

리튬폴리머 축전지의 철도차량 적용 및 용량증대에 관한 연구

A Study on the Rail Vehicle Applications and Increase the Capacity of Lithium Polymer Batteries

조규화* · 강승욱†
(Kyu-Hwa Cho · Seung-Wook Kang)

Abstract - Railway vehicle battery is supplying the power required for the initial start-up of the train, in the event of a fault in the vehicle, or catenary for supplying emergency power is one of the components are very important. Currently, the railway vehicles such as nickel-cadmium batteries are being used [1,2]. Ni-Cd batteries as a battery installed in the railway vehicles have a strong corrosion resistance is included, The charge-discharge performance is significantly degraded in cold weather, there is a danger of deterioration or explosion. Train accidents have been caused a lot of damage due to rapid deterioration and cracking of the battery and memory due to the effect of Ni-Cd batteries. In order to solve the problems, There is no risk of degradation, deterioration and leakage, cracking and exploding. maintenance is simple and applied measures proposed to apply Lithium Polymer battery of high performance. In addition, the lack of capacity problems identified by testing the different special systems is replaced by a 70Ah lithium-polymer battery is possible without changing the batteries of 50Ah caused by installing additional equipment in existing older trains were applied to the vehicle.

Key Words : Battery, Rail vehicle battery, Lithium polymer battery, Cell battery, Cell temperature, Memory effect, Reliability & safety, The discharge time

1. 서 론

전기철도시스템의 구성에서 승객과 화물을 실어 나르는 차량은 대용량의 이동부하이며 팬터그래프와 전차선과의 습동에 의해 수 백~천 수백 암페어 전류가 흐르는 특징을 갖고 있어 계통에 연결되어 있는 일반부하와는 매우 다르다. 이러한 철도차량시스템에 사용되고 있는 축전지 시스템은 전동차의 초기 기동할 때 팬터그래프를 상승하고 차량 및 전차선 고장 시에 비상전원을 공급하는 시스템으로 매우 중요한 구성품의 하나로 현재 철도차량 분야에서는 충전과 방전이 가능한 니켈카드뮴(Ni-Cd) 축전지 등이 사용되고 있다.

철도차량 축전지 시스템은 납과 황산 전해액을 사용하는 연축전지를 주로 사용하였으나 축전지 기술 발달로 Ni-Cd 축전지가 사용된다. 이 Ni-Cd 축전지의 알카리 전해액은 수산화칼륨(KOH), 수산화리튬(LiOH)이 포함되어 있어 강한 부식성을 가지고 있으며 호환기에 충·방전 성능이 급격히 저하되고 열화 및 폭발의 위험성을 내재하고 있다. 이로 인하여 기동불능 또는 운행중단과 같은 사고가 다수 발생되어 철도운영과 유지보수 환경에 어려움이 내재하고 있다. 표 1은 서울메트로 1~4호선에서 Ni-Cd 알카리 축전지의 충·방

전 성능저하, 파손 및 균열, 열화 및 발화 등 불량이 발생되어 교체한 현황을 보여주고 있다. 2009년까지는 성능 저하 품이 누적되어 2010년부터 대량으로 교체를 함으로써 3년 주기로 교체 량의 큰 변화를 보이고 있다.

이에 본 연구에서는 철도차량 축전지 시스템인 Ni-Cd 축전지의 문제점을 대체할 수 있는 리튬 폴리머 축전지 시스템을 제시하였다. 철도차량에 안정적으로 적용하기 위하여 리튬폴리머 축전지 특성을 분석하였다. 그리고 전동차에 요구되는 추가설비의 용량증대에 대한 기술적 분석과 현차시험을 수행한 결과를 분석을 통하여 안정적인 열차운행과 정시성 그리고 유지보수 향상을 확보한 결과를 보여주고자 한다.

