

## 도시철도시스템의 에너지 저장방식에 관한 연구

이 한민<sup>1)</sup>, 김 길동<sup>2)</sup>, 이 장무<sup>3)</sup>

### A Study on the Energy Storage Mass of Urban Transit System

HanMin Lee, GilDong Kim, ChangMu Lee

**Key words** : Regenerative energy(회생에너지), Saving energy(에너지절감), Supercapacitor(슈퍼캐패시터), Energy storage system(에너지저장시스템)

**Abstract** : Energy Saving is one of worldwide emerging issues. These days, applicable techniques of railway vehicle's regenerative energy are investigating in worldwide railway industries. Energy saving methods are "Downsizing energy loss" and "Re-utilizing kinetic energy". Useful plans for Downsizing energy loss are "adjusting operation table" and "optimizing running pattern". Furthermore, regenerative energy that is produced with decreasing speed and stoping, is an important element with reducing vehicle's weight, raising equipment 's efficiency, decreasing running resistance and re-configurating running pattern. Sustainable energy storage mass : Flywheel, EDLC(electrical double layer capacitor) and Secondary battery are applied in overseas, but these cases are not reported within the country. This research is reported for problems and economical validity that comes from by installing sustainable regenerative energy storage system in korean railway industries.

### 1. 서 론

전 세계적으로 에너지의 보전과 재활용의 방안 및 새로운 에너지의 개발을 위한 여러 가지의 연구들 가운데 제3의 에너지원의 개발과 에너지의 소모를 줄이는 전력변환장치 및 시스템의 효율증설을 위한 노력과 더불어 에너지의 재활용을 위한 각종 방안들이 고려되고 있으며, 에너지 재활용의 방안 중에서 소모성의 에너지를 저장하는 기술의 발전이 가장 눈부시다고 할 수 있다. 그 중에서 철도시스템의 경우는 에너지의 종류에서도 디젤, 석탄, 가스, 전기 등 다양한 에너지를 활용하고 있는데, 그중에서 가장 많이 활용되는 에너지는 전기에너지를 사용하는 전동차가 주류를 이루고 있는 실정이다. 도시간을 잇는 고속전철과 도심의 교통을 해소하는 통근형 전동차 지역의 연계를 위한 경량 전철 등이 그 주류를 이루는 시스템이다.

철도 시스템은 에너지의 소모를 통해 추진력을 얻고 이를 기반으로 차량의 동력을 사용하는 시스템으로 제동시에 가선으로의 회귀하는 회생의 에너지를 발전함으로 제동력과 회생전기에너지를 생산하는 특징이 있다. 따라서 이미 여러해 전부터 국외의 선진국에서는 회생에너지의 활용을 위한 여러 가지의 방법들을 연구하였고 그중에서 차량 및 변전소와 역사내부와 역과 역 사이에서 차량의 회생에 의한 전기에너지를 저장에 의한 소모를 배제하고 재활용하기

위하한 에너지 저장방식의 연구로 플라이휠방식(Flywheel)과 이차전지를 이용한 방식(Lithium-ion Battery), 슈퍼캐패시터(EDLC: Electric Double Layer Capacitor)를 이용한 방식, 그리고 초전도 에너지저장장치(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)를 이용한 저장방식이 각국에서 검토 및 연구 개발 중에 있다.

아직까지는 기초적인 연구와 적용을 위한 단계에 불과 하지만 반도체 기술의 진보와 마이크로프로세서의 기술 및 화학기술의 진보에 힘입어 점차적으로 개발의 속도가 빨라지고 있는 실정이다. 현재까지는 그 주력에 에너지의 밀도 및 충방전 효율, 응답특성 그리고 유지보수의 관점에서 독일의 Siemens와 일본의 미쓰비시, 도시바를 중심으로 한 슈퍼캐패시터를 이용한 방법과 영국, 독일 일본 및 미국을 중심으로한 플라이휠의 방식 및 초전도 에너지저장장치를 중심으로 한 연구가 좀 더 활발히 연구되고 있다고 할 수 있다.

