

부스트 컨버터의 전류 피크 값에 따른 배터리 수명특성 분석

최정렬¹ · 박경도² · 김윤식³ · 이성근[†]

(Received July 26, 2017 ; Revised August 1, 2017 ; Accepted August 18, 2017)

Analysis of battery lifetime characteristics with current peak value of boost converter

Jung-Leyl Choi¹ · Kyung-Do Park² · Yoon-Sik Kim³ · Sung-Geun Lee[†]

요약: 오늘날 전기자동차, 전기추진선박 등에서는 배터리를 직렬, 병렬 또는 직·병렬로 접속하여 에너지원으로 사용하고 있으며, 이러한 시스템에 사용하는 배터리에는 리튬폴리머, 리튬인산철 등과 같은 리튬계열의 배터리가 사용되고 있다. 배터리는 휴대전화와 같은 소형 전자기기에서부터 대형 전기기기까지 광범위하고 편리하게 사용하지만, 충·방전 횟수에 따라서 배터리의 수명에 영향을 줄 수 있다. 또한 충전전원의 종류와 방전전류의 특성에 따라서도 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 주요 방전전류의 특성으로서는 방전전류의 크기를 나타내는 C-rate와 고조파 함유를 나타내는 전류 노이즈이다. 본 논문에서는 배터리를 전원으로 사용하고, 배터리에서 흘러나오는 평균값은 일정하게 유지하면서 전류 피크값(리플)과 고조파 함유율을 달리하는 두 가지 형태의 부스트 컨버터를 사용하여 배터리 방전전류의 피크값에 따른 배터리 수명이나 몸체 온도가 어떻게 달라지는지를 분석하고, 관찰하였다. 300회 방전 후의 내부저항을 측정하고, 방전이 진행되는 도중에 열화상카메라로 배터리의 외관을 촬영한 결과, 방전전류의 피크 값이 높을수록 배터리의 수명이 짧아진다는 것을 확인하였다.

주제어: 전기자동차, 전기추진선박, 리튬폴리머, 고조파, 부스트 컨버터

Abstract: At present, batteries connected in series, parallel, or series-parallel are used as energy sources in electrically propelled ships and other electric vehicles. In addition, lithium-based batteries, such as lithium polymer and lithium phosphate batteries, are widely used in these systems. Even though such batteries are used in a variety of electronic devices, from small devices such as mobile phones to larger devices, their lifespans are affected by a number of factors, including the number of charge and discharge cycles they undergo, the types of power sources they use for charging, and the characteristics of their discharging currents. The characteristics of the main discharge current are the C-rate, which represents the magnitude of the discharge current, and the current noise, which represents the harmonic inclusion. In the present study, we designed a boost converter that, when connected to the battery, could control both its peak value (ripple) and its harmonic content, while allowing it to maintain a constant output current. Moreover, we analyzed and observed the changes in both its lifetime and temperature, with respect to the peak value of its current using images collected by a thermal imaging camera over 300 discharge cycles, as well as internal resistance measurements made after the last cycle. Ultimately, it was confirmed that the battery life shortened as the peak value of the discharge current increased.

Keywords: Electro vehicle, Electric propulsion ship, Lithium polymer, Harmonic, Boost converter

1. 서론

오늘날 전기 자동차나 소형 전기추진선박에서는 리튬계열의 배터리를 많이 사용하고 있으며, 특수한 목적에 주로 사용되는 드론에서도 리튬 폴리머 배터리가 많이 사용되고 있다[1]-[5].

리튬 폴리머 배터리는 납산 배터리보다 동일 용량에서 부피와 무게를 적게 할 수 있고, 에너지 밀도가 높아 작은 배터리에 많은 에너지를 저장할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 리튬 폴리머 배터리는 배터리의 안전성을 위해 보호회로를 사용해야 하며 배터리의 온도가 상승되는 경우

† (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2493-3916>): Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: sglee48@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4821

1 Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: rsf302@naver.com, Tel: 051-410-4891

2 Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: hiphop4457@naver.com, Tel: 051-410-4891

3 Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: benkys@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4411

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

배터리의 수명이 빠르게 줄어들고 배터리 셀이 파괴되는 경우가 있으며, 배터리의 온도는 배터리가 충·방전되는 전류의 양에 따라 온도가 상승되는 정도가 달라진다.