2. 철도차량용 Ni-Cd 축전지 특성

2.1 Ni-Cd 축전지 충·방전 특성과 저온특성

철도차량에는 충전과 방전이 가능한 2차 화학전지를 축전지로 사용하며, 2차 화학전지에는 연축전지와 니켈카드

표 1 Ni-Cd 축전지 교체 상황(서울메트로 1-4호선)
Table 1 Replacing Ni-Cd battery status(Seoulmetro Line 1-4)

Description	Total	2007~2009	2010~2012	2013~2015
Replacement quantity(ea)	11,425	15,074	8,939	1,412
Year average replacement quantity(ea)	1,269	5,024	2,980	471

† Corresponding Author : Dept. of Train Engineer, Catholic Sangji College, Korea

E-mail : ksw0413@csj.ac.kr

* Dept. of Railway Electrical and Fusion Engineering, Dong Yang University, Korea

접수일자 : 2016년 11월 6일

최종완료 : 2016년 11월 29일

뮬 축전지가 사용되고 있다. 표 2는 Ni-Cd 축전지 특성을 나타내며 그림 1과 그림 2는 각각 충전특성곡선과 방전특성곡선을 나타낸다[1, 2]. Ni-Cd 축전지(60 Ah)의 충전특성을 알기 위하여 충전전압을 측정된 그림 1에서 셀 전압이 1.5V까지 상승함을 알 수 있으나 1.5V 보다 높아진 이후에는 전압이 급상승을 보이는데 이 상태가 만 충전 상태이다. 그림 2는 방전특성을 알기 위하여 측정된 셀 전압이 특정한 1.3V부터 방전을 시작하여 1.1V까지 지속적인 정전류 방전을 유지한다. 그러나 1.1V보다 전압이 낮아진 때부터는 전압이 급격히 감소하여 방전효율이 급격히 감소함을 알 수 있다[1].

표 2 Ni-Cd 축전지 특성

Table 2 Characteristics of Ni-Cd batteries

Division		Ni-Cd batteries
Rated voltage		1.2 V
Electromotive force		1.33V
Active	Cathode	NiOOH +C
	Cathode	Cd + Fe
Electrolyte		KOH

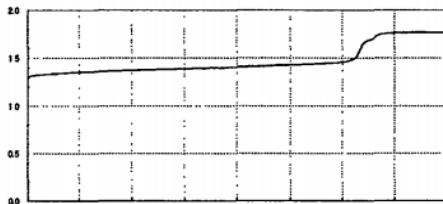


그림 1 충전특성곡선

Fig. 1 Charge characteristics graph

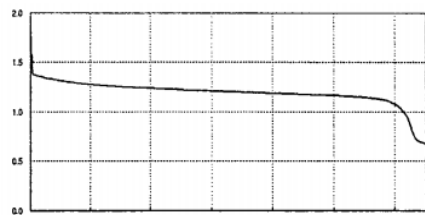


그림 2 방전 특성곡선

Fig. 2 Discharge characteristics graph

그림 3은 저온특성을 알기 위하여 -18℃와 -30℃에서의 방전시험 비교 곡선으로서 온도가 낮아질수록 방전성능이 저하됨을 볼 수 있다. x축은 20%/div 효율을 나타낸다. 실선으로 표시된 -30℃에서는 점선으로 표시된 -18℃ 상온의 방전보다 약 26.6% 효율이 저하됨을 확인할 수 있다[2].

2.2 차량 탑재된 Ni-Cd 축전지 충·방전 시험결과

서울지하철3호선 345편성에 장착된 동일한 45 Ah용량의 Ni-Cd 축전지에 대하여 4년 정도 사용하던 축전지와 1년이

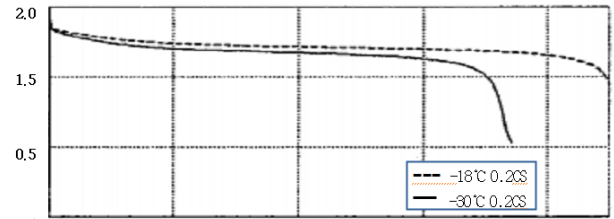


그림 3 18℃-30℃ 방전시험 비교 곡선

Fig. 3 Discharge test and compare

경과한 축전지의 충·방전 측정결과는 다음과 같았다.

