

## 정량적 밀착도 검사에 사용되는 장비 간 밀착도 검사 결과 비교

서혜경\*

신한대학교 보건대학

## Comparison of Fit Performance Between Devices Used for Quantitative Fit Testing

Hyekyung Seo\*

*The College of Biotechnology and Health, Shinhan University*

### ABSTRACT

**Objectives:** This study aims to compare the performance of fit test equipment with international standards and to provide essential data for the establishment of national standards.

**Methods:** This study compared the characteristics and performance of three quantitative fit test(QNFT) devices and evaluated their fit factor measurements for various types of respiratory protective equipment(RPE). A total of 1,350 fit tests were conducted on three different sizes of nine models of respirators, including full-face, half-face, and filtering facepiece respirators. The suitability coefficients and accuracy thresholds of each device were assessed through statistical analysis using ANOVA and ROC-AUC.

**Results:** Fit factors measured using three QNFT devices showed no significant differences overall ( $p=0.547$ ), but variations were observed depending on the type of RPE and device. ROC analysis confirmed that devices B and C exhibited excellent accuracy ( $AUC > 0.9$ ), comparable to international standards. Despite similar accuracy across all devices, B and C needed higher fit factor thresholds due to differences in sensor sensitivity. Devices B and C required slightly higher cut-off values (119 and 114 respectively) to meet the international standard for device A.

**Conclusions:** These findings underscore the significance of selecting devices based on environmental conditions and suggest that devices B and C can serve as viable alternatives to device A with appropriate adjustments.

**Key words:** Standardization, fit test devices, QNFT, AUC, cut-off values


### 1. 서 론

산업현장에서 근로자의 건강과 안전은 매우 중요한 문제이다. 특히 다양한 생물학적 유해인자와 미세먼지 등 분진에 노출되는 작업환경에서는 호흡기를 통한 유해물질의 전파를 차단하는 것이 필수적이다. 이를 위해 근로자들은 호흡보호구를 착용하게 되는데, 이때 보호 효과는 얼마나 잘 밀착되는지 여부에 따라 크게 좌우된다. 호흡보호구의 밀착 상태를 확인하기 위해 실시하는

밀착도 검사는 보호구 선정과 안전한 사용을 확인하는 중요한 수단이다. 이러한 중요성을 인식하여 미국, 캐나다, 일본 등 많은 국가에서는 밀착도 검사를 법적 규정으로 관리하고 있다(NIOSH CA2019-1011; Chen et al., 2009; GB-2626-2006; JIST8157-2009). 우리나라 경우, 안전보건공단 및 질병관리청에서 밀착도 검사를 권고사항으로 안내하고 있다(KOSHA, 2022). 그러나 여전히 밀착도 검사에 사용하는 장비 및 검사 방법에 대한 표준화가 이루어지지 않아, 국제표준과 동등한

\*Corresponding author: Hyekyung Seo, Tel: 010-3955-5229, E-mail: seohk65@hanmail.net  
The College of Biotechnology and Health, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-city, Gyeonggi-do11644, Republic of Korea

Received: February 10, 2025, Revised: March 10, 2025, Accepted: March 26, 2025

 Hyekyung Seo <https://orcid.org/0000-0002-5615-8523>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수준의 표준 확립이 시급한 실정이다. 이러한 배경에 따라 수년 전부터 몇몇 연구자들(Han, 1999; Kim et al., 2003; Seo et al., 2020)은 밀착도 검사 및 표준 확립의 중요성을 강조해 왔으며, 한국형 패널(Seo et al., 2023; Park et al., 2023)을 개발하고, 이를 밀착도 검사용 표준으로 사용할 수 있는지에 대한 연구도 진행하였다.

밀착도 검사는 작업장에서 근로자의 안전을 보장하는데 핵심적인 역할을 한다. 최근 직업 건강 위험에 대한 인식이 높아지면서 호흡보호구 적합성 테스트 시장이 상당한 관심을 받고 있다. 특히 COVID-19 대유행으로 인해 마스크의 밀착 개념이 일반 대중에게까지 중요하게 인식되었다. 이는 작업장 안전뿐만 아니라 공중보건 측면에서 밀착도 검사의 중요성을 부각시켰다. 착용자가 특정 시약의 냄새나 맛, 자극을 감지할 수 있는지 평가하는 정성적(qualitative fit testing, QLFT) 밀착도 검사 이외 수치 데이터에 기반한 정량적(quantitative fit testing, QNFT) 밀착도 검사는 호흡보호구가 착용자의 얼굴에 적절하게 밀착되었는지를 평가하는데, 특히 정량적 밀착도 검사는 호흡보호구 성능을 객관적으로 평가하는 중요한 과정이지만 이를 운용하는 데 있어 전문 장비를 사용할 전문 인력이 필요하다(Han, 2015).

