

방탄헬멧의 고장인자 분석에 관한 연구

구승환^{1*}, 박호연², 김영철¹
¹국방기술품질원, ²국방기술진흥연구소

A Study on the Analysis of Failure Factors of Combat Helmet

Gu Seung Hwan^{1*}, Park Ho Yun², Kim Young Chul¹
¹Defense Agency for Technology and Quality,
²Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

요 약 헬멧의 고장인자 파악과 수명주기에 대한 연구는 매우 부족한 실정이기에 본 연구에서는 방탄헬멧의 수명에 영향을 미치는 환경 인자를 파악해보고자 하였다. 방탄헬멧의 고장을 방탄성능을 구현하지 못하거나, 방탄성능을 만족하더라도 물리적 충격 등으로 인하여 파손이 발생하는 경우로 정의하였다. 또한 고장인자를 분석하기 위해 실제 부대에서 발생한 고장사례에 대해 재현성 시험을 수행하였다. 일사시험과 낙하시험의 2가지 환경시험을 수행하였으며 방탄헬멧 환경시험 후 방탄성능을 비교하였다. 연구결과, OO부대에서 발생한 헬멧의 고장의 주 원인은 충격으로 분석되었으며, 방탄성능에 미치는 영향은 일사량 대비 낙하충격이 높음을 확인하였다. 이후 파손이 발생한 방탄헬멧에 방탄성능시험을 수행하였으나, 방탄성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평소 운용과정에서 낙하 등의 충격에 주의해야 한다는 것을 반증하며, 작전 중 헬멧이 파손되더라도 헬멧을 착용해야 안전을 확보할 수 있음을 나타낸다. 본 연구의 기대 효과로 낙하충격이 고려된 방탄헬멧 규격 최신화를 위한 연구자료 마련했다는 것을 들 수 있다.

Abstract This study analyzed the failure factors of combat helmets based on actual failure cases. For the reproducibility test, an environmental treatment was performed assuming the actual operating environment. Two environmental tests were conducted: a solar radiation test and a drop test. The bulletproof performance was then compared. The main cause of the failure of the combat helmet was analyzed as an impact. The impact on the bulletproof performance was higher for the drop impact than the solar radiation. A bulletproof performance test on an environmentally treated helmet revealed satisfactory bulletproof performance. The results are as follows. First, attention should be paid to the impact caused by falling during the operation process. Second, even if the combat helmet is damaged during operation, it is necessary to wear it to ensure safety.

Keywords : Combat Helmet, Aging Factor, Shelf Life, Accelerated Aging, Bulletproof Test

1. 서론

전장에서 총탄 및 폭탄의 파편 등으로부터 유발되는 각종 부상을 방지하기 위해 병사들은 방탄복과 방탄헬멧 등 개인 보호장구를 착용한다. 이 중 두부의 손상을 방지하기 위해 착용하는 것이 방탄헬멧이다. 방탄헬멧은 최초 강철로 헬멧을 제작하였으나 무게와 착용감 측면에서

지속적인 개선요구가 발생하였다. 이후 고망간강(Hadfield Steel)을 사용한 M1(Steel Pot) 헬멧이 사용되다가 1980년대부터는 듀폰(DuPont)사가 개발한 아라미드(Aramid) 섬유(케블라, Kevlar)를 적용한 헬멧이 사용되었으며, 최근에는 UHMWPE(Ultra High Molecular Weight Polyethylene)를 적용한 헬멧이 사용되고 있다 [1]. 이와 같이 방탄헬멧은 섬유 등의 기술이 발전됨에

*Corresponding Author : Seung-Hwan Gu(Defense Agency for Technology and Quality)
email: gsh999@hanmail.net

Received August 30, 2021
Accepted October 1, 2021

Revised September 7, 2021
Published October 31, 2021

따라 더욱 강화되고 경량화된 소재를 사용하여 제작되고 있다.

