

마이크로파 조사에 따른 개질화 활성탄의 온도특성 및 벤젠흡착

최 성 우 · 김 윤 갑*

계명대학교 환경과학과 · 계명문화대학 소방환경안전과
(2005년 5월 27일 접수; 2006년 1월 3일 채택)

Temperature Characteristics of the Modified GAC by Microwave Irradiation and Benzene Adsorption

Sung-Woo Choi and Yoon-Kab Kim*

Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

*Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College, Daegu 704-703, Korea

(Manuscript received 27 May, 2005; accepted 3 January, 2006)

The purposes of this paper were to monitor the temperature rising courses and spark discharge of the modified granular activated carbon (GAC) by microwave (MW) irradiation and to evaluate absorption of benzene. The GAC coated on SiO₂, boron, talc, ferrite was named as the modified GAC. Thermal and spark discharge measurement of virgin GAC and modified GAC has been carried out using a MW device operating at 2450 MHz under various energy conditions. The results of this paper as follows. First, the modified GAC is more efficient than the virgin GAC in temperature control. Temperature gradient of the modified GAC is more lower than that of virgin GAC. The temperature gradient of GAC was observed in the following order : virgin GAC, Mn-Zn ferrite/GAC, Ni-Zn ferrite/GAC, SiO₂/GAC, Boron/GAC, Talc/GAC. Second, the spark discharge of the modified GAC was diminished, compared with that of virgin GAC. Because of its excellent electrical insulating properties, the coating material prevents the spark discharge. Finally, the benzene adsorption capacity of the modified GAC decreased due to diminishing of adsorption site by the coating material. Considering the temperature gradient and spark discharge of GAC, the GAC coated SiO₂ would be appropriate absorbent under irradiation of MW.

Key Words : Granular Activated Carbon (GAC), Adsorption, Spark discharge, Regeneration, Microwave (MW)

1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compounds: VOC)은 낮은 농도로 존재하여도 암의 유발과 같이 인체에 상당한 피해를 준다¹⁾. VOC 제어기술로는 분리, 회수, 재사용 및 분해하는 방법이 있다. 배출되는 VOC가 단일배출구에서 비교적 고농도로 배출되고 VOC를 회수했을 경우 경제성이 있을 때에는 회수 시설을 설치하는 것이 바람직하다. VOC 회수 기술들은 활성탄 흡착, 세정, 저온응축 등이며, 배출되는 VOC 농도와 배출가스의 유량에 따라 적합한 방

법을 선정하는데, 가장 널리 사용되는 방법은 활성탄 흡착법이다. 반면, VOC가 단일물질이 아닌 혼합물질로 되어 있거나 유해물질인 경우 또는 회수가치가 없을 때에는 분해시설을 설치하는 것이 바람직하다. VOC 분해에 이용 가능한 기술은 열소각, 촉매소각, 생물여과 등이 있으며, 열소각의 경우 높은 온도를 필요로 하기 때문에 충분한 연료의 양이 요구되며 질소산화물과 같은 2차 오염물질이 생성되는 문제점이 있으며²⁾ 또한, 촉매 시스템을 이용할 경우 촉매 활성화 온도를 유지하기 위해 보일러를 이용한 촉매 가열장치가 요구됨으로 이에 따른 상당한 에너지 손실을 감수하고 있으며 고온열화에 의한 촉매의 수명단축이 문제가 되고 있다³⁾.

최근에는 마이크로파의 특성을 이용하여 유기합

Corresponding Author : Sung-Woo Choi, Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-6292
E-mail: swchoi@kmu.ac.kr

성⁴⁾이나 유해가스처리 및 환경에 대한 응용이 진행되고 있다. 또한, 흡착제로 사용된 활성탄이 마이크로파(microwave: MW)를 흡수하여 발열하는 특성을 재생공정과 분해공정을 응용한 연구결과가 발표되고 있다⁵⁻⁸⁾. MW 기술은 플라스틱 폐기물을 열분해⁹⁾하는 공정과 중금속을 포함하고 있는 슬러지 처리¹⁰⁾뿐만 아니라 polychlorinated biphenyls (PCBs)¹¹⁾와 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)¹²⁾로 오염된 토양을 현장에서 토양복구를 위해 응용되고 있다.

MW를 이용한 VOC 제어방법으로는 VOC를 분해하는 방법과 회수하는 방법으로 분류될 수 있다. MW를 이용한 VOC 분해는 활성탄에 MW를 조사시 발생하는 불꽃방전(spark discharge)과 빠른 온도상승을 이용하는 방법이다. Jou¹³⁾는 VOC를 처리하기 위한 GAC(granual activated carbon) 흡착과 MW 분해를 응용한 공정은 에너지 소모와 공정효율 면에서 중요한 장점을 가진다고 하였다. 또한 반면에 MW에 의한 VOC 회수는 활성탄의 상승 온도를 조절하여 VOC를 탈착분리하고 냉각시스템을 이용하여 VOC를 회수하는 방법으로 VOC를 회수하는 것을 제외하면 GAC 재생과 같은 공정이라고 할 수 있다. GAC 재생을 위해 Van 등¹⁴⁾은 MW 가열은 신속하고 정확한 온도 제어와 장치의 소형화 및 간헐적으로 사용하지만 매우 좋은 효율을 나타내는 이점을 제공한다고 하였다.

