

## 시험환경 내 입자수에 대한 OPC, CNC 장비 간 마스크 밀착 성능비교

서혜경\* · 장호영 · 심수아 · 김희주 · 한돈희<sup>1</sup>

신한대학교 바이오 생태보건대학, <sup>1</sup>인제대학교 보건안전공학과

## Fit Performance Comparison Between OPC and CNC Based on Number of Ambient Aerosol Particles

Hyekyung Seo\* · Hyeong Jang · Sua Shim · Huiju Kim · Donhee Han<sup>1</sup>

College of Biomedical Laboratory Science, Shinhan University

<sup>1</sup>Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University

### ABSTRACT

**Objectives:** Fit performance may vary depending on the ambient aerosol number and ratio in respective test environment. Although several instrument can measure it, they differ with respect to the measurement principle and the range of ambient aerosols collected to calculate the fit factor.

**Methods:** In this study, the fit performance between a condensation nuclei counter(CNC) and an optical particle counter(OPC) was compared according to ambient aerosol number concentration, and evaluated consistency. One type respirators(N95 masks) was worn by 50 participants PortaCount®(Pro+ 8038) and MT®(05U) were connected with one probe to one mask, and Fit Factors(FFs) were measured simultaneously.

**Results:** The interclass correlation coefficient of the fit factor and ambient aerosol number, as measured by the two instrument, was 0.82 and 0.79, respectively, indicating a high consistency level. On the other hand there was a significant correlation between the successful test performance of the OPC instrument and the ambient aerosol number.

**Conclusions:** The test was passed with the CNC and OPC instruments when the ambient aerosol number was 635-3,332 particles/cm<sup>3</sup> and 368-1,976 particles/cm<sup>3</sup>, respectively. Thus, the ideal ambient aerosol number of particles differed between the two instrument.

**Key words:** Ambient aerosol number concentration, CNC, Fit test, N95 mask, OPC


### 1. 서 론


병원성 미생물 등 바이오 에어로졸은 보건의료종사자(health care workers, hcws)의 건강 및 생명을 위협(Kang, 2011)할 수 있으므로 평상시 N95 마스크 등을 사용하여 호흡기를 보호하고 있다. 최근 지속되고 있는 코로나 감염증(COVID-19)에 대하여 2020년 3월 11일


세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 팬데믹(pandemic)을 선언하였을 뿐만 아니라 감염 확산을 예방하기 위하여 마스크 착용을 권고하고 있다. 감염자의 기침, 재채기, 대화 등으로 노출된 직경 5 μm 이상 큰 비말(바이러스가 포함된) 및 5 μm 이하 에어로졸화(aerosolization)된 작은 비말(Eissenberg et al., 2020; Lee, 2021)이 전파되는 것을 개인 보호장비


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


Received: May 16, 2022, Revised: June 2, 2022, Accepted: June 17, 2022

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

 Hyeong Jang <https://orcid.org/0000-0001-7522-6969>

 Sua Shim <https://orcid.org/0000-0003-2199-3374>

 Huiju Kim <https://orcid.org/0000-0002-8675-7738>

 Donhee Han <https://orcid.org/0000-0002-8984-2655>

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.

(personal protective equipment) 등 착용으로 감소 (Eikenberry et al., 2020; Kumar & Morawska, 2020) 시킨다고 알려져 있다.

의료인들이 착용한 마스크 경우 밀착에 따라 병원체 감염 위험이 달라질 수 있는데, 밀착도 시험을 통해 의료인 안전(Charney, 2009; Han et al., 2017)을 지킬 수 있다는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 착용자 얼굴과 맞지 않을 경우 틈새로 유해물질이 유입될 수 있는데, 이 누설현상(face seal leakage)으로 인한 감염 가능성은 간과할 수 없이 중요하다. 따라서 마스크 밀착을 확인할 수 있는 장비 및 도구를 사용하여 일부 의료기관에서는 착용 상태를 주기적으로 확인하고 있다. 미국, 캐나다, 호주, 영국, 일본 등 산업보건 선진국에서는 밀착도 시험(fit test)을 법으로 강제하여 누설현상을 최소화하도록 노력하고 있다(Standards Australia, 2009; CSA, 2011; OSHA, 2021; Canada OHSR, 2014; AOSH-Act 2015; JMHLW, 2020). 밀착도 확인은 바이오 에어로졸 및 기타 분진 노출로부터 호흡기 건강을 보호할 중요한 항목이므로 국제표준기구(International Standard Organization, ISO)에서도 이를 권고하고 있다(ISO, 2017).