미국 방탄헬멧의 발전과정을 살펴보면 1980년대 케블라를 사용한 PASGT(Personnel Armor System for Ground Troops) 헬멧을 사용하고 2002년부터는 MICH(Modular Integrated Communications Helmet), 그 후 ACH(Advanced Combat Helmet) 헬멧을 운용하고 있다[1]. 우리나라는 2003년 아라미드 섬유를 사용한 방탄헬멧을 개발한 뒤, 성능형으로 규격화되어 무게, 방탄성능 등의 기준만 수치화되어 있고 재료나, 공정 등에 대한 제한은 별도로 없다. 현재 군에 중앙조달로 납품되고 있는 방탄헬멧은 아라미드(Aramid)와 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)을 방탄소재로서 활용하고 있다[2].

이처럼 우리나라의 경우 소재에 대한 별도의 제한을 두고 있지 않기 때문에 어떠한 소재를 사용하는가에 따라서 방호성능에는 차이가 없지만 환경조건 등의 변화로 헬멧에 고장이 발생할 우려가 존재한다. 예를 들어 최근 많이 사용하고 있는 UHMWPE의 경우 Fig. 1에서 보는 것과 같이 일정 온도에서 물성이 변하기 때문에 해당 환경에 노출될 경우 헬멧의 고장이 발생할 수 있다[3].

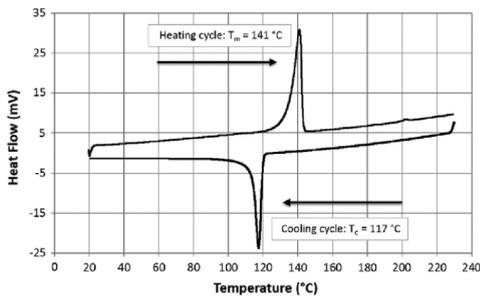


Fig. 1. DSC Curve of UHMWPE[3]

기존 방탄헬멧에 대한 연구를 살펴보면 헬멧의 개발로 인한 성능증가[3], 시험방법 개선[4,5] 등에 대한 연구는 종종 이루어졌지만 헬멧의 고장인자 파악과 수명주기에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 실제로 한국군 방탄헬멧 국방규격을 살펴보면 헬멧의 수명기한은 별도로 없는 실정으로 방탄류 보급계획 수립 및 운용 관리에 애로가 발생한다. 따라서 방탄헬멧의 파손 등 외부적 결함이 발생했을 때 교체가 이루어지고 있는 실정이다. 방탄헬멧의 수명을 연구하기 위해서는 방탄헬멧의 고장인자에 대한 선행연구가 필요하다. 박호연, 구승환(2020)[2]은 미군이 운용중인 ACH 방탄헬멧의 환경 처리 기준(상온, 고온, 저온, 염수 침수, 가속내후 및 가속노화 처리) 중

‘온도’ 인자가 방탄헬멧의 수명에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았으나 온도(고온)가 헬멧의 고장(노화)에 미치는 영향은 미미함을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 선행연구의 후속연구로써, 방탄헬멧의 수명에 영향을 미치는 환경 인자를 파악해보고자 한다.

본 연구를 위해 00부대에서 고장이 발생한 방탄헬멧의 운용 환경을 모사하고자 하였으며, 다음의 두 가지 조건을 고려하였다. 먼저 일사시험을 수행하여 직사광선으로 인한 화학선(광분해) 영향성을 살펴보고자 하였다. 그 이유는 파병부대가 속한 열대 환경에서의 악조건(일사량)을 고려했기 때문이다. 다음으로 낙하충격시험을 실시하여 충격에 대한 영향성을 확인하고자 하였다. 그 이유는 운용과정에서 발생하는 헬멧 낙하에 따른 충격을 고려하기 위함이다.

