

# 방탄헬멧의 노화인자에 관한 연구 : 고온 환경 처리를 중심으로

박호연, 구승환\*  
국방기술품질원

## A Study for Aging Factor of Bulletproof Helmet : High Temperature Treatment

Ho Yun Park, Seung Hwan Gu\*  
Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 본 연구는 방탄헬멧의 저장 수명을 설정하기 위한 선행연구로 방탄헬멧의 노화인자에 대해 고찰해보았다. 방탄헬멧의 노화인자를 추정하기 위해 미군 방탄헬멧 구매요구서상의 환경 처리, 재료의 재질 등에서 공통적으로 요구하는 환경 처리에 관한 내용을 고려하여 '온도' 인자가 방탄헬멧의 수명에 가장 많은 영향을 미칠 것이라는 가설을 수립하였다. 이 가설을 검증하기 위해 방탄헬멧의 고온 가속 환경 처리를 수행하고 아레니우스 식을 적용하여 고온에 따른 수명을 산출하였다. 본 연구의 결과로 방탄성능과 고온 환경 처리 간 음(-)의 상관관계를 확인했으며, 아레니우스 모델을 활용하여 수명을 도출해냄으로써 노화인자로서의 온도의 영향성은 크지 않음을 확인하였다. 본 연구의 한계점으로 시험 대상이 가지고 있는 특수성(군수품)으로 인해 다양하고 많은 시료수를 확보하지 못했다는 것을 들 수 있다. 하지만 방탄헬멧의 수명 관련 연구가 진행되지 않았음을 고려할 때 이에 대한 선행연구를 수행했다는 데에서 본 연구가 시사하는 바가 크다고 할 수 있으며, 한국군 방탄헬멧 규격의 개선에 대한 검토 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract** This study was a prior study to establish the shelf life of bulletproof helmets, considered the aging factor of bulletproof helmets. To estimate the aging factor of bulletproof helmets, we established a hypothesis that the 'temperature' factor would have the greatest impact on the shelf life of the bulletproof helmet, considering the environmental treatment of the American army's bulletproof helmet's materials. To verify the hypothesis, high temperature acceleration environmental treatment of bulletproof helmets was performed, and the Arrhenius formula was applied to calculate the shelf life. The study result confirmed the negative correlation between bulletproof performance and high temperature, and the influence of temperature as an aging factor was not significant by deriving life by using the Arrhenius model. The limitation of this study is that we couldn't obtain enough samples due to the specificity (military supplies) of the test subjects. However, given that the life-related research on bulletproof helmets has not been carried out, this research has great implications and could be used as a reference for improving the Korean Army's bulletproof helmet specifications.

**Keywords** : Bulletproof Helmet, Aging Factor, High Temperature, Shelf Life, Accelerated Aging

### 1. 서론

방탄헬멧은 전장에서 총탄 및 고폭탄의 파편으로부터

두부를 보호하는 필수 장비이다. 방탄헬멧은 1차 세계대전 이후로 본격적으로 발달되었는데, 초기에는 강철로 헬멧을 제작하였으며, 1942년부터 1980년대 중반까지 고

\*Corresponding Author : Seung-Hwan Gu(Defense Agency for Technology and Quality)

email: gsh999@hanmail.net

Received March 12, 2020

Accepted June 5, 2020

Revised April 3, 2020

Published June 30, 2020

망간강(Hadfield Steel)을 사용한 M1(Steel Pot) 헬멧이 사용되었다. 1960년대에 듀폰(DuPont)사가 개발한 고강도 및 내열성의 아라미드(Aramid) 섬유(케블라, Kevlar)가 상용화 되었으며, 현재까지 방탄재로 사용되고 있다[1].

미군은 나일론, 유리섬유(E-glass Fiber) 대신 케블라를 사용한 PASGT(Personnel Armor System for Ground Troops)를 개발하였다. PASGT는 케블라로 제작한 방탄조끼와 방탄헬멧을 의미하며, 1980년대 중반부터 사용되었다[1]. 2002년부터는 PASGT를 개선하여 보강한 MICH(Modular Integrated Communications Helmet)를 사용하였고, 그 후 ACH(Advanced Combat Helmet)로 이름을 변경하여 현재까지 운용하고 있다. 최근에는 UHMWPE(Ultra High Molecular Weight Polyethylene)를 차기 방탄헬멧 재료로 활용하고 있다 [1]. 우리나라는 아라미드 섬유를 사용한 방탄헬멧을 2003년 개발하여 현재까지 운용하고 있다. 방탄헬멧은 성능형으로 규격화되어 방탄성능, 도장박리 등의 기준이 수치화되어 있고 재료, 공정 등은 제한되어 있지 않다.

