

리튬 2차 전지의 저장 수명에 관한 연구

김동성*, 진홍식
국방기술품질원 국방신뢰성연구센터

A Study of Shelf Life about Li-ion Battery

Dong-seong Kim*, Hong-Sik Jin
Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

요약 국방 분야에서 유도무기와 같은 일회성 무기체계는 제작 후 오랜 기간 보관되어지기 때문에 수명 예측이 필수적이다. 본 연구에서는 유도무기에 사용되는 리튬 2차 전지에 대해 수명을 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 연구를 위해 5년 이상 무기체계에 탑재되어 사용된 리튬 2차 전지를 확보하였으며, 비기능 검사를 수행하여 외적인 변화나 고장이 발생하였는지 확인하였다. 비기능 검사가 끝난 후 리튬 2차 전지의 성능 측정을 위한 방전 시험을 실시하였으며, 방전 시험 시 전지를 규격에 맞추어 충전한 후 방전 시험을 실시하였다. 방전 시험을 통해 초기 충전 전압, 방전 시간, 전지 온도 등을 측정하였으며, 이를 기존에 측정된 데이터와 비교하여 성능 변화 경향을 확인하였다. F-검정과 일원분산분석(One-way ANOVA, Analysis of Variance), 회귀 분석을 통해 노화가 발생하였는지 확인하였으며, 회귀 분석을 통해 측정된 근사식을 통해 리튬 전지의 수명을 추정하였다. 분산분석 결과 p-value 값이 기준값 0.05보다 작은 것을 알 수 있었으며, 일정 시간이 경과하였을 때에 전지의 성능이 15% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 성능 변화는 리튬 폴리머 셀의 물성 변화로 인해 일어나는 것으로 추정된다.

Abstract In the field of defense, one-shot devices such as missiles are stored for a long period of time after they are manufactured, so it is essential to predict their storage life. A study was conducted to find the shelf life of a Li-ion battery used in one-shot devices. To do this, a Li-ion battery that has been used in weapon systems for more than 5 years was secured. A non-functional test was performed on the battery to check for external changes or failures. After the non-functional test, a discharge test was performed to measure the performance after storing it. Through the test, the performance was checked, including the initial charging voltage, discharge time, and battery temperature, and the trend of the change was identified. An F-test, One-way ANOVA, and regression analysis were performed to verify the aging, and the shelf life of the battery was estimated by an approximation formula that was derived through a regression analysis. As a result of the ANOVA, the p-value was less than the reference value of 0.05, and the performance of the battery decreased by more than 15% after a certain period of time. This change is assumed to result from the change in physical properties of the lithium polymer cell.

Keywords : One-shot Device, Li-ion Battery, Shelf Life, Performance Test, One-way ANOVA

*Corresponding Author : Dong-seong Kim(Defense Agency for Technology and Quality)

email: kds21104@dtqa.re.kr

Received October 19, 2020

Accepted December 4, 2020

Revised November 16, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

2차 전지(또는 축전지)는 외부에서 발생한 전기에너지를 화학 에너지로 변환하여 저장(충전)하였다가 산화-환원 반응에 의해 전기 에너지로 변환(방전)하는 장치로, 납축전지, 니켈카드뮴전지, 니켈수소전지 등이 널리 알려져 있다. 그러나 최근 들어 휴대용, 무선 전자장비들이 소형화 및 경량화 되는 추세에 따라 에너지 밀도가 높은 2차 전지의 필요성이 대두되고 있다.

리튬 2차 전지는 이와 같은 요구를 충족시킬 수 있는 강력한 후보로서, 에너지 밀도와 작동 전압이 높고, 보존 특성이 매우 우수하여 수명이 길다는 장점을 가지고 있다. 이 때문에 휴대전화나 무선 전자제품의 전원장치로 널리 사용되고 있으며, 전기 자동차나 에너지 저장 시스템(ESS, Energy Storage System) 등의 중·대형 제품 분야까지도 점차 확대되고 있다.