MW를 이용한 VOC 회수공정에서 중요한 것은 VOC 분해공정과는 달리 MW 조사에 의해 가열되는 활성탄의 온도 상승율이 적절해야 하며 불꽃방전이 발생되지 않아야 한다. GAC 자체가 MW 흡수율이 우수하여 순간적인 온도상승은 효과적이거나 불꽃방전시 5,000°C~10,000°C¹⁵⁾ 이상 온도가 상승하며 낮은 MW 출력에도 급격한 온도상승이 일어나 GAC의 국소가열이 일어나거나 VOC의 분해가 일어날 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 VOC 회수를 위한 흡착제를 개발할 목적으로 불꽃방전과 급격한 온도상승 문제를 해결하기 위해 GAC를 개질화하여 온도 상승특성, 불꽃방전실험과 벤젠 흡착실험을 수행하였다. 개질화 GAC는 유전율이 좋은 자성물질과 SiO₂, Boron, Talc를 GAC에 코팅하여 제조하였으며 각 MW 에너지별 온도상승율과 불꽃방전의 정도를 분석하였으며 개질화 GAC와 일반 GAC의 흡착실험을 통해 벤젠 흡착량을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 재료

개질화를 위한 GAC는 일본 다께다(XL-7100)계

품을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 GAC는 구형의 형태를 가지며 내구성이 뛰어나고 개질화 조건에 적합하여 선정하였다. GAC의 표면적은 1,101 m²/g, 기공부피는 0.516 ml/g, 평균기공길이는 1.85 nm인 물리적 특성을 가지고 있다. 먼저 GAC의 불순물을 없애기 위해 10 % 염산에 24시간동안 담근 후 30분 동안 물에서 가열하였으며 105°C에서 건조 후 사용하였다. MW 조사에 온도상승과 방전문제를 고려하여 SiO₂, Boron, Talc, 및 자성물질을 GAC에 코팅하였다. SiO₂/GAC는 sol-gel 방법으로 실리카를 GAC에 코팅한 것으로 Tetraethoxy-silane (TEOS)를 에탄올에 용해시킨 후 acetic acid와 물을 혼합하여 침적시키고 실온에서 2일간 방치하여 제조하였다. 또한 GAC는 110°C에서 5시간 건조한 후 300°C에서 소성시켜 사용하였다. Boron/GAC는 Boron nitride를 스프레이 방법으로 코팅하였고, Talc/GAC는 Mg₃(Si₄O₁₀)(OH)₂에 바인더를 첨가하여 물리적인 방법으로 제조하였다. 또한 GAC에 일본 Toda Kogyo 회사의 자성물질인 Ni-Zn ferrite와 Mn-Zn ferrite 제품에 소량의 바인더를 첨가하여 Ni-Zn ferrite/GAC와 Mn-Zn ferrite/GAC를 제조하였다.

2.2. 연구방법

MW 조사장치의 구성은 Fig. 1에 나타내었으며 2,450 MHz, 최대출력 1.2 kW의 마그네트론이 장착된 마이크로 발진관을 사용하였다. MW는 발진관으로부터 도파관을 통하여 도입되며, 도파관 중간에 반응기를 설치하였다. 반응기는 유전손실이 아주 작은 석영제 흡착관으로 내경 8mm의 U자관을 사용하였다.

개질화 GAC의 MW 조사에 따른 온도를 측정하기 위해 반응기에 개질화 GAC 1 g을 충전하여 MW 조사량을 변화하면서 측정하였다. 반응기 내부 온도는 일본 Anritsh Meter사의 Amoth FX8500 광화이버온도계를 사용하였다. 또한 MW의 입사력과 반사력을 정확하게 측정하기 위해 미국 Agilent사의 E4419B (EPM Series Power Meter) 계측기를 사용하였고, GAC의 방전을 확인하기 위해 일본 Hamamatsu Photonics 사의 Photosensor Module H5784-03 방전센서를 부착하여 Digital Real Time Oscilloscope로 불꽃방전 피크를 확인하였다.

흡착실험은 Fig. 2의 Chan사의 발란스를 이용하여 상온(25°C)의 조건에서 흡탈착 실험을 수행하였으며, 흡착실험에 앞서 전처리과정으로 150°C에서 2시간 정도 헬륨을 이용하여 탈기시키고, 흡착실험은 발란스의 Ball(시료를 담은 반구형의 접시)에 흡착제를 50 mg 올려놓은 다음 벤젠 포화후 질소가스를

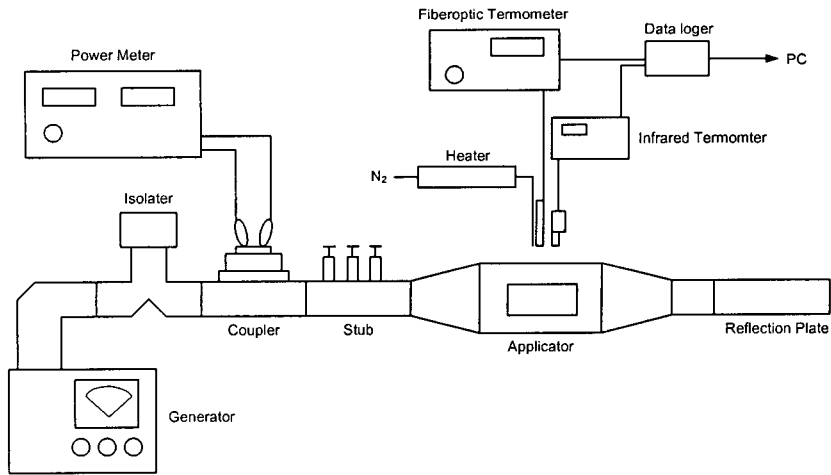


Fig. 1. The scheme of microwave system.