C-rate는 배터리 용량 대비 방전되는 에너지의 비이며 1C는 1Ah용량의 배터리가 1A로 방전된다. 배터리 용량에 비해 방전되는 에너지가 많은 드론의 경우 2~4C 정도로 운전이 되고 있으며 이는 배터리의 온도가 증가하고 배터리의 수명이 빠르게 줄어드는 원인이 된다. 또한 배터리의 수명에 영향을 주는 요소로는 충·방전 횟수와 충전, 방전전류의 리플성분 또는 피크 전류값 등이 있다[6]. 배터리의 충·방전 전류는 충·방전에 사용되는 컨버터의 종류에 따라 충·방전 전류의 형태가 달라지며, 이에 따라 배터리의 수명 변화 및 온도의 변화가 달라질 것이다.

본 논문에서는 배터리를 전원으로 사용하고, 배터리에서 방전되는 전류가 DC에 가까운 컨버터와 배터리에서 방전되는 전류의 피크값이 큰 컨버터 2가지를 사용하여 배터리 방전 전류의 피크값에 따라 배터리 수명이나 몸체 온도가 어떻게 달라지는지를 분석 및 관찰하였다.

2. 배터리 방전특성 실험

2.1 부스트 컨버터(Boost converter, BC) 입력 전류 분석

Figure 1은 배터리 V_b 의 방전특성을 시험하기 위하여 제작한 IBC(Interleaved boost converter) 회로도이다. IBC 회로는 L_1, Q_1, D_1, C 로 구성된 일반적인 부스트 컨버터(Boost converter, BC)에 L_2, Q_2, D_2 가 병렬 형태로 추가된 회로도이다.

부스트 컨버터는 입력 전압보다 출력 전압이 높은 DC/DC 컨버터로 스위칭 소자의 게이트 전압의 듀티비(Duty ratio)에 따라 입력 전압 대비 출력 전압의 승압 비가 결정된다. 이러한 특성을 이용해서 부하의 정격 전압이 배터리의 전압보다 높을 때 사용된다.

스위칭 소자로 MOSFET을 사용하였으며 MOSFET의 게이트 전압 V_{g1}, V_{g2} 의 위상차를 180°로 하여 일반적인 부스트 컨버터에 비해 입력 전류 I_{in} 의 리플이 저감된 컨버터이다[7].

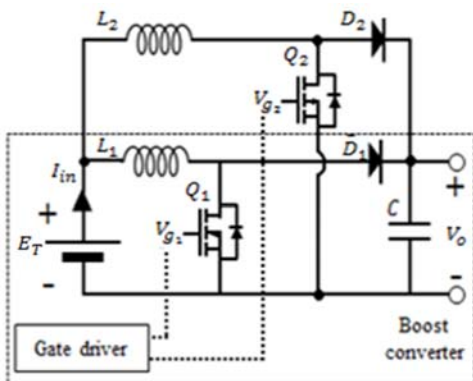
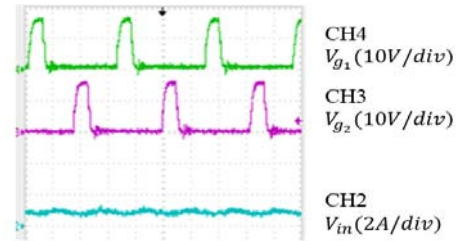
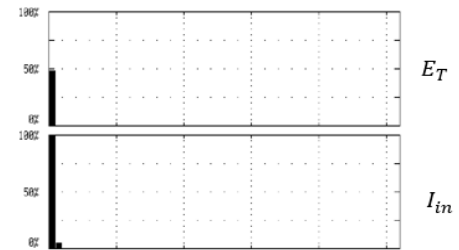


Figure 1: Test circuit for battery discharge characteristics of IBC

Figure 2는 2상 IBC의 스위칭 전압 V_{g1}, V_{g2} 와 배터리 전류 I_{in} 의 파형이다. 스위칭 전압 V_{g1} 과 V_{g2} 는 위상차가 180°인 것을 볼 수 있으며, 스위칭 전압 V_{g1} 과 V_{g2} 의 듀티비는 20%, 전류의 최대값은 1.15A이며 전류의 평균값은 1A이다.