- 
- 1) 한국철도기술연구원  
E-mail : hanmin@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5423 Fax : (031)460-5749
  - 2) 한국철도기술연구원  
E-mail : gdkim@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5710 Fax : (031)460-5749
  - 3) 한국철도기술연구원  
E-mail : cmlee@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5421 Fax : (031)460-5749

이차전지의 경우 대규모의 시설이 필요로 하기 때문에 차량의 연구보다는 산업제품을 위한 연구가 주류를 이루지만 차량의 에너지 저장을 위한 연구 또한 진행되고 있는 실정이다. 이러한 에너지 저장 방식들 중에서 플라이휠 저장방식이나 초전도 에너지 저장방식의 경우 저장효율 및 응답특성은 우수하지만, 시스템 개발 및 제작비용이 높아 시스템 적용에 다소 불리하고 기술적 접근 또한 쉽지 않은 실정이다. 특히 플라이휠의 경우는 현재 1000RPM대의 중저속의 대용량의 방식에서 30000RPM대의 초고속의 방식으로 발전하는 추세에 있으며, 이러한 초고속을 위하여 회전체의 재질과 베어링의 기술들이 필요한 실정이며, 초전도 플라이휠의 경우는 초전도용 재질과 헬륨의 초저온을 위한 재료기술이 필요한 실정이다. 이차전지의 경우는 대용량화를 위하여 대형 화학회사를 기반으로 연구가 진행 중이지만 온도와 환경에 민감하고 유지보수를 위한 여러 가지의 시설들을 필요로 하는 실정이다. 전기 이중층 캐패시터로 불리는 슈퍼캐패시터의 경우는 용량의 대형화를 위한 활성탄소의 흡착의 방식과 결정의 미세화를 추진하고 있으며, 전압 내량의 증대를 위하여 전극재료의 고용량화를 위하여 연구되고 있는 실정이다.

이러한 여러 가지의 에너지 저장방식 중에서 시스템의 설치방식과 설치공간, 유지보수의 관점에서의 운영의 효율화를 검토할 경우 슈퍼 캐패시터의 적용에 좀 더 무게가 실린다고 할 수 있으며, 에너지의 응답성능과 에너지밀도 및 기술의 진보성을 고려한다면 초전도 에너지방식의 적용에 무게가 실린다고 할 수 있다. 또한 설치공간적인 제약이 없다면 플라이휠 방식의 적용이 조금 더 시스템에 어울린다고 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 이동성의 특성과 대용량 에너지의 회생의 특성을 갖는 철도시스템에 적용을 고려하여 에너지저장방식을 기반으로 에너지 저장장치에 관하여 각 장치의 저장방식 및 특징에 대해 연구하여 가장 효율적인 저장매체를 선택하고자 한다.

### 1.1 플라이휠 에너지 저장시스템

플라이휠 에너지 저장시스템은 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 장치로 배터리와 같은 화학적 에너지 저장장치에 대비되는 기계적 에너지 저장방식 (Electro-mechanical Battery)이다.

플라이휠 저장장치는 최근의 자석이나 윤활유등의 재료의 진화, 고속 모터나 반도체식 전력변환장치 등의 저가격화가 진행되는 것으로 전력회생용도의 분야에 있어서 에너지절약화의 가능성에 대해 높아지고 있으며, 전기화학 반응을 하는 2차 전지에 비하여 급속 충방전을 반복해도 화학적 노화가 없으며 긴 수명 및 야외의 온도환경에 따른 성능저하나 노화가 없는 장점이 있다.

또, 전기 이중층 캐패시터에 비교하여 에너지 밀도 및 전력밀도가 크고, 야외의 온도 환경에 따른 성능저하나 노화가 없는 장점이 있으나 종래의 플라이휠 식의 과제에 있어서 다음과 같은 개선 과제를 포함하고 있다.

