

# 유도탄 열전지 기밀성능에 따른 고장요인 및 저장수명 영향 분석

박경환  
국방기술품질원

## Analysis of Failure Factors and Impact on Storage Life According to Guided Missile Thermal Battery Hermeticity

Gyeong Hwan Park

PGM Life Analysis Team, Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 유도탄 열전지는 추진기관, 탄두, 신관 등과 같이 유도탄의 수명을 좌우하는 품목으로서 유도탄 저장탄약신뢰성 평가(ASRP : Ammunition Stockpile Reliability Program) 관점에서 열전지의 성능을 시험평가하는 것은 매우 중요한 업무이다. 열전지는 유도탄에 전원을 공급하는 역할을 하는 시효성 품목으로 대부분의 유도탄에 탑재되어 있으며, 10년 이상 장기저장이 가능한 비축전지이다. 한번 활성화된 후 재사용이 불가능한 일회성부품이기 때문에 수명에측이 어려우며, 해외선진국에서도 열전지의 수명평가기법이 부재한 실정이다. 이러한 열전지의 수명을 평가하기 위해 기존에는 고온가속노화시험법을 이용하여 성능을 예측하였으나, 고온가속노화 시 성능의 변화가 거의 없어 노화경향을 파악하는 것이 제한되었다. 본 연구에서는 열전지의 주요 노화 원인으로 추정되고 있는 기밀성능에 따라 발생하는 산소 및 수분침투에 의한 변화를 분석하고자 하였다. 특히 해외에서 열전지의 수명을 예측하기 위해 사용되는 공기누출율에 따라 음극의 산화량을 계산하는 수명평가 기법의 실효성을 검증하고자 하였다. 또한 가속노화시험을 대체하여 열전지의 수명을 예측하기 위한 방법으로서 해외에서 주로 활용되는 장기저장품 감시프로그램 운영법을 활용하여 야전에 배치된 유도탄 열전지의 수명을 예측하는 등 향후 유도탄 신뢰성평가의 나아가야 할 방향을 제시하였다.

**Abstract** A guided missile thermal battery is an item that determines the lifespan of a guided missile, such as the propulsion engine, warhead, and fuze. Testing the performance of a thermal battery is an essential task from the perspective of guided missile life evaluation. Thermal batteries are long-lasting items that supply power to guided missiles and are mounted on most. Despite this, it is difficult to predict their lifespan because thermal batteries are disposable parts that cannot be reused. Even in developed countries, there is no technique to evaluate the lifespan of thermal batteries. Previously, a high-temperature accelerated aging test method was used to evaluate the lifespan of a thermal battery, but there was no change in thermal battery performance even during high-temperature accelerated aging, which limited the ability to identify aging trends. This study attempted to analyze the changes caused by oxygen and moisture infiltration, which are presumed to be the main causes of the aging of thermal batteries. This study attempted to predict the lifespan of thermal batteries deployed in the field by utilizing the long-term storage monitoring program operation method, which is used overseas to predict the lifespan of thermal batteries in place of accelerated aging tests. In addition, an attempt was made to verify the effectiveness of a technique for evaluating the lifespan of a thermal battery by calculating the level of oxidation of the cathode according to the air leakage rate inside the thermal battery. The lifespans of thermal batteries deployed in the field were predicted using the long-term storage monitoring program operation method, which is used overseas to predict the lifespan of thermal batteries in the place of accelerated aging tests.

**Keywords** : Non-destructive Test, Neutron, Guided Missile, X-ray, Radiographic Inspection, Reliability Evaluation

---

\*Corresponding Author : Gyeong Hwan Park(Defense Agency for Technology and Quality)

