

The effect of hair and beard on the airtightness of gas masks: A quantitative study using SMARTMAN

Nam, Hanyeol* · Kang, Janggyu** · Lee, Changryeol*** · Kim, Sungki****

ABSTRACT

This study aims to quantitatively analyze the correlation between hair and beard and the airtightness of gas masks in response to the escalating threat of chemical and biological warfare, changes in military personnel regulations, and grooming standards. Airtightness refers to the ability of a gas mask to fit snugly on the user face, thereby preventing the infiltration of harmful external substances, that is among the primary functions of the mask. Although hair and beard are known to affect the airtightness of gas masks, research is lacking in this area, domestically and internationally, and no studies have analyzed the correlation between gas mask airtightness and hair, including beards, under controlled variables. Therefore, research on the correlation between gas mask airtightness and hair, including beards, is necessary to respond to the current evolving threats. For this purpose, gas masks that passed the airtightness performance test specified in military standards were selected. The masks were fitted on a SMARTMAN (SiMulant Agent Resistant Test MANikin) mannequin head with artificial hair and beard attached, and changes in airtightness were measured based on the presence and condition of the hair and beard. The experimental results showed that the presence of hair and beard at the gas mask-face contact surface decreased the airtightness of the mask, and that the highest airtightness was observed with gas masks of the optimal size. The findings of this study can be used as an important reference material for maintaining the performance of gas masks and the combat effectiveness of the military.

Keywords : Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN), hair and beard, gas mask, fit factor, simulant agent resistant test manikin (SMARTMAN)

* (First Author) CBRN Defense Research Institute, Researcher of Performance Test Department, namhy915@snu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4687>.

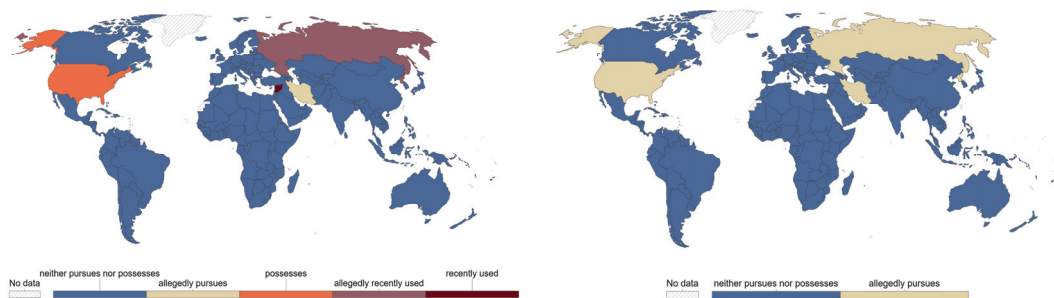
** (Co-Author) CBRN Defense Research Institute, Senior Researcher of Performance Test Department, kjg79490@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2302-3987>.

*** (Co-Author) CBRN Defense Research Institute, Researcher of Performance Test Department, ic034575@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5476-0553>.

**** (Corresponding Author) CBRN Defense Research Institute, Head of Performance Test Department, shimlab@naver.com, <https://orcid.org/0009-0000-3751-1443>.

I. 서론

화학(Chemical), 생물학(Biological), 핵(Nuclear) 및 방사능(Radiological) 무기는 가장 위험하고 파괴력이 강력한 대량살상무기이다(Kang et al., 2023). 이러한 화생방무기는 생명체 대량 살상, 막대한 환경 피해, 사회적 공포 조성 등을 야기할 수 있으며, 국가 단위뿐만 아니라 비국가 단체에 의해 사용될 수 있다. 실제, 전 세계적으로 러시아-우크라이나 전쟁, 이스라엘-하마스 전쟁에서 화생방 무기 사용 논란¹⁾과 김정남 VX 테러, 북한 전술핵운용부대 공개 등의 위협이 고조되고 있다(Figure 1).



〈Figure 1〉 Current chemical (left) and biological (right) weapons activity, 2022

¶ Source: OurWorldInData.org/biological-and-chemical-weapons

이런 화생방(CBNR) 위협에 대응하기 위해 우리 군은 다양한 개인보호장비(예 : 화생방보호의, 진단키트 등) 개발 및 운용을 추진하고 있다. 이 중 대표적인 기본 보호장비로 방독면을 야전부대에 보급하여 활용하고 있으며(Baik et al., 2023), 방독면 착용 및 활용은 개인뿐만 아니라 부대 전체의 전투력을 보존할 수 있어 효과적인 유무형의 전투력을 발휘하도록 지원하는 주요 개인보호장비이다(Kim et al., 2021). 군에서 활용하는 방독면은 화생방 공격에 따라 전투원 개개인의 얼굴, 눈, 호흡기 계통 등으로 유입되는 유해물질을 장비의 구조적 특징과 여과기 등을 통해 보호한다. 이런 점에서 방독면은 자체적인 방호성능도 중요하지만, 개인의 착용방식에 따라 방호성능이 좌우될 수 있어 군은 다양한 훈련을 통해 개인의 방독면 착용법과 주의사항²⁾을 숙달시키고 있다. 예를 들어 예를 들어 방독면이 착용자의 얼굴에 정확히 밀착되지 않을 경우에 정화통을 통해 화생방 유해물

1) 파이낸셜뉴스(2022.10.24.). ‘러, “우크라, 더티밤 준비”...젤렌스키 “핵은 러가 쓸 것”’, <https://n.news.naver.com/article/014/0004917561?sid=104>

2) 앞머리와 옆머리를 쓸어 올리며 아래에서부터 위로 착용, 착용 검사, 두발정리 등 국방일보(2020.10.21.). ‘방독면 원리와 착용’, https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20201021/1/BBSMSTR_000000100128/view.do

질이 여과되지 못하고 비(非)밀착 부위로 침투해 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 그래서 방독면 착용 시, 얼굴 부분에 밀착하는데 방해 요인을 사전에 최대한 제거하는 것이 필수적이다.

특히, 군용 방독면은 국군화생방방어연구소,³⁾ 국방기술품질원 등의 유관기관에서 국방규격(KDS 4240-4009 등)에 의거 방독면 및 그 구성품(보호두건, 정화통 등)에 대한 물리·화학적 성능⁴⁾을 시험하여 그 성능을 보장하고 있다. 반면 이러한 성능시험은 방독면의 부분적인 성능 평가로 방독면의 전체 성능 보장을 판단하는데 한계가 있으며, 실제 사람이 착용하여 부분적인 성능 및 전체 성능이 보장되어야 한다. 이러한 이유로 방독면 성능시험은 방독면 체계통합시험장치(SMARTMAN : SiMulant Agent Resistant Test MANikin)를 활용한 방독면 체계통합시험이 있다. 구체적으로 해당 시험은 사람이 방독면을 착용한 상태를 모사할 수 있는 방독면 체계통합시험장치를 활용해 규격화된 조건에서 방독면 전체 체계의 성능 적합성을 평가하는 방독면 체계 기밀성⁵⁾ 시험이다.

