

# 전기이중층캐패시터에서 마이크로파에 의해 개질된 활성탄소전극의 전기화학적 특성

선진규\* · 엄익흠 · 이철태<sup>†</sup>

단국대학교 공학부 화학공학전공, \*한불화장품  
(2009년 7월 28일 접수, 2009년 10월 5일 채택)

## Electrochemical Characteristics of the Activated Carbon Electrode Modified with the Microwave Radiation in the Electric Double Layer Capacitor

Jin-Kyu Sun\*, Eui-Heum Um, and Chul-Tae Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi-do 448-701, Korea

\*R&D Center, Hanbul Cosmetics Co. Ltd., Chungbuk 369-834, Korea

(Received July 28, 2009; Accepted October 5, 2009)

유기용액계 전해질을 갖는 전기이중층캐패시터의 성능향상을 위해 마이크로파 처리를 통하여 활성탄소를 개질하고 이에 따른 전기화학적 특성의 변화를 조사하였다. 대상 시료로 petroleum cokes와 pitch cokes를 사용하여 NaOH 활성화에 의해 제조한 활성탄과 시판용 활성탄 BP-25를 사용하였다. 세 종류의 활성탄 모두 마이크로파 처리를 통해 산소를 포함하는 친수성관능기들이 표면으로부터 제거되었으며, 처리 시간이 증가함에 따라 비표면적과 세공부피는 감소하고, 평균세공직경은 증가하였다. 이러한 영향으로 표면 개질된 활성탄소로 제조한 전기이중층캐패시터는 계면저항이 개질하지 않은 활성탄소를 사용한 전기이중층 캐패시터에 비해 크게 감소하였으며, 비표면적의 감소에도 불구하고 방전용량은 개질하지 않은 경우보다 크게 증가하였다.

Modifying surface of activated carbon for the electrode of EDLC with an organic electrolyte was investigated to improve the electrochemical performance of EDLC by the microwave radiation. Three kinds of activated carbons, prepared activated carbon from petroleum cokes and pitch cokes and commercial activated carbon BP-25, were used for this study. For all investigated activated carbons, hydrophilic functional groups-containing oxygen disappeared from the surface of activated carbon as microwave radiation. And as microwave radiation time was increased, the specific surface area and total pore volume of activated carbons were reduced and average pore diameter were increased. From these effects, interfacial resistance of EDLC with the modified activated carbon electrode was drastically decreased, and discharge capacitance was increased although the specific surface area of activated carbon was reduced by this microwave radiation.

**Keywords:** activated carbon, electric double capacitor, microwave, modification

### 1. 서 론

전기이중층캐패시터(electric double layer capacitor)는 전지와는 달리 전하를 띤 입자의 이동 및 흡·탈착을 통해 전기에너지를 저장, 방출한다. 즉, 물리적 과정을 통해 에너지를 저장 및 방출한다. 따라서 반응속도가 빨라 출력밀도가 높고, 전극활물질이 화학적으로 반응하지 않아 사이클 수명이 매우 길다[1,2]. EDLC를 구성하는 중요한 요소 중 하나는 전극 물질이다. 이들 재료는 비표면적이 높아야 하며, 전기전도성이 크고, 전기화학적으로 안정하여야 한다. 현재 사용되고 있는 전극물질은 대부분 활성탄소이다. EDLC용 전극활물질로 사용되고 있는 활성탄소는 전구체 및 제조 방법에 따라 다양한 물리적 특성과 다공성 구조를 갖고 있으며, 이들의 물리적 특성과 전기화학적 특성의 상관관계를 조사하는 연구를 통해 EDLC의 용량을 극대화시킬 수 있는 다양한 방안들이 모색되고 있다[2-5].

일반적으로 활성탄소는 제조공정과 그 환경에서 표면에 산소를 포함한 관능기를 갖게 되며, 이것은 전극물질의 무게를 증가시키고, 특히 친수성 표면을 형성하여 유기전해질을 사용한 EDLC에서 용량감소를 수반하게 된다. 이러한 산소를 포함한 관능기는 고열처리로 제거가 가능하며, 활성탄소 표면이 소수성을 갖게 하여 유기전해질의 젖음을 용이하게 하므로 용량증가 효과를 갖게 한다[6]. 이와 같은 일반적인 고온열처리방법은 전기료를 이용하게 되는데, 온도구배가 심하고 처리시간이 길어 활성탄소의 비표면적이 많이 감소하며, 또한 세공의 크기가 불균일하게 되는 단점이 있다. 마이크로파로 고온열처리를 하면 이러한 단점들을 보완할 수 있다. 마이크로파 가열은 유전 가열을 이용하기 때문에 열이 가열물질 내부로부터 발생되므로 온도구배가 거의 없고, 순간적으로 열이 발생되므로 처리시간도 매우 짧아지며, 부가적으로 장치가 단순하며 처리비용이 저렴하다는 장점도 있다[7,8].

본 연구에서는 Petroleum cokes와 pitch cokes를 원료로 하여 제조된 고비표면적 활성탄을 마이크로파로 고온 가열하여 활성탄소 표면

<sup>†</sup> 교신저자 (e-mail: chult823@dankook.ac.kr)

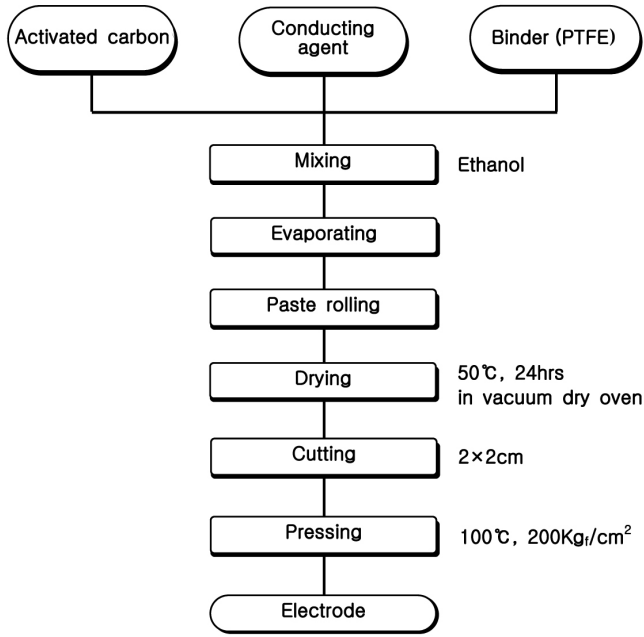


Figure 1. Flow diagram for the preparation of electrode.