- 구르는 베어링 등의 피로보수 부품이 많다.
- 냉각장치 등의 부속기기를 필요로 한다.
- 비교적 무겁다.
- 고속회전시의 공기저항이 크다.
- 장시간 에너지 보존이 곤란하다.
- 외부진동에 따른 베어링 응력의 완충을 필요로 한다.
- 전력변환 제어를 필요로 한다.
- 안전대책이 필요하다.

또한 마찰이 작은 고효율 베어링의 구현을 위해 축 방향으로 영구자석을 사용하고 반경 방향으로 작용하는 힘을 잡아주기 위해서 자기 베어링을 사용하는 연구도 진행되고 있으나 고정밀도를 갖는 제어장치가 별도로 필요하게 되며 제어가 복잡하게 된다.

에너지 저장시와 회생시의 효율은 사용하는 모터/발전기에 종속적이며 따라서 고효율 모터를 사용하여야 하는 부담을 안고 있다.

따라서 최근 베어링 손실에 관한 문제점을 해결하기 위한 노력으로 덩어리형 초전도체 위에서의 영구 자석의 자기적 부상력을 이용한 플라이휠 에너지 저장시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 초전도 자기부상 베어링을 사용할 경우 에너지 손실이 2[%/day]로 매우 낮은 것으로 보고되고 있다.

### 1.2 초전도 에너지 저장장치 (SMES)

초전도 에너지 저장(SMES)시스템은 초전도마그네트 에 전류를 흘려 발생되는 자기에너지로 전력을 저장하는 새로운 개념의 전력저장 방식이다.

즉 인덕턴스  $L[H]$ 인 초전도 마그네트에 직류전류  $I[A]$ 를 흘리면 발생되는 자기에너지  $LI^2/2[J]$ 를 이용하는 기술로 에너지 저장요소가 초전도 마그네트이기 때문에 효율이 높고, 에너지의 저장, 방출을 신속히 할 수 있는 큰 특징이외에도 다음과 같은 장점이 있다.

- 유효, 무효전력을 각각 제어 할 수 있다.
- 수명이 반영구적이다.
- 환경 친화적이다.

현재 소용량 SMES까지는 현재의 기술수준으로 개발 가능한 것으로 예상되고 있지만, 향후 중대형 SMES시스템을 개발하기 위해서는 저 교류손실의 대용량 도체, 대용량 초전도 마그네트 제작 및 보호 및 대용량 전력 변환 등과 같은 기술개발이 요구되고 있다.

따라서 중대형 SMES시스템을 실용화 하는데까지는 아직도 상당한 시간이 필요할 것으로 전망된다.

그리고 이와 같은 기술적 측면 이외에도 SMES는 경쟁 기술인 양수발전, 나트륨 유황(NAS)전지, 정지형 무효전력 보상장치(SVC)등과 비교해 볼 때 아직은 가격 측면에서 고가이기 때문에 SMES를 실용화하기 위해서는 성능에 중점을 둔 개발은 물론 저비용화를 목표로 기술 개발이 추진되어야 한다.

대형화를 위한 주요 기술개발의 항목은 다음과 같다.

- (1) 초전도 코일
  - 저 교류손실도체의 개발
  - 고 내전압화
  - 대 전류화 Quench시의 안정화 기술
  - 전자력
  - 단열지지구조, 누설자계 대책
- (2) 영구전류 스위치
  - 대전류 영구전류스위치의 개발
- (3) Quench 보호
  - 자기보호법의 개발
- (4) 영구전류 스위치 전력변환장치
  - 변환기의 대용량화 및 고성능화
  - 저손실 및 다중화 제어기술
- (5) 시스템 기술
  - 최적시스템, 소형화

### 1.3 슈퍼캐패시터 에너지 저장방식

슈퍼캐패시터는 기존 알루미늄 전해 콘덴서에 비하여 비약적으로 용량이 증대되어 최근 들어 고출력 특성과 고에너지 저장능력으로 인하여 전지와 더불어 전기화학 적 에너지 저장장치, 대출력 펄스 파워 및 부하 평준화 용으로 각광받고 있다.