email: parkgh@dtaq.re.kr

Received September 26, 2023

Revised October 18, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

## 1. 서론

### 1.1 개요

열전지는 유도탄에 사용되는 비축전지로, 10년 이상의 장기저장이 가능하다. 저장 시에는 상온에서 비활성화된 상태로 유지되기 때문에 자가방전이 없다는 장점이 있다. 평시엔 전해질이 고체인 상태로 저장되며, 활성화 시 열원 점화를 통해 내부 온도가 상승하게 되면서, 전해질이 용융되어 유도탄에 전력을 공급하게 된다. 이렇게 실제 사용하기 전까지는 매우 안정적인 상태로 장기저장이 가능하며 성능의 열화가 매우 적고 신뢰성이 우수하다는 장점 때문에 유도탄 운용에 필요한 전력을 공급하는 핵심적인 구성품으로 널리 사용되고 있다. 고가의 무기체계에 해당하는 유도탄에는 열전지를 포함하여, 추진제, 점화기, 신관 등 저장기간동안의 수명을 좌우하는 시효성 부품들이 탑재되어 있다. 유도탄의 신뢰성과 안전성을 평가하기 위한 방법으로서 해당 시효성품목들을 주기적으로 평가하며, 노화특성 및 수명을 예측하는 것은 유도탄을 관리하고 운용하는 과정에서 매우 중요한 단계이다. 특히, 시효성품목 중 유도탄에 필요한 전력을 공급하게 되는 열전지는 시간이 지남에 따라 전체 방전성능이 감소하기 때문에 열전지의 노화는 유도탄의 수명을 결정짓는 핵심 품목이다. 그러나 열전지와 같은 시효성 품목들은 한번의 사용으로 수명을 다하는 One-shot Device 특성을 가지며, 비용이 매우 고가이기 때문에 많은 품목을 직접 시험하여 수명을 평가하는 것은 매우 제한된다. 이러한 특성 때문에 장기저장된 열전지의 수명 평가를 위해 고온가속노화시험이 주로 활용 되었다[1-4].

고온가속노화시험은 Arrhenius 모델을 활용하며 온도와 관련이 있는 수명모델로서, 주요 열화요소가 온도일 때 제품의 수명평가를 위해 사용된다. 제품의 고장은 화학반응속도와 재료성분의 확산에 의해 발생하는 열화에 기인하게 되는데 고온 가속노화시험은 일반환경에서 매우 느린속도로 발생하는 열화반응을 고온환경에서 가속시키는 방법이다. Arrhenius 모델을 기반으로 열전지의 각 구성품(전극, 열원, 전해질 등)의 활성화에너지 실험값을 도출하여, 가속노화시험을 설계하며, 계산식은 Eq. (1)과 같다.

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

$k$ 는 반응 속도,  $A$ 는 상수,  $E_a$ 는 활성화에너지(cal/mol 또는 J/mol),  $R$ 은 이상기체상수 ( $R=1.987$  cal/mol),  $T$ 는 절대온도(K)를 말한다.

최근에 김민우 등은 위와 같은 가속노화모델을 활용하여 가속노화시험을 수행하였으나, 열전지의 성능 변화가 매우 작았으며 반대로 고온가속노화시험에서 방전성능이 더 높아지는 현상도 확인할 수 있었다. 특히, 최근 선행 연구 중 실제 장기저장된 노화품과 가속노화시험설계를 통해 고온가속된 열전지와 방전성능을 비교한 결과 상당히 큰 차이가 있었으며, 가속노화시험법이 열전지의 노화경향 파악을 위해서 적합하지 않다는 것을 보여주는 사례로 해석할 수 있었다[5].

이처럼 고온 가속노화시험법이 열전지의 수명을 예측하기 위한 방법으로 적절하지 않은 가장 큰 이유는 Arrhenius 모델의 경우 온도가 주요 노화원인일때를 가정하며 습도, 기밀성 등 기타 다른 외부요인이 고려되지 않는다. 이러한 한계점들로 인해 열전지 수명평가에는 주로 부적합한 것으로 평가된다. 이에 따라, 최근 해외 열전지 제작사에서는 열전지의 수명을 예측하기 위한 방법으로서, 열전지의 기밀성능에 따라 공기누출율을 계산하여 내부 전극의 산화되는 정도를 도출하여 수명을 평가하는 기법을 활용하고 있다.