우리나라에서도 이에 대한 필요성을 인지하고 있지만 아직 제도권 안으로 들어오지 않은 상황이다. 누설현상의 심각성을 인지한 대기업 제조업체 및 대형병원은 국내 밀착도 시험이 법제화되지 않았음에도 불구하고 주로 정량적인 방법으로 호흡보호구 밀착여부를 확인하고 있다. 한국산업안전보건공단(KOSHA GUIDE, 2020)에서는 착용자의 얼굴에 맞는 호흡보호구를 선정하고 오염물질의 누설여부를 판단하기 위하여 호흡보호구 내부와 외부 공기중 에어로졸 농도를 비교하는 등의 정량적 방법과 사람의 오감 등을 이용하여 호흡보호구 내부의 오염물질 침투 여부를 판단하는 정성적 방법으로 밀착도 검사를 하도록 권고한다. 하지만 국외 사례와 달리 밀착시험 측정 장비 및 구체적 검사 프로토콜 그리고 결과값 기준에 대한 명확한 제시가 부재하므로 현장에서는 여러 방법으로 진행되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 밀착도 시험에 자주 사용하고 있는 원리가 서로 다른 두 장비를 선정하고 수집된 외부 입자(ambient aerosol)수와 밀착성능 상관성을 평가하기로 하였다. 시험환경 내 입자수가 장비간 차이를 보였는지 확인하고 마스크 외부 입자수와 밀착성능을 비교 분석하였다. 이에 두 장비의 외부 입자수는 어떤 영역

대에서 시험성공 유무와 관계가 있었는지 알아보고자 한다. 이 결과를 통해 밀착성능에 대한 시험환경 내 입자 조건의 기초 자료를 마련하고자 하였다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 연구 대상

국내 소재 대학에 공고문을 게시하여 자발적 참여에 동의한 50명이 참여하였다. 선행연구(Wu et al., 2017)와 같이 effect size 0.5, 유의수준  $\alpha=0.05$ , Power (1- $\beta$  error)=0.95를 적용한 참여자 수(total sample size)는 42명이었으며 중도 탈락할 경우를 고려하여 남녀 각 25명씩 총 50명이 모집되었다. 이 연구는 기관생명윤리위원회 심의(IRB No: INJE 20 21-04-017-003)를 통과하였다.

평소 N95 마스크를 착용해보지 않았고 측정장비로 시험한 경험이 없으며 폐질환자, 폐질환 기왕력이 없는 사람들을 참여자로 선발하였다. 또한, 시험 참여 30분 전 담배를 피우거나 취식, 취음을 하지 않도록 안내하였는데 이러한 조치는 장비 외 기타 요인으로 인한 결과 영향을 최소화하려는 것이다. 특히 밀착도 시험 경험자로 인한 선택비뮴 가능성은 제어하고자 하였다.

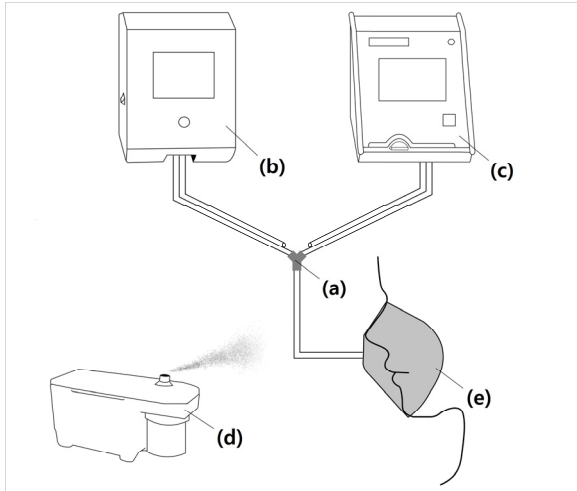
### 2. 연구 방법

#### 1) 시험마스크

미국 국립 직업안전보건연구원(The National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 마스크 기준 규격을 만족한 안면부 여과식 N95 인증 제품이다. 가로 길이 100mm, 세로 길이 155mm인 접이형 시험 마스크(DOBU MASK 201 N95, DOBU LIFE TECH Co., Ltd. Korea)를 Y자 노출로 연결(Figure 1a)시켜 두 장비를 동시에 운용하여 밀착성능을 확인하였다. 그러므로 참여자 50명이 1개 마스크로 시험한 밀착시험 데이터는 각 장비 당 50개였다.