또한 슈퍼 캐패시터는 전지에 비하여 매우 가역적인 반응을 하므로 높은 에너지 효율과 장수명 특성 및 특히 전압이 충전상태에 직선적으로 비례하므로 충전 상태를 직접적으로 측정 가능하여 저장된 에너지의 잔류량을 예측할 수 있다.

일반 캐패시터보다 거대한 용량을 지닌 슈퍼 캐패시터는 1995년에 일본, 러시아, 미국 등에서 상품화 되었으며, 고기능성의 활성탄소 섬유, 고분자 금속 화합물 등의 첨단 신소재 기술의 발전에 따라 그 용량 및 사용범위가 더욱 넓어지고 있어 세계 각국에서 앞다투어 개발을 진행하고 있는 새로운 범주의 캐패시터로 차세대 에너지저장 장치로 각광받고 있다.

보다 효율적인 에너지 저장 및 이용을 위해서 슈퍼캐패시터의 에너지 밀도를 높이는 연구와 자기방전 및 누설 전류의 감소를 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

슈퍼캐패시터의 기본구조는 다공성전극(Electrode), 전해질(Electrolyte), 집전체(Current Collector), 격리막(Separator)으로 이루어져 있으며, 단위 셀전극의 양단에 수 볼트의 전압을 가해 전해액내의 이온들이 전기장을 따라 이동하여 전극표면에 흡착되어 발생하는 전기 화학적 메카니즘을 작동원리로 한다.

슈퍼캐패시터는 기존 캐패시터와 2차전지의 중간적인 저전압 고용량의 특성을 가지고 있으며, 충방전의 특성은 2차전지보다 월등하지만 에너지밀도는 2차전지보다 낮은 특성을 가지고 있다.

슈퍼캐패시터에 사용되는 전극 및 메카니즘에 따라 크게 3가지로 구분 되는데

① 활성탄소를 전극으로 사용하고 전기이중층 전하 흡착을 메카니즘으로 갖는 전기이중층 캐패시터(EDLC, Electrical Double Layer Capacitor)

② 금속산화물과 전도성고분자를 전극재료로 사용하고 유사용량(pseudo-capacitance)을 메카니즘으로 갖는 금속산화물 전극 Pseudocapacitor (Redox 캐패시터라고도 함)

③ EDLC와 전해캐패시터의 중간적인 특성을 지닌 하이브리드 캐패시터로 나누어 진다.

Pseudocapacitor는 EDLC에 비해 축전용량이 3~4 배 정도 크지만, 고가의 금속산화물을 전극활물질로 사용한다는 단점과, 제조상의 난이도, 높은 ESR(equivalent series resistance) 등의 문제점을 가지고 있고, 하이브리드 캐패시터의 에너지 밀도는 EDLC 보다 높을 수 있으나, 충방전 등의 특성들이 이상적이지 않고 비선형성으로 인해 보편화되지 못하고 있다.

따라서 활성탄소를 전극으로 사용하여 환경친화적 일뿐만 아니라 충방전이 용이하고 제조상의 이점을 지닌 EDLC가 주류를 이루고 있다.

슈퍼캐패시터의 최대 해결해야 할 문제점은 에너지 밀도를 높이는 것이다.

구성재료의 무게 최적화를 통하여 중량 감소에 의한 특성향상 연구는 기본적으로 행하여지고 있으며, 전극 재료의 고용량화와 전극의 고밀도화 및 제조공정의 개선으로 에너지 밀도를 향상시키는 연구가 계속되고 있다.

활성탄의 기공의 평균크기와 분포특성도 흡착이온의 이동도에 영향을 주어 출력특성과 밀접한 관계가 있다.

따라서 전극재료의 특성을 제어하여 용도에 따른 차

별화된 특성을 갖는 전극재료 개발 연구가 필요하다. 현재 일반적으로 사용되는 슈퍼 캐패시터의 활성탄은 비표면적이 1500~3000m<sup>2</sup>/g 이며 평균 기공크기는 10~20Å 이 개발되어 사용되고 있다.

최근에는 비표면적은 낮으면서도 용량 특성은 향상된 비다공성 탄소재료의 출현으로 성능이 향상된 제품이 가능하게 되었다.