리튬 2차 전지의 활용 분야가 넓어짐에 따라 전지의 수명을 예측하고자 하는 연구가 여러 가지 방법을 통해 진행되고 있다. Joris는 전기 자동차에 들어가는 리튬 이온 전지의 수명을 예측하기 위해 온도 cycling을 통한 가속노화시험을 실시하였다. 리튬 이온 전지를 상온과 저온(약 -20 °C)에 반복적으로 노출시키면서 전지의 방전

량 및 리튬 전지 셀의 충전량을 cycle 별로 측정하여 성능의 변화를 확인하였다. 시험 결과 저온 영역에서 리튬 전지의 성능과 수명이 매우 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다[1].

Yang은 Joris와는 다르게 전지의 셀이 충전과 방전을 반복적으로 수행하였을 때 리튬 전지의 성능 변화를 확인하고자 하였다. 이를 위해 리튬 전지의 셀을 여러 가지 충·방전 조건으로 반복 시험을 수행한 후 저항, 충전량 등의 성능이 감소되는 정도를 확인하였다. 또한, 각 데이터에 대해 분산분석(ANOVA, Analysis of variance)을 수행하여 충·방전에 따른 노화가 발생하였는지 통계적으로 확인하였다[2].

이와 같이 수명 예측에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나 개발품 또는 신품을 활용하여 수명을 예측하는 연구로 한정되었다는 한계가 존재한다. 또한, 수명 예측을 위한 여러 가지 모델을 제시하였으나 실제 수명이 도래한 전지를 시험하여 해당 모델을 입증하는 연구가 수행되지 않았다는 제한사항도 존재한다.

본 연구에서는 이와 같은 연구의 한계점을 극복하고자 실제 장기간 보관된 리튬 2차 전지를 이용하여 수명을 예측하고자 한다. 이를 위해 7~8년간 보관된 2차 전지를 확보한 후, 방전 성능 시험을 실시하여 규격 대비 방전 성능을 비교하였다. 또한, 초기 생산 시 방전시험 결과와 4~5년 보관 후의 시험 데이터를 통해 2차 전지의 성능 변화 추세 및 노화 경향을 확인하고자 하였다. 이를 위해 일원분산분석(One-way Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하여 노화 경향이 있는지 확인하였으며, 방전시험 데이터를 통해 성능 변화 추세를 확인하여 수명을 예측하고자 하였다.

2. 본론

2.1 리튬 2차 전지

리튬 2차 전지는 양극, 음극, 분리막, 전해질의 주요 4대 요소로 구성되어 있다. 양극은 리튬이 함유된 금속 산화물이 주요 성분이며, 리튬 이온을 방출 / 흡수하여 전지 내에서 전기 에너지를 저장 / 방출하는 것이 가능하게 한다. 음극은 주로 흑연계(천연흑연, 인조흑연) 물질로 제작하는데, 대용량 전지의 경우 일반적으로 수명이 긴 인조흑연을 많이 사용하고 있다. 분리막은 양극과 음극의 직접적인 연결(단락)을 방지하면서 리튬 이온이 이동할 수 있도록 미세 기공이 형성된 구조로 되어 있으며, 일반

Table 1. Comparison to previous study

	Content
Joris (2016)	- Sample : New manufactured - Application : Electronic car - Purpose 1) Observe the change of capacity and resistance in thermal cycling test 2) Construct the aging model by thermal cycling 3) Storage time prediction in low temperature storage
Yang (2017)	- Sample : New manufactured - Application : Electric vehicles - Purpose 1) Identifying battery aging mechanism 2) Finding the aging stage to reduce charging stresses. 3) Establishing capacity degradation rate model.
This study	- Sample : naturally aged (over 5 years) - Application : One-shot devices - Purpose 1) Observe the change capacity and working time 2) Confirm the aging characteristic 3) Compare to the prior test data

