

비산회재 및 무연탄을 원료로 한 흡착제 제조

백 일 현[†] · 빈 현 숙 · 류 완 호* · 김 태 영** · 민 병 무

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부, *단국대학교 공업화학과, **충청북도립 옥천전문대학 환경공학과
(1999년 2월 1일 접수, 1999년 5월 17일 채택)

Manufacture of Adsorbent from Fly-ash and Anthracite

Il-Hyun Baek[†], Hyun-Suk Bin, Wan-Ho Roo*, Tae-Young Kim**, and Byoung-Moo Min

Energy & Environmental Research Department, Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea

[†]Department of Industrial Chemistry, Dankook University, Chungnam 330-714, Korea

^{**}Department of Environmental industry, Chungbuk Province Okchon Collage, Chungbuk 373-800, Korea

(Received February 1, 1999; accepted May 17, 1999)

요 약: 본 연구에서는 현재 폐기되고 있는 미연탄소분을 많이 함유한 비산회재를 이용하여 흡착제를 제조하고자 하였으며, 제조된 흡착제에 대한 중금속 제거실험을 통하여 중금속을 함유한 폐수처리의 적용가능성을 알아보았다. 비산회재에 장성탄의 혼합비율을 달리하여 세 종류의 펠릿을 제조하였으며, 장성탄의 혼합비율이 증가함에 따라 펠릿의 고정탄소함량이 증가하였다. 이를 이용하여 탄화와 활성화를 거쳐 85~96%의 경도와 100~300 mg/g의 요오드 흡착량을 갖는 흡착제를 제조하였으며, 장성탄 혼합비율이 증가할수록 경도 및 요오드 흡착량이 증가함을 알 수 있었다. 중금속의 제거실험에서 제조된 흡착제에 대한 Pb와 Cr의 제거율이 90% 이상을 나타내었으며, 비산회재의 경우 Pb 31.5%, Cr 5.6%의 낮은 제거율을 보였다. 이는 활성화과정등인 비산회재에 함유된 미연탄소분과 SiO₂에 의하여 흡착능력이 증가되었기 때문이다.

Abstract: The utilization of fly-ash containing high levels of the unburned carbon was investigated. In this study adsorbents were manufactured from fly-ash as a raw material and the manufactured adsorbents were applied to the waste-water treatment including heavy metals. Varying the anthracite(Jangsung coal) content, three types of pellet were made. The carbon content of pellet increased appreciably upon the addition of anthracite. After carbonization and activation using the pellets, adsorbents showed following characteristics: the range of hardness was between 85% and 96%, iodine number was from 100 mg/g to 300 mg/g. In proportion to the anthracite addition, hardness and iodine number increased. Through the adsorption experiments of heavy metals, removal efficiencies of Pb and Cr by manufactured adsorbents were over 90%. In case of fly-ash, removal efficiencies of Pb and Cr were 31.5% and 5.6% respectively. The reason why removal capacities of manufactured adsorbents were higher than fly-ash was postulated that adsorption capability was improved by unburned carbon and SiO₂ which were included in fly-ash during steam activation.

Key words: Fly-ash, Anthracite, Adsorbent, Heavy metal removal

1. 서 론

흡착공정은 효과적인 수처리를 위한 고도의 기술로 인식되고 있으며, 대표적인 흡착제로 활성탄이 널리 알려져 있다. 활성탄은 유기물에 대한 탁월한 흡착력을 가지고 있어, 수처리 및 오염된 기체의 정화공정에 이용되고 있으나, 활성탄은 가격이 비싸고, 재생 또는 운전과정에서 10~15%의 마모가 생기기 때문에 유지관리비가 많이 든다. 또한 재생과정에서 부차적인 오염이 발생한다는 단점이 있다. 따라서 보다 저렴한 활성탄 대체제의 개발이 필요시되고 있다. 이를 위하여 bottom ash, brick-kiln ash, fly-ash, clay, wollastonite 등이 새로운 흡착제의 원료로 시도되고 있으며, 많은 연구결과에서 비산회재(fly-ash)가 좋은 흡착력을 갖는다고 보고되었다 [1,2].

