

미니트램 차량을 위한 탄소 나노소재 기반 하이브리드 커패시터 개발

강석원*, 한수현**, 정락교*, 박지현*, 전성찬**
한국철도기술연구원*, 연세대학교**

Development of Carbon Nanomaterials-based High-Energy-Density Hybrid Capacitors for a Mini-Tram Vehicle

Seok-Won Kang*, Su-Hyun Han**, Rag-Gyo Jeong*, Ji-Hyun Park*, Seong-Chan Jun**
Korea Railroad Research Institute*, Yonsei University**

Abstract - 미니트램(Mini-Tram)의 에너지 공급시스템은 유도급전(IPT: Inductive Power Transfer) 기반의 무선급속충전(Wireless High Speed Charging) 및 슈퍼커패시터(Supercapacitor) 기술을 융합하여 구성되었다. 기존의 전기이중층 커패시터(EDLC) 및 하이브리드 커패시터(LIC)는 급속충전을 위한 출력성능은 충족하지만, 낮은 에너지밀도 때문에 미니트램의 활용성을 제한하고 있다. 이에 수송시스템 분야에서의 커패시터의 경쟁력을 향상하기 위해서는 최소한의 공간 및 무게 조건을 충족함과 동시에 에너지 밀도를 극대화할 수 있는 하이브리드 커패시터의 개발이 요구된다. 본 논문에서는 개발 중인 미니트램의 에너지 요구량을 산정하여 매체의 개발목표 사양을 도출하고 이를 실현하기 위한 방안에 대해서 논하고자 한다.

<그림 1>에 보이는 노선은 한국철도기술연구원 내 구축된 시험노선으로, 에너지 소모량 예측을 위한 운영조건은 노선상에 5개의 모든 역사에 대해 가속(2.5[km/h/s])~정속(30[km/h])~감속(5.0[km/h/s])의 패턴으로 가장 긴 노선을 1회전 운행하는 경우로 가정하였다. 해석결과, <그림 2>에 보이는 바와 같이 전체 요구 에너지량은 345[Wh]였지만 회생 제동에 의한 에너지 생산(111[Wh])을 고려할 때 실제 소모량은 대략 234[Wh]인 것으로 예측되었다. 이를 한 번의 가속과 감속조건에 대해 최대 운행 거리를 계산했을 때는 대략 1[km]을 주행할 수 있는 것으로 계산되었다.

1. 서 론

미니트램(PRT: Personal Rapid Transit)은 경전철이 미치지 못하는 수송서비스 영역에 대해서 교통약자에 대한 대중교통 분담률을 획기적으로 높일 수 있는 미래형 교통시스템으로 수송 거리(5[km] 이내) 및 시스템 특성(4~6인승 소형 전기자동차 기반)을 고려할 때 고에너지밀도 하이브리드 커패시터의 활용도가 매우 높다고 할 수 있다. 전기구동 차량용 에너지저장 전원의 경우 슈퍼커패시터는 전기이중층 커패시터(EDLC: Electric Double Layer Capacitor)와 리튬이온 커패시터(LIC: Lithium-Ion Capacitor)가 주로 사용되고 있고, 이차전지는 일반적으로 납축전지(Pb Acid Battery)와 리튬이온전지(LIB: Lithium-Ion Battery)가 상업화되어 있다. 하지만 납축전지(~70[Wh/L])와 리튬이온전지(~300[Wh/L])는 높은 에너지밀도를 나타내면서도 불구하고 낮은 출력특성(~400[W/L])과 1,000회 정도의 충방전 횟수로 인해 무선충전 효율 감소와 2, 3년 사용 후의 교체 비용 발생의 문제점이 있다. 전기구동 차량의 긴 주행거리, 높은 무선충전 효율 및 장기신뢰성을 확보하기 위해 기존의 전기이중층 커패시터와 이차전지와외의 장점을 겸비한 하이브리드 커패시터에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 기존의 매체를 활용할 시 시스템의 특성에 따른 매체의 설계가 불가능하기 때문에 시스템 설계의 유연성을 확보하기 힘들다. 본 연구에서는 미니트램 차량의 에너지 매체의 사양을 분석하고, 이를 만족하기 위한 매체의 개발에 활용 가능한 다양한 나노소재 적용 기술을 검토하고자 한다.



