

## EDLC 전극용 메조기공 활성탄소 섬유의 전기화학적 특성

강채연 · 신윤성 · 이종대<sup>†</sup>

충북대학교 화학공학과  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410  
충북대학교 산업과학기술연구소  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410  
(2010년 7월 24일 접수, 2010년 8월 13일 채택)

## The Electrochemical Characteristics of Mesopore Active Carbon Fiber for EDLC Electrode

Chae Yoen Kang, Yun Sung Shin and Jong Dae Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Research Institute of Industrial Sci. & Tech., Chungbuk National Univ.,  
410 Sungbong-ro, Heungduk-gu, Chungju-si, Chungbuk 361-763, Korea  
(Received 24 July 2010; accepted 13 August 2010)

### 요 약

철 이온 교환방법에 의해 메조기공을 갖는 활성탄소 섬유(ACF)를 제조하고, 이를 사용하여 전기 이중층 커패시터(EDLC)의 전극소재 성능을 조사하였다. 질산처리에 의해 제조된 메조기공 ACF는 비표면적이 1,249, 664 m<sup>2</sup>/g이고, 메조 기공 분율이 70.6~81.3%이고, 평균 기공크기는 약 2.78~4.14 nm이다. 질산처리시간이 짧을수록 비표면적이 크고 메조 기공이 적게 발달됨을 알 수 있었다. 전기이중층 커패시터의 성능을 조사하기 위해서, 메조기공 ACF, 도전제, 바인더를 사용하여 단위 셀을 제조하였으며, 유기 전해질을 사용하였다. 2시간 질산으로 처리된 ACF의 비 축전량은 0.47 F/cm<sup>2</sup>이고, 20회 충방전 테스트에서 안정된 실험결과를 얻을 수 있었다. EDLC의 전기화학적 성능은 ACF 전극의 비표면적에 크게 영향을 받으며 메조기공은 전하의 확산저항을 감소시키는 것을 알 수 있었다.

**Abstract** – The electrode material performances of electric double layer capacitor(EDLC) were investigated using mesoporous active carbon fiber(ACF), which was prepared by the iron exchange method. The mesoporous ACF had pore characteristics of specific surface area around 1249, 664 m<sup>2</sup>/g, mesoporous fraction around 70.6~81.3% and meanpore size around 2.78~4.14 nm. The results showed that as HNO<sub>3</sub> treatment time decreased, the specific surface area increased and mesoporous fraction decreased. To investigate electrochemical performance of EDLC, unit cell was manufactured using mesoporous ACF, conducting material and binder; organic electrolyte was used on this experiment. The specific capacitance of ACF treated with HNO<sub>3</sub> for 2 hours turned out to be 0.47 F/cm<sup>2</sup> and the results of the cyclic charge-discharge tests were stable. Thus, the electrochemical performance of EDLC was mainly dependent on specific surface area of ACF electrode and the diffusion resistance of charge decreased as the mesopore increased.

Key words: Active Acrcbon Fiber, Mesopore, EDLC, Ion Exchange, Organic Electrolyte

### 1. 서 론

최근, 지구 온난화 방지를 위해 CO<sub>2</sub>발생량의 저감방안의 마련을 위하여 태양열 발전, 풍력발전, hybrid electric vehicle의 개발에 관련된 노력이 활발히 이루어지고 있으며, 급속한 정보화 사회의 형성에 따라 리튬 이차전지를 비롯한 고 용량 에너지 저장장치 등의 전지분야의 개발이 진행되고 있다. 이러한 개발을 위해서는 에너지의 지속성과 효율성에 있어서 보완되어야 할 점과 자체 특성상 지니고 있는 문제점이 있다. 태양열 발전 시스템이 효율적으로 작동되기 위해서

는 우수한 에너지 축적 저장장치가 필수적으로 요구되며, 휴대가 가능한 이동성 전자 시스템의 에너지원인 전지는 그 특성상 충방전 속도가 느리고 출력밀도가 낮은 단점이 있어 정밀한 고 신뢰성 시스템에서는 우수한 충전기능과 안정적인 에너지원이 필수적이다.