물자나 장비는 수명을 설정하고 관리하는 것이 일반적이다. 미군 ACH 방탄헬멧 구매요구서에는 저장 수명(Shelf Life)을 5년으로 명시하고 있으며, 이에 따라 관리가 이루어지고 있으나, 한국군 방탄헬멧 규격에는 별도로 수명이 설정되어 있지 않다. 방탄헬멧의 수명도래에 따른 교체 및 관리가 이루어지지 않을 경우, 전쟁 및 훈련 도중 헬멧의 노화로 인한 파손 등이 발생하여 전투능력을 상실할 우려가 있기 때문에 방탄헬멧의 수명 설정에 관한 연구가 필요하다. 방탄헬멧의 수명 연구를 위해서는 우선적으로 방탄헬멧의 노화인자에 대한 연구가 수행되어야 하지만 관련 선행연구는 전무한 실정이다.

방탄헬멧의 노화인자로 온도, 직사광선, 충격 등 다양한 인자가 있을 것으로 추정되나 이에 관한 연구는 없는 실정이며 수명관리에 관한 연구가 전무한 실정이다. 노화인자를 추정하기 위해 미군 ACH 방탄헬멧에서 요구하는 환경 처리(상온, 고온, 저온, 염수 침수, 가속내후 및 가속노화 처리)와 재료의 재질, MIL-STD-810, 가속수명시험 등에서 공통적으로 요구하는 환경 처리에 관한 내용을 고려할 수 있다. 섬유소재의 가속수명시험과 환경 처리에 대한 기존 선행연구에서도 환경 처리와 수명 간의 영향성을 제기하고 있음을 알 수 있다[2][3]. 이러한 내용을 종합하여 판단해볼 때, 우선적으로 '온도' 인자가 방탄헬멧의 수명에 가장 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 방탄헬멧의 고온 가속 환경 처리를 수

행하고 아레니우스 식을 적용하여 고온에 따른 수명주기를 산출하고자 한다. 본 연구를 토대로 한국군 방탄헬멧 규격의 환경 처리 조건에 대한 고찰과 방탄헬멧 수명에 영향을 미치는 노화인자 연구가 수행될 수 있을 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 방탄헬멧 수명

방탄헬멧의 고온처리를 통한 수명주기를 설정하기 위해 방탄헬멧의 '수명'을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 충격, 빛 등과 같은 외적인 요소들을 제외하고 고온의 조건 하에서만 방탄헬멧을 가속노화 시키므로 파손 등의 외관상 문제점을 고려하지 않았으며 방탄성능(방탄한계속도( $V_{50}$ ))에 초점을 맞춰 수명을 설정하였다. 한국군 방탄헬멧 규격서 상의 방탄한계속도 값이 609.6 m/s로 명기되어 있으므로 본 연구에서는 고온처리하기 전의 방탄헬멧 방탄한계속도 값이 고온처리 후 규격서 상의 한계값으로 감소하는데 걸리는 시간을 수명으로 정의한다. 방탄헬멧 규격서 상의 방탄성능을 구현하지 못하는 헬멧은 방호능력을 구현하지 못하기 때문이다.

### 2.2 아레니우스 모델

고온 가속노화를 통한 수명주기 관련 선행연구를 고찰한 결과 아레니우스(Arrhenius) 모델이 적합하며, 활용빈도가 높은 것을 확인하였다[9][10]. 본 연구는 고온 가속노화를 통해 방탄헬멧의 수명주기를 예측하고자 하는 것으로 아레니우스 모델을 사용하는 것이 적절한 것으로 사료된다. 아레니우스 식은 화학반응에서 반응속도상수와 온도의 관계를 나타내는 식으로 활성화 에너지 이상의 에너지를 가진 분자들 간의 충돌로 반응이 발생한다는 이론에서 착안하여 만들어진 식이다. 아레니우스 식은 다음과 같다[11].