화력발전소에서 발생하는 비산회재는 미세한 비연소성 잔류물로, 배연가스와 함께 연소로에서 이송되어 1~100 μ m 정도의 입자크

기를 갖는다. 현재 발생되는 비산회재는 주로 슬러리화하여 회사장에 매립되고 있다. 회사장에 저장된 비산회재는 인근 지역으로 날리어 주변환경을 저해시키거나, 함유된 화학성분의 용출에 의하여 토양 및 수질오염의 가능성이 제기되고 있다. 또한 기존 화력발전소들의 회사장은 거의 포화상태에 다다르고 있고, 신규 화력발전소의 건설시 회사장의 부지확보가 큰 부담이 되고 있다. 따라서 비산회재를 재활용할 경우, 폐기물의 재이용에 따른 부가가치의 창출, 발전소의 부지확보, 환경오염방지 등 많은 문제점을 해결할 수 있다 [3]. 특히 비산회재는 다량의 실리카와 알루미늄을 함유하는 특징이 있기 때문에 여러 용도로 활용이 가능하다. 실례로 매립지에서 고농도 유기물을 함유한 침출수의 누수방지를 위한 복토제, 막음제로 비산회재가 사용되고 있다. Aydin은 비산회재가 수용액상에서 유기물에 대한 흡착능력을 가지고 있음을 발표하여, 저급흡착제로서의 잠재적 능력을 평가하기도 하였다 [4].

Panday는 비산회재와 규회석을 1:1로 혼합하여, 이를 흡착제로 사용하였으며, 수용액상에서 6가 크롬에 대한 흡착실험을 수행하였다. 비산회재와 규회석에 대한 크롬의 제거는 농도, pH, 수용액의 온도에 의존되며, 실험을 통하여 얻어진 데이터를 Langmuir

[†] 주 저자 (e-mail: ihb@sun330.kier.re.kr)

isotherm에 적용한 결과, 최대의 크롬 제거는 30 °C, pH 3에서 이루어졌고, 흡착은 우선 확산에 의해 결정되어진다고 보고하였다[5].

외국에서는 각종 중금속 및 유기물질의 제거에 관한 연구가 많이 이루어졌으나, 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 아직 미비한 실정이다. 한편 이시진과 홍성장은 폐놀제거를 위하여 비산화제를 사용하였으며, 수중의 대표적 유기물로 취급되는 폐놀에 대한 제거를 통하여 악취 및 THMs과 같은 발암물질의 발생근원을 없애고자 하였다[6].

현재까지는 분말상태의 비산화제를 흡착제로서 그대로 사용하거나, 알루미나나 철을 비산화제에 함침시키는 등, 단순한 과정을 거쳐 분말흡착제로 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 비산화제에 석탄계 핏치를 바인더로 첨가하여 흡착제를 원주형태로 만들었으며, 이를 탄화, 활성화시켰다는 특징을 가지고 있다. 여기서 탄화와 활성화는 활성탄의 제조공정에 이용되는 방법으로, 탄화(carbonization)는 일반적으로 500~700 °C의 공기가 없는, 즉 비반응(inert) 분위기에서 이루어지며, 활성화에 필요한 기공을 형성시킨다. 탄화 과정에서 가열을 통해 1차로 결합하지 않은 수분이 105 °C에서 대부분 제거되고, 300 °C 정도에서 결합수분까지 완전히 제거된다. 활성화(activation)는 흡착제의 표면적을 증가시키기 위하여 수반되어지며, 수증기활성화를 기본으로 할 경우 750~900 °C 사이에서 반응이 일어난다[7].

본 연구의 목적은 현재 폐기되고 있는 미연탄소분을 많이 함유한 비산화제를 재활용하는 것으로 이를 이용하여 흡착제를 제조하였으며, 제조된 흡착제의 중금속 제거능력을 평가함으로써 고농도의 중금속을 함유한 폐수처리에 대한 적용가능성을 알아보았다.