안정적인 전기에너지 저장장치로서 에너지 밀도와 출력밀도의 두 측면을 만족시킬 수 있는 에너지 저장 시스템이 요구되어 지고 있다. 이러한 목적을 위해 개발된 것이 슈퍼커패시터(Electrochemical capacitor)로 알려져 있는 초고용량 커패시터로 고출력 밀도 특성인 재래식 커패시터(Condensor)와 고에너지 밀도 특성을 갖는 이차전지의 중간 특성을 지닌 에너지 저장장치이다. 슈퍼커패시터의 한 종류인 전기이중층 커패시터(Electric double layer capacitor, EDLC)의 단위 전지는 적당한 다공성 물질로 된 분리막(separator)과 분리막에

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jdlee@chungbuk.ac.kr

<sup>‡</sup>이 논문은 충남대학교 유승곤 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

의해 분리된 양극과 음극의 전극 및 전하의 흐름통로인 집전체 (current collector) 그리고 전하 운반자(ions)를 제공하는 전해질로 구성되어 있다. 고체전극과 전해질 용액과 같이 두상의 계면에 있어서 정부의전하가 굉장히 짧은 거리를 두고 배열, 분포하는데 이러한 전하의 층이 전기 이중층이다[1].

EDLC에서 핵심을 이루는 기술은 분극성 물질을 사용하는 전극분야이다. 현재 EDLC의 전극물질로 대부분 활성탄이 사용되고 있는데, 이는 비표면적이 높고 전기전도도가 크며 전기화학적으로 안정하기 때문이다. 따라서 활성탄의 물성이 EDLC에 적합하도록 제조하는 것은 매우 중요한 일이며 이를 위한 다양한 방법들이 고안되어지고 있다[2-4].

EDLC의 전극물질인 활성탄의 비표면적과 기공구조는 EDLC의 전기화학적 성능에 직접적인 영향을 미친다. 이들의 상관관계를 밝히기 위하여 많은 연구들이 활발히 연구되고 있지만, 이에 대한 메커니즘이 아직도 명확하게 규명되지는 못하고 있다. 활성탄의 물리적 구조와 EDLC의 성능과의 관계를 조사한 최근의 연구 결과를 살펴보면, EDLC의 용량은 비표면적에 영향을 받지만, 비표면적이 일정수준 이상이 되면 더 이상 EDLC의 용량 증대에 영향을 미치지 않으며, 전체 기공 부피 중 일정량 이상의 메조기공은 전하의 확산저항을 줄여 EDLC 총방전 용량에 영향을 미친다는 보고가 있다[5-7]. 이는 높은 비표면적을 갖는 활성탄의 경우는 마이크로 기공이 발달한 구조를 가지고 있으며, EDLC의 전극 반응 시 이온반경이 수용성 전해질보다 큰 유기 전해질을 사용하는 경우 전하 흡착에 효율성이 감소할 수 있다. 따라서 활성탄의 비표면적과 기공구조를 조절하여 전기화학적 특성을 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다. 일반적으로 메조기공을 가진 활성탄을 제조하는 방법으로 고분자 블렌드 탄화법 [8], 촉매 활성화법[9-11], 졸-겔 활성화법[12], 템플레이트 탄화법 [13,14] 등이 연구되어지고 있다.

본 연구에서는 메조기공이 발달된 활성탄소 섬유를 제조하고, ACF의 비표면적과 기공특성이 EDLC의 전기화학적 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 촉매활성화법을 사용하여 질산처리 시간 변화하면서, 철 이온교환에 의한 메조기공을 가진 ACF를 제조하고 물성을 측정하였으며, 이에 따른 EDLC 전기화학적 성능과의 관계를 조사하여, 제조된 ACF가 슈퍼커패시터의 전극물질로서 가능성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 이온교환법 의한 메조활성탄소섬유 제조

본 연구에서는 메조기공을 가진 활성탄소섬유를 제조하기 위하여 MSP-20(2266 m<sup>2</sup>/g, Kansai Coke & Chem.)를 사용하였다. 메조기공을 형성하기 위하여 HNO<sub>3</sub>(60%, 덕산화학), Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O(98%, Aldrich)와 HCl(35%, 삼진화학)를 사용하였다. 철 이온교환법에 의한 메조기공 ACF를 제조하기 위한 실험방법으로는 ACF표면에 질산처리, 철이온교환, 열처리 고정화, 탈철 과정으로 진행했으며, Fig. 1에 도시하였다[9]. ACF의 표면을 개질하기 위하여 삼구 플라스크에 ACF 20 g당 질산용액 500 mL의 비율로 넣고 90~100 °C에서 여러 시간 동안 교반하면서 표면처리하였다. 질산처리 시간은 각각 2, 4시간으로 하였으며 표면 처리 후 잔류 질산을 제거하기 위하여 용액의 pH가 7이 될 때까지 수세하고 100 °C의 오븐에서 12시간 이상 건조하였다. 건조된 활성탄을 철 이온의 농도 3%의 질산철 수용액