<그림 2> 에너지 시뮬레이터에 의한 에너지소모량 예측 결과

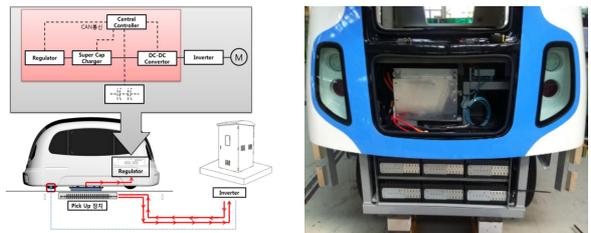
2.2 미니트램의 에너지공급 시스템

미니트램 차량의 에너지공급시스템은 무선급전 기술과 슈퍼커패시터를 활용하여 구성되었다. 정거장 앞 노면에 매설된 급전선로부터 유도된 전력(500[V], 10[kW])은 차량에 설치된 픽업(Pick-up) 장치로 비접촉 방식에 의해 전송되고, 이후 차량에서 정류(135[V]) 및 강압(24[V] 및 80[V])하여 각종 전장품에 에너지를 공급한다. 현재 적용된 커패시터는 하이브리드 커패시터인 LIC(모듈당 45.6[V], 275[F]) 모듈이 3 직렬-2 병렬로 구성되어 적용되었다. 최대전압은 136.8[V]이며, 10%의 연유 전력을 고려할 시 226[Wh]의 에너지를 사용할 수 있다. 아래 <그림 3>은 원내 시험노선에 구축된 무선충전의 개념도 및 미니트램 차량에 설치된 전력공급장치(전력변환장치 및 에너지저장 매체)를 나타낸다.

2. 본 론

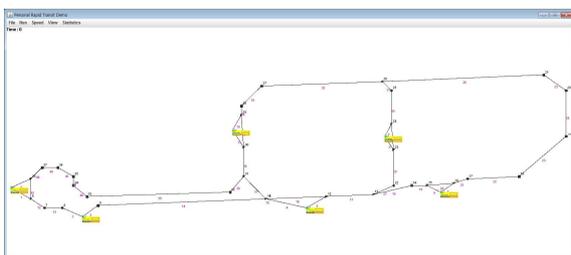
2.1 미니트램의 에너지 소모량 예측

우선 본 연구에서는 철도연 내 시험노선(총연장 506[m])에 대한 에너지 소모량을 분석하여 현재의 에너지 공급 시스템이 이를 충족하는지 분석하였다. 이를 위해 미니트램의 에너지사용량을 예측할 수 있는 Java 프로그래밍 언어를 기반으로 한 에너지 시뮬레이터(Energy Simulator)를 활용하였다. <그림 1>은 에너지 시뮬레이터를 실행했을 때의 초기화면을 나타낸다.



<그림 3> 에너지공급시스템 개념 및 전력공급 장치의 차량 적용

<그림 3>의 차량은 연구개발 과정 중 제작된 시제 1호 차량으로, 향후 차량의 에너지 독립성을 보장하고 실용화 단계에서의 경쟁력 향상을 위해 미니트램 차량의 특성에 맞는 매체의 개발이 필요하다. 아래 <표 1>은 미니트램 차량의 에너지저장 매체의 시스템적 요구사항[2]이다.



<그림 1> 에너지 시뮬레이터의 실행 화면

<표 1> 에너지저장 매체의 시스템적 요구사항

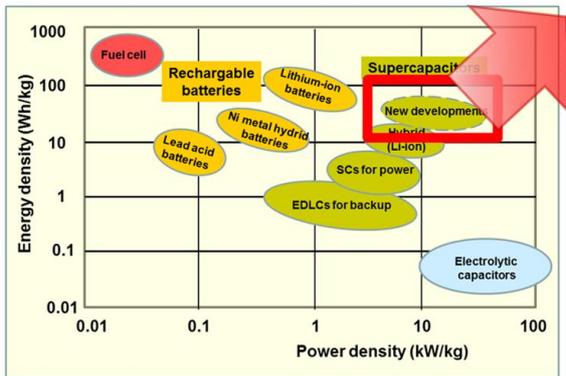
성능지표	단위	요구사항
시스템 용량	Wh	600
요구 전력	kW	10
급속충전 시간	분	< 2
주행거리(1충전 기준)	km	2
차량 적용 공간	L	30
허용 무게	kg	60
운영기간	년	10