2. 실험방법 및 장치

2.1. 시료 선정

보령화력발전소에서 발생하는 비산화제를 (주)한국FLY-ASH공업에서 분급한 후 미연탄소분이 많은 비산화제를 흡착제의 주원료로 사용하였다. 일반적으로 (주)한국FLY-ASH공업에서는 3% 미만의 탄소를 함유한 저탄소 비산화제와 6~18%의 미연탄소를 함유한 고탄소 비산화제를 분리하며, 저탄소 비산화제는 콘크리트 혼화제 및 시멘트의 원료로 재활용하고 있다. 그러나 고탄소 비산화제는 현재 폐기되고 있는 실정이다. 무연탄은 강원도에서 발생하는 장성탄을 이용하였으며, 74 μm 이하(200 mesh)로 분쇄하여 사용하였다. 바인더로는 (주)거평에서 생산되는 석탄계 핏치를 250 μm 이하(60 mesh)로 분쇄하여 첨가하였다. 원료에 대한 공업분석을 통하여 고정탄소의 함량을 알아보았으며, 이를 토대로 탄소성분과 흡착제의 제조에 관한 연관성을 찾고자 하였다.

2.2. 펠릿 제조

비산화제 및 무연탄의 혼합비를 변화시켜 3종류의 펠릿(pellet)을 제조하였다. 우선 비산화제를 주원료로 하여 제조한 펠릿의 경우 PFF(pellet from fly-ash)로 하였으며, 비산화제와 무연탄을 75:25의 비율로 혼합하였을 경우 PFFA25(pellet from fly-ash and anthracite(75:25)), 비산화제와 무연탄의 비율을 50:50로 하였을 경우 PFFA50(pellet from fly-ash and anthracite(50:50))으로 명명하였다. 배합비는 PFF의 경우 비산화제를 65~70%, 핏치 15~20%의 비율로 하였으며, 제조된 펠릿의 표면을 매끄럽게 하고, 균일하게 혼합되도록 15%의 물을 첨가하였다. PFFA25의 경우 비산화제 45~55%, 무연탄 15~20%, 핏치 15~20%, 물 15%, PFFA50의 경우 비산화제 30~35%, 무연탄 30~35%, 핏치 15~20%, 물 15%의 비율로 배합하였다. 원료의 균일한 혼합을 위하여 50~60 °C에서 20~40 min 동안 교반하였다. 그후 원형펠릿제조기(disk

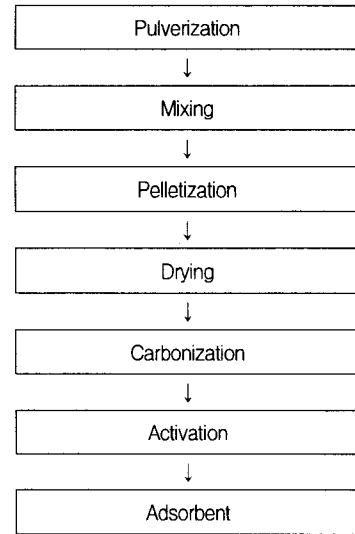


Figure 1. The manufacture procedure of adsorbent.

pelletizer)를 이용하여 직경 3 mm, 길이 6 mm의 펠릿을 만들었다. 제조된 펠릿은 80 °C에서 수분이 완전히 제거될 때까지 건조시켰다.

2.3. 흡착제 제조

건조된 펠릿을 로타리 킬른의 작은 반응기에 넣고 온도를 상승시켜 탄화와 활성화과정을 거쳤으며, 탄화는 600 °C에서 1시간 동안 질소분위기에서 이루어졌다. 질소는 20 mL/min의 일정한 속도를 가지고 킬른안으로 유입되었으며, 탄화과정을 거친 후 연속과정으로 활성화를 수행하였다. 활성화는 수증기활성화를 기본으로 하였으며, 850 °C에서 2시간 동안 1.66 mL/min로 공급되는 물을 200 °C의 수증기로 전환하여 킬른내로 주입하였다. 활성화반응이 끝난 후 로타리 킬른을 200~300 °C까지 냉각시킨 후 반응기에서 시료를 꺼내어 분석하였다. 킬른의 온도상승 및 냉각과정동안 반응이 일어나지 않도록 비반응(inert) 분위기를 유지하였으며, 이를 위해 탄화과정에서와 마찬가지로 20 mL/min의 질소를 주입하였다. 이 과정을 통하여 흡착제를 얻었으며, 비산화제만을 원료로 하여 제조된 흡착제를 AFF(adsorbent from fly-ash), 비산화제 75%와 무연탄 25%를 혼합하여 제조한 흡착제를 AFFA25(adsorbent from fly-ash and anthracite(75:25)), 비산화제와 무연탄의 비율이 50:50인 흡착제를 AFFA50(adsorbent from fly-ash and anthracite(50:50))으로 하였다. 제조된 흡착제는 기존 상품화된 C사의 활성탄 ACC와 비교하여 그 특성을 파악하였으며, 이를 위하여 공업분석 및 요오드 흡착량(iodine number, mg/g), 경도(hardness, %)를 측정하였다. 요오드 흡착량 및 경도는 한국산업규격에 제시된 활성탄 시험방법에 준하여 실험하였다.