본 연구에서는 열전지의 불완전한 밀봉에 따라 발생하는 산소와 수분의 침투가 열전지 내부전극에 미치는 영향을 분석하고, 기밀성능이 열전지의 수명평가에 주요 인자로 적용하는지 여부를 확인하고자 하였다. 또한 열전지 수명예측기법 중 가장 신뢰도가 높은 방법으로 알려진 장기저장시험법을 적용의 필요성을 검토하였다.

### 1.2 시험대상

열전지는 상온에서 고체로 유지되어 전도성이 없는 전해질을 이용하여 만든 전지로서 활성화 전까지는 자가방전이 없는 특성을 가지고 있다. 유도탄의 발사 명령에 따라 스쿼브신호에 의해 미세한 전류가 착화기에 인가되면 착화기의 작동으로 내부 열원이 점화되고 이에 따라 고온으로 전해질이 액화됨에 따라 전지가 활성화된다. 열전지 내부 구성품은 외부용기, 착화기, 집전체, 열원, 양극, 전해질, 음극 등으로 구성되어 있으며 G-M Sealing과 케이스 용접을 통해 밀봉되어 있다. 열전지의 내부 각 전극과 점화되는 과정은 Fig. 1과 같다.

스쿼브 신호 인가시점부터 열전지가 활성화되어 최저 전압을 발생할 때 까지의 시간을 활성화시간이라 하며 일반적으로 1초 이내에 모든 과정이 완료된다. 열전지가 활성화된 이후부터 열전지의 내부 고온상태를 유지하기 위해 열전지 내부에 단열재를 통해 고온을 유지하며, 열전지 각 구성품의 성분은 Table 1과 같다.

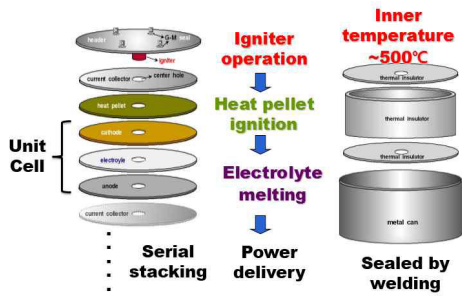


Fig. 1. Principle of the Thermal Battery

Table 1. Element of thermal battery components

components	Element
Cathode	LiSi
Anode	FeS2
Electrolyte	LiCl+LiBr+LiF+MgO
Heat Source	Fe+KClO4
Case	STS304L

열전지의 음극과 양극은 전기 출력을 발생시키는 주요 구성품이며, 전해질은 고온에서 용융되어 전자의 이동을 활성화시킨다. 열원은 고온에서 전해질을 용융시키기 위한 요구 열량을 공급하는 역할을 하며, 구성품 중 열전지의 성능 열화의 주요 원인은 음극의 노화에 기인한다. 특히 열전지의 내부구성성분 중 기밀성에 따라 열전지의 내부에 가장 큰 변화를 일으키는 곳이 바로 음극이다. 열전지 내부 음극의 산화로 인해 실제 활성화 시 사용 불가능한 산화리튬의 양이 늘어남에 따라 방전성능은 저하되게 된다. 열전지의 기밀을 완벽하다고 가정한다면, 해당 음극의 산화과정은 무시할 수 있지만 그러한 G-M Sealing 기법은 현실적으로 존재하지 않는다. 열전지 조립 시 내부의 잔류 산소와 저장 시 열전지 내부에 유입되는 산소와 수분으로 인해 열전지 내부의 음극의 산화가 주된 고장 요인으로 볼 수 있다[4,6].

