

습식방법에 의한 팽창흑연의 제조 및 특성에 관한 연구

박수진[†] · 김기석 · 홍성권*

한국화학연구원 화학소재연구부
305-600 대전시 유성구 장동 100

*충남대학교 고분자공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
(2003년 6월 20일 접수, 2003년 9월 1일 채택)

Preparation and Characterization of Expanded Graphites by Wet Process

Soo-Jin Park[†], Ki-Seok Kim and Sung-Kwon Hong*

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
100, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

*Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received 20 June 2003; accepted 1 September 2003)

요 약

본 연구에서는 습식방법에 의한 팽창흑연(EG)의 특성을 조사하였고, 오일 흡착실험을 통하여 EG의 유류 흡착제로서의 적용에 대한 가능성을 조사하였다. 실험에 사용된 층간흑연(GICs)은 습식방법에 의하여 천연흑연의 층간에 삽입제를 삽입시켜 준비하였고, EG는 GICs를 600-900 °C 사이의 고온과 산소기류 하에서 1분간 열처리하여 제조하였다. 다양한 처리 온도에 대한 EG의 팽창 부피, 삽입제의 함량 그리고 층간거리는 메스실린더와 XRD를 사용하여 측정하였고, 오일 흡착실험을 위하여 n-dodecane을 사용하였다. 또한, 오일흡착 전과 후의 표면 형태는 SEM을 이용하여 관찰하였다. 실험 결과, 처리 온도의 증가와 함께 EG의 팽창 부피와 삽입제의 함량은 증가하였고, 오일 흡착용량은 EG(1 g)에 대해 16-35 g의 오일을 흡착하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 실험결과, EG의 제조를 위한 습식방법은 오일의 새로운 흡착제로써 EG를 제조하는 유용한 방법으로 관찰된다.

Abstract – In this work, the characteristics of expanded graphite (EG) are investigated for the possibility of useful application as oil-adsorbent of EG. The graphite intercalated compounds (GICs) are prepared by the wet process that leads to an intercalation of intercalant into natural graphites. The graphite intercalate is subjected to the heat treatment in furnace between 600 °C and 900 °C under oxidizing atmosphere for about 1 min. The expansion volume, volatile content, and interlayer distance of EG on different heating temperatures are measured by mass cylinder and X-ray diffraction (XRD). N-dodecane is used for oil adsorption, and morphology of EG before and after oil adsorption is observed by SEM. As a result, the expansion volume and volatile content of EG are increased with increasing the treatment temperature. The oil adsorption capacity is found to be 16-35 g of n-dodecane per the 1 g EG studied. It is then concluded that the wet process of EG is a useful technique for a new adsorbent of oil.

Key words: Expanded Graphite, Graphite Intercalation Compounds, Furnace, X-Ray Diffraction

1. 서 론

일반적으로 팽창흑연은 산-충상화합물에 의하여 제조되며, 압축성, 탄성, 열적 안정성 그리고 부식 저항성 등과 같은 우수한 물성으로 인하여 봉인물질로서 널리 이용되는 유연한 흑연시트를 만드는 재료로 주로 사용되어 왔다[1-3]. 그리고 최근 연구에 따르면 팽창흑연은 의료 과학[4], 촉매[5] 등 여러 분야에서 적용이 되며, 또한 커다란 분자크기와 약한 극성을 갖는 물질에 대한 특별히 좋은 흡착제로 밝혀졌다[2].

지난 여러 해 동안 세계적으로 걸프전 등에서 발생한 거대한 양의 오일 누설 및 대형사고로 인한 유출유나 폐수중 유분의 회수는 환경 보전상 매우 중요한 관심사로서 대두되어 왔다[6]. 바다에서의 오일누설 사고에 대한 일반적인 처리 방법은 특수한 배를 사용하여 커다란 오일 fence로써 오일을 걷어내거나 vacuum을 이용하여 바닷물로부터 빨아들이는 방법 외에 흡착제 물질을 사용하여 오일을 흡착하여 걷어내는 방법이 주로 사용되어 왔다. 하지만 이러한 방법들은 대부분 사람의 힘에 의해 이루어지며, 유출된 오일을 완전히 제거하기에는 많은 인력, 비용 그리고 시간이 소비되어 진다[7-9]. 또한, 각각의 방법에는 모두 한계가 있어 커다란 흡착량과 빠른 흡착속도를 갖는 새로운 흡착제의 사용에

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: psjin@kriict.re.kr

대한 관심이 집중되어 왔다. 이러한 흡착제를 사용하는 경우에는 물과 오일이 공존하는 경우 물은 흡착하지 않고 오일만을 흡착하는 선택적 흡착이 요구되며, 또한 오일 누설에 의한 환경오염을 최소화하기 위해 빠른 흡착속도, 커다란 흡착용량 그리고 쉬운 조작이 요구되어 진다[7].

이러한 요구조건에 가장 근접하여 새로운 흡착제로서 각광받고 있는 팽창흑연의 흡착물성은 층상화합물과 팽창 조건에 좌우되며, 또한 팽창 부피 및 비표면적과 같은 흑연의 다공 특성에 크게 의존한다[2]. Inagaki 등 [10]은 흑연의 팽창은 천연흑연의 결정입자가 20 nm보다 클 때 일어나며, 팽창 부피는 흑연에 삽입된 휘발성을 갖는 삽입제 물질의 함량과 흑연입자 크기의 증가와 함께 증가한다는 근거를 제시하였다.