흡착제의 제조과정을 Figure 1에 간략하게 나타내었다.

2.4. 로타리 킬른 장치구성

사용된 로타리 킬른은 장치구성이 용이하고, 경사각 및 회전속도를 통하여 체류시간을 변화시킬 수 있다. 또한 외부가열방법으로 온도를 손쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 로타리 킬른은 길이 120 cm, 지름 45 cm로 설계되었고, 킬른 외부로 단열재로 둘러싸서 온도가 외부로 전달되는 것을 방지하였다. 이때 단열재 내부에 가열체로 슈퍼칸탈을 장착하여 반응기를 가열하였다. 반응기의 온도는 50 cm 간격으로 설치된 2개의 열전대(K-Type) 및 자동온도조절기(HAN YOUNG HY-P100)에 의해 조절되었다. 로타리 킬른의 회전을 위해 회전모터를 설치하였고 회전속도를 10

rpm으로 고정하여 실험하였다. 탄화과정시 질소를 주입하기 위하여 레귤레이터를 포함하는 질소 주입장치와 활성화과정 동안 수증기의 주입을 위해 물탱크와 정량펌프(Milton Roy minipump[®], metering pump), 유량계로 구성된 수증기 주입장치를 설치하였다. 또한 반응시 발생하는 액상 타르 및 휘발성분을 포집할 수 있도록 출구에 응축기를 장착하였다.

2.5. 제조된 흡착제의 중금속 제거능력

중금속 제거실험을 위하여 Pb와 Cr을 선택하였으며, 사용된 Pb는 Junsei사 1000 ppm standard solution (Pb(NO₃)₂ in 1 mole/L HNO₃), Cr의 경우 Shannon사의 1000 ppm standard solution (Cr(NO₃)₃ in 1 mole/L HNO₃)을 사용하였다. 대상시료는 L.O.I. 7.3%의 비산회재와 제조된 흡착제 AFF, AFFA50, 그리고 비교활성탄 ACC로 하였다. 우선 Pb 및 Cr의 1000 ppm 표준시약을 5 ppm으로 희석시켰으며, 흡착제는 74 μm (200 mesh체를 통과)이하로 분쇄 후 110 °C에서 2시간 동안 건조한 후 사용하였다. 300 mL의 삼각플라스크에 흡착제 1 g을 정량하고, 5 ppm 중금속희석수를 100 mL 넣었으며, 이를 20 °C로 조절된 water bath shaker에서 1 시간동안 진탕시킨 후 여과지(whatman사, filter paper No. 42)를 이용하여 흡착제를 분리하였다. 분리 후 남은 여액의 ICP 분석을 통하여 중금속의 농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시료분석

본 연구에서 (주)한국 FLY-ASH공업에서 발생하는 고탄소 비산회재를 활용하고자 '98년 8월에 원료를 구입하였으며, L.O.I.(loss on ignition)가 7.3%로 나타났다. 여기서 L.O.I.은 700 °C 이상의 고온에서 손실되는 양을 말하며, 미연탄소량과 같은 의미로 사용되고 있다. Table 1은 흡착제의 원료로 사용된 비산회재의 구성성분을 나타낸 것이다. SiO₂가 53.12%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었으며, 그 다음으로 Al₂O₃가 26.29%를 나타내었다. 또한 CaO가 3.94%를 차지하고 있었으며, 비산회재내 함유된 CaO는 수증에서 Ca(OH)₂로 전환되어 pH를 상승시키는 작용을 한다. 이에 증류수 100 mL에 비산회재 1 g을 담아 24시간 동안 교반시킨 후 pH를 측정된 결과 12이상의 높은 값을 보였다. 비산회재에 함유된 중금속은 Cr이 71 mg/kg, V가 136 mg/kg, Zn이 78 mg/kg이었으며, 이에 따라 비산회재를 흡착제의 원료로 사용할 경우 수용액상에서의 중금속 용출에 대한 평가가 이루어져야 했다. 이스라엘의 Nathan은 비산회재에 대한 수용상에서의 중금속 용출실험을 수행하였으며, 물과 아세톤을 용매로 사용하였다. 실험을 통하여 Cr은 pH 4 이하의 낮은 pH에서 용출되며, As의 경우 수용액상에서는 낮은 용해도를 보였으나, 아세톤에서는 높은 용해도를 가지고 있어 비산회재를 재이용할 경우 Cr에 대한 주의가 요구된다고 발표하였다[8]. 그러나 본 실험에 사용된 비산회재는 CaO를 3.94%함유하고 있어, pH 12이상을 유지하므로 Cr의 용출에 대한 잠재적 위험은 없다고 평가된다.