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 반응속도상수,  $A$ 는 빈도인자,  $E$ 는 활성화 에너지,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 절대온도이다. 방탄헬멧의 노화가 1차 반응이라고 가정하고 방탄성능 특성 값을  $P$ , 노화 전 방탄성능 특성 값을  $P_0$ , 시간을  $t$ 라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP \quad (2)$$

$$\text{즉, } \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -kt \quad (3)$$

식 (3)을 아레니우스 식에 접목시키면 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\ln\frac{t_1}{t_2} = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (4)$$

본 연구에서는 본 모형을 사용하여 방탄헬멧을 3가지 온도에서 10일 주기로 30일 동안 가속노화 시켜 방탄한 계속도를 측정 한 후 각 온도에서의 2차 방정식 그래프(X축:  $\ln t(\text{time})$ , Y축: 방탄한계속도)를 산출한다. 산출된 방정식을 활용하여 환경 처리 전 방탄한계속도 값이 규격서 상의 한계치만큼 감소하는데 걸리는 시간을 산출한다. 다음으로 산출된 시간에 로그를 적용하여 Y축에 표시하고, X축에는 3가지 절대온도의 역수를 사용하여 1차 방정식 그래프를 도출해낸다. 최종적으로 1차 방정식 그래프의 수식을 사용하여 상온에서의 수명주기를 산출한다.

### 2.3 현황 분석

본 연구에서는 한국군 방탄헬멧 규격서에 명기되어 있는 제원을 알아보고, 한국군 방탄헬멧과 미군 방탄헬멧 구매요구서의 환경 처리 조건 및 타 방탄류 제품인 방탄복과 방탄판의 환경 처리 조건을 비교하였다. 한국군 방탄헬멧 주요 제원은 Table 1과 같다.

미군 방탄헬멧(ACH, Advanced Combat Helmet) 구매요구서와 한국군 방탄헬멧(BH-2000)의 환경 처리 조건은 Table 2와 같다. 한국군 방탄헬멧 규격 대비 미군 방탄헬멧 규격에서는 고온처리, 염수처리, 가속내후(Weatherometer)처리, 가속노화처리, 온도충격과 같은

Table 1. Characteristics of Korean Ballistic Helmet

Classification	Requirement of Specification
Size	Large / Medium / Small
Thickness(Max)	9.0 mm
Ballistic Protection (Ambient, Low Temp., After Immersion in Water)	$V_{50} \geq 609.6 \text{ m/s}$ (Fragment Simulating Projectile 17-grain)

\*  $V_{50}$ (Ballistic Protection Limit): Average of an equal number of highest partial penetraion velocities and the lowest complete penetration velocities which occur within a specified velocity spread[4].

환경 처리 조건이 있다[9][10]. 미국은 다양한 환경 처리를 통해 가혹한 조건에서도 방호능력을 유지할 수 있는 방탄헬멧을 운용하고 있는 반면, 국내에서는 고온, 염수 등 환경 처리 조건들이 규격화되어 있지 않다. 따라서 한국군 방탄헬멧의 노화인자 관련 연구를 진행하여 적절한 환경 처리 조건을 발견하여 국내 실정에 맞게 규격화시킬 필요가 있다.

타 방탄류 제품인 방탄복과 방탄판 규격서의 환경 처리 조건과 방탄헬멧의 환경 처리 방법은 Table 3과 같다. 방탄복과 방탄판의 환경 처리에서 실시하는 고온처리는 일종의 가속수명시험에 관한 것으로 방탄헬멧의 소재가 방탄복과 방탄판의 소재와 유사하기 때문에 본 연구에서는 미군 규격, 타 방탄류 제품 규격에서 시험하는 고온 환경 처리를 노화인자로 선정하여 연구를 진행하고자 한다.

## 3. 연구 설계

### 3.1 연구 가설

Table 2. Comparison of Conditioning Method between ACH and BH-2000

Conditioning Method	ACH (USA Army's Ballistic Helmet)	BH-2000 (Korean Army's Ballistic Helmet)	Ballistic Testing after Conditioning	
			ACH	BH-2000
Temperature	Ambient( $20 \pm 5.5^\circ\text{C}$ ) 24 hr, Low Temperature ( $-51 \pm 5.5^\circ\text{C}$ ) 24 hr, High Temperature ( $71 \pm 5.5^\circ\text{C}$ ) 24 hr.	Ambient( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 24 hr, Low Temperature ( $-32 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 24 hr.	Conducted	Conducted
Immersion Resistance	Seawater Resistance	Water Resistance (No Seawater)	Conducted	Conducted
Weatherometer Resistance	Light, Water Spray, High Temperature	Light, Water Spray, High Temperature (Using Cut Specimen of Helmet)	Conducted	Not Conducted
Accelerated Aging /Shelf Life	Ozone, Weight(13.6 kg), High Temperature( $40 \pm 1^\circ\text{C}$ )	-	Conducted	-
Temperature Shock	$71 \pm 5.5^\circ\text{C}$ & $-51 \pm 5.5^\circ\text{C}$	-	Not Conducted	-