그러나 이런 방독면 요구성능 부합 여부를 확인하였더라도 방독면 기밀성은 실제 착용 간에 착용자의 체모, 흉터 등에 따른 영향이 나타날 수 있으므로 미 직업안전위생국(OSHA) 등의 관련 기관은 관리되지 않은 요소(수염, 상처 등)가 외부 위험물질 흡입에 피해 영향을 미칠 수 있다고 명시하고 있다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾ 즉, 관련 연구는 방독면-얼굴 접촉면(방독면과 얼굴 간)에 머리카락, 수염 등의 물질로 인한 성능저하 문제를 제기하였으며, 인종(人種), 방독면 종류, 제조업체, 계절 등의 요인과 체모에 의한 방독면 기밀성 차이를 밝혔다. 이에 방독면 기밀성과 관련하여 특정 상황과 조건에 따른 체모 영향과 이런 요소를 통제하는 연구가 진행되었다(Floyd, Henry, & Johnson, 2018; Hounam et al., 1964; Hyatt et al., 1973).⁹⁾ 반면에 우리나라의 경우는 체모와 방독면 기밀성 간의 관계를 밝히는 연구가 부재한 실정으로 한국산업안전보건공단 등의 유관기관에서 미국의 규정을 준용하여 “안면 부가 닿는 부분에 수염이나 깊은 흉터가 있어 누설의 우려가 있으면 후드형 호흡보호구를 사용한다”¹⁰⁾고 지침으로 제시하고 있다.

3) 국군화생방방호사령부 예하의 화생방 전문연구기관으로 화생방 정밀분석과 성능시험 등의 기술지원 업무를 수행함.

4) 흡기·배기저항, 안면부 누설률, 배기 밸브 작동, 시야, 강도, 신장률 및 영구 변형률, 불연성, 투시부의 내충격성, 에어로졸 투과율, 화학작용제 방호성능 등

5) 기밀성: 외부 입자가 방독면을 통과하여 내부로 얼마나 유입되는지에 대한 특성을 의미하며, 방독면 외부 입자농도를 방독면 내부 입자농도로 나뉜 값(외부 입자 농도/내부 입자 농도)으로 정량적으로 표현할 수 있으며, 기밀계수(fit factor, FF)로 표현함.

6) The Occupational Safety and Health Administration(OSHA), Respiratory Protection Standard 29 Code of Federal Regulations(CFR), 1910.134.

7) Health Safety Executive(2013). Respiratory protective equipment at work - a practical guide. p.20.

8) The Occupational Safety and Health Administration(OSHA), Inspection Procedures for the Respiratory Protection Standard, OSHA Directive CPL 2-0. 120, 2014.

9) Naber, D. G., & NAVAL AIR DEVELOPMENT CENTER WARMINSTER PA CREW SYSTEMS DEPT.(1972). Effects of Facial Hair in Oxygen Masks (p. 0036). Crew Systems Department, Naval Air Development Center.

10) 한국 산업안전보건연구원(2020. 10.). 호흡보호구의 선정·사용 및 관리에 관한 지침. p.14

화생방 위협에 직접 대응하는 군은 민간기관과 유사한 수준으로 지침 및 규정 등이 기술되어 있으며, 비교적 짧은 머리를 유지하는 군인의 경우도 체모에 의한 방독면 기밀성 저하 가능성이 여전히 존재한다. 예를 들어 남성 군인은 주기적인 면도를 통해 수염을 관리하고, (간부)표준형¹¹⁾과 스포츠형¹²⁾으로 나누어 체모를 관리하도록 규정하고 있다. 그래서 스포츠형을 적용받는 용사(이병~병장)의 경우에 평소 상황에서 방독면을 착용하게 되면 체모에 따른 방독면 기밀성의 저하 가능성이 매우 낮지만, 표준형 두발을 적용받는 간부의 경우에 체모에 의한 저해가 발생할 여지가 있다.¹³⁾ 게다가 전시 상황에서 화생방전(戰)은 급박한 전장 상황에 따라 발생하고, 장기간 진행될 수도 있어 현재 두발·면도 규정을 준수하는데 제한되고, 관련 체모 관리가 원활하지 않을 수 있어 방독면의 기밀성이 저하될 수 있다. 또한, 최근 국방부는 '23~'27 국방중기계획과 2022년 국방부 업무보고 등을 통해 향후 군무원과 여군 인력확대 방향을 제시하였다. 이러한 군 규정 및 구성원의 변화는 방독면 착용 및 성능 측면에서 고려되어야 할 주요 요인이라고 볼 수 있다.¹⁴⁾

따라서 본 연구는 군의 변화 상황에 대응하기 위해 군용 방독면의 기밀성과 체모의 상관관계를 분석하는데 목적을 두고 있다. 이를 위해 본 연구는 국방규격¹⁵⁾에 명시된 기밀성 성능시험을 통과한 방독면을 분석대상으로 선정하고, 기밀성 성능시험과 동일한 조건에서 방독면 체계통합시험장치를 이용해 착용자의 체모를 모사하여 정량적인 상관관계를 분석하였다. 끝으로 분석결과를 토대로 향후 방독면 착용과 관련된 군 교리 및 규정에 대한 객관적·전술적 근거를 제시하고자 하였다.

II. 선행 연구 고찰

화학전에서 방독면의 중요성은 1차 세계대전 당시 염소가스를 이용한 최초 대규모 화학전인 서부 전선, 독일군과 유럽 연합군의 2차 이프르(Ypres) 전투(1915.4.22.~5.25)를 통해 부각되기 시작하였다. 또한, 방독면의 정화통 성능 자체뿐만 아니라 방독면의 방호력에 영향을 미치는 요인(특히 수염)과 관련된 연구가 추진되어 왔다(Table 1).

Hounam 등(1964)은 영국군(7명)을 대상으로 2주 동안 턱수염 길이 증가에 따른 전면형 마스크의 기밀계수¹⁶⁾ 변화 측정 연구를 통해 턱수염이 없는 Day 0(100,000 기밀계수) 이후 턱수염이 길러진

11) 착모 시 귀 위쪽 머리 1cm 이내, 윗 머리의 경우 왁스 등으로 용모 단정

12) 앞·윗머리 3cm 이내, 옆·뒷머리 1cm 이내

13) 부사관과 장교를 포함하는 간부는 군의 30~40%로 적지 않은 비율을 차지하고 있다. 더군다나, 인권위의 권고 등으로 국방부에서는 관련 규정 완화를 지속해서 검토하고 있어, 규정이 완화된다면 간부뿐만 아니라 용사들까지 체모에 의한 저해가 발생할 여지가 높아진다.

14) '23~'27 국방중기계획, 국방부, 2022. 12. 28. / 2022년 국방부 업무보고, 국방부, 2021. 12.

15) 국방규격. KDS 4240-4009-7 방독면, 화학-생물학전용(K5), Mask, Chemical-Biological.

16) 기밀계수(fit factor), 방독면 외부 입자농도를 방독면 내부 입자농도로 나뉜 값(외부 입자 농도/내부 입자 농도)

Day 9에 10 기밀계수를 보이는 결과를 확인하였다. McGee & Oestenstad(1983) 연구에서도 수염에 대한 SCBA(self contained breathing apparatus)의 기밀계수를 측정한 결과, 2주 간격으로 8주 동안에 초기 20,000에서 14~1,067 기밀계수 감소 추세를 밝혔다.