의 산소를 포함한 관능기를 제거하여 표면 개질을 하였으며, 개질된 활성탄소의 표면특성, 비표면적, 평균세공경, 세공용적 등 물리적 특성을 조사하였다. 또한 개질된 활성탄소를 사용하여 제조한 전극과 유기액체 전해질로 구성된 유기액체 EDLC에서의 전기화학적 특성을 조사하여, 마이크로파를 이용한 개질이 활성탄소 전극의 전기화학적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

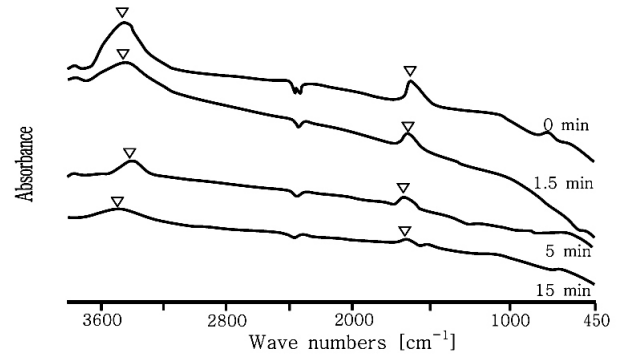
## 2. 실험

### 2.1. 시료

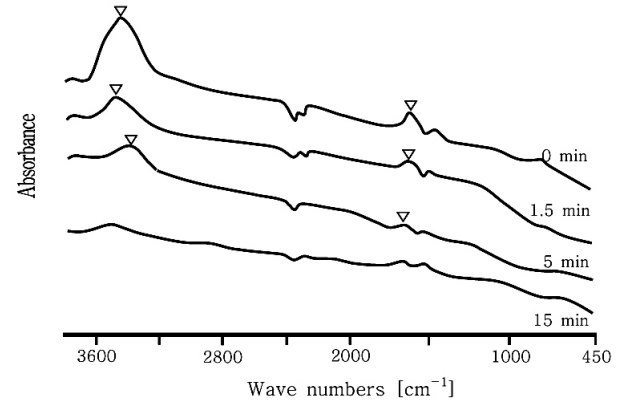
본 연구에서는 국내 모 정유사의 petroleum cokes와 pitch cokes를 사용하여 제조된 활성탄과 EDLC용으로 시판되는 활성탄소 BP-25의 세 종류의 활성탄을 사용하였다. Petroleum과 pitch coke로부터 활성탄을 제조한 공정은 일반적인 KOH 약품활성화법으로 간단히 요약하면 다음과 같다. KOH를 분쇄된 petroleum cokes와 pitch cokes에 4배 질량비로 하여 일정시간 동안 ball mill로 혼합하고 이것을 관형로에서 400 °C에서 1 h 동안 유지하여 불순물을 제거하고 및 KOH의 침적을 균일하게 하고, 활성화 온도 800 °C에서 1 h 동안 활성화하였다. 활성화 공정 동안 로 내부는 N<sub>2</sub>가스로 불활성 분위기 유지하였으며, 제조된 활성탄소에서 잔류 KOH를 제거하기 위해 pH가 약 7 정도가 되도록 증류수를 이용하여 여러 번 수세한 후 건조하여 사용하였다.

### 2.2. Microwave를 이용한 활성탄의 표면개질

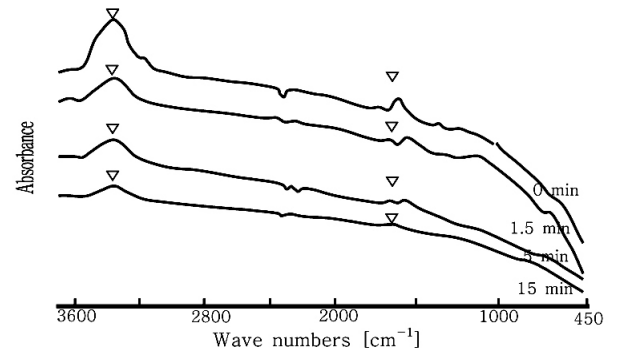
제조된 활성탄소와 시제품 활성탄소를 최대출력 700 W, 주파수 2450 MHz를 가진 microwave oven을 사용하여 개질하였다. 마이크로파 처리시 800 °C 이상의 고열이 생기기 때문에, 산소와 접촉하여 산화되는 것을 피하기 위해 불활성 분위기에서 개질하였으며, 처리시간은 1.5, 5, 15 min으로 하여 처리시간에 따른 활성탄소 표면의 특성 변화를 알아보았다. 표면 개질된 활성탄소는 ASP2010 (micromeritics)를 사용하여 N<sub>2</sub> 가스 흡·탈착방법으로 비표면적, 평균세공크기, 세공부피를 조사하였으며, FTIR-8501 (Shimadzu)로 표면 개질된 활



(a) PE-AC



(b) PI-AC



(c) BP-25

Figure 2. FT-IR spectra of the activated carbon and modified activated carbons according to microwave radiation time.

성탄소 표면의 관능기(functional group)를 조사하였다.

### 2.3. EDLC 전극 및 Cell 제조

표면 개질된 활성탄소들을 Figure 1과 같은 공정으로 EDLC 전극으로 제조하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 전극물질인 활성탄을 90 wt%, 도전제로 KJ-black을 10 wt%, binder로 PTFE (polytetrafluoroethylene) 5 wt%를 용매로 에탄올을 이용하여 점성이 생길 때까지 혼합한 후 rolling press를 이용하여 일정한 두께(150~250 μm)로 제조하였다. 제조된 얇은 판상의 전극은 80 °C 진공 건조기에서 24 h 동안 건조한 후 정사각형(2×2 cm) 모양으로 절단하여 current collector로 쓰인 Al-mesh에 100 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>로 압착하였다. Current collector에 압착한 두 개의 전극 사이의 separator로 cellquad<sup>®</sup> 3501을 사용하

었다. 안쪽이 고분자물질로 표면처리된 Al bag을 이용하여 cell을 제조하였으며 전해질을 충전한 후 Al bag 가장자리를 전기접착기로 접착하여 공기를 차단하였다. EDLC cell 제조의 모든 공정을 Ar 분위기의 glove box에서 진행하였다.