정량적 밀착도 검사는 주로 두 가지 방식으로 수행되며, 하나는 입자 계수기를 이용한 밀착도 측정, 다른 하나는 통제된 음압 환경에서 마스크 내외부 압력 차이를 분석하는 방법이다. 현재 국내에서는 주변 공기 중 입자 농도 대비 마스크 내부의 입자 농도를 측정하여 밀착계수(fit factor)를 산출하고, 이를 기준으로 밀착 여부를 판단하는 방식이 도입되어 있다. 국내에서 사용되는 정량적 밀착도 검사 장비는 다양한 제조업체에서 생산되며, 각 장비는 고유한 특성과 기능을 가지고 있어 성능과 정확도에서 차이가 발생할 수 있다. 따라서 효과적인 호흡보호구 선택과 작업장 안전 향상을 위해 각 장비의 밀착 성능을 비교하는 것이 중요하다.

그러므로 이를 위해 다양한 작업환경과 호흡보호구 유형에서 밀착도 평가 장비의 강점 및 차이점을 분석하고 장비 간 성능을 비교할 필요가 있다. 또한 정량적 밀착도 검사 장비의 개선과 표준화를 위한 기반 데이터 수집이 요구된다. 그러나 현재까지 밀착도 검사 장비에 대한 비교 연구가 부족한 실정이므로, 이 조사는 기초 자료를 마련하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 밀착도 검사 결과를 기반으로 각 장비의 성능을 비교하고 국제

표준 통과 기준에 대한 평가를 수행할 예정이다. 본 조사를 통해 확보된 자료는 국내 밀착도 검사 표준화의 기초 자료로 활용될 것이며, 궁극적으로 작업장에서의 호흡보호구 보호 성능을 향상시키는 데에 기여할 것으로 사료된다. 또한 이 조사는 국제표준과 동등한 한국 표준 개발을 위한 근거로 활용될 수 있을 것이다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 연구대상

국제표준(ISO16976-2:2022)에 근거하여 개발한 한국형 이변량 테스트 패널 25명(Seo et al., 2023)을 모집하였다. 연구 참여에 앞서 기관생명윤리지침(SHIRB-202406-HR-231-02)에 따라 연구계획서는 사전심의를 거쳤으며 심의 결과 승인을 통보받았다. 해당 기관 생명윤리지침에 따라 자발적 참여 동의를 받은 참가자가 밀착도 검사를 수행하였다. 참가자의 개인 정보는 보호되도록 익명화 처리되었다.

### 2. 연구모형

#### 1) 측정 장비

밀착도 검사는 OSHA(Occupational Safety and Health Administration, 미국산업안전보건청) 프로토콜에 포함된 밀착도 검사 장비(PortacountPRO+ 8038, TSI, USA) 및 국내에서 마스크 밀착도 시험기라고 불리는 모델 AccuFIT 9000(KANOMAX, Japan)과 일본에서 개발한 마스크 피팅 테스터(MT-11D, SIBATA, Japan)를 비교하였다.

이들 장비는 대부분 CNC(Condensation Nucleus Counter, 응축핵 입자계수기) 방식으로 미세한 입자 주위에 액체를 응축시켜 광학장치로 측정할 수 있을 정도의 크기로 성장시킨 후 그 입자를 계수한다. 그러므로 호흡보호구 외부 입자 수 농도에 대한 내부 입자 수 농도 비를 산출(수식 1)하는 원리이다.

$$\text{Overall fit factor} = \frac{n}{1/ff_1 + 1/ff_2 + \dots + 1/ff_n} \quad \dots \dots (\text{Expression 1})$$

ff: 각 exercise 수행시 fit factor, n: exercise 수

하지만 각 장비마다 측정하는 입자크기 등 범위가 다르게 설정되어 있는데 A 장비는 0.02~1  $\mu\text{m}$  이상 입자를



Figure 1. Experimental setting conditions

측정할 수 있고 B 장비는  $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$  입자를 측정하며 C 장비는  $0.06 \mu\text{m}$  입자에 대하여 측정한다. 이와 같이 운용 측면에서는 차이가 약간 있지만 측정 원리가 유사하고, OSHA 프로토콜(29CFR1910.134)이 구동되도록 설계되었으므로 사용자에게 안내하는 밀착도 검사 방식은 크게 다르지 않다. 이와 같은 점을 감안하여 외부 입자 조건을 동일하게 유지하도록 입자발생기 (Model 8026 Particle generator, TSI, USA)를 구동하였고, 3 Way Connector를 연결하여 동시에 일정한 유량( $1\text{L}/\text{min}$ )으로 시험 입자를 포집하도록 하였다 (Figure 1).