## 2. 시험방법

본 연구에서는 열전지의 기밀성능이 실제 장기저장간 열전지 내부 전극 및 방전성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 특히 수분의 침투가 가능한지 여부와 산소 유입의 영향을 확인하고자 하였다. 기존의 열전지의 기밀성능은  $1.0 \times 10^{-7}$  He·atm·cc/sec 정도로 기밀성이 높아 단기간에 실험을 통해 확인이 제한되어 1000배이

상 가속시킨 특수열전지를 별도로 제작하였다. 기존 열전지의 경우 외부케이스(SUS304)재질에 G-M Sealing을 적용한 후 열팽창 차이를 이용하여 높은 기밀성을 확보한다. 이번 실험을 위해 SUS304대신 타이타늄(Ti)을 적용하여 G-M Sealing에 미세한 간극을 주어 기존 열전지 대비 1000배이상 누설율이 높은 열전지를 제작하였으며, 기밀성능은 약  $1.0 \times 10^{-4}$  He·atm·cc/sec 정도로 열전지의 형상과 내부구조는 Fig. 2와 같다.

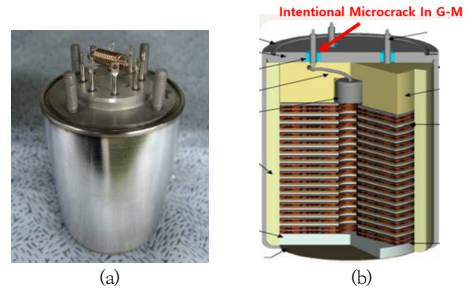


Fig. 2. Thermal Battery  
(a) Picture (b) Structure of Thermal battery

### 2.1 적용 이론

열전지 장기저장시 외부 공기누출로 인해 다양한 노화의 원인이 발생할 수 있지만 가장 주된 요인은 리튬의 높은 환원성으로 인한 전체 전기용량의 감소이다. 기밀성에 따라 열전지 내부의 음극 일부가 산화로 인해 사용이 불가능해지는 양을 고려하기 위해서는 열전지 전체에 포함된 리튬의 총량을 검토하여야 한다. 평균 공기누출에 따른 열전지 반응식은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{oxygen} = \frac{m}{t} * \frac{R}{MW_{O_2}} \quad (2)$$

Qoxygen = Average oxygen leak rate (STP cc/sec)

m = Allowable mass of oxygen leakage (g)

t = time (sec)

R = Volumetric gas constant (22414 cc/mole)

MWO2 = Molecular weight of O2 = 32 g/mole

침투하는 모든 산소가 리튬과 반응하여 소모된다고 가정한다면, 열전지 리튬의 총량, 공기누출율, 열전지 제작 설계시 리튬용량 설계 마진 등을 고려하면 열전지의 수명을 예측할 수 있다. 그러나 해당 수식은 수분의 침투는 고려되지 않았다[7].

본 연구에서는 위 식과 같이 수분의 침투량을 배제하여 산소의 누출량만으로 열전지의 수명평가가 실질적으로 가능한지 여부와, 해당 수식이 실제 열전지가 장기저장되면서 발생하는 공기누출율을 대표 할 수 있는지를 실증하고자 하였다. 상기 방정식에서 가장 주요 인자인 공기누출율을 실험적으로 확인하기 위한 방법으로는 헬륨누설시험법을 사용하였다. 헬륨 누설시험법이란, 열전지 내부에 헬륨을 가압한 후 누설되는 헬륨량을 측정하여 열전지의 공기누출율을 확인하는 방법이다. 현재 공기의 누출율을 확인할 수 있는 시험법 중 가장 검출도가 높은 방법으로, JIS Z 2330(Standard Recommended Guide for the Selection Of Helium Leak Testing)에 따르면  $10^{-11} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  까지 검출이 가능한 것으로 기술하고 있으며, 누설시험법 검출도는 Fig. 3과 같다[8].

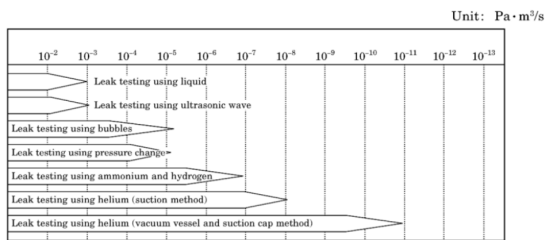


Fig. 3. Detectable Leakage Amount for Test Case

## 2.2 시험 조건

헬륨누설시험법의 주요 과정 및 시험장비 구조는 은 Fig. 4와 같으며, 검출도가 매우 높다는 장점을 가지고 있어 주로 열전지 및 피로부품의 수락시험에 활용된다.