#### 2.4. 전기화학적 특성 조사

제조된 cell의 충방전 특성을 확인하기 위하여 충방전시험기에 cell을 연결하여 시험을 실시하였다. 시험조건은 정전류 충방전 시험으로 전류밀도를  $2 \text{ mA/cm}^2$ 로 하였으며  $0.001 \sim 2 \text{ V}$  전압범위에서 시험을 실시하였다. EDLC 전극의 계면저항을 조사하기 위하여 Solartron사의 SI1255 high frequency FRA (Frequency Response Analyser)를 이용하였으며  $10 \text{ MHz} \sim 100 \text{ KHz}$ 의 주파수범위에서 측정하였으며, Potentiostat/Galvanostat (EG&G ; 273A)을 이용하여  $5 \text{ mV/sec}$ 의 scan rate로  $2 \text{ V}$  범위 내에서 CV를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

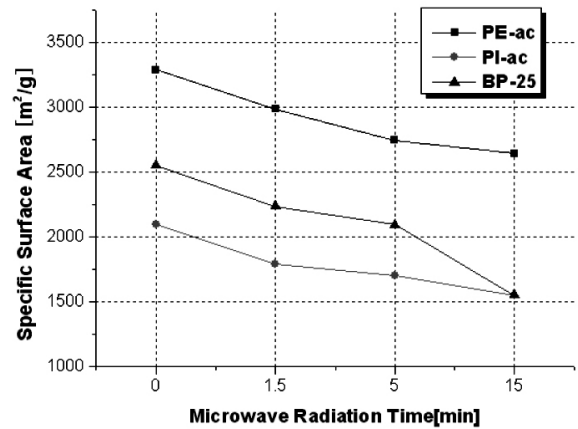
#### 3.1. FT-IR Spectrum과 기공 특성

Figure 2는 petroleum coke와 pitch cokes를 출발물질로 하여 제조한 활성탄과 BP-25를 마이크로파를 이용하여 표면처리하고, 그 처리시간에 따른 활성탄 표면의 변화를 FT-IR을 통해 확인한 것이다. Figure 2 및 이하의 내용에서 PE-AC는 petroleum coke로, PI-AC는 pitch coke로부터 제조된 활성탄이며, BP-25는 시판용 활성탄을 나타낸다. Figure 2에서 볼 수 있는 바와 같이 (a), (b), (c)의 경우 모두 마이크로파로 처리하지 않은 활성탄소에서는  $3400 \text{ cm}^{-1}$ 에서 OH 관능기를 나타내는 peak와  $1650 \text{ cm}^{-1}$ 에서 C=O 결합의 peak가 나타나는 반면, 마이크로파를 통하여 처리한 활성탄소는 이와 같은 산소와 결합을 갖는 관능기들을 나타내는 peak들의 intensity가 감소하였으며, 처리시간이 길어질수록 감소되는 폭도 증가하고 있다. 즉, 마이크로파 처리를 통하여 활성탄 표면에서 친수성을 띠는 관능기들을 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다.

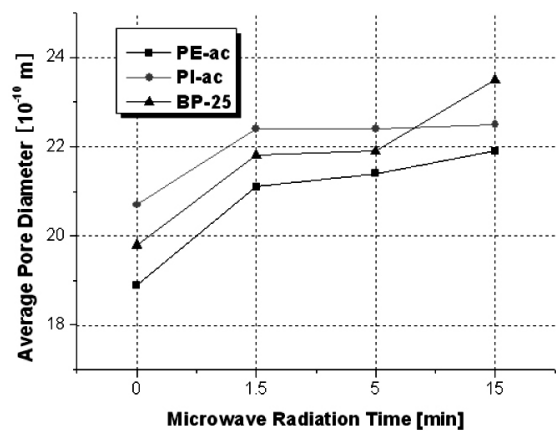
Figure 3은 각각의 활성탄소를 마이크로파로 표면 개질하였을 때 나타나는 기공 특성의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 세 가지 활성탄소가 공히 마이크로파 처리시간이 길어질수록 비표면적과 기공 부피는 감소하며, 평균세공직경은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 평균세공 직경이 증가됨에도 기공의 부피가 감소하는 현상은 마이크로파의 처리로 인해 세공이 커짐에 따라 세공벽의 두께는 감소하고 결국은 세공벽이 붕괴되어 세공이 합쳐서 전체 세공의 수가 감소한 것으로 유추되며, 이에 따라 비표면적도 감소되는 것으로 사료된다. 조사된 활성탄소들이 다공구조 변화의 근거는 각각의 활성탄소별 비표면적 및 기공부피의 감소율이 큰 것일수록 평균세공직경의 증가율이 커지는 경향성에 근거한다. 즉, 비표면적 감소율이 39%, 기공부피 감소율이 20%에 이르는 BP-25 활성탄의 경우 평균세공직경 증가율이 18.6%로 가장 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서, 이러한 결과는 마이크로파의 처리가 활성탄소의 다공구조 변화에 매우 커다란 영향을 미치고 있는 활성탄소 개질의 명백한 근거라고 볼 수 있으며, 또한 마이크로파를 처리한 활성탄을 사용하여 EDLC 전극으로 사용하는 경우 전기화학적 특성에 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

#### 3.2. Electrochemical Impedance Spectroscopy

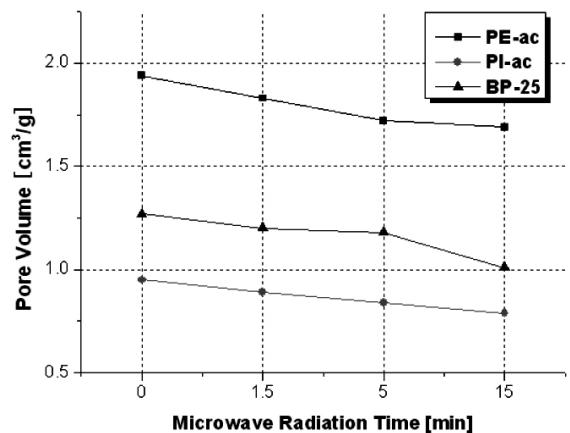
Figure 4는  $1 \text{ M LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1)을 전해질로 사용하고, 세



(a) Specific surface area vs. microwave radiation time



(b) Average pore diameter vs. microwave radiation time



(c) Pore volume vs. microwave radiation time

Figure 3. Effects of microwave radiation time on pore characteristics of activated carbons.