2. 이론적 고찰

2.1 방탄헬멧 고장 및 수명의 정의

방탄헬멧의 고장인자 분석을 위해 방탄헬멧의 ‘고장’을 정의할 필요가 있다. IEC 60050-191에서는 대상이 요구하는 기능을 수행하지 못하게 되는 사건을 고장으로 정의하고 있다[6]. 여기에서 요구하는 기능을 수행하지 못하게 되는 것은 대상이 가지고 있는 여러 기능 중에서 특정 기능을 수행하지 못하는 경우만을 의미하는 것이 아닌, 성능이 요구수준을 만족하지 못하는 경우도 포함하는 것으로 정의하고 있다.

국방규격에서 요구하는 방탄헬멧의 성능은 방호성능 뿐만이 아니다. 예를 들어 중량과 도장 및 박리상태, 일 솜씨에 대한 요구조건을 만족해야 한다. 따라서 본 연구에서 방탄헬멧의 고장은 ‘방탄성능을 구현하지 못하거나, 방탄성능을 만족하더라도 물리적 충격 등으로 인하여 파손이 발생하는 경우’를 고장으로 정의한다.

방탄헬멧의 ‘수명’에 대한 정의는 기존의 연구[2]에서 정의한 것을 수정하여 “방탄헬멧 방탄한계속도 값이 환경처리나 사격 등의 물리적 영향으로 인하여 규격서 상의 한계 값으로 감소하는데 까지 걸리는 시간”으로 정의한다. 방탄헬멧 규격서 상의 방탄성능을 구현하지 못하는 헬멧은 방탄헬멧으로써의 역할을 하지 못하기 때문이다.

2.2 방탄헬멧의 특징

현재 우리 군에서 사용하고 있는 방탄헬멧의 국방규격서 상의 품명은 ‘헬멧, 방탄용, BH-2000’으로써 일명

‘신형방탄헬멧’이라고 일컫고 있다. 신형방탄헬멧은 1997년부터 2003년에 걸쳐 개발되었으며, 2004년부터 군에 보급되고 있다. 방탄헬멧의 기능은 전투 시 적의 탄자나 파편으로부터 두부의 손상을 방지하는 역할이며, 규격명은 KDS 8470-4001이다.

현재 군에서 운용 중인 방탄헬멧은 17 grain의 모의 파편체(FSP : Fragment Simulating Penetrator)에 대한 방호시험을 수행하며, 상온(20 ℃ ± 2 ℃), 저온(-32 ℃ ± 2 ℃), 침수(20 ℃ ± 2 ℃)의 3가지 환경조건에서 각각의 환경에서 FSP에 의한 V₅₀(방탄한계속도)이 000.0 m/s 이상이어야 한다고 규정하고 있다. 다만, 고온 환경조건에서의 방탄성능 요구조건은 별도로 있지 않다. 여기서 V₅₀이란 특정 시험 탄종에 대해 해당 방탄재가 관통될 수 있는 임계속도라고 할 수 있다.

방탄헬멧의 소재에 대해서는 국방규격에서 제한을 두고 있지는 않지만, 현재 군에 중앙조달로 납품되고 있는 방탄헬멧의 소재를 살펴보면 아라미드(Aramid) 또는 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)이 많이 활용되고 있다.

3. 연구 설계

본 연구에서는 방탄헬멧의 고장인자를 도출하기 위해 환경시험 전과 후에 외관상 OO부대에서 발생한 고장형태의 재현성이 발생하는지를 살펴보고자 하였다. 이후 방탄성능시험을 수행하여 방탄성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. Fig. 2는 OO부대에서 발생한 헬멧 상부파손 및 적층분리 현상이다.



Fig. 2. Breakage and Delamination of Combat Helmet

환경시험에 앞서 방탄헬멧의 내구성을 살펴보기 위해 별도로 텀블링(Tumbling) 처리를 수행한 뒤, 방탄성능 시험을 수행하였다. 텀블링이란 방탄복 시험을 위한 환경처리 시험방법으로 드럼 세탁기와 유사한 챔버 내에

시료를 넣고 일정한 회전을 주어 충격을 가하는 시험이다. 이는 미국의 NIJ Standard 0101.06 규격을 수정하여 적용한 것이다.

