

전기이중층 캐패시터 전극용 meso-pore구조의 미소구형 활성탄소 제조

엄익흠 · 이철태[†]

단국대학교 공학부 화학공학전공
(2009년 3월 30일 접수, 2009년 5월 20일 채택)

Preparation of Micro-spherical Activated Carbon with Meso-porous Structure for the Electrode Materials of Electric Double Layer Capacitor

Eui-Heum Um and Chul-Tae Lee[†]

Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 140-714, Korea
(Received March 30, 2009; accepted May 20, 2009)

전기이중층 캐패시터의 성능향상을 위한 전극물질로서 resorcinol-formaldehyde수지를 탄소원으로 사용하여 meso-pore 비율 52~64%의 기공특성을 지니며 직경 2~10 μm 의 미세구형 활성탄을 제조하였다. 이 활성탄을 전기이중층에 적용한 결과, meso-pore구조의 미세구형활성탄은 전하전달저항의 저감 및 충방전을 수용능력 향상에 효과적인 영향을 나타내어 전기이중층 캐패시터의 성능향상을 위한 효과적인 전극물질이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

A micro-spherical activated carbon with meso-pore structure of 52~64% and particle diameter of 2~10 μm was prepared for the improvement electrochemical performance of activated carbon as electrode material for electric double layer capacitor. Resorcinol-formaldehyde resin was used as a carbon source in this preparation. According to electrochemical analysis of EDLC using this activated a carbon with showing effects to reduce charge transfer resistance and to increase rate capability, it was found out that micro-spherical activated carbon could be a good method as well as a material for enhancing the performance of electric double layer capacitor.

Keywords: double capacitor, activated carbon, micro-sphere, meso-pore

1. 서 론

전기이중층캐패시터(electric double layer capacitor ; 이하 EDLC로 표기)는 전극활물질이 화학적으로 반응하지 않아 사이클 수명이 매우 길고, 전하를 띤 입자의 이동 및 흡·탈착의 물리적 과정을 통해 전기 에너지를 저장, 방출하므로 출력밀도가 높은 재래식 캐패시터와 에너지밀도가 높은 2차전지의 중간 특성을 지닌 에너지 저장장치이다 [1,2]. 이러한 EDLC의 성능 개선을 위한 핵심요소는 분극성 전극 물질이며 활성탄소는 그 대표적인 재료이다. 이는 활성탄소가 비표면적이 높고, 전기전도도가 크며 전기화학적으로 안정하기 때문이다. 따라서 활성탄소의 물성이 EDLC에 적합하도록 제조하는 것은 매우 중요한 일이며 이를 위한 다양한 방안들이 모색되어 오고 있다[3-13].

활성탄소의 기공구조와 EDLC의 성능과의 관계는 아직도 명확하게 규명되지 못하고 지금까지 논란의 여지가 되고 있으나, 최근의 연구 결과를 살펴보면, 비표면적이 일정 수준이상인 되면 더 이상 EDLC의 용량 증대에 영향을 미치지 못하며, 전체체공 중 일정량 이상의 meso-pore가 존재할 때 EDLC의 방전용량이 증대된다는 된다는 보고가 다수 나오고 있다[14-16]. 활성탄소의 물성 및 성능을 EDLC의

용량과 관련지을 때 활성탄소의 기공구조와 더불어 활성탄소의 형상은 또 하나의 고려의 대상이라고 볼 수 있다. 실제 활성탄소의 형상은 전극 특성에도 영향을 미치는데, 분말[5,6] 또는 섬유상 활성탄소 [17,18]의 경우 각각의 기공특성에 따라 EDLC전극 소재로 사용된 여러 연구결과가 보고되었다. 그러나 입상 활성탄소나 특히 구형 활성탄소를 EDLC에 적용한 경우에 대한 연구는 거의 이루어진 바 없는 것으로 보인다. 구형 활성탄소를 EDLC에 적용하는 경우, 전극 내부 입자간의 공극이 균일하게 분산될 수 있으므로 전극 구성 입자 사이로 이온 확산 속도를 높일 수 있어 충·방전 속도가 향상되며 내부 저항이 감소될 것이고, 전극물질의 충전 효과가 커지므로 전극의 밀도를 증가시킬 수 있어 EDLC의 단점으로 지적되는 단위부피당 낮은 에너지밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 미세구형으로 meso-pore구조를 지닌 고비표면적의 활성탄소는 EDLC의 성능을 개선할 수 있는 전극물질이 될 수 있을 것으로 기대된다.

이에 따라 본 연구는 resorcinol과 formaldehyde로부터 합성한 R-F xerogel을 탄소원으로 하며 micro-encapsulation원리를 이용하여 미세구형화한 후 meso-pore의 구조형성을 용이하게 하는 친이금속산화물 코발트 촉매하에서 KOH를 활성화제로 사용하여 meso-pore구조를 지닌 미세구(micro-sphere)형의 활성탄 제조를 시도하고 제조된 미소구형 활성탄을 EDLC의 전극물질로 적용하여 기존 활성탄소 전극물질

[†] 교신저자 (e-mail: chult823@dankook.ac.kr)

의 성능개선의 방향 및 그 가능성을 조사하였다.