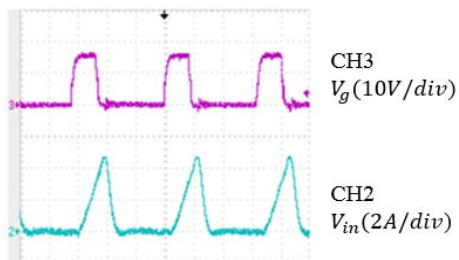
(a) Waveforms



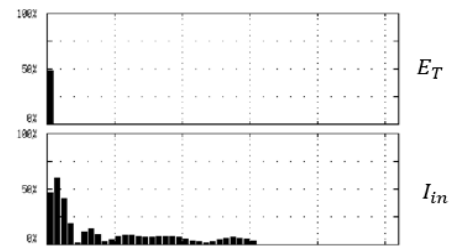
(b) Harmonics

Figure 2: Waveforms and harmonics of IBC

Figure 3은 불연속 모드(Discontinuous mode, DCM)으로 동작되고 있는 BC의 스위칭전압 V_{g1} 와 배터리 전류 I_{in} 의 파형이다. 스위칭 전압의 듀티비는 약30%, 전류의 피크값은 4.8A이며 평균값은 1A이다. 본 논문에서는 전류의 피크치를 높여 전류의 피크치가 배터리에 미치는 영향을 실험하기 위해 BC를 DCM으로 동작시켰다.



(a) Waveforms



(b) Harmonics

Figure 3: Waveforms and harmonics of BC

Figure 2와 Figure 3에서 알 수 있는 바와 같이 제작된 부스트 컨버터는 배터리에서 출력되는 평균전류를 일정히 유지하면서 피크값을 서로 다르게 출력할 수 있도록 MOSFET의 게이트 펄스로 조정하였다.

2.2 배터리 내부 파라미터 분석

Figure 4는 DC/DC 컨버터에 접속되어 있는 배터리의 Randles 1차 모델(점선 내부)이다. 등가 모델은 배터리 내부 저항 R_1 , 충·방전 전류에 의한 이온화 손실 저항 R_2 그리고 2중층의 커패시턴스 C 로 구성된다.

본 논문에서는 배터리 내부 저항 R_1 만 측정하여 배터리의 수명을 추정하였으며 내부저항 R_1 을 구하는 식은 Figure 4에서 배터리 단자 전압 $E_T = E_b - (V_{R_1} + V_{R_2})$ 이고, 접속 순간에는 커패시턴스 C 에 의해 V_{R_2} 가 0이 되면서 단자 전압 E_T 는 R_1 만큼의 전압강하만큼 뿐 $E_T = E_b - V_{R_1}$ 이 된다. 이때 $V_{R_1} = E_b - E_T$ 으로부터 $R_1 = V_{R_1} / I$ 으로 구해진다[8][9].

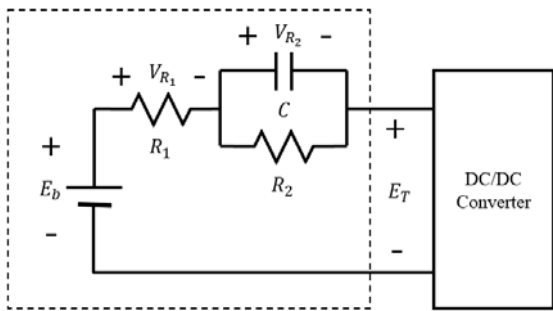


Figure 4: Randles model of battery(dot line)

배터리의 수명(SOH, State of health)은 사용되지 않은 배터리를 SOH 100%, 배터리의 수명이 다 되어 더 이상 사용하지 못하는 배터리를 SOH 0%라 한다. 여기에서 배터리의 내부저항 R_1 과 R_2 를 이용하여 배터리의 SOH를 추정하는 것이 가능하다. 일반적으로 SOH 0%일 때 내부저항 R_1 , R_2 의 값은 SOH 100%일 때의 내부저항 R_1 , R_2 의 값보다 높다. 그리고 배터리의 충·방전 횟수가 높아질수록 내부저항 R_1 , R_2 의 값은 높아진다. 이는 내부저항 R_1 , R_2 를 이용해서 배터리의 수명 추정이 가능하다는 것을 보여준다.

3. 실험 및 고찰

Figure 5는 부하 방전전류 리플에 따른 배터리의 수명특성을 분석하기 위한 실험장치이며, Figure 6는 마이크로프로세서(ATmega128 controller) 제어블록도이다. 배터리 셀 8개를 직렬로 연결하고 마이크로프로세서에서 배터리의 전압에 따라 충전과 방전을 수행한다. 충전 전류는 같고 BC

로 방전한 배터리와 IBC로 방전한 배터리로 나누어 실험하였다. 수회의 저항부하 방전의 실험이 종료된 후에 배터리 외장을 열화상 카메라로 관찰하고, 배터리 수명을 추정하기 위한 내부저항 R_1 을 측정하였다. BC와 IBC의 방전전류와 노이즈 함유율은 2.1절의 값과 같다.