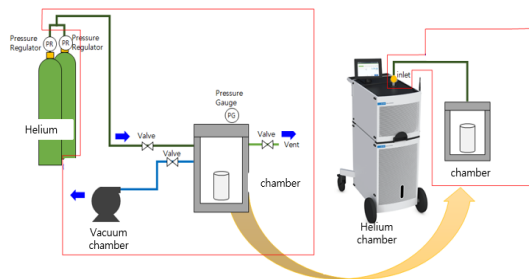


Fig. 4. Principle of Helium Leak test

열전지 내부 헬륨을 가압하기 이전 10분이상 진공조건에서 내부 공기를 감압한뒤, 헬륨가스를 주입하여 일정시간동안 가압한 후 열전지의 헬륨누설량을 검출하였

다. 헬륨누설시험법에서 공기누출량 시험 시 중요 시험 조건은 진공시간, 가압시간, 가압압력, 가압 후 대기시간이다. 본 연구에서는  $10^{-2} \text{Torr}$  압력으로 10분간 진공하였으며, 5 atm으로 30분간 가압 후 2분간 외부표면을 공기로 세척하여 누설시험을 진행하였다. 해당 시험 조건은 현재 양산되는 열전지의 수락시험 기준을 준용하였으며, MIL-STD-1576 (Electroexplosive subsystem safety requirements and test methods for space systems)에 따른 누설시험 조건기준을 만족하도록 설계하였다. 해당 시험조건으로 기밀성이 낮게 특수제작된 열전지의 공기누출률의 시험 결과  $3.6 \times 10^{-4} \text{He}\cdot\text{atm}\cdot\text{cc}/\text{sec} \sim 4.7 \times 10^{-4} \text{He}\cdot\text{atm}\cdot\text{cc}/\text{sec}$  로 확인되었으며, 이는 일반적으로 생산되는 양품 열전지의 1000배정도에 해당하는 수치이다.

해당 열전지는 수분에 의한 영향을 검토하기 위하여, 고습과 저습으로 두 조건에 각각 나누어 저장하였으며 실온에서 장기저장(10년)된 열전지와 비교하였다.

Table 2. Storage Condition

Battery	Storage Condition	Period
Long-term Storage (10 years)	Room temperature	10 years
Battery(Dry)	75°C/ 10%(humidity)	60 day
Battery(Wet)	75°C/ 90%(humidity)	60 day

온도는 75°C로 설정하였으며, 내부로 누출된 산소가 음극과의 반응을 가속하기 위해 일반적으로 열전지 가속 노화시험시 사용되는 온도를 기준으로 하였다. 습도는 각각 챔버의 사용가능 최대습도(90%)와 최저습도(10%)로 설정하였다.

## 3. 시험결과

### 3.1 성분분석

기존 양산되는 열전지에 비해 기밀성이 1000배 이하로 제작된 열전지를 습도조건이 상이한 조건에서 저장한 후 열전지 분해시험(TDI)을 진행 하였다. 리튬전극은 수분에 매우 민감하기 때문에 모든 작업은 Dry룸에서 진행하였으며, 시료와 분해 사진은 Fig. 5와 같다.

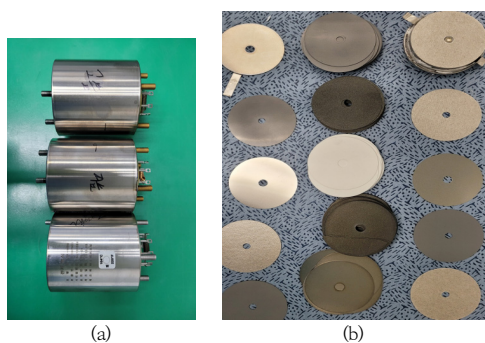


Fig. 5. Thermal battery  
(a) Thermal battery(3) (b) TDI(tear down inspection)