#### 2) OPC 방식 측정기

공기 중 건조된 입자에 레이저를 발사하여 산란광을 계수하는 OPC(optical particle counting) 방식 장비에 해당하는 일본 SIBATA사 MT 시리즈를 시험에 사용하였다. MT 시리즈는 입자 크기가 0.3  $\mu\text{m}$  혹은 0.5  $\mu\text{m}$  이상 및 0.3-0.5  $\mu\text{m}$ 를 선택할 수 있으며 비교적 큰 입자를 계수하기 때문에 condensation nuclei counter



**Figure 1.** Experimental setup of (a) Y nozzle connector (b) OPC instrument (c) CNC instrument (d) Particle generator (e) N95 mask

(CNC) 방식과 달리 밀착계수 값이 낮게 산출된다(Wu et al., 2017). 그러나 우리나라 의료기관에서 N95 마스크 밀착성능을 확인하거나 교육용으로 자주 사용하고 있으므로 OPC 방식 측정기 중 하나인 MT-05U (SIBATA Scientific Technologies, Ltd., Tokyo, Japan)모델을 이용하여 마스크 외부입자(ambient aerosol)수와 밀착성능을 비교하였다(Figure 1b).

3) CNC 방식 측정기

공기 중 외부입자를 시험물질(challenge agent)로 사용하는 미국 TSI사 Portacount 시리즈는 시험환경 중에 존재하는 입자 핵에 이소프로필 알코올을 증발시켜 생성된 증기가 입자 핵에 달라붙으면서 응축이 일어나 커진 입자를 광도계가 인식하여 측정하도록 하는

CNC 방식이다. 광도계가 인식하기 어려운 0.02~0.3 μm 입자를 포함하여 계수하는 이 장비(Portacount PRO + 8038, TSI, MN, USA)모델은 정량적 밀착시험(Quantitative Fit Test, QNFT)에서 널리 사용되고 있다(Figure 1c).

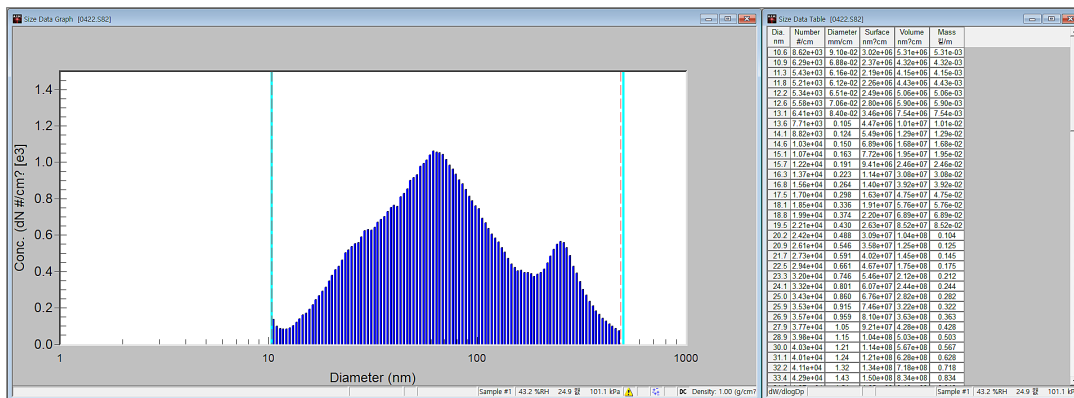
이와 같이 두 장비는 측정 원리 차이가 있지만 시험환경 내 외부입자와 마스크 내부 입자를 측정하여 밀착계수를 산출하는 방식과 시험 프로토콜 및 측정시간 등 모두 동일하며 시험유량도 1L/m으로 같다.