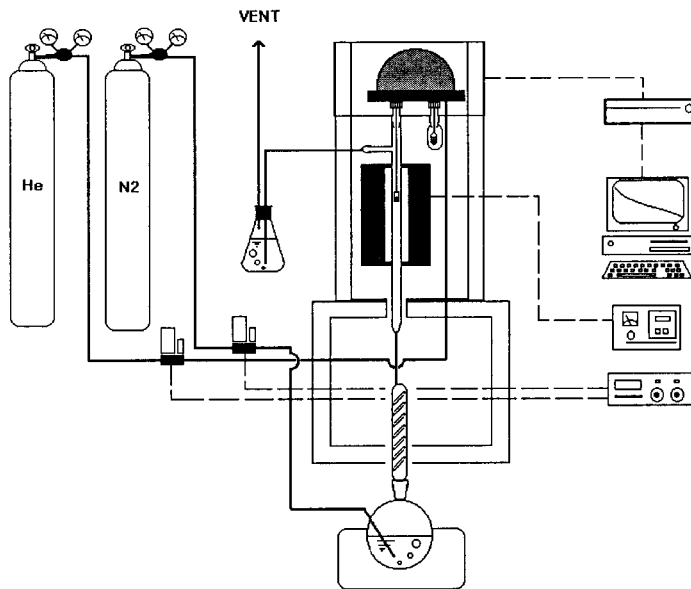


Fig. 2. The scheme of adsorption apparatus.

이용하여 발란스로 흘려주었다. 이때 질소가스의 유량은 100 ml/min 정도였다. 흡착을 시작하기 전에 무게 안정화가 이루어진 후 무게 변화가 없는 상태에서 벤젠을 흡착반응기 내로 유입시켜 파파에 도달할 때까지 흡착을 하였으며, 이때 흡착층 외측에 냉매를 흘려 흡착층 온도를 조절하였다.

3. 연구 결과

3.1. GAC의 TGA 평가

MW를 연속 조사시 GAC는 빠른 온도 상승으로

인해 연소하게 된다. 따라서 온도에 따른 연구 대상 GAC의 무게변화를 측정하는 것은 매우 중요하다. Fig. 3은 Shimadzu사의 Thermal Gravity Analyzer (TGA)로 GAC의 온도에 따른 무게변화를 측정하는 것이다. 실험 방법은 일정량의 시료를 반응셀에 충전하고, 이에 공기를 주입하면서 온도를 상승시켜 무게 변화를 측정하였다. 그림에서 보면 온도를 서서히 증가함에 따라 무게 감소가 나타나는데 100°C 부근은 수분의 탈리로 인한 무게 감소현상이 나타나며, 400°C 정도에서 서서히 연소하기 시작하여

700°C 정도에서 완전히 연소해 버린다. 따라서 GAC를 흡착제로 사용하기 위해서는 내부온도가 400°C이하를 유지하도록 MW 출력을 조절하여야 함을 알 수 있었다.

3.2. MW 조사에 의한 온도 평가

MW 반응기에서 에너지 효율을 높이기 위하여 MW가 집중되는 위치를 도파관의 끝 부분에 위치한 반사판을 조정한 후 온도변화를 조사하여 MW 가열 효율을 최적화 하였다. 먼저 자성물질인 Ni-Zn ferrite를 2.0 g을 넣고 반사판을 변화시키면서 시료의 온도변화를 조사하였다. Fig. 4의 (a)를 보면 반사판을 10 mm 정도 이동시 조사 조건에서 가장 높은 온도 100°C 정도를 나타내었으며 이후 본 연구에서 사용된 MW 가열실험은 반사판을 10 mm 위치에 고정후 수행하였다. Fig. 4의 (b)는 Blank 상태의 흡착관에 MW 조사 출력의 변화에 따른 입사력과 반사력을 나타낸 것이다. MW를 50 W의 출력으로 입사를 하였을 경우 반사되어 돌아오는 출력은 40 W로 약 20%가 감소하였으며, 100 W 이상의 출력에서도 입사력을 증가함에 따라 반사력은 동일

하게 20%씩 감소하였다. 추후 연구에서 MW 조사 장치의 개조를 통한 에너지 효율 증가 실험이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3. 개질화 GAC의 온도 특성