본 연구에서는 고온 가속 환경처리가 방탄헬멧의 수명에 미치는 영향을 분석하고자 방탄헬멧을 환경처리(가속 노화)하면 방탄성능 값( $V_{50}$ , Ballistic Limit)을 살펴보았다.

Table 3. Comparison of Conditioning Method

Classification	Conditioning Method (Temperature Testing)
Body Armor	Tumbling at 65°C for 10 days
Armor Plate	Thermal Exposure Testing(65°C) for 10 days and Thermal Cycle Testing (-15°C~90°C) for 1 day
Ballistic Helmet, BH-2000	Ambient(20±2°C) Low Temperature(-32±2°C)

방탄헬멧의 주 소재로 활용되는 UHMWPE는 아라미드 대비 방호성능에서 강점을 보이는 반면, 온도에 취약하다는 단점을 보인다. 실제로 UHMWPE를 대상으로 수행한 고온 가속노화 관련 선행연구를 살펴보면 고온으로 장기간 노출 시에 방탄재의 노화가 이루어짐을 확인할 수 있다[9][10].(인장강도 감소) UHMWPE의 인장강도와 방탄성능 간 상관관계는 입증되지 않았지만 방탄재의 노화는 방탄성능에 부정적인 영향을 미칠 것이라는 추론이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 연구가설을 수립하였다.

$H_0$  : 고온 가속 환경 처리는 방탄헬멧의 수명에 음(-)의 영향을 미칠 것이다.

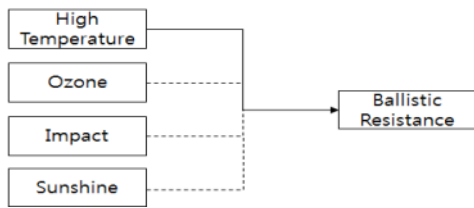


Fig. 1. Aging Factors of Ballistic Helmet

### 3.2 연구 방법

본 연구의 방법은 환경 처리, 방탄시험, 수명예측 단계로 수행하였으며, 이를 도식화하면 Figure 2와 같다. 먼저 방탄헬멧을 71 °C, 90 °C, 100 °C에서 10일 주기로 총 30일 동안 고온 환경 처리를 실시한다. 이후 환경 처리된 방탄헬멧에 17 grain Cal. 22 FSP (Fragment Simulating Penetrator)를 사용하여 방탄성능 시험을 진행한다. 마지막으로 방탄성능 시험 결과 값을 활용하여

고온 환경 처리가 방탄성능에 미치는 영향을 분석하고, 아레니우스 모형을 사용하여 고온 처리에 따른 방탄헬멧 수명을 예측한다. 3가지 온도에서 총 30일 동안 고온 환경 처리를 진행한 방탄헬멧의 수량은 Table 4와 같다.

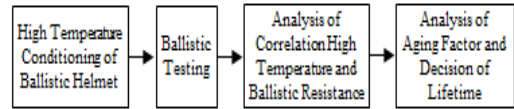


Fig. 2. Research Model

Table 4. Ballistic Helmets at which Conditioned Each Temperature

Classification	71°C	90°C	100°C	Ambient
Conditioned for 10 days	4 Helmets	4 Helmets	4 Helmets	6 Helmets
Conditioned for 20 days	4 Helmets	4 Helmets	4 Helmets	
Conditioned for 30 days	4 Helmets	4 Helmets	4 Helmets	

71 °C, 90 °C, 100 °C로 온도를 선정하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 71 °C는 미군 규격 MIL-STD-810H (Environmental Engineering Considerations And Laboratory Tests)와 미군 방탄헬멧(ACH) 구매요구서 (AR/PD 10-02)[7]에서 정하고 있는 온도이다. MIL-STD-810H의 2.3.1 Climate Conditions에서는 고온 건조(Hot Dry) 환경의 Induced Temperature(컨테이너 등에 보관 시 온도)가 최고 71°C임을 나타낸다 [12]. 또한 미군 방탄헬멧(ACH) 구매요구서에서도 고온 (71 ± 5.5) °C에서 24시간 동안 고온 환경 처리를 실시한 후 방탄성능 시험을 진행하도록 되어있다[7]. 상기 2가지 미군 규격에서 고온 설정을 71 °C로 규정하고 있기 때문에 본 연구에 적용하였다.