적으로 폴리에틸렌(PE, Polyethylene), 폴리프로필렌(PP, Polypropylene) 등이 주요 소재이다. 최근에는 세라믹이나 고내열성 물질을 분리막 표면에 도포하여 내열성을 향상시키고 있으며, 고내열성인 물질을 분리막으로 사용하려는 연구도 진행되고 있다. 전해질은 이온을 전달하는 매개체 역할을 하는 물질로서 리튬 염과 유기 용매로 구성되어 있으며, 필요에 따라 각종 첨가제를 사용하여 일정한 특성을 향상시키기도 한다.

리튬 2차 전지는 제조 방식에 따라 크게 권취형(Winding type)과 적층형(Stacking)으로 분류한다. Fig. 1과 같은 권취형의 경우 별도의 공정 없이 전극을 원형으로 감아 적층하는 방식으로 생산되기 때문에 적층형 전지에 비해 생산성이 우수하지만 내부 저항이 높고, 수명특성이 취약하다는 단점이 존재한다. 또한, 권취형의 경우 원하는 형태로 형상을 변경하기 어려워서 주로 소형 전지를 요구하는 휴대폰이나 노트북 등에 적용되고 있다.

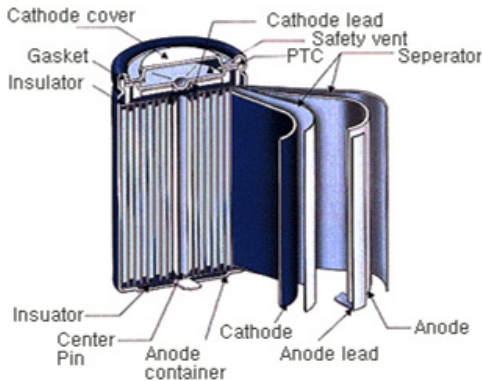


Fig. 1. Structure of winding type battery

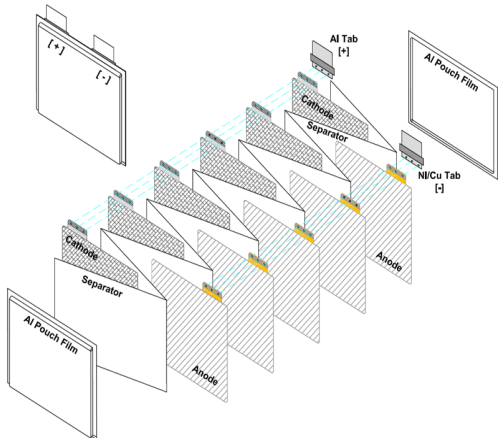


Fig. 2. Structure of stacking type battery

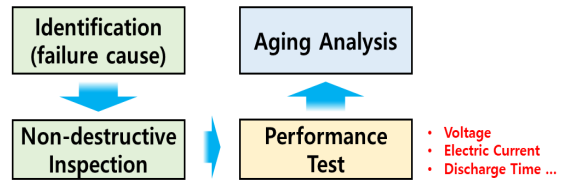


Fig. 3. Process of Test

리튬 2차 전지는 제조 방식에 따라 크게 권취형(Winding type)과 적층형(Stacking)으로 분류한다. Fig. 1과 같은 권취형의 경우 별도의 공정 없이 전극을 원형으로 감아 적층하는 방식으로 생산되기 때문에 적층형 전지에 비해 생산성이 우수하지만 내부 저항이 높고, 수명특성이 취약하다는 단점이 존재한다. 또한, 권취형의 경우 원하는 형태로 형상을 변경하기 어려워서 주로 소형 전지를 요구하는 휴대폰이나 노트북 등에 적용되고 있다.