기존의 오일 흡착제로서 polypropylene과 polyurethane 같은 약간의 다공성을 가진 고분자가 오일의 흡착을 위하여 사용이 되어왔지만, 이러한 고분자 흡착제는 오일에 대한 특별한 선택성이 없고 물과 함께 흡착하여 실제 흡착된 오일의 흡착량은 보고되어진 양보다 적을 것이며, 이러한 고분자 흡착제는 점성이 큰 오일들은 흡착할 수 없는 단점을 가지고 있다[11-13]. 이러한 면에서 짧은 시간 내 단위 무게 당 커다란 흡착량과 빠른 흡착속도를 보이며 오일을 흡착 한 뒤 물위에 떠 있는 장점을 갖는 팽창흑연은 유출된 오일에 의한 환경오염을 막는데 효율적인 흡착제 물질로 제안되어 왔다.

본 연구에서는 습식법에 의하여 팽창흑연을 제조하였고, 열처리에 따른 팽창 부피, 삽입제의 함량 그리고 층간거리와 같은 팽창흑연의 특성을 조사하였으며, 이러한 EG의 오일 흡착율과 흡착속도 등 오일에 대한 흡착특성에 관하여 조사하였다.

2. 실험

2-1. 시약 및 재료

본 연구에서 사용된 천연흑연(Aldrich, >150 μm , 비중 2.09-2.23)은 flake상을 사용하였다. 팽창흑연의 제조를 위하여 전형적인 방법인 습식 방법을 택하였으며[14], 층상화합물의 제조를 위하여 황산(Mw: 98.08, Jin Chem.), 질산(Mw: 63.02, Jin Chem.) 그리고 과산화수소(Mw: 34.04, Showa)를 사용하였다. 그리고 오일 흡착실험을 위하여 n-dodecane (Sigma Co.)을 사용하여 팽창흑연의 단위 무게 당 오일의 흡착율과 흡착속도를 측정하였다.

2-2. 팽창흑연의 제조

일반적으로 팽창흑연(EG)은 천연흑연(N-GP)의 층간에 고온에서 기화 가능한 물질을 삽입 후, 삽입물을 고온에서 순간적으로 기화시켜 제조한다.

본 실험에서는 층상화합물(GICs)의 제조를 위하여 N-GP(10 g)에 대하여 각각 황산/질산(4:1)과 황산/과산화수소의 혼합용액(4:1)을 사용하였으며, 황산(250 ml)과 질산/과산화수소(50 ml)는 각각 삽입제와 산화제로서의 역할을 한다[15]. N-GP는 상온에서 각각의 혼합용액에 침적 처리하여 24시간 동안 방치하였으며, 이 때 제조된 GICs를 황산/질산 및 황산/과산화수소로 사용된 각각을 GIC-1과 GIC-2로 명명하였다. 제조된 각각의 GICs는 증류수로 세척하고 90 °C의 오븐에서 8시간 동안 건조하였으며, 완전 건조된 각각의 GICs는 튜브형 furnace에서 600-900 °C로 1-3분간 반응시켜 최종적으로 EG를 제조하였고, 각각을 EG-1과 EG-2로 명명 하였다.

2-3. 오일흡착

EG를 이용한 오일 흡착실험을 위한 방법에는 Wicking법[16], bag법[17] 및 직접 흑연을 첨가하여 실험하는 방법[18] 등이 있는데, 본 실험에서는 마지막 방법을 이용하여 오일 흡착실험을 하였다. 비커에 증류수와 오일을 넣고, EG를 첨가한 후 일정 시간동안 방치하였다. 미 흡착

된 오일의 제거 및 잔류 수분을 증발시키기 위하여 오일이 흡착된 EG를 90 °C의 오븐에서 건조하였으며, 건조된 EG의 무게를 재어 흡착된 오일의 양을 측정하였다. 오일의 흡착량은 아래 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$Q \text{ (adsorption capacity)} = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (1)$$

여기서 m_0 는 EG의 무게를 말하며 m 은 오일을 흡착한 EG의 무게를 뜻한다.

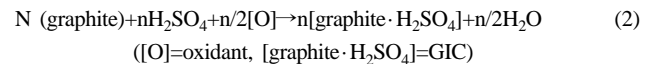
2-4. 팽창흑연의 구조적 특성

팽창흑연의 제조를 위해 일반적으로 사용되는 산화제로서 질산과 환경 친화적인 특성을 갖는 과산화수소를 사용하여 팽창흑연을 제조하였고, 물성의 비교를 위하여 제조된 EG의 팽창 부피와 삽입제의 함량은, 열처리된 GICs(1 g)의 부피와 무게를 측정하고 600-900 °C에서 열처리하여 제조된 팽창흑연의 부피와 감소된 무게를 비교하여 정의하였다. EG의 팽창 부피는 메스실린더를 사용하여 측정 하였고, 삽입제의 함량은 GICs의 열처리에 의한 EG의 제조시 휘발된 삽입제의 양을 나타낸다. 또한, N-GP에 대한 삽입제의 삽입과 열처리에 의한 팽창을 확인하기 위하여 X-ray diffraction(XRD)을 사용하여 층간거리의 변화를 측정하였으며, 산 처리에 의한 GICs와 열처리에 의해 제조된 EG 및 EG의 오일 흡착 전과 후의 표면 형태를 비교, 관찰하기 위하여 scanning electron microscope(SEM)를 이용하여 각각의 표면 구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 흑연구조의 특성

