

## 전기화학 커패시터

김 종 휘

대전시 유성구 장동 71-2, 한국에너지기술연구원 에너지신소재연구부

(2007년 1월 31일 접수 : 2007년 2월 5일 채택)

## Electrochemical Capacitors

Jong Huy Kim

Dept. of Advanced Energy Materials, Korea Institute of Energy Research,  
#71-2 Jang-dong Yousung-gu, Taejeon, 305-343, Korea

(Received January 31, 2007 : Accepted February 5, 2007)

### 초 록

전기 에너지를 가장 직접적으로 저장하는 기기로서 우리는 흔히 전지(battery)와 콘덴서(condenser)를 생각한다. 산업혁명 이후 과학과 기술의 엄청난 발전에 따라 여러 분야에서 다양한 문명이기의 개발과 활용이 있어왔지만 우리 생활에 밀접히 활용되고 있으며 각종 전기전자 시스템의 핵심 구성품인 이러한 전지나 콘덴서의 기술 발전 속도는 다른 분야에 비하여 상대적으로 뒤쳐진 상황이라고 볼 수 있다. 그러나 최근 10여년 동안 괄목할 만한 소재기술의 발전에 힘입어서 재래식의 콘덴서는 물론 니켈수소전지, 리튬이온전지, 리튬폴리머전지 등과 같은 최신형 2차전지들조차도 갖지 못하는 장수명, 고출력 특성을 갖는 새로운 형식의 전기에너지 저장장치인 '전기화학커패시터(electrochemical capacitor)'의 개발이 실현되고 있다. 이에, 본 고에서는 전기화학커패시터에 대한 기본적인 이해와 이의 최신기술 동향에 대하여 간략히 소개하기로 한다.

**Abstract :** In general, the battery and the (electric) condenser are pictured as electrical energy storage devices. Although there were lots of inventions and utilizations of modern conveniences according to enormous growth of the science and technologies after the Industrial Revolution, a speed of technology development on these devices being closely used in civilized human lives and many electric or electronic systems as a core component are relatively slower to the other fields of technologies. Nevertheless, based on a remarkable progress of the material science and technologies for the last ten years, a new type of electrical energy storage device so called as 'electrochemical capacitors' are being developed and used practically. The electrochemical capacitors exhibit their own characteristics of much enhanced capacitance over the conventional condensers and also distinctively exhibit a longer life time and higher power capability that the nickel hydrogen batteries and secondary batteries such as lithium ion and polymer batteries does not show up so far. Hence, in this paper, it is intended to introduce a fundamental understanding and updated technology trends on the electrochemical capacitors.

**Keywords :** electrochemical capacitors, electrical energy storage devices, electrochemistry, supercapacitor, hybrid supercapacitors

### 1. 커패시터(축전기)와 전기화학(electrochemistry)

아득히 먼 예전에도 우리 인류의 조상들은 하늘에서 천둥과 번개가 치는 것을 보았을 것이며, 머리털이나 비단 또는 양털에 마찰시킨 동물의 뼈나 뿔 또는 호박(amber) 등을 또 다른 물체와 가까이 하면 소리를 내며 불꽃이 튀는 전기방전 현상을 우연하게도 경험하였을 것이다. 그러나, 비록 음(-)전하가 전자(electron)라는 사실을 발견하지는 못하였으나, 18세기 중엽(1745년)에는 그러한 현상이 정전기유도에 의한 전하의 저장 원리라는 것을 알게 되었으며 네덜란드의 Univ. of Leyde에서는 굳어

서는 이를 이용한 전기저장 장치(Fig. 1의 Leyden Jar 참조)를 만들어 전기에너지를 저장하기도 하였다.<sup>1)</sup>

그러나 이러한 정전기 유도현상에 의한 축전기에서 더욱 발전하여 오늘날에 사용되는 2차전지 기술이 개발되기까지는 '전기화학'이라는 학문적 기초에 힘입은 바 크다. 실험적인 연구를 통하여 1830년대 이후에 전기와 화학반응과의 관계를 밝힌 패러데이(Michael Faraday)와 19세기 후반에 패러데이의 연구 결과를 정리하고 이론적으로 접근한 헬름홀츠(von Helmholtz)에 의하여 전기화학 분야가 개척되었다.<sup>2)</sup> 지금으로부터 100여년 전인 20세기 초(1902년)에는 미국 동부의 필라델피아에서 미국과 유럽의 과학자들이 모여 현재의 전기화학회(Electrochemical

\*e-mail: kjhy@kier.re.kr

Society)가 되는 최초의 대규모 국제 회의를 개최할 정도로 전기화학은 새로운 학문분야로 주목을 받았었다.

패러데이가 밝힌 전기와 화학반응과의 관계는 패러데이 법칙(Faraday's Law)으로써 '화학반응물의 양은 전하량에 비례하며, 특정한 전하량을 가해서 생성된 화학반응물의 질량은 반응물의 전기화학적 등가중량(즉, mole 당 원자량 또는 분자량)에 비례한다'는 것이다.<sup>3)</sup> 보다 쉽게 말하면, '화학적 물질에 어느 시간 동안 전류를 가하면 화학반응이 야기되며 그 화학반응의 양은

가해진 전하의 총량에 비례한다'는 것이다. 이러한 전기화학적 반응을 '패러데이 반응(Faradaic reaction)'이라고 한다.

