Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 22, No. 12 pp. 509-516, 2021

https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.12.509
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

# 열전지 수명예측 기법에 관한 실험적 고찰

**황수하**
**국방기술품질원**

# Experimental Study of Shelf-Life Prediction Method for Thermal Battery

Su Ha Hwang
Components Reliability Team, Defense Agency for Technology and Quality

**요 약** 본 연구의 대상인 열전지는 10년 이상 저장 후 사용이 가능한 대표적인 비축전지로서 추진기관, 탄두, 신관 등과 같이 유도탄의 수명을 좌우하는 핵심적인 품목이다. 이러한 열전지의 수명을 예측하기 위해서는 현재 군에 배치된 열전지나 장기저장 중인 열전지를 주기적으로 시험하여 기능 및 특성 변화를 파악하여 통계적인 분석을 통해 수명을 가늠하는 방안이 가장 정확한 방법이지만 10년 이상의 시간이 소요되기 때문에 이러한 방법은 적용이 불가하다. 국내의 경우 열전지 개발의 역사가 짧기 때문에 수년간 축적된 성능 데이터를 제시할 수 없고, 신뢰성시험 중 하나인 가속노화시험을 통해 열전지의 수명을 예측하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기존의 문헌을 참고하여 열전지를 고온조건에서 노화 시키고, 방전성능의 변화 경향 분석을 통해 Arrhenius 수식의 활성화에너지 및 가속계수를 산출하고자 하였다. 이후 산출된 값을 기반으로 가속노화시험(8년 모사)을 재수행하고 실제로 상온 조건에서 자연노화된 열전지(8년차)의 방전성능을 비교 분석하도록 시험계획을 수립하였다. 이 과정을 통해 최종적으로 산출된 활성화에너지의 실효성을 확인하고 기존에 적용되었던 수명예측 기법에 대한 타당성을 확인하고자 하였다. 하지만 시험 결과, 실제 8년 자연노화된 열전지의 방전성능은 신품 대비 약 20% 감소하였지만, 75℃, 95℃, 115℃의 고온 조건에서 약 30일간 가속노화된 열전지는 방전성능의 변화가 없었다. 이는 열전지를 고온에서 저장하여도 노화가 가속되지 않는다는 것을 방증하는 결과라고 해석할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결과들을 통해 열전지 수명예측 기법에 대한 고찰을 실시하였고, 추후 나아가야할 방향을 제시하였다.

**Abstract** Thermal battery is the principal component affecting the shelf-life of a guided missile. The most accurate method to predict the shelf-life of a thermal battery involves periodically testing the battery in storage to check the performance and performing statistical analysis on the test results. However, it is difficult to present statistical data of several years in Korea, so the accelerated aging test predicted the shelf-life in the present analysis. This study used samples that have been aged under high-temperature conditions. Subsequently, the activation energy has been calculated by varying the discharge performance. The calculated activation energy value was again used to conduct the accelerated aging test to compare it with a test on naturally aged ones. Following these processes, we confirmed the validity of the existing predicting method. However, the results are different from what we expected. The discharge performance of naturally aged ones has been decreased by 20%, but there was no change in performance of the samples put under accelerated aging at 75, 95, 115℃. This observation could mean that aging was not accelerated even when the thermal battery was stored at a high-temperature condition. In essence, this study conducted appropriate tests and used the shelf-life method to predict the shelf-life of thermal battery.

**Keywords :** Shelf-Life, Thermal Battery, Prediction, Accelerated Aging Test, Accelerated Degradation Test, Arrhenius Equation

*Corresponding Author : Su Ha Hwang(Defense Agency for Technology and Quality)
email: suhah12@dtaq.re.kr
Received November 18, 2021 Revised November 30, 2021
Accepted December 6, 2021 Published December 31, 2021

# 1. 서론

## 1.1 개요

열전지는 10년 이상 저장 후 사용이 가능한 대표적인 비축전지로서 내장된 화학 열원에 의해 전해질이 녹아야만 활성화가 되는 1차 비축전지(Heat Activated Reserve Battery)이다. 이와 같이 비활성상태에서 사용하기 전까지 장기저장되는 특성으로 인해 오랜시간이 지나도 성능의 열화가 매우 적어서 유도무기에 전력을 공급하는 핵심적인 부품으로 사용되고 있다[1,2].