MW조사시 GAC의 빠른 온도상승으로 인한 연소와 GAC 입자 주위 전계의 집중으로부터 방전이 일어나 국소가열 및 분해의 가능성이 있기 때문에 온도상승제어와 불꽃방전효과가 없는 흡착제의 개발이 중요하다. Fig. 5는 불꽃방전 현상을 도식화한 것이다. 불꽃방전은 GAC 자체의 특성이다. Jou¹³⁾의 연구에 따르면 입자 표면의 그래파이트 구조들은 높은 주파수대의 MW에 의해 "Boiled off" 된 유리전자를 받아들이며 대전된 GAC 입자와 방전된 GAC간의 전위적 증가가 스파크로 나타나게 된다고 보고하였다. 그래파이트나 불꽃방전으로부터 생성된 자유전자는 반응기내에서 다른 분자의 이온화를 야기시킨다. 또한 입자 주위의 전계 집중으로부터 방전이 일어나 GAC의 국소가열이 일어나거나 흡착질의 분해가 일어날 가능성이 있다. 따라서 불꽃방전을 최소화하면서 MW 가열이 적용 가능한 흡착제를 개발하고자 유전율이 좋은 자성물질인 Ni-Zn ferrite와 Mn-Zn ferrite를 코팅물질로 선정하였다. 본 연구에서 코팅물질로 선정한 Boron은 좋은 열전도성으로 MW 장치, 단파광전자공학 장치 및 고온·고전력 반도체 장치 등의 구성에 널리 사용된다¹⁶⁾. MW를 흡수하는 흡착체인 SiO₂는 자체가 MW 에너지를 열에너지로 발산한다¹⁷⁾. Talc의 평면은 끊어진 형태의 Si-O와 Mg-O 결합이 없기 때문에 중성의 소수성을 나타내며, 끊어진 형태의 Si-O와 Mg-O 결합을 가지는 Talc의 모서리 부분은 전하를 띠는 Mg²⁺와 OH⁻ 이온이 있으므로 친수성을 나타낸다. 또한 유전율이 좋은 자성물질¹⁸⁾인 Ni-Zn ferrite¹⁹⁻²⁴⁾와 Mn-Zn ferrite²⁵⁻²⁶⁾를 선정하여 GAC

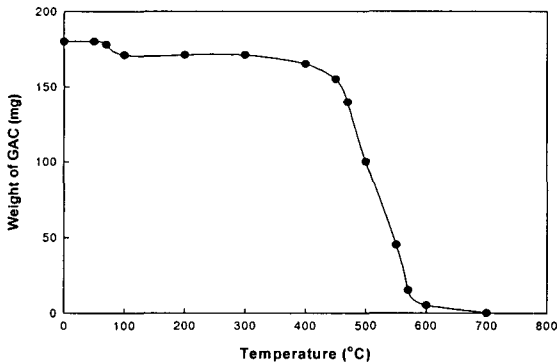


Fig. 3. TGA diagram for granular activated carbon.

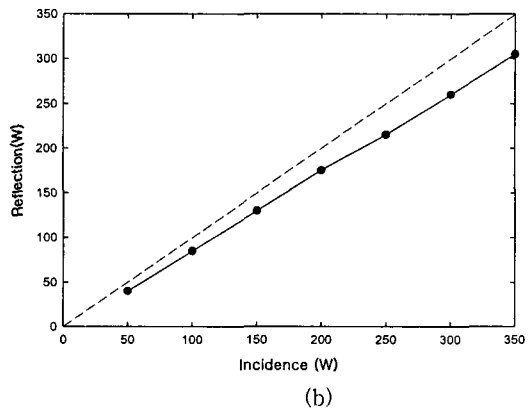
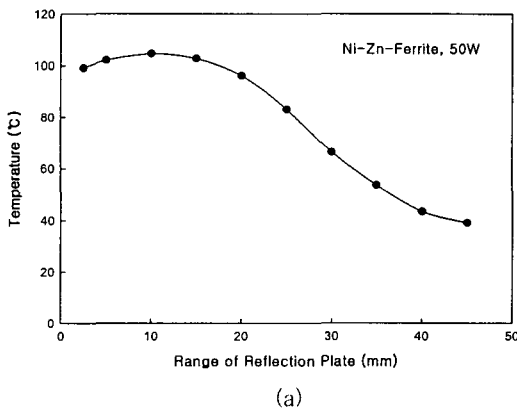


Fig. 4. The effect of temperature by the distance of reflection plate(a) and efficiency of microwave energy(b).

마이크로파 조사에 따른 개질화 활성탄의 온도특성 및 벤젠흡착

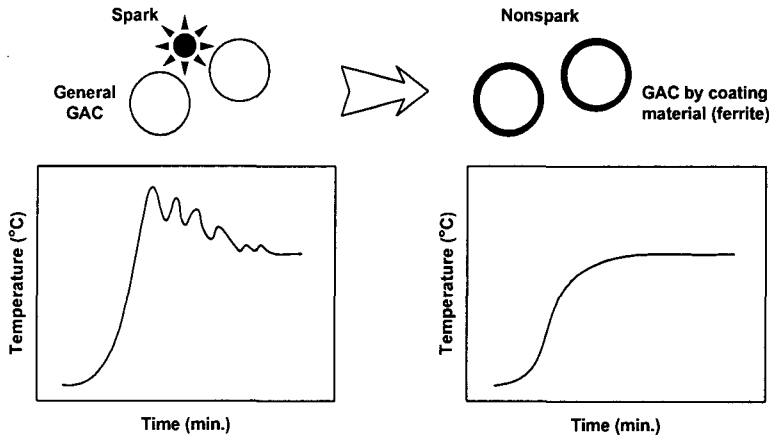


Fig. 5. Temperature stability of magnetic adsorbent by microwave irradiation.