Design Type	Location	Ambient Air °C (°F)	Induced <sup>2</sup> °C (°F)
Basic Hot (A2)	Many parts of the world, extending outward from the hot dry category of the southwestern United States, northwestern Mexico, central and western Australia, Saharan Africa, South America, southern Spain, and southwest and south central Asia.	30 - 43 (86 - 110)	30 - 63 (86 - 145)
Hot Dry (A1)	Southwest and south central Asia, southwestern United States, Saharan Africa, central and western Australia, and northwestern Mexico.	32 - 49 (90 - 120)	33 - 71 (91 - 160)

Fig. 3. High Temperature Range in MIL-STD-810H

둘째, 90 ℃는 방탄 재료인 UHMWPE를 가속 노화시키는 것에 관한 선행연구를 고찰한 결과를 토대로 적용하였다[9]. 셋째, UHMWPE의 물성이 변하는 임계치가 Figure 4와 같이 (120 ~ 130) ℃로 나타났기 때문에 그보다 낮은 100 ℃를 선정하였다.

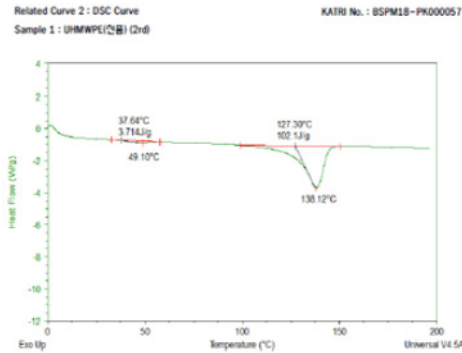


Fig. 4. DSC Curve of UHMWPE

## 4. 연구 결과

### 4.1 방탄헬멧 생산능력 분석

본 연구에서는 방탄헬멧 제작업체의 생산능력 현황을 먼저 분석하였다. 그 이유는 업체 공정능력을 산출함으로써 헬멧의 품질 수준(방탄성능) 및 편차를 사전에 파악하기 위함이다. 해당 업체는 근래 5년간 방탄헬멧을 군에 납품하였으며, 2018년도에 소재를 교체/생산하였다. 2018년도부터 2019년도까지의 방탄성능 시험 결과 값은 Figure 5와 같다.

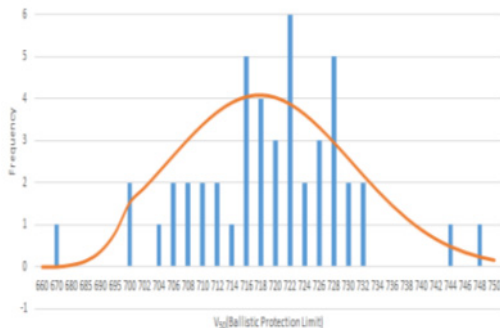


Fig. 5. Normal Distribution of Ballistic Helmet's V<sub>50</sub>

2018년부터 2019년까지 군에 납품한 방탄헬멧의 방탄성능 시험 결과 값의 평균은 717.8 m/s, 중앙값은

718.8 m/s로 방탄헬멧 규격 요구조건(609.6 m/s)보다 약 17% 정도 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 공정능력인 Cp 값도 2.84로서 공정능력의 우수함을 나타내는 기준인 1.67보다 높은 값을 가지고 있다. 다만, 방탄한계속도의 최대 값과 최소 값의 편차가 82.0 m/s이며, 최대/최소 값을 제외하더라도 편차가 44.4 m/s로서 동일한 공정, 소재로 제작한 제품임에도 불구하고 높은 편차가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 본 연구를 위해 생산한 방탄헬멧 시료 간에 품질편차가 존재할 수 있음을 의미한다.

