

EDLC용 Carbon-PTFE 전극의 제조 및 전기화학적 특성

Preparation and Electrochemical Performance of Carbon-PTFE Electrode for Electric Double Layer Capacitor

김익준^{1,a}, 이선영¹, 문성인¹
(Ick-Jun Kim^{1,a}, Sun-Young Lee¹, and Seong-In Moon¹)

Abstract

This work describes the effect of the number of roll pressing and the composition of carbon black on the electric and mechanical properties of carbon-PTFE electrode, in which composition is MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%. It was found that the best electric and mechanical properties were obtained for sheet electrode roll pressed about 15 times and for sheet electrode, in which composition is MSP20 : carbon black : PTFE = 80 : 15 : 5 wt.%. These behaviors could be explained by the network structure of PTFE fibrils and conducting paths linked with carbon blacks, respectively. On the other hand, cell capacitor using the sheet electrode with 15 wt.% of carbon black attached on aluminum current collector with the electric conductive adhesive, in composition is carbon black : CMC = 70 : 30 wt.%, has exhibited the best rate capability between 0.5 mA/cm²~100 mA/cm² current density and the lowest ESR.

Key Words : EDLC, Activated carbon, PTFE, Capacitance, Resistivity, Rate capability

1. 서 론

전기이중층 커패시터는 전지와는 달리 충방전 특성이 이온들의 활성탄소 표면에서의 물리적인 흡착·탈착에 기인하는 것으로, 많은 에너지를 모아두었다가 수 초 또는 수십 초 동안에 높은 출력의 에너지를 발산하고 높은 충방전 효율, 장수명 등의 특성을 가지고 있다[1-5]. 전기이중층 커패시터는 휴대통신기기 및 가전제품의 메모리 백업용에서 최근에는 군사용, 의료용 및 하이브리드 전기자동차 (HEV) 등의 고부가 장비의 대출력 펄스 파워의 주전원 및 보조전원으로 사용될 것이 기대된다. 실제로 2002년 6월에 닛산 (Nissan) 디젤이 개발하고 판매 중인 커패시터 하이브리드 트럭 및

동년 12월에 혼다 (Honda)에서 출시한 연료전지승용차 Honda FCX에 커패시터를 장착하고 있고, 향후 전기자동차의 ISG용으로 커패시터가 채택될 경우 커패시터에 대한 수요는 기하급수적으로 증가할 것으로 예측되고 있다[6].

최근의 전기이중층 커패시터에 관한 연구는 이러한 수요를 충족시키기 위해 높은 용량과 출력특성을 동시에 개선시키기 위한 연구에 중점을 두고 있다. 전기이중층 커패시터는 활성탄소, 바인더 및 도전재로 구성된 전극과 전해액 및 조립기술에 따라 특성이 좌우되고, 특히 전극의 제조방법과 성분들에 많은 영향을 받는다. 전기이중층 커패시터의 용량을 증가시키기 위해서는 비표면적이 큰 활성탄소를 사용하여야 하나 비표면적이 2000 m²/g 이상인 활성탄소는 micro pore (~1 nm 이하)가 차지하는 비율이 많으므로, 이온들의 pore 저항이 크고 전기이중층 커패시터의 출력특성을 저하시키는 결과를 가져온다[7].

전기이중층 커패시터의 용량 증대와 출력특성을

1. 한국전기연구원 전지연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : ijkim@keri.re.kr

접수일자 : 2005. 5. 11

1차 심사 : 2005. 7. 11

심사완료 : 2005. 7. 25

개선시키기 위해서는 meso pore의 분율이 높은 활성탄소의 선정과 함께 활성탄소의 전극 내 충전 밀도를 높이고 전극의 전기전도도를 높이는 것이 중요하다. 전극의 전기적 특성은 선정된 활성탄소 외에 도전재의 함량과 함께 바인더에 따른 제조방법에 영향을 받는다. 바인더의 요구특성은 우수한 전기화학적 특성, 우수한 결합력 및 기계적 강도를 유지하는 것에 있다. 전극 성분들 간의 바인더에 의한 우수한 결합력은 전극밀도의 향상에 의한 전극 내 충전 용량의 개선과 입자들 간의 접촉저항을 감소시키는 역할을 하고, 기계적 강도는 전극제조 또는 커패시터의 제조공정에서의 과도한 전극 내 충격을 흡수하여 전기적 단락을 방지하는 역할을 한다[8,9].