비산회재의 입자크기분포를 Figure 2에 나타내었다. 입자크기는 펠릿 제조시 표면의 거칠기 및 경도에 영향을 끼치므로 입자크기의 분포분석을 통하여 비산회재의 물리적 특성을 평가하고자 하였다. 실험결과 53~74 μm의 크기를 갖는 비산회재가 39.65%로 가장 많은 비율을 차지하고 있었으며, 그 다음으로는 45~53 μm의 크기를 갖는 입자로 26.06%였다. 일반적으로 조립 활성탄의 제조시 미분탄의 크기는 45~74 μm가 최적이며, 이보다 입자가 클 경우 표면이 거칠뿐만 아니라, 균일한 활성탄의 제조가 어렵게 된다. 또한 입자가 작을 경우 경도가 낮아지는 문제가 있다. 실험에 사용

Table 1. Contents of Components and Heavy Metal Elements in Fly-ash

	Inorganic components (%)					Heavy metal elements (mg/kg)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr	V	Cu	Pb	Zn
Boreng fly-ash	53.12	26.29	7.71	3.94	1.23	71	136	59	44	78

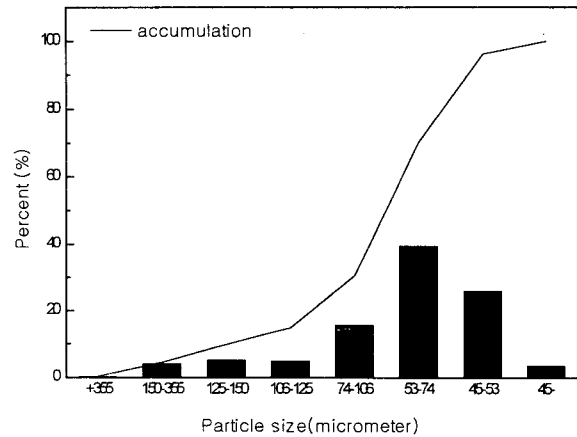


Figure 2. Particle size distribution of Boreng fly-ash.

된 비산회재는 45~74 μm의 크기를 갖는 입자가 65.71%로 많은 비율을 차지하고 있는 장점이 있다. 비산회재중 입자가 큰 것일수록 흑색을 띠며 미연탄소분을 많이 포함하고 있었으며, 45 μm 이하의 미세한 입자의 경우 연회색을 띠고 있어, 미연탄소분이 거의 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 비산회재에 함유된 SiO₂뿐만 아니라 미연탄소성분을 활용하여 흡착제를 제조하고자 하였기 때문에 45~74 μm의 입자크기를 갖는 비산회재를 분리하여 사용하지 않고, 구입된 비산회재를 전처리 없이 그대로 사용하였다.

흡착제의 탄소함량을 높이고자 국내 무연탄인 장성탄을 첨가하였으며, 장성탄은 외국에서 수입하는 유연탄보다 휘발분 및 고정탄소분이 상대적으로 적어 탄화 및 활성화과정에서 기공이 잘 발달되지 않으며, 회분의 함량이 높아 활용도가 낮은 실정이다. 따라서 비산회재를 원료로 한 흡착제 제조에 장성탄을 혼합할 경우 원료의 탄소비율이 높아질 뿐만 아니라, 국내 무연탄에 대한 활용도를 찾을 수 있는 두 가지의 장점이 있다. 장성탄의 공업분석결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서 보여지듯이 고정탄소 및 회분의 함량이 각각 50.2%, 36.1%로 분석되었으며, 휘발분이 9.9%로 낮게 나타났다.