한편, 헬름홀츠는, 어떤 전위(potential)에서 고체상태의 금속 전극과 액체상태의 전해액이 서로 맞닿아 경계를 이루고 있을 때 그 경계면에는 이온과 반대되는 극성의 전하가 정전기력에 의하여 서로 당기는 상태에서 2차원적인 한 개의 얇은 층을 형성하며 전기에너지를 저장한다는 전기이중층(electric double layer) 이론을 발표하였다.<sup>4)</sup> 이러한 전기이중층 축전원리에는 패러데이 반응이 없다. (Fig. 3 참조)

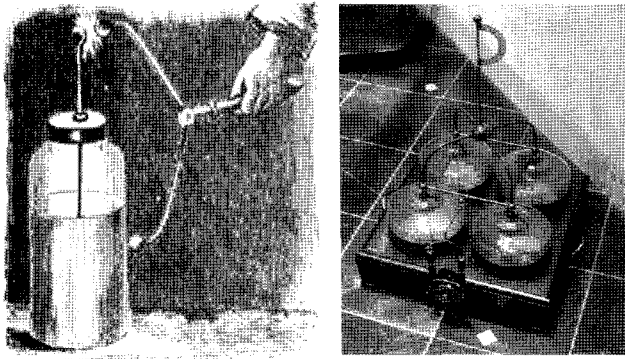


Fig. 1. Leyden Jar

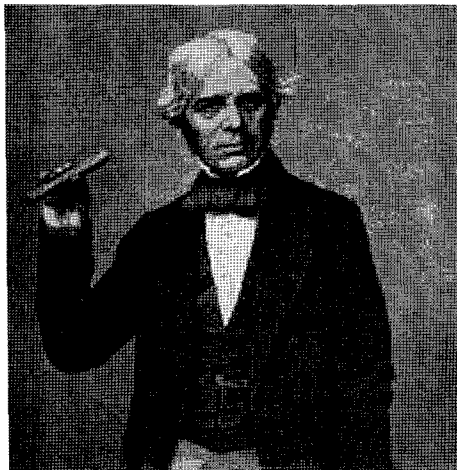


Fig. 2. Michael Faraday(1791-1867)

## 2. 커패시터의 구조

흔히 물리적 정전기 현상에 의한 축전장치를 '콘덴서(condenser)'라고 말하고 있으나 이 용어는 기계공학에서의 응축기와 광학에서의 집광기 등으로도 사용되므로 주의해서 사용할 필요가 있으며 오히려 '커패시터(capacitor) 또는 축전기'라고 하는 것이 바람직하다. 일반적으로 축전기(콘덴서), 전지(2차 전지), 전기화학 커패시터 등의 내부구조는 Fig. 4에서와 같은 구조를 갖는다. 전하를 가두어 놓는 전극, 전극간의 단락을 막는 분리막, 전극에 가두어진 전하를 모아서 도선으로 흐르게 하는 집전체(current collector), 그리고 전극에 전하가 유도되도록 두 전극 사이에서 전기적 매체로 사용하는 유전체(dielectrics) 또는 전해액(electrolytes)이 있다.

진공관을 사용하던 오래된 라디오에는 주파수를 맞추기 위하

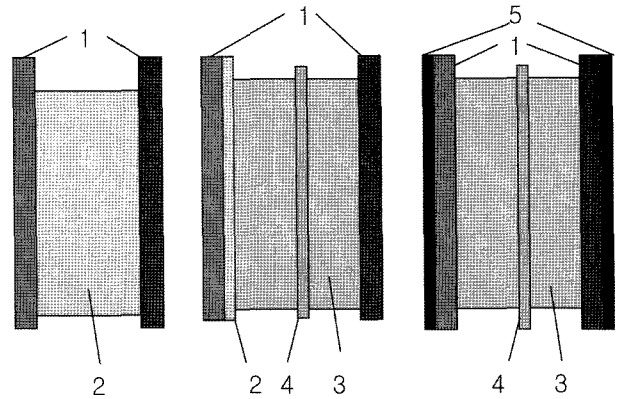


Fig. 4. 축전 기기류의 구조 (좌: 정전기형 유전체 축전기, 중: 정전기형 전해 커패시터, 우: 전기화학 커패시터 및 2차전지)