### 1.4 이차전지를 이용한 에너지저장방식

전지는 크게 일차전지와 이차전지로 구분하여 볼 수 있다. 일차전지란, 오늘날 전지의 효시라고 할 수 있는 망간 건전지를 비롯해 알카라인 전지, 이산화망간 리튬 전지, 공기아연전지, 열전지 등 한번 사용하고 버리는 전지를 말한다. 이에 반해 이차전지는 전기화학 반응의 가역성을 이용하여 전기에너지를 화학에너지로 저장하고 다시 전기에너지로 저장과 방출을 반복할 수 있도록 한 화학전지의 일종을 뜻한다. 이차전지는 화학 전지 중 1회 사용으로 끝나지 않고 재충전 과정을 거쳐 수십 회 이상 재사용이 가능한 형태의 전지. 즉, 쉽게 말하면 충전지라고 할 수 있다.

현재 산업화 되어 있는 4대 이차전지로는 연축전지, Ni-Cd, Ni-MH, 리튬 이차전지를 들 수 있다. 그 중에서 가장 앞서 개발된 것은 연축전지. 연축전지는 현재 대형화 추세로 가고 있으며 자동차용 축전지 및 밀폐형 납산 전지 등으로 특화된 시장을 형성하고 있다. 이차전지 중 비교적 오랜 역사를 갖고 있는 Ni-Cd 이차전지는 양 음극으로 각각 Ni, Cd 수산화물을 사용하는 수용액계 이차전지로서 전압 1.2V를 형성한다. 이 전지는 대전류 방전에 강하고 가격이 저렴해서 다양한 분야에 사용되고 있으나 고성능 이차전지 개발에 밀려 점차 시장이 축소되고 있다. 1993년에 등장한 Ni-MH 이차전지는 양 음극으로 각각 Ni 수산화물, 수소저장합금을 사용하는 수용액계 이차전지다. Ni-Cd 이차전지와 마찬가지로 1.2V의 전압을 갖는 이 전지는 Ni-Cd 이차전지 시장을 대체하면서 각광을 받았지만 곧이어 개발된 리튬이온 이차전지에 밀려 시장점유율이 크게 확대되지는 못했다. 수계 전해질을 사용한 이차전지로서 전압이 2.0 이하인 연축전지, Ni-Cd, Ni-MH와는 달리, 유기계 전해질을 사용한 리튬 이차전지는 3.0~3.8V의 고전압 전지다. 리튬 이차전지는 전지의 충방전 반응에 리튬이 금속, 이온 등의 형태로 관여하는 이차전지의 종류를 통칭하는 용어인데, 일반적으로 리튬이온 이차전지를 일컫는다. 리튬이온 이차전지는 일반적으로 Li 이온을 저장·제거할 수 있는 전기전도성 매질을 전극으로, Li 이온 전도성 매질을 전해질로 하는 화학전지의 일종을 말한다. 이 전지는 지금까지 개발된 어떤 전지보다 에너지 밀도가 우수하고 전압이 높기 때문에 1994년에 시장에 등장한 이래 휴대폰, 노트북 등 모바일 어플리케이션에 응용되면서 폭발적인 성장세를 보이고 있다. 그러나 대전류 특성이나 과충 방전에 약하다는 측면에서 취약점도 없지 않다. 최근에는 고분자 매질을 전해질 층으로 사용한 리튬 이온 폴리머 이차전지가 등장, 일부 제품에 채용되고 있는 추세다.

## 2. 에너지 저장방식의 장단점 비교분석

에너지의 재활용을 위하여 각국에서 저장방식으로 플라이휠방식과 이차전지를 이용한 방식 그리고 슈퍼 캐패시터를 이용한 방식이 세계의 여러 나라에서 연구되어 왔으며, 그중에서도 철도차량과 철도시스템에 전

력을 공급하는 변전소에 사용되는 회생시의 전기 에너지의 저장을 위하여 여러 가지 저장장치의 장단점을 본 절에서는 비교하고자 한다.