일반적으로 흑연은 다이아몬드의 형태를 나타내며, 층상구조를 가진 탄소의 동족체는 공유결합으로 연결된 탄소 원자들로 이루어져 있다. 또한, 육각형의 고리구조로 연결된 각 층은 다른 층과 평행한 배열을 이루고 있으며, 탄소-탄소 결합의 길이는 1.415 Å이고 각 층간거리는 van der Waals 힘에 의해 탄소 결합보다 큰 값(3.35 Å)을 갖는다. 흑연의 평행한 층들 사이에는 화학적 결합이 없고, 약한 van der Waals 결합으로 이루어져 있어 흑연의 층간 사이에는 다양한 원자 또는 분자가 삽입 될 수 있기 때문에 GICs를 형성하게 된다. 이러한 GICs가 형성되는 과정을 아래와 같이 수식으로 표현하였다[19].



그리고 GICs는 열처리에 의해 상대적으로 약한 흑연의 c축이 팽창되어 최종적으로 EG가 생성되며, 이러한 EG가 형성되는 과정을 Fig. 1에 간략히 나타내었다.

3-2. 팽창 부피와 삽입제의 함량

EG의 팽창 부피와 삽입제의 함량은 EG의 질을 설명하는데 중요한 요소로 사용이 된다. 팽창 부피는 N-GP의 혼산과의 반응 시간과 혼합물, GICs의 열처리 온도 그리고 흑연의 입자 크기 등에 의존하며, 열처리 온도의 변화에 따른 EG-1과 EG-2의 팽창 부피와 삽입제의 함량 변화를 Fig. 2와 3에 나타내었다.

Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이, EG-2는 EG-1 보다 더 큰 팽창률을 보였으며, GICs에 삽입된 삽입제의 함량은 비슷한 값을 보였다. 이는 N-GP가 산 처리되는 동안 과산화수소의 강한 활성을 갖는 산소 원자와 흑연간의 화학적 전하에 의해 층상 구조가 붕괴된 GIC-2의 구조적 특성으로서 삽입제의 함량은 GICs-1과 비슷하지만, 열처리에 의한 팽창이 더 쉽게 일어나는 것으로 판단된다[20]. 그리고 열처리 온도변화에 따른 EG-1과 EG-2의 팽창 부피와 삽입제의 함량은 온도의 증가와 함께 모두 증가하는 것을 볼 수 있었는데, 이는 동일한 열처리 시간하에

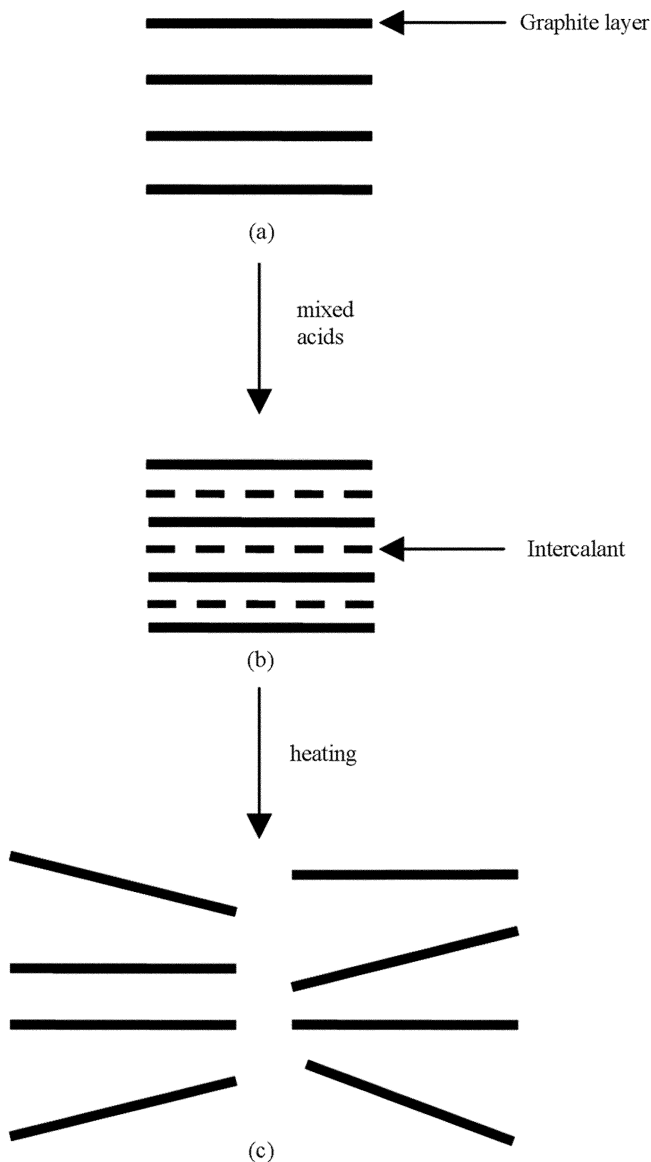


Fig. 1. A mechanism showing the formation of EG from N-GP; (a) N-GP, (b) GIC, (c) EG.

