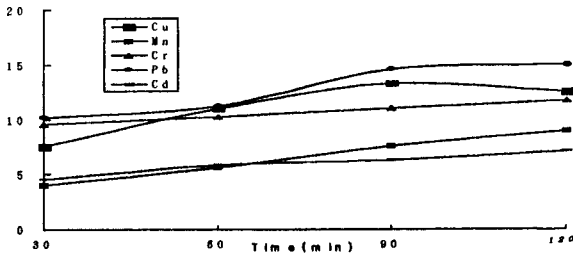


Fig. 7. Effects of co-existing on the Adsorption of Heavy metals.(pH=4)

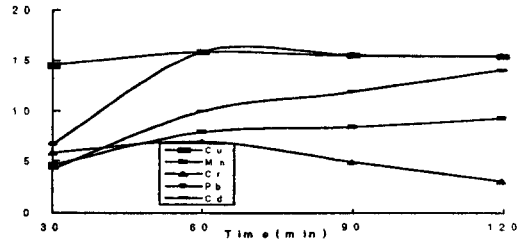


Fig. 9. Effects of co-existing on the Adsorption of Heavy metals.(pH=10)

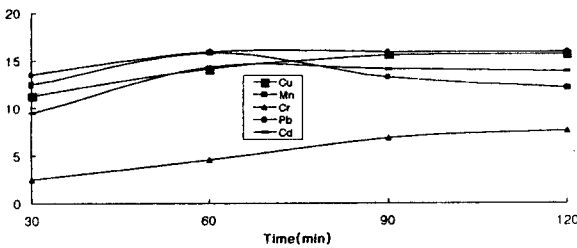


Fig. 8. Effects of co-existing on the Adsorption of Heavy metals. (pH=7)

되어 탈착이 일어나고 있음을 볼 수 있다.  $Cr^{6+}$ 은 흡착의 적정 pH인 3부근을 벗어나서 흡착이 시간이 흐름에 따라 진행은 되지만 속도와 제거율은 가장 떨어지는 것을 볼 수 있다.

pH 10에서는  $Cu^{2+}$ 는 30분안에 흡착이 평형에 이르렀으며,  $Mn^{2+}$ 은 거의 직선적으로 흡착이 이루어지고 있으며,  $Cr^{6+}$ 은 낮은 흡착력을 보이며 60분 이후에는 탈착되는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 pH 10에서  $Cu^{2+}$ 와  $Pb^{2+}$ 은 흡착이 잘 되고 있으며,  $Cr^{6+}$ 은 탈착이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 전체적으로 공존되는 이온들의 영향이 적으므로 사료된다.

#### 4. 탈착실험

평형흡착이 이루어진 활성탄에 0.1N-HCl용액 100ml에 넣고 150rpm으로 30분간 교반시킨후 반응을 완료시켰다.

이는 평형 실험과도 유사한 관계를 나타내었다. 각각 이온의 탈착량은  $Cu^{2+}$  : 86.65%,  $Mn^{2+}$  : 90%,  $Cr^{6+}$  : 60%,  $Pb^{2+}$  : 70.35%,  $Cd^{2+}$  : 91.44%의 탈착량을

보였다. 대부분 중금속의 회수율이 60~80%정도면 회수할 경제적 가치가 있는 것으로 되어 있어, 부착활성탄에 의한 탈착실험결과 중금속을 회수 할 수 있다고 보여진다.

### IV. 결론

석탄회를 이용하여 부착활성탄을 만들어 중금속의 제거 특성을 알아본 결과는 다음과 같다.

1. 석탄회의 배합율을 25%, 50%, 75%, 100%로 하여 물성실험을 한 결과 기공율 및 흡수율은 100%소성체가 가장 높았고, 내마모성은 25%소성체가 가장 낮았으며, 용출실험의 결과는 75%와 100%가 Fe와 Zn의 용출을 보였다.
2. pH에 따른 변화를 살펴보면  $Cu^{2+}$ 는 pH 7이상에서는 거의 흡착이 이루어지고, pH 10에서부터 환원현상이 일어났으며,  $Mn^{2+}$ 은 알칼리성 영역에서,  $Cr^{6+}$ 은 산성영역에서,  $Pb^{2+}$ 는 전 영역에서,  $Cd^{2+}$ 은 pH 4와 pH 9에서 흡착이 잘 되는 것을 알 수 있었다.
3. 부착활성탄의 중금속흡착은 Langmuir등온식보다는 Freundlich등온식을 따르는 것으로 사료되며,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ 은 Freundlich등온식에  $Mn^{2+}$ 과  $Cr^{6+}$ 은 Langmuir등온식에 잘 일치함을 알 수 있었다. Freundlich constant  $1/n$ 은 0.1~0.5범위에 들어와 부착활성탄의 중금속흡착은 용이한 것으로 보인다.