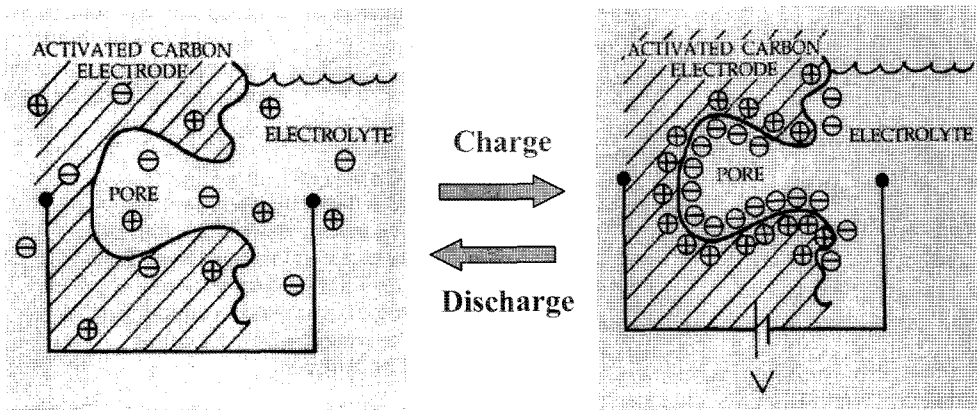


Fig. 3. 전기이중층 형성 개략도

여 손으로 돌리던 다이얼식 축전기가 사용되었다. 이러한 축전기는 전극면적을 변화시키는 부채꼴 모양의 구조를 가지며 두 전극이 사이에 공기를 유전체로 사용한다. 또한, 유리, 세라믹, 종이 또는 고분자 필름을 유전체로 사용하는 정전기형 유전체 축전기가 있다. 유전체는 전위차에 의하여 두 전극 사이에 전기장(electric field)이 만들어지면, 극성을 띠며 전기장에 평행하도록 배열되는 분극성 성질의 물질을 이용하여 두 전극에 전하가 정전기적으로 유도되도록 하는 매체이다. 이러한 정전기형 축전기에는 분리막과 집전체가 없으며 전극이 집전체의 역할을 겸하게 된다.

한편, 전해 커패시터, 2차전지, 전기화학 커패시터와 같이 두 전극 사이에 전해액이 있는 경우는 전해액의 역할이 유전체와는 다르다. 전해액에는 전해질이 용해되어 있는데 전압을 가하면 전해질은 양(+)극성을 띤 분자 상태의 양이온(anions)과 음(-)극성을 띤 분자 상태의 음이온(cations)으로 나뉘어지고 전기장을 따라 서로 반대 방향으로 이동하며 전기를 통하게 되는 전기전도성 이온화 매체인 것이다.

알루미늄 전해 커패시터의 경우, 양(+)극의 전극에는 산화알루미늄의 얇은 막이 형성되어 정전기형 유전체 축전기에서의 유전체와 같은 역할을 하고 두 전극에 가해진 전위차를 유지할 수 있도록 한다. 그리고 유전체인 산화막에 직접 닿아 있는 액체상태의 전해액은 유전체와의 접촉에 의하여 음(-)극을 대신하여 전위를 유지한다. 또한, 음(-)극의 표면에 닿아 있는 전해액의 양이온들은 전기이중층을 형성하여 음극에 전하가 저장되도록 한다.

2차전지의 경우, 전기이중층에 의한 축전원리와는 달리 전해액과 경계한 전극의 표면에 3차원적으로 이온들이 모이게 된다. 이온과 전극의 경계면에서 전자가 전달되는 패러데이 반응이 있으며 2차전지의 축전원리가 된다. 아울러, 전극의 표면에 서로 직렬 또는 병렬연결 상태의 3차원적으로 모여 있는 이온들 간에도 전자의 교환이 있어서 서로 간에 화학적인 반응이 있다. 따라서, 패러데이 반응에 따라 축전하는 2차전지에서는 전기이중층 원리에 따라 저장되는 전하량 보다 훨씬 많이 저장할 수 있으나 정전기적인 전기이중층 축전원리 보다는 충분히 가역적이지 못하므로 충전과 방전을 반복함에 따라 전극물질의 물성이 바뀌고 결정구조가 파괴되는 열화(degradation)현상이 발생한다.

### 3. 전기화학커패시터

전기화학 커패시터는 기존의 정전기형 커패시터(축전기) 및 2차전지와는 그 특성이 다른 축전기기로서, 전기화학적인 작동원리를 갖는 축전기를 통칭하여 말한다. 먼저, 활성탄소와 같이 전기전도성이 좋으며 이온과 맞닿게 되는 비표면적(specific surface area)이 매우 큰 다공성 물질을 양극과 음극의 전극소재로 사용하므로써 전기이중층 원리에 따라 축전되는 전하의 양을 극대화한 전기이중층 커패시터(EDLC:electric double layer capacitor)가 있다. 재래식의 정전기형 커패시터 보다도 수 십만 배 이상 비축전용량(specific capacitance; F/g of electrode material)을 향상시킨 것이므로 '초고용량 커패시터(supercapacitor)'라고도 한다. 전기이중층 이론은 이미 알려진 축전 원리였으나 1957년도에 미국의 Becker에 의하여 전기이중층 커패시터의 발명특허가 출원되었다. 그 후, 미국 오하이오주 클리브랜드의 Sohio Co.에서 전기이중층 커패시터를 최초로 제작하게 되었다.

한편, 패러데이 반응의 특수한 경우로써 전위차에 따른 전기

화학적 반응(산화-환원 반응)의 전하량이 일정하게 비례하며 축전하는 경우를 '유사축전(pseudo-capacitance)'이라고 하는데 이러한 현상의 전기화학 커패시터를 '레독스 커패시터(redox capacitor)' 또는 '슈도 커패시터(pseudo-capacitor)'라고 한다. 레독스 커패시터는 패러데이 반응이 있지만 이온과 전극의 계면에서 전달된 전자가 전극물질의 격자층 사이로 침투하여 반응하는 현상은 갖지 않으며 전극물질의 물성을 변화시키지 않는다. 아울러, 충분히 가역적인 산화환원 반응이므로 충방전 반복 사용수명이 전기이중층 커패시터와 같이 최소 100,000회 이상을 유지한다. 이러한 슈도 커패시터 원리는 1971년 S.Trasatti와 G.Buzzanca에 의하여 최초로 발표되었으며 1975년부터 1981년까지 미국의 Continental Group의 지원을 받은 캐나다 Ottawa 대학의 B.E.Conway 교수에 의하여 슈도 커패시터(Conway 교수는 'ultracapacitor'라고 하였음)가 연구 개발되었다.<sup>5)</sup>