2.2.1 4년 사용한 Ni-Cd 축전지 경우

그림 4는 4년 사용한 45 Ah 축전지의 동작특성 시험한 결과의 곡선이다. 축전지의 메모리 효과 및 자가 방전에 따른 용량이 급감하고 최초 102V로 충전된 Ni-Cd 축전지를 차량에서 방전할 때 약 95V로 떨어졌다. 따라서 출입문 개폐 7회, 안내방송 1회 진행시 65.51V까지 용량감소 소요시간은 6.69분이고 용량 3.67 Ah로 사용이 불가능한 상태의 축전지로 판단되었으며 차량이나 전력공급 계통 사고 시 장시간 비상전원을 공급해야 하는 상황에서는 차량을 기동할 수 없는 심각한 상황이 발생한다. 31A에서 36.2A로 방전 이후 충전은 40.8A로 충전 후 내부저항 측정 시 IR값 575Ω로 정상 충전이 되지 않았다. 따라서 시험 이후 Ni-Cd 상태 확인 시 부분적으로 단자 열화현상이 나타나고, 전해액 불순물이 관찰되었으며, 극판에는 수산화칼륨(KOH)의 결정이 형성되었다.

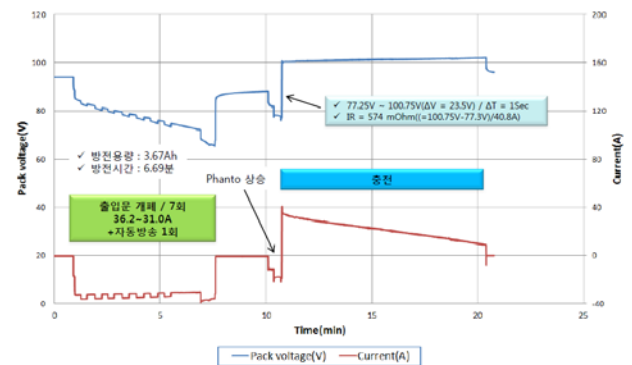


그림 4 45 Ah Ni-Cd 축전지 동작특성 시험(4년 사용한 경우)

Fig. 4 45 Ah Ni-Cd battery operation characteristics test(use 4 years after battery)

2.2.2 1년 사용한 Ni-Cd 축전지 경우

그림 5는 사용 1년 사용한 45 Ah 축전지의 동작특성 시험한 결과의 곡선으로 초기전압 102.7V에서 75V까지 출입문개폐 24회 등 평균 22.3A로 방전하여 총 방전시간이 1.38 시간이며 방전용량은 30.3 Ah로서 메모리현상이 발생되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 Ni-Cd 축전지의 사용수명은 4년에서 5년에 불과할 것으로 추정된다.

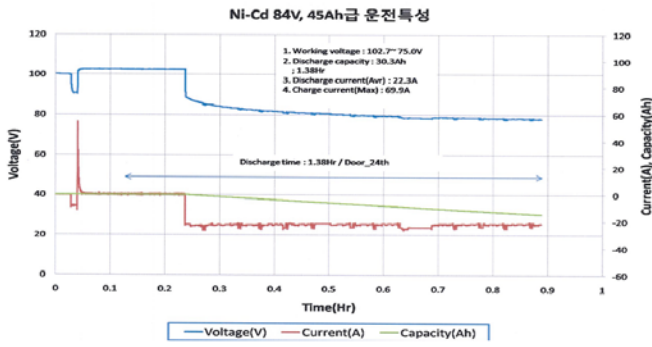


그림 5 45 Ah Ni-Cd 축전지 동작특성 시험(1년 사용한 경우)
 Fig. 5 45 Ah Ni-Cd battery operation characteristics test (Up to 1 year elapsed battery)

3. 철도차량용 리튬폴리머 축전지 특성

3.1 리튬폴리머 축전지 충·방전 특성과 온도 특성

리튬폴리머 2차전지의 충·방전 곡선을 나타내는 그림 6.(full 셀의 경우)은 그림 7에 도시된 리튬급속을 기준전극으로 사용하는 반쪽전지(half 셀의 경우에서 얻어지는 양극의 충전 및 방전곡선과 음극의 충전 및 방전곡선 간의 용량에 따른 전위차에 의해서 나타나게 된다. 그림 6과 그림 7의 충·방전곡선에서에서 세로축은 축전지가 가지는 전압의 변화, 가로축은 용량을 나타낸다. 따라서 세로축의 높이가 높을수록 즉 축전지가 가지는 전압이 높을수록 출력이 좋아지게 되며 가로축이 증가할 수록 축전지의 용량이 증가하여 오랜 시간 구동이 가능하게 되는 장점을 가지고 있다.