환경시험은 낙하충격시험과 일사시험을 수행하였다. 먼저 낙하충격시험은 150 cm에서 자유낙하시험을 수행하였다. 낙하 높이를 150 cm로 설정한 이유는 대한민국 남성의 평균 키에서 어깨 높이를 가정한 것으로 실제 운용환경을 고려한 것이다. 낙하 횟수는 110회, 230회, 300회로 설정하여 자유낙하시험을 수행하였다. 낙하충격시험 후 방탄성능시험을 실시하여(후면변형 측정 및 V₅₀ 시험) 충격횟수와 방탄성능 간에 경향성을 확인하였다. 여기서 후면변형 시험(P-BFS: Perforation and Back Face Signature Test)이란 방탄헬멧에 사격을 한 뒤 헬멧 내부의 부풀음 등으로 인하여 두부에 손상을 주는 정도를 측정하는 시험방법(뇌 등의 장기 손상 방지)으로 후면변형 값이 높게 나타날수록 헬멧의 방호성능이 낮은 것으로 판단한다. Fig. 3은 후면변형 시험을 위한 시료거치와 후면변형 발생을 나타낸 것이다.



Fig. 3. P-BFS Test

다음으로 일사시험을 수행하였다. 일사시험은 직사광선의 화학선(광분해) 영향에 따른 방호성능 확인하기 위한 것으로 1,120 W/m², 49 ℃(사막지역 환경을 가정)에서 24시간 1주기로 최대 16주기에 걸쳐 수행하였다. 환경조건 산정을 위해 MIL-STD-810G 505.4(Solar Radiation)의 시험조건을 적용하였으며, 이는 자연 일사량의 2.5배 수준이다. 일사량 환경시험 후 방탄성능시험

Table 1. Test bullet & velocity of the ACH helmet

| Classification | Bullet & Velocity | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | Bullet | 2 grain RCC | 4 grain RCC | 16 grain RCC | 64 grain RCC | 17 grain FSP | 9mm Ball |
| V ₅₀ (m/s) | | 1280.2 | 1059.2 | 754.4 | 533.4 | 670.6 | Note* |

* Note : 9mm Ball P-BFS Limit
 - Front-Rear : 25.4 mm / Left-Right-Crown : 16 mm



Fig. 4. FSP, RCC, 9mm Ball

을 실시하였으며, 일사주기와 방탄성능 간에 경향성을 확인하였다. 이를 토대로 두 노화인자(낙하충격, 일사량)와 방탄성능 간의 상관관계 분석 및 비교를 수행하였다.

또한 본 연구에서는 시험의 위협이 되는 대상 탄을 선정함에 있어서 미국 ACH 헬멧의 방탄시험에 사용되는 탄을 사용하였으며, 방탄헬멧은 방탄시험 전 각각 4가지(상온(20 ℃), 고온(71 ℃), 저온(-51 ℃), 염수처리)의 환경 처리를 실시한 뒤 사격을 진행하였다. 이는 현 운용 중인 국내 방탄헬멧 성능의 현주소까지 파악할 수 있기 때문이다. Table. 1과 Fig. 4는 본 연구에서 시험된 탄환의 속도 및 형상을 보여준다. 여기서 RCC(Right Circular Cylinders)는 최근 테러와의 전쟁에서 큰 위협

으로 부각된 급조폭발물에 대한 방호성능을 시험하기 위해 고안된 모의파편체이다.