적층형 전지(Fig. 2)는 전극을 한 장 한 장씩 타발한 후, 분리막을 가운데 두고 양극과 음극을 번갈아가면서 쌓는 방식으로 제조한 전지를 말한다. 적층형은 권취형 전지에 비해 생산 속도가 느리고, 제조비용이 높다는 단점이 있다. 그러나 권취형 전지에 비해 전자의 이동거리가 매우 짧다는 구조적 특성으로 인해 전지 내부 저항이 낮아 출력 전압이 높고, 발생하는 열이 매우 낮아 고출력을 요구하는 경우에는 매우 유리하다. 또한, 전지의 형상은 탄력적으로 쉽게 변경이 가능하며, 적층수 및 전극 크기에 따라 대용량으로 사용이 가능하며, 수명이 길다는 장점이 있기 때문에 전기자동차나 ESS 등 대형 전지를 사용해야 하는 경우에는 적층형 전지 방식이 매우 유리하다.

본 연구에서 대상으로 하는 리튬 2차 전지는 충전 전압이 000 VDC, 용량 00 kWh 인 적층형 전지로 유도무기의 추진을 위한 전원 및 전자장비의 전원을 공급하는 역할을 수행한다. 국방 분야의 제품 특성상 전쟁이 발생하지 않는 경우 오랜 기간(약 10년 이상) 보관되어지며, 온도 / 습도 등의 환경 변화를 받게 되어, 전지는 온도 / 습도의 변화에 따라 노화가 발생하게 되어 배터리 내의 셀의 저장 용량이 감소하는 노화 현상이 발생하기도 한다. 이와 같은 저장 용량의 변화는 성능의 저하를 의미하며, 이로 인해 구동기, 센서 등의 부품에 필요한 전력의 공급이 부족하게 되어 일시적인 작동 중지를 일으키기도 하고, 종래에는 임무 실패에 이를 수도 있다. 셀의 노화의 경우 일반적으로 배터리의 주기적인 검사를 통해 확인되지만, 유도무기 같은 특수한 경우에는 정기적 검사가 어려워 수명 예측이 필수적인 경우도 존재한다.

이러한 특성을 지닌 리튬 2차 전지의 수명에 대한 연구를 수행하기 위해 Fig. 3과 같은 절차로 시험을 실시하였다. 비기능 검사(Non-destructive inspection)는 육안으로 확인하는 과정이며, 특별한 이상이 없는 경우 전기적 특성 검사(회로저항, 절연저항 검사 등)를 실시한다. 전기적 특성 검사 시에는 주로 대상 시료를 작동하지 않고 충/방전회로, 절연저항 등 회로의 이상 여부를 확인한다. 비기능 검사를 통해 이상이 없는 것을 확인한 시료에 대해서는 방전시간, 방전량 등을 측정하기 위한 성능 시험(Performance test)을 수행한다. 성능시험 변수는 선행연구 및 규격 요구조건을 참고하였다.

2.2 비기능 검사

성능 확인을 위한 방전시험 전 먼저 시료의 이상이 없는지 2가지 비기능 검사(육안 검사 및 절연저항 검사)를 수행하였다.

육안 검사는 전지의 외관, 커패터 등의 부품 또는 전체 전지의 찍힘, 균열 등의 결함이 없는지 확인하는 검사로, X-ray 촬영 등의 비파괴 검사와 같이 수행하기도 한다. 육안검사 결과, 16조의 전지 시료가 모두 결함이 없는 것으로 확인되었다.

절연저항은 전지에 인가될 수 있는 정전기나 우발적인 전기 신호가 발생하였을 때 작동하지 않도록 막아주는 역할을 수행한다. 절연저항 검사 시 저항에 $DC\ 1,000 \pm 50\ VDC$ 를 인가하였을 때 저항값이 $000\ M\Omega$ 이상이어야 정상으로 판단한다. 절연저항 검사 결과 16조의 시료 모두 ∞ 값을 나타내는 것을 확인하여 비기능 검사 결과 이상이 없는 것으로 판단하였다.