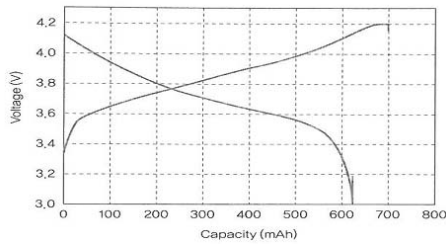


그림 6 리튬폴리머 2차 전지의 충·방전 곡선
 Fig. 6 Charge and discharge of the Li-Cd secondary battery (full cell)

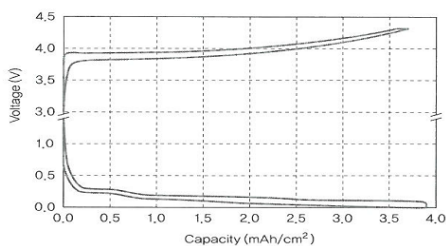


그림 7 리튬폴리머 2차 전지의 충·방전 곡선
 Fig. 7 Charge and discharge of the Li-Cd secondary battery (half cell)

그림 8의 양극에 따른 충전과 방전곡선에서, 다양한 재료의 종류에 따른 전기적 에너지 용량이 차이 있음을 알 수 있다[3-5].

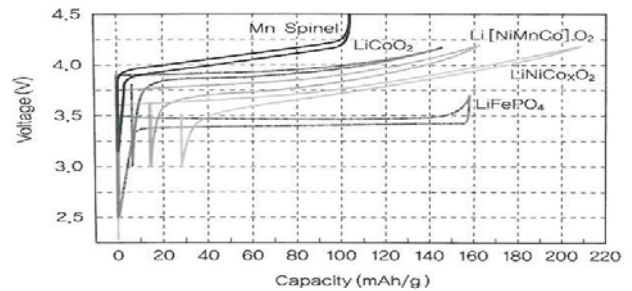


그림 8 양극에 따른 충전과 방전 곡선
 Fig. 8 Charge and discharge curve according to the positive electrode material

3.2 리튬폴리머 축전지 온도특성

온도에 대한 축전지 성능 내구성 관련된 축전지의 온도특성은 정상적인 온도영역과 비정상적인 영역으로 구분된다. 정상적인 온도영역에서의 성능 내구성은 축전지가 작동 시 전기저항에 의해 내부 발열이 일어나는데 이때 열손실과 열발생이 균형을 이루어 평형이 되는 온도에서 축전지의 성능 저하가 있는지 여부를 판단하는 것이다(그림 11 참조). 비정상적인 영역의 내구성은 비정상적인 환경에서 축전지가 처해 있을 때 위험 여부를 조사하는 것과 또는 축전지가 정상적인 영역으로 회복되었을 때 초기성능 대비하여 어느 정도 회복하는지 여부를 확인하게 된다. 그림 9는 방전온도 변화에 따른 축전지 방전용량과 정격용량 대비 사용율을 나타낸다[6].

특히 추운 겨울이나 저온 상태에 노출되었을 때 물질의 이동성이 급격히 감소하기 때문에 물질의 이동도를 좋게 유지하는 것이 필요하다. 그림 9에서 활물질의 입자 크기가 작을수록 입자의 표면적이 크기 때문에 리튬폴리머의 출입 통로가 증가하여 저온에서 물질의 이동도가 느려지더라도 반응면적이 커서 용량 보전을 할 수 있게 되어 혹한기 전동차 축전지로 활용하기에 적합하다.

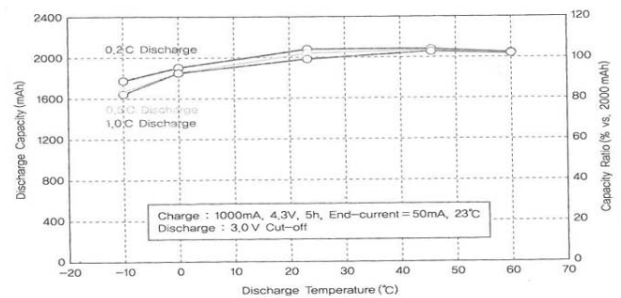


그림 9 온도변화에 따른 축전지 대비 사용율
 Fig. 9 Discharge performance of the battery according to temperature

4. 철도차량용 리튬폴리머 축전지 구성 및 제작

4.1 축전지 용량 선정

축전지의 용량은 일반적으로 보조전원장치의 가동이 정지된 상태에서 사용하는 조건으로 검토하며, 전동차 10량 편성의 경우 축전지가 담당 할 부하(A)를 산정한 후 다음 식에 의해 계산한다.