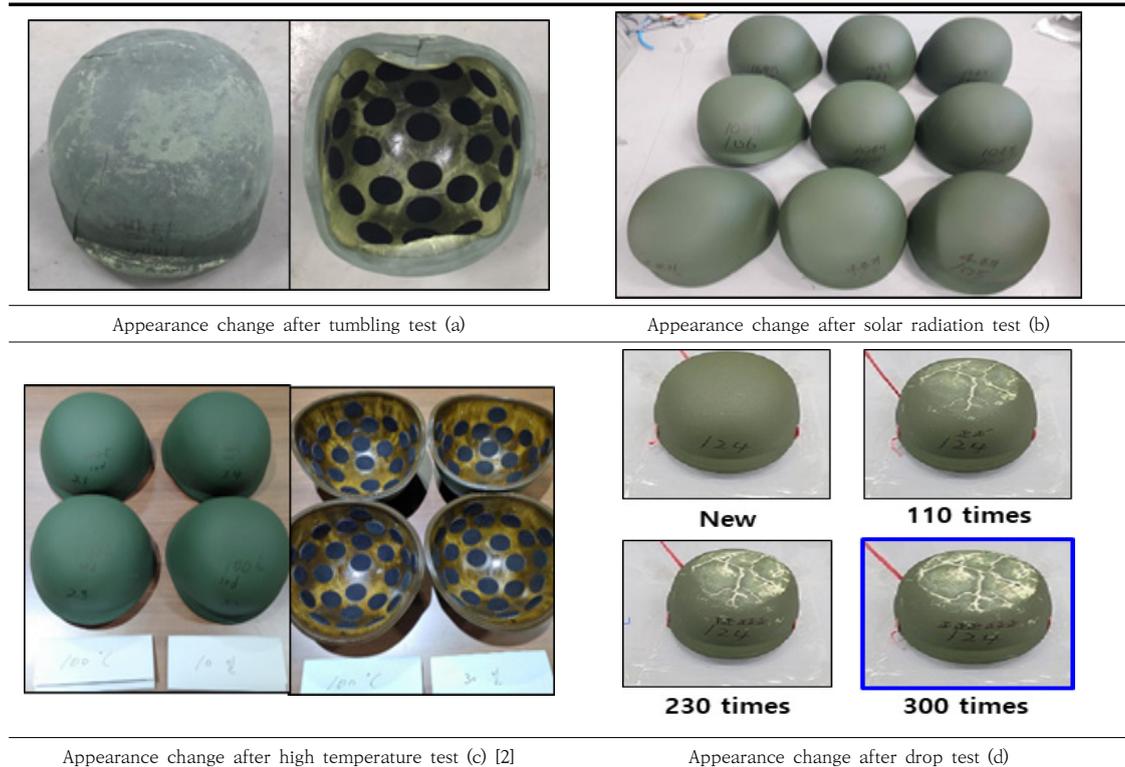
4. 연구 결과

4.1 환경시험 후 외관 변화

방탄헬멧의 내구성을 확인하기 위해 사전시험으로 수행된 텀블링 처리 후 외관은 Table. 2 (a)와 같다. 텀블링(다빈도 저충격) 시험을 통하여 외부 파손 및 적층 분리 현상이 발생한 것을 알 수 있었다. 하지만 외관형태가 OO부대에서 발생한 것과는 유사하지 않음을 확인하였으며, 손상된 방탄헬멧의 방호성능을 확인하기 위해 V₅₀ 시험을 수행하였다. V₅₀ 시험결과 000.00 m/s로 파손 및 적층분리에도 불구하고 국방규격에서 요구하는 성능은 만족하는 것으로 나타나 방호성능에는 문제가 없음을 확인하였다.

방탄헬멧의 일사량(사막조건) 환경시험 후 외관 변화는 발생하지 않았다(Table. 2 (b)). 이는 선행연구[3]에

Table 2. Environmental test results



서 수행한 방탄헬멧 고온처리 후의 외관 변화(Table. 2 (c))가 없었던 것과도 동일했다. 반면 방탄헬멧의 낙하충격시험 후 외관을 관찰한 결과, 충격 횟수가 증가할수록 상부 파손 및 적층 분리가 발생했으며(Table. 2 (d)), OO부대 방탄헬멧의 파손된 외관(Fig. 2)과 상당히 유사한 것을 확인하였다.