2.3 방전 시험

비기능 검사 후 성능 확인을 위한 방전시험을 실시하였다. 방전시험을 위한 시험장비는 Fig. 4와 같이 구성되어 있다. 먼저 고전압인 전지를 방전하기 위한 고전압 방전기 1대와 전압, 전류 온도를 기록할 수 있는 기록계, 전지의 열적 변동을 확인할 수 있는 열화상 카메라 1대 및 시험 진행 과정 전반에 걸쳐 단위전지 전압을 모니터링하기 위한 전지 모니터링 장비로 구성되어진다. 또한, 열화상 카메라와 별도로 전지 내에 온도센서를 부착하여 시험 중 발열되는 온도를 측정하였다.

Fig. 5는 실제 방전 시험이 진행되는 모습을 보여준다. 시험은 리튬 2차 전지를 00 A의 충전 전류로 000 V 까지 충전한 후, $60 \pm 0\ kW$ 의 출력으로 방전을 실시하

여 전체 전압이 000 V에 도달하는 경우, 시험을 종료한다. 시험이 완료되면 측정된 전압, 전류, 전력, 온도의 측정 결과를 기록하였다.

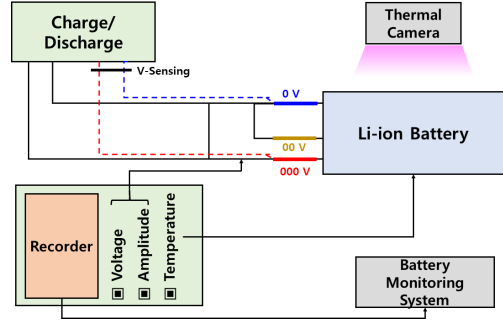


Fig. 4. Test system for measuring performance

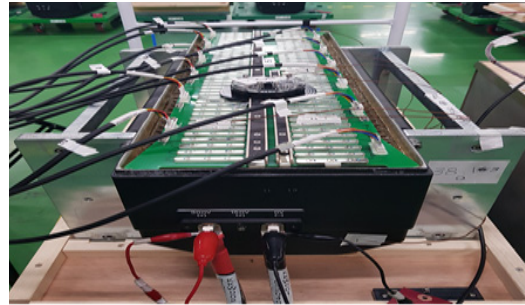


Fig. 5. Performance test

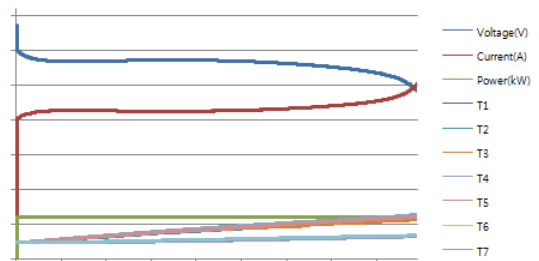


Fig. 6. Performance test result

리튬 2차 전지의 방전 시험 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 No. 1~5 시료는 7년 보관, No. 6~16 시료는 8년 보관된 시료이며, Working time은 규격 대비 방전시간, Voltage decrease는 초기 전압 대비 감소 비율을 의미한다. 시험 결과, 전지 16개의 시료 중 16개의 시료가 방전시간 기준인 0분00초(000초)를 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Performance test result

No.	Working time [%]	Temperature [°C] (end)	Voltage decrease [%]
1	103.7	66	35.5
2	108.0	65.8	36.1
3	108.2	63.8	35.5
4	108.2	64.4	35.8
5	108.4	64.7	35.6
6	105.7	67.6	36.0
7	103.5	66	36.1
8	102.4	67.9	35.7
9	106.7	69.6	35.9
10	105.5	68.3	35.6
11	104.5	66.1	36.0
12	104.3	65.2	35.4
13	105.3	65.8	36.2
14	106.3	75	35.7
15	108.2	69.7	35.6
16	104.9	65.1	35.7

2.4 분산분석을 통한 전지 노화 분석

시험결과를 바탕으로 수명 변화를 추정하기 위해 기존의 시험 데이터를 바탕으로 전지의 노화에 대해 확인하였다. 이를 위해 분산분석, 회귀분석을 수행하여 노화로 인한 변화 및 경향을 확인하였다.