Hyatt 등(1973)은 산업용 전면형 및 반면형 마스크 착용 시, 턱수염 길이 증가가 일반적인 호흡과 다양한 행동(깊은 호흡, 고개 양측 움직임, 위아래로 움직임, 웃기, 읽기, 기침)에서 기밀계수의 변화(DOP : dioctyl phthlate 및 NaCl 에어로졸의 내·외부 농도변화)를 실험하였다. 이를 통해 마스크 모델에 따라 기밀계수 차이가 나타났다(2,000~200 또는 1,111~111). 그 외에 수염 밀도·질감, 형태(턱수염, 구렛나룻) 등이 기밀성 저하에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, Floyd 등(2018)도 착용자의 수염 길이에 따라 0.5 in.에서 26,086~429, 0.125 in.에서 740~22 기밀계수가 저하되는 것을 밝혔다.

〈Table 1〉 Summary of previous studies on the airtightness of the gas masks

Study	Experimental design method used	Results
Hounam et al. (1964)	With british army full-face mask 7 subjects tested the effect of increasing beards length for two weeks	Day 0: 100,000 FF Day 9: 10 FF
Hyatt et al. (1973)	With industrial full-face and half-face mask 4 subjects tested the effect of increasing beards length for 8 days including a range of behaviours 12 subjects tested the effect of beard density and texture	Day 0: 2,000~1,111 FF Day 8: 1,111~111 FF
McGee & Oestenstad (1983)	With SCBA(self contained breathing apparatus) 8 subjects tested the effect of increasing beards length for 8 weeks	Day 0: 20,000 FF Week 8: 814~1,067 FF
Floyd et al. (2018)	With half mask 20 subjects with long beards, the beards were cut to 0.5, 0.25, 0.125 in., considering density and diameter per unit area	0.125 in.: 26,086~429 FF 0.5 in.: 740 22 FF

선행연구 고찰 결과, 다양한 실험 기반 연구에서 방독면 기밀성과 체모 간의 상관관계를 정량적으로 확인하였다. 하지만, 해당 연구는 체모 중 수염만을 고려하여, 실제 사람을 대상으로 한 연구였다. 이는 중요한 변수인 머리카락에 대해서는 다루지 않았다는 것과 방독면 착용자에 의해 발생하는 다양한 변수(호흡, 체온, 주변 환경, 체모 및 얼굴 형상 등)가 충분히 통제되지 못했다는 제한 사항이 존재한다.

이외에도 미군 해군, 미국 노동성(DOL, US Department of Labor) 예하 직업안전위생국(OSHA, Occupational Safety and Health Administration), 미국 질병통제예방센터(CDC, Centers for Disease Control and Prevention) 예하 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health), 영국 보건안전청(Health and Safety Executive) 등은 방독면을 활용한 다양한 실험을 통해 관리되지 않은 수염 및 상처 등의 요소가 밀착성에 영향을 미쳐 착용자에게 해가 될 수

있다고 지침에 명시하였다.¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾

반면, 우리나라는 한국산업안전보건공단 등의 유관기관에서 규정을 토대로 체모에 의한 방독면의 기밀성에 영향을 유의하도록 명시하고 있으며, 군의 경우도 방독면 밀착성 저하를 방지하기 위해 개인 건강관리 항목에 턱수염이나 투발 관리 등을 규정하고 있다. 그러나 여전히 우리나라 실정에 맞는 자체 실험 데이터와 관련 연구가 전반적으로 부족하므로 방독면 기밀성과 체모에 의한 상관관계에서 발생할 수 있는 외생변수를 최소화하여 통제할 수 있는 실험설계 개발과 분석이 필요하다. 이를 위해 본 연구는 우리나라 군의 실정에 맞게 관련 규정, 작전적 환경 및 정책 변화를 감안하여 군 방독면(K5) 기밀성에 체모가 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 설계하고 이를 토대로 상관관계를 분석하였다.

III. 연구방법

3.1 실험 대상 및 관련 장치

3.1.1 방독면

현재 우리 군이 활용하는 K5 방독면은 전·평시 화생방 및 테러 상황에서 착용자의 안면부와 호흡기를 보호하는 개인 방호용으로 화학·생물학전용 방독면이다. 해당 방독면은 정화통과 불침투성 고무 소재, 구조적 특징 등을 통해 화학·생물학 작용제, 방사능 낙진, 산업용 독성화학물질 등에 대한 방호성능을 갖고 있고, 가로·세로 폭에 따라 특대(XL), 대(L), 중(M), 소(S)로 분류한다(국방규격, KDS 4240-4009-7 방독면, 화학·생물학전용(K5)).

17) The Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Respiratory Protection Standard 29 Code of Federal Regulations(CFR) 1910.134

18) Health Safety Executive(2013). Respiratory protective equipment at work - a practical guide. p.20.

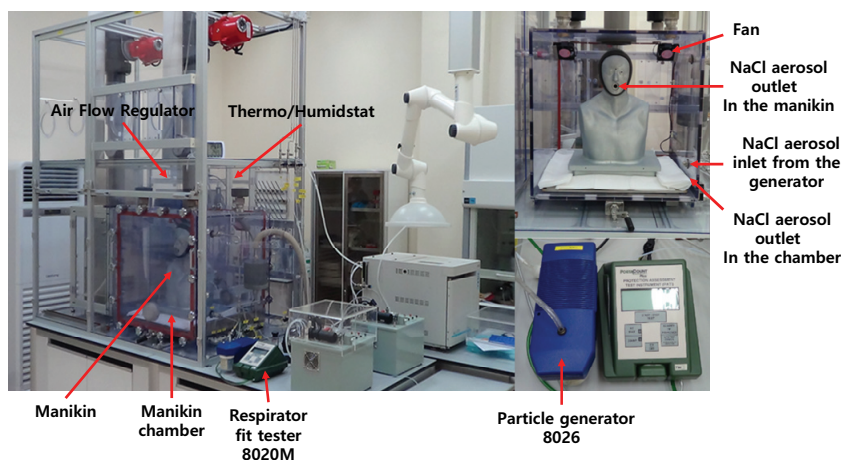
19) 미 해군은 실제 실험 사례가 있으며, 미국 직업안전위생국(OSFA)은 하루 이상 자란 수염 또한 방독면 기밀성에 영향을 미치는 요인으로 규정하고 주의를 당부하고 있음.



〈Figure 2〉 Face feature of K5 gas mask

3.1.2 방독면 성능시험 및 방독면 체계통합시험장치(SMARTMAN)

방독면 성능시험은 군용 방독면의 요구성능 필요조건 충족 여부를 검사하는 것이다. 방독면 체계통합시험에서는 기본 정화통 2개(정화통 요구성능을 통과한)가 장착된 방독면을 대상으로 NaCl 을 모의 화학작용제로 활용해 방독면의 기밀성을 확인한다. 해당 시험은 방독면 체계통합시험장치 (SMARTMAN : imulant agent resistant test manikin)²⁰⁾(Figure 3)를 활용하여 진행되며, 공기 유량 조절 장치, 온·습도 조절 장치, 인조두상, 인조두상 챔버, 방독면 기밀계수 측정기(8020M) 등으로 구성되어 있다. 장치 인조두상(마네킨)에는 방독면을 착용시킬 수 있으며, 사람과 같이 호흡하도록 설정할 수 있다. 또한, 방독면 시험절차서²¹⁾에 명시된 시험 환경을 조성하여 방독면 성능시험의 최적 환경을 조성할 수 있다.