### 3.2 방탄한계속도 Data 선별 및 도식화

고온 환경 처리한 방탄헬멧 및 환경 미처리 방탄헬멧에 대해 방탄한계속도를 측정하였고, 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Ballistic Helmet's V<sub>50</sub> for Research

Classification	Max	Min	Deviation
Not Conditioned	725.0	690.5	34.5
Conditioned for 10 days (71℃)	699.6	694.1	5.5
Conditioned for 20 days (71℃)	690.4	675.3	15.2
Conditioned for 30 days (71℃)	702.3	683.5	18.7
Conditioned for 10 days (90℃)	704.5	677.9	26.7
Conditioned for 20 days (90℃)	698.3	671.9	26.4
Conditioned for 30 days (90℃)	691.0	666.0	25.0
Conditioned for 10 days (100℃)	708.3	683.1	25.3
Conditioned for 20 days (100℃)	713.2	679.8	33.4
Conditioned for 30 days (100℃)	681.6	654.1	27.5

각 시료군 내 편차는 최대 34.5 m/s, 평균 23.8 m/s로 나타나 시료 간 편차가 발생한 것을 알 수 있었다. 따라서 각 시료군 내에서 유사한 성능을 가진 헬멧들을 선별할 필요가 있다. 그 이유는 다른 외적인 요소들을 배제하고 고온 환경 처리의 영향성만을 외생변수로 사용하기 위해서이다. 따라서 본 연구에서는 이탈 값을 제거하기 위한 방법으로 중앙값, 표준오차를 활용하였다.

먼저 이탈 값의 영향을 최소화하기 위한 방안으로 각 시료군 V<sub>50</sub> 결과 값들의 중앙값을 추출하여 분석한 결과는 다음과 같다. 추출 결과는 Table 6과 같으며, 각 시료군의 중앙값을 그래프(x축: ln t(time), y축: V<sub>50</sub>)로 표현한 것은 Figure 5와 같다. Figure 6을 보면 90 ℃와 100 ℃에서 음(-)의 기울기가 발견됨으로써 방탄한계속도(V<sub>50</sub>)와 고온 간에 음의 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.

Table 6. Median Value of Each Sample Group's V<sub>50</sub>

Classification	Median Value
Not Conditioned	699.3
Conditioned for 10 days (71℃)	697.3
Conditioned for 20 days (71℃)	689.2
Conditioned for 30 days (71℃)	699.3
Conditioned for 10 days (90℃)	694.6
Conditioned for 20 days (90℃)	678.9
Conditioned for 30 days (90℃)	672.7
Conditioned for 10 days (100℃)	684.6
Conditioned for 20 days (100℃)	690.6
Conditioned for 30 days (100℃)	673.8

Table 7. Each Group's Average V<sub>50</sub> Sorted by Standard Error

Classification	Sorted Value
Not Conditioned	699.2
Conditioned for 10 days (71℃)	697.0
Conditioned for 20 days (71℃)	689.6
Conditioned for 30 days (71℃)	700.3
Conditioned for 10 days (90℃)	694.7
Conditioned for 20 days (90℃)	683.0
Conditioned for 30 days (90℃)	670.5
Conditioned for 10 days (100℃)	684.1
Conditioned for 20 days (100℃)	687.0
Conditioned for 30 days (100℃)	676.4

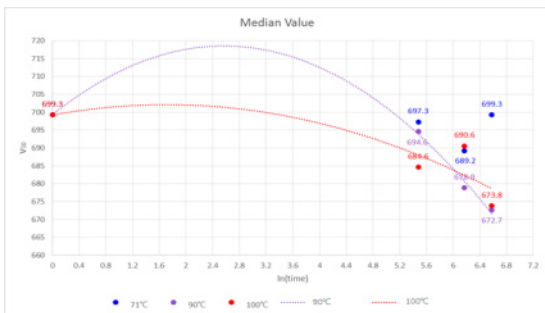


Fig. 6. Graph for V<sub>50</sub> Median Value of Sample Group

이탈 값 제거를 위해 ± 2 표준오차(95.45%)를 설정 하였으며, 범위 밖의 4.55 %에 해당하는 헬멧의 V<sub>50</sub> 값을 추출하였다. ± 2 표준오차(95.45%) 범위 내 각 시료 군의 V<sub>50</sub> 평균 계산결과는 Table 7 및 Figure 7과 같다.