분산분석은 R. A. Fisher에 의해 개발된 3개 이상의 모평균에 대한 분석으로, 측정된 데이터의 변동을 총 제곱합(Total sum of square)으로 나타내고, 이 총 제곱합을 실험과 관련된 요인(인자의 작용)에 대한 각각의 제곱합으로 분해한 후, 나머지를 오차변동으로 해석하는 검정법을 의미한다. 즉, 각각의 요인마다 분해한 분산을 오차 분산과 비교하여 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인지를 검정하고, 유의한 결과가 있으면 요인마다 효과를 추정한다.

Table 3. Table of ANOVA

Parameter	with group	in group	Total
Sum of square	SSA	SSE	SST= SSA+SSE
Degree of Freedom	k-1	N-k	N-1
Average of square	$MS_A = \frac{SS_A}{k-1}$	$MS_E = \frac{SS_E}{N-k}$	
F_0	$\frac{MS_A}{MS_E}$		

본 연구에서는 분산분석을 통해 보관 기간에 따라 노화가 발생하는지 여부를 확인하기 위하여 다음과 같이 가설을 수립하였다.

- **귀무가설** : 보관 기간에 따라 성능 특성의 차이가 없다고 판단함

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i \quad (1)$$

- **대립가설** : 보관 기간에 따라 성능 특성의 차이가 있다고 판단함

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ for at least one pair (i,j)} \quad (2)$$

위와 같이 가설을 설정하고, Table 3과 같이 분산분석표를 작성하여 검정통계량 F_0 및 유의확률 p-value를 계산하고, 이에 따라 가설을 검증한다.

$$SS_T = SS_A + SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SS_A = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2 \quad (5)$$

분산분석 표에서 유의수준을 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였을 때 p-value가 0.05보다 큰 경우 귀무가설을 기각할만한 근거가 없다고 판단하여 귀무가설(성능 변화가 없음)이 맞는 것으로 판단한다. 만약 유의수준 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였을 때 p-value가 0.05보다 작은 경우에는 귀무가설이 맞지 않는 것으로 판단하여 대립가설(성능 변화가 있음)을 채택한다. 여기서, p-value 값은 유의수준에 따라 다른 값을 사용하기도 한다. (ex. $\alpha = 0.1$ 의 경우에는 p-value 값은 0.1을 기준으로 판단함)

분산분석을 수행하기 위해서는 먼저 데이터 간에 분산이 같은 값을 나타내는지 확인이 필요하다. 이를 위해 MINITAB을 활용하여 F-검정을 수행한 후, 각 데이터의 등분산 특성을 확인하였으며, 분산값이 동일하다는 가설을 귀무가설로 채택하여 분산분석과 동일하게 검정한다. 결과 p-value 값이 0.007804로 계산되어 등분산이 아닌 것으로 검정되었다.

F-검정 결과를 바탕으로 데이터를 이분산으로 가정한 후 분산분석을 수행하였다. 그 결과 p-value 값이 1.99×10^{-11} 로 p-value 값이 0.05보다 작기 때문에 보관 기간에 따라 성능차이가 있는 것으로 판단되었다.

2.5 회귀분석을 통한 노화 경향 분석

성능 변화의 경향을 확인하기 위하여 추가적으로 회귀 분석을 수행하였다. 측정된 방전 시간 데이터를 가지고 선형 회귀분석을 수행하고 p-value 및 선형 모델의 기울기로 노화 경향을 판단하였다. 회귀분석을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. 회귀 분석 결과 방전시간과 방전을 모두 p-value 값이 2.3×10^{-44} 으로 0.05보다 작기 때문에 노화의 경향이 있는 것으로 판단되며, 보관 기간에 따라 노화가 발생하는 것으로 생각된다.