$$\text{부하[W]} / \text{축전지 전압[V]} = X \text{ [A]} \quad (1)$$

$$\text{축전지 1대가 공급해야 할 전류 Y:} \quad (2)$$

$$X[A] / 3\text{대} = Y[A]$$

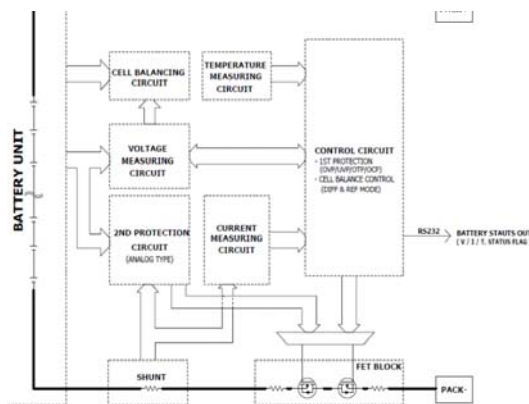
전동차에 장착되는 축전지는 상기 (1), (2)식으로 계산된 부하전류 Y[A]와 보수율, 방전전류, 용량 환산시간, 여유율 등을 감안하여 축전지 용량이 선정되며, 여기서는 기 사용되는 축전지의 교체용으로 제작되는 리튬폴리머축전지이므로 기존 용량과 동일한 용량으로 선정한다.

4.2 구성 및 제작

전동차의 종류에 관계없이 적용가능 하도록 설계 제작함으로써 유지보수 편의성을 고려하며 경량화와 진동 충격에 강한 내구성을 갖도록 제작하였다. 본체 재질은 알루미늄으



(a) 리튬폴리머 축전지(좌측 축전지, 우측 제어장치)



(b) 보호회로(1 모듈)

그림 10 리튬폴리머 축전지와 보호회로
Fig. 10 Lithium polymer battery(a) and protect circuit(b)

로 제작하고 커넥터 및 내부 점검용 포트를 설치하였다. 그림 10은 차량에 탑재된 리튬폴리머 축전지와 모듈의 보호회로를 나타내고 표 3은 특성을 나타낸다. 제어장치는 축전기와 주변기기를 포함하며 진동으로 인한 파손, 배선의 외부 노출의 위험성을 최소화하여 설계하였다. 보호회로의 모듈은 각 12~13개의 셀이 직렬 연결되어 각 셀에 대한 전압 및 온도를 모니터링하고, 각 모듈에 적재된 셀 전체에 대한 전류를 모니터링하고 있는 보호회로가 설치되어 있다.

표 3 리튬폴리머 축전지 특성

Table 3 Characteristics of Lithium polymer batteries

Division	Lithium polymer batteries
Cathode material	$LiCoO_2$
Anode material	C
Electrolyte	Polymer
Rated voltage	3.7V

모듈에 설치된 보호회로는 적재된 셀들에 대한 전압편차를 제어하는 밸런싱회로, 셀들의 전압을 측정하는 전압측정회로, 충·방전에 대한 기능을 제어하는 FET 블록, 셀들의 온도측정 회로, 충·방전 전류를 측정하는 전류측정 회로 등으로 설계하였다. 이들 회로들을 제어 관리하며 외부 기기와 통신(RS232C D-Sub Port)하여 축전지의 정보를 공유할 수 있는 제어 유니트로 구성되어 있다[7].

5. 용량증대 검토

5.1 용량증대

시운전에 적용된 동일한 전동차에 장착된 45 Ah용량의 Ni-Cd 축전지는 각종 편의설비 및 필수기기의 추가 설치에 따라 심각한 용량부족 문제가 발생되고 있다. 전동차가 가선으로부터 전원을 수신하지 못하는 상황에서 축전지가 담당할 부하를 산정해 보면 45 Ah축전지(객실 형광등 32W 40개 포함한 총 10,914W)에 추가하여 단부출입문제어(60W 18개소, 1,080W)를 포함하여 총 5,215 W(22 Ah)상당의 용량이 추가되어 70 Ah용량이 필요하게 되었다. 표 4는 장치 추가로 요구되는 축전지 용량을 도출한 결과를 보여주고 있다.