4) 에어로졸 분부

두 장비는 시험환경 내 입자수가 검출한계 미만으로 낮을 경우 시험이 불가능하므로 실험실 내부에 NaCl 입자를 20분 정도 분무시킨 후 안정화를 위해 창문 개폐 및 에어컨 가동 등은 금지하였다. 이때 선행연구(Wu et al., 2018)같이 다분산(polydisperse) 에어로졸 분무장치(Figure 1d) PARTICLE GENERATOR MODEL 8026(TSI, MN, USA)을 사용하여 10~500 nm 크기 염화나트륨 입자(Nontoxic salt aerosol)수를 1000#/cm<sup>3</sup> 이상 되도록 생성시켰다. 그러나 시험환경 내 입자는 안정화 노력에도 불구하고 쌍봉(bimodal)분포를 보였다(Figure 2).

5) 밀착시험 방법

그림 1에 따라 1개 시험 마스크(Figure 1e)를 착용한 참여자는 y자 노즐로 연결된 두 장비로부터 동시에 밀착계수를 산출하였다. 밀착시험(fit test)은 착용한 마스크가 얼굴에 잘 맞는지 확인하기 위한 것으로서 밀착계수(fit factor, ff)를 평가 기준으로 사용한다. 밀착계수는 다음 (1) 식으로 산출되며 마스크 내, 외부 입자수



**Figure 2.** Size distribution of generated particles

를 비교한 수치로써 이 값이 크면 착용 면 틈새로 유입 되는 에어로졸이 적게 들어오는 것이므로 얼굴에 잘 맞는다고 평가한다.

미국직업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) 29 CFR 1910.134의 'QNFT Protocol'은 대부분 다른 나라에서 정기적으로 수행되고 있는데 밀착계수 100 이상을 통과 기준으로 준용하고 있다. 정량적 밀착시험은 다음 4단계로 수행하며 총 밀착계수(overall fit factor) 값이 100 이상일 경우 밀착이 잘된 것으로 한다.

본 연구에서는 29 CFR 1910. 134. Appendix A에 명시된 시험 방법으로 (1) 허리 굽히기(Bending over) (2) 말하기(Talking) (3) 머리 좌우로 움직이기(Turning head side to side) (4) 머리 상하 움직이기(Moving head up and down) 동작을 수행하도록 하였으며 이때 소요되는 시간은 총 2분 29초였다.

$$(1) \text{ Fit Factor} = C_{\text{out}} / C_{\text{in}}$$

$C_{\text{out}}$  : number concentration of particles in an aerosol sample outside of the mask the surrounding ambient air

$C_{\text{in}}$  : number concentration of particles in an aerosol sample inside the mask

6) 통계분석

수집된 밀착계수에 대하여 평균(mean) 및 표준편차(standard deviation)를 구하고,  $\alpha=0.05$ 를 기준으로 통계적 유의성을 평가하였다. 범주형 변수는 빈도(백분율), 연속형 변수는 평균(표준편차)로 표시하고 평균 비교는 t 검정으로 하였다. 서로 다른 두 장비에서 수집된 결과값은 급내상관분석(intra-class correlation

coefficient, ICCs)으로 비교하였다. 자료분석은 SPSS system ver.20(IBM SPSS Inc USA)을 사용하였다.

III. 결 과

1. 두 장비에서 수집된 자료 비교

CNC 및 OPC 원리를 이용하는 일부 장비 모델로 시험 마스크의 밀착계수를 측정하였다. 참가자는 남자 25명(50%), 여자 25명(50%)이며 연령별 분포는 20대 45명(90.0%), 30대 이상 4명(8.0%) 및 20대 미만 1명(2.0%)이다(Table 1). 선행연구(Kim et al., 2015; Eoh et al., 2016; Seo et al., 2021)를 참고하여 밀착 시험 결과값 영향을 최소화하기 위한 주의를 기울였다.