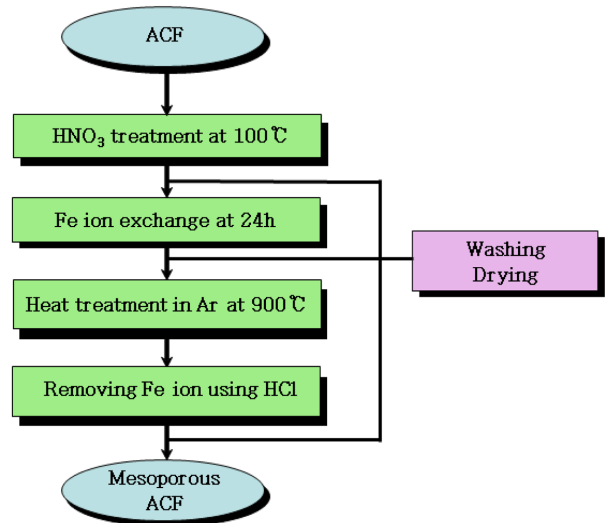


Fig. 1. Manufacturing procedure of mesoporous active carbon fiber.

에 넣고 완전히온 교환이 되도록 24시간 동안 교반시킨 다음 수세하고 100 °C의 오븐에서 12시간 이상 건조하였다. 이온 교환된 활성탄을 900 °C에서 2시간 동안 아르곤 분위기에서 열처리하여 철 이온을 고정화하였다. 열처리한 활성탄을 증류수/염산의 용액에 넣고 350 °C에서 30분 동안 가열하여 이온 교환되어 활성탄 내에 고정되었던 철 이온을 제거하였다.

제조된 메조기공 ACF의 비표면적과 기공특성을 N<sub>2</sub> 흡착시험을 통해 BET법으로 측정하였다. 제조된 활성탄의 표면 형태와 기공형태는 전자주사 현미경(TESCAN study-3), 탈철 과정의 철 이온 제거 여부는 XPS(ESCALAB 210)를 통하여 분석하였다.

### 2-2. EDLC의 제조 및 전기화학적 특성 분석

철 이온 교환 방법으로 제조된 ACF를 Fig. 2와 같은 공정으로 전기이중층 커패시터 전극을 제조하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 전극물질인 메조기공 ACF : 도전재 : 바인더 = 75 : 19 : 6의 비율로

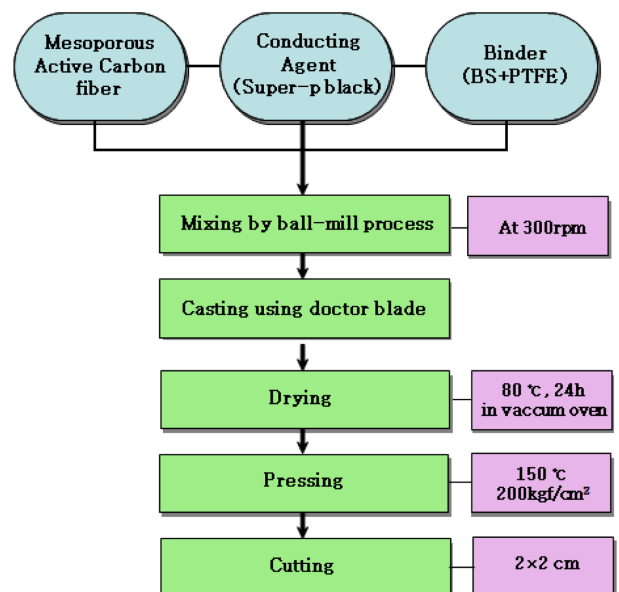


Fig. 2. Manufacturing procedure of electrode.

섞어 슬러리를 만든 후, 300 rpm의 속도로 균일하게 혼합한 후 집전체로 사용된 알루미늄 호일에 슬러리 코팅하여 전극을 제조하였다. 코팅된 전극은 80 °C에서 2시간 동안 건조시킨 후 2×2 cm<sup>2</sup>로 재단한 후 상온에서 150 °C, 200 kgf/cm<sup>2</sup>로 핫 프레스를 사용하여 일정한 두께(100 μm)를 갖도록 압착한 후, 80 °C의 진공건조기에서 24시간 건조시켰다.