바인더로 사용된 석탄계 핏치는 (주)거평에서 생산하는 연화점이 112 °C인 경핏치를 사용하였으며, 1%의 회분을 함유하고 있었다. 석탄계 핏치는 타르를 증류시켰을 때 발생하는 잔류물로 연화점에 따라 연핏치, 중핏치, 경핏치의 3종류가 있으며, 연화점 70~85 °C인 것은 중핏치, 연화점이 85 °C 이상인 것은 경핏치라 한다. 일반적으로 석탄계 핏치는 석탄을 원료로 하는 조립 활성탄의 바인더로 사용되고 있다.

3.2. 펠릿의 특징

각 타입별 건조된 펠릿의 공업분석을 Table 3에 나타내었다. 미연탄소가 7.3% 포함된 비산회재를 원료로 펠릿을 제조한 PFF의 경우 고정탄소의 함량이 16.32%로 증가하였다. 이는 바인더로 15~20% 첨가한 석탄계 핏치에 탄소가 포함되어 있어 상대적으로

Table 2. Proximate Analysis of Anthracite

%	T.M. ⁱ⁾	V.M. ⁱⁱ⁾	ASH ⁱⁱⁱ⁾	F.C. ^{iv)}	caloric value (kcal/kg)
Jangsung coal	3.8	9.9	36.1	50.2	4,900

i) T.M. - total moisture
 ii) V.M. - volatile matter
 iii) ASH - ash content
 iv) F.C. - fixed carbon

Table 3. Proximate Analysis of Pellets

Type	mixture ratio (%)	proximate analysis (%)		
		V.M.	ASH	F.C.
PFF	FA ⁱ⁾ : JA ⁱⁱ⁾ = 100 : 0	19.37	64.31	16.32
PFFA25	FA : JA = 75 : 25	20.45	55.05	24.50
PFFA50	FA : JA = 50 : 50	21.43	47.36	31.32

i) FA : fly-ash
 ii) JA : Jangsung coal

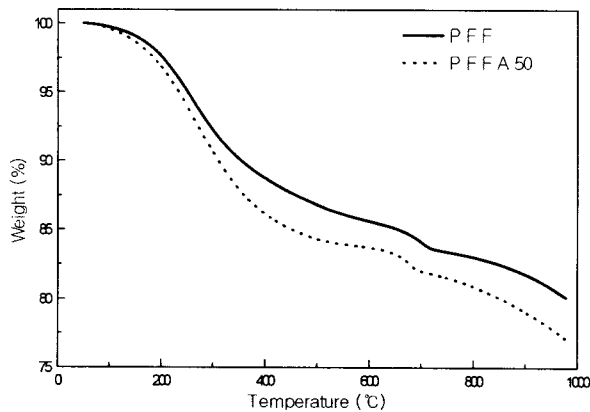


Figure 3. TGA thermograms of pellets.

고정탄소의 비율이 증가되었기 때문이다. 비산회재와 장성탄을 75 : 25의 비율로 혼합하여 만든 PFFA25의 경우 고정탄소의 비율이 24.50%로 PFF보다 8.18% 증가되어졌으며, 비산회재와 장성탄을 50 : 50으로 혼합한 PFFA50의 경우 PFF보다 15%가 더 증가되었다. 각 펠릿의 휘발분은 약간씩 증가하였으나, 그 변화량이 크지 않았고, 고정탄소비율이 증가정도에 따라 회분의 함량이 감소하는 경향을 보였다.

Figure 3은 PFF와 PFFA50의 열중량분석결과를 나타낸 것으로, 200 °C에서 급격한 질량감소가 시작되어 그 경향이 400 °C까지 지속되고 있음을 보이고 있다. 열중량분석을 통하여 펠릿안에 존재하는 휘발분은 200 °C에서 400 °C 사이에 빠른 속도로 제거됨을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 탄화는 400 °C 이상의 온도에서 수행하는 것이 적절하다고 판단되었다. 또한 400 °C에서 1000 °C까지 완만한 질량감소가 보이고 있었으며, 이는 펠릿이 압축, 성형되었기 때문에 펠릿 내부에 존재하고 있는 휘발분이 온도가 높게 상승하면서 압력을 이기고 표면을 통하여 서서히 빠져 나오기 때문이다. 본 실험에서는 탄화를 600 °C에서 수행하였고, 이 온도를 1시간동안 유지하여 펠릿내부에 존재하는 휘발성분이 빠져 나올 수 있도록 하였다. 이 과정을 통하여 휘발분이 표면으로 방출되면서 그 자리에 기공(open pore)이 형성된다.