일반적으로 전극의 제조방법으로는 용매에 용해가 가능한 바인더를 이용하여 구성 성분들을 슬러리 상태로 집전체 (current collector)에 코팅하는 방법과 PTFE를 사용하여 니딩 (kneading) 공정에 의해 sheet 형태로 제조하는 방법으로 분류할 수 있다. 전자의 경우, 바인더가 활성탄소 또는 도전재 분말들과의 접촉저항으로 작용할 가능성이 높아 단일 바인더 대신 상용화되고 있는 전기이중층 커패시터용 전극의 경우 3~4성분들로 구성된 복합 바인더를 사용하는 것이 일반적이다. 후자의 경우 PTFE가 화학적으로 안정할 뿐 아니라 섬유상의 network 구조의 PTFE 내에 활성탄소와 도전재를 감싸는 형태로 전극을 구성하기 때문에 상대적으로 접촉저항은 낮으나 sheet 형태의 전극을 집전체에 결합하기가 곤란한 단점이 있다.

본 연구에서는 전기이중층 커패시터의 용량과 출력 특성을 향상시키기 위한 방법으로 sheet 형태의 carbon-PTFE 전극을 제조하였고, 이때 제조공정과 구성 성분비에 따른 기계적, 전기적 특성을 조사하였다. 또한 carbon-PTFE 전극과 집전체와의 접촉저항을 최소화하기 위한 도전성 접착제의 개발과 함께 영향을 조사하였으며 separator와 전해액과 함께 조립한 cell capacitor의 전기화학적 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 전극 및 cell capacitor의 제조

전기이중층 전극의 구성 성분 중, 활물질은 MSP20 (비표면적 : 2000 m²/g, Kansai Coke & Chemicals Co.), 도전재는 carbon black, 바인더로는 Polytetrafluoroethylene emulsion (이하 PTFE)

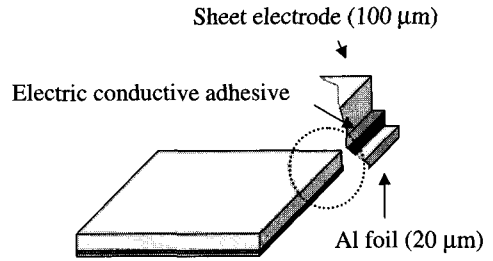


그림 1. 전극의 구성도.

Fig. 1. Schematic structure of the electrode.

를 사용하였으며 활물질 : 도전재 : 바인더 = 95-X : X : 5 wt.%의 중량비로 전극을 구성하였다. 전극의 구성 성분들을 용매와 함께 2000 rpm으로 혼합하여 슬러리를 제조하고 용매를 건조 제거한 슬러리는 적당량의 I.P.A. (Iso Propyl Alcohol)와 함께 상온에서 roll press로 압연 후 반으로 접어서 압연하는 방식을 반복한 후 200 μm 두께를 가지는 sheet을 제조하였다. 이 sheet을 roll 표면의 온도가 80 °C인 hot roll press를 이용하여 10 μm씩 roll 간격을 줄이면서 roll pressing하여 최종적으로 100 μm 두께의 sheet 전극을 제조하고 150 °C의 진공건조기에서 overnight하여 건조시켰다. 한편 전극을 에칭 Al foil에 접착시키기 위해 carbon black과 Carboxymethylcellulose (이하 CMC)로 구성된 도전성 접착제를 개발하였다.

그림 1은 전극의 구성도를 나타낸다. 그림에서 액상의 도전성 접착제를 에칭 Al foil의 표면에 5 μm 이하로 도포한 후 sheet 전극을 부착하고 120 °C에서 roll press로 압착하였다. 접착한 전극은 3×4 (가로×세로, cm×cm)로 재단하였다. Cell capacitor의 조립은 dew point가 -60 °C 이하인 dry room에서 행하였으며, celgard 3501의 separator를 알루미늄 단자가 용접된 전극들 사이에 삽입한 후 5 mmφ의 유리봉의 표면에 감고, 1.2 M의 TEABF₄ (tetra-ethyl-ammonium-tetra-fluoro-borate)/acetonitrile의 전해액이 함유된 10 mmφ의 test 유리 tube내에 집어넣은 후 고무 cap으로 sealing하여 완성하였다.