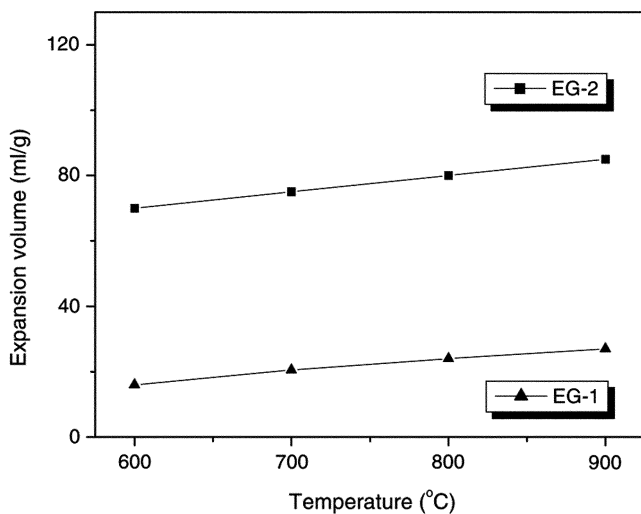


Fig. 2. Effect of heating temperature on expansion volume.

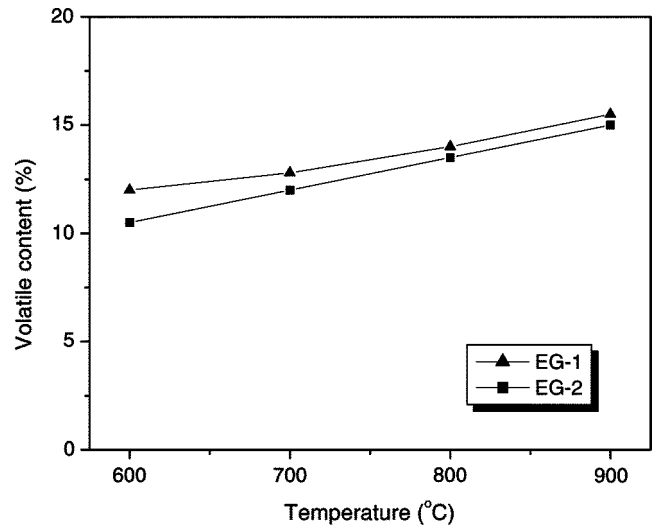


Fig. 3. Contents of volatile intercalated in GICs.

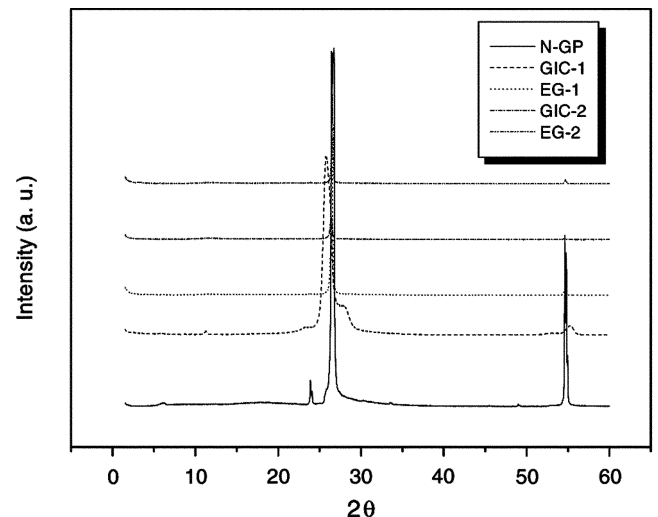


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of GICs and EG.

낮은 온도에서는 흑연의 층간에 삽입된 HSO_4^- 분자들의 휘발성이 낮아 열처리에 의한 GICs의 순간적인 팽창이 적게 일어나는 것으로 보이며, GICs에 삽입된 삽입제의 함량 역시 열처리 온도의 저하와 함께 감소하는 것은 저온에서 삽입제의 낮은 휘발성에 의한 것으로 관찰되며, 이로써 저온에서 제조된 EG의 층간에는 미휘발분의 HSO_4^- 의 분자가 더 많이 존재할 것으로 판단된다.

3.3. 층상화합물의 구조

X-ray를 이용하면 층상화합물의 층간거리 및 결정의 구조 등을 알 수 있는 관계로, 흑연 층의 반복되는 구조 및 삽입제가 삽입되었을 경우 층간거리의 변화 등을 알 수 있다. N-GP, GICs 그리고 EG의 층간거리를 비교하기 위하여 XRD 분석에 의하여 측정된 팽창흑연의 d_{002} 값으로서 각각의 층간거리를 알아보고, 측정된 XRD 패턴을 Fig. 4에 나타내었으며 XRD 분석에 의한 층간거리 값을 Table 1에 정리하였다.