전기 이중층 커패시터 단위 셀 제조의 모든 공정을 아르곤 분위기 하의 글러브 박스에서 진행하여 유기 전해질이 공기 중의 수분과 접촉하는 것을 방지하였다. 유기 전해질이 공기 중에 노출되어 수분과 접촉하면 단위전지의 충방전시 H<sub>2</sub>가스 발생 및 폭발 위험성이 있기 때문이다.

제조된 메조기공 ACF로 만들어진 EDLC의 전기화학적 특성은 WBCS 3000 Battery Cycler(Won A Tech)를 이용하여 측정하였다. 충방전 테스트에서 운전조건은 0~2.5V까지 일정한 전류로 충전한 후 2.5 V에서 동일한 전류로 30분 동안 유지시키고 다시 일정한 전류로 방전을 시켰다. 또한 20회 사이클 충방전 테스트를 하여 안정성을 실험하였다. 순환 전압 전류 테스트는 전극과 전해액의 계면에 주기적인 전압을 가하여 이때 발생하는 전류변화를 관찰하는 전기화학적 실험으로 구동전압을 0~2.5 V로 하고 5 m, 10, 15, 20 mV/s의 스캔 속도로 WBCS 3000 Battery Cycler를 이용하여 측정하였다. 누설 전류 실험은 WBCS 3000 Battery Cycler를 이용하여 2.5 V까지 1 mA의 일정한 전류로 충전한 후 2.5 V의 정전압 충전 시 전류 값의 변화를 10시간 동안 측정하였다

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 제조된 메조기공 ACF의 물리적 특성

질산처리 시간에 따라 활성탄소 함유를 표면 개질한 후 철 이온교환을 하고 열처리를 하여 제조한 메조기공을 활성탄소함유의 비표면적, 기공 부피, 메조기공 분율, 평균 기공 크기를 Table 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 2시간, 4시간 질산처리하여, 철 이온 교환법으로 제조한 활성탄소함유는 각각 비표면적은 1,249에서 664 m<sup>2</sup>/g, 기공 부피는 0.55, 0.45로 감소한 반면에, 메조기공 분율은 70.6, 81.3%, 평균기공 크기는 2.78에서 4.14 nm로 증가한 결과를 보였다. 질산처리를 하여 ACF 표면에 산소 복합체인 -COOH가 생성시키고, 철 이온 교환을 효과적으로 일어나게 한 다음, 열처리하여 탄소 매트릭스 위에 철이온을 고정화한 후, 염산을 사용한 이온제거 과정에서 pitting 작용에 의하여 메조기공이 생성되는 것으로 알려져 있다[15]. 따라서 질산 처리시간이 증가하면 철 이온교환 량이 많아지고 이에 따라 메조기공이 발달된다. 이온 교환법에 의해 제조된 ACF는 마이크로 기공부피가 크게 줄어든 반면에 메조기공 부피는 크게 차이가 없음을 알 수 있었다. N<sub>2</sub> 흡-탈착 등온곡선과 BJH식으로 기공 크기 분포를 계산한 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3에서는 원료 활성탄소함유의 경우에는 마이크로 기공이 발달한 Type I의 Langmuir N<sub>2</sub> 흡-탈착 등온곡선을 나타내었고, 철 이온교환 방법으로 메조기공을 제조한 활성탄소 함유의 경우 모두 흡착 량 증가에

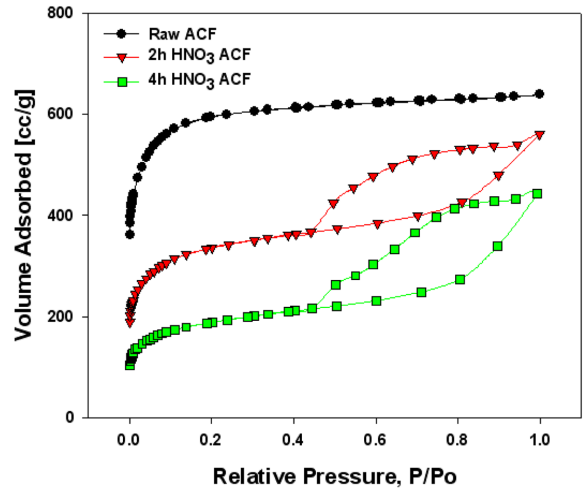


Fig. 3. Isotherm curve of HNO<sub>3</sub> treatment of active carbon fiber.