2.2 전극 및 cell capacitor의 전기화학적 특성 분석

Sheet 전극의 기계적 강도는 인장시험을 통해 측정하였으며 전극의 저항 (R)은 DC 4단자법을

사용하여 측정하였으며 전극의 전기비저항은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$\rho = R \times S / t \quad (1)$$

여기서 S는 전극의 단면적, t는 전극의 두께를 나타낸다. 전극의 표면은 FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope, S-2700, Hitachi Co.)을 사용하여 관찰하였다.

Cell capacitor의 충·방전 실험을 하기 위하여 충방전 시험기 (MACCOR, 모델명 MC-4)에서 정전류법으로 충·방전하였다. 구동전압은 0~2.5 V, 전류밀도는 2.5 mA/cm²~100 mA/cm²의 범위 내에서 측정하였다. Cell capacitor의 측전 용량은 시간-전압곡선에서 식 (2)에 의해 계산하였다. Cell capacitor의 내부저항 (Equivalent Series Resistance, 이하 ESR)은 방전곡선에서의 IR drop으로부터 구하였다.

$$C = dt \cdot i/dV \quad (2)$$

임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)은 Impedance analyzer (Zahner IM6)를 사용하여 two - electrode system 으로 100 kHz에서 0.01 Hz의 주파수 범위에서 행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 MSP20 : carbon black : PTFE의 중량비가 80 : 15 : 5 wt.%의 sheet 전극의 roll pressing 회수에 따른 전기비저항 및 인장강도의 변화를 나타낸다. 200 μm의 sheet을 80 °C의 hot roll press의 roll 간격을 10 μm 간격씩 줄여서 압연할 경우 전극 두께는 압착 후 두께 회복 현상이 있어 roll 간격과는 일치하지 않는다. 전극의 두께는 약 15회의 압연 후 100 μm로 포화하고 더 이상의 두께 감소는 관찰되지 않았다. 압연 회수에 따라 각각의 전극을 일정 크기로 절단한 후 전기비저항과 인장 강도를 조사하였다. 압연회수가 15회까지는 전기비저항은 감소하고, 그 이상의 압연에서는 포화하는 경향을 나타내었다. 인장강도는 압연회수가 15회까지는 증가한 후 이상의 압연회수에서는 약간의 감소를 나타내었다.

그림 3은 MSP20 : carbon black : PTFE의 중량비가 80 : 15 : 5 wt.%의 sheet 전극의 표면형상

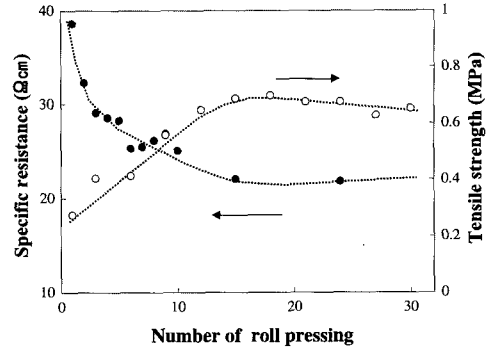


그림 2. 압연회수에 따른 전지 비저항과 인장강도의 변화.

Fig. 2. Variation of the specific resistance and the tensile strength vs. the number of roll pressing for sheet electrode.

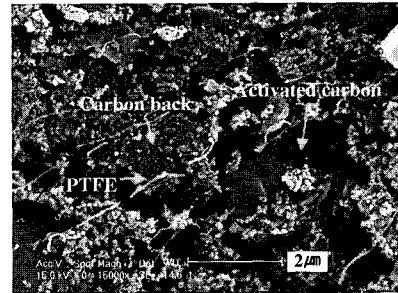


그림 3. Carbon-PTFE 전극의 표면 SEM 사진.

Fig. 3. SEM micrographs of the carbon-PTFE electrode.

을 나타낸다. 그림에서 8 μm의 활성탄소 분말들 사이에 약 100 μm의 도전재 분말이 분포되어 있는 것을 알 수가 있고 이들 분말들은 섬유상의 PTFE 들에 감싸여져 있는 형상을 관찰할 수 있다. 초기 직경이 0.1 μmφ의 섬유상의 PTFE가 압연 횟수가 증가할수록 길이 방향으로 고분자 체인이 증가하고 늘어난 PTFE의 섬유들에 의한 network 구조를 이루는 것으로 추정할 수 있다. 그림 2에서 압연 횟수가 증가할수록 sheet 전극의 전기비저항의 감소와 인장강도의 증가하는 것은 발달된 PTFE의 network 구조가 활성탄소분말과 도전재 분말을 고착화시키기 때문으로 사료할 수 있다. 즉, 압연 횟수가 증가할수록 발달된 섬유상의 PTFE network