Fig. 7. Graph for V<sub>50</sub> Sorted by Std. Error of Sample Group

Figure 7을 토대로 고온 환경 처리와 방탄성능 간 음(-)의 상관관계를 확인할 수 있지만, 영향성을 판단할 수 있는 아레니우스 모델을 활용할 수 없다. 따라서 표준오차를 적용한 데이터에서 가혹조건을 부여하여 아레니우스 모델을 활용하였다. 가혹조건은 성능이 낮게 나타난 방탄헬멧을 별도 선별하여 아레니우스 모델을 활용해 짧은 수명주기라도 도출하는 것을 의미한다. 이에 71℃에서 30일 환경 처리한 시료군에서 성능이 낮게 나타난 헬멧의 V<sub>50</sub> 값을 추출한 결과는 Table 8 및 Figure 8과 같다.

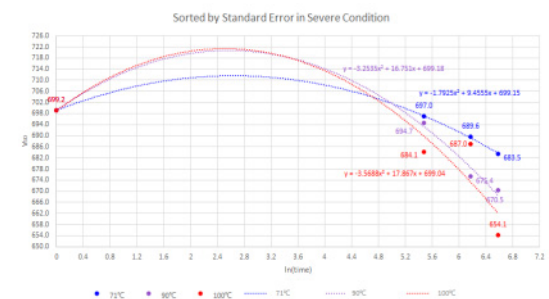


Fig. 8. Graph for V<sub>50</sub> Sorted by Std. Error of Sample Group in Severe Condition

각 온도에 대해 아레니우스 수식을 적용하여 환경 처리 전 방탄헬멧 방탄한계속도 값(699.2 m/s)이 환경 처리 후 한계치(609.6 m/s)만큼 감소하는데 걸리는 시간(수명)을 Table 9와 같이 산출하였으며 아레니우스 선도는 Figure 9와 같다.

Table 8. Each Group's Average  $V_{50}$  Sorted by Standard Error in Severe Condition

Classification	Sorted Value in Severe Conditoin
Not Conditioned	699.2
Conditioned for 10 days (71℃)	697.0
Conditioned for 20 days (71℃)	689.6
Conditioned for 30 days (71℃)	683.5
Conditioned for 10 days (90℃)	694.7
Conditioned for 20 days (90℃)	683.0
Conditioned for 30 days (90℃)	670.5
Conditioned for 10 days (100℃)	684.1
Conditioned for 20 days (100℃)	687.0
Conditioned for 30 days (100℃)	654.1

Table 9. Quadratic Equation of Each Temperature

	Quadratic Equation	Int ( $V_{50}=609.6m/s$ )
71℃	$V_{50}=-1.79(\text{Int})^2 + 9.46\text{Int} + 699.15$	10.18
90℃	$V_{50}=-3.25(\text{Int})^2 + 16.75\text{Int} + 699.18$	8.42
100℃	$V_{50}=-3.57(\text{Int})^2 + 17.87\text{Int} + 699.04$	8.10

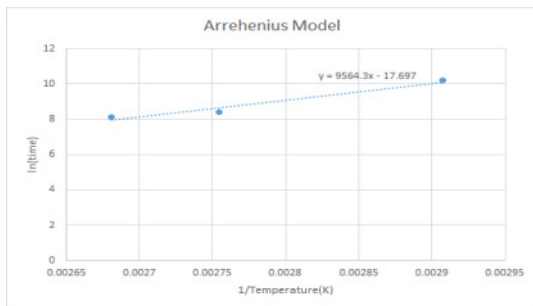


Fig. 9. Shelf Life Equation and Graph for Ballistic Helmet

아레니우스 선도를 활용하여 수명 예측식을 도출한 후 Table 10과 같이 25℃, 30℃, 40℃에서의 수명을 산출하였다. 수명 산출결과 25℃에서 204.4년이라는 높은 값이 산출되었기 때문에 고온 환경 처리가 방탄헬멧의 수명에 영향을 미칠 것이라는 가설( $H_0$ )은 기각되었다.