〈Figure 3〉 Simulant agent resistance test manikin (SMARTMAN) for test of protective mask systems

20) 미국 ECBC(Edgewood Chemical Biological Center)에서 개발한 장비로 미국, 네덜란드에 이어 우리나라 군에 설치되어 운용 중임.

21) TOP 08-2-109A(2023), Simulant Agent Resistance Test Manikin (SMARTMAN) Testing of Protective Masks

3.2 실험 조건

선행연구를 고찰한 결과, 방독면 착용 시 발생할 수 있는 다양한 잠재적 영향요인(호흡, 얼굴 형태, 신체 상태, 계절, 인종 등)이 존재하며 해당 요인들이 기밀성 관련 실험결과에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 그래서 본 연구는 상기한 외생변수의 영향을 통제하기 위해 실제 사람을 모사할 수 있는 방독면 체계통합시험장치를 활용하여 실험을 진행하였다. 구체적인 실험조건(Table 2)의 경우, 사람의 체모 대신에 머리카락은 붙임머리피스5핀 가발(아티 社), 수염은 인공 수염(LivingDA 파티공구 社, 7번 턱수염, 8번 턱수염, 10번 수염세트)으로 공산품을 활용하였다. K5 방독면은 착용자의 얼굴 크기에 맞는 최적의 방독면 보급이 제한될 수 있다는 상황을 반영하기 위해 SMARTMAN 인조두상에 최적 사이즈로 명시된 중(M : medium) 및 대(L : large)를 대상으로 선정하였다. 단, 실험에 활용된 방독면은 모두 국방규격에 명시된 성능시험을 통과한 제품을 활용하였다.

〈Table 2〉 Parameters for experimental design of testing the airtightness of the gas masks

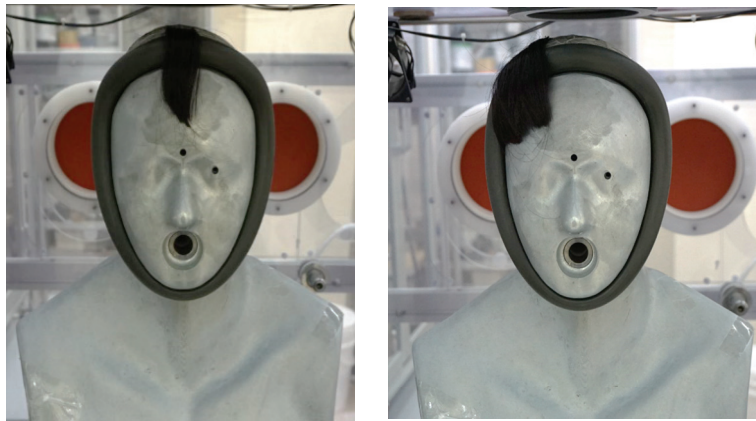
Parameters		Specifications
Gas mask wearer	SMARTMAN manikin	Experimental environment - Temp: $21\pm3^{\circ}\text{C}$ - Relative humidity: $50\pm5\text{ RH\%}$ - Respiratory rate: 1.5 L/breath, 33 breaths/min.
Gas mask	K5 gas mask	The gas masks used were pre-tested to meet the Korean Defense Specification
Gas mask size	Medium and large	
Hair	Artificial hair	Attached hair piece 5-pin wig
Beards	Artificial beards	LivingDA's Party Tools, Set of 7 Beards, 8 Beards, 10 Beards

특히, 본 연구는 기밀성 성능시험을 통과한 방독면을 활용해 성능시험과 동일한 환경에서 체모만을 변수로 설정하여 방독면 기밀성과 체모의 상관관계를 확인하였다. 이에 따라 SMARTMAN의 조절장치를 활용해 시험절차서에서 명시된 바와 동일하게 실험환경인 온도 $21\pm3^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50\pm5\text{RH\%}$, 호흡량 1.5L, 분당 33회로 설정하였다. 그리고 전체 공기 유량을 $50\pm0.1\text{L/min}$ 로 설정하였다. 기밀계수를 확인할 입자는 TSI 100% Pure Sodium Chloride(NaCl) tablet(Part NO.: 803011)를 사용하였으며, 입자발생기(TSI Particle Generator 8026)를 활용하여 NaCl 에어로졸(CMD²²⁾: $0.04\mu\text{m}$, GS D²³⁾: 2.2)을 $130,000\text{ particle/cm}^3$ 이상이 되도록 조성하였다. 방독면-얼굴 접촉면을 통과하는 머리카락이 많아질때의 방독면 기밀계수 변화 정도 측 둘 간의 상관관계를 확인하기 위해, 머리카락 다발을 가로 폭 0mm에서 100mm까지 조건을 설정하였다. 이에 따라 가발 가닥이 부착되어 있는 부위

22) Count Median Diameter

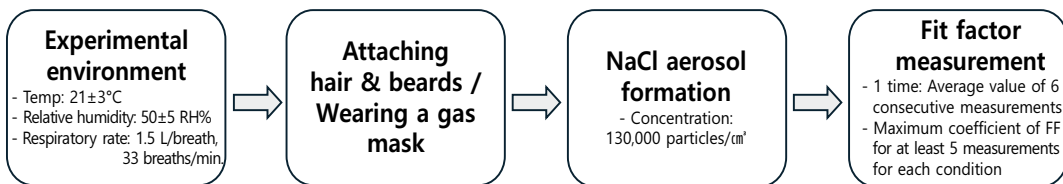
23) Geometric Standard Deviation

(가발 핀과 결합되어 있는 부위)를 잘랐으며, 가발의 길이는 방독면-얼굴 접촉면을 충분히 통과할 수 있도록 세로 길이를 약 10cm로 절단하였다. 조건에 따라 머리카락이 방독면-얼굴 접촉면을 통과할 수 있는 다양한 상황을 모사하기 위해 이마 중앙 또는 관자놀이를 통과 부위로 설정하고 테이프로 머리카락이 층지지 않도록 마네킹에 부착하였다(Figure 4). 수염과 방독면 기밀계수 상관관계를 확인하기 위해, 한국인에게 나타날 수 있는 대표적인 인공 수염 형상을 3가지 설정하였다. 실험 여건상, 머리카락의 조건만큼 세분화하지 않고, 수염 형상 및 유무(有無)를 실험 조건으로 설정하고 인공 수염이 뭉치지 않도록 마네킹에 부착하였다.