3.3. 흡착제 특성

각 흡착제별 탄화 및 활성화 후 특성을 알아보았으며, 요오드 흡

Table 4. Comparison of Manufactured Adsorbent and Activated Carbon

Type	carbonization		activation	
	I ₂ (mg/g) ⁱ⁾	H.D.(%) ⁱⁱ⁾	I ₂ (mg/g)	H.D.(%)
AFF	91.96	95.4	100.63	85.8
AFFA25	-	96.6	257.67	95.3
AFFA50	111.28	97.5	287.60	96.3
ACC ⁱⁱⁱ⁾			940.60	77.5

i) I₂ - iodine number, mg/g
 ii) H.D. - hardness, %
 iii) ACC - comparison activated carbon

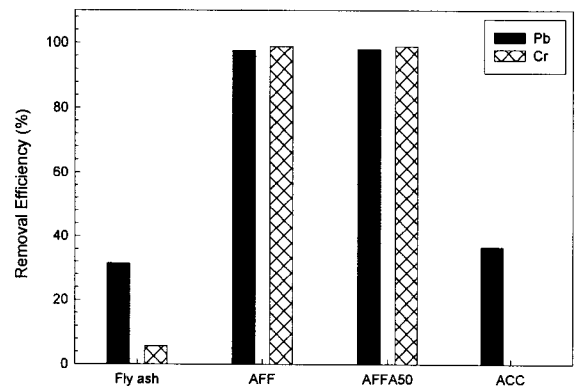


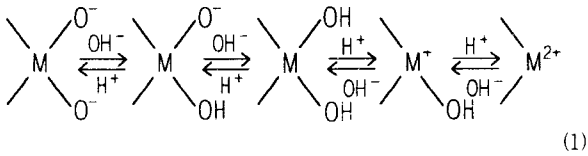
Figure 4. Removal efficiency of heavy metals.

착량 및 경도를 측정하여 Table 4에 그 값을 나타내었다. 또한 기존 상용화된 C사 활성탄(ACC)을 비교흡착제로 하였다. 여기서 요오드 흡착량은 액상에서의 흡착능을 평가하는 대표적인 방법으로 일반적으로 활성탄의 요오드 흡착량은 800~1200 mg/g이다. 우선 AFF의 경우 탄화후 95.4%의 높은 경도를 가지고 있었으나, 91.96 mg/g의 낮은 요오드 흡착량을 보였다. 이를 활성화하였을 경우 경도가 85.8%로 낮아진 반면 요오드 흡착량이 100.63 mg/g으로 증가하였다. AFFA25의 경우 활성화과정후 95.3%의 경도 및 257.67 mg/g의 요오드 흡착량을 가지고 있었으며, AFFA50의 경우 각각 96.3%, 287.60 mg/g으로 나타났다. 따라서 장성탄의 혼합비율이 증가할수록 경도가 증가되는 경향을 보이고 있었으며, 이를 통하여 고정탄소의 비율이 증가될수록 경도가 증가되어짐을 알 수 있었다. 경도는 제조된 흡착제가 ACC보다 높게 나타났다. 요오드 흡착량 역시 장성탄을 혼합함에 따라 상당량이 증가되어 졌으나, 940.60 mg/g의 요오드 흡착량을 갖는 ACC와 비교할 때 낮은 흡착능력을 보였다.