Table 10. Ballistic Helmet's Shelf Life at 25℃, 30℃, 40℃

Absolute Temperature	Shelf Life Equation	Shelf Life
25℃ 298 K	$\text{Int} = 9564.3(1/T) - 17.70$	204.4 yr
30℃ 303 K		120.3 yr
40℃ 313 K		43.9 yr

## 5. 결론

본 연구는 방탄헬멧의 저장 수명(Shelf Life)을 설정하기 위한 선행연구로 방탄헬멧의 노화인자에 대해 고찰해보았다. 방탄헬멧의 노화인자를 추정하기 위해 미군 ACH 방탄헬멧에서 요구하는 환경 처리와 재료의 재질, MIL-STD-810, 가속수명시험 등에서 공통적으로 요구하는 환경 처리에 관한 내용을 고려하여 '온도' 인자가 방탄헬멧의 수명에 가장 많은 영향을 미칠 것이라는 가설을 수립하였다. 가설을 검증하기 위해 방탄헬멧의 고온 가속 환경 처리를 수행하고 아레니우스 식을 적용하여 고온에 따른 수명을 산출하였다.

본 연구의 결과로 방탄성능과 고온 환경 처리 간 음(-)의 상관관계를 확인했으며, 아레니우스 모델을 활용하여 수명을 도출해냄으로써 노화인자로서의 온도의 영향성은 크지 않음을 확인하였다. 본 연구의 한계점으로 시험 대상이 가지고 있는 특수성(군수품)으로 인해 다양하고 많은 시료 수를 확보하지 못했다는 것을 들 수 있다. 즉, 시료 수 36개에 대한 회귀분석은 가설 판단에 제한이 있을 수 있다는 점이다. 하지만 전술하였듯 방탄헬멧의 수명 관련 연구가 진행되지 않았음을 고려할 때 이에 대한 선행연구를 수행했다는 데에서 본 연구가 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 추후 연구에서는 충격, 일광 등의 다양한 노화인자를 적용하여 진행한다면 의미 있는 결과가 나올 것으로 사료된다. 본 연구는 방탄헬멧의 수명산출 관련 연구의 참고사례로써 활용될 수 있을 것이며, 한국군 방탄헬멧 규격의 개선에 대한 검토 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- [1] National Research Council, "Review of Department of Defense Test Protocols for Combat Helmets", The National Academies, pp. 11-14, 2014.
- [2] G. S. Chang, Y. L. Jung, and Jeon. B. D, "Accelerated Life Test of Knife Protection Fabrics for Cut Resistance", Journal of Applied Reliability, Vol. 15, No. 4, pp. 270-275, 2015.
- [3] S. H. Gu, "A Study on the Bulletproof Reliability Program", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 1, pp. 300-307, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.1.300>
- [4] U.S. Department of Defense, DOD Test Method Standard, "V<sub>50</sub> Ballistic Test for Armor",



MIL-STD-662F, DOD, 1997.

- [5] Defense Acquisition Program Administration "Helmet, Ballistic, KH-B2000(KDS 8470-4001)", DAPA, 2019.
- [6] National Research Council, "Review of Department of Defense Test Protocols for Combat Helmets", The National Academies, pp. 15-24, 2014.
- [7] U.S. Army, "Advanced Combat Helmet(ACH) Purchase Description", Rev A with Change 4, AR/PD 10-02. Soldier Equipment, Program Executive Office-Soldier, Fort Belvoir, Va., 2012.
- [8] S. H. Gu, K. M. Kim, J. H. Park, "A Study on Improvement of Ballistic Testing Method for Combat Helmet", J Korean Soc Qual Manag, Vol. 47, No. 2, pp. 283-294, 2019.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.2.283>
- [9] S. Chabba, M. J. Jongedijk, E. J. van Klinken, "Accelerated aging study of ultra high molecular weight polyethylene yarn and unidirectional composites for ballistic applications", Journal of Materials Science Vol. 42, pp. 2891-2893, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-1617-7>
- [10] Amanda L. Forster, Aaron M. Forster, Joannie W. Chin, "Long-term Stability of UHMWPE Fibers", Journal of Polymer Degradation and Stability, Vol. 114, pp. 45-51, April, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.028>
- [11] Jung-Soo Oh, Bong-Soo Lee, "A Study for Lifespan Prediction of Expansion by Temperature Status", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 19, No. 10, pp. 424-429, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.424>
- [12] U.S. Department of Defense, "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", MIL-STD-810H, DOD, April. 2014.

구 승 환(Seung-Hwan Gu)

[정회원]



- 2014년 8월 : 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원 산업정보시스템 전공 (공학박사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터 선임연구원

<관심분야>

금융공학, 제약이론(TOC), 방탄신뢰성평가

박 호 연(Ho-Yun Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 연세대학교 화학공학 (공학박사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 전투물자센터 연구원

<관심분야>

방탄신뢰성평가, 품질경영