XRD 측정결과, Table 1에서 보는 바와 같이 N-GP와 비교하여 산 처리와 열처리에 의한 GIC-1과 EG-1의 층간거리는 각각 증가된 것을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 4에서 N-GP와 GIC-1의 XRD 패턴을 비교하였을 때, N-GP에서 나타나는 특성 피크인 2θ 의 26 부근의 피크가 산 처리 후 broad해지며 왼쪽으로 이동되었고, 55부근의 피크의 강도가 약해지는 등 N-GP의 특성 피크가 변화된 것을 알 수 있었다. 이는 산 처리

Table. 1 Interlayer distances measured from X-ray diffraction

	N-GP	GIC-1	EG-1	GIC-2	EG-2
Interlayer distance (Å)	14.22	14.87	22.92	7.54	26.88

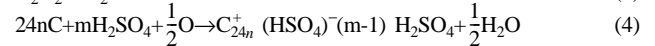
에 의해 N-GP의 층간에 삽입제가 삽입되어 천연흑연의 결정성 저하 및 피크의 강도가 약해진 것으로 관찰되며, 또한 N-GP(14.22 Å)와 GIC-1 (14.87 Å)의 층간거리의 차이로 보아 N-GP의 층간에 성공적으로 HSO_4^- 분자가 삽입되었던 것으로 판단된다. 그리고 GIC-1의 열처리 후 EG-1의 2θ의 26 부근의 피크가 다시 N-GP의 특성 피크와 같이 sharp해지고 오른쪽으로 이동된 것을 볼 수 있었는데, 이는 열처리에 의한 흑연 층간의 삽입제가 분출되어 다시 N-GP의 특성 피크를 나타내는 것으로 사료되며, GIC-1과 EG-1(22.92 Å)의 층간거리의 차이는 고온에서 열처리된 GIC-1의 상대적으로 약한 c-축이 HSO_4^- 의 방출에 의하여 팽창되어 층간거리가 넓어진 것으로 판단된다. 그리고 GIC-2와 EG-2의 XRD 패턴은 산화제로서 질산을 사용한 경우와 달리 N-GP와 거의 비슷한 XRD 패턴을 보였지만, 2θ의 55 부근의 피크의 강도가 약해진 것으로 보아 산처리와 열처리에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 GIC-2의 층간거리는 N-GP 보다 작은 값(7.53 Å)을 보였으며, 열처리에 의해 팽창된 EG-2의 층간거리는 EG-1보다 더 높은 값(26.88 Å)을 나타내었다. 이는 N-GP와 과산화수소의 산소 원자 간의 화학적 전하에 의해 층상 구조가 붕괴되어 GIC-2는 N-GP 보다 낮은 층간거리를 나타내는 것으로 사료되며, 이러한 특성으로 인하여 EG-2는 열처리에 의한 팽창이

더 크게 일어나 EG-1보다 높은 층간거리를 나타내는 것으로 판단된다.

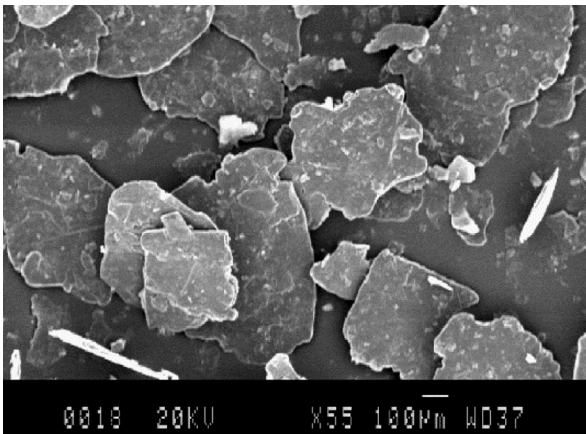
3.4. 팽창흑연의 형태학

산 처리에 의한 GICs와 열처리에 의한 EG의 표면 구조를 비교 및 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 Fig. 5와 같이 관찰하였다.

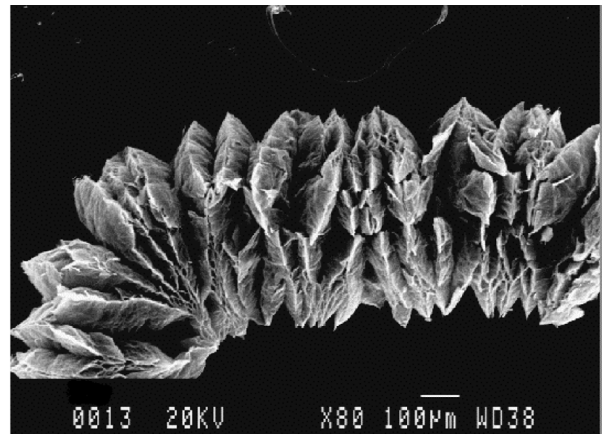
SEM 관찰 결과, GIC-1은 판상을 나타내었고, 열처리에 의한 팽창 후 EG-1은 기공형상을 나타내며, 약한 결합을 갖는 흑연의 c-축이 팽창되어 부풀어 오른 zig-zag 구조의 'worm-like' 형태를 보였다[2]. 이러한 현상은 층간에 삽입제가 삽입된 GIC-1의 높은 단계구조에 의해 일어나는 것으로 판단된다. 그러나 EG-2는 EG-1과 같은 zig-zag 구조의 'worm-like' 형태가 아닌 층간 구조가 손상되어 팽창된 구조가 나타나는 것을 볼 수 있었고, GIC-2의 제조시 N-GP에 황산/과산화수소가 삽입되는 동안 과산화수소의 높은 활성을 나타내는 산소 원자와 N-GP간의 화학적 전하에 의하여 층상 구조가 사라진 것에 의한 것으로 판단된다. H_2O_2 는 N-GP에 삽입되는 동안, N-GP를 산화시키기 위하여 강한 활성을 갖는 산소 원자들을 방출하며 분해되어지고, 산화된 흑연은 H_2SO_4 -GICs를 형성하기 위하여 H_2SO_4 와 함께 반응한다. 이러한 전체적인 화학반응을 아래 식과 같이 표현하였다[20].