전기화학 커패시터는 2차전지보다 높은 충방전 효율(94% 이상)을 가지며 대전류의 신속한 충방전이 가능하다. 비록 단위 중량의 전기화학커패시터가 저장할 수 있는 총 전하량(에너지밀도)은 2차전지보다 적으나 단위 시간에 사용할 수 있는 에너지의 양(즉, 동력밀도)는 훨씬 크다. 비유하여 말하면, 2차전지는 목이 가는 1리터(liter) 짜리 호리병이어서 1초 동안에 10 cc 밖에 부을 수 없다면 전기화학 커패시터는 목이 없는 100 cc 짜리 컵과 같아서 1초 동안에 100 cc 전부를 부을 수 있는 것과 같다. 따라서, 전기화학 커패시터는 짧은 시간동안에 큰 전기에너지를 충전하거나 방전해야 할 용도로 사용하는 것이 적합하다. 한편, 2차전지는 저전류로 장시간의 충전 또는 방전하여 사용할 용도에 적합하다.

특정한 전압범위( $\Delta V = V_{max} - V_{min}$ )에서만 전하의 축전(충전)과 방출(방전)이 가능한 2차전지의 경우에는 저장되는 에너지의 양을  $E = Q(\Delta V)$ 으로 정의한다. 또한, 축전용량을 'capacity'라고 하며 이를 'Ah(=Q): 즉 1시간 동안에 축전할 수 있는 총 전하량의 의미'로 표시한다. 그러나, 전기화학 커패시터의 경우는 저장되는 에너지의 양을  $E = C \cdot V_{max}^2 / 2$ 으로 정의하고 축전용량을 'capacitance'라고 하며 이를 물리적인 단위인 '[F](farad)'로써 표시한다. 즉, 단위 전압(1 V)에서 단위 시간(1초) 동안에 축전할 수 있는 총 전하량으로 정의한다.

한편, 전기화학 커패시터를 분류할 때, 전해 커패시터의 음극에서는 전기이중층이 형성되므로 전해 커패시터를 넓은 의미에서 전기화학 커패시터에 포함시켜 분류하기도 한다.(Table 1 참조) 현재, 전기화학 커패시터의 전극소재로써는 활성탄소뿐만 아니라 고분자계, 금속산화물계 등의 다양한 소재를 사용하고 있으며 이러한 소재를 서로 혼합/합성하여 사용하는 복합전극소재에 대한 연구개발도 상당히 진행되었다.<sup>6)</sup>

### 4. 전기화학커패시터 신기술

#### 4.1 하이브리드 전지(Hybrid Battery or Capattery) 기술

2차전지가 갖는 높은 에너지밀도(energy density: 단위 중량 또는 체적당 저장할 수 있는 에너지의 양)의 특성을 최대한 유지하면서 전기화학 커패시터가 갖는 높은 동력밀도(power density: 단위시간 동안에 단위 중량 또는 체적의 축전기가 입출력 할 수 있는 에너지의 양)의 장점을 이용하기 위하여 최근부터 연구개발이 활발히 시작되고 있는 전기화학 커패시터 신기술 중에서 하이브리드 전지 기술이 있다.

2차전지는 저전류 장시간 충방전 사용이 가능한 반면, 대전류

Table 1. 축전기의 분류

| 분류   | 종류   | 전극중량당 축전용량<br>(per gram)                  | 단위 cell 당<br>사용전압 | 특징  |   |
|--|--|---|-------------------|---|---|
| 정전기 커패시터<br>(Electro-physical Capacitors)            | Ceramic Capacitor  | 1.0 pF~2.2 μF                             | ~1.5 kV           | 유전체의 정전기적<br>복극성을 이용,<br>자유전자의 정전기적<br>축전, 고전압,<br>고출력, 저에너지밀도        |   |
|  | Glass Capacitor  | 0.5 pF~10000 pF                           | 100~500 V         |   |   |
|  | Mica Capacitor   | 1.0 pF~10000 pF                           | 100V~2.5 kV       |   |   |
|  | Plastic/Metalized Film<br>Capacitor                      | 0.001~100 μF                              | 15 kV             |   |   |
| 전해커패시터<br>(Electolytic Capacitors)                   | Aluminium Electolytic<br>Capacitor                       | 0.68 μF~0.22 μF                           | ~350 V            | 금속 전극과 전해질이용,<br>이온흡착에 의한<br>전하유기 축전, 공해성                             |   |
|  | Tantalum Electolytic<br>Capacitor                        | 0.001 μF~1000 μF                          | 6~120 V           |   |   |
| 전기화학<br>커패시터<br>(Electro-<br>chemical<br>Capacitors) | 하이브리드 커패시터<br>(Electolytic Hybrid<br>Supercapacitor)     | Aluminum/Tantalum<br>+ Carbon/Metal-oxide | ~100 F            | ~600 V  | 전해콘덴서와<br>Supercapacitor의 중간형                         |
|  | 초고용량 커패시터<br>(Supercapacitor/<br>Ultracapacitor)         | Double Layer Capacitor<br>(전기이중층 캐패시터)    | ~150 F            | 0.8~3.0 V   | 다공성 전극과 전해액 이용,<br>fully reversible<br>chemisorption, |
|  |  | Redox Capacitor<br>(유사 축전기)               | ~750 F            | 0.8~3.0 V   | 긴 수명, 고출력 밀도,<br>무공해성 소재                              |
|  | 하이브리드 전지<br>(Hybrid Supercapacitor<br>or Hybrid Battery) | Metal + Carbon                            | ~2000 F           | ~3.0 V  | Battery와<br>Supercapacitor의 중간형                       |
| 신형 2차전지<br>(Secondary Batteries)                     | Ni-MH 전지   | > 10,000 F                                | ~2.0 V            | irreversible redox process,<br>짧은수명, 저출력 밀도,<br>고에너지 밀도,<br>사용안전 주의필요 |   |
|  | Li-ion 전지  | > 10,000 F                                | ~3.0 V            |   |   |
|  | Li-polymer 전지  | > 10,000 F                                | ~4.0 V            |   |   |