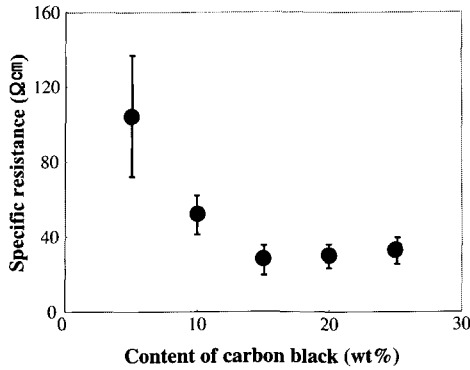


그림 4. MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%로 구성된 전극에서의 carbon black의 중량비에 따른 전기 비저항의 변화.
 Fig. 4. Variation of the specific resistance vs. the content of carbon black for the sheet electrode, in which composition is MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%.

구조로 인해 활성탄소 분말 또는 도전재 분말들 간의 접촉저항이 감소함과 동시에 conducting path의 증가로 인해 전기비저항은 감소하고, 결합력의 개선에 의해 인장강도는 증가하는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 약 15회 이상의 압연에서 인장강도가 약간 감소하는 것은 필요이상의 압연 하중으로 인해 PTFE의 고분자 체인이 부분적으로 끊기는 현상에 의한 것으로 추정할 수 있다.

그림 4는 MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%로 구성하고 15회의 압연에 의해 제조한 sheet 전극에 있어서, carbon black의 중량비에 따른 sheet 전극의 전기비저항의 변화를 나타낸다. 그림에서 carbon black의 중량비가 증가할수록 전기비저항은 감소하고, 약 15 wt.%에서 전기비저항은 약 20 Ωcm로 가장 낮은 값을 나타낸 후 이후의 중량비에서는 약간 증가하는 경향을 나타낸다. Carbon black의 중량비가 증가할수록 전극의 구성 성분 중 전기전도도가 낮은 도전재의 conducting path의 증가에 의해 전극의 전기전도도는 증가하나, 15 wt.% 이상의 조성에서는 나노 크기 입자의 carbon black의 과도한 증가로 인한 계면 접촉저항에 의해 오히려 전기전도도가 감소하는 것으로 사료된다.

이들 각 carbon black의 조성별 전극밀도의 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 carbon black

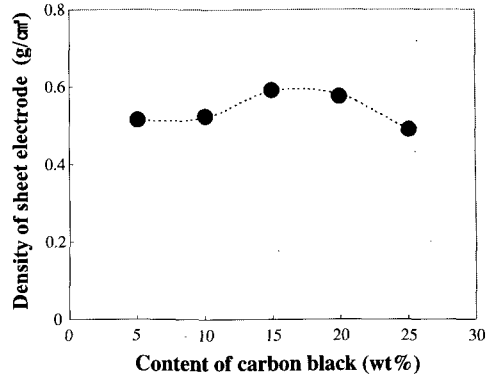


그림 5. MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%로 구성된 전극에서의 carbon black의 중량비에 따른 전극밀도의 변화.
 Fig. 5. Variation of the density vs. the content of carbon black for the sheet electrode, in which composition is MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%.

의 중량비가 증가할수록 전극 밀도가 증가하다가 15 wt%일 때 약 0.6 g/cm³로 최대값을 나타내고, 다시 감소하였다. Carbon black의 중량비가 증가할수록 입자가 큰 활성탄소와 작은 도전재 입자들의 적당한 분산에 의해 밀도가 증가하나, 15 wt% 이상에서는 과도한 carbon black의 중량비로 인해 나노 크기의 입자들 간의 결합력 감소로 인해 밀도가 감소하는 것으로 사료된다.