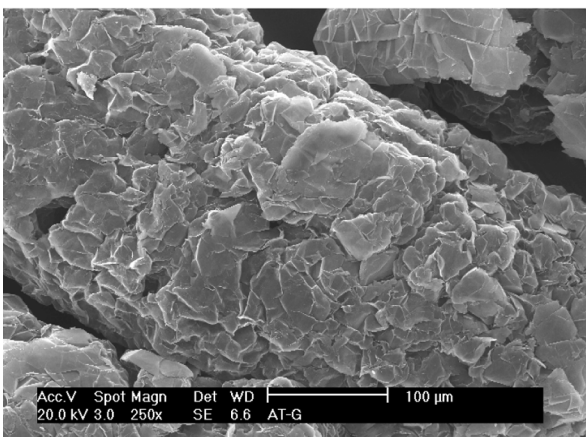
여기서, n은 단계 지수를 나타내고 m은 화학양론적 요소를 나타낸다. 과산화수소는 GICs를 생성하기 위해 다른 산화제와 유사한 성질을 나



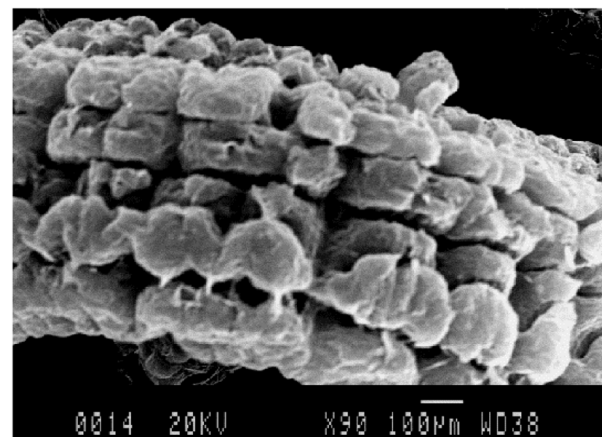
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. SEM micrographs of EG particles; (a) GIC-1, (b) EG-1, (c) GIC-2, (d) EG-2.

타내며, GICs를 생성하기 위해 효과적이지만 GICs를 형성하는 기능은 다른 산화제보다 더 복잡한 메커니즘을 갖는 것으로 알려져 있다[20].

3.5. 오일 흡착 특성

n-alkane은 석유 연료 및 윤활유 등의 주요 구성 성분으로, 평행한 알칸 사슬의 중심축과 함께 선형 탄화수소 및 흑연의 표면에 흡착된다고 알려져 있다. 이러한 n-alkane의 탄소 원자들은 결합길이 0.154 nm와 결합각 $109^{\circ}28'$ 으로 zig-zag의 사슬모양으로 선형 탄화수소의 표면에 배열되며[21], n-alkane의 흑연에 대한 흡착은 atomic force microscopy (AFM)[21-23] 등에 의하여 확인 및 연구가 보고된 바 있다.

본 연구에서 오일 흡착실험을 위하여 사용된 n-dodecane은 n-alkane의 하나로서, 1.85 nm의 길이와 0.4 nm의 폭을 갖으며 흡착물이 더 뛰어난 n-hexadecane과 비교하여 사슬 길이 외에 물리적 특성에 커다란 차이가 없고, 흑연의 표면에 흡착되어 진다. 이러한 n-dodecane은 흑연의 탄소 육각형 고리의 중심에서 n-dodecane의 수소 원자들이 흡착된다고 제안되어 졌다[22].

EG-1과 EG-2를 이용한 오일 흡착실험 결과, 오일의 흡착은 2-3분내에 이루어졌고, 최대 오일 흡착량을 측정하기 위하여 1시간동안 방치하였다. 실험적으로 EG의 오일 흡착시, 투명한 색을 나타내는 오일은 EG의 첨가와 함께 수분내에 사라지는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 오일이 EG에 흡착되었음을 알 수 있었다. 또한, 오일에 첨가된 EG는 오일의 흡착과 함께 수면 위에서 넓게 퍼지며 주변의 오일을 더 빨리 흡착하였다. 그러나 과량의 오일과 함께 EG의 오일 흡착 실험시, EG는 최대 오일을 흡착함으로써 포화되어 젖고 미 흡착된 오일과 실험에 사용된 비커에 흡착된 오일은 포화된 EG에 더 이상 흡착되지 않고 수면 위에 남아있는 것을 알 수 있었다.

EG-1과 EG-2의 최대 오일 흡착량을 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 EG-1과 EG-2는 각각 g당 최대 16 g과 35 g의 오일을 흡착하는 것을 알 수 있었다. 대부분의 주요 성분이 탄소로 이루어져 있는 흑연은 높은 소수성을 나타내고, 또한 오일 역시 비극성이므로 흡착 속도가 매우 빠른 것으로 판단된다. 그리고 EG는 소수의 micropore와 대부분의 macropore로 구성되어 있기 때문에 오일 흡착은 팽창된 흑연 내부로의 확산과 흑연 표면에서의 흡착에 의해 흡착의 속도가 매우 빠르다. 또한, 열처리에 의한 팽창 부피의 증가와 함께 EG는 대량의 오일을 흡착하며, 열처리에 의하여 감소된 흑연의 밀도에 의해 EG는 오일을 흡착한 후에도 수면에 떠 있는 것으로 판단된다[24-26].