에 코팅하여 MW 가열 흡착제를 제조하였다. 자성 물질은 큐리점에서는 더 이상 온도 상승이 일어나지 않는 특성도 가지고 있어서 MW 가열 흡착제를 개발하는 데 온도제어와 방전 저감효과를 기대할 수 있을 것이다.

MW 출력에 따른 개질화 GAC의 온도변화를 Fig. 6에 나타내었다. MW 출력이 증가할수록 직선적으로 온도가 상승함을 볼 수가 있었다. 400W 출력으로 조사시 흡착제의 온도는 GAC, Mn-Zn ferrite/GAC, Ni-Zn ferrite/GAC, SiO₂/GAC, Boron/GAC, Talc/GAC 순으로 높았다. 자성물질 Ni-Zn ferrite와 Mn-Zn ferrite의 경우 MW 출력이 증가하더라도 온도 상승이 직선적으로 일어나지 않았다. Ni-Zn ferrite의 경우 100 W 부근에서부터 MW 출력을 증가시켜도 120°C에서 일정한 온도를 계속 유지하였다. Mn-Zn ferrite의 경우는 200°C 부근부터 온도의 증가폭이 둔화되어 서서히 온도가 상승하였다. 이러한 일정한 온도를 유지하는 것은 자성체 물질의 큐리점 부근이다. 그러나 Ni-Zn ferrite/GAC와 Mn-Zn ferrite/GAC의 경우는 MW 출력 증가에 따라 온도가 계속 증가하였다. 자성물질 단독의 경우 MW 출력이 증가하더라도 지속적인 온도의 상승이 일어나지 않아 온도제어가 효과적인 것으로 판단되나, 자성물질이 코팅된 GAC의 경우 자성물질 단독의 효과를 기대할 수 없었다. 이는 구형활성탄의 온도상승효과와 자성체 단독으로 MW를 조사했을 때 유지되는 온도효과가 적절하게 조합되어 일어나는 현상으로 사료된다. 실리카(SiO₂)를 코팅한 흡착제는 다른 개질화 GAC에 비해 온도 상승률이 일정함을 알 수 있었다. Talc/GAC는 출력을 증가시켜도 온도상승이 좀처럼 일어나지 않았다. 특히 200W 이후 온도가 일정하게 유지되는 현상을 보여 본 연구의 가장 적절한 코팅물질임을 알 수 있었다. 낮은

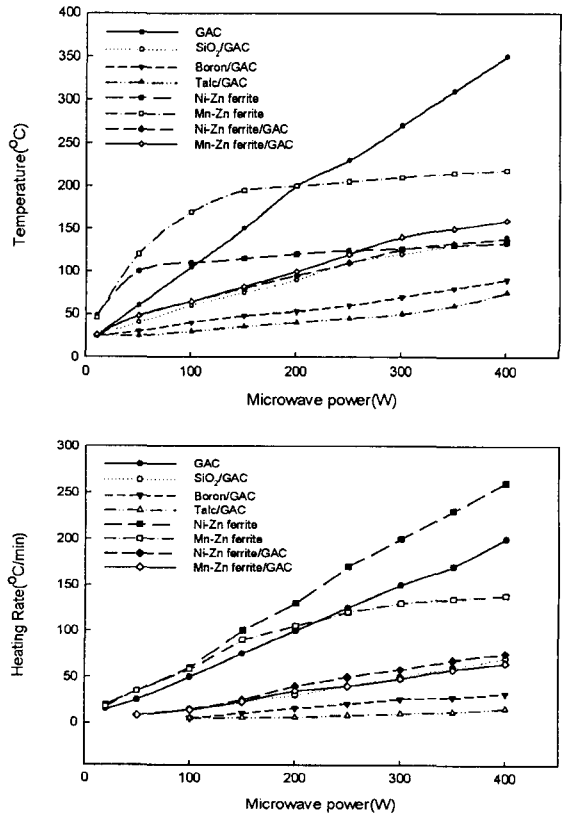


Fig. 6. Variation of temperature and heating rate on the modified GAC by various microwave power.

MW 출력으로 VOC를 탈착 할 수 있는 온도까지 상승되는 것이 효과적인데 열효과로 탈착되는 VOC의 탈착 온도를 약 100°C 정도로 보면 GAC, SiO₂/GAC, Ni-Zn ferrite/GAC, Mn-Zn ferrite/GAC 순으로 효과적인 것으로 사료된다. 승온 속도는 MW 흡탈착장치를 설계할 경우 탈착속도와 연관되므로