그림 6은 sheet 전극을 집전체인 Al foil에 부착할 목적으로 개발한 도전성 접착제의 성분별 전기비저항을 나타낸다. 도전성 접착제는 접착력과 도전성을 동시에 갖추고 있어야 하고, 이러한 목적으로 결합력 향상을 위해서는 CMC 바인더를 선정하였으며, sheet 전극과 Al foil 간의 도전성을 위해서는 carbon black을 첨가하였다. CMC를 물에 용해시킨 용액에 carbon black을 일정량 첨가하고 일정한 점도를 유지할 정도로 물을 건조시킨 후 부도체인 폴라로이드 필름 위에 5 μm로 도포한 후 건조, 압착시키고 일정 크기로 재단한 후 DC 4 단자법으로 전기비저항을 측정하였다. 그림에서 carbon black의 중량비가 70 %까지 전기비저항은 0.1 Ωcm로 가장 낮은 값을 나타낸 후 90 %의 중량비로 첨가할 경우 전기비저항은 증가하였다. 이러한 경향은 70 %까지는 도전성 분말들에 의해 conducting path의 증가에 의한 것으로 사료할 수

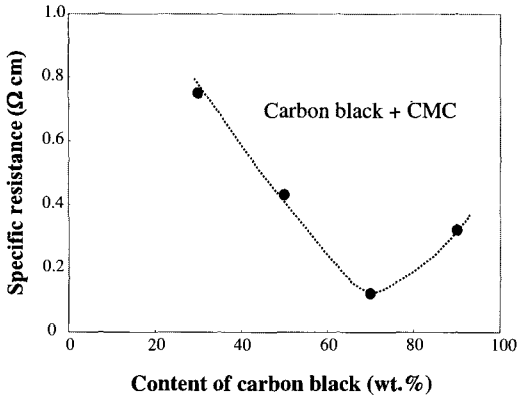


그림 6. Carbon black과 CMC로 구성된 도전성 접착제의 중량비에 따른 전기비저항의 변화.

Fig. 6. Variation of the specific resistance vs. the content of carbon black for electric conductive adhesive composed of carbon black and CMC.

있고, 90 %에서는 도전성 분말의 과대 함량 또는 CMC 바인더의 상대적 함량이 부족하여 도전성 분말들 간의 결합력 부족으로 인한 접촉저항의 증가에 의한 것으로 사료된다. 그림에서 도전성 접착제의 전기비저항은 sheet 전극의 전기비저항에 비해 약 2 order 정도로 낮은 값을 나타낸다.

그림 7은 MSP20 : carbon black : PTFE의 중량비가 95-X : X : 5 wt.%로 구성되고 압연을 15 회 행해서 얻어진 100 μm 두께의 sheet 전극을 carbon black : CMC 중량비가 70 : 30 wt.%로 구성된 도전성 접착제를 통해 에칭 Al foil에 접착한 전극을 사용하여 제조한 cell capacitor의 전류밀도에 따른 비축전용량의 변화를 나타낸다. 그림에서 비축전용량은 전류밀도가 증가할수록 감소하고, 고전류밀도에서의 비축전용량의 감소 폭은 carbon black의 중량비가 15 %까지는 적고 이후의 중량비의 증가에서는 큰 것으로부터 carbon black의 중량비가 15 %에서 제조한 cell capacitor의 출력특성이 가장 우수한 것을 알 수 있었다.

이들 출력특성의 변화는 그림 8에서 나타낸 carbon black의 중량비 변화 별 전류밀도에 측정된 voltage profile으로부터 고찰할 수 있다. 그림 8 (a)는 5 mA/cm²에서, 그림 8 (b)는 100 mA/cm²에서 각각 측정된 결과를 나타낸다. 5 mA/cm²의 전류밀도로 방전을 할 경우 carbon black 중량비에 관계

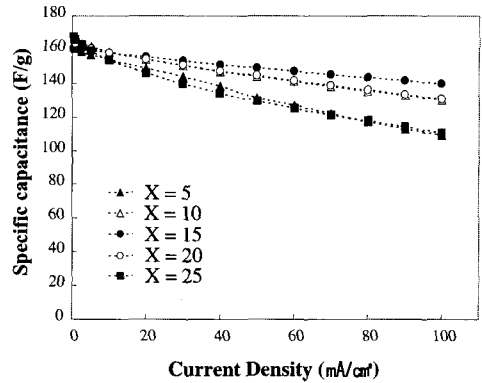


그림 7. MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%로 구성된 전극을 사용하여 제조한 cell capacitor의 전류밀도에 따른 축전비용량의 변화.

Fig. 7. Variation of the specific capacitance vs. the current density for the cell capacitors using the sheet electrode, in which composition is MSP20 : carbon black : PTFE = 95-X : X : 5 wt.%.