2. 시료 및 실험

2.1. microsphere형 활성탄의 제조

2.1.1. 시료

미세구(microsphere)형의 활성탄 제조를 위해서는 전구체의 성형과정이 필수적이며 이를 위해 합성소재인 phenol수지를 원료물질로 선정하였다. 출발물질로 resorcinol (aldrich)과 formaldehyde (37% solution, 덕산공업)을 사용하였으며, 중합반응에서의 촉매로 sodium carbonate (Aldrich), 활성화시 meso-pore 형성을 위한 촉매인 천이금속 원소로 cobalt acetate (Aldrich)를 사용하였다. 또한 에멀전 형성을 위해 균일상으로 cyclohexane (Aldrich), 유화제로서 span-80을 사용하였다.

2.1.2. 미소구체형 활성탄의 제조

탄소 전구체를 제조하기 위해 기존에 알려진 방법[19,20]과 같이 resorcinol을 물에 녹인 후 촉매와 formaldehyde를 일정비율로 혼합하여 R-F 용액을 제조하여 중합반응을 시켰다. 이때 Resorcinol에 대한 formaldehyde의 mole비(F/R) 및 첨가촉매의 몰비(C/R)를 각각 2.0 및 0.01로 고정하였으며, 물의 첨가량은 resorcinol의 단위 g당 2.0 mL의 비율로 조정하였다. 이와 같이 준비된 R-F 용액을 초기 pH = 7.0의 조건하에 상온에서 교반하여 중합반응 및 반응 생성물의 gel화를 지속시키다가 미세구형을 형성하기 위해 micro-encapsulation의 원리를 이용[21]하여 용액의 유동성이 사라지기 직전에 cyclohexane과 span으로 구성된 유기상 용액에 분산시켜, W/O형의 emulsion을 형성시켰다. 에멀전의 전체 구성은 부피비로 R-F용액 1, cyclohexane 3.6, span-80 0.4로 하였다. 사용된 물질에 대한 각각의 물질량은 최종 목적하는 meso-pore구조의 미세구형 활성탄의 제조에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료되는 변수이므로 여러 차례 시행착오에 의해서 일단 구형상이 잘 생성될 수 있는 임의적인 조건에서 선정된 것이다. 이와 같이 형성된 emulsion을 R-F용액이 완전히 gel화 될 때까지 상온에서 교반하여 R-F hydrogel을 제조하였다. 이와 같이 얻어진 hydrogel을 acetone에 침적하고 여과하는 과정을 3회 이상 반복하여 세척 및 hydrogel 내부의 물을 acetone로 치환한 후, 70 °C의 진공오븐에서 수일간 건조하여 미소구형의 xerogel을 얻었다. 얻어진 미소구형의 xerogel을 일정온도의 질소분위기에서 1 h 동안 열분해하여 탄화된 미세구형체를 얻고 이를 KOH를 이용하여 활성화하여 활성탄을 얻었다. 이상의 과정을 Figure 1에 나타내었으며, 탄화 및 활성화는 분위기를 조절할 수 있는 관형반응기에서 진행하였다.

2.1.3. 제조된 활성탄의 물성 분석

N₂ gas 흡착시험을 통해 제조된 구형활성탄의 비표면적, 기공부피, PSD (pore size distribution)를 구하였다. 제조된 활성탄의 형상 및 입자 크기 등을 전자주사 현미경(SEM)을 통해 관찰하였다.

2.2. EDLC전극에 대한 적용

2.2.1. 복합전극 및 test cell의 구성

제조된 활성탄을 전기이중층 캐패시터의 전극 물질로서 사용시 성능을 조사하기 위한 전극의 제조는 Figure 2와 같은 공정에 따라 glove box에서 실시하였다. 제조된 미세구형 활성탄소를 85 wt%, 도전재로 KJ-black을 10 wt%, binder로 PTFE를 5 wt%의 비율로 하여 에탄올을 이용하여 점성이 생길 때까지 혼합한 후 rolling press를 이

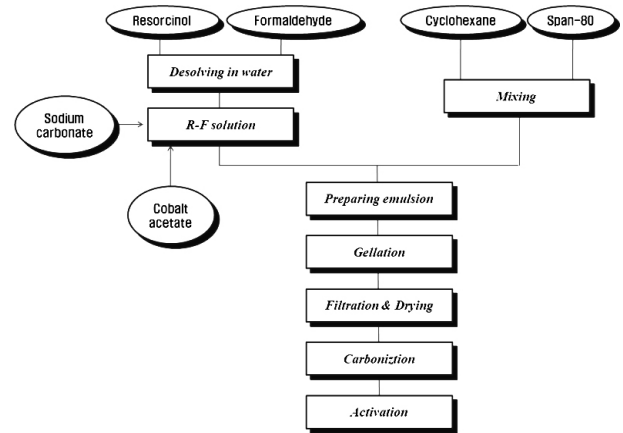


Figure 1. Preparation procedure of micro-spherical activated carbon with meso-pore structure.