종류의 활성탄소를 대상으로 마이크로파를 처리하지 않은 경우와 마이크로파로 1.5, 5, 15 min의 시간변수로 마이크로파로 개질된 활성탄소로 제조된 전극으로 구성된 EDLC의 impedance를 측정된 결과이며, 측정은  $10 \text{ mHz} \sim 100 \text{ kHz}$ 의 주파수범위에서 이루어졌다. Figure 4(a)에서 보는 바와 같이 PE-AC의 경우 마이크로파로 개질된 경우가 마이크로파를 조사하지 않은 경우보다 계면 저항이 크게 감소하였음을 확인할 수 있으며 또한 마이크로파 처리시간이 길어질수록 계면 저항

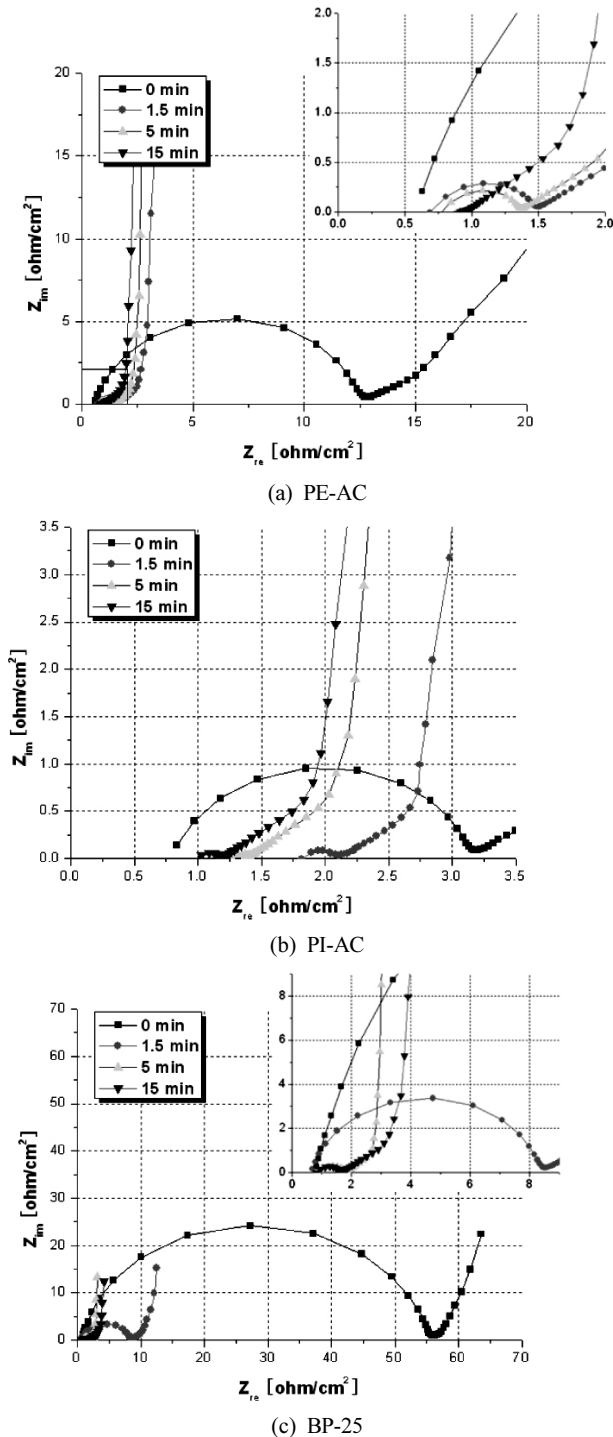


Figure 4. The Nyquist plot of electrodes prepared from activated carbon and modified activated carbon with microwave in EDLC cell using 1 M  $\text{LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1) as electrolyte.

의 감소가 증가하는 경향을 보였다. Figure 4(b)에 나타난 PI-AC의 경우 PE-AC의 경우보다 상대적으로 계면 저항이 컸으며, PE-AC와 마찬가지로 마이크로파 처리시간이 길어질수록 전해질과 계면 저항의 감소가 증가하는 경향을 보였다. BP-25의 경우도 Figure 4(c)에서 보는 바와 같이 다른 활성탄소의 경우와 마찬가지로 마이크로파를 조사하지 않은 BP-25활성탄의 경우에는 상대적으로 높은 계면 저항을 보

이고 있으나, 마이크로파로 개질한 BP-25활성탄의 경우에는 위의 PE-AC와 PI-AC의 경우에서와 같이 계면 저항의 감소를 보이고 있으며 마이크로파 처리시간이 길어질수록 전해질과 계면저항의 감소가 증가하는 경향도 같았다.

Figure 5는 1 M  $\text{LiPF}_6/\text{EC}+\text{EMC}+\text{DMC}$  (1 : 1 : 1) 전해질을 사용한 EDLC의 impedance를 측정한 결과이다. Figure 5에서 보는 바와 같이 1 M  $\text{LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1)을 전해질로 사용한 경우와 마찬가지로 마이크로파로 표면 개질된 경우가 개질하지 않은 경우보다 계면 저항이 크게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 마이크로파 처리시간이 길어질수록 계면 저항의 감소가 조금씩 증가하는 경향을 보였다.