중요한 인자이다. 승온 속도가 빠를수록 보다 짧은 시간에 재생시킬 수 있으므로 장치운영 면에서 경제적이다. 본 연구에 사용한 흡착제 및 개질화된 흡착제의 승온 실험에서 GAC가 낮은 MW 출력에서 가장 높은 온도상승결과가 나타났다. 이것은 GAC가 MW에 대한 유전율이 높아 MW 흡수율이 우수하기 때문인 것으로 사료된다. 자성체를 제외한 코팅된 흡착제 중에서 SiO₂/GAC가 승온 속도가 빨랐는데, 이는 SiO₂의 유효손실계수가 적기 때문이며, SiO₂가 수분을 흡수하기 때문에 수분량에 의해 승온속도가 빠른 것으로 사료된다. 자성체의 경우 Ni-Zn ferrite가 Mn-Zn ferrite 보다 승온 속도가 빨랐다. MW 출력이 약할 경우는 두 물질의 승온 속도변화가 크지 않지만 MW 출력이 증가할 수록 Ni-Zn ferrite가 빠르게 나타났다. GAC에 자성물질을 코팅한 경우, MW 출력이 150 W 이하일 때에는 승온속도의 차이가 작았으며 200 W 이상으로 MW 출력이 증가함에 따라 Ni-Zn ferrite/GAC가 Mn-Zn ferrite/GAC 보다 승온속도가 약간 증가하였다. 이는 Fig. 6에서 나타나듯 온도 상승률이 Ni-Zn fer-

rite가 Mn-Zn ferrite보다 높아 Ni-Zn ferrite/GAC와 Mn-Zn ferrite/GAC에서도 같은 경향이 일어난 것으로 사료된다. 이로부터 온도제어 측면에서 GAC에 자성물질을 코팅한 흡착제가 MW 가열에 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

3.4. 개질화 GAC의 불꽃방전 특성

GAC, Ni-Zn ferrite/GAC, Mn-Zn ferrite/GAC, SiO₂/GAC에 MW 조사하였을 경우 시간 변화에 따른 온도 및 불꽃방전을 Fig. 7에 나타내었다. 불꽃방전 특성 실험에서는 Boron, Talc를 코팅한 GAC는 상승온도가 너무 낮아 제외하였다. 본 실험에서는 개질화 GAC를 대상으로 불꽃방전 실험을 실시하였으며, Fig. 7을 보면 GAC는 급격한 온도상승과 더불어 빈번한 불꽃방전과 강한 불꽃방전효과가 나타났다. 15분 실험동안 온도는 380°C 증가하였으며 4V의 스파크가 9회 반복, 전체 시간 동안 2V의 스파크강도를 보여 주었다. 이는 Liu⁷⁾ 등의 연구와 같이 온도상승 및 GAC 입자 주위의 전계 집중으로부터 방전이 일어나 GAC의 국소가열이 일어나

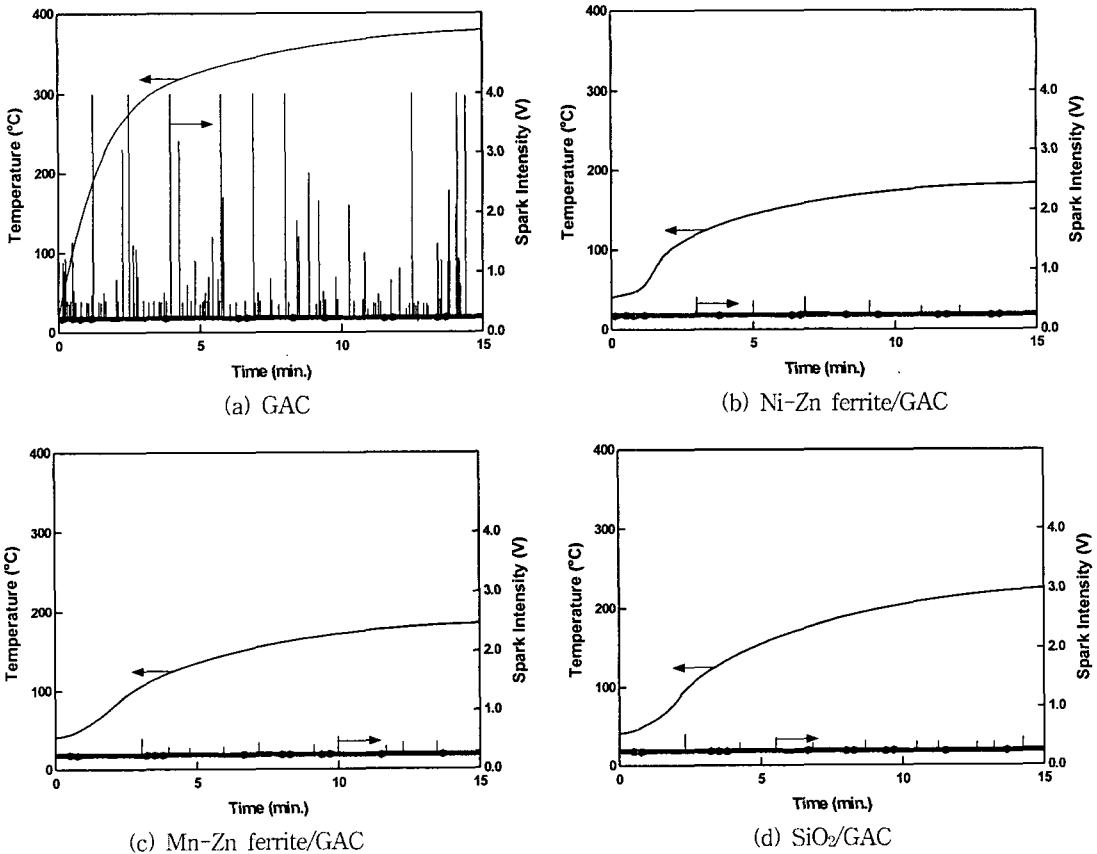


Fig. 7. Spark intensity of the modified GAC and GAC in microwave heating with 100W.