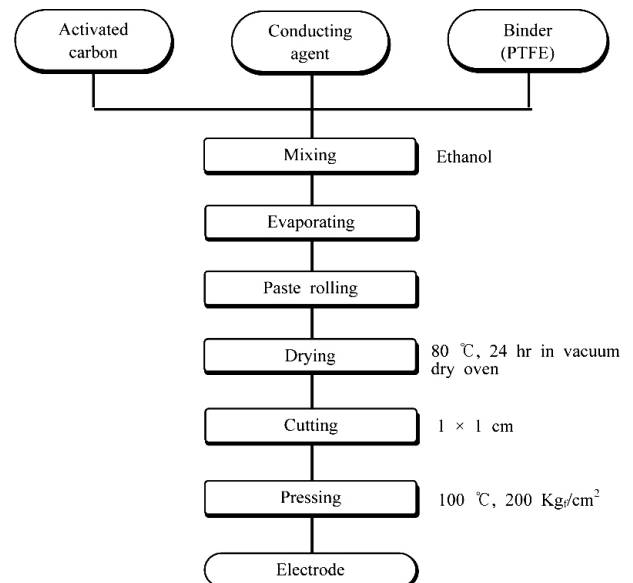


Figure 2. Flow diagram for the preparation of electrode for the EDLC.

용하여 일정한 두께(150~250 μm)의 EDLC 전극을 제조하였다. 제조된 얇은 판상의 전극은 80 °C 진공 건조기에서 24 h 동안 건조한 후 정사각형(1 × 1 cm) 모양으로 절단하여 집전체로 쓰인 Al-mesh에 100 °C, 200 kg/cm²로 압착하였다. 집전체에 압착한 두 개의 전극 사이의 separator로 celgard[®]3501을 사용하였다. 안쪽 표면이 폴리에틸렌으로 코팅된 알루미늄 봉지를 이용하여 전해질을 충전한 후 알루미늄 봉지의 가장자리를 전기접착기로 접착하여 공기를 차단하였다. 이와 같이 제조된 EDLC의 구조는 Figure 3과 같다.

2.2.2. EDLC에 적용 시험

유기전해질은 수용액계 전해질보다 점도가 높고 전기전도도가 낮은 단점을 가지고 있지만 작동전위(operating voltage)가 높기 때문에 수용액계 전해질에 비해 매우 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 점성은 높지만 비교적 전기전도도가 우수한 1 M LiClO₄/PC + DME (1:1) 전해질을 사용하였다. 제조된 전극에 대하여 계면저항을 조사하기 위하여 AC impedance를 조사하고, CV특성을 통하여 에너지밀도와 전류밀도를 조사하였다.

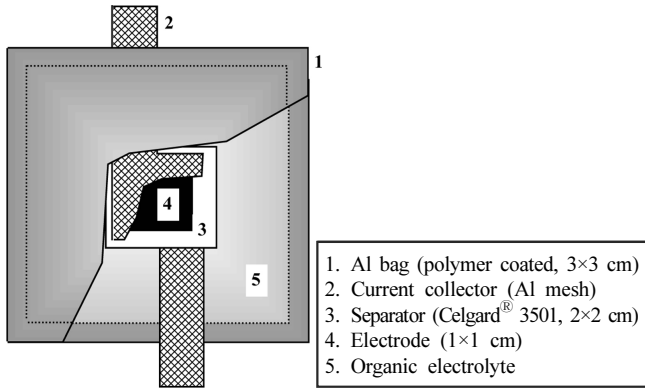


Figure 3. Structure of EDLC unit cell using organic electrolyte solution.

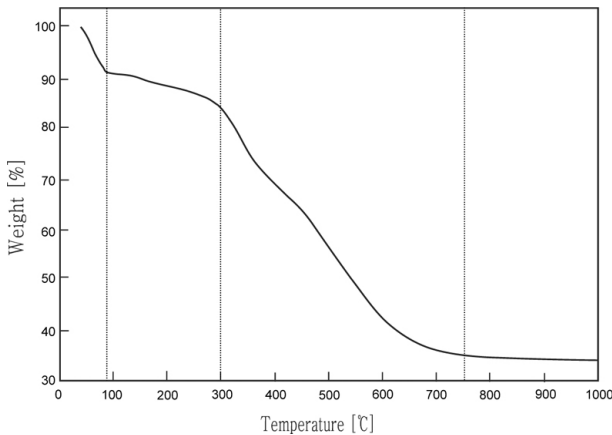


Figure 4. TG analysis of micro-spherical xerogel.