## 2) 밀착성능 비교 방법

각 장비의 밀착성능은 국제적으로 통용되는 OSHA 프로토콜(29CFR1910.134) 방법으로 확인하였다. 밀착도 검사 동작은 4가지로 머리 구부리기, 말하기, 고개 좌우 움직임이기, 머리 위아래 움직임이기이며, 착용한 호흡보호구 주변의 외부 에어로졸이 안면부 틈새를 통해 내부로

들어오는지 측정하였다. 이때 밀착도 검사 장비에서 측정된 내외부 간 입자 수는 밀착계수로 계산되며, 밀착성능은 밀착도 검사의 통과여부로 확인할 수 있다.

각 장비의 밀착성능은 Figure 2와 같이 설계된 방법으로 시험한 후 비교하였다. 한국형 테스트 패널 25인에 대하여 전면형, 반면형, 안면부여과식 호흡보호구를 각각 3가지 사이즈, 2개 모델을 무작위 배정하였으며, 총 1,350개 데이터에 대한 밀착도 검사 성공률을 분석하였다(Figure 2).

## 3. 통계분석

통계분석은 SPSS version 20.0 (International Business Machines Corporation, IBM, USA)을 사용하였고, 통계적 유의수준( $p$ -value)은 0.05 미만으로 하였다. 측정된 밀착계수가 정규분포를 따르지 않고 대수 정규분포를 따름에 따라, 기하평균과 기하표준편차를 구하였다. 각 장비 간의 밀착계수가 집단 간 우연에 의한 평균 차이를 보인 것인지 실제로 의미 있는 차이였는지 판단하기 위하여 분산분석(ANOVA) F-검정으로 비교하였으며, 신뢰성 있는 비교 결과를 도출하기 위하여 사후 검증하였다. 장비가 측정한 밀착계수 값의 정확도 평가는 ROC 분석(receiver-operating characteristic curve analysis)의 AUC(area under the ROC curve, 분류곡선 범위) 지표를 이용하였다. AUC 영역에서 최대가 되는 지점의 값은 cut-off point 값이며, 이는 밀착도 검사 통과값으로 비교되었다.

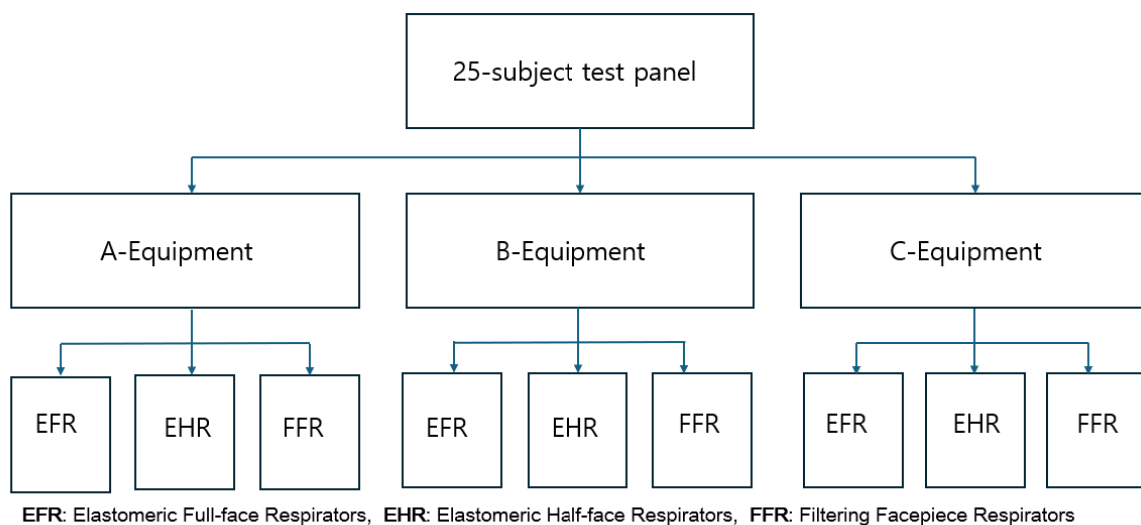


Figure 2. Schematic diagram of the study design

### III. 결 과

#### 1. 참여자 일반 특성

선행연구에서 개발한 한국형 테스트 패널(Seo et al., 2023)을 참가자로 모집하였으며 총 25명의 일반적 특징은 다음과 같다(Table 1). 소형 얼굴 6명, 중형 얼굴 15명, 대형 얼굴 4명으로 한국형 패널 수를 만족하였으며 참가자의 얼굴 길이는 각각 106.0(4.7), 118.1(6.5), 128.4(8.1) mm로 한국형 패널 범주인 107, 114, 124 mm와 유사하였다.