배터리 충전은 CC/CV(Constant current/Constant voltage)로 배터리를 충전한다. CC/CV는 처음에는 정 전류로 충전하며 전압이 최대 충전 전압에 다다르면 정 전압으로 충전하는 방식이다. CC/CV 충전 방식은 비교적 구현하기 쉬우며 구조가 간단하여 현재 많은 충전기가 이 방식을 사용하고 있다. 방전은 CP(Constant power)로 방전하고 있으며 CP 방전은 배터리에서 일정한 전력으로 방전한다. 배터리를 방전시키면 배터리의 전압이 감소하게 되는데 전류를 증가시켜 일정한 전력을 부하에 공급한다.

본 논문에서는 전류는 1C, 전압은 4.1V로 배터리를 충전하였으며 방전은 배터리 셀당 3.7W로 방전하였다.

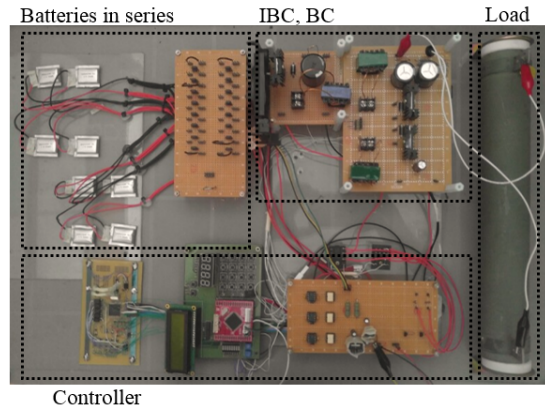


Figure 5: Experimental device

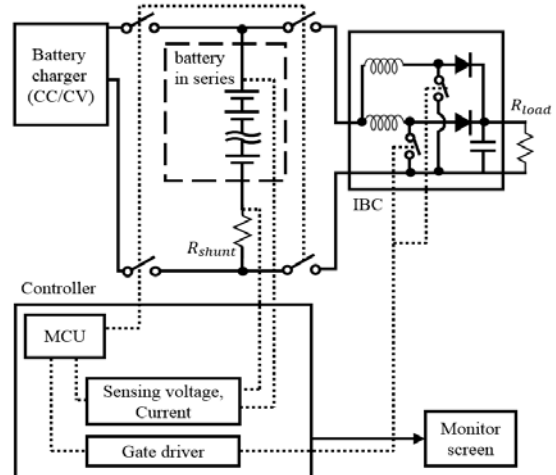


Figure 6: IBC control block-diagram

Figure 7은 실험에 사용된 리튬 폴리머 배터리의 외관이며, 그 사양은 Table 1과 같다.

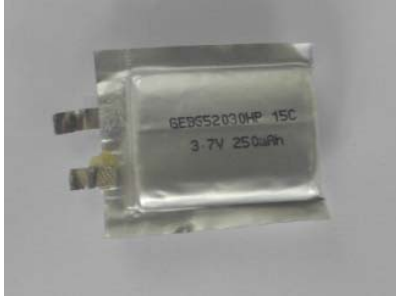


Figure 7: Lithium polymer battery

Table 1: Specifications of lithium polymer battery

| | |
|---------------------------|---------------|
| Nominal voltage | 3.7V |
| Nominal capacity | 250mAh |
| Charge cut-off voltage | 4.2V |
| Discharge cut-off voltage | 3.0V |
| SOH 100% R_1 | 0.1 Ω |
| SOH 0% R_1 | 0.25 Ω |
| Max. Charge current | 20C(5A) |
| Max. Discharge current | 20C(5A) |

실험에 사용된 배터리는 실험 전의 내부저항 R_1 은 0.1 Ω 이 측정되고 있으며 배터리의 충방전이 반복됨에 따라 배터리 셀이 파괴되기 직전에서 내부저항 R_1 은 0.25 Ω 이 측정되고 있다. 실험 중에 내부저항 R_1 은 0.1~0.25 Ω 사이로 측정되고 있으며 충방전이 반복됨에 따라 내부저항 R_1 은 증가한다. 이를 이용해서 배터리의 수명 변화를 알 수 있다.