〈Figure 4〉 Examples of artificial hair attached SMARTMAN in center of the forehead 20mm (left side) and temple area 40mm (right side)

3.3 실험 절차 및 분석 방법

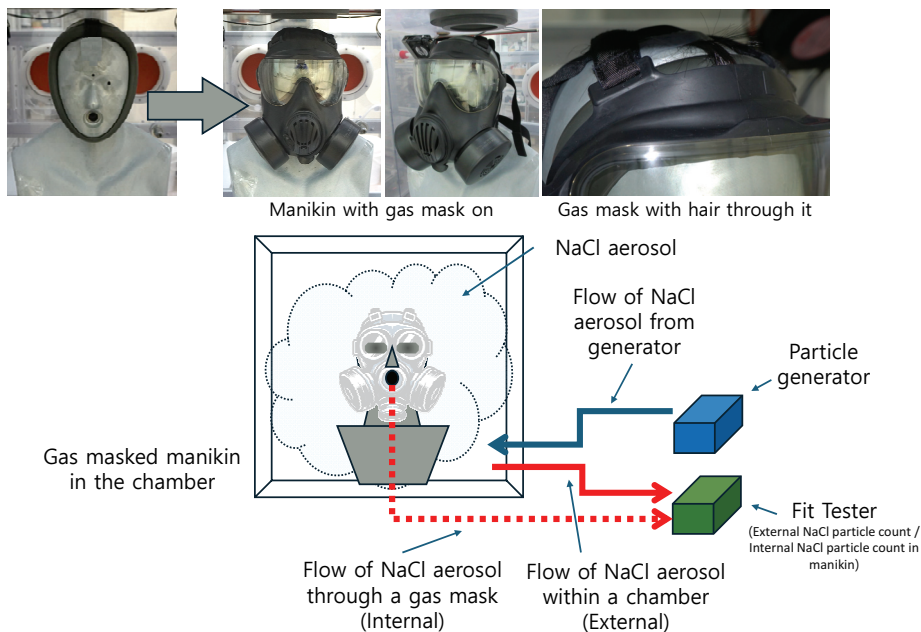


〈Figure 5〉 Diagram of the experimental procedure for a gas mask airtightness test

본 연구의 전체적인 실험 절차는 Figure 5와 같다. 실험환경 조성 후 조건에 맞는 체모를 인조두상에 부착한다. 이후 방독면을 착용시킨 후, NaCl 에어로졸을 130,000 particle/cm³ 이상 형성하고, 기밀계수 측정기(Fit tester)²⁴⁾를 활용해 기밀계수를 측정하였다. 기밀계수 측정기는 인조두상 챔버 내부와 인조두상 입 부위 호흡관에 연결하며 인조두상에 방독면을 씌우고 NaCl 에어로졸을 형성하면

24) PortaCount® Plus Protection Assessment Test Instrument Model 8020M

챔버 내부와 인조두상 내부는 NaCl 에어로졸의 농도가 차이가 난다(Figure 6). 이를 통해 두 가지의 농도를 동시에 측정하여 ‘외부 NaCl 에어로졸 농도/내부 NaCl 에어로졸 농도’를 계산하여 기밀계수를 도출한다. 측정 시, 6회 연속 측정값의 산술평균값을 기밀계수 1회 측정값으로 설정하였다. 각 조건당 최소 5회 이상의 측정값을 확인하고 측정값 중 가장 큰 값(각 조건별 방독면 기밀계수 최대값)으로 기술하였다.



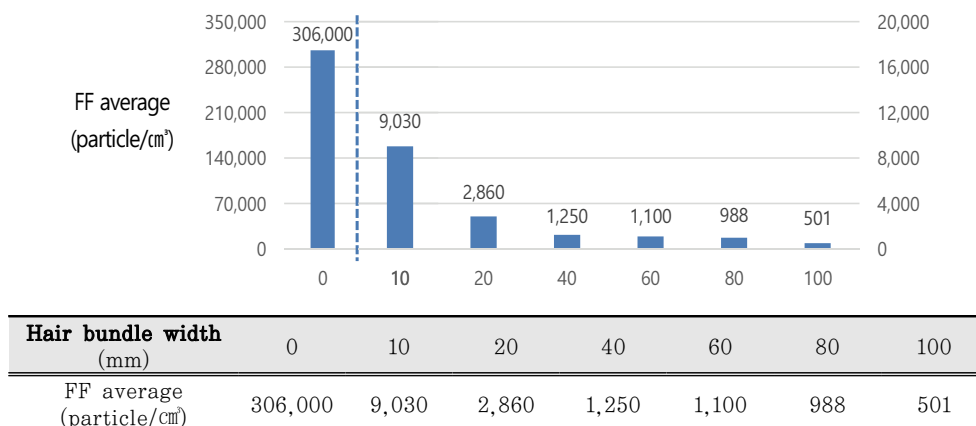
〈Figure 6〉 Overview of the experimental design to measure fit factors (FF) in wearing a gas mask with SMARTMAN

IV. 연구결과

4.1 머리카락 요인과 방독면 기밀성 실험

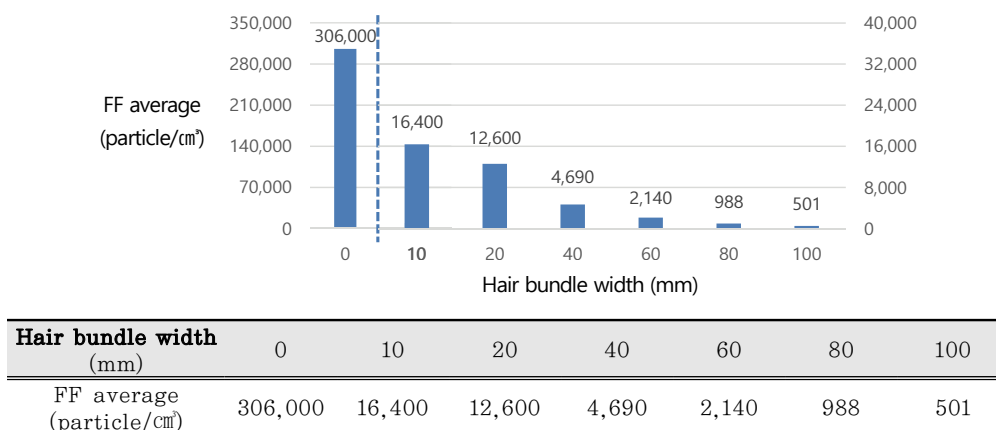
본 연구는 인조두상에 최적 사이즈인 M 사이즈와 비교적 큰 L 사이즈 방독면 착용 상태에서 이마 중앙 부위에 0~100mm의 머리카락 다발 폭이 통과했을 때 기밀계수를 측정하였다. M 사이즈 방독면 착용 상태에서 기밀계수 변화를 살펴보면(Figure 7), 머리카락이 없는 0mm 조건(306,000 기밀계수) 기준으로 10mm부터 100mm까지 머리카락 다발 폭이 증가함에 따라 501 기밀계수까지 변화하였다. 결과적으로 이런 기밀계수 감소는 비(非)밀착 부위로 정화통의 여과를 거치지 않은 외부 화생방물질이 호흡기 등으로 유입될 수 있다는 의미한다. 방독면 기밀성-수염의 관계에서 방독면-

얼굴 접촉면에 머리카락이 증가함에 따라 기밀계수가 감소하는 결과는 기존 문헌의 수염과 방독면 기밀성 상관관계 결과와 유사한 경향을 나타냈다.