없이 활성탄소의 중량 당 방전 비용량은 160 F/g으로 유사한 값을 나타낸다. 그러나 100 mA/cm²의 고출력밀도에서의 방전 비용량은 도전재의 함량에 따라 많은 차이를 나타내는 것을 알 수가 있고, 이들 차이는 방전 초기의 IR drop에 의한 내부저항 (ESR)에 비례하는 것을 알 수 있다. 15 wt.%의 도전재 함량에서 130 mΩ으로 가장 낮고 5와 20 wt.%의 도전재 함량에서 각각 330 mΩ와 240 mΩ을 나타내었다. 이들 내부저항의 변화는 그림 9의 AC impedance의 결과와 동일한 결과를 나타낸다.

그림 9은 carbon black의 중량비 변화 별로 첨가한 전극을 사용하여 제조한 cell capacitor의 open circuit voltage에서 100 kHz와 0.01 Hz의 주파수 범위내의 complex impedance를 측정된 결과이다. 그림에서 R₁은 전해질 저항으로 전해질의 이온전도도에 의해 결정된다. R₂-R₁ 값은 용량발현과 관련된 전극저항을 의미한다. 여기서 R₂는 semicircle의 연장선과 real resistance (X축)과의 교점이다. 그리고 semicircle은 전극저항과 다공성 활성탄소 전극의 용량으로 구성된다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 전해질의 사용에 따른 전해질의 저항(R₁)은 동일하나 전극저항(R₂-R₁)은 carbon black이 15 wt.%에서 가장 낮고, carbon black이 20 wt.% 이상의 중량비에서는 증가하였다.

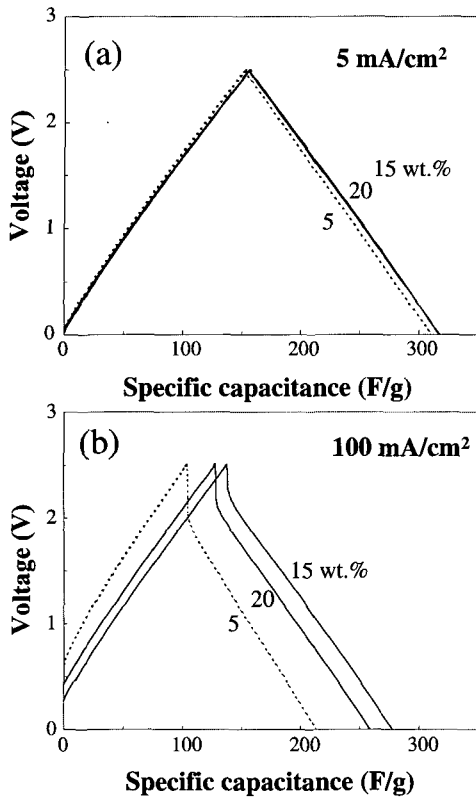


그림 8. 5, 15, 20 wt.%의 중량비로 첨가된 전극을 사용한 cell capacitor에서 5 mA/cm² (a) 와 100 mA/cm²(b)의 전류밀도에서의 충·방전 전압 거동.

Fig. 8. Charge-discharge voltage profiles at current density of 5 mA/cm² (a) and 100 mA/cm²(b) for cell capacitors using the electrode with 5, 15, 20 wt.% of carbon black.

이상의 결과로부터 carbon black의 중량비가 15%에서 제조한 전극을 사용하여 제조한 cell capacitor의 출력특성이 가장 우수한 것은 낮은 내부저항 (ESR)에 의한 것을 알 수가 있다. 일반적으로 전기이중층 커패시터의 내부저항 (ESR)은 전극저항 ($R_{\text{electrode}}$), 벌크 전해질 저항 (R_{bulk})과 활성탄소의 pore내부에서 전해질의 분리이온에 의한 출입저항 (R_{pore})로 구성된다. 본 연구에서 제조한 cell capacitor는 동일한 전해질을 사용하기 때문에 전해질 저항 (R_{pore}) 또는 R_1 은 동일한 값을 나타내는 것을 알 수가 있었고 동일한 활성탄소 (MSP20)에 의한 R_{pore} 또한 동일한 값으로 가정할

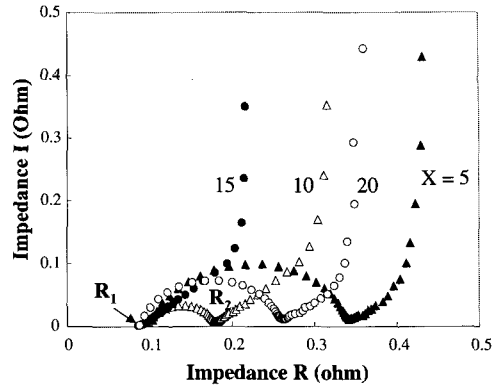


그림 9. Carbon black의 중량비 별 cell capacitor의 AC impedance 거동.