열전지의 수명은 곧 유도탄 수명에 직접적인 영향을 미치기 때문에 설계/잔존 수명예측 기법을 확보하는 것은 국방예산의 절감과 군의 전력지수 향상을 위해 필수적이다. 이를 위해 저장중인 열전지를 주기적으로 시험하여 기능 및 성능 변화를 파악하는 것이 가장 정확하지만, One-Shot Device라는 특성상 전지를 활성시키기 전까지 성능을 확인할 수 없다는 제한사항이 있다. 또한 해외 대부분의 국가에서 열전지 및 파이로테크닉 부품들은 엄격한 수출허가 품목으로 관리하고 있으며[3], 이에 관련된 자료도 제한적이다. 이러한 이유로 국방과학연구소에서는 열전지에 대한 독자적인 기술을 확보하기 위해 핵심기술 개발에 성공하였고 현재 열전지가 국산 유도무기 전원으로 사용되고 있다. 하지만 열전지의 신뢰성, 즉 수명을 예측하고 평가하는 기법에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

해외 열전지 제작사의 경우, 자사 제품의 실제 사용실적으로 수명을 제시하고 있지만 국내의 경우 열전지 개발의 역사가 짧기 때문에 사용실적을 제시할 수 없다. 따라서 국내에서는 수명시험 중 하나인 가속노화시험을 통해 열전지의 수명을 예측하고 있다.

가속노화시험이란 신뢰성시험 중 하나로 스트레스의 수준을 증가시켜 제품 성능(특성)의 노화(열화)를 가속하여 고스트레스 수준 하에서 제품의 성능 데이터를 수집하고, 이 데이터와 수명모델식을 이용하여 제품의 신뢰성을 추정하거나 정상 스트레스 하에서 제품의 수명 시간을 예측하는 시험이다. 최근에는 고신뢰도를 갖는 제품에 대한 적절한 신뢰성 평가 시에 직면하게 되는 시간과 시험단위 수의 제약을 극복하여 짧은 기간에 제품의 신뢰도와 성능을 파악하기 위해서는 가속수명시험 또는 가속노화시험 등이 필수적인 도구로 자리매김을 하고 있다.

가속노화시험을 하기 위해서는 가장 먼저 고장모드, 고장판단기준 등을 식별하여야 하며, 고장 메커니즘을 알아야만 고장을 정의하고 가속 스트레스를 결정할 수 있다. 국내 열전지 개발기관의 문헌에 따르면, 열전지의 고장은 내부의 잔류 free volume에 의한 잔류 수분량, 산소량, Fe와 KClO4의 조성으로 제작되는 열원에 의한 전극의 자연 산화 등으로 발생되는 열전지의 성능 저하로 알려져 있다[4]. 이를 정리하면 고장모드는 열전지 방전지속시간의 감소이며, 고장 메커니즘은 내부 구성품들의 산화로 볼 수 있다. 따라서 가속 스트레스는 내부 구성품들의 산화반응을 가속시키는 온도가 되며, 온도에 관한 수명모델인 Arrhenius 식을 기반으로 가속노화시험을 통한 수명예측 방법이 제시되었다.

최근에 김민우 등은 해외 문헌에서 제시하는 활성화에너지를 기반으로 약 3개월 동안 가속노화를 수행하였고, 이는 곧 12년에 대응하는 기간이다. 하지만 가속노화에도 불구하고 성능 변화가 매우 작았으며 오히려 방전성능이 더 좋아진 결과도 확인할 수 있었다[5]. 보고서의 결론으로 국내 개발 열전지의 에너지의 재도출이 필요하며, 이를 통해 더 정확한 장기저장 수명예측 방법이 필요함을 강조하고 있다.

활성화에너지란 반응물질계로부터 생성물질이 되기 위한 반응의 최소한의 에너지를 말하며 주로 가속노화시험의 기간과 온도 조건 산정에 필요한 값이다. 이 값을 도출하기 위해서는 여러 가지 방법이 제시되고 있고, 최근에는 시차주사열량계(DSC)나 열흐름분석기(HFC) 등을 활용하여 열전지의 구성품별 에너지를 측정하기도 하였다. 기존의 열전지 수명예측은 고온 가속노화시험을 통해 실시되었다. 내부 구성품들 중에서 가장 민감한 부품의 활성화에너지를 열전지의 활성화에너지로 설정하고 목표가 되는 기간까지 고온가속노화 후 성능시험을 실시하는 방식이다. 예를 들어 10년이 설계수명이라면 열전지의 내부 구성품 중 하나인 열원의 활성화에너지를 기반으로 OO℃도에서 O개월동안 고온 가속노화를 수행하고, 방전시험을 수행한다. 이때 열전지의 성능이 국방규격에 만족한다면 이는 곧 10년의 수명에 대응하는 것이다.