4.2 방탄성능시험 결과

두 가지 환경시험(일사시험 및 낙하충격시험) 후 방탄성능시험 결과는 Fig. 9과 Fig. 10 그래프와 같다. 후면 변형 값이 클수록 헬멧의 방호성능이 낮으므로, 두 그래프의 기울기를 비교해봤을 때 일사시험 대비 낙하충격시험 후 방탄성능의 감소 경향성이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 두 가지 노화인자 비교 결과, 일사량 대비 낙하충격이 방탄성능에 미치는 악영향이 더 높음을 확인할 수 있다.

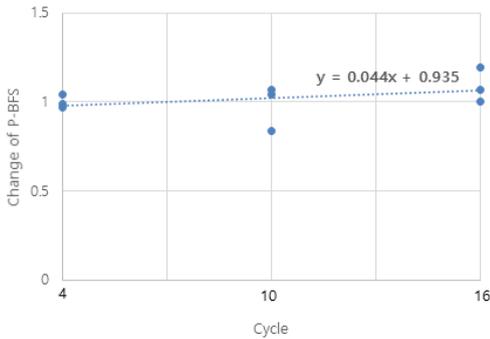


Fig. 9. Change of P-BFS after ballistic test(solar radiation)

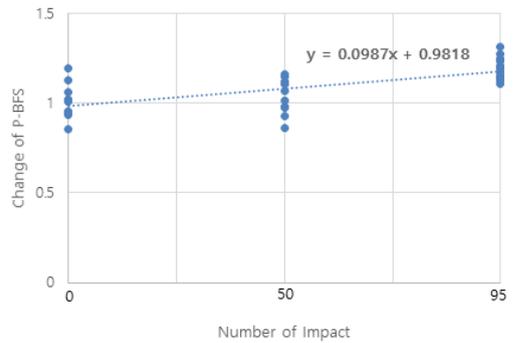


Fig. 10. Change of P-BFS after ballistic test(drop)

앞서 정의했던 고장에 대한 정의를 고려했을 때, 방탄헬멧이 충격으로 인해 파손되었을 경우도 고장으로 분류할 수 있으며, 온도 등의 환경요인보다도 충격에 의한 고장 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었으며, 방탄헬멧의 고장인자로 선정할 수 있음을 알 수 있었다. 미군 ACH 방탄헬멧 규격을 적용한 방탄헬멧의 방탄시험 결과는 Table. 3과 같으며, 국내 국방규격에서 사용하는 17 grain FSP를 사용한 시험에 대해서는 미국 ACH 헬멧에서 요구하는 수준의 방호성능을 갖는 것으로 나타났다. 다만 RCC와 9mm 탄의 경우 일부 차이를 보였다. 하지만 국내 방탄헬멧과 미군 방탄헬멧 간의 직접적인 비교는 시료 수의 부족과 규격 간의 차이 등의 이유로 제한이 있기 때문에 추가적인 시험이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Ballistic test result

| Bullet | Type of Test | Environmental Conditions | | | | | | | |
|--------------|--|--|--------|--|--------|--|--------|--|--------|
| | | Ambient Temperature (20±5.5℃ 24hour) | | High Temperature (71±5.5℃ 24hour) | | Cold Temperature (-51±5.5℃ 24hour) | | Seawater (3~4hour) | |
| 2 grain RCC | V ₅₀ ≥ 1280.2 m/s | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 |
| 4 grain RCC | V ₅₀ ≥ 1059.2 m/s | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 | 0000.0 |
| 16 grain RCC | V ₅₀ ≥ 754.4 m/s | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 |
| 64 grain RCC | V ₅₀ ≥ 533.4 m/s | 000.0 | | 000.0 | | 000.0 | | 000.0 | |
| 17 grain FSP | V ₅₀ ≥ 670.6 m/s | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 | 000.0 |
| 9mm ball | * P-BFS - Front-Rear : 25.4 mm - Left-Right-Crown : 16mm | * 8EA Avg. - Front: 00.0 mm - Rear: 00.0 mm - Left: 00.0 mm - Right: 00.0 mm - Crown: 00.0 mm | | * 8EA Avg. - Front: 00.0 mm - Rear: 00.0 mm - Left: 00.0 mm - Right: 00.0 mm - Crown: 00.0 mm | | * 8EA Avg. - Front: 00.0 mm - Rear: 00.0 mm - Left: 00.0 mm - Right: 00.0 mm - Crown: 00.0 mm | | * 8EA Avg. - Front: 00.0 mm - Rear: 00.0 mm - Left: 00.0 mm - Right: 00.0 mm - Crown: 00.0 mm | |