Table 2. 축전기기의 특성비교

| 항목            | 구분 | 전해커패시터       | 하이브리드 커패시터   | 초고용량 커패시터      | 하이브리드 전지   | 최신형 2 차전지 |
|---------------|----|--------------|--------------|----------------|------------|-----------|
| 정격방전시간        |    | 수초           | 수초 ~ 수분      | 수초 ~ 수 ( 십 ) 분 | 수십분 ~ 수시간  | 수시간       |
| 정격충전시간        |    | 수초이내         | 수초 ~ 수분      | 수 ( 십 ) 분이내    | 수십분이내      | 수시간       |
| 에너지밀도 (Wh/kg) |    | ~0.1         | 0.1~1        | 2~10           | 5~20       | 20~100    |
| 동력밀도 (W/kg)   |    | 10,000 이상    | 5,000~20,000 | 1,000~2,000    | 200~1,000  | 50~200    |
| 충방전효율 (%)     |    | 90~98        | 90~98        | 90~95          | 85~90      | 70~85     |
| 작동온도 (°C)     |    | -25~65       | -40~90       | -40~90         | -30~70     | -20~70    |
| cell 전압 (VDC) |    | 120~900      | 1~500        | 1~3.0          | 1~3.0      | ~3.0      |
| 충방전반복횟수       |    | 1,000,000 이상 | 200,000 이상   | 100,000 이상     | 100,000 이하 | 500~1000  |

의 빠른 라이징 타임(rising time)을 갖는 펄스 충방전이 요구되는 경우에는 적합한 특성을 보이지 못한다. 이는 축전 메커니즘이 산화환원 반응에 의존하기 때문이며 이때 산화환원의 반응 속도와 그 반응량(전하량)이 크게 제한되어 큰 내부저항(internal resistance)을 갖기 때문이다. 아울러, 충분히 가역적이지 못한 축전 메커니즘으로 인하여 전극소재의 열화현상(degradation)이 발생하고 충방전 반복수명이 500~1000회 이내에서 제한된다. (Table 2 참조) 따라서, 고가의 소재를 사용하는 2차전지의 경우 동력밀도의 향상과 충방전 반복사용 수명의 획기적인 연장이 요구되고 있다.

최근들어, 니켈수소전지나 리튬이온전지 기술을 응용하여 에너지밀도는 리튬이온전지보다 다소 낮으나 동력밀도가 현격하게 향상된 하이브리드 전지를 연구 개발코자하는 노력이 더욱 활발해 지고 있다. 니켈수소전지의 특성과 전기이중층 캐패시터

의 특성을 결합한 형태의 하이브리드 전지는 현재 러시아의 ESMA사와 ELIT사에서 개발하여 상품화단계에 있다.<sup>7)</sup> 일본에서는 리튬이온전지와 전기화학 커패시터의 중간형인 유기 전해액계 하이브리드 전지 연구개발을 진행하여 리튬이온 커패시터 신상품이 출시되고 있다.<sup>8)</sup> 국내에서는 한국에너지기술연구원에서 자체연구사업의 일환으로 이들 러시아 제품과 같이 니켈수소전지와 전기이중층 캐패시터의 중간형인 하이브리드 전지 개발연구를 성공적으로 수행하여 하이브리드 전기자동차(HEV, Toyota PRIUS)에 장착하여 주행시험한 결과 공해성 배기가스 배출량 저감과 연비의 향상이 있음을 이미 2003년도 실증한 바 있다.<sup>9)</sup>

한국에너지기술연구원에서 수행 중인 하이브리드 전지 연구 개발 진행내용을 간략히 소개하면, 전극소재로서 양극은 니켈계 금속분말과 활성탄소분말을 혼합하여 사용하고 음극은 활성탄

소만을 사용한다. 각각의 전극을 제작한 후 충분한 에이징(aging) 과정을 거친 후 단위 셀(cell)을 조립하게 된다. 뚜렷한 성능 특성으로서는 수용성 전해액(KOH)에서도 단위 셀 전압을 1.6 Volt(최대 1.7 Volt)까지 올릴 수 있어서 전기이중층 커패시터보다 훨씬 증가된 에너지밀도(~5.0 Wh/kg, 전해액과 케이스 및 단자 중량 포함)를 갖으며 니켈수소전지보다 크게 증가된 동력밀도(약 2 kW/kg 이상)를 보인다. 그러나 작동전압 범위는 0.8 V-1.6 V의 범위로 제한된다.