입자 발생기로 분무된 시험환경 내 입자 크기는 10~500 nm 로 두 장비에서 권고하는 조건을 만족하였다. 입자수는 CNC 및 OPC 모델 각각 1370.0 (622.6)#/cm<sup>3</sup> 및 1320.2(831.8)#/cm<sup>3</sup>로 두 장비 간 차이가 없었지만(p=0.73), 측정된 최저 및 최고 입자수는 각각 609.0-3332.0#/cm<sup>3</sup> 및 368.0-4036.0#/cm<sup>3</sup>로 OPC에서 더 낮거나 높은 입자수가 측정되었다. 또한 밀착계수 평균(표준편차)은 CNC 장비 모델 경우 85.2(69.7), OPC 69.7(53.7)로 통계적 차이는 없

Table 1. General characteristics of study participants

Classification (N=50)		N (%) <sup>*</sup>
Gender	Male	25(50.0)
	Female	25(50.0)
Age	20>	1(2.0)
	20≤	45(90.0)
	30≤	4(8.0)

\*: Number of participants (%)

Table 2. Comparison of two instruments

	Fit Factor		Ambient aerosol number (#/cm <sup>3</sup> )	
	CNC	OPC	CNC	OPC
Mean	85.2	69.7	1370.0	1320.2
Std. Deviation	69.7	53.7	622.6	831.8
Median	69.0	52.5	1151.0	1040.5
95 % CI	65.3-105.5	46.3-76.6	1214.4-1549.0	1083.7-1565.7
P-value <sup>†</sup>	0.06		0.73	
ICCs <sup>‡</sup>	0.82		0.79	

<sup>†</sup>P-value was calculated by t-test (Levene's) N=50 (CNC & OPC each)

<sup>‡</sup>ICCs: Intraclass Correlation Coefficient (p>0.05)

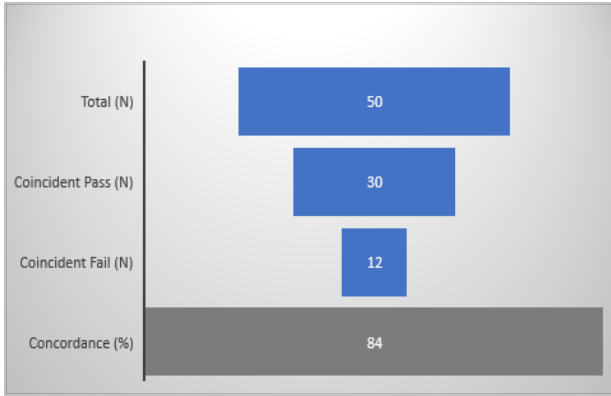


Figure 3. Concordance rate of the two instruments

였지만(p=0.06), OPC에서 더 낮았다.

서로 다른 측정장비 결과값의 신뢰도를 분석하기 위한 급내상관계수(ICC)는 각각 0.82 및 0.79로 높은 일관성(consistency)을 보였는데(Table 2) 이는 밀착계수 및 외부입자수에 대한 측정값이 장비 간 다르지 않다는 것을 의미한다. 그러므로 이 결과는 선행연구(Wu et al., 2018)에서 0.86의 높은 밀착계수 상관성을 보였던 것과 유사하였다. 두 장비로 측정한 밀착시험에서 동시 성공한 경우는 50건 중 30건(60%), 동시 실패한 경우는 12건(24%)으로 50건 중 42건 결과가 서로 일치(84%)한 것으로 나타났다(Figure 3).

## 2. 시험환경 내 입자수에 대한 밀착성능 상관성

두 장비로부터 측정된 밀착성능은 Figure 3으로 분포되었다. CNC 장비 모델로는 0.02~1 μm 이상 입자를, OPC 장비 모델로는 0.3 μm 이상 입자를 측정하였으므로 시험환경 내 외부입자수는 다르게 측정되었다. 밀착시험 중 측정된 외부입자 평균은 CNC 장비 모델에서 성공한 경우 1360.8(752.8)#/cm<sup>3</sup>이고 실패한 경우 1375.2(549.5)#/cm<sup>3</sup>이었으나, OPC 장비 모델 경우 각각 1021.7(574.0)#/cm<sup>3</sup> 및 1436.3(892.6)#/cm<sup>3</sup>이었다(Table 3). 밀착계수와 시험환경 입자수 상관성을 분석한 결과 OPC 장비 모델로 성공한 경우에서 유의한 상관성(correlation coefficient=0.47)을 보였지만(p<0.05), 실패한 경우는 그렇지 않았다. 그러므로 OPC 장비 모델에 대한 밀착성공 여부는 시험환경 입자수와 관련이 있었다. 이들 성공한 14건(28%)에 대한 입자수는 2000#/cm<sup>3</sup>이하로 분포하였는데 실패한 36건 중 10건(27.8%)은 2000#/cm<sup>3</sup> 이상이었다. 한편 CNC 장비 모델의 시험환경 입자수와 밀착성공 여부는 상관성이 없었다(Table 3).