5. 결론

본 연구는 방탄헬멧의 고장인자를 분석하기 위해 실제 운용환경을 모사하여 환경시험을 수행하고, 재현성 시험을 수행하여 실제 고장이 발생한 방탄헬멧과 비교하여 유사성을 발견하고자 하였다. 이를 위해 실제 운용환경을 모사하기 위해 일사시험과 낙하시험의 2가지 환경시험을 수행하였으며, 방탄헬멧 환경시험 후 방탄성능 비교에 따른 노화인자를 도출하였다.

연구결과, OO부대에서 발생한 헬멧의 고장의 주 원인은 충격인 것으로 판단되었으며, 2가지 환경처리에 대해서는 일사량 환경시험 대비 낙하충격이 방탄성능에 미치는 영향이 높음을 확인하였다. 이후 파손이 발생한 방탄헬멧에 대해 방탄성능시험을 수행한 결과, 방탄성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평소 운용과정에서 낙하 등의 충격에 주의해야함과 동시에 파손된 헬멧이 방호성능을 만족하기 때문에 위급상황에서도 헬멧을 착용해야 안전을 확보할 수 있음을 나타낸다.

본 연구의 기대효과로 낙하충격이 고려된 방탄헬멧 규격 최신화를 위한 연구자료 마련했다는 것을 들 수 있으며, 한계점으로는 미국과의 성능 비교를 위한 시험에서 일반화를 위한 충분히 많은 수의 시료를 확보하지 못했다는 것과 많은 요인을 동시에 고려하지 못했다는 것을 들 수 있다. 따라서 추후 복합인자(예를 들어 온도와 습도, 낙하충격 등을 혼합)를 고려한 방탄헬멧 수명 연구를 수행한다면, 방탄헬멧의 수명을 설정하는데 기초자료를 마련할 수 있을 것이다. 앞으로 장기적인 관점에서 방탄장구류 수명 연구가 이루어져야 하며 이를 통해 국내 방탄물자의 신뢰성 향상을 통해 군 전투력 유지에 기여할 수 있기를 기대한다.

References

- [1] National Research Council, "Review of Department of Defense Test Protocols for Combat Helmets", pp. 11-14, 2014.
- [2] Park. H. Y., Gu. S. H. "A Study for Aging Factor of Bulletproof Helmet : High Temperature Treatment", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 6, pp.332-339, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.332>
- [3] Khalil Y., Kowalski A., and Hopkinson N., "Influence of laser power on tensile properties and material characteristics of laser-sintered UHMWP",

Manufacturing Rev., pp. 1-9, 2016.

DOI : <https://doi.org/10.1051/mfreview/2016015>

- [4] Kim. H., Hwang. T. S., Gu. S. H., and, Nam. H. T. "A Research for New Model of Improved Bulletproof Helmet", J. Korean Soc. Mech. Technol., Vol. 21, No. 3, pp.478-483, 2019.
DOI : <https://doi.org/10.17958/ksmt.21.3.201906.478>
- [5] Gu. S. H., Kim. K. M., and Park. J. H. "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 : <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.2.283>
- [6] IEC 60050-192, International Electro-technical Vocabulary(IEV) - Part 192: Dependability, 2015.

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 화학공학과 (공학박사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 전력지원체계연구센터 연구원

<관심분야>

방탄신뢰성평가, 품질경영

김 영 철(Kim Young Chul)

[정회원]



- 1997년 8월 : 경북대학교 대학원
공업화학전공 (공학석사)
- 2003년 4월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 국방신뢰성연구센터 선임연
구원

〈관심분야〉
신뢰성연구