AC impedance는 Solartron사의 SI1255 high frequency FRA (Frequency Response Analyzer)를 이용하여 주파수 10 mHz~100 KHz 범위에서 측정하였으며, CV는 Potentiostat/Galvanostat (EG&G ; 273A)을 이용하여 5 mV/sec의 scan rate로 2 V 범위 내에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제조된 전구체의 열적 특성

제조된 탄소 xerogel의 탄화온도를 결정하기 위해 xerogel의 열적 특성을 조사하였다. Figure 4는 제조된 xerogel을 10 °C/min의 승온속도로 1000 °C까지 가열하여 얻은 열중량분석결과를 나타낸 것이다. 열중량 분석결과를 보면 전체 중량 감소는 65% 정도이며, 중량 감소는 상온~90 °C, 100~300 °C 그리고 300~700 °C의 세 구간에서 다른 형태로 이루어지며, 750 °C 이상에서는 더 이상의 중량 감소가 없음을 알 수 있다. 첫 번째 구간에서는 수분이, 두 번째 구간에서는 xerogel 내에 잔류하는 유기물이 분해되고 세 번째 구간에서는 탄화반응이 일어나는 것으로 사료된다. 이상의 결과를 바탕으로 제조된 xerogel을 750 °C에서 탄화하여 활성탄을 제조하였다.

3.2. 활성탄의 제조

KOH 약품 활성화법을 이용하여 미세구형 활성탄을 제조하였다. 전구체로서의 xerogel은 촉매로서 cobalt의 양을 resorcinol에 대해 몰비 0.001로 첨가하고, 중합반응 시 R-F 용액의 초기 pH는 7.0의 고정 조건하에 제조하였다. 제조된 xerogel을 750 °C에서 4 h 동안 탄화한 후,

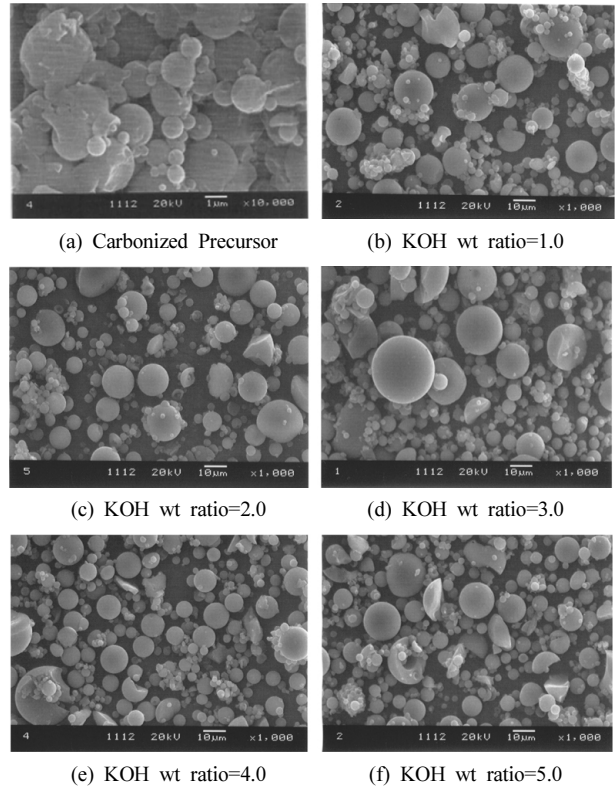


Figure 5. Surface morphologies of prepared activated carbons.

KOH를 탄화시료에 대해 중량비로 1.0~5.0 되게 가하여 KOH의 침적이 용이하게 이루어지도록 400 °C에서 1 h 동안 1차 열처리 한 후 800 °C에서 2 h 활성화하였으며 얻어진 활성탄의 특성을 조사하였다.

3.2.1. 제조된 활성탄의 형상

Figure 5는 제조된 활성탄의 특성 분석의 하나로서 그 형상을 확인하고자 SEM으로 관찰한 것이다. Figure 5에 제시된 사진 중 (a)는 활성화 전의 탄화된 상태의 precursor이며 나머지는 KOH의 첨가량을 탄화된 precursor에 대한 중량비로 1.0부터 5.0까지 달리한 조건에서 활성화된 활성탄의 형상이다.

Figure 5에서 볼 수 있는 바와 같이 활성화 결과 제조된 활성탄은 공히 평균적으로 직경 2~10 μm의 크기를 갖는 미세구형의 활성탄으로 제조되었음을 알 수 있다. KOH의 첨가량이 미세구형 활성탄의 크기에 미치는 영향 등은 명확히 확인이 되지 않으나 활성화 전 탄화된 상태의 precursor인 (a)와 비교해보면 KOH의 첨가량이 무게비 4.0 이상에서는 활성탄의 구형상이 깨어지는 현상이 두드러짐을 확인할 수 있었다. 이는 지나친 과량의 KOH의 첨가는 구형으로 멩쳐진 탄화물의 결합력을 약화시키는 영향으로 고려되며 비표면적을 비롯한 기공 특성 등, 활성탄의 본질적인 특성이 문제가 없다면 양산화과정에서 제조된 활성탄의 형태상 구형을 유지하기 위해서는 중량비로서 4.0 이상 과량의 KOH첨가는 바람직하지 않을 것으로 사료된다.