이와 같은 impedance 시험 결과를 살펴보면, 각각의 활성탄소에 마이크로파를 조사하여 개질하였을 경우가 개질하지 않은 활성탄소의 경우보다 계면저항이 크게 감소함을 알 수 있다. 이것은 앞선 FT-IR 시험 결과를 근거로 하였을 때 활성탄소를 마이크로파 처리함으로써 활성탄소 표면의 산소를 포함한 관능기가 제거되고, 활성탄소의 다공 구조를 변화시키므로 이 마이크로파를 조사하여 개질된 활성탄소를 사용하여 제조한 유기전해질 전기이중층캐패시터의 계면저항을 감소시키는 결과를 초래하게 된 것으로 유추할 수 있다.

### 3.3. 충·방전 특성

Petroleum cokes와 Pitch cokes를 각각의 원료로 제조된 활성탄소와 시판되는 활성탄소 BP-25, 그리고 이것들을 마이크로파로 개질된 활성탄소를 전극물질로 사용하여 제조된 전극과 1 M  $\text{LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1), 1 M  $\text{LiPF}_6/\text{EC}+\text{EMC}+\text{DMC}$  (1 : 1 : 1)를 전해질로 EDLC cell을 제조하고, 전류밀도를 2  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 하여 2 V까지의 충·방전 특성을 확인하였다. Figure 6(a)는 1 M  $\text{LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1)을 사용하여 구성한 EDLC에서 마이크로파로 처리한 시간과 방전용량과의 상관관계를 나타내었다. Figure 6(a)에서 나타난 바와 같이 PE-AC와 PI-AC의 경우에는 마이크로파로 처리한 시간이 길어질수록 방전용량의 증가가 있었으며, 이것은 앞선 FT-IR 시험과 impedance 시험을 근거로 할 때 마이크로파로 개질되어 활성탄소 표면의 산소를 포함한 관능기가 제거됨으로써 계면 저항이 감소했기 때문이고, 처리시간이 길수록 산소를 포함한 관능기가 제거되는 양이 증가해서 계면 저항의 감소량도 증가했기 때문에 용량이 증가했다고 판단된다. 그리고, BP-25 활성탄소의 경우에는 마이크로파로 처리한 시간이 1.5 min, 5 min으로 증가할수록 방전용량이 증가하다가 처리시간 15 min에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 처리시간 5 min까지는 PE-AC와 PI-AC의 경우에서와 마찬가지로 마이크로파로 처리한 시간이 길어질수록 활성탄소 표면의 산소를 포함한 관능기의 제거되는 양이 증가하여 계면 저항의 감소량도 증가하고 따라서 방전용량도 증가하기 때문이다. 그러나 마이크로파 처리시간이 15 min인 경우에서 방전용량의 감소가 나타나는 것은 BET표면분석 결과에서 보듯 마이크로파 처리에 따른 비표면적의 감소가 너무 커져서 활성탄소 표면의 산소를 포함한 관능기의 제거로 인한 계면저항의 감소와 이에 의한 방전용량의 증가보다 더 큰 영향을 주었기 때문이라고 사료된다. 따라서, 마이크로파로 표면 개질할 경우 처리시간의 결정은 비표면적의 감소를 고려해야 함을 알 수 있다. Figure 6(b)는 1 M  $\text{LiPF}_6/\text{EC}+\text{EMC}+\text{DMC}$  (1 : 1 : 1) 전해질을 사용하여 같은 방법으로 전기이중층캐패시터를 제조하고 충방전 특성을 조사한 것이다. 그림에서 보듯이  $\text{LiClO}_4/\text{PC}+\text{DME}$  (1 : 1) 전해질을 사용하였을 경우와 유사한 방전용량 변화를 가졌다. PE-AC와 PI-AC의 경우 마이크로파의 처리시간 증가와 비례하여 방전용량이 증가하였으며, BP-25의 경우에서도 처리시간 5 min까지 방전용량

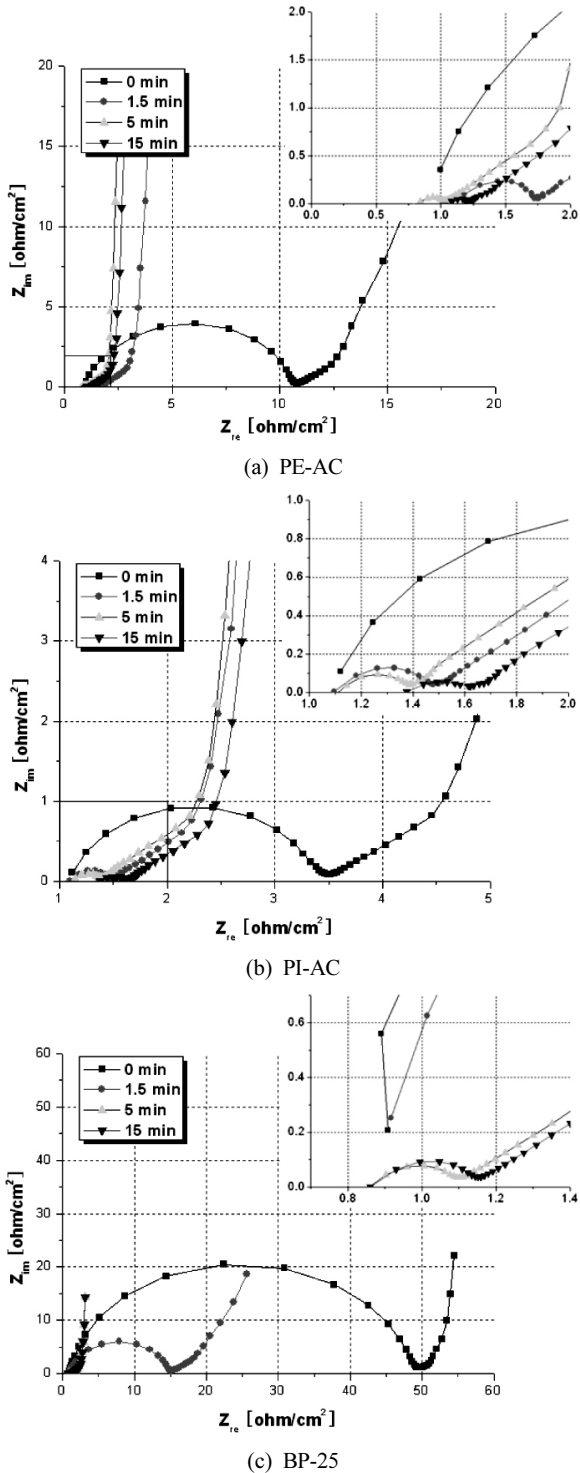


Figure 5. The Nyquist plot of electrodes prepared from activated carbon and modified activated carbon with microwave in EDLC cell using 1 M LiPF<sub>6</sub>/EC+EMC+DMC (1:1:1) as electrolyte.