**4.2 하이브리드 커패시터(Hybrid Supercapacitor) 기술**

하이브리드 커패시터는 전해 커패시터와 초고용량 커패시터(특히, 전기이중층 커패시터)의 중간형인 전기화학 커패시터이다. 수초 이내의 짧은 충전시간에 큰 펄스 출력을 요구하며 높은 전압과 주파수 영역에서 사용되는 축전기가 가져야 할 특성영역을 만족시키게 된다. 특히, 초고용량 커패시터와 2차전지는 단위 셀의 전압이 1-3 V의 범위에서 제한되는 문제점이 있다. 이러한 문제는 실제의 응용시스템에서 수십 볼트(Volt) 이상을 요구하는 축전시스템 전압을 유지하기 위하여 전압평형회로(voltage equalization circuit)등과 같은 별도의 보완기능을 추가해야함을 의미한다.

예를 들어, 전압이 3 V-10 F인 단위 팩(pack) 10개를 직렬로 연결해서 30 V-1 F인 축전시스템을 구성한다고 할 때 10개의 단위 팩들의 내부저항이 동일하다는 전제를 하고 있음을 명심할 필요가 있다. 수 밀리 옴(mili-Ohm) 범위의 내부저항을 가진 단위 팩들이 실제적으로 10%정도의 내부저항 오차를 가진다면 어떤 단위 팩은 충전전압이 3.3 V가 되고 어떤 단위 팩은 2.7 V가 되는 전압불균형 문제가 발생한다. 실제적으로 이는 축전시스템의 내부저항의 증가와 충전전시에 축전시스템의 과열발생과 충전 효율의 감소 원인이 되므로 각각의 팩에 대한 과충전 방지 및 등전압 유지를 위한 별도의 제어회로를 구성하고 더 많은 수의 단위 팩을 여분으로 한 축전시스템을 구성하고 있다. 그러나 만약 충전용량은 1/100이지만 단위 셀의 전압이 10배 높은(즉, 동일한 에너지밀도의) 30 V-0.1 F급 단위 팩 축전기가 있다면 이러한 등전압 유지를 위한 보호회로가 불필요하게 되고 이러한 단위 팩 축전기 10개만으로 단순 병렬 연결하면 동일한 에너지량을 만족시키고 내부저항은 오히려 감소하게 되는 큰 장점이 있다.

세계적으로 하이브리드 커패시터를 연구개발한 회사는 미국

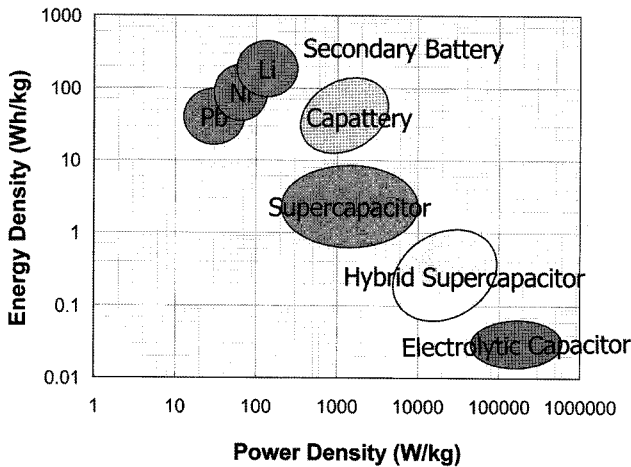


Fig. 5. 2 차전지, 전기화학 축전기, 전해 커패시터 등의 특성영역

의 EVANS사가 있다. 이 회사에서는 양극물질로써 알루미늄(Al)과 탄탈륨(Ta)을 음극물질로써 루테튬(Ru)을 주로 사용하여 동일한 용량의 전해 커패시터에 비하여 에너지밀도를 5배 이상 향상시켰다.<sup>10)</sup> 한국에너지기술연구원에서는 양극소재를 알루미늄으로 하고 음극소재를 활성탄소를 사용하는 하이브리드 커패시터 신기술을 국가지정연구실 연구과제로 수행한 바 있다.<sup>11)</sup> 본 신기술의 핵심은 300 V까지의 단위 셀 전압과 100°C 정도의 사용온도에서도 안정한 전해액을 조성하는 것과 양극에서의 산화막을 균일하게 형성하면서도 큰 비표면적을 만들어 축전용량을 크게 증가시키는 소재기술에 있다.

Fig. 5는 전해 커패시터와 전기화학 커패시터, 2차전지 등이 고유하게 갖는 에너지밀도와 동력밀도의 특성영역을 표시한 그림이다.

**5. 전기화학 커패시터의 활용**

전기화학 커패시터의 활용은 방전시간에 따른 방전 전류의 정도에 따라 Table 3에서와 같이 크게 네 가지 정도로 구별할 수 있다. 방전시간이 매우 짧은 펄스파워용으로는 매우 큰 방전전류를 낼 수 있어야 하는데 전기화학 커패시터의 내부저항은 전지에 비하여 매우 적으므로 가능하다. 실제로 약 600 g의 중량을 가진 2.7 V-3000 F급의 상용화된 전기이중층 커패시터의 경우 1 kHz에서의 내부저항 값이 약 0.5 mili-Ohm을 갖으며 500 Amp 이상의 방전전류를 2-3초간 발생할 수 있다. 이와 같이 전기화학 커패시터들은 저전압에서도 대전류 충전방전이 가능하며, 충전 효율이 95%이상으로 매우 높고, 충전반복사용 수명이 매우 길며 무공해성 소재를 사용하는 축전장치이므로 그 특징을 살려서 활용할 수 있는 분야가 매우 광범위하다.