하지만 단위 구성품의 특성과 열전지의 방전 성능과의 상관관계가 불명확할 뿐만 아니라 여러 구성품들의 복합적인 노화가 성능감소에 기인할 수 있기 때문에 구성품의 활성화에너지로 열전지 전체의 수명을 예측하는 데 무리가 있다고 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구들과 다른 방법으로 에너지를 도출하는 방법을 시도하였다. 먼저 열전지를 3가지 이상 고온 조건에서 저장하고, 신품대비 방전 성능이 변화되는 경향을 확인하여 에너지를 역으로 산출하는 방법을 수행하는 것을 계획하였다. 이와 같은 방법은 유

도탄의 추진제나 화공품 및 고무류 등에서 에너지를 도출할 때 널리 사용하는 방법이다.

유건성 등은 전투화용 고무를 60℃, 80℃, 100℃에서 고온 가속노화를 수행하여 인장강도, 신장률, 내마모도의 변화율을 확인하였고, 이를 통해 활성화에너지 도출 및 수명을 예측하였다[6].

또한 정규동 등은 HTPB 고체 추진제의 노화를 평가하기 위해 고온저장 및 탄성률의 변화를 기반으로 수명예측 연구를 수행하였다. 이들은 후경화 반응이 완료된 추진제 시편에 대하여 가속노화시험을 진행하고 Arrehenius 식의 계수 즉 활성화에너지를 도출하였다[7].

본 연구에서도 이와 같이 세 가지 온도 조건에서 열전지를 일정기간 저장하고 방전시험을 수행하였다. 이후 신품대비 방전성능의 변화율을 반응속도로 보고 활성화에너지를 산출하고자 하였으며, 이를 기반으로 8년 가속노화시험을 수행하고자 하였다. 또한 가속노화품과 8년차 자연노화품과 성능을 비교하여 산출된 활성화에너지의 실효성을 확인하고자 하였다.

### 1.2 시험대상

본 연구의 대상이 되는 품목은 유도탄의 시효성 품목 중 하나인 열전지이다. 열전지는 내장된 화학 열원에 의해 전해질이 녹으면서 활성화되는 1차 비축전지(Heat Activated Reserve Battery)이며, Fig. 1에 나타난 것처럼 헤더, 착화기, 집전체, 열원, 양극, 전해질, 음극 등으로 구성된 전지 스택이 단열재에 둘러싸인 채 전지 케이스에 밀봉되어 있는 형태로 되어있다. 보통 1개의 단위셀에 약 2.0V정도의 전압을 가지며 유도탄의 종류 및 운용 조건에 따라 총 전력이 결정된다.

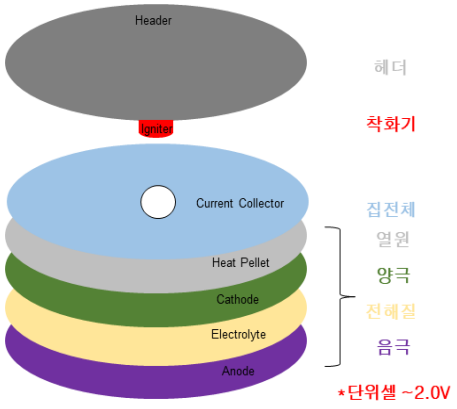


Fig. 1. Component of the Thermal Battery

Fig. 2는 단위셀들이 직렬로 적층된 형태로 만들어진 열전지의 내부 구성과 작동원리를 나타낸 그림이다. 발사 통제 장비에서 발사 명령을 따라 착화기(Igniter 또는 Squib)에 전기 신호가 인가되면 전지 상부 헤더(Header)를 통해 착화기가 동작하여 전지 내부의 열원을 점화시킨다. 이 열원에 의하여 열전지 내부 온도는 고온으로 가열되며, 이 열에 의해 고체 전해질이 용융되어 비로소 열전지가 활성화되어 외부에 전력을 공급하다.