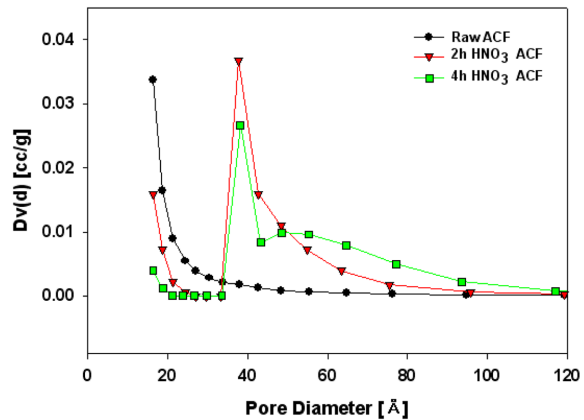


Fig. 4. BJH pore size distribution of HNO<sub>3</sub> treatment of active carbon fiber.

따른 메조기공의 모세관 응축현상에 의해 상대압력(P/P<sub>0</sub>)이 0.45~1.0 사이에서의 hysteresis loop 상의 급격한 흡착량 변화를 나타낸 메조기공 크기를 갖는 전형적인 Type IV의 등온곡선을 관찰할 수 있었다[16,17]. 마이크로 및 메조기공 크기 분포를 BJH식으로 계산한 기공 크기 그림에서는 원료 활성탄소함유의 경우에는 2 nm 이하의 크기를 갖는 마이크로 기공이 많이 발달하였고 질산처리에 따른 철 이온교환방법에 의해 제조된 활성탄소 함유는 2~10 nm의 메조기공이 발달한 것을 관찰하였다.

표면 개질 된 활성탄소함유 특성을 SEM과 EDS image를 사용하여 조사하였다. Lee등[9]의 연구에서 보고된 바와 같이 Fig. 1에서와 같은 과정에서 질산처리 후 표면에 산소 그룹(carboxylic, -COOH)의 생성을 나타내는 산소 피크와, 철 이온교환으로 -COOFe가 활성탄소함유 표면에 생성된 것을 알 수 있는 Fe 피크를 확인할 수 있었다. 탈착 과정으로 활성탄 표면의 있던 -COOFe가 떨어져 나감으로 인하여 Fe 피크가 사라진 결과와 충분히 수세하여 활성탄소함유 표면에 잔류물질에 대한 제거가 효과적으로 되었음을 Table 2와 같

Table 1. Pore characteristics of mesoporous active carbon fiber

ACF	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	V <sub>mic</sub> (cc/g)	V <sub>mes</sub> (cc/g)	V <sub>total</sub> (cc/g)	Mesopore fraction (%)	Mean pore size (nm)
Raw	2266	0.72	0.12	0.84	14.3	1.50
2h HNO <sub>3</sub>	1249	0.23	0.55	0.78	70.6	2.78
4h HNO <sub>3</sub>	664	0.10	0.45	0.56	81.3	4.14

Table 2. XPS analysis of mesoporous ACF

HNO <sub>3</sub> treatment time	Fe ion exchange time	atomic percent (%)		
		C	O	Fe
2h	24h	92.30	7.70	0
4h	24h	92.14	7.86	0

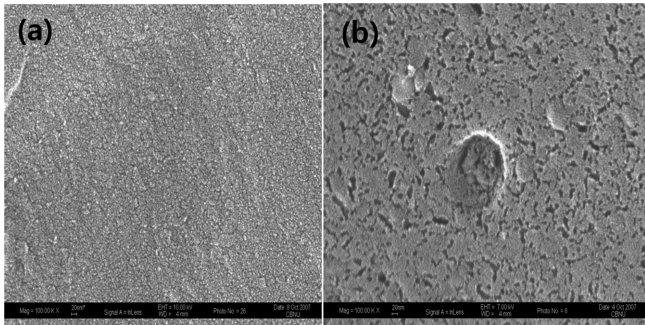


Fig. 5. FE-SEM image of active carbon fiber (a) raw ACF, (b) prepared mesoporous ACF.