3.4. 중금속의 흡착성능

제조된 흡착제의 Pb와 Cr의 흡착실험결과를 Figure 4에 나타내었다. Pb에 대한 흡착에서 L.O.I. 7.3%인 비산회재의 경우 31.5%의 제거율을 보였으며, AFF의 경우 97.7%, AFFA50의 경우 98.1%의 높은 제거율을 보였다. 그러나 ACC의 경우 36.6%의 제거율을 나타내, 제조된 흡착제가 Pb에 대한 탁월한 흡착능력을 가지고 있음을 알 수 있었다. Cr의 흡착에서도 Pb과 같은 경향을 나타냈으며, 비산회재의 경우 5.6%, AFF 99%, AFFA50 99%, ACC 0.0%의 제거율이 나왔다. 이를 통하여 Cr은 비산회재 자체에 대해서는 흡착이 잘 일어나지 않으나, 이를 원료로 흡착제를 제조하였을 경우 높은 흡착능을 보이고 있음을 알 수 있었다.

이는 원료로 사용한 비산회재에 Al, Ca, Si의 산화물이 풍부하게 존재하고 있으며, 산화물의 수화된 표면은 산과 염기의 양성적 해리를 통하여 수용액상에서 표면의 이온기를 발달시키기 때문이다.



식 (1)에서 M은 Al, Ca, Si를 의미하며, 흡착제의 표면이온은 pH에 의존된다. 그러나 비산회재에 많이 함유된 Si의 경우 PZC(point of zero charge)가 pH_{PZC} 2.0[5]으로 대부분의 pH 범위에서 음이온성을 띠고 있다[9]. 이에 따라 다가양이온의 중금속에 대한 흡착이 일어나게 된다. 또한 흡착제의 제조과정의 마지막 단계인 수증기 활성화에서 흡착제의 표면에 존재하는 Si가 수증기와 충분한 시간을 가지고 반응하여 많은 OH 이온이 Si와 결합하게 된다. 즉, 산화물의 수화반응이 활발히 일어나게 된다. 결과적으로 Figure 4에서 비산회재보다 제조된 흡착제 AFF와 AFFA50이 Pb와 Cr에 탁월한 흡착능력을 가지게 됨은 수증기활성화를 거치기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

비산회재 및 무연탄을 원료로 한 흡착제 제조에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 장성탄의 혼합비율에 따라 3종류의 펠릿을 만들었으며, 장성탄의 혼합비율을 증가시킬수록 고정탄소의 함량이 증가되었다. 펠릿의 열중량분석결과 200~400 °C 사이에서 급격한 질량감소를 보였으며, 1000 °C까지 완만한 질량감소가 있었다.
- 2) 제조된 3종류의 흡착제는 요오드 흡착량이 100~300 mg/g의 범위에 있는 반면, 활성탄은 940 mg/g으로 높은 흡착능력을 가지

고 있었다. 그러나 제조된 흡착제의 경도는 85~96%이었으며, 77%의 경도를 가진 활성탄보다 높게 나왔다. 또한 장성탄의 혼합비율이 증가할수록 경도가 증가되어, 고정탄소의 함량과 경도가 비례함을 알 수 있었다.

3) 제조된 흡착제와 활성탄에 대한 Pb, Cr의 흡착실험결과 제조된 흡착제가 90% 이상의 높은 제거율을 보인 반면, 비산회재는 Pb 31.5%, Cr 5.6%, 활성탄의 경우 Pb 36%, Cr 0%의 낮은 제거율을 보였다. 따라서 비산회재를 어떤 처리과정 없이 그대로 흡착제로 사용하는 것보다 수증기 활성화과정을 거쳐 Si를 수화시켰을 때 중금속에 대한 흡착능력이 높아짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Satendra Kumar, S. N. Upadhyay and Y. D. Upadhyya, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **37**, 281(1987).
2. Binay K. Singh & Narendra S. Rawat, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **61**, 57(1994).
3. 이무성, 김문영, 김옥배, 정재일, *한국폐기물학회지*, **13**, 728 (1996).
4. Aydin Akgerman and Minoo Zardkoobi, *J. Chem. Eng. Data*, **41**, 185(1996).
5. K. K. Panday, Gur Prasad and V. N. Singh, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **34A**, 367(1984).
6. 이시진, 홍성창, 안봉호, *대한환경공학회학술발표*(1997).
7. 眞田雄三, 鈴木基之 編, 朴永泰 譯, "新版 活性炭-基礎와 應用", 東和技術(1996).
8. Y. Nathan, I. Pelly, U. Mimran, *International Ash Utilization Symposium*(1997).
9. Ralph K. Iler, "The chemistry of silica", John Wiley and Sons(1979).