〈Figure 7〉 Measurements of fit factors towards the width of hair bundle in the center of the forehead with gas mask size medium

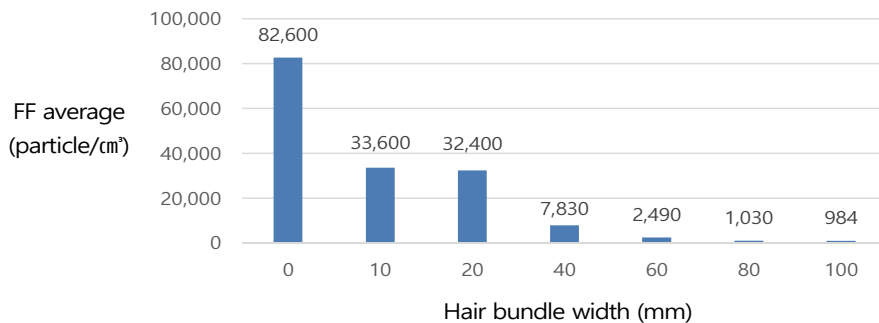
동일한 조건에서 관자놀이 부위에 0~100mm의 머리카락 다발 폭이 통과했을 때 기밀계수를 측정하였다. 측정결과(Figure 8), 10mm부터 100mm까지 머리카락 다발 폭이 증가함에 따라 계속해서 기밀계수가 감소하였다. 또한 머리카락이 이마 부위를 통과한 실험과 비교하여 기밀계수 감소량이 관자놀이 부위보다 더욱 크게 나타났다. 기밀계수 감소만을 확인한 기존 문헌과 달리, 본 연구는 방독면-얼굴 접촉면 내 머리카락 통과 부위에 따라서도 방독면의 기밀계수에 차이가 있다는 것을 확인하였다.



〈Figure 8〉 Measurements of fit factors towards the width of hair bundle in the temple area with gas mask size medium

다음으로 L 사이즈 방독면 착용 상태에서 이마 중앙 부위에 0~100mm의 머리카락 다발 폭이 통과했을 때 기밀계수를 측정하였다. 측정결과(Figure 9), 머리카락이 없는 0mm 조건에서 82,600 기밀계수가 측정되었으며, 10mm부터 100mm까지 머리카락 다발 폭이 증가할수록 기밀계수가 984 기밀계수까지 감소하였다. M 사이즈 방독면의 실험과 동일하게 머리카락이 많이 통과할수록 기밀계수가 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 두 가지 사이즈 방독면을 이용한 실험을 통해 착용자와 방독면-얼굴 접촉면을 통과하는 머리카락이 동일하더라도, 방독면 크기에 의해 방독면의 기밀성이 달라진다는 것을 추가로 확인하였다. 실험 결과, 머리카락이 통과하지 않은 최초 기밀계수는 최적 사이즈(M 사이즈) 방독면에서 가장 높게 나타났다. 하지만 머리카락 통과 시점부터는 머리카락 다발 폭이 증가함에도 불구하고 오히려 L 사이즈 방독면에서 기밀계수가 비교적 크게 나타났다.

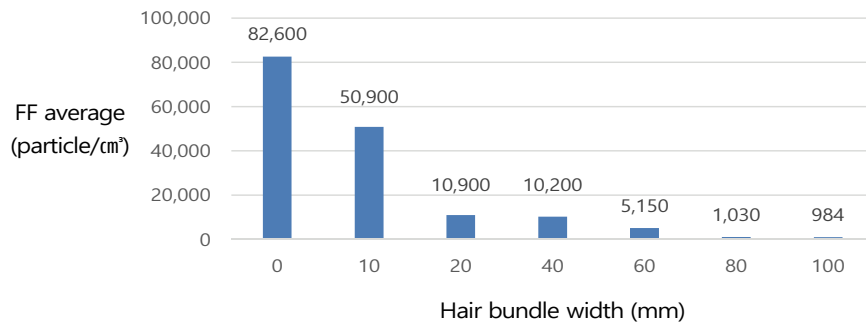
이러한 결과는 방독면 착용 시 착용자의 얼굴 크기에 맞도록 착용해야 최상의 기밀성을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 비교적 큰 사이즈의 방독면에서 비교적 높은 기밀계수가 유지되는 것은 예상컨데, 최적 사이즈인 M 사이즈의 방독면은 착용자의 얼굴을 정확히 덮기에는 충분한 용량이지만, 방독면 기밀성-얼굴 접촉면에 밀착 방해 물질(머리카락, 수염)이 존재하면 방해 물질까지 덮을 수 있는 충분한 용량이 아니기 때문인 것으로 추측된다. 다만, 이는 추후 다양한 사이즈의 방독면을 대상으로 실험을 진행하여 경향성을 확인할 필요가 있다.



Hair bundle width (mm)	0	10	20	40	60	80	100
FF average (particle/cm³)	82,600	33,600	32,400	7,830	2,490	1,030	984

〈Figure 9〉 Measurements of fit factors towards the width of hair bundle in the center of the forehead with gas mask size large

이어서 관자놀이 부위에 0~100mm의 머리카락 다발 폭이 통과했을 때 기밀계수를 측정하였다 (Figure 10). L 사이즈 방독면을 착용한 실험 결과와 마찬가지로 이마 중앙 부위를 통과한 조건에서 가장 높은 기밀계수가 관찰되었으며, 큰 사이즈 방독면에서 동일한 조건에서 비교적 높은 기밀계수가 측정되었다.



Hair bundle width (mm)	0	10	20	40	60	80	100
FF average (particle/cm³)	82,600	50,900	10,900	10,200	5,150	1,030	984

〈Figure 10〉 Measurements of fit factors towards the width of hair bundle in the temple area with gas mask size large

방독면 기밀성과 머리카락 간의 상관관계에 관한 실험결과, 기존 문헌에서 제시한 결과와 유사하게 방독면-얼굴 접촉면에 이물질이 많을수록(머리카락이 많이 통과할수록) 방독면 기밀계수가 감소하였다. 본 연구는 방독면 크기를 차이 조건을 설정한 실험설계를 통해 L 사이즈보다 M 사이즈 방독면이 머리카락이 없는 조건에서 기밀계수가 상당히 높게 나타나는 결과를 도출하였다. 또한, 머리카락과 같은 이물질이 존재할 경우에 L 사이즈 방독면에서 측정된 기밀계수가 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인하였다.

본 연구는 방독면-얼굴 접촉면의 통과 부위(이마, 관자놀이) 조건을 고려한 실험을 통해 이마 부위에서 기밀계수 감소가 더 민감하게 나타나는 경향을 확인하였다. 이는 현재 관자놀이 부분에 조임 끈이 있는 방독면의 구조상, 이물질이 존재할 경우에도 조임 끈으로 인해 이마 부위보다 관자놀이 부위의 밀착 수준이 높게 유지되는 것으로 추정할 수 있다. 이런 점에서 차후 방독면 개선 시 조임 끈 위치를 기존 양쪽 관자놀이 부위 외에 이마 중앙 부위까지 추가하는 개선 방안을 고려해 볼 수 있을 것이다.