3.2.2. 활성탄의 기공 특성

Figure 6 및 Figure 7은 750 °C에서 탄화하여 얻어진 탄화물에 대해 KOH의 첨가량을 중량비로서 1.0부터 5.0까지 변화시키면서 활성화하여 얻어진 미세구형 활성탄의 특성을 조사하기 위해 N₂ 가스 흡착 곡선을 나타낸 것이다. Figure 6에서 볼 수 있는 바와 같이 조사된 5가

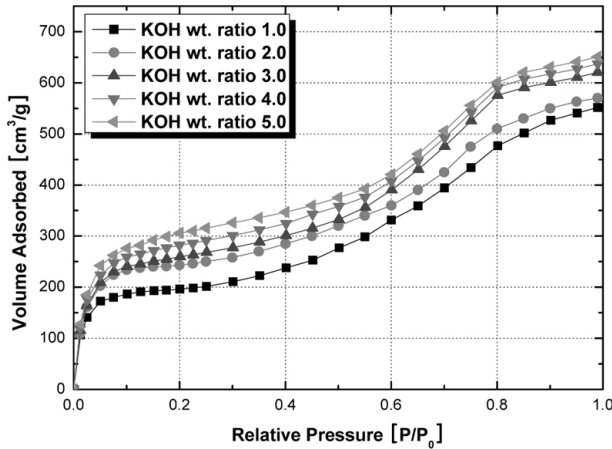


Figure 6. N_2 gas adsorption isotherms of prepared activated carbons.

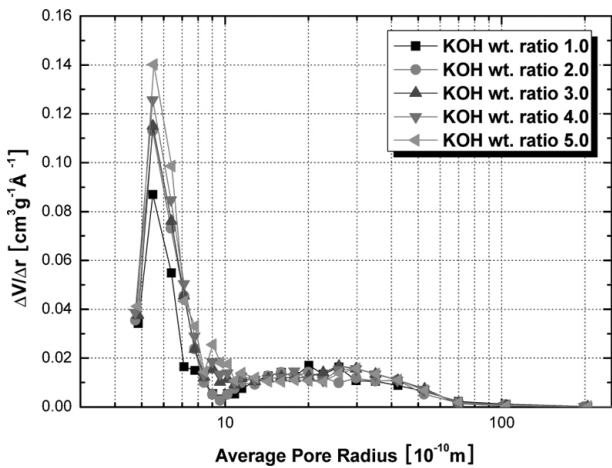


Figure 7. Pore size distributions of prepared activated carbons.

지의 활성탄 모두 VI type의 흡착곡선을 나타내어 meso-pore가 발달되어 있음을 알 수 있었으며, KOH의 첨가량이 증가함에 따라 전체 흡착 부피는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 흡착부피의 증가가 대부분 낮은 상대압력 부분에서 이루어진 것으로 보아 증가된 부피의 대부분이 micro-pore에 의한 것이며, 이를 통해 KOH 첨가량의 증가는 비표면적의 증가에 영향을 주고 있으나 meso-pore의 증가에 대한 영향은 상대적으로 적은 것으로 유추할 수 있다. Figure 7은 N_2 기체 흡착실험을 통해 얻은 활성탄의 기공 크기 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 KOH의 첨가량이 증가함에 따라 반경 10 Å 이하의 micro-pore는 증가하였으나, meso-pore는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Figure 8과 Figure 9는 KOH 첨가량의 변화에 따른 활성탄의 비표면적, average pore diameter, 총 기공부피, micro-pore 부피 및 meso-pore 부피의 변화를 나타낸 것이다. Figure 8과 Figure 9에서 볼 수 있는 바와 같이 KOH의 첨가량이 증가함에 따라 활성탄의 비표면적, 총 기공부피 및 micro-pore 부피는 증가하며, average pore diameter는 감소하나 meso-pore의 부피는 큰 변화가 없는 것으로 나타나고 있다. KOH를 이용한 활성탄의 제조공정에서 KOH의 영향은 일반적으로 KOH의 첨가량이 증가하게 되면 탄화된 시료의 CO_2 가스화가 활발히 이루어져 기공의 크기가 커져 비표면적, average pore diameter 및 meso-pore의 부피가 증가한다고 알려져 있다[22-24]. 그러나 본 연구

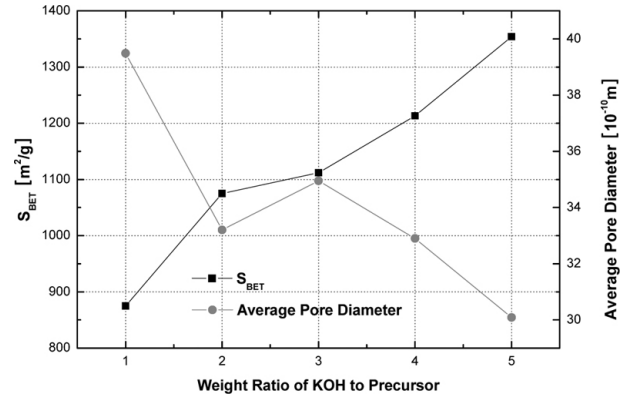


Figure 8. Effect of weight ratio of KOH to carbonized sample on specific surface area and average pore diameter of prepared activated carbons.