#### 2. 시험 장비별 특성 및 밀착계수 비교

3가지 장비 원리는 CNC 등으로 유사하지만 측정 입자에 대한 수 농도 범위 및 입자 크기는 다소 상이하였

다(Table 2). A 장비 경우 수집된 입자를 응축시켜 계수하기 위해 순도 99.5% 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol)을 사용하도록 권장하지만, 나머지 두 장비는 알코올 사용에 제한을 두지 않았다.

동시에 같은 장소에서 동일한 참가자가 수행한 밀착계수 평균은 장비 간 차이가 없었다(Table 3). C 장비가 측정한 밀착계수 평균은 가장 낮았지만 최고값으로 측정된 것은 3가지 장비 중 가장 높았다. B 장비는 A 장비보다 약간 높은 평균값을 보였으며 최고값도 A보다 높았다. 하지만 이 값들은 유의미하지 않다( $p < 0.547$ ).

Table 3의 밀착계수는 Figure 3과 같은 경향을 보였는데 B, C 장비에서 유난히 높게 측정된 밀착계수 값이 있었다. 이들의 외부 입자수는 A 장비보다 높게 측정되었으며 특히 C 장비에서 보편적이지 않게 높은 값

**Table 1.** General characteristics of participants

Cell	Participants	Face size category*	Gender	Age**	Face length <sup>+</sup>	Face width <sup>+</sup>
1	3	Small (n=6)	Female=6 M=0	20.8	106.0(4.7)	130.5(7.1)
2	1					
3	2					
4	4	Medium (n=15)	Female=13 M=2	22.5	118.1(6.5)	138.3(6.2)
5	1					
6	4					
7	6	Large (n=4)	Female=0 M=4	27.0	128.4(8.1)	149.6(1.4)
8	1					
9	0					
10	3					
Total	25	25	Mean	23.6	116.9(9.6)	138.6(8.2)

\*Number of participants \*\* Average <sup>+</sup> Mean(SD): mm

**Table 2.** Characteristics of devices-specific

	Operation	Concentration range	Particle size	Reagent grade
A	CNC	0.01 to $2.5 \times 10^5$ particles/cm <sup>3</sup>	0.02 to greater than 1 $\mu$ m	99.5% IPA
B	CNC	0 to $1.0 \times 10^5$ particles/cm <sup>3</sup>	0.02 to 1 $\mu$ m	IPA (or alcohol)
C	CNC(&CPC)	0 to 9,999,999 #	0.06 $\mu$ m	IPA (or ethanol)

**Table 3.** Comparison of fit factor by device (N=1,350)

	Min	Max	95% CI		GM(GSD)	$p^*$
			Lower	Upper		
A	12	87646	6022.7	8402.8	1632.3(8.3)	0.547
B	11	96407	6345.2	8942.1	1669.0(8.4)	
C	13	97470	5707.5	7715.7	1596.9(8.3)	

N : for each 3 devices, (25 subjects  $\times$  3 mask type  $\times$  2 models  $\times$  3 sizes) \* Duncan post hoc test

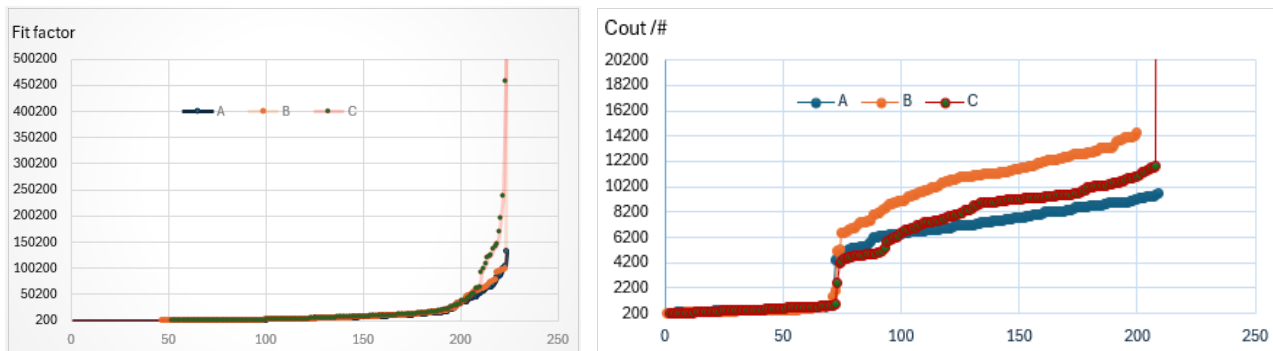


Figure 3. Comparison of fit performance among the three devices

들이 보였다(Figure 3).