착화기 동작부터 전지에서 기전력이 발생하는 시간, 즉 전지 시간은 전지의 크기에 따라 차이가 있으며, 소형 열전지는 대략 1초 이내, 대형 열전지는 2~3초 이내에 동작한다. 열전지는 전해질이 액체 상태일 때만 전지로 동작하기 때문에 장시간 전지 동작을 위하여 전지 내부에 단열재를 두어 전해질이 액체 상태를 유지하게 한다.

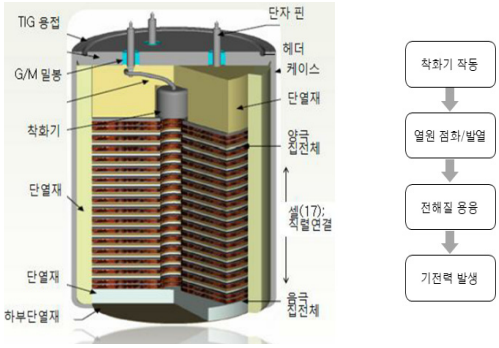


Fig. 2. Principle of the Thermal Battery

또한 열전지는 전해질이 녹기 전까지는 비활성 상태로 매우 우수한 장기 보관특성(10년 이상)을 가지고, 유지보수 활동이 불필요하며 신뢰성이 탁월하다는 장점이 있다.

## 2. 시험방법

본 연구를 위한 시험은 고온저장품 시험과 자연노화품 시험으로 항목을 분류하였고 이에 대한 설명은 다음과 같다. 고온저장품 시험은 앞서 언급했던 것과 같이 온도챔버에서 열전지 저장 후 방전시험을 통해 반응속도 상수 및 활성화에너지를 산출하고, 이 값을 기반으로 8년 가속노화 열전지를 만드는 시험으로 정의하였다. 자연노화품 시험은 2013년부터 수명평가를 위해 저장중인 8년차 열전지를 시험하여 데이터를 획득하는 시험으로 정의하였으며, 최종적으로 8년 가속노화된 열전지와의 성능과 비교하기 위한 기준이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는

고온저장품 시험을 위해 온도 챔버에서 시료를 보관하는 기간 동안 자연노화품 시험을 수행하였다. 최종적으로 두 시험을 통해 도출된 방전성능 값을 비교하는 것이 본 연구의 핵심이며, 두 열전지의 성능이 유사하다면 기존에 수행하던 고온 가속노화시험을 통한 열전지 수명예측 기법이 타당하다고 볼 수 있을 것이다.

## 2.1 고온저장품 시험

Arrhenius 모델을 기반으로 열전지의 수명을 예측하는 기존의 방법은 해외 문헌에 제시된 활성화에너지 값이나 각 부품(양극, 음극, 열원, 전해질 등)의 활성화에너지를 시차주사열량계(DSC) 또는 열흐름분석기(HFC)를 통해 실험적으로 값을 구하고 이를 기반으로 가속노화시험을 설계하는 방식이었다. 하지만 본 연구에서는 내부의 구성품이 아닌 전체 성능에 대한 활성화에너지를 도출하고자 열전지를 고온저장하였다. 이를 위해 적어도 3개 조건에서의 반응속도 값이 필요하며 이와 관련된 Arrhenius 식은 아래와 같다.

$$k = Aexp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

k는 반응 속도, A는 상수, $E_a$는 활성화에너지(cal/mol 또는 J/mol), R은 이상기체상수 (R=1.987 cal/mol), T는 절대온도(K)를 말한다. 한편 시간에 따른 성능 노화 영향은 추진제와 같은 화공품 등에 적용되는 모델인 Layton 노화모델을 적용하였고 이는 식(2)로 나타낼 수 있다[8].

$$P = P_0 + klog\frac{t}{t_0} \quad (2)$$

$P$는 성능 특성치를 말하며 본 연구에서는 국방규격에 주요한 특성으로 제시되어 있는 방전지속시간으로 선정하였다. 본 연구에서는 열전지를 75℃, 95℃, 115℃에서 30일간 저장 한 후에 방전지속시간($P$)을 실험적으로 도출하여 선형식의 기울기인 k값을 도출하고자 하였다. 또한 이 값들을 식(1)의 양변에 로그를 취한 식(3)에 대입하여 최종적으로 활성화에너지를 도출하고자 하였다.

$$\ln(k) = \ln A - \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

실험을 통해 산출된 활성화에너지는 다시 가속노화시험 설계에 활용되며 아래와 같이 저장온도 조건에 따른 가속기간을 계산할 수 있으며 그 예시를 Table 1에 나타내었다.