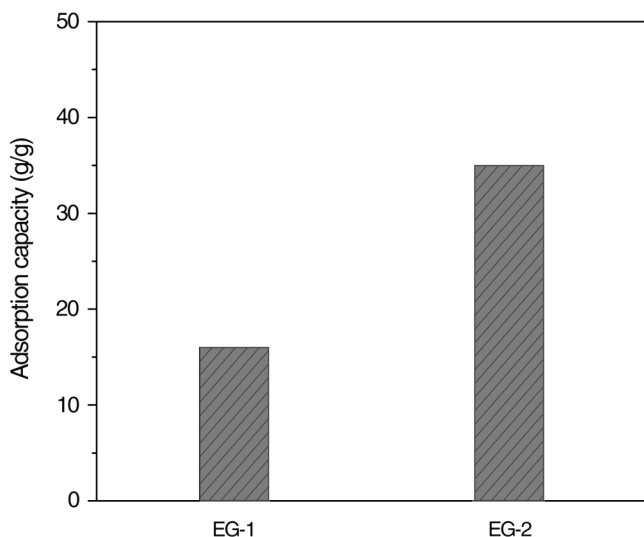
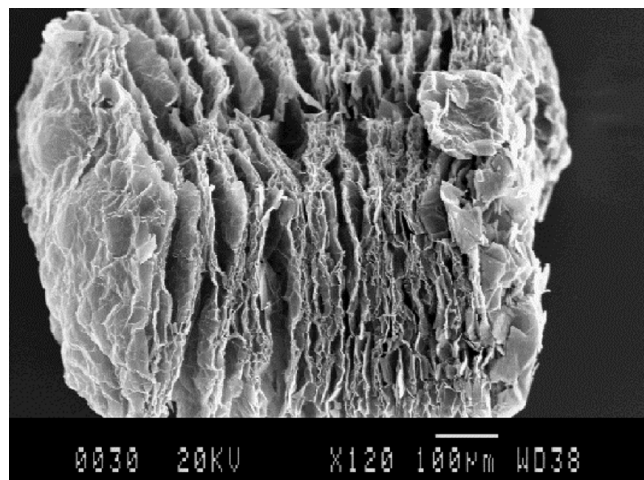
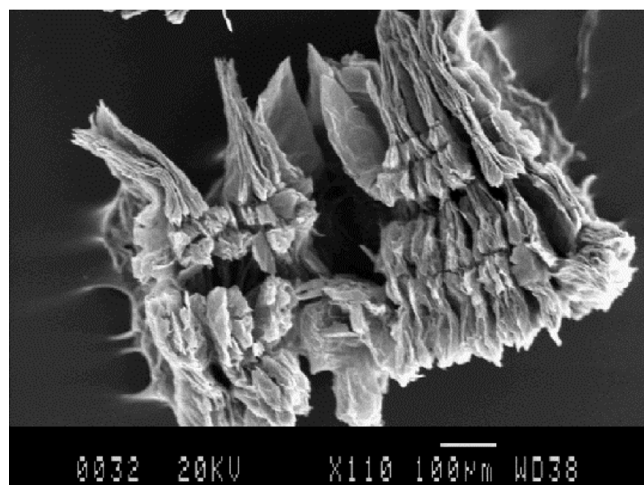


Fig. 6. Adsorption capacities per 1 g of EG-1 and EG-2 for n-dodecane.



(a)



(b)

Fig. 7. SEM micrographs of EG-1 and EG-2 after oil adsorption and drying; (a) EG-1, (b) EG-2.

Fig. 7은 오일 흡착 후 80-90 °C에서 건조된 EG-1과 EG-2의 표면 형태를 SEM을 이용하여 관찰한 것으로, Fig. 7의 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 EG-1과 EG-2는 오일 흡착 및 건조 후에도 오일 흡착 전과 같은 'worm-like'의 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 EG-1과 EG-2는 건조 후 'worm-like'형태가 감소된 것을 볼 수 있었는데, 이는 열처리에 의한 팽창으로 인하여 약해진 흑연의 층간 특성으로 인하여 건조시 수분 및 미 흡착된 오일의 방출에 의한 수축으로 팽창된 형태가 감소하는 것으로 판단된다[7].