4. 반응시간의 변화를 살펴보면  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  이온은 30분 경에,  $\text{Mn}^{2+}$ 은 15분,  $\text{Cr}^{6+}$ 은 60분 정도에 흡착평형에 이른 것으로 사료된다.
5. 탈착률 60~80%정도면 금속의 회수가 가능한 것으로 보고 있어 60~91.44%의 탈착율은 금속 회수의 가능성이 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 남인식, 이용연, 이한주, 하백현 : 흡착분리공정의 에너지 절약, 에너지관리공단, p.23, 1988
2. Breck, D.W. : Zeolite Molecular Sieves, John Wiley & Sons, New York, 1974.
3. 고도정수처리 시스템 개발, 한국건설기술연구원, pp.106~145.
4. 최병선, 박종현, 민창기 : Fly ash이용 경량골재 시용화를 위한 연구.
5. 한국원자력 관리공단 연구집, 1992, p.325.
6. 한국자원리사이클학회, 자원리사이클링의 실제, 동화기술, 1994.
7. Mattson, J.S. and Mark, H.B. : Activated Carbon, Marcel Dekker, NewYork, 1971.
8. LeChevallier, M.W., T.S. Hassenauer, A.K. Cramper. : Disinfection of Bacteria Attached to Granular Activated Carbon, Appl. Environ. Micro., Vol 48-5, pp 918~923, 1984.
12. Schultz, J.R. and T.M.Keinath. : Powdered Activated Carbon Treatment Mechanisms, J. WPCF, Vol 56, pp 143~151, 1984.
13. 沈鶴輔, 金宗植 : 化學工學, 東明社, p.280, 1975.
14. 韓泰熙 外 : 物理化學演習(下), 寶普齋, p.218, 1979.
16. 李奉模, 河白顯 : 單位操作, 普成文化社, 1983, p.280.
17. M.J.McGuire, I.H.Suffet : J., Aiwwa, 70, pp 621~624, 1978.
18. 柳井弘 : 活性炭 讀本, 日刊工業新聞社, 1982, pp.54~70.
19. 崔義昭, 趙光明 : 環境工學, 清文閣, 1985, p.147.
21. J. J. Kipling : Academic Press, N.Y., 1965.
22. 석탄회 및 탈황석고활용 국제워크숍, 한국전력공사, 1997, pp.29~38.
23. 석탄회의 구조 및 특성 연구, 보령화력발전소, 기술정보, 1996, pp.4~20.
24. R.G.Aldrich and W.J.Zacharias : Fly ash Magnetite-A Commercial Realization, in Proceedings of the Sixth International ash Utilization Symposium, Reno, Nevada, DOE/METC/82-52,2, 1982.
25. A. D. Kelmers, R.M.canon, B.Z.Egan, L.K. Felker, T.M.Gillain, G. Jones, G.D.Owen, F.G.Seeley, and J.S.Watson : Cheminsty of the direct Acid Leach, Calsinter, and Pressure Digestion-Acid Leach Methods for the Recovery of Aluminum from Fly ash, Resources and Conservation, Vol9, p271, 1982
27. Takesh, Ohtake, et al : J. Ceram. Soc. Japan. 99-233,55, 1991
29. Antonio Peloso : Resources and conservation, 10,211-220, 1983.
32. 홍원표, 노재성, 조현영, 정수영, 김우한 : J. Kor. Ceramic Soc., Vol 27, p 833, 1990.
33. P. K. Mehta : CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol 15, pp 669~694, 1985.
34. C Poole, et. al. : The Characterization of Fly ash Microspheres, Leeds University Mining Association J., 1983, p.103.
35. 이기강, 김동원 : J. Korean Association of Crystal Growth, Vol3, p. 45, 1993.
37. 이기강, 김동원 : 석탄회-점토계 벽돌소지의 곡강도와 미세구조, 한국결정성장학회지, Vol3, pp45~58, 1993.
38. 최규승 : 산성용액에서 활성탄에 의한 Cr(VI)이온의 환원 및 흡착, 고려대학교, 1982, 9.
39. 강경희 : 활성탄에 의한 염료합성폐수의 흡착 특성에 관한 연구, 중앙대학교, 1987, 12.
40. 강운석 : 활성탄에 의한 중금속 이온의 흡착에 관한 연구, 한양대학교, 1987, 6.