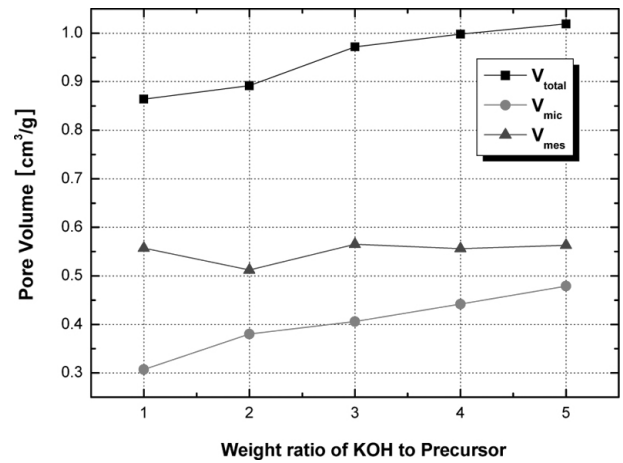


Figure 9. Effect of weight ratio of KOH to carbonized sample on total, micro and meso-pore volume of prepared activated carbons.

에서는 KOH의 첨가량이 증가됨에 따라 비표면적이 증가되어 기존 연구의 경향성과 일치되나 average pore diameter는 오히려 반대로 감소되었으며, micro-pore는 증가되나 meso-pore는 큰 변화가 없거나 오히려 약간 감소되어 더 이상 증대시키지 않는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상이 나타나는 원인은 KOH의 첨가량이 증가함에 따라 기공이 커지는 현상과 기공이 깊어지는 현상이 동시에 일어나는 하나, 본 연구에서는 cobalt 촉매의 작용과 전구체의 제조시 pH의 영향으로 인한 전구체 구조의 영향 및 hydrogel로부터 물이 제거 과정 등, 활성화 이전의 공정 또한 활성화과정에서의 기공 형성에 영향을 미치기 때문으로 사료되며 이에 대한 추가적인 연구 검토가 필요하다. 그러나 본 연구는 비표면적의 향상을 위해 KOH 약품활성화법을 적용하고, meso-pore의 발달을 위해서 유기겔의 탄화 및 Co 촉매활성화법을 적용하여 EDLC 전극물질로서 우수한 성능을 나타낼 것으로 기대되는 meso-pore구조의 미소구형 활성탄 제조를 그 목적으로 하는 바 조사된 조건하에서 제조된 미세구형 활성탄을 대상으로 우선 EDLC 전극물질로서의 성능 향상의 가능성을 조사하고자 하였다. 이에 Table 1은 이상과 같이 활성화제 KOH의 첨가량을 달리한 조건에서 제조된 미세구형 활성탄(A~E)의 기공특성을 요약하여 나타낸 것이다. 이 Table 1에서 시료 F는 비구형인 일반적인 활성탄[25]으로 본 연구에서 제조된 활성탄과 성능 비교를 위해서 제시한 것이다.

Table 1. Physical Properties of Prepared Activated Carbons and Reference

| Sample | KOH content [wt. ratio] | Specific surface area [m ² /g] | Average pore diameter [Å] | Total pore volume [mL/g] | Micro pore volume [mL/g] | Meso pore volume [ml/g] | Meso pore ratio [%] | Shape & poretype |
|--------|-------------------------|---|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|------------------|
| A | 1.0 | 875 | 39.49 | 0.864 | 0.307 | 0.557 | 64.47 | sphere/meso |
| B | 2.0 | 1075 | 33.20 | 0.892 | 0.380 | 0.512 | 57.39 | sphere/meso |
| C | 3.0 | 1112 | 34.95 | 0.972 | 0.406 | 0.565 | 58.13 | sphere/meso |
| D | 4.0 | 1213 | 32.91 | 0.998 | 0.442 | 0.556 | 55.71 | sphere/meso |
| E | 5.0 | 1354 | 30.09 | 1.019 | 0.479 | 0.540 | 52.99 | sphere/meso |
| F | - | 2096 | 20.71 | 0.952 | - | - | - | non sphere/micro |

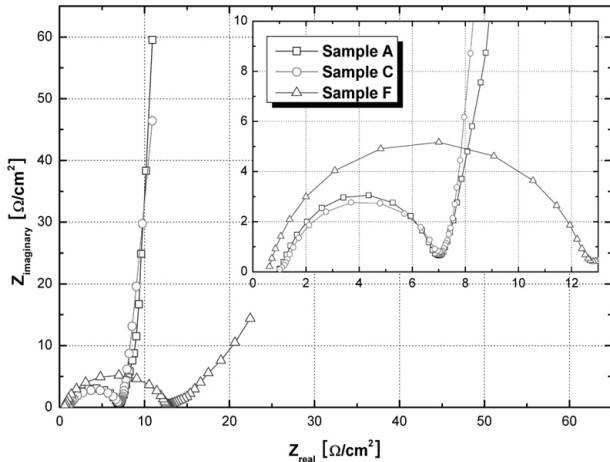


Figure 10. Nyquist polts of various EDLC with various activated carbons.