2.3 에너지 저장매체의 개발

일반적으로, 슈퍼커패시터는 산화환원반응(Redox)이 없이 전극 표면에서의 전하의 흡탈착에 의한 충방전 특성에 따라 빠른 충방전 속도를 갖고 반영구적으로 쓸 수 있는 전기이중층 커패시터(EDLC)와 Redox 반응을 통해 EDLC에 비해서 낮은 충방전 속도를 갖지만 EDLC 보다 높은 에너지 밀도를 갖는 유사 커패시터(Pseudocapacitor)로 구분된다. 슈퍼커패시터는 전극 소재의 표면적을 증가시키거나 혹은 우수한 전기 전도성(Electric Conductivity)을 나타내는 소재를 활용함에 따라 성능을 향상할 수 있다. 전기 전도성이 우수한 나노 소재는 비표면적의 증가에 따른 큰 폭의 에너지밀도 향상을 기대할 수 있으므로 최근 들어 주목을 받고 있다. <표 2>와 <그림 4>는 본 연구를 통해서 달성하고자 하는 매체의 성능 사양 및 현재까지 개발된 다른 매체와의 성능사양 비교를 각각 나타낸다.

<표 2> 하이브리드 커패시터의 연구개발 목표 사양

항목	세계 최고수준	목표사양	측정방법 및 조건
에너지 밀도 (Energy Density)	14Wh/kg (LIC, FDK)	20Wh/kg 이상	cyclic voltammetry 방법 이용, 액상 전해질 상 측정
출력 밀도 (Power Density)	15kW/kg (LIC)	40kW/kg 이상	cyclic voltammetry 방법 이용, 액상 전해질 상 측정



<그림 4> 하이브리드 슈퍼커패시터 전극 개발 목표 및 성능사양 비교

특히, 탄소나노튜브(CNT: Carbon Nanotubes), 그래핀(Graphene)과 같은 탄소계열 나노 소재가 등장하면서 급격한 기술 향상이 이루어지고 있다. 기존의 높은 출력밀도(Power Density)를 유지하면서도 에너지밀도(Energy Density)를 획기적으로 증가시키기 위해 SWNT(Single Wall CNT), MWNT(Multi Wall CNT) 및 rGO(Reduced Graphene Oxide) 등이 커패시터의 전극소재로 활용하기 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있으며, 최근에는 화학증기증착(CVD: Chemical Vapor Deposition) 기술의 활용을 통한 3D 그래핀 기반의 커패시터가 개발되기에 이르렀다. <표 3>은 기존에 개발된 탄소 나노소재 기반의 커패시터 전극 소재의 사양[3-8]을 나타낸다.

<표 3> 탄소 나노소재 기반 하이브리드 커패시터 개발 현황

	SWNT	Activated Carbon	rGO	3D Graphene Foam	Co-Ni Hydroxides on 3D Graphene Foam
전해질	KOH	Organic Electrolyte	NaNO ₃	KOH	KOH
에너지 밀도 [Wh/kg]	7	36.2	17.8	39.72	62
출력밀도 [kW/kg]	20	11.1	106.08	154.67	10

3D 그래핀 폼(Foam)은 다른 2D 형태의 탄소계열 매체(즉, EDLC)보다 질량 대비 표면적이 높고 다공성 구조이기 때문에 전해질의 이동이

용이해서 높은 성능을 보여준다. 하지만 탄소 나노소재만을 활용한 전극 소재는 20~154.67[kW/kg]의 높은 출력 밀도를 보여줬지만 7~39.72[Wh/kg] 이라는 상대적으로 낮은 에너지 밀도를 나타내었다. 이를 보완하기 위해 유사 커패시터에 사용되는 고전도성 나노입자와 탄소 나노소재 간 복합소재를 활용하려는 시도가 시작되었다. 기존의 탄소 나노소재 표면에 금속 산화물, 금속 수산화물, 전도성 고분자 등을 전기 증착 또는 열 증착을 통해서 부착시켜서 에너지 밀도를 높이려는 연구가 수행되었다. 최근에는 3D 그래핀 폼에 코발트/니켈 수산화물을 붙여서 에너지 밀도를 62[Wh/kg]까지 높이는데 성공하였지만 출력 밀도가 줄어드는 단점이 있었다. 최근까지도 전기화학적 특성이 우수한 2D 물질인 MoS₂(Molybdenum Disulfide) 및 WS₂(Tungsten Disulfide)를 이용해서 고성능의 슈퍼 커패시터를 개발하는 노력이 계속되고 있다.