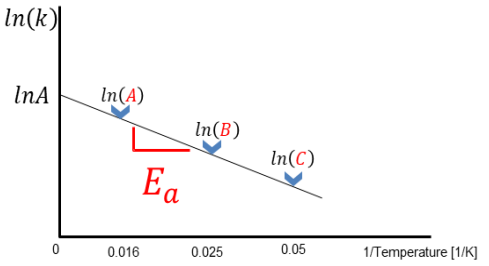


Fig. 3. Example of the Arrhenius Plot

Table 1. Example of Calculation Based on Arrhenius Equation

| Variable | Example | |
|---|---|---|
| Ea, (Activation energy) [cal/mol] | 10000 | |
| R, (Gas constant) [cal/mol] | 1.9872 | |
| T_stored, (Stored temperature) [K] | 297.3 | |
| t_stored, (Stored time) [day] | 2920 | |
| T_accel, (Accelerated temperature) [K] | 345.3(72℃) | 373.3(100℃) |
| t_accel, (Accelerated time) [day] | 276.4385743 | 92.48561962 |
| Acceleration Reaction Factor | 10.56292526 | 31.57247594 |

$$t_1 e^{-\frac{E_a}{RT_1}} = t_2 e^{-\frac{E_a}{RT_2}} \quad (4)$$

$$AF = \frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (5)$$

이때 열전지 저장 온도는 선행연구 결과를 참고하여 75, 95, 115℃로 선정하였다[5]. 기존에 개발기관에서 열전지를 60℃에서 약 100일정도 가속노화한 후에 방전시험을 했음에도 불구하고 성능변화가 매우 미미하거나 없는 것을 확인하였고, 성능의 변화가 없다면 앞서 계획한 것처럼 활성화에너지를 산출할 수 없다. 따라서 본 연구에서 선행연구와 사업기간 등을 고려하여 기존의 조건보다 조금 더 가혹한 조건으로 저장온도를 설정하였다.

## 2.2 자연노화품 시험

자연노화품 시험은 위에서 언급하였듯이 시간의 흐름

에 따라 자연스럽게 노화가 진행된 열전지의 성능을 확인하는 시험이다. 본 연구에서는 국방기술품질원에서 장기저장시험(Surveillance Test)을 위해 2013년부터 약 7년동안 저장된 열전지를 활용하였다. 이 열전지는 군 시설부대의 배치탄 저장환경과 유사하게 양산업체가 소유한 시료창고에 저장되어 있던 시료이다. 2020년 기준 약 8년차 시료라고 볼 수 있으며, 고온저장품 시험을 통해 도출된 가속계수를 기반으로 8년 가속노화가 된 열전지와의 비교 및 검증을 위해 활용되었다. 이때 열전지를 생산한 공정이 같더라도 시간이 흐름에 따라 2013년에 제작한 열전지와 2020년에 제작한 열전지의 성능특성이 다를 수 있다. 이를 확인하기 위해 과거부터 2019년 까지 양산품 로트 수락시험 결과를 비교하였다.

열전지에 가해진 전류는 실제 유도탄 발사부터 비행과정까지를 모사한 전류 프로파일을 활용하였으며, 2014년부터 2020년까지 제작된 31개의 열전지 시험값을 활용하였다. 이때 나타나는 방전 곡선에서 특정시점에서의 전압값을 Fig. 4, 5에 나타내었다.