3.3. 제조된 활성탄의 EDLC에 적용

제조된 meso-pore구조의 미세구형 활성탄을 EDLC 전극물질로서의 적용시 성능을 조사하기 위해, 비구형 및 micro-pore구조의 활성탄을 사용한 경우와 함께 EDLC를 제작하여 impedance 및 CV 특성을 조사하였다. 이를 위해서 Table 1의 F에 나타낸 바와 같이 비표면적은 A ~ E에 비해 월등히 크지만 micro-pore 구조를 지니고 비구형인 활성탄과 본 연구에서 제조된 미세구형 활성탄 중 비표면적이 가장 적으나 meso-pore가 가장 발달된 A, 그리고 A보다 meso-pore구조 비율이 조금 낮으나 비표면적은 A보다 상대적으로 큰 C를 대상으로 활성탄의 형태적인 특성인 구형과 기공구조적인 특성인 meso-pore의 영향을 조사하였다. 그 결과는 Figures 10, 11 및 Table 2에 나타낸 바와 같다.

먼저 Figure 10은 상기 A, C 및 F시료를 대상으로 1 M LiClO₄/PC + DME (1:1) 전해질 용액을 사용하여 조립된 EDLC cell의 impedance 특성을 나타낸 것으로, 측정은 OCV에서 100 mHz ~ 100 kHz의 범위에서 이루어졌다. 이들의 물리적 특성과 상관관계를 살펴보면, 활성탄의 형상이 구형으로 됨에 따라, 또 같은 구형활성탄에서 meso-pore의 함량이 증가할수록 계면저항이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 효과는 Table 2에 나타낸 이들 경우의 전하전달저항(charge transfer resistance)의 값을 보면 구형과 meso-pore의 구조 특성을 지니고 있는 경우의 활성탄의 경우에 비해 1/2의 수준으로 감소하는 것으로 그 영향이 매우 큰 것으로 확인할 수 있었다.

Figure 11은 조립된 EDLC cell을 0~2 V의 범위에서 5 mV/s의 scan rate로 cyclic voltammetry 특성을 조사한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 활성탄 C의 경우 그 비표면적은 활성탄 F의 1/2의 수

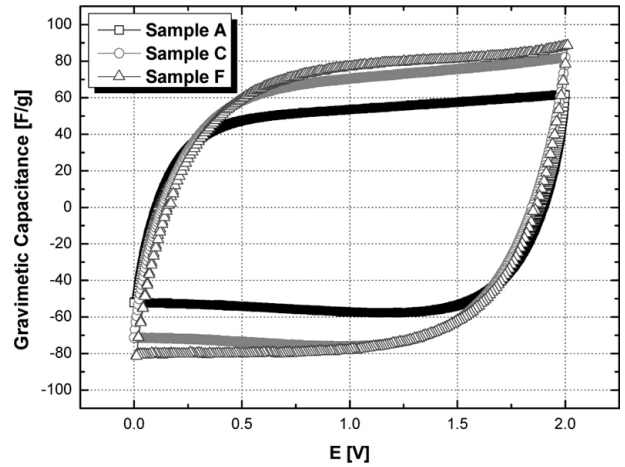


Figure 11. Cyclic voltammograms of various EDLC with various activated carbons.

Table 2. Electrochemical Performances of EDLC with Various Activated Carbons

| Sample | Charge transfer resistance [Ω/cm ²] | Discharge capacitance [F/g] | Rate capability [%] |
|--------|---|-----------------------------|---------------------|
| A | 6.09 | 53.6 | 82.8 |
| C | 6.18 | 77.6 | 77.1 |
| F | 12.18 | 77.0 | 762 |

준이지만 정전용량이나 충방전율 수용능력(rate capability)는 오히려 더 나은 결과를 보여주어 구형과 meso-pore 구조의 영향이 EDLC의 성능 개선에 뚜렷한 영향을 주고 있음을 보여주고 있다. 더욱이 조사된 3종의 활성탄 중 비표면적이 가장 작은 활성탄 A의 경우 낮은 비표면적으로 낮은 정전용량(반전지 기준으로 53.6 F/g)을 나타내고 있으나, Table 2에 나타낸 바와 같이 가장 높은 충방전율 수용능력을 나타내고 있어 활성탄의 구형과 meso-pore의 구조가 전극 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 영향 인자가 될 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 이상의 결과를 살펴보면, 미세구체형 mesopore 활성탄은 낮은 비표면적으로 인해 EDLC 전극물질으로서 단위중량당 정전용량은 낮아질 수도 있으나, 전하전달저항의 감소와 충방전율 수용능력의 증가에 매우 효과적인 영향을 주고 있음을 보여주는 바 meso-pore구조를 지닌 미세구형의 활성탄은, EDLC의 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 하나의 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