4. 결 론

본 연구는 습식 방법에 의하여 EG를 제조하고, 제조된 EG의 특성들을 고찰하였으며, 오일 흡착실험을 통하여 흡착제로서의 특성을 조사하였다. 실험 결과, 팽창 부피와 흑연 층간에 삽입된 삽입체의 함량은 열처리 온도의 증가와 함께 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 XRD 분석으로서 황산/질산 처리된 EG-1 보다 황산/과산화수소 처리된 EG-2의 층간거리가 더 증가된 것을 확인할 수 있었고, 오일흡착 결과 EG-1과 EG-2는 g당 각각 16 g과 35 g의 오일을 흡착하여 오일 흡착량은 흑연의 층간거리에 비례함을 알 수 있었다. 또한 오일 흡착 및 건조 후 EG의 'worm-like'형태는 오일 흡착 전보다 감소하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kang, F., Leng, Y. and Zhang, T. -Y., "Electrochemical Synthesis and Characterization of Formic Acid-Graphite Intercalation Compound," *Carbon*, **35**, 1089-1096(1997).
2. Kang, F., Zheng, Y. P., Wang, H. N., Nishi, Y. and Inagaki, M., "Effect of Preparation Conditions on the Characteristics of Exfoliated Graphite," *Carbon*, **40**, 1575-1581(2002).
3. Inagaki, M. and Suwa, T., "Pore Structure Analysis of Exfoliated Graphite using Image Processing of Scanning Electron Micrographs," *Carbon*, **39**, 915-920(2001).
4. Shen, W., Wen, S., Cao, N., Zheng, L., Zhou, W., Liu, Y. and Gu, J., "Expanded Graphite-A New Kind of Biomedical Material," *Carbon*, **37**, 351-358(1999).
5. Celzard, A., Krzesińska, M., Bégin, D., Maréché, J. F., Puricelli, S. and Furdin, G., "Preparation, Electrical and Elastic Properties of New Anisotropic Expanded Graphite-Bases Composite," *Carbon*, **40**, 557-566(2002).
6. Westermeyer, W. E., "Oil Spill Response Capabilities in the United States," *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 196-200(1991).
7. Toyoda, M. and Inagaki, M., "Heavy Oil Sorption Using Exfoliated Graphite New Application of Exfoliated Graphite to Protect Heavy oil Pollution," *Carbon*, **38**, 199-210(2000).
8. Inagaki, M., Kawahara, A. and Konno, H., "Sorption and Recovery of Heavy Oils using Carbonized Fir Fibers and Recycling," *Carbon*, **40**, 105-111(2002).
9. Nishi, Y., Iwashita, N., Sawoda, Y. and Inagaki, M., "Sorption Kinetics of Heavy Oil Into Porous Carbons," *Water Re.*, **36**, 5029-5036 (2002).
10. Inagaki, M., Iwashita, N. and Hishiyama, Y., "Criteria for the Intercalation of Sulfuric Acid," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **244**, 89-94(1994).
11. Inagaki, M., Kawahara, A., Nishi, Y. and Iwashita, N., "Heavy Oil Sorption and Recovery by using Carbon Fiber Felts," *Carbon*, **40**, 1487-1492(2002).
12. Chol, H. M. and Cloud, R. M., "Nature Sorbents in Oil Spill Cleanup," *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 772-776(1992).
13. Shimizu, T., Koshiro, S., Yamada, Y. and Tada, K., "Effect of Cell Structure on Oil Absorption of Highly Oil Absorptive Polyurethane Foam for On-Site Use," *J. Appl. Polym. Sci.*, **65**, 179-186(1997).
14. Nakajima, T., "Formation Process and Structure of Graphite Oxide," *Carbon*, **32**, 469-472(1994).
15. Zheng, W. and Wong, S. H., "Electrical Conductivity and Dielectric Properties of PMMA/Expanded Graphite Composite," *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 225-235(2003).
16. Aggarwal, R. K., "Evaluation of Relative Wettability of Carbon Fibers," *Carbon*, **15**, 291-293(1977).
17. Inagaki, M., Shibata, K., Setou, S., Toyoda, M. and Aizawa, J. I., "Sorption and Recovery of Heavy Oils by using Exfoliated Graphite Part III. Trial for Practical Application," *Desalination*, **128**, 219-222(2000).
18. Toyoda, M., Moriya, K., Aizawa, J., Konno, H. and Inagaki, M., "Sorption and Recovery of Heavy Oils by using Exfoliated Graphite Part I: Maximum Sorption Capacity," *Desalination*, **128**, 205-211 (2000).
19. Chen, C. H., Wu, D. J., Weng, W. G. and Yan, W. L., "Preparation of Polymer/Graphite Conducting Nanocomposite by Intercalation Polymerization," *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 2506-2513(2001).
20. Kang, F., Leng, Y. and Zhang, T. Y., "Influences of H_2O_2 on Synthesis of H_2SO_4 -GICs," *J. Phys. Chem. Solids*, **57**, 889-892(1996).
21. Venkatarman, B., Breen, J. J. and Flynn, G. W., "Scanning Tunneling Microscopy Studies of Solvent Effects on the Adsorption and Mobility of Triacontane/Triacontanol Molecules Adsorbed on Graphite," *J. Phys. Chem.*, **99**, 6608-6619(1995).
22. Martin, D. S., Weightman, P. and Gauntlett, J. T., "The Adsorption of n-Hexadecane Onto Highly Oriented Pyrolytic Graphite Studied by Atomic Force Microscopy," *Surface Science*, **398**, 308-317(1998).
23. Martin, D. S., Weightman, P. and Gauntlett, J. T., "The Adsorption of n-Dodecane and n-Pentane Onto Highly Oriented Pyrolytic Graphite Studied by Atomic Force Microscopy," *Surface Science*, **424**, 187-198(1999).
24. Park, S. J. and Kim, K. D., "Influence of Activation Temperature on Adsorption Characteristics of Activated Carbon Fiber Composites," *Carbon*, **39**, 1741-1746(2001).
25. Park, S. J. and Jung, W. Y., "Adsorption Behaviors of Chromium (II) and (VI) on Electroless Cu-Plated Activated Carbon Fibers," *J. Colloid Interface Sci.*, **243**, 316-320(2001).
26. Park, S. J. and Jang, Y. S., "Pore Structure and Surface Properties of Chemically Modified Activated Carbons for Adsorption Mechanism and Rate of Cr (VI)," *J. Colloid Interface Sci.*, **249**, 458-463(2002).