는 것으로 비슷한 경향을 보였다. 따라서 불꽃방전이 발생하는 GAC의 경우 온도상승이 급격하여 VOC 회수용 물질로 사용하기 어려울 것으로 사료된다. 반면에 Ni-Zn ferrite/GAC와 Mn-Zn ferrite/GAC의 경우 온도는 180℃를 유지하며 6회의 약한 스파크강도를 보여주었다. 반면에 SiO₂/GAC는 210℃ 까지 완만한 온도상승과 함께 약한 불꽃방전 현상이 일어났다. 따라서 앞선 GAC의 TGA결과와 온도상승과 방전특성을 고려해 볼 때 SiO₂/GAC가 MW 조사시 가장 적절한 흡착제임을 알 수 있었다.

3.5. 개질화 GAC의 벤젠 흡착특성

일반 GAC와 SiO₂, Ni-Zn ferrite, Mn-Zn ferrite로 개질화된 GAC의 흡착능을 알아보았으며 각각의 벤젠흡착 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 개질화 GAC가 일반 GAC 보다 벤젠 흡착능이 낮게 나타났는데, 이것은 GAC에 SiO₂와, 자성물질을 코팅함에 따라 흡착 표면적이 GAC에 비해 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 사료된다. Ni-Zn ferrite/GAC와 Mn-Zn ferrite/GAC는 초기에 일반 GAC와 흡착량이 비슷했으나 10분 후 흡착량이 감소하였다. 반면에 SiO₂/GAC의 경우 초기 흡착능이 가장 낮았으나 30분 이후부터 다른 개질화 GAC에 비해 흡착능이 증가하는 경향을 보였다. 30분 이후 개질화 GAC의 흡착능은 일반 GAC에 비해 SiO₂/GAC가 84%, Ni-Zn ferrite/GAC가 75%, Mn-Zn ferrite/GAC가 72% 낮아져 개질화 GAC중 SiO₂/GAC가 가장 높은 흡착능을 보였다. 본 연구에서는 불꽃방전과 온도상승제어를 위한 개질화 GAC를 개발하고자 하였다. 그러나 개질화 GAC의 흡착능이 감소하는 경향을 보여주어 향후 연구에서 흡착능을 향상시키기 위한 개질화과정 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

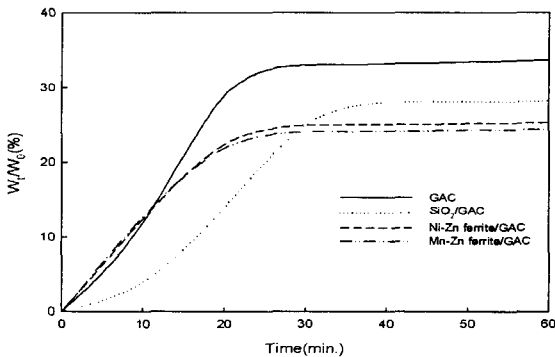


Fig. 8. Adsorbability of the modified GAC and GAC.

4. 결 론

GAC에 MW를 조사시 방전 및 온도의 급격한 상

승에 의한 온도제어의 문제점이 발생되며 코팅을 통해 이러한 문제점을 제어하고자 하였다. MW는 기존활성탄 재생을 위해 사용된 열재생법과 달리 대량의 화석연료를 사용하지 않아도 되며, 질소산화물과 같은 2차적인 오염물질이 발생되지 않고 적은 에너지를 이용하여 효율적인 탈착회수를 할 수 있는 장점을 가진다.

본 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, TGA실험 분석결과 GAC는 400℃에서 연소하기 시작하였다. 따라서 MW조사시 GAC 내부온도가 400℃이하를 유지하도록 출력을 조절해야 함을 알 수 있었다. 둘째, 개질화 GAC의 온도상승특성은 GAC, Ni-Zn ferrite/GAC, Mn-Zn ferrite/GAC, SiO₂/GAC, Boron/GAC, Talc/GAC 순으로 높았다. 자성물질 Ni-Zn ferrite와 Mn-Zn ferrite의 경우 MW 출력이 증가하더라도 온도 상승이 직선적으로 일어나지 않았으나 GAC에 개질을 한 후 온도 상승 패턴은 다른 개질화 GAC와 유사하였다. Boron, Talc로 개질화한 GAC는 온도상승율이 미비하여 MW에 적용하기에는 적절하지 않았다. 셋째, 불꽃방전 실험결과 GAC에서 강한 불꽃방전이 발생되었으나 개질화 GAC인 Ni-Zn ferrite/GAC, Mn-Zn ferrite/GAC, SiO₂/GAC에서는 불꽃방전이 거의 일어나지 않았다. 개질화 GAC의 온도상승과 방전특성을 고려해 볼 때 SiO₂/GAC가 MW 조사시 가장 적절한 흡착제임을 알 수 있었다. 넷째, GAC와 개질화 GAC의 벤젠 흡착실험을 수행 한 결과 개질화 GAC가 일반 GAC 보다 벤젠 흡착능이 낮게 나타났다. 이것은 코팅물질에 의해 개질화 GAC의 흡착할 수 있는 표면적이 상대적으로 감소한 것에 기인하는 것으로 사료된다. 본 연구의 결과물은 차후 MW를 이용한 VOC 회수 장치의 개발에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-03-02) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) Jenkin, M. E. and G. D. Hayman, 1999, Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters, *Atmos. Environ.*, 33, 1275-1293.
- 2) Chang, Y. C. and C. T. Carlisle, 2001, Microwave process for volatile organic compound abatement, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 51, 1628-1641.
- 3) 문승일, 2003, VOCs 제거에 따른 플라즈마/촉