분해한 각 구성품(음극, 양극, 전해질, 열원)의 육안상 차이는 없었으며 각 셀의 중량검사 결과 모두 동일 하였다. 해당구성품 중 습도와 산소에 가장 영향이 많이 받는 음극과 양극에 대해 전자주사현미경 및 SEM(EDS)를 활용한 정량분석을 진행하였다. 전자주사현미경을 통한 각 전극의 외부 표면은 Fig. 6과 같았으며, EDS를 활용한 산소분포도는 Fig. 7과 같았다.

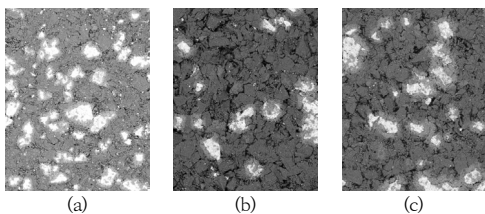


Fig. 6. SEM(Cathode)  
(a) 10year of Storage (b) Wet (c) Dry

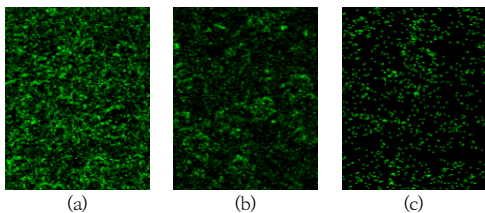


Fig. 7. SEM(EDS) Mapping(Oxygen) of Cathode  
(a) 10year of Storage (b) Wet (c) Dry

전자주사현미경 분석결과와 같이 장기저장된 열전지에서는 비교적 높은 산소분포를 보인 반면, 저습과 고습에서 저장된 열전지는 큰 차이가 없었다. 해당 시험결과는 60일간 저습과 고습의 환경에서 각각 보관하였음에도 불구하고, 각 열전지에 침투된 수분의 양은 차이가 없었다고 볼 수 있으며, 비록 기존 양산 열전지에 비해 1000배

낮은 기밀성능을 가지고 있음에도,  $1.0 \times 10^{-4}$  He·atm·cc/sec의 기밀성으로도 충분히 수분의 침투를 방지할 수 있다고 볼 수 있다. 반면, 장기저장된 열전지에서는 보다 높은 산소포화도가 확인되었는데, 이는 장기간 저장되면서 오랜시간 미세한 누출로 인해 산소가 침투한 것으로 확인되며, 이는 장기저장 시 방전성능의 주요 저하 원인으로 추정된다.

반면 양극 및 전해질의 SEM(EDS) 시험결과 표면 및 산소분포도 측면에서 3개의 시료가 모두 큰 차이가 없었다. 해외 연구 사례를 살펴보면 수분의 침투로 음극이 산화되어 수소가 발생하고 해당 수소가 양극의 성분에 반응을 발생 가능성이 있는 것으로 알려져 있으며, 해당 반응은 Eq. (3,4)와 같다[9].

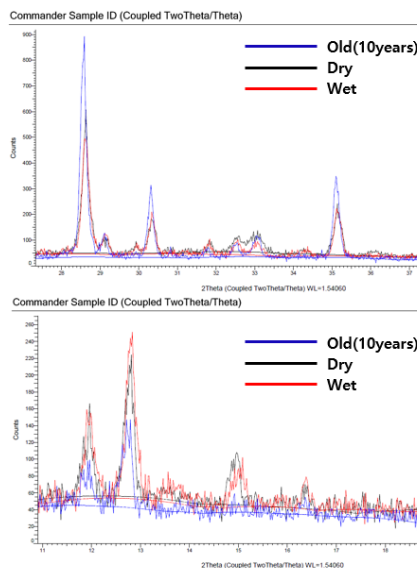
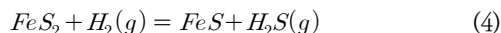
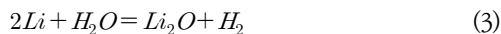