### 3. 호흡보호구 형태별 밀착성능 비교

전면형, 반면형 그리고 안면부여과식 호흡보호구 밀착계수는 차이가 있었다(Table 4). 3가지 장비로 시험한 밀착도 검사는 호흡보호구 유형별 차이를 보였으며 전면형 호흡보호구는 반면형보다 약 3배 높았다. 안면부여과식 마스크보다 반면형 호흡보호구는 약 20배 이상 높았다( $p < 0.001$ ).

전면형 및 반면형 호흡보호구 평균 밀착계수는 A 장비에 비해 B, C 장비에서 더 높았으나 유의한 차이는 아니었다. 전면형 호흡보호구 밀착계수는 B 장비에서 가장 높게 측정되었으며 반면형 호흡보호구 밀착계수는 C 장비에서 가장 높았다. 외부 입자 수는 전면형 및 반면형 호흡보호구 시험에서 B 장비가 특히 높게 측정되었다( $p < 0.001$ ). 따라서 전면형 호흡보호구 밀착계수는 B, C, A 순으로 높았으며 외부 입자 수도 동일한 순이다. 반면형 호흡보호구 밀착계수는 C, B, A 순이며 외부 입자 수는 B, C, A 순으로 높아 동일한 경향을 볼 수 없었다. 안면부여과식 마스크 밀착계수는 B 장비에서 가장 낮았지만 유의한 차이가 아니었다( $p = 0.837$ ).

또한 외부 입자 수는 B 장비에서 유의하게 낮았다. 전면형 및 반면형 호흡보호구 밀착도 검사 결과와 다르게 안면부여과식 마스크 밀착계수는 B 장비에서 가장 낮았다(Table 5).

### 4. 안면부여과식 마스크에 대한 밀착계수 평가

A, B, C 장비가 측정한 안면부여과식 마스크 밀착계수는 AUC 지표를 통해 검사 정확도를 평가하였다. 통상 AUC는 0.7 보다 높을 경우 정확도가 어느 정도 있다고 평가하는데 Table 6과 같이 B, C 장비 밀착계수는 0.9 이상으로 우수한(excellent) 정확도를 보였으며 A 장비는 1.0으로 더 높았다.

다만 이들의 밀착계수가 통과를 올바르게 평가하였는지에 대한 민감도는 조금씩 차이가 있었으므로 AUC 지표의 최대 지점인 cut-off point를 이용해 각 장비의 밀착도 검사 통과 지표값을 평가하였다(Table 6). 이 분석에서 A 장비는 밀착도 검사 통과기준인 밀착계수 100을 만족하였지만, B, C 장비는 조금 더 높은 값을 요구하였다. 즉, 밀착계수가 각각 119 및 114 이상을 나타내어야만 밀착도 검사 통과기준인 100과 동등한 결과라는 분석이 도출되었다.

Table 4. Fit factor differences by type of respirator (N=1,350)

	Min	Max	95% CI		GM(GSD)	$p^*$
			Lower	Upper		
EFR	2589	67800	11299.7	13473.3	9727.1(1.9)	.000
EHR	12	98470	7885.9	10928.0	3278.3(6.3)	
FFR	11	200	167.6	177.7	155.1(1.8)	

N : for each 3 devices, (25 subjects × 3 mask type × 2 models × 3 sizes) \* Duncan post hoc test  
 GM(GSD) : geometric mean and geometric standard deviation  
 EFR : elastomeric full face respirators  
 EHR : elastomeric half facepiece respirators  
 FFR : filtering facepiece respirators



**Table 5.** Differences in ambient particles by device (N=1,350)

	GM(GSD)	A	B	C	$p^*$
EFR	FF	9332.9(1.9)	10079.3(1.8)	9831.9(1.9)	.996
	COUT	7342.4(1.2)	10222.2(1.3)	7923.0(1.4)	.000
EHR	FF	3100.1(6.6)	3200.2(6.0)	3541.3(6.3)	.389
	COUT	7150.5(1.8)	10458.4(1.3)	8239.3(1.4)	.000
FFR	FF	155.3(1.8)	153.9(1.8)	156.1(1.8)	.837
	COUT	466.7(1.4)	410.3(1.4)	463.8(1.5)	.000

N : for each 3 devices, (25 subjects x 3 mask type x 2 models x 3 sizes) \* Duncan post hoc test  
 GM(GSD) : geometric mean and geometric standard deviation EFR : elastomeric full face respirators  
 EHR : elastomeric half facepiece respirators FFR : filtering facepiece respirators

**Table 6.** Optimal cut-off value evaluated by AUC index

	AUC	Std. err	95% CI		Sensitivity(%)*	Cut-off value**
			Lower	Upper		
A	1.000	.000	1.000	1.000	100	100.0
B	.980	.021	.938	1.000	94	118.5
C	.971	.022	.928	1.000	93	113.5