1) R-F 수지를 전구체로 사용하고 Co축매 하에 KOH를 활성화제로 하여 비표면적 875~1354 m²/g, 세공용적 0.57~1.02 cm³/g, micropore 부피 0.307~0.479 cm³/g, mesopore 부피 0.512~0.565 cm³/g, 평균세공경 30.09~39.49 Å으로 meso-pore 비율이 52~64.4%를 가지며 직경 2~10 μm의 미소구형 활성탄을 제조할 수 있었다.

2) 제조된 meso-pore 구조의 미세구형 활성탄은 1 M LiClO₄/PC + DME 전해질에서 반전지 기준으로 70 F/g 이상의 정전용량을 나타내어 EDLC 전극 물질로 사용가능하며, 또한 전하전달저항이 감소하고 충방전율 수용능력이 증가하는 효과를 제공하므로 EDLC의 성능향상을 위한 하나의 방법이 될 수 있음을 보여주었다.

감 사

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. T. Lee, J. H. Kim, and B. W. Cho, *Prospectives of Industrial Chemistry*, **2**, 16 (1999).
2. T. Osaka and M. Datta, *Energy Storage Systems for Electronics*, 521, Gordon and Breach Science Publishers, New York (2000).
3. M. Hahn, R. Kötz, R. Gallay, and A. Siggel, *Electrochimica Acta*, **52**, 1709 (2006).
4. N. Nanbu, T. Ebina, H. Uno, S. Ishizawa, and Y. Sasaki, *Electrochimica Acta*, **52**, 1763 (2006).
5. T. Osaka, X. Liu, and M. Nojima, *Journal of Power Sources*, **74**, 122 (1998).
6. H.-B. Gu, J.-U. Kim, H.-W. Song, G.-C. Park, and B.-K. Park, *Electrochimica Acta*, **45**, 1533 (2000).
7. B. Zhang, J. Liang, C. L. Xu, B. Q. Wei, D. B. Ruan, and D. H. Wu, *Materials Letters*, **51**, 539 (2001).
8. B.-J. Yoon, S.-H. Jeong, K.-H. Lee, H. S. Kim, C. G. Park, and J. H. Han, *Chemical Physics Letters*, **388**, 170 (2004).
9. S.-W. Hwang and S.-H. Hyun, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **347**, 238 (2004).
10. S. R. S. Prabaharan, R. Vimala, and Z. Zainal, *Journal of Power Sources*, **161**, 730 (2006).
11. S. Wen, M. Jung, O.-S. Joo, and S.-I. Mho, *Current Applied Physics*, **6**, 1012 (2006).
12. S. Mitani, S.-I. Lee, K. Saito, Y. Korai, and I. Mochida, *Electrochimica Acta*, **51**, 5487 (2006).
13. G. Liu, F. Kang, B. Li, Z. Huang, and X. Chuan, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **67**, 1186 (2006).
14. B. Fang, Y. Z. Wei, and M. Kumagai, *Journal of Power Sources*, **155**, 487 (2006).
15. K. Leitner, A. Lerf, M. Winter, J. O. Besenhard, S. Villar-Rodil, F. Suárez-García, A. Martínez-Alonso, and J. M. D. Tascón, *Journal of Power Sources*, **153**, 419 (2006).
16. G. Gryglewicz, J. Machnikowski, E. L. Grabowska, G. Lota, and E. Frackowiak, *Electrochimica Acta*, **50**, 1197 (2004).
17. C. Merino, P. Soto, E. Vilaplana-Ortego, J. M. Gomez de Salazar, F. Pico, and J. M. Rojo, *Carbon*, **43**, 551 (2005).
18. E. Raymundo-Piñero, K. Kierzek, J. Machnikowski, and F. Béguin, *Carbon*, **44**, 2498 (2006).
19. C. Lin and J. A. Ritter, *Carbon*, **35**, 1271 (1997).
20. H. Tamon, H. Ishizaka, T. Araki, and M. Okazaki, *Carbon*, **36**, 1257 (1998).
21. T. Hasegawa, S. R. Mukai, Y. Shirato, and H. Tamon, *Carbon*, **42**, 2573 (2004).
22. S.-J. Park and W.-Y. Jung, *Journal of Colloid and Interface Science*, **250**, 196 (2002).
23. H. Teng and S.-C. Wang, *Carbon*, **38**, 817 (2000).
24. J. Hayashi, A. Kazehaya, K. Muroyama, and A. P. Watkinson, *Carbon*, **38**, 1873 (2000).
25. J. K. Sun, M.S. Dissertation, Dankook University, Seoul, Korea (2001).