특히, 차세대형 무공해 전원인 연료전지 시스템이나 태양전지 시스템에서 전력저장용으로 사용하게 되면 부하 측에서 발생할 수 있는 순간과부하를 감당할 수 있는 부하조절 능력이 탁월하다. 예를 들어, 연료전지 시스템의 운전개시에 필요한 부속장치의 가열을 비롯하여 펌프, 밸브 등의 부품 작동에 소요되는 전력을 전기화학 커패시터로써 감당할 수 있다. 또한, 운전 중에 정격출력보다 훨씬 큰 과부하를 신속히 충족시켜 주어야 할 경우에는 연료전지 스택(stack)의 출력만으로는 만족시킬 수 없거나 수십 초 내지 수 분 이상이 소요되므로 2차전지보다 동력밀도가 큰 전기화학 커패시터를 사용하는 것이 고효율 연료전지 시스템을 구성할 수 있는 훌륭한 방법이 된다.

각종 전자제품의 경우 메모리 칩(chip)의 백업(back-up)용으로써 코인(coin) 모양으로 제작된 5 F급 미만의 소용량 전기이중층 커패시터를 이미 많이 활용하고 있지만 앞으로는 점점 대응

Table 3. 전기화학커패시터의 기능별 활용분야

| 기능별 분류        | 방전시간      | 활용분야  |
|---------------|-----------|---|
| Pulse Power   | 0.001초 이하 | High Energy Pulse Power Laser System, Military/Medical Equipment              |
| Bridge Power  | 수 초 이하    | Internal Combustion Engine Starter Industrial Motor Starter, Air-Bag/Actuator |
| Load Leveling | 수 분 이하    | EV/HEV, Fuel-Cell System, Power Line Network                                  |
| Standby Power | 수 시간      | Solar-Cell system, Memory Protection  |

량 고전압화된 모듈 내지 뱅크(bank) 형태로 전기화학 커패시터가 많이 활용될 전망이다. 예를 들면 태양전지를 이용한 차선 표시 및 도로표시등의 경우 5V-수 십F급 이상이 활용되며 직류 전원 용접기의 경우 수 십V-수 천F급 이상이 사용된다. 아울러, 내연기관 엔진과 전기모터 구동방식이 같이 내장된 하이브리드 차량(HEV: Hybrid Electric Vehicle)의 경우 300-400 V 정도의 전압을 유지하며 정격출력 20-40 kW의 출력을 낼 수 있는 전기화학 커패시터 뱅크가 장착된다. 이러한 HEV 차량의 경우 2차전지로서는 불가능한 브레이킹 에너지 재생(breaking energy regeneration) 기능을 가지게되며 내연기관 엔진이 최고 효율점에서 연속운전이 가능해 지므로 약 40%이상의 연비향상 효과가 있는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

시스템 전압이 수 백 Volt급으로 고전압이며 고주파 영역에서 사용해야하는 경우 지금까지 사용하고 있는 전해 커패시터를 대체하여 하이브리드 커패시터를 UPS, 전력변환기, 대형 전동기 구동회로 등에 활용하게 되면 기기나 장치를 보다 소형 경량화 할 수 있으며 신뢰성을 높일 수 있다. 현재 미국의 경우, 이러한 종류의 하이브리드 초고용량 커패시터는 군사용과 인공위성 용 등으로 채택하여 이미 사용하고 있다. 그 밖의 전기화학 커패시터의 활용분야는 Table 4에 표시하였다.

전기화학 커패시터의 세계시장규모를 사용전압별로 구분하여 Table 5에 표시하였다.<sup>13)</sup> 지금까지의 수요는 12 V 미만의 저전압 소용량형이 주축을 이루고 있지만 향후에는 48 V이상 대용량형으로 진행될 것을 예측하고 있으며 2006년도의 세계시장

Table 5. 전기화학 커패시터의 세계시장 규모

| 전압 년도      | 2002 | 2003 | 2004  | 2005  | 2006  |
|------------|------|------|-------|-------|-------|
| 12V 이하     | 378  | 412  | 476   | 693   | 1,006 |
| 12-48V     | 63   | 70   | 80    | 91    | 112   |
| 48V 이상     | 96   | 155  | 498   | 908   | 1,275 |
| 합계(백만US\$) | 536  | 637  | 1,054 | 1,692 | 2,394 |

규모는 약 24억달러 규모를 예상하고 있다. 그러나, 전기화학 커패시터 신기술의 개발 성과에 따라서는 예상치를 훨씬 상회할 가능성이 있다. 이는, 기존의 전해 커패시터와 2차전지 수요를 용도와 특성영역에 따라 신기술 전기화학 커패시터가 대체할 수 있기 때문이다.

### 6. 맺음말

대부분의 전력전자회로 설계자나 전기기기 제작자들에게는 아직까지는 생소한 '전기화학 커패시터'에 대한 소개를 간략히 하였다. 전기화학커패시터는 사용하는 소재와 성능특성에 따라 그 종류와 형식이 점차 다양하게 세분화되고 있는 상황이다.