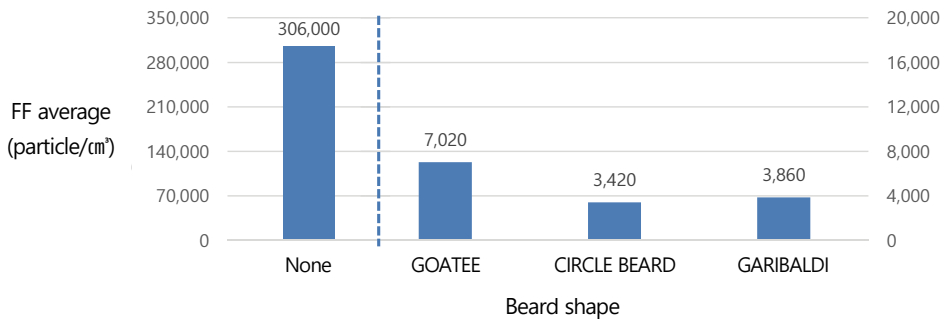
4.2 수염 요인과 방독면 기밀성 실험

기존 문헌이 제시했던 방독면 기밀성-수염 간의 상관관계가 유사하게 도출되는지 확인하기 위해 OSHA 지침에 명시된 수염 중에서 일반적인 한국인과 유사한 모조 수염 형태(왼쪽 그림 : 염소수염, 중앙 그림 : 인종과 턱을 감싼 수염, 오른쪽 그림 : 가라발디)를 선정하고(Figure 11), 두 종류의 방독면 사이즈 대상으로 수염 유무에 따른 기밀성 영향에 관한 실험을 수행하였다.



〈Figure 11〉 Examples of artificial beards attached SMARTMAN in left (GOATEE), middle (CIRCLE BEARD) and right (GARIBALDI) side

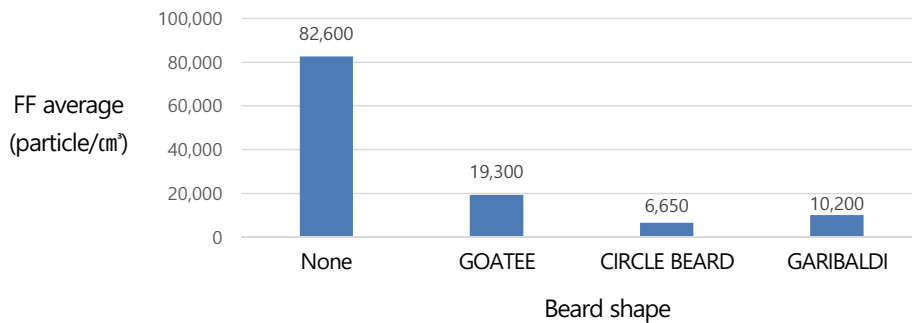
방독면 M 사이즈 착용 시 수염에 의한 기밀계수 실험 결과(Figure 12-1), 모든 수염 형태에서 기밀계수가 감소하였으며, 기밀 부위와 많이 접한 수염 형태(인중과 턱 감싼 형태, 가리발디 형태)에서 낮은 기밀계수가 나타났다. 다만, 가리발디 형태가 다른 형태와 비교하여 기밀계수가 다소 증가하였으며, 이는 실제 체모와 달리 매우 촘촘하게 제작된 인공 수염의 특성에 기인한 결과로 판단된다.



Beard shape	None	GOATEE	CIRCLE BEARD	GARIBALDI
FF average (particle/cm³)	306,000	7,020	3,420	3,860

〈Figure 12-1〉 Measurements of fit factors according to beard shape with gas mask size medium

다음으로 동일한 조건에서 방독면 L 사이즈를 이용해 실험결과(Figure 12-2), 방독면 M 사이즈 결과와 유사하게 모든 수염 형태에서 기밀계수가 감소하는 것으로 나타났다. 수염에 의한 기밀성 영향 실험은 기존 문헌과 유사하게 기밀 부위와 접촉면이 많은 수염 형태(인중과 턱 감싼 형태, 가리발디 형태)가 기밀계수 감소에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.



Beard shape	None	GOATEE	CIRCLE BEARD	GARIBALDI
FF average (particle/cm³)	306,000	19,300	6,650	10,200

〈Figure 12-2〉 Measurements of fit factors according to beard shape with gas mask size large

체모(머리카락 및 수염) 중에서 수염이 방독면의 기밀성에 미치는 영향을 분석한 실험 결과, 방독면-얼굴 접촉면에 수염이 많을수록 방독면 기밀계수가 감소하는 경향이 나타났다. 머리카락에 의한 기밀성 영향 실험과 동일하게 큰 사이즈 방독면보다 최적 사이즈(M) 방독면이 수염이 없는 조건에서 기밀계수가 높게 나타났으나, 수염과 같은 이물질이 존재하는 경우에는 큰 사이즈 방독면이 상대적으로 높은 기밀계수를 보였다. 또한, 수염보다 머리카락이 상대적으로 방독면의 기밀성을 더 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 현재 국내 운용되는 방독면의 형상이 입과 턱 전체를 감싸는 구조이고, 조임 끈이 턱 양쪽 끝에 위치하여 상대적으로 기밀성 계수가 높게 나타났다고 추정할 수 있다. 이런 분석결과는 올바른 방독면 착용법 및 두발 정리의 필요성을 판단하는 기초적인 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

V. 결론 및 논의

본 연구의 목적은 국방규격에 명시된 요구조건을 통과한 방독면을 대상으로 방독면-얼굴 접촉면에 체모가 존재하는 상황에서 방독면의 기밀성 변화를 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 본 연구는 인간 체모에 의한 방독면의 기밀성 변화를 구조적으로 재현하고, 다양한 조건에 의한 반응을 체계적으로 분석하기 위해 실험실 실험(laboratory experiment) 방법을 채택하였다. 특히, 본 연구에서의 체모 묘사는 전·평시 표준형 머리와 여군 및 군무원의 긴 머리와 같은 체모로 인해 나타날 수 있는 상황을 가정하였으며, 머리카락과 수염을 가발과 인공 수염으로 묘사하고 폭, 형태 등을 실험 조건으로 설정하여 수행하였다. 또한, 방독면의 기밀계수 변화를 정량적으로 측정하기 위해

SMARTMAN 인조두상에 가정한 체모와 K5 방독면(M/L 사이즈)을 부착하여 실험의 충실도를 확보하였다.