이 증가하다가 15 min의 처리시간에서 감소가 일어났다. 마이크로파 처리를 함으로써 방전용량의 증가가 나타나는 것은 앞서 언급한 것과 같이 활성탄소 표면의 산소를 포함한 관능기가 제거됨으로써 전해질과 계면저항이 감소했기 때문이라고 유추되며, 또한 15 min 동안 마이크로파로 처리한 BP-25의 방전용량 감소는 활성탄소 표면 개질에

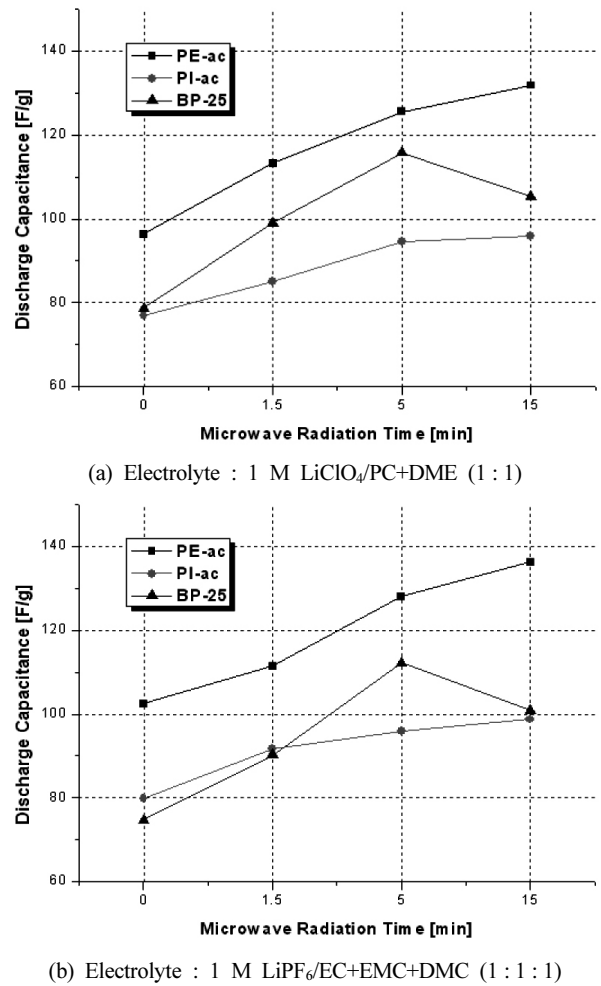
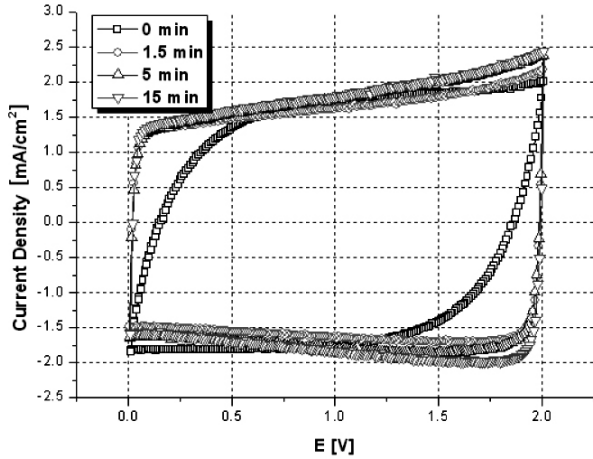


Figure 6. The relationship of discharge capacitance and microwave radiation time for the prepared EDLC cell at constant current density 0.2 mA/cm<sup>2</sup>.

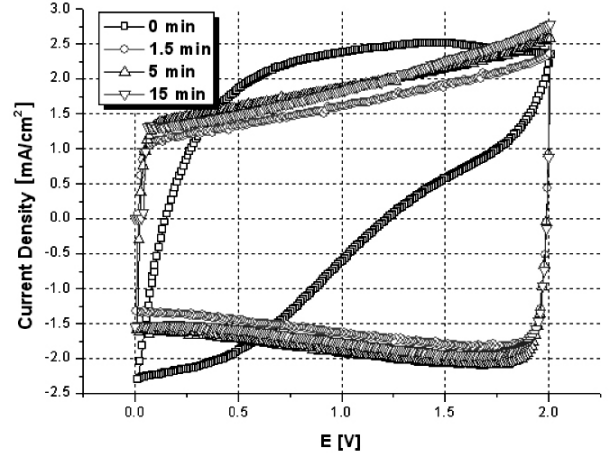
의한 방전용량의 증가보다 비표면적의 감소로 인한 방전용량의 감소가 더 큰 영향을 주었다고 생각된다. 서로 다른 유기질 전해질을 갖는 EDLC에서 서로 다른 다공구조를 갖는 활성탄소가 보여주는 상기와 같은 경향성은 유기액계 전해질을 갖는 EDLC의 경우 방전용량은 수용액 전해질을 갖는 EDLC의 방전용량이 활성탄소의 비표면적에 크게 의존하는 것과는 달리 활성탄소의 비표면적에만 전적으로 의존하는 것이 아니며 오히려 세공의 평균직경 등 활성탄소의 다공구조의 특성에 좌우함을 나타낸다. 이러한 결과는 유기액계 전해질을 갖는 EDLC의 방전용량이 활성탄소의 다공구조에 좌우한다고 보고한 기존의 연구[9-11]와 일치되는 결과라고 볼 수 있다.