\* : True positive rate(TPR) \*\* : Calculated by ROC analysis

#### IV. 고 찰

호흡보호구의 효과는 얼마나 잘 밀착되어 있는지에 따라 크게 좌우된다. 밀착도 검사는 작업장에서 근로자의 안전을 보장하는 데 핵심적인 역할을 하며, 보호구 선정과 안전한 사용을 확인하는 중요한 수단이기도 하다. 많은 국가에서 밀착도 검사를 법적 규정으로 관리하고 있으나, 우리나라는 안전보건공단과 질병관리청에서 권고사항으로 안내하고 있다. 이는 한국의 밀착도 검사 관련 규정이 국제표준에 비해 미흡함을 시사한다. 특히 정량적 밀착도 검사는 호흡보호구 성능을 객관적으로 평가하는 중요한 과정으로 검사 장비를 사용하여 호흡보호구 내부와 외부 입자 수에 대한 누설된 비율을 밀착계수로 산출하고 이것을 통해 밀착 여부를 확인하는 것이다.

OSHA(29CFR1910.134:ISO 16976-3)는 호흡보호구 사용에 대해 다음과 같은 기준을 제시하고 있다. 사용자는 작업에 필수적인 호흡보호구를 착용하기 전에 정성 또는 정량 밀착 검사를 해야 하며 밀착도 검사는 최소 1년에 한 번씩 수행하도록 한다. 일본의 밀착도 검사 표준은 JIST8157-2009에 따라 관리되고 있는데 부분적으로 밀착도 검사를 법적 규정으로 관리하는 국

가 중 하나이다(JMHLW, 2020). 영국의 경우 특정 유해물질(납, 석면 등) 노출 공정에 한해 밀착도 검사를 요구하고 있으며 싱가포르 또한 석면 관련 작업에만 한정적으로 규제하고 있다. 따라서 우리나라도 단계적 규제 도입이 필요하며 밀착도 검사의 중요성을 점진적으로 높여가야 할 것이다(Phee et al., 2019). 다수 국가에서 A 장비 등을 이용한 정량적 밀착도 검사가 활발히 수행되며 작업장에서의 호흡기 보호를 위한 엄격한 기준이 적용되고 있다. 따라서 밀착도 검사는 근로자의 건강과 안전을 보장하기 위한 중요한 조치로 활용할 수 있다.

정량적 밀착도 장비는 CNC 방식인 Portacount(PRO+8038, TSI, USA)와 AccuFIT(9000, KANOMAX, Japan)이 자주 사용되고 있으며 CPC 방식인 MT-11D(SIBATA, Japan)도 유사하다. 이러한 장비는 국제표준과 국내 실정을 고려하여 적절한 선택이 필요하지만, 아직 이러한 측면에서 장비 간 비교를 확인한 연구는 드물다(Seo et al., 2022). 따라서 이 조사를 통해 정량적 밀착도 검사 장비의 특성 및 밀착계수 비교를 통해 각 장비 간 차이를 분석하고자 하였다. 장비의 작동 원리는 기본적으로 유사하지만, 측정 가능한 입자의 농도 범위 및 입자 크기에서 약간 차이가 있었다. 이는 각 장비의 설계

및 적용할 수 있는 환경 조건이 다를 수 있음을 시사한다.

A 장비는 가장 널리 사용되는 것으로 작은 입자부터 큰 입자까지 포획할 수 있으며 응축할 수 있는 입자 수 농도 범위도 크다. B 장비는 A 장비와 유사한 크기의 입자를 포획하며 입자 수 농도 범위도 유사하다. 반면, C 장비는 측정할 수 있는 입자가 상대적으로 크기 때문에 작은 입자를 포획하는 능력이 다소 제한적일 수 있다. 하지만 동일한 참가자들을 대상으로 수행된 밀착계수 평균 비교 결과에서 A, B, C 장비 간 평균값이 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 외부 입자 환경을 동일하게 하였기 때문으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 외부 입자 수 차이가 있었으므로 측정 조건에 따른 제한이 따를 수 있다는 것을 의미한다.