6. 현차시험

6.1 시운전 시험

70 Ah 리튬폴리머 축전지를 실제 전동차에 장착하여 1일 당 2시간30분씩 시험운행 후 측정결과는 전압변동폭은 최대 3.7V이고 셀당 온도는 23.2 ℃에서 23.9℃로 안정된 상태이며 운행 시 축전지 전압폭은 103.9V에서 100.2V로 평균전압 변동폭은 약 3.7V로 정상상태를 유지하였다. 평균 12회의 충·방전이 발생하는 것으로 계산하면 설계수명 130,000 Cycle 대비 약 29년 이상의 사용수명이 될 것으로 예측되어 사용수명도 대폭 증가할 것으로 판단된다. 그림 11은 온도변화에 따른 팩전압과 온도, 전류용량을 나타낸다. Temp.1은

표 4 장치 추가에 따른 요구되는 축전지 용량

Table 4 Capacity of battery required by adding device

Battery capacity	Load type	Unit Power Consumption (W)	Quantity (EA)	Total (W)
Additional equipment (22AH)	End door control	60	18	1,080
	LCD controller	200	1	200
	Fire alarm	40	10	400
	PSD control	70	2	140
	RTD	10	1	10
	TCMS	200/40/75	2/2/8	1,080
	CMSB	50	3	150
	Setter	50	2	100
	Instrument	5	5	25
	Propulsion device	250	5	1,250
	Auxiliary power unit	250	3	750
	Side lamp	1.5	20	30
	total			5,215
Remark	1. The first set of load to the battery charge = $5,215 / 84V / 3 = 20.7A$ 2. The battery capacity calculations apply = 22AH			

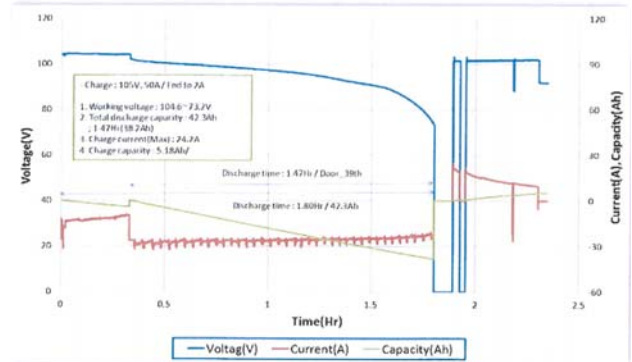


그림 12 비상상황에서 리튬폴리머축전지 방전특성

Fig. 12 Lithium polymer battery discharge characteristic in emergency situation during the operation

전하고 방전 평균전류는 38.2A가 소모되는 비상상황에서 1시간28분이 소요되었고 총 방전용량은 42.3Ah로 나타났다.

각 종 부하의 종류는 전조등, 객실등은 상시 점등하고 방송 및 출입문은 총 39회 이상 작동하는 악 조건하에서 실시 하였으나 우수한 성능을 유지하였다.

6. 결 론

본 논문에서 철도차량 축전지 시스템인 Ni-Cd 축전지의 문제점을 대체할 수 있는 리튬 폴리머 축전지 시스템에 대하여 철도차량에 안정적으로 적용하기 위하여 리튬폴리머 축전지 특성을 분석하고 전동차에 요구되는 추가설비에 따른 용량증대 검토 그리고 현차시험을 수행한 결과를 분석하여 다음의 결과를 도출하였다.

첫째 차량의 충전전압이 동일하며 방전시간이 60분에서 120분으로 증가하여 차량의 보조전원장치, 충전기에 영향이 미치지 않아 특별한 시스템 변경 없이 교체가 가능하다.

둘째 다소 충전시간은 90분에서 130분으로 길어지더라도 차량의 운행도중에 충분히 105V 만 충전이 가능하여 니켈-카드뮴 축전지와 달리 메모리 효과나 자가 방전이 없으므로 사용수명이 증대되고 특히 비상상황과 혹한기에서의 성능이 우수하다.

셋째 용량의 증가로 인해 추가 직류기기 설비를 설치할 수 있으며 1호선 저항전동차, 2,3호선 일본형·영국형 초파 전동차에서 발생하는 부하용량증가에 대응하여 전력 부족 문제를 함께 해결할 수 있다.

넷째 2일에서 3일 주기로 시행하는 상태점검과 전해액 보충 등의 복잡한 유지보수 업무를 대폭 간소화할 수 있으며 폭발 등의 장애가 없는 안정적인 운영을 확보할 수 있다.