이 XPS 분석을 통하여 알 수 있었다. 표면 개질 된 활성탄소 섬유의 FE-SEM 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 원료 ACF(a) 표면에 메조기공을 확인할 수 없지만, 철 이온 교환방법에 의해 제조된 메조기공을 갖는 ACF(b)의 표면에선 2~10 nm의 크기를 갖는 메조기공이 발달됨을 확인할 수 있었다.

### 3-2. EDLC의 전기화학적 특성

EDLC의 성능을 평가하기 위해 전기화학적 분석기법으로 정전류 충방전 시험을 사용하여 평가하였다. EDLC는  $dV/dt$ 가 일정하므로, 따라서 정전용량(capacitance) 및 에너지밀도를 전압-시간 분포에서 간단히 구할 수 있다.

$$C = i \frac{dt}{AdV} = \frac{i\Delta t}{A\Delta V} \quad (1)$$

여기서  $C[F/cm^2]$ 는 단위 면적당 정전용량이며,  $i[A]$ 는 전류,  $A[cm^2]$ 는 전극물질의 면적이다. 제조된 메조기공을 가진 ACF를 전극으로 사용하여 제조한 EDLC의 단위 전지의 충방전 특성을 Fig. 6, 7에

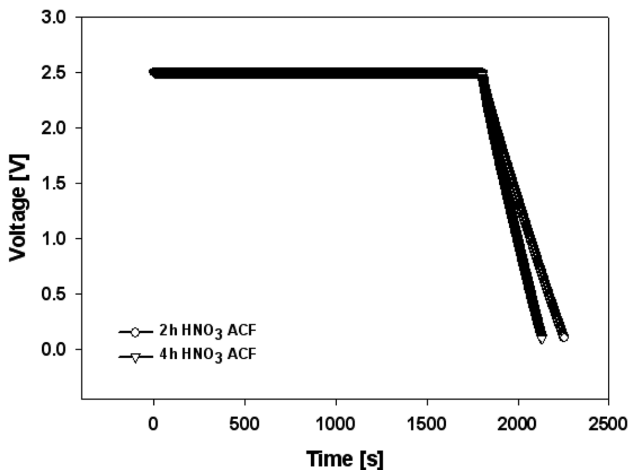


Fig. 6. Charge-discharge curves of EDLC using different carbon electrode.

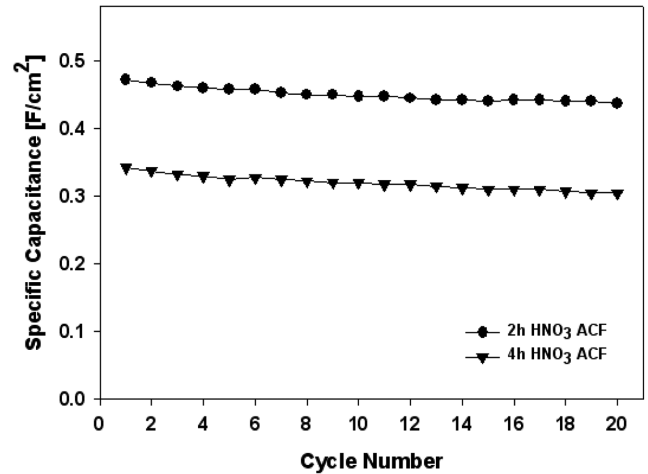


Fig. 7. Cycle performances of EDLC using different carbon electrode.

나타내었다. 충전과 방전 시 구동전압은 0.1~2.5 V이고, 2.5 V에 도달하면 전지에 과 충전을 방지하기 위해 일정 전압 모드에서 실험을 수행하였고 충전과정과 방전과정 사이에 5분 정도의 휴지시간을 두어 급격한 전위변화에 대한 전지의 불안정성을 최소화하면서 20 사이클 동안의 충방전 테스트를 하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 방전특성은 2시간 동안 질산처리 한 ACF를 가지고 만든 단위전지는 0.47 F/cm<sup>2</sup>으로서 4시간 동안 질산처리하여 제조된 ACF보다 상대적으로 우수하게 나왔다. 표 1에서 보는 바와 같이 비표면적과 기공부피가 차이가 나 충전용량에서 차이가 나는 것으로 생각되고, 4시간 질산 처리 시 비표면적의 큰 차이에도 불구하고 충전용량이 0.34 F/cm<sup>2</sup>로 크게 차이가 나지 않은 메조기공의 발달에 의한 전하의 확산저항의 감소 때문인 것 같다. 또한 2×2 cm<sup>2</sup>인 100 μm 두께의 전극의 무게를 측정하여 비충전용량(Specific capacitance, F/g)을 구한 결과 2시간, 4시간 질산 처리한 각각의 경우 172, 125 F/g의 값을 구하였다. 그러나 실험적으로 전류 집전체로 사용되는 알루미늄 호일에 코팅되는 전극물질의 양이 적기 때문에 질량의 작은 측정편차가 비충전용량의 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 3부분의 두께를 측정하여 실험적 오차를 감소시키는 단위 면적당 충전량이 신뢰성이 큰 것으로 생각된다. 20 사이클 테스트 실험에서 EDLC 성능 효율은 질산처리 2시간, 4시간하여 제조된 ACF를 전극물질로 사용하였을 때 93, 90% 정도로 다른 마이크로 기공이 발달된 ACF 전극에 비해 장기 안정성 테스트에서 우수한 것으로 나타났다. 이는 적절한 양의 메조기공의 존재가 충방전 시 전극 내에서 전하의 물질전달을 향상시킬 수 있고 이 때문에 안정성이 증가한다고 생각한다.