이 조사에서는 3가지 호흡보호구 유형별 밀착계수와 장비별 주위 입자 농도 차이 분석을 통해 호흡보호구의 성능 차이 및 장비 특성이 밀착계수 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 호흡보호구 유형에 따라 밀착계수는 유의미한 차이를 보였는데, 전면형 호흡보호구는 가장 높은 밀착계수를 보였으며 최솟값과 최댓값 모두 다른 유형에 비해 높은 범위를 나타냈다. 이는 전면형 호흡보호구가 가장 밀폐성이 우수한 호흡보호구임을 시사한다. 반면형 호흡보호구는 전면형에 비해 낮았지만, 얼굴의 하부만 덮기 때문에 밀폐성이 다소 낮을 가능성을 반영한 결과이다. 가장 낮은 밀착계수를 기록한 안면부여과식 마스크는 최솟값과 최댓값 범위가 가장 좁았는데, 이는 전면형 및 반면형에 비해 상대적으로 낮은 밀착성을 보이므로 정확한 착용법에 따라 밀착 성능이 크게 달라질 수 있음을 확인하였다. 이 결과를 고려해 본다면 안면부여과식 마스크 밀착도 검사는 상대적으로 낮은 밀착 성능에 대하여 효과적으로 보완할 중요한 수단이 밀착도 검사이므로 호흡보호구 선택 시 반드시 활용되어야 할 것이다.

장비별 외부 입자 수와 밀착계수 차이 분석에 의하면 전면형 호흡보호구의 외부 입자 수는 A, B, C 장비 간 유의미한 차이를 보였다. 특히 B 장비는 주위 입자를 더 많이 포획할 가능성을 보였으므로 장비 간 센서 민감도 차이를 반영한 것으로 사료된다. 반면형 호흡보호구의 외부 입자 농도 역시 B 장비에서 가장 높은 값을 기록하였으며 밀착계수도 높게 측정되었다. 이와 같이 B 장비가 상대적으로 높은 값을 기록하였으나 밀착계수가 유의미한 차이를 보이지 않았으므로 특정 환경 조건에서 결과 해석 시 장비 특성을 고려해야 함을 시사한

다(Seo et al., 2020). 이는 실제 작업환경에서의 호흡보호구 밀착도 검사 장비의 선택이 작업환경과 보호 수준 요구사항에 따라 달라져야 함을 보여준다. 특히, 높은 보호 성능이 요구되는 작업환경에서는 전면형 호흡보호구와 같이 밀폐성이 우수한 유형을 선택해야 하며, 장비 특성을 고려한 밀착도 검사가 필수적이다.

이 조사는 안면부여과식 마스크의 밀착성능을 평가하고, A 및 B, C 장비의 검사 정확도 및 민감도를 AUC 지표를 통해 분석하였다. A 장비 AUC는 1.00으로 완벽한 검사 정확도를 보였으며 이는 국제적으로 통용되는 밀착계수 값인 100으로 cut-off 값이 산출되어 장비의 신뢰성이 입증되었다. B 및 C 장비는 각각 0.980 및 0.971로 분석되어 0.9 이상의 높은 정확성을 유지하지만, A 장비에 비해 약간의 민감도 저하가 있는 것으로 확인되었다. A 장비에서 산출한 밀착계수 100은 모든 통과 사례를 정확히 검출할 수 있는 기준치로서 높은 민감도(100%)가 확인된 반면, B 및 C 장비 민감도는 각각 94% 및 93%로 나타났다. 따라서 A 장비와 동일한 수준의 통과 사례를 제공하기 위해서 다소 엄격한 기준값이 필요할 수 있다고 사료된다. 이와 같은 분석 결과는 B와 C 장비가 높은 정확도를 유지하였지만, A 장비에 비해 약간의 민감도 저하가 있음을 시사한다. 즉 B 및 C 장비 Ccut-off 값이 A 장비보다 높게 나타났으므로 각 장비의 센서 민감도 및 측정 알고리즘 차이에서 기인하는 것이므로 B 및 C 장비를 사용할 때, 밀착도 검사 기준 100에 대한 동등한 평가를 위해 밀착계수의 조정이 필요하다. 이와 같이 조정된 B 및 C 장비는 A 장비에서 측정된 밀착계수와 동일하게 활용되므로, 다양한 환경에서 안정적으로 작동할 경우 유용할 수 있다.

이러한 결과는 다음과 같은 의미를 가진다. 장비 선택 시 환경 및 사용 목적 고려, 농도 범위와 입자 크기와 같은 세부 특성에 맞는 장비 선택이 중요함을 파악하였다. 안정적인 결과를 제공하는 민감도 높은 A 장비와 다른 특성을 갖는 장비 경우, 노출되는 입자 농도 범위가 다양하거나 특정 크기 이상의 입자를 대상으로 하는 작업환경에서 활용할 수 있다. 더욱이 C 장비에서 최대 밀착계수가 가장 높게 측정되었다는 점은 장비의 민감도 차이에서 기인할 가능성이 있으므로 특정 상황에서 더 민감하게 반응할 수 있다는 점을 인식하고 실제 사용 환경에 따라 결과 해석에 주의가 필요하다.