3.1 배터리 방전 시험 결과

Figure 8는 BC로 배터리를 방전 시켰을 때의 배터리 내부 저항 R_1 의 변화를 그린 그래프이며, Table 2는 시험 중에 기록한 내부저항의 값을 나타낸 표이다.

초기의 배터리 내부 저항 R_1 의 평균은 0.095667 Ω 이며, 300회 방전 후 내부 저항 R_1 은 0.2085 Ω 으로 바뀌었다. 따라서 내부저항은 0.112833 Ω 이 증가하였으며 실험 도중 배터리 5셀이 파괴되었다.

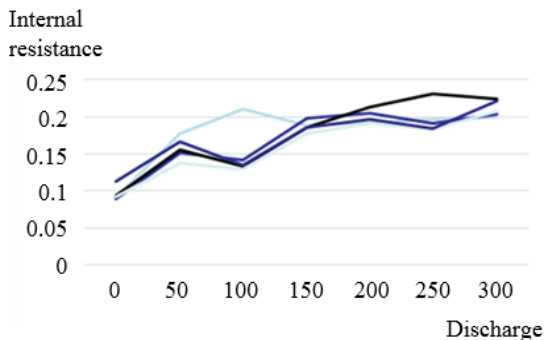


Figure 8: The graph of R_1 change after BC load test

Table 2: R_1 change after BC load test

| | |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| Initial internal resistance | 0.095667 Ω |
| Internal resistance after discharging of 300 times | 0.2085 Ω |
| Increased value of internal resistance | 0.112833 Ω |
| The number of destroyed cells | 5 |

Figure 9은 IBC로 동작시켰을 때의 배터리 내부 저항 R_1 의 변화를 그린 그래프이며, Table 3는 시험 중에 기록한 내부저항의 값을 나타낸 표이다.

초기의 배터리 내부 저항 R_1 의 평균은 0.101214 Ω 이며, 300회 방전 후 내부 저항 R_1 은 0.205 Ω 으로 바뀌었다. 따라서 내부저항은 0.103786 Ω 이 증가하였으며 실험 도중 배터리 2셀이 파괴되었다.

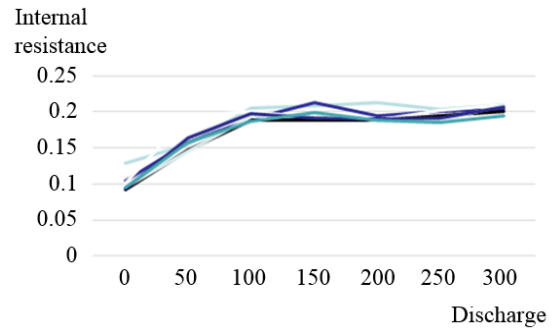


Figure 9: The graph of R_1 change after IBC load test

Table 3: R_1 change after IBC load test

| | |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| Initial internal resistance | 0.101214 Ω |
| Internal resistance after discharging of 300 times | 0.205 Ω |
| Increased value of internal resistance | 0.103786 Ω |
| The number of destroyed cells | 2 |

Figure 10은 BC와 IBC로 동작시켰을 때의 외관을 열화상 카메라로 촬영한 것이다. 전류의 피크치 크기에 따라서 내부 온도가 어떻게 변하는지를 확인하기 위한 방법이다. Figure 10 (a)는 실험이 수행되기 전의 배터리 외관을 촬영한 사진이다. 위부분(A)은 BC로, 아래 부분(B)은 IBC로 시험하였을 경우의 외관이다. 방전 시험 전에는 30.7 $^{\circ}\text{C}$ 를 나타내고 있다. Figure 10 (b)는 실험이 수행된 후 7분이 지날 때의 배터리 외관을 촬영한 사진이다. 위부분은 BC로 동작시켰을 때의 온도가 37.05 $^{\circ}\text{C}$ 이고, 아래 부분은 IBC로 동작시켰을 때의 온도는 34.89 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 외관은 육안으로도 판별할 수 있을 만큼 BC로 동작시켰을 때의 모습이 더 진한 색으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 전류의 피크치가 높은 컨버터를 사용하여 배터리를 방전할 때 배터리의 온도가 더 많이 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 결국 배터리의 수

명을 단축시키는 결과를 초래하는 것으로 판단된다.

이와 같은 결과는 Table 2와 Table 3의 배터리 파손 결과와도 일치됨을 알 수 있다.