제조된 메조기공을 가진 ACF 전극 중에서 충방전 특성이 좋은 2시간 질산처리한 ACF를 사용하여 단위전지를 구성하고 Cyclic voltammetry 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 순환 전압 전류시험은 모두 0~2.5 V의 범위에서 5, 10, 15, 20 mV/s의 주사 속도로 이루어졌다. 이상적인 순환 전압 전류곡선 형태가 직사각형이지만 충방전 시 전하들의 전극 기공내의 확산저항으로 인해 이러한 형태에서 벗어나고 있음을 그림에서 보여주고 있다. 또한 EDLC에서 두 평탄전위 사이의 거리는 축전용량을 의미하고 EDLC 순환전압전류 곡선의 경우 단위전지는 전압에 무관하게 축전용량이 일정하므로 아래 식에 의해 설명될 수 있다.

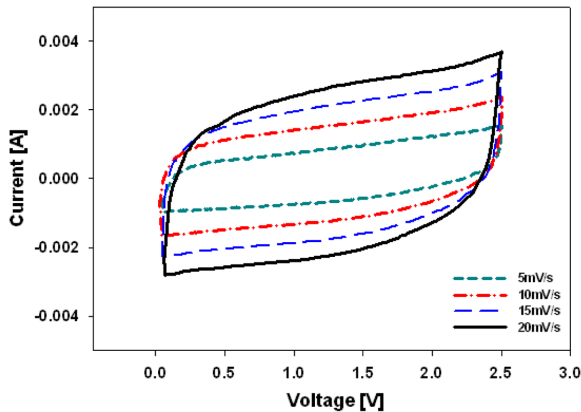


Fig. 8. Cyclic voltammogram for EDLC of using  $\text{HNO}_3$  treatment of ACF electrode.

$$i = C_{dl} \cdot dV/dt \quad (2)$$

여기서  $C_{dl}$ 는 전극면적당 비축전용량이고,  $dv/dt$ 는 일정한 상수이다.

제조된 메조기공을 갖는 활성탄소섬유를 전극물질로 한 EDLC용 단위전지를 완전히 정 전류로 충전한 후 정전압 상태로 누설전류 (leakage current) 값을 측정하였다. 동일시간을 기준으로 할 때 2시간, 4시간 질산처리한 ACF를 전극으로 한 전기 이중층 커패시터에서 각각  $29.7 \mu\text{A}$ 와  $21.7 \mu\text{A}$ 의 누설전류 값이 측정되었다. 누설전류 값은 전해질-전극 활물질 사이의 계면저항에 영향을 미치므로, 메조기공이 더 발달된 4시간 질산처리한 ACF가 저항 면에서 다소 우수한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철 이온 교환법에 의해 제조된 메조기공이 발달된 활성탄소섬유를 전극물질로 사용하여 전기이중층 커패시터(EDLC)의 특성을 조사하였다. 활성탄소섬유를 질산으로 표면처리하고 철 이온교환을 함으로서 메조기공이 발달시킨 후, 활성탄소섬유의 비표면적, 기공부피, 평균기공크기 등의 물리적 특성의 변화를 조사한 결과 2시간, 4시간으로 질산 처리한 경우 각각 비표면적은  $1249, 664 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 감소하고 평균기공크기는  $2.78, 4.14 \text{ nm}$ 로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 질산처리 시간에 따른 제조된 활성탄소섬유전극의 전기화학적 충-방전 특성은 각각  $0.47 \text{ F}/\text{cm}^2, 0.34 \text{ F}/\text{cm}^2$ 로 비표면적에 크게 영향을 받을 수 있었고 메조기공이 발달됨에 따라 전극과 계면의 전하저항이 감소되어 장기 안정성 향상과 누설전류의 감소를 가져 오는 것을 확인하였다.