에너지의 축적매체의 효율적인 면에서 이차전지를 이용한 방식 그리고 슈퍼캐패시터, 연료전지, 플라이휠 등을 비교한 자료가 일본 철도총련의 2002년 보고 자료에 다음과 같이 나타내바 있다.

각 매체의 경우는 일본 철도 총련에서 개발 중인 사양을 기반으로 비교 검토한 자료로서 세계적인 추세라고는 볼 수 없지만, 단시간적인 에너지의 저장매체의 효율적인 비교로서는 플라이휠과 슈퍼캐패시터가 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

다음의 비교자료는 유지보수 및 개발방향 및 향후 개발의 과제부분에서 비교 검토한 자료이다.

표 1 각종 에너지 축적매체의 개요

방식	플라이휠	이차전지	슈퍼 캐패시터	연료전지
특징	고회전에 의해 작은 것으로도 큰 에너지축적이 가능	가동부가 없다	가동부가 없다	가동부가 없다
		에너지밀도가 크다	파워밀도가 크다	
		전압변동 폭이 작다	저 가격 가능	
개발 과제	축수의 개발	파워 밀도 증대	에너지밀도 증대	시스템이 복잡
	손실저감대책 (특히 풍손)	수명증대	전압변동 대책	입수성이 어렵다
내구성	약 20,000h 정도	2000~5000 사이클 (DOD=50%에서)	이론적 무한	연속 40,000h
		약 5년	실제는 사용법에 따라 10~15년	
개발 비용	중	중	중	고
개발 동향	일부변전소 실적 (런던지하철)	Ni-H: 하이브리드 자동차에 실용	HEV용 개발중	각 자동차 메이커
	철도차량에서 시험 (독일철도)	Li+: 자동차 메이커에서 개발중	철도차량에서 시험 (독일철도)	2003~2005년에 시판차 판매예정
	하이브리드 버스에 사용 (오란다CCM)		부지내 선로 실험 (RTRI)	

플라이휠의 경우 회전부분 및 진동의 발생부분이 많기 때문에 유지보수를 위한 부분이 단점으로 지적되고 있으며, 이차전지의 경우는 짧은 수명과 유지보수를 위한 부분이 많다는 단점이 있다.

연료전지의 경우는 연료전지를 위한 시스템이 복잡하게 구성되어야 하며 설치를 위한 장소의 문제점이 단점으로 지적되고 있다.

개발 비용의 측면에서도 대용량의 플라이휠장치와 연료전지의 비용이 가장 많이 드는 것으로 알려져 있으며, 이차전지의 비용 또한 현재 낮아지고 있는 추세에 있지만, 아직까지는 슈퍼 캐패시터에 비하여 2~3배 이상이 드는 것으로 알려져 있다.

개발의 동향을 보면 플라이휠의 경우는 군사용의 목적과 전기자동차용의 목적으로 구분되어 개발되어지고 있으며, 이차전지의 경우는 차량의 탑재를 위한 용도로 개발되어지고 있는 실정이다.

슈퍼캐패시터의 경우는 변전소 및 역간의 전원 불균형 방지 및 에너지 저장을 위한 방향으로 개발되어지고 있다.

연료전지의 경우는 추진 시스템의 변경을 목적으로 연구되고 있으며 아직까지는 차량에 설치하여 운영한 실례는 없는 것으로 알려져 있다.

파워밀도에 비하여 에너지 밀도를 그린 Ragone diagram은 다른 저장 기술들을 비교하고 다른 차량에서 그들의 적합성을 평가하는데 편리한 수단이다. 그림 1은 Ragone diagram에서 상대적 저장 기술들의 위치와 충전시간들을 보여주고 있다. 그들은 상응하는 제동시간과 함께 열차유형에 의해 분류되어진다.