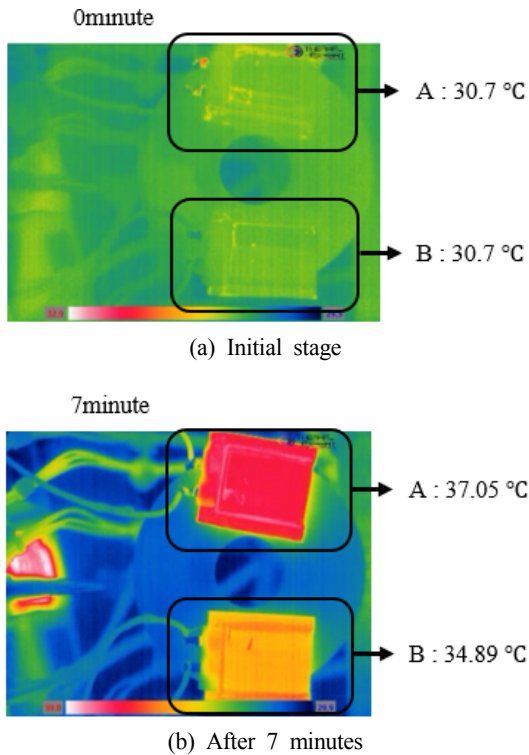


Figure 10: Photograph of surface temperature taken by thermo-graphic camera

4. 결 론

본 논문에서는 리튬 폴리머 배터리의 방전 특성을 관찰하기 위해 IBC와 BC를 제작하고, 배터리에서 방전되는 전류의 피크 값이 높은 경우와 반대로 낮은 경우에 배터리의 수명 및 온도 변화를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 동일 전력 공급의 조건에서 배터리 방전 전류의 피크 값이 낮은 컨버터와 높은 컨버터로 동작시키고 7분후에 열화상카메라로 외관 촬영을 한 결과 피크값이 낮은 경우보다 높은 경우의 배터리의 온도가 약 2.16° 더 높은 것으로 나타났으며, 실험 도중에 배터리 셀의 파괴가 피크값이 낮은 경우 2셀, 높은 경우에는 5셀이 파괴되었다.
- (2) 배터리의 수명을 추정할 수 있는 파라미터인 내부저항 R_1 은 배터리 방전 전류의 피크 값이 낮은 경우보다 높은 경우에서 약 0.09Ω 더 많이 상승하였다. 이는 3.1절의 배터리 방전시험 결과를 고려해 볼 때 배터리 방전 전류의 피크 값이 높아지면 배터리의 수명이 더 빨리 감소하는 것으로 분석된다.
- (3) 향후 배터리의 충·방전에 사용되고 있는 컨버터에 대한 연구와 배터리의 다양한 수명추정에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] J. Kwon, A Study of Remote Management system of Lithium Ion Battery for Ship Based on BLE, M.S. Dissertation, Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2015 (in Korean).
- [2] Go Directly to the Battery, Hybrid Ship, <http://news.joins.com/article/18148927>, Accessed December 6, 2015 (in Korean).
- [3] Research Center of Meritz, Reignition of Growth Engine with Midium and Large Scale 2nd Battery ESS, http://www.inmeritz.com/mailling/stock_king/pdf/LIB_130708.pdf, July 8, 2013 (in Korean).
- [4] Entering of HHI Hybrid Ship Period, <http://blog.daum.net/hiltiwslee/8923131>, Accessed June 29, 2016 (in Korean).
- [5] J. W. Ko, G. S. Ko, and Y. C. Park, "A study on battery performance of a motor driven local transportation vehicle," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 4 pp. 430-436, 2012 (in Korean).
- [6] K. Uddin, A. D. Moore, A. Barai, and J. Marco "The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance," Applied Energy, vol. 178, no. 15 pp. 142-154, 2016.
- [7] Y. J. Kang, "Design and control of interleaved boost converter for multi-string PV inverter," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 60, no. 3 pp. 538-543, 2011.
- [8] D. Y. Noh, A Study on the SOH Estimation Method of Lithium Ion Batteries using OCV, M. S. dissertation, Department of Electrical Engineering, Korea University, Korea, 2011 (in Korean).
- [9] H. J. Kwon, M. K. Kim, and S. G. Lee, "Low price type inspection and monitoring system of lithium ion batteries for hybrid vessels," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no. 1 pp. 28-33, 2016 (in Korean).