Fig. 8. XRD of Cathode(2Theta = 11o~37o)

SEM-EDS의 경우 원소에 대한 성분분석만 가능하며, 내부 분자구조에 관한 추가 시험을 위해, 장기저장된 열전지와 가장 큰 차이가 발생한 음극을 대상으로 X선 회절분석기를 이용해 추가분석을 시행하였으며 결과는 Fig. 8과 같다. 2Theta = 11° ~70° 구간에서 X선 회절분석기를 이용한 분석결과 고습과 저습환경에서 저장된 열전지는 SEM(EDS)결과와 동일하게 큰 차이가 없었으나, 장기저장품에서는 각 피크에서 확연한 차이가 발생

하였다. 명확한 비교분석을 위해 각도 별 그래프를 중첩하여 피크값을 확인하였으며, 장기저장품에서만 유의미한 차이점이 확인되었다. 이는 장기저장 되면서 서서히 발생하는 반응에 의해 차이가 기인한 것으로 확인된다.

### 3.2 방전성능 분석

장기저장품과 고습 및 저습환경에서 각각 저장된 제작품에 대해서 열전지 방전성능을 분석하였다. 열전지의 주요 성능은 활성화시간, 전압, 방전시간 등으로 볼 수 있는데 활성화시간과 전압은 만족여부에 따라 Pass/Fail 시험기준을 주로 적용한다. 열전지의 핵심성능을 대표할 수 있는 수치로는 주로 방전시간이 활용되며 방전시간은 요구 최저전압을 만족할때까지 부하조건에서의 방전 전체시간을 측정하였으며 결과는 Fig. 9와 같다.

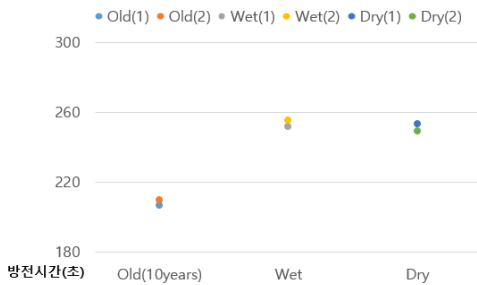


Fig. 9. Discharge result of Thermal battery

열전지는 저온환경에서의 방전성능이 매우 중요한 품목으로서 각 전지는 환경처리 후 저온(-40℃)에서 4시간 이상 저장 후 5분 이내 활성화하여 측정하였다. 장기저장품의 경우 기존 양품 대비 동작시간이20%이상 저하된 반면, 고습과 저습환경에서 저장된 열전지의 경우 일반 양산 열전지와 큰 차이점이 없는 것으로 확인되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 열전지의 내부 공기누출율과 수명저하간의 관계를 탐구하였다. 실제로 열전지 내부의 공기누출율이 1000배 이상 높았음에도, 75℃와 습도(10%/90%) 조건에서 60일 동안 저장한 결과, 양품 열전지와 성능차이는 크지 않았다. 이러한 결과는 열전지의 수명저하에 단기간의 공기누출이 큰 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 또한 누설율을 측정하는 헬륨누설시험법의 한계와