Fig. 9. Variation of impedance spectra in Nyquist presentation as a function of carbon black weight ratio for cell capacitors.

경우, capacitor의 내부저항은 전극저항 ($R_{\text{electrode}}$)에 좌우되는 것을 알 수 있다. 그림 8과 9의 cell capacitor의 DC 및 AC 저항의 변화와 그림 4의 전극의 전기비저항과 동일한 변화를 나타내는 것으로부터 carbon black의 함량비를 달리하여 제조한 test cell capacitor의 출력특성은 전극의 제조방식과 구성 성분의 함량변화에 의한 전극 저항에 영향을 받는 것을 알 수가 있었다.

4. 결론

전기이중층 커패시터의 용량과 출력 특성을 향상시키기 위한 방법으로 MSP20 : carbon black : PTFE의 중량비가 95-X : X : 5 wt.%로 구성된 sheet 형태의 carbon-PTFE 전극을 제조하여 이때 제조공정과 구성 성분비에 따른 기계적, 전기적 특성을 조사하였고, separator와 전해액과 함께 조립한 cell capacitor의 전기화학적 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 200 μm의 sheet을 80 °C의 hot roll press의 roll 간격을 10 μm 간격씩 줄여서 압연할 경우, 15회의 압연에서 얻어진 100 μm 두께의 전극이 가장 낮은 전기 비저항과 높은 인장강도를 나타내었다.
- 2) MSP20 : carbon black : PTFE = 80 : 15 : 5 wt.%로 구성된 전극의 전기비저항은 20 Ωcm로

가장 낮은 값을 나타내었다.

- 3) Sheet 전극을 Al foil에 부착시킬 목적으로 carbon black과 CMC으로 구성된 도전성 접착제를 개발하였고 중량비 의존성을 조사한 결과, carbon black : CMC = 70 : 30 wt.%에서 0.1 Ω_{cm} 의 가장 낮은 전기비저항을 나타내었다.
- 4) Carbon black의 중량비를 달리하여 제조한 전극을 사용하여 조립한 cell capacitor의 율특성을 조사한 결과, carbon black의 중량비가 15%인 전극을 사용한 cell capacitor의 출력특성이 가장 우수하였고, 이는 전극의 저항 ($R_{electrode}$)에 기인한 낮은 내부저항 (ESR)에 의한 것으로 고찰할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] B. E. Conway, "The electrolyte factor in supercapacitor design and performance : conductivity, ion-pairing and solvation", Proceedings of The 4th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, FL, 12-14, Vol. 4, 1994.
- [2] B. E. Conway, "Transition from supercapacitor to battery behavior in electrochemical energy storage", J. Electrochem. Soc., Vol. 138, p. 1539, 1991.
- [3] S. Sarangapani, B. V. Tilak, and C. P. Chen, "Materials for electrochemical capacitors", J. Electrochem. Soc., Vol. 143, p. 3791, 1996.
- [4] J. DeGaynor and R. Johnston, "Double layer capacitors for automotive applications", Proceedings of The 4th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, FL, Vol. 4, 1994.
- [5] 김익준, 이선영, 도철훈, 문성인, "전기이중층 커패시터의 특성에 미치는 혼성 도전재의 영향", 전기전자재료학회논문지, 17권, 1호, p. 107, 2004.
- [6] "전기이중층 콘덴서 시장의 철저연구", 야노경제연구소, 2002.
- [7] J. Gamby, P. L. Taberna, P. Simon, J. F. Fauvarque, and M. Chesneau, "Studies and characteristics of various activated carbons used for carbon/carbon supercapacitors", J. of Power Sources, Vol. 101, p. 109, 2001.
- [8] 도철훈, 최상진, 문성인, "유기전해액에서 루테튬산화물 전극의 전기화학적 특성", 전기전자재료학회 2002 하계학술대회논문집, p. 1125, 2002.
- [9] 김익준, 이선영, 문성인, "EDLC용 CMC+PTFE 혼합바인더 전극의 전기적, 기계적 특성", 전기전자재료학회논문지, 17권, 10호, p. 1079, 2004.