- 매 시너지효과에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 25(7), 810-815.
- 4) Mats, L. and H. Anders, 2001, Microwave-assisted high-speed chemistry: a new technique in drug discovery, *Drug Discov Today*, 6(8), 406-416.
 - 5) Haque, K. E., 1999, Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review, *International Journal of Mineral Processing*, 57, 1-24.
 - 6) Ania, C. O., J. A. Menéndez, J. B. Parra and J. J. Pis, 2004, Microwave-induced regeneration of activated carbons polluted with phenol, A comparison with conventional thermal regeneration, *Carbon*, 42, 1383-1387.
 - 7) Liu, X., X. Quan, L. Bo, S. Chen and Y. Zhao, 2004, Simultaneous pentachlorophenol decomposition and granular activated carbon regeneration assisted by microwave irradiation, *Carbon*, 42, 415-422.
 - 8) Quan, X., X. Liu, L. Bo, S. Chen, Y. Zhao and X. Cui, 2004, Regeneration of acid orange 7-exhausted granular activated carbons with microwave irradiation, *Water Research*, 38, 4484-4490.
 - 9) Ludlow, P. C., 2001, Microwave induced pyrolysis of plastic wastes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 4749-4756.
 - 10) Gan, Q., 2000, A case study of microwave processing of metal hydroxide sediment sludge from printed circuit board manufacturing wash water, *Waste Manage*, 20, 695-701.
 - 11) Abramovitch, R. A., B. Z. Huang, D. A. Abramovitch and J. Song, 1999, In situ decomposition of PCBs in soil using microwave energy, *Chemosphere*, 38, 2227-2236.
 - 12) Abramovitch, R. A., B. Z. Huang, D. A. Abramovitch and J. Song, 1999, In situ decomposition of PAHs in soil and desorption of organic solvents using microwave energy, *Chemosphere*, 39, 81-87.
 - 13) Jou, C. J. G., 1998, Application of activated carbon in a microwave radiation field to treat trichloroethylene, *Carbon*, 36(11), 1643-1648.
 - 14) Van, W. E. J., S. M. Bradshaw and J. B. D. Swardt, 1998, The dependence of microwave regeneration of activated carbon on time and temperature, *J. Microwave Power Electromagn. Energy*, 33(3), 151-157.
 - 15) Jou, C. J. G., 1998, Application of granulated activated carbon packed-bed reactor in microwave radiation field to treat BTX, *Chemosphere*, 37(4), 685-698.
 - 16) Hao, X. P., D. L. Cui, G. X. Shi, Y. Q. Yin, X. G. Xu, M. H. Jiang, X. W. Xu and Y. P. Li, 2001, Low temperature benzene thermal synthesis and characterization of boron nitride nanocrystals, *Materials Letters*, 51, 509-513.
 - 17) Bathen, D., 2003, Physical waves in adsorption technology an overview, *Separation and Purification Technology*, 33, 163-177.
 - 18) Pardavi, H. M., 2000, Microwave applications of soft ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 171-183.
 - 19) Abdeen, A. M., 1998, Electric conduction in Ni-Zn ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 185, 199-206.
 - 20) Dias, A. and R. L. Moreira, 1999, Chemical, mechanical and dielectric properties after sintering of hydrothermal nickel-zinc ferrites, *Materials Letters*, 39, 69-76.
 - 21) El, S. M., 1997, DC electrical properties of Zn-Ni ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 172, 1888-192.
 - 22) Mangalaraja, R. V., S. Ananthakumar, P. Manohar, F. D. Gnanam and M. Awano, 2004, Microwave-flash combustion synthesis of $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ and its dielectric characterization, *Materials Letters*, 58, 1593-1596.
 - 23) Sorescu, M., L. Diamandescu, R. Peelamedu, R. Roy and P. Yadoji, 2004, Structural and magnetic properties of NiZn ferrites prepared by microwave sintering, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 279, 195-201.
 - 24) Vijaya, K. K. and D. Ravinder, 2001, Electrical transport properties of erbium substituted Ni-Zn ferrites, *International Journal of Inorganic Materials*, 3, 661-666.
 - 25) Ravinder, D. and B. R. Kumar, 2003, Electrical conductivity of cerium substituted Mn-Zn ferrites, *Materials Letters*, 57, 1738-1742.
 - 26) Ravinder, D. and K. K. Vijaya, 2001, Thermoelectric power studies of erbium substituted Mn-Zn ferrites, *Materials Letters*, 49, 57-62.