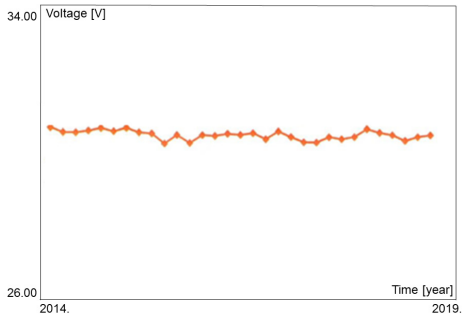


Fig. 4. Voltage Value of the Thermal Battery at a Specific Point in time (High Temperature)

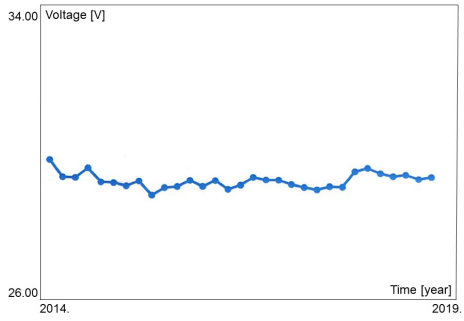


Fig. 5. Voltage Value of the Thermal Battery at a Specific Point in time (Low Temperature)

Fig. 4는 고온운용 조건에서 방전시험한 결과값이며, Fig. 5는 저온운용 조건에서의 결과값이다. 각 그래프에서 확인할 수 있듯이 과거부터 현재까지 열전지 방전성능의 편차는 약 10% 미만으로, 특성값이 일정하게 유지된다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 2013년에 제작된 열전지와 2020년의 제작된 신규 열전지를 동일한 로트로 가정하고 본 연구를 수행하였다.

## 3. 시험결과

열전지의 성능은 방전시험을 통해 확인하였다. 통상적으로 방전시험은 운용 환경에 따라 온도챔버를 활용하여 고온, 저온, 상온 조건으로 컨디셔닝을 한 뒤, 별도 제작된 시험장비를 통해 방전성능을 확인한다.

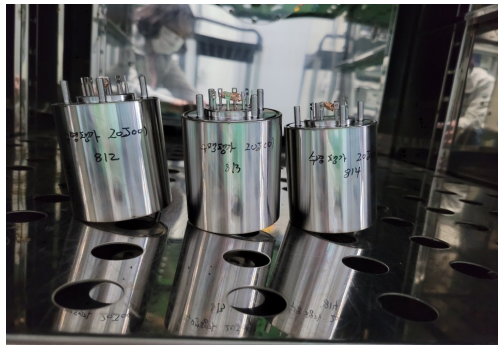

Fig. 6. The Photography of Thermal Battery in the Temperature Chamber

Fig. 7. Experimental Setup of the Discharge Test

본 연구에서는 열전지 성능에 가장 가혹한 조건인 저온조건을 택하였고 방전지속시간 결과를 기반으로 성능변화를 확인하였다. 방전지속시간이란 열전지 활성 후,

국방 규격에 제시되어 있는 Cut-off 전압값 미만으로 떨어질 때까지의 시간을 말하며 동작수명(Operation Life)이라고도 불린다. 먼저 활성화에너지 도출을 위해 신품과 고온저장품의 방전지속시간의 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다.

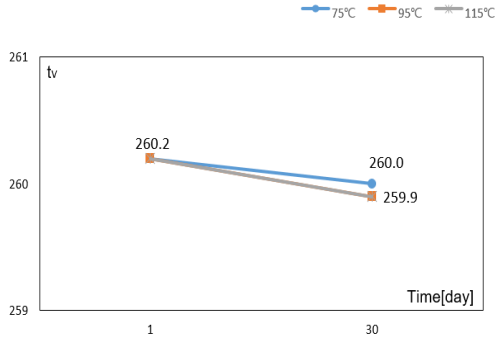


Fig. 8. Variation of the Discharge Duration Time According to Storage Time

75, 95, 115 ℃에서 30일 저장했음에도 불구하고 방전지속시간은 신품대비 차이가 없다. Fig. 8의 1일차 데이터 즉, 신품 열전지의 경우 방전지속시간은 260.2초로 나타났고, 고온에서 30일간 저장된 열전지 3개의 방전지속시간 값도 신품과 차이가 없는 것을 확인하였다. 그래프에서 보이는 미세한 차이는 계측에 오차에 불과한 것으로 보이며, 실질적으로는 성능변화가 전무한 것으로 판단된다. 즉 기존에 예상했던 것과 달리 고온조건에서 열전지의 노화가 가속되지 않았다고 볼 수 있다. 하지만 기계획 대로 위 식(2)를 통해 반응속도 상수 k를 도출하고 이를 Fig. 3과 같이 Arrhenius 모델식과 결합하여 나타내면 Fig. 9과 같다. 이때 선형식의 기울기인 -1392.1은 식(3)에 따라 -Ea/R값이 되며 최종적으로 Ea 값은 2766 cal/mol이다. 또한 식(5)와 Table 1과 같이 가속계수 및 가속시간 등을 나타내면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