본 연구는 방독면 기밀성과 수염 간의 상관관계를 분석한 기존 연구를 확장하여, 머리카락과 수염이 기밀성 감소에 미치는 영향을 두 가지 사이즈의 방독면을 대상으로 다양한 조건 하에서 확인하였다. 실험결과, 수염을 대상으로 한 기존 연구와 유사하게 방독면-얼굴 접촉면에 머리카락이 많을수록 방독면 기밀계수가 감소하는 경향을 확인하였다. 방독면 크기에 따라 M 사이즈 방독면(306,000→501), L 사이즈 방독면(82,600→984)으로 기밀계수 감소가 나타났으며, 방독면-얼굴 접촉면 통과 부위에 따라 관자놀이와 비교하여 이마 부위 통과 조건에서 기밀계수가 상대적으로 더 감소하였다. 수염 형태에 따른 기밀계수 감소폭은 306,000에서 3,860까지 감소하였으며, 기밀 부위에 많이 접한 수염 형태(인중과 턱 감싼 형태, 가리발디 형태)일수록 낮은 기밀계수가 나타났다. 해당 실험 결과를 토대로 방독면의 성능 확보를 위해서는 얼굴 크기에 맞는 방독면을 착용하는 것뿐만 아니라 방독면과 얼굴 접촉면에 체모의 영향을 최소화할 수 있도록 두발 정리, 면도 등이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험 결과는 다변화하는 군 전투원과 구성원에게 적용할 수 있는 규정의 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점과 후속연구에 관한 제언은 다음과 같다. 국내 생산하여 실제 운용되는 군의 방독면을 활용하여 변수가 통제된 환경 속에서 방독면 기밀성과 체모의 영향 관계를 정량적으로 분석했다는 점에서 학술적 의의가 있으나, 고정된 인조두상과 인공 체모를 사용하여 실험하였기 때문에 실제 환경을 모두 반영할 수 없다는 점에서 제한사항이 존재한다. 추후 연구에서는 방독면 크기에 따라 체모와 기밀계수가 변화하는 경향을 보다 명확하기 확인하기 위해 실험 대상 방독면 크기를 다양화하는 것이 필요하다. 이에 더해 피부 접촉식 센서 장치(e.g., Lee et al., 2022) 혹은 접촉식 화학탐지 센서 등을 활용한다면 다양한 조건에서 방독면의 취약 부위를 명확히 식별할 수 있을 것이다. 또한, 실제 착용 환경에서는 방독면-얼굴 접촉면에 체모뿐만 아니라 체액(땀 등), 흙 등과 같은 이물질도 방독면 기밀성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 연구한다면 방독면 착용 및 개선 시 참고할 수 있는 기초자료를 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgements

We appreciate the constructive feedback from the peer reviewers which greatly improved the manuscript.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Author contributions

Conceptualization, Literature review: NH and KS, Resources and Data curation, Investigation and Methodology: NH, KJ, LC, and KS, Writing (Original Draft): NH and KS, Project administration and Supervision: NH and KS.

Reference

- Baik, S., Kim, W., Lee, N., Yi, H., Jeong, Y., & Ahn, N. (2023). Monte Carlo simulation-based defect ratio estimation approach for a chemical materials stockpile reliability program. *Journal of Advances in Military Studies*, 6(1), 1-17. <https://doi.org/10.37944/jams.v6i1.179>
- Floyd, E. L., Henry, J. B., & Johnson, D. L. (2018). Influence of facial hair length, coarseness, and areal density on seal leakage of a tight-fitting half-face respirator. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(4), 334-340. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1416388>
- Hounam, R. F., Morgan, D. J., O'connor, D. T., & Sherwood, R. J. (1964). The evaluation of protection provided by respirators. *Annals of Occupational Hygiene*, 7(4), 353-363. <https://doi.org/10.1093/annhyg/7.4.353>
- Hyatt, E. C., Pritchard, J. A., Richards, C. P., & Geoffrion, L. A. (1973). Effect of facial hair on respirator performance. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 34(4), 135-142. <https://doi.org/10.1080/0002889738506822>
- Kang, S., Kim, S., Churchill, D. G., Ku, K., & Jang, Y. (2023). Review of recently reported Ricin detection techniques focusing on combined immunoassay detection with abrin and saxitoxin in human plasma. *Journal of Advances in Military Studies*, 6(2), 197-212. <https://doi.org/10.37944/jams.v6i2.191>
- Kim, S. K., Byun, K. S., Lee, S. Y., Park, J. W., & In, C. Y. (2021). A Study on the Process Quality Level of K5 Gas Mask. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(1), 74-80. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.74>
- Lee, G. H., Kang, H., Chung, J. W., Lee, Y., Yoo, H., Jeong, S., ... & Choi, B. K. (2022). Stretchable PPG sensor with light polarization for physical activity-permissible monitoring. *Science Advances*, 8(15), eabm3622. DOI: 10.1126/sciadv.abm3622
- McGee, M. K., & Oestenstad, R. K. (1983). The effect of the growth of facial hair on protection factors for one model of closed-circuit, pressure-demand, self-contained breathing apparatus. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 44(7), 480-484. <https://doi.org/10.1080/15298668391405175>

원 고 접 수 일 2023년 12월 17일

원 고 수 정 일 2024년 03월 21일

게 재 확 정 일 2024년 04월 30일

체모(體毛)가 방독면의 기밀성에 미치는 영향: SMARTMAN(인조두상)을 활용한 정량적 연구

남한열* · 강장규** · 이창렬*** · 김성기****

국문초록

본 연구는 고조되어 가는 화생방 위협과 변화하는 군 구성원 및 체모 관리 규정 등에 대응하기 위하여 방독면 기밀성과 체모의 상관관계를 정량적으로 분석하는데 그 목적이 있다. 방독면 기밀성은 방독면이 사용자의 얼굴에 밀착되어 외부 유해물질의 내부 침투를 차단하는 특성을 말하는 것으로, 방독면의 주요 성능 중 하나이다. 체모는 방독면 기밀성에 영향을 준다는 것이 알려져 있었으나, 기존 국내의 경우 관련 연구가 전무하였으며, 국외의 경우에도 방독면 기밀성과 머리카락 및 수염의 상관관계를 일정한 변수 통제 조건을 갖춘 상태에서 분석한 연구가 없었다. 따라서 현재 변화하는 위협 요소에 대응하기 위해 방독면 기밀성과 머리카락 및 체모 간의 상관관계 연구가 필요하다고 판단하였다. 이를 위해 국방규격에 명시된 기밀성 성능시험을 통과한 방독면을 대상으로, 인공체모를 부착한 SMARTMAN 인조두상에 방독면을 착용시키고, 체모 유무 및 조건에 따른 기밀계수 변화를 측정하였다. 실험 결과, 체모가 방독면-얼굴 접촉면에 존재할수록 방독면 기밀성이 감소하는 것과 방독면 기밀성은 최적의 크기 방독면에서 가장 높은 나타나는 것 등을 확인하였다. 본 연구의 결과는 방독면의 성능과 군의 전투력을 유지하기 위한 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 화생방, 체모, 방독면, 기밀성, 방독면 체계통합시험장치

* (제1저자) 국군화생방방어연구소, 성능시험과 연구원, namhy915@snu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4687>.

** (공동저자) 국군화생방방어연구소, 성능시험과 선임연구원, kjg79490@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2302-3987>.

*** (공동저자) 국군화생방방어연구소, 성능시험과 연구원, ic034575@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5476-0553>.

**** (교신저자) 국군화생방방어연구소, 성능시험과장, shimlab@naver.com, <https://orcid.org/0009-0000-3751-1443>.