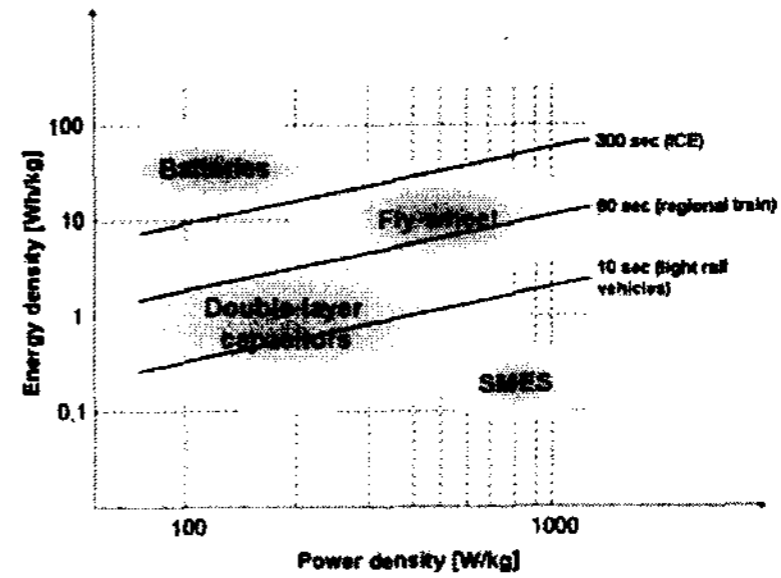


그림 1 Ragone diagram 와 충전시간

배터리는 매우 높은 에너지 밀도를 가지고 있다. 하지만 매우 긴 충전시간을 갖게하는 낮은 파워 밀도를 가지고 있다. 니켈-메탈 하이브리드 배터리는 상당한 파워밀도를 가지고 있지만, 요구하는 수명을 만족시키지 못한다. 그러므로 배터리는 현재 차량용 저장을 위해 우선적인 선택대상이 아니다. 플라이휠은 높은 파워와 높은 에너지 밀도 둘 다 가지고 있다. 그리고 특히 regional train에 거의 모든 상황이 이상적으로 맞는다. 최근에 상당히 발전해온 슈퍼캐패시터는 특히 도심경량전철에서 철도 적용성을 만족시키고 있다. SMES는 매우 낮은 파워 낮은 에너지 타입이다.

#### 4. 결 론

현재까지는 그 주력에 에너지의 밀도 및 충방전 효율, 응답특성 그리고 유지보수의 관점에서 슈퍼 캐패시터를 이용한 방법과 플라이휠의 방식이 좀 더 우위에 있다고 볼 수 있다.

하지만 국내의 기술적 발전 방향과 개발비용과 제작비용을 검토하면 플라이휠이 많은 개발 비용이 소요된다. 또한 고속 회전 및 베어링의 기술적 접근이 쉽지 않다는 단점이 있다. 따라서, 설치방식과 설치 공간, 유지보수, 개발비용, 향후의 발전방향과 기술적 우위를 선점한다는 관점과 운영의 효율화를 놓고 검토할 경우 에너지 저장방식으로는 슈퍼 캐패시터를 사용한 에너지의 저장방식의 적용이 가장 적합할 것으로 분석된다.

## References

- [1] 2002. 11. 초전도를 이용한 중소형 전력저장 장치에 관한 보고서, 한국전기연구원,
- [2] Supercapacitor 의 특성 및 응용, 한국전기연구소 전지연구그룹 보고
- [3] 2004.6. 에너지 절약 기술동향, 제 31호
- [4] 2005.2. 전력저장기술의 최근의 동향, 철도와 전기기술 VOL.16 No.2,
- [5] 2002.4. 초전도 에너지저장 시스템 기술개발 동향, 전력전자학회지 제7권 제2호,
- [6] 2004. Contact-wire-less Tramcar using Rechargeable Lithium Ion Battery, Japanese Railway Engineering no.152,
- [7] 전력리사이클차량 - 가선과 충전지의 하이브리드형 전차, 철도의 미래를 향한 연구개발, RRR 2005.7
- [8] 전전기브레이크의 기술동향, 철도차량과 기술 No.74
- [9] 회생 브레이크와 에너지, 철도차량과 기술 No.78