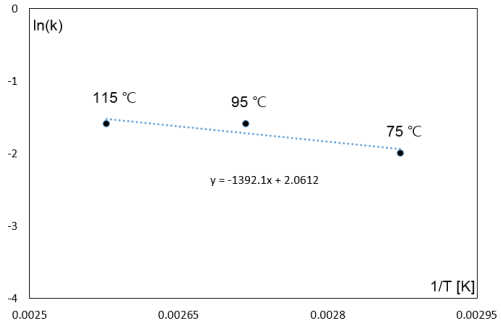


Fig. 9. Curve Fitting with Arrhenius Equation

Table 2. Activation Energy and AF Based on Discharge Duration Results using Arrhenius Equation

| Variable | Calculated Values | Reference (NSWC) |
|---|---|---|
| Ea, (Activation energy) [cal/mol] | 2766 | 14600 |
| R, (Gas constant) [cal/mol] | 1.9872 | 1.9872 |
| T_stored, (Stored temperature) [K] | 297.3 (24 ℃) | 297.3 (24 ℃) |
| t_stored, (Stored time) [day] | 2920 (8년) | 2920 (8년) |
| T_accel, (Accelerated temperature) [K] | 344.3 (71℃) | 344.3 (71℃) |
| t_accel, (Accelerated time) [day] | 1539.2029 (4 year) | 99.43594492 (3 month) |
| Acceleration Reaction Factor | 1.89 | 29.365 |

앞서 언급했듯이 성능변화가 전무하기 때문에 도출된 값 또한 의미가 없다고 판단된다. 계산된 값에 따르면 24 ℃에서 8년간 저장된 열전지를 모사하기 위해서는 71 ℃에서 약 4년간을 저장해야만 노화정도가 같다고 볼 수 있다. 이는 기존의 문헌값을 통해 산출한 가속기간과는 약 16배 차이가 있으며, 이는 가속노화시험이라고 보기에는 무리가 있다. 만약 계산된 값이 타당하다면 열전지의 수명은 무한대이며, 자연노화품 시험결과 또한 신품대비 성능변화가 없을 것이다. 하지만 자연노화품 시험결과는 이전 시험결과와 상충된다. Fig. 10은 신품과 상온(약 24 ℃)에서 약 8년간 저장되어 있었던 자연노화품 시료 3개의 방전지속시간 변화를 나타낸 결과이다.

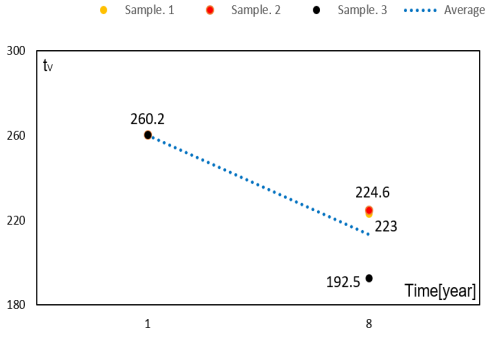


Fig. 10. Variation of the Discharge Duration Time According to Real Time

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 자연상태에서 8년의 시간이 경과함에 따라 방전지속시간은 신품대비 약 20% 감소하였다. 이는 앞서 가속노화시험을 통해 확인한 결과와는 대비된다. 이는 곧 고온조건에서 열전지의 노화가 가속되지 않았지만 실제로는 열전지가 노화되었다는 것을 의미한다. 다만, 온도챔버에 저장하는 기간이 짧았다는 제한사항이 있었지만, 기존의 NSWC의 문헌값(활성화에너지 : 14600 cal/mol)을 적용하여 30일 저장에 대응하는 가속시간을 산출해보면 Table 3와 같다.