#### 감 사

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- Osaka, T. and Datta, M., *Energy storage systems for electronics*, Gordon and Breach Science Publishers(2000).

- Prabaharan, S. R. S., Vimala, R. and Zainal, Z., "Nanostructured Mesoporous Carbon as Electrodes for Supercapacitors," *J. Power sources*, **161**, 730-736(2006).
- Mitani, S., Lee, S. I., Saito, K., Korai, Y. and Mochida, I., "Contrast Structure and EDLC Performances of Activated Spherical Carbons with Medium and Large Surface Areas," *Electrochimica Acta*, **51**, 5487-5493(2006).
- Fang, B., Wei, Y. Z. and Kumagai, M., "Modified Carbon Materials for High-rate EDLCs Application," *J. Power Sources*, **155**, 487-491(2006).
- Gryglewicz, G., Machilkowski, J., Lorenc-Grabowska, E., Lota, G. and Frackowiak, E., "Effect of Pore Size Distribution of Coal-based Activated Carbons on Double Layer Capacitance," *Electrochimica Acta*, **50**, 1197-1206(2005).
- Barbieri, O., Hahn, M., Herzog, A. and Kotz, R., "Capacitance Limits of High Surface Area Activated Carbons for Double Layer Capacitors," *Carbon*, **43**, 1303-1310(2005).
- Alonso, A., Ruiz, V., Blanco, C., Santamaria, R., Granda, M., Menendez, R. and de Jager, S. G. E., "Activated Carbon Produced from Sasol-Lurgi Gasifier Pitch and Its Application as Electrodes in Supercapacitors," *Carbon*, **44**, 441-446(2006).
- Ozaki, J., Endo, N., Ohizumi, W., Igarashi, K., Nakahara, M. and Oya, A., "Novel Preparation Method for the Production of Mesoporous Carbon Fiber from a Polymer Blend," *Carbon*, **35**(7), 1031-1033(1997).
- Kang, C. Y., Kang, M. G. and Lee, J. D., "Preparation of Mesoporous Carbon Using Ion Exchange," *J. Korean oil chem. Soc.*, **26**, 328-334(2009).
- Sutherland, I., Sheng, E., Bradley, R. H. and Freakley, P. K., "Effects of Ozone Oxidation on Carbon Black Surfaces," *J. Mater. Sci.*, **31**(21), 5651-5655(1996).
- Sing, K. S. W., "Reporting Physisorption Data for Gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity," *Pure and Appl. Chem.*, **54**(11) 2201-2218(1982).
- Tamon, H., Ishizaka, H., Araki, T. and Okazaki, M., "Control of Mesoporous Structure of Organic and Carbon Aerogels," *Carbon*, **36**, 1257-1262(1998).
- Li, L., Song, H. and Chen, X., "Ordered Mesoporous Carbons from the Carbonization of Sulfuric-acid-treated Silica/triblock Copolymer/sucrose Composites," *Microporous Mesoporous Mater.*, **94**, 9-14(2006).
- Li, L., Song, H. and Chen, X., "Pore Characteristics and Electrochemical Performance of Ordered Mesoporous Carbons for Electric Double-layer Capacitors," *Electrochimica Acta*, **51**, 5715-5720(2006).
- Tomita, A., Yuhki, Y., Higashiyama, K., Takarada, T. and Tamai, Y., *Nenryo Kyokaishi(J. Fuel Soc. Jpn.)*, **64**, 402-408(1985).
- Li, H., Xi, H., Zhu, S., Wen, Z. and Wang, R., "Preparation, Structural Characterization, and Electrochemical Properties of Chemically Modified Mesoporous Carbon," *Microporous Mesoporous Mater.*, **96**, 357-362(2006).
- Karadikar, P., Patil, K. R., Mitra, A., Kakade, B. and Chandwadkar, A. J., "Synthesis and Characterization of Mesoporous Carbon Through Inexpensive Mesoporous Silica as Template," *Microporous Mesoporous Mater.*, **98**, 189-199(2007).