그 결과로 얻은 데이터의 신뢰성에 대한 의문이 제기되었다. 공기누출율이 열전지의 수명노화를 가속시키는 직접적 원인으로 작용하지 않은 이유로는 열전지에 누출되는 공기량이 음극과 100% 반응한다는 가정의 실효성 문제와, 헬륨누설시험법으로 측정된 열전지의 누설율이 실제 열전지 내부로 유입되는 공기의 양과 동일하지 않은 점에 기인한다고 판단된다. 실제 1000배이상 누출율이 높은 전지라 할지라도,  $1.0 \times 10^{-4}$  He·atm·cc/sec 누출율은 대기압이 아닌 5atm에서의 배압을 통한 실험값이며, 결과값 또한 비교적 낮은 누출율에 해당되기 때문에 실제 열전지 보관환경에서의 공기누출율이 해당 실험값에 비해 확연히 낮을것으로 판단된다. 즉 본 연구 결과, He Leakage Rate 측정에 의존한 열전지 수명예측 기법에는 몇 가지 제한점이 있음을 확인하였다. 이에 따라, 현실적으로 실제 노화된 열전지의 수명노화경향을 파악하는 장기저장시험법이 열전지 수명예측을 위한 가장 정확한 방법으로 간주되며, 국방기술품질원은 이를 활용한 연구를 진행 중이다. 특히, 국내 유도탄 열전지의 수명평가는 매우 중요한 단계로 간주되고 있다. 최근 단거리 지대공미사일 및 휴대용 지대공미사일 등 유도탄 열전지에 대해 장기저장시험법을 통해 실제 저장기간에 따른 열전지의 수명노화 경향을 파악하고 이를 기반으로 수명을 예측하는 연구를 수행하고 있다. 단거리 지대공미사일 유도탄의 경우 장기저장시험법을 이용한 수명예측 결과 20년이상의 수명이 예측됨을 확인하는 등 후속연구를 지속적으로 수행하고 있다.

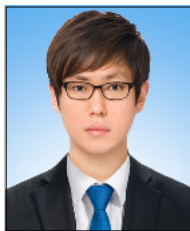
그러나, 장기저장품을 이용한 감시 프로그램 (Surveillance Program) 운영을 위해선 실제 장기저장된 열전지의 다량확보가 필수적이기 때문에 모든 유도탄 체계에 적용하기는 어려운 실정이다. 이로 인해 최근 미국 SNL (Sandia National Laboratories)등에서 열전지의 수명예측을 위한 연구 등이 시행되고 있으며, 국내에서도 열전지의 고장요인 및 수명예측을 위한 여러 연구 등이 추진되고 있다. 특히, 유도탄에 탑재되는 열전지 대부분 해외도입에 의존하던 방식에서 최근 국내생산품으로 전환되는 과정으로 국내 열전지 수명평가를 위한 시험평가 및 연구가 중요한 시점이다. 장기저장에 따른 방전성능의 저하 경향성과 내부 음극의 산화에 따른 성능특성, 내부 잔류산소 및 수분에 의한 열화가능성에 관한 후속 연구 등 향후 국내 열전지의 수명 평가를 위한 다양한 연구 방법의 유효성과 효용성에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

## 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., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.013>
- [2] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries 3rd ed.* (McGraw-Hill, 2002)
- [3] R. A. Guidotti and P. Masset, *J. Pow. Sourc.*, 161, 1443(2006).
- [4] Kang, S.H., "State of the Art and Research Trends on Electrode Materials of Thermal Batteries" *Journal of the Korean Inst. Electr. Electron. Mater.*, Vol. 28, No. 12, pp. 765-770, 2015, DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.12.765>
- [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] J. Q. Searcy, P.A. Neiswander, J.R. Armijo, R.W. Bild. "Lithium Oxide in the Li(Si)/FeS<sub>2</sub> Thermal Battery System." Sandia Report SAND81-1705 (1981).
- [7] *Clay D. Beevers, Daniel E. Wesolowski* ., "Hermeticity and Thermal Battery Lifetime *Clay* ", SAND2012-2848C, Sandia National Laboratories , USA, 2012.
- [8] JIS(Japanese industrial standard) Z 2330, "Non-destructive testing-Selection of leak testing method", Japanese Standard Asspcoation, Japan, p.1-22, 2012.
- [9] *Daniel E. Wesolowski, Margaret Sanchez*, "Accelerated Aging of Li(Si)/CoS<sub>2</sub>Thermal Batteries", SAND2018-4330C, Sandia National Laboratories, USA, 2018.

박 경 환(Gyeong Hwan Park)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한양대학교 원자력 공학 전공 (원자력학사)
- 2015년 10월 ~ 2020년 8월 : 한국원자력환경공단
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 국방신뢰성연구센터 연구원

<관심분야>

비파괴검사, 신뢰성연구, 열전지, 방사선, 원자력