Table 3. Calculation Value of the Accelerated Aging Period Based on Reference Value of Activation Energy

| Storage condition | Accelerated aging period |
|---|---|
| 75 ℃ (30day) | 3 year |
| 95 ℃ (30day) | 10 year |
| 115 ℃ (30day) | 28 year |

Table 3에 따르면 30일간 95℃에서 저장하면 약 10년동안 자연노화된 열전지와 성능이 같아야하지만 실제 값은 매우 다른 결과를 보여준다. 즉 열전지 수명을 가속시키는 인자는 고온 이외에 다른 인자가 있을 수 있다는 것을 반증하는 결과이며, 이는 곧 고온 가속노화시험이라는 수명예측 기법에 오류가 있을 수 있다는 것을 방증하는 결과이다.

## 3. 결론

본 연구에서는 열전지의 수명예측 기법으로 사용되고 있는 고온 가속노화시험에 대한 실험적인 고찰을 수행하였다. 기존에 추진제와 같은 화공품류에서 수행하는 방법과 같이 Arrheninus 모델을 기반으로 열전지의 활성화에너지를 도출하여 가속노화시험을 수행하고, 이를 실제 자연노화품과의 비교를 통해 기법의 실효성을 검증하려는 시도가 있었다. 활성화에너지는 화공품 등에서 통상적으로 사용하는 방법과 같이 고온 저장 및 성능 변화 데이터를 통해 산출하였다. 하지만 75, 95, 115℃에서 약 30일간 고온 저장을 하였음에도 불구하고 방전성능의 변화는 존재하지 않았지만, 실제 자연노화품의 성능은 신품대비 약 20% 정도 감소한 것을 확인하였다. 이는 곧 열전지가 고온의 스트레스로 수명이 가속화 되지 않는다는 것을 방증하는 결과이며, 기존의 설계 수명예측 기법에도 오류가 있을 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 시료의 수가 한정적이고 저장의 기간이 짧다는 시험계획에 한계점이 존재하며 2013년과 2020년의 생산공정이 같다고 가정하는 것에 대한 오류도 존재할 수 있기 때문에 이를 결론으로 단정 짓기에는 다소 무리가 있다.

따라서 열전지의 수명예측 기법 개발을 위해서는 환경시험 등을 통한 고장인자 또는 가속인자 재선정 등에 관한 추가적인 후속연구가 필요하다고 판단된다. 또한 단기적으로는 군이 보유하고 있는 유도탄 열전지(장기저장된 시료)를 창정비 시기에 확보하여 내부 구성품의 열화정도를 파악하고 이를 통해 세부적인 고장메커니즘을 규명할 필요가 있다고 사료된다.

## References


[1] Guidotti, R.A. and Masset, P., "Thermal Activated (Thermal) Battery Technology. Part I: An Overview," *Journal of Power Sources*, Vol. 161, pp. 1443-1449, 2006.

[2] Cheong, H.W. "Status and Strategy of Thermal Battery Development," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 22, No. 7, pp. 24-33, 2009.

[3] Cheong, H.W., Kang, S.H., Kim, K.Y., Cho, J.H., Ryu, B.T., Baek, S.S., "Performance Analysis of Pyrotechnic Devices on the Reliability of Thermal Batteries," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers.*, Vol. 23, No. 1, pp. 116-123, 2019.

[4] Yoo, J.C., Kim, B.Y., "A Study of Predicting Design-Life of Shelf Life Items of the Missile", Project Ending Report, Agency of Defense Development, Korea, p.125-143, 2020.

[5] Kim, M. U., "Accelerated Aging Test Result Report of Thermal Battery for Lifetime Assessment-1", Project Result Report, Agency of Defense Development, Korea, p.1-140, 2019.

[6] Yu, G.S., Lee, N.R., Yeo, Y.H., Lee, B.C., "Accelerated Life Prediction of the Rubber for Combat Boots", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,* Vol. 16, No. 12 pp. 8637-8642, 2015., http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8637

[7] Jung, G.D., Park, J.B., Kim, S.H., "Study on the Experimental Aging Estimation Technique for HTPB based Solid Propellant Considering Post Curing Effect", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 23, No. 3 pp. 51-57, 2019., DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.3.051

[8] Layton, L.H., "Chemical Structural Aging Effects," Thiokol-AD-A002836, 1974.

황 수 하(Su Ha Hwang) [정회원]

- 2019년 2월 : 충남대학교 기계공학과 열유체시스템 전공 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터 연구원

〈관심분야〉
신뢰성연구, 추진기관, 수명예측 등