3D 그래핀 폼에 유사 커패시터 물질을 붙였을 때 성능이 가장 우수했지만, 대면적화 공정에 부적합한 제작공정(즉, CVD)에 기반을 두었으며 경제적으로도 비효율적이다. 따라서 본 연구를 통해서 실제 산업현장에 적용 가능함과 동시에 경제성을 확보할 수 있는 전극 제작 원천 기술을 확보하고자 한다. 예를 들어, 대량 생산을 통해 전극 물질을 입자의 형태로 만들고 집착체를 이용해서 집진체(Collector)에 전극 물질을 Roll-to-Roll 공정에 기반을 두어 손쉽게 합성하는 방법 등을 고안하고자 한다. 본 연구를 통해 현재 시제 1호 차량에 적용된 매체(20Wh/L 및 5kW/L)의 성능 사양을 넘어서는 매체 제작기술을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 궁극적으로는 <표 2>에 정리된 매체의 개발목표를 달성함으로써 에너지밀도 증가에 따른 2배 이상의 주행거리 증가 혹은 차량 무게 및 부피 감소가 가능할 것으로 생각한다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존 슈퍼커패시터(예: EDLC)의 고출력 특성(Surface Energy Storage)과 이차전지의 고에너지 특성(Bulk Energy Storage)을 복합/융합하여 수송시스템의 특성에 맞는 하이브리드 커패시터를 개발하고자 한다. 구체적으로는 미니트램 차량의 에너지매체의 사양을 분석하고, 이를 만족하기 위한 매체의 개발에 활용 가능한 다양한 나노소재 적용 기술을 검토하였다. 특히, 현재 확보된 기술을 바탕으로 실제 모듈을 제작하기 위한 대면적화 공정기술에 대해서도 기술하였다. 본 연구를 통해서 시스템의 특성에 따라 전지를 구성하는 셀 및 모듈의 디자인을 차별화하고 시스템 설계와 연동하는 기술을 확보함과 동시에 전기구동 운송시스템에의 적용 및 고효율 급속 충전을 위한 인터페이스 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 궁극적으로는 기존의 슈퍼커패시터와 이차전지로 양분되어 있는 수송시스템용 에너지 저장 매체 시장에서 시스템 설계의 유연성 확보와 고도화를 지원하기 위한 맞춤형 설계 기술 확보를 통한 새로운 시장 창출을 목표로 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강석원, 정락교, 변윤섭, 엄주환, 김백현, "PRT 차량의 무선급전 시스템 설계 및 구현", 디지털융복합연구, 12(11), 289-298, 2014
- [2] 정락교 외, "소형·경량철도차량을 위한 고에너지 하이브리드 커패시터 및 시스템 적용 기술개발 기획", 한국철도기술연구원, 2014
- [3] Vasile V.N. Obreja, "On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotubes and carbon activated material-a review", Physica E., 40(7), 2596 - 2605, 2008
- [4] M. Nawa, T. Nogami, H. Mikawa, "Application of activated carbon fiber fabrics to electrodes of rechargeable battery and organic electrolyte capacitor", J. Electrochem. Soc., 131(6), 1457-1459, 1984
- [5] K.-H. An, K.-K. Jeon, W.-S. Kim, and Y.-S. Park, S.-C. Lim, D.-J. Bae, and Y.-H. Lee, "Characterization of supercapacitors using single walled carbon nanotube electrodes", J. Korean Phys. Soc., 39, S511-S517, 2001
- [6] X.-Y. Peng, X.-X. Liu, D. Diamond and K. T. Lau, "Synthesis of electrochemically-reduced graphene oxide film with controllable size and thickness and its use in supercapacitor", Carbon, 49(11), 3488-3496, 2011
- [7] W. Wang, S. Guo, M. Penchev, I. Ruiz, K. N. Bozhilov, D. Yan, M. Ozkan and C. S. Ozkan, "Three dimensional few layer graphene and carbon nanotube foam architectures for high fidelity supercapacitors", Nano Energy, 2(2), 294-303, 2013
- [8] U. M. Patil, J.-S. Sohn, S. B. Kulkarni, S.-C. Lee, H.-G. Park, K. V. Gurav, J.-H. Kim, and S.-C. Jun, "Enhanced supercapacitive performance of chemically grown cobalt-nickel hydroxides on three-dimensional graphene foam electrodes", ACS Appl. Mater. Interfaces, 6, 2450-2458, 2014