따라서, 현재 사용되고 있는 Ni-Cd 축전지 대체품으로 리튬 폴리머 축전지의 사용에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 향후 우수한 품질의 리튬폴리머 축전지를 안정적으로 운영하기 위해서는 이번 시험연구에 확인하지 않은 축전지 제어장치의 신뢰성 향상에 대한 지속적인 연구, 개발이 필요할 것으로 판단된다.

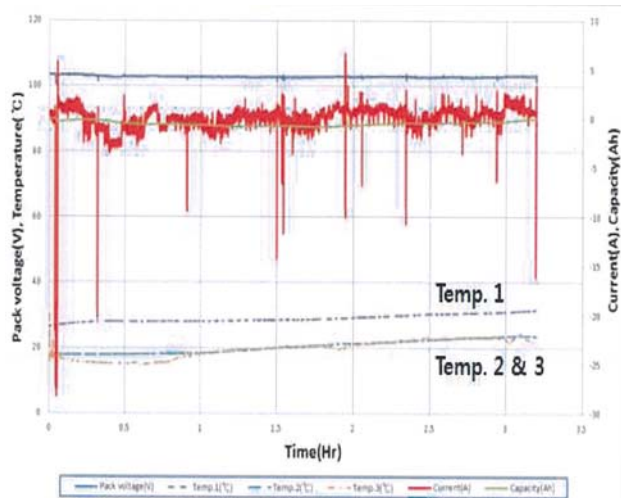


그림 11 동작 후 온도변화에 따른 전압, 전류 그래프

Fig. 11 Current, Time, Voltage graph after operation

축전지 내부온도, Temp.2는 축전지 외부온도 그리고 Temp.3는 축전지함의 온도를 보여주고 있다.

6.2 비상상황 시 시험

열차 운행 중 돌발사고로 가선으로부터 전기를 공급받지 못하는 비상상황에서는 1시간 이상의 장시간 동안 축전지의 전력으로 팬터그래프를 가선에 연결하고 제어장치와 비상조명등에 전원을 공급할 수 있어야 한다. 그림 12는 3개월간 실차시험의 결과로서, 방전전압을 104.6V에서 73.2V까지 방

감사의 글

본 논문은 가톨릭상지대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것임

References

- [1] O.J. Ghun, M.Y. Kim, W.K. Kyong, Y.K. Hong, "An Analysis of Performance Test Results for Nickel-Cadmium Battery", Journal of the Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 600-605, 2003
- [2] Graph : www.maximintegrated.com/en/images/appnotes/3958/3958Fig01.gif
- [3] School of Chemical & Biological Engineering, Seoul National University
- [4] Do-cheon Ahn† † , Yang-Mo Koo† † , Min-Gyu Kim† † , Namsoo Shin† † , et.al., "Polyaniline Nanocoating on the Surface of Layered Li [Li0.2Co0.1Mn0.7]O2 Nano disks and Enhanced Cyclability as a Cathode Electrode for Rechargeable Lithium-Ion Battery", Journal of Phys. Chem. C, 114 (8), pp 3675 - 3680, 2010
- [5] J.G-Park, "Principles and applications of Lithium Secondary Batteries". pp436-439, 2014
- [6] J.G-Park, "Principles and applications of Lithium Secondary Batteries", pp451-454, 2014
- [7] K.H.Cho, M.S.Jo, S.W.Hwang, "A study on the application of lithium polymer battery for rolling stock", Proceedings of The KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY KSR2013S046, pp 289~297, 2013

저 자 소 개



조 규 화 (趙奎和)

1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2013년 동양대학교 정보대학원 졸업(석사). 1983~2013년 서울메트로 차량본부장. 운영본부장(상임이사). 2014년 3월~현재 동양대학교 철도대학 철도전기융합학과 교수. 현 본 학회 정회원

E-mail : khcho1893@hanmail.net



강 승 옥 (姜承旭)

1982년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년6월~1992년9월 현대중공업(주) 마북리연구소 주임연구원. 1993년 3월~현재 가톨릭상지대학교 철도기관사와 교수. 현 본 학회 산업전기위원회 감사, 전기설비부분회 학술이사, 시니어회원

E-mail : ksw0413@csj.ac.kr