#### 3.4. Cyclic Voltammetry

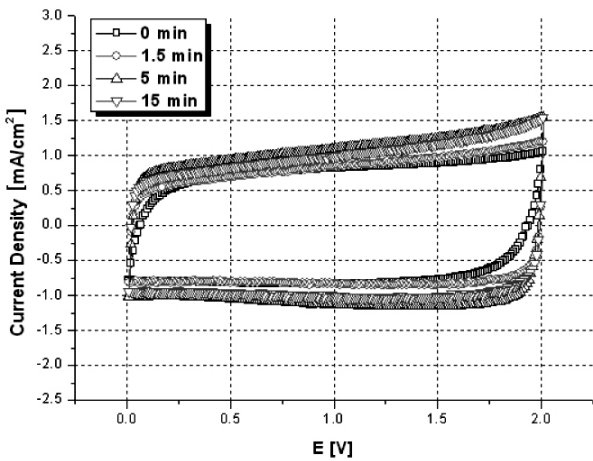
Figure 7과 8은 상기의 각각 다른 다공구조 특성을 가지며 마이크로파를 조사한 경우와 그렇지 않은 경우 활성탄소를 사용하여 전극을 만들고 여기에 1 M LiClO<sub>4</sub>/PC+DME (1:1), 1 M LiPF<sub>6</sub>/EC+EMC+DMC (1:1:1)의 각각 다른 유기전해질을 주입하여 구성한 EDLC의 cyclic voltammetry 특성을 나타낸 것이다. Scan rate를 5 mV/sec로 하였으며 2 V 이내에서 측정하였다. Figure 7과 8에서 보는 것처럼 조사된 세 가지 활성탄소에 대해 마이크로파로 개질하지 않은 활성탄소보



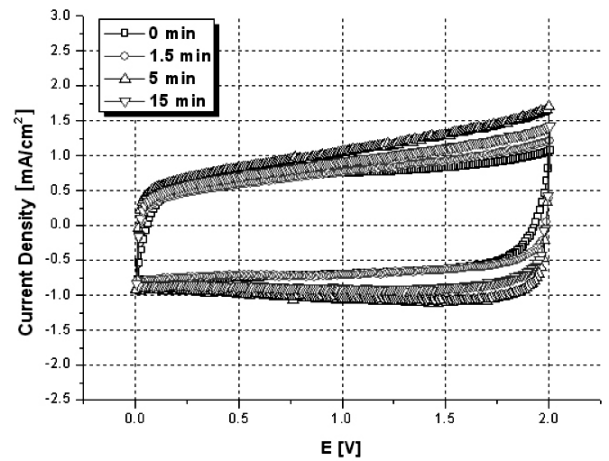
(a) PE-AC



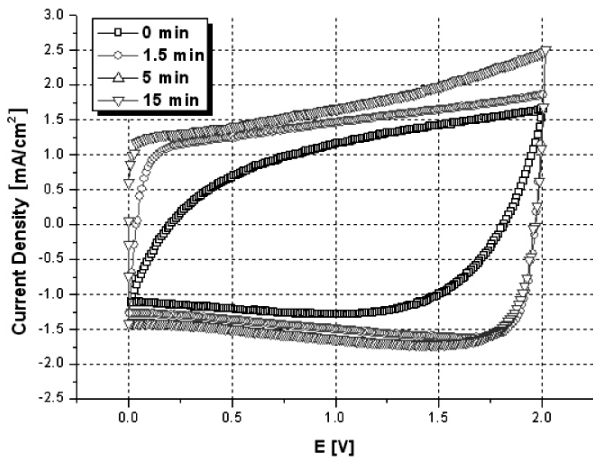
(a) PE-AC



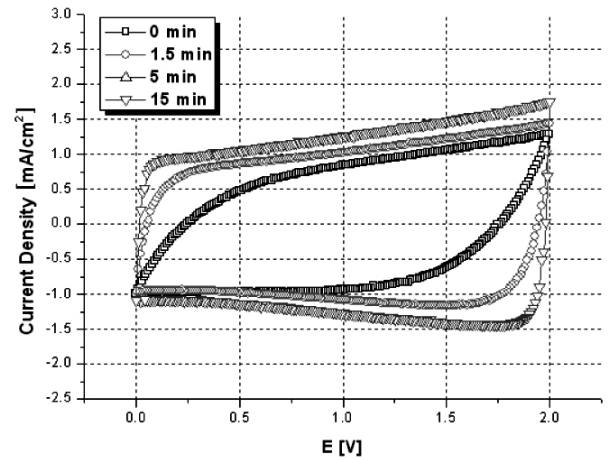
(b) PI-AC



(b) PI-AC



(c) BP-25



(c) BP-25

Figure 7. Cyclic voltammety of electrodes prepared from activated carbon and modified activated carbon with microwave in EDLC cell using 1 M LiClO<sub>4</sub>/PC+DME (1 : 1) as electrolyte.

다 마이크로파 개질된 활성탄소의 경우에서 높은 방전 용량과 큰 에너지밀도를 나타내며, 마이크로파 처리시간이 길어짐에 따라 방전용량과 에너지 밀도가 증가하는 전체적인 경향성을 나타내었다. 그러나 마이크로파의 조사시간에 따른 경우 BP-25 활성탄소의 경우는

Figure 8. Cyclic voltammety of electrodes prepared from activated carbon and modified activated carbon with microwave in EDLC cell using 1 M LiPF<sub>6</sub>/EC+EMC+DMC (1 : 1 : 1) as electrolyte.