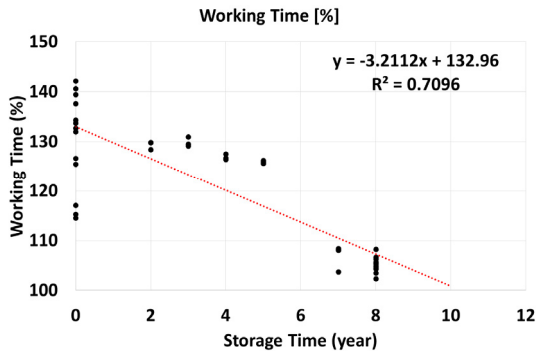


Fig. 7. Life Prediction by working time

그러나 노화 시험을 수행한 데이터를 기반으로 볼 때 보관기간 6년 전후로 데이터의 노화 경향이 크게 바뀌는 것을 알 수 있다. 6년차 시험 데이터가 존재하지 않기 때문에 정확한 경향은 알 수 없으나 6년을 기준으로 큰 감소가 발생하는 것을 볼 때 해당 시점에서 리튬 셀의 물성 변화가 일어나는 것으로 판단할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 국방 분야에서 사용되고 있는 리튬 2차 전지의 수명에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 7년 이상 보관된 전지를 확보하여 비기능 검사와 성능 시험을 수행하였으며, 성능 시험을 통해 방전 시간, 방전을 등을 측정하였다. 또한, 측정된 데이터를 활용하여 F-검정, 분산분석, 회귀분석 등의 통계 분석을 수행하여 노화 경향을 확인하였으며, 이를 바탕으로 리튬 2차 전지의 수명을 추정하였다.

F-검정과 분산분석 결과 p-value 값이 기준값 이하인 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 측정된 데이터 간의 노화로 인한 차이가 나타나는 것으로 추정되었다. 또한, 회귀 분석 결과에서도 전체적으로 노화가 발생하여 성능

이 감소하는 것을 확인하였으며, 보관 기간 6년 전후로 성능이 크게 감소하는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 볼 때 리튬 2차 전지의 정상 성능을 발휘할 수 있는 기간은 약 10년 정도로 판단되며, 6년을 기준으로 15% 이상 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 6년 이후에도 사용은 가능하지만 신뢰도는 감소될 것으로 판단된다.

References

- [1] Joris, J., Loïc, B., Pascal, V., Yves, D., and Ali, S., "Lithium-Ion Battery Aging Experiments at Subzero Temperature and Model Development for Capacity Fade Estimation", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 6, pp. 4328~4343, June. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2473841>
- [2] Yang, G., Jiuchun, J., Caiping, Z., Weige, Z., Zeyu, M., Yan, J., "Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses", *Journal of Power Sources*, Vol. 356, pp. 103~114, April. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.04.084>
- [3] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Sack, A. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 147, pp.269-281, March, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- [4] Kim, D., Jang, S., "Study on Aging Characteristics of Exploding Foil Initiator", *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp.581-588, August, 2020.
- [5] Achintya Haldar, Sankaran Mahadevan, *Probability, Reliability, and Statistical Method in Engineering Design*, pp. 304, John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 304.
- [6] Choi., S., Ramana, V. G., Robert, A. C., *Reliability-based Structural Design*, pp.309, Springer, 2006, pp. 309.

김 동 성(Dong-seong Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한국항공대학교 항공공우주 및 기계공학과 (항공공우주 및 기계공학석사)
- 2016년 10월 ~ 2019년 12월 : 국방과학연구소 연구원
- 2020년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

추진, 유도무기, 신뢰성

진 홍 식(Hong-Sik Jin)

[정회원]



- 1991년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (항공우주공학사)
- 2012년 8월 : 국방대학교 사업관리학(사업관리학석사)
- 1991년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

〈관심분야〉

일반기계, 신뢰성