이에, 기존의 전기에너지 저장 기기인 전지나 콘덴서(커패시터)만을 활용하는 설계나 제작을 고집하여 재래의 기술제품을 생산하여서는 첨단 신기술을 적용한 선진국 제품과의 세계 기술시장에서 이길 수 없음을 쉽게 알 수 있다. 첨단 소재기술에

Table 4. 전기화학 커패시터의 활용 용도별 제원 분야

| 분야                | 품 명   | 제 원 범 위   |
|-------------------|---|---|
| 가전분야              | VCR   | 0.047~1 F, 5.5 V, 3 min~1 hr  |
|                   | Audio System                                      | 1 F, 5.5 V, 4 days, Micro PD1704C28 chip, PD1709STC127 chip   |
|                   | Video Camera                                      | 0.022 F, 5.5 V, 1 hour, 64KCMOS SRAM  |
|                   | Flash Camera                                      | 0.043~0.056 F, 5.5 V, 1 hour  |
|                   | CATV  | 1 F, 5.5 V, Micro 170886-023 chip, DSS IC (TV channel memory)   |
| 컴퓨터분야             | SRAM  | 1 F, 5.5 V, ~1 sec, 64KCMOS SRAM  |
|                   | Sequence Controllers                              | 1 F, 5.5 V, 64 KCMOS SRAM, 256 CMOS SRAM, 1 Mega CMOS SRAM  |
|                   | Computer Bridge Power                             | 0.01~1.5 F, 5.5~11 V, 50~70 gr.10~25 cc, lap-top computer(UPS)  |
| 차량용               | Actuator  | 11 V, solenoid valve  |
|                   | Electric Power Steering                           | 25~50 F, 16 V, 1 yrs (fuel saving)  |
|                   | Engine Starting(ICE)                              | 60 F, 16 V (Battery saving)   |
|                   | Electric Vehicle                                  | 100-200 F, 300 V (Hybrid EV load leveling)  |
|                   | Cappattery  | Capacitor + Battery, 65 F, 16 V (1/3 of Battery size)   |
| 산업용               | Motor Starter                                     | 10~200 F, 1~100 V, 1~5 kg, 0.1~10 Litter<br>Large cranking circuit for large ocean-going vessels, Dissel electric locomotives |
|                   | Amusement Park Ride                               | 470 V, 2.3 V, Rapid Charging System   |
|                   | UPS   | ~300 VDC, ~10 F, High frequency   |
|                   | Welding Machine                                   | ~20 VDC, ~1000 F, High current  |
| 군사 / 우주용          | Weapons System                                    | 0.01~1.5 F, 5.5~11V, 50~75 gravitafinal accl.,<br>10~25 cc volume (in missile for after firing)                               |
|                   | Satellite Data Transmission                       | Solar Energy → Energy Storage → Pulse Power Supply System (under development)   |
| 기타                | Taxi Meters                                       | 0.22 F, 5.5 V, 12 hours   |
|                   | Solar Battery                                     | 0.22 F, 5.5 V, 1 hour   |
|                   | Cellular Phone                                    | 1-5 F, 5.5 V, days  |
|                   | Automotive  | Ignition System, Air-bag Atuator, Catalitic Device Preheating   |
|                   | Medical/Food                                      | Defibrillators, Sterilization   |
| High Power System | Pulse Power Laser System, Plasma Switching device |   |

바탕을 두고 하루가 다르게 급속히 발전하고 있는 신기술 분야인 전기화학 커패시터 기술에 대한 깊은 관심과 기술개발을 위한 집중적인 투자 그리고 체계적인 연구개발 노력이 지속되면, 기술선진국들이 우리보다 약 5-10년의 앞서 확보한 핵심원천기술을 약 4-5년 이내에 확보할 수 있으며 고부가가치 전기전자부품의 국산화와 세계시장에서의 경쟁력이 확보될 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 고(총설)는 산업자원부가 지원하고 차세대 성장동력 이차전지 사업단에서 지원하는 '이차전지 상용화 기술 개발사업' 과제의 연구비 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사를 포함합니다.

### 참고문헌

1. Wikipedia, the free encyclopedia, from <http://en.wikipedia.org>.
2. Chang, Raymond, *Chemistry*, 7th Edition, Mc Graw Hill (2002).
3. Allen J. Bard and Larry R. Faulkner, "Electrochemical Methods, Fundamentals and Application", John Wiley & Sons. (2004).
4. Paul Delahey, "Double Layer and Electrode Kinetics", Interscience Publishers, Division of John Wiley & Sons. (2004).
5. B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors-Scientific Fundamentals and Technological Applications", *Kluwer Academic/Plenum Publishers* (1999).
6. R. J. Brodd, D. H. Doughty, J. H. Kim, M. Morita, K. Naoi, G. nagasubramanian, and C. Nanjundiah, "Electrical Capacitor and Hybrid Power Sources", *The Electrochemical Society, Inc.* PV2002-7 (2002).
7. The 9th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Florida Educational Seminars, Inc. (1999).
8. Atusushi Nishino, Katsuhiko Naoi, "Technologies and Materials for EDLC and Electrochemical Supercapacitors", CMC Publishing Co., Ltd, 2002, Japan.
9. 김종휘, 진창수, 신경희, "차세대형 고출력 전기화학 축전기 기술개발", *한국에너지기술연구원 연구보고서* (2002).
10. Frank M. Delnick, David Ingersoll, Xavier Andrieu, Katsuhiko Naoi, "Electrochemical Capacitors II", *The Electrochemical Society, Inc.*, PV96-25 (1996).
11. 김종휘, 진창수, 신경희, "고출력 고전압 단셀형 Hybrid Supercapacitor 개발", *한국에너지기술연구원 연구보고서* (2005).
12. (주)기술정보협회(일본), "[자동차용]전기이중층커패시터를 이용하는 2차전지의 고에너지밀도화·고출력화기술", *일본인쇄(주)* (2005).
13. World Ultracapacitor Markets, Frost & Sullivan (2003).