하지만 이 조사는 다음과 같은 한계점이 지닌다. 첫

째, 다양한 환경 조건(예: 온도, 습도, 입자 유형 등)을 고려하지 않았다. 둘째, 장비 간 결과의 재현성을 검증하지 않았다. 장비 간 재현성 검증을 통해 측정 결과가 일관되게 유지되는지 평가하여야 한다. 또한 실험실 환경에서 진행되었으므로 실제 작업 현장에서의 장비 성능을 검증하기 위한 추가 연구가 필요하다. 향후 연구에서는 이러한 한계를 보완하여 다양한 노출이 있는 작업환경에서 호흡보호구와 장비 성능을 더욱 체계적으로 분석하여야 한다. 알고리즘 및 기술적 차이에 대한 분석을 통해 B와 C 장비의 cut-off 값이 A 장비와 차이를 보인 원인에 대한 심층적이며 기술적인 분석이 이루어져야 하며 장비별 데이터 재현성(reproducibility) 및 장기적 안정성을 평가함으로써, 실질적인 장비 선택 및 사용 가이드를 제시할 필요도 있다.

결론적으로, 이 조사는 다양한 정량적 밀착도 검사 장비의 특성과 성능을 비교 분석함으로써, 사용자와 연구자들에게 장비 선택에 대한 중요한 참고 자료를 제공하였다. 밀착도 장비가 시험 호흡보호구 밀착 성능에 대하여 유사한 수준의 정확도를 보인다고 확인하였으며, 적절한 조정을 통해 다양한 작업환경에서 대안 장비로 활용될 가능성을 보여주었다. 향후 연구는 이를 더욱 확장하여 실제 적용 가능성을 높이고, 다양한 환경에서의 신뢰성 있는 결과를 확인하는 데 중점을 두어야 할 것이다. 따라서 이 연구는 호흡보호구의 효과적인 사용과 작업자의 안전을 지킬 밀착도 검사 중요성을 재확인하였으며, 관련 기술과 표준의 발전에 기여할 수 있는 의미 있는 시도가 될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 2024학년도 신한대학교 교내 학술연구비 지원을 받아 작성되었습니다.

## References

- Chen W, Zhuang Z, Benson S, Du L, Yu D et al. New respirator fit test panels representing the current Chinese civilian workers. *Ann Occup Hyg*. 2009; 53(3):297-305
- GB 2626. Respiratory protection-non-powered air-purifying particle respirator. State for Administration Market Regulation, Standardization Administration of China; 2019
- Han DH. Fit testing for respirators and development of fit test panels for Koreans. *Korean Ind Hyg Assoc J*. 1999;9(1):1-13
- Han DH. Usage of filtering-facepiece masks for healthcare workers and importance of fit testing. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2015;25(3): 245-253
- International Standard Organization (ISO). ISO16976-2: 2022 Respiratory protective devices-Human factors-Part 2: Anthropometrics. 2022
- Japanese Ministry of Health, Labour and Welfare (JMHLW). Notice No. 286, Method of measuring welding fume concentration related to indoor workplaces continuously working such as metal arc welding, etc. 2020
- JIS T8157. Powered air-purifying respirator for particulate matter. 2009
- Kim YK, Kim HW, Lee J, Lee ED, Kim DW. Development of the new 3D test panel for half-mask respirators by 3D shape analysis for Korean faces. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2003; 13(3):217-225
- KOSHA. Guidelines for selection, use and care of respirator [serial online]. [cited 2020 Oct 8]. Available from: <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceH.do>
- OSHA29 CFR 1910.134, Respiratory protection [serial online]. [cited 2021 Mar 20]. Available from: <https://www.osha.gov/lawsregs/regulations/standardnumber/1910/1910.134>
- Park JK, Kim SD, Cho HM. 3D face dimensions and new fit test panels for the labor population using respirators in South Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2023;33(2):247-264
- Phee YK, Kim SW, Eoh WS, Lee ES. Study on fit performance survey for respirators and suggestion on fit test regulation (II) [erial online]. 2019. Available from: <https://www.kosha.or.kr/oshri/publication/researchR-eportSearch.do?mode=view&articleNo=411165&article.offset=235&articleLimit=5>
- Seo HK, Jang HY, An HR. A study on the Korean fit test panel and static headform chamber. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2023;32(2):145-155. Available from: <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.2.145>
- Seo HK, Jang HY, Shim S, Kim H, Han DH. Fit performance comparison between OPC and CNC based on number of ambient aerosol particles. *J*



Korean Soc Occup Environ Hyg. 2022;32(2): 163-171

Seo HK, Kim JI, Kim HW. Development of Korean head forms for respirator performance testing. Saf Health Work. 2020;11(1):71-79. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2019.12.008>

The National Personal Protective Technology Laboratory. NIOSH Conformity Assessment Interpretation

Notice 2019. NIOSH CA 2019-1011 [serial online]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/resources/pressrel/letters/default.html>

<저자정보>

서혜경(조교수)