PE-AC나 PI-AC와는 달리 조사시간이 일정시간 이상 경과하는 경우 방전용량 및 에너지 밀도가 감소하는 경향을 종류가 다른 유기전해질을 갖는 두 가지의 EDLC에서 공히 나타내었다. 이러한 결과는 사용되는 활성탄소의 종류에 따라 최상의 결과를 얻을 수 있는 마이크로

**Table 1. Discharge Capacitance and Energy Density according to Modification of Pore Structure of Various Activated Carbon by Microwave Radiation**

Sample	Microw. Radiation Time [min]	Specific Surface Area [m <sup>2</sup> /g]	Average pore diameter [Å]	Pore Volume [cm <sup>3</sup> /g]	Discharge Capacitance [F/g]		Energy density [Wh/kg]	
					Electrolyte A	Electrolyte B	Electrolyte A	Electrolyte B
PE-AC	0	3289	18.9	1.94	96.4	102.4	52.4	55.6
	1.5	2988	19.9	1.83	113.2	111.4	62.7	61.7
	5	2744	21.4	1.72	125.6	128	69.5	70.8
	15	2645	21.9	1.69	131.8	136.2	73.1	75.5
PI-AC	0	2096	20.7	0.95	77	79.8	42.5	44.1
	1.5	1793	22.3	0.89	85.2	91.6	47.2	50.8
	5	1701	22.4	0.84	94.6	95.9	52.5	53.1
	15	1547	22.7	0.79	96	98.7	53.2	54.7
BP-25AC	0	2552	19.8	1.27	78.8	74.8	42.2	40.4
	1.5	2239	21.8	1.2	99.1	90.2	52	49.3
	5	2096	21.9	1.18	115.8	112.2	62.7	62.1
	15	1552	23.5	1.01	105.3	100.9	58.4	55.9

\* Electrolyte A = 1 M LiClO<sub>4</sub>/PC+DME (1 : 1), Electrolyte B = 1 M LiPF<sub>6</sub>/EC+EMC+DMC (1 : 1 : 1)

파의 조사조건이 있음을 의미한다. Table 1은 마이크로파의 조사에 따른 방전용량 및 에너지밀도의 값들을 나타낸 것이다. Table 1에 나타난 바와 같이 방전용량의 경우는 마이크로파의 조사에 의해 유기전해질의 차이에 상관없이 활성탄소에 따라 차이는 있으나 적게는 23.7%로부터 많게는 50%에 이르기까지 획기적으로 증대하며 아울러 에너지밀도 또한 24%에서 53.7%까지 증가하는 획기적인 결과를 나타내었다. 이러한 결과들은 Figure 7과 8에서 보는 것 마이크로파로 조사된 활성탄소로 만든 EDLC의 CV 그래프가 이상적인 EDLC의 CV 그래프와 비슷하게 나타나며, 또한 처리시간이 길어짐에 따라 더욱 이상적인 EDLC의 CV 그래프에 접근하는 형태를 나타내고 있음과 무관하지 않다고 볼 수 있다. 그러므로 EDLC의 전극소재인 활성탄소에 마이크로파를 조사함으로써 상기와 같이 EDLC의 성능이 개선된 효과를 얻게 되는 것은 앞서 impedance 측정에서 언급한 바와 같이 마이크로파에 의해 활성탄소 표면층에 존재하는 관능기를 제거함으로써 활성탄소의 표면특성을 개질시키고 아울러 비표면적 또는 기공부피는 감소하지만 평균기공직경의 증가 등의 다공구조 변화에 근거한다고 볼 수 있다. 특히 상기의 결과는 유기전해질을 갖는 EDLC의 경우 그 성능은 활성탄소의 다공특성에 있어 비표면적보다는 기공의 크기가 더욱 큰 영향을 받음을 보여주는 것이라 할 수 있을 것이다. 결론적으로 활성탄소에 마이크로파의 조사 또는 그 처리는 유기계 전해질을 갖는 EDLC의 방전용량의 증가와 함께 전기화학적 특성을 개선시키는 효과가 큰 공정이라고 사료된다.

#### 4. 결 론

Petroleum cokes 및 pitch cokes로부터 KOH 활성화에 의해 제조된 활성탄소, 그리고 시판되는 BP-25 활성탄소를 대상으로 마이크로파 처리를 통하여 활성탄소 표면 개질한 활성탄을 유기전해질 전기이중층 캐패시터의 전극으로 사용한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 활성탄소에 마이크로파를 조사함으로써 활성탄소의 표면에 존재하는 친수성관능기들이 표면으로부터 제거되며 비표면적 및 세공부피는 감소하고, 평균세공직경의 증가 등 활성탄소의 다공구조가 변화된다.
- 2) 마이크로파의 처리 시간이 증가함에 따라 활성탄소의 비표면적과 세공부피는 감소하고, 평균세공직경은 증가하는 경향성을 보였다.

- 3) 마이크로파에 의해 개질한 활성탄소를 EDLC의 전극으로 사용한 경우 마이크로파를 조사하지 않은 활성탄소를 전극으로 사용한 EDLC에 비해 계면저항은 크게 감소하였으며, 비표면적의 감소에도 불구하고 방전용량 및 에너지밀도는 개질하지 않은 경우보다 오히려 크게 증가하였다.

- 4) 활성탄소에 마이크로파의 조사 또는 그 처리는 유기계 전해질을 갖는 EDLC의 방전용량의 증가와 함께 전기화학적 특성을 개선시키는 효과가 큰 공정기술이다.

#### 참 고 문 헌

1. C. T. Lee, J. H. Kim, and B. W. Cho, *Prospectives of Industrial Chemistry*, **2**, 16 (1999).
2. T. Weng and H. Teng, *Journal of Electrochemical Society*, **148**, 4 (2001).
3. C. J. Farahmandi and E. Blank, *Proceeding of The 4th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices*, Florida Education Seminar, Vol. 4 (1994).
4. I. Tanahashi, A. Yoshida, and A. Wishino, *Bull. Chem. Soc. Japan*, **63**, 2755 (1990).
5. A. Burke, *Journal of Power Sources*, **91**, 37 (2000).
6. B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors : Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (1994).
7. J. A. Menendez, E. M. Menendez, M. J. Iglesias, A. Garcia, and J. J. Pis, *Carbon*, **37**, 115 (1998).
8. B. W. Ricketts and C. Ton-That, *Journal of Power Sources*, **89**, 64 (2000).
9. B. Fang, Y. Z. Wei, and M. Kumagai, *Journal of Power Sources*, **155**, 487 (2006).
10. 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).
11. G. Gryglewicz, J. Machnikowski, E. L. Grabowska, G. Lota, and E. Frackowiak, *Electrochimica Acta*, **50**, 1197 (2004).