## 3. 성공률이 높은 시험환경 내 외부 입자수

두 장비는 성공률도 달랐는데 CNC 장비 모델로 시험한 18건(36.0%)은 밀착시험에서 100 이상을 기록하

Table 3. Correlation between fit factor and ambient aerosol number

		Pass mean (SD)	r <sup>s</sup>	Fail mean (SD)	r <sup>s</sup>
CNC	Fit Factor	167.3 (34.6)	-0.04	39.1 (30.1)	0.12
	Ambient aerosol	1360.8 (752.8)		1375.2 (549.5)	
OPC	Fit Factor	131.6 (33.2)	0.47	33.6 (29.3)	-0.19
	Ambient aerosol	1021.7 (574.0)		1436.3 (892.6)	

<sup>s</sup>Pearson correlation coefficient of between Fit Factor and mean ambient aerosol (#/cm<sup>3</sup>)  
N=50 (CNC & OPC each)

Table 4. Comparison of CNC and OPC based on ambient aerosol

	CNC		OPC	
	Pass	Fail	Pass	Fail
min	635.0	609.0	368.0	343.0
max	3332.0	2418.0	1976.0	4036.0
median	1134.0	1151.0	833.0	1083.5
95 % CI	635.0-2646.0	674.0-2353.7	368.0-1877.0	373.6-3535.4
N(%)	18 (36%)	32 (64%)	14 (28%)	36 (72%)

Ambient aerosol (#/cm<sup>3</sup>) N=50 (CNC & OPC each)

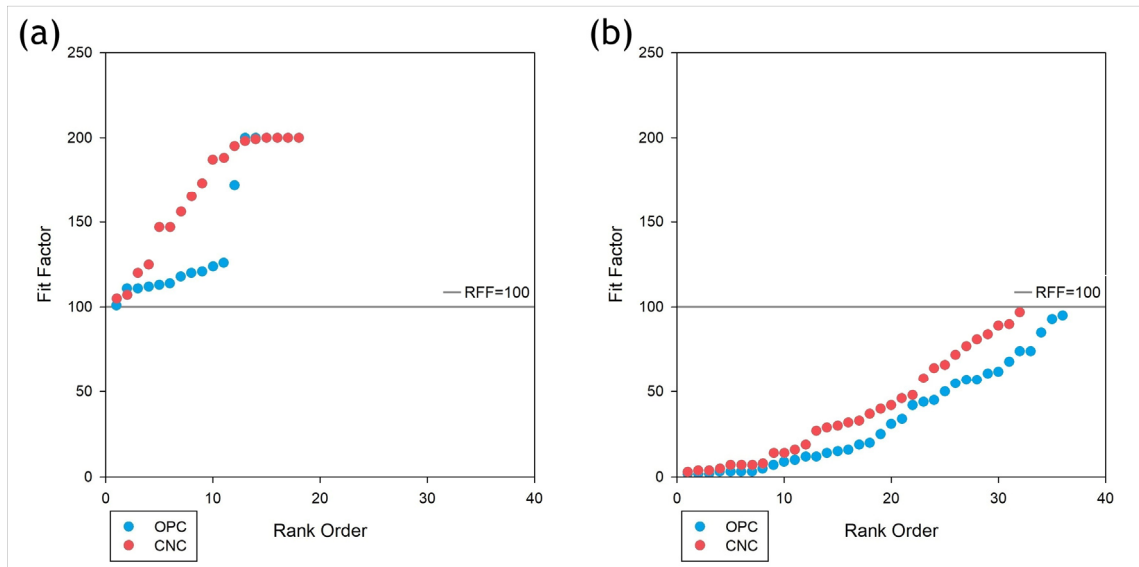


Figure 4. Rank order of fit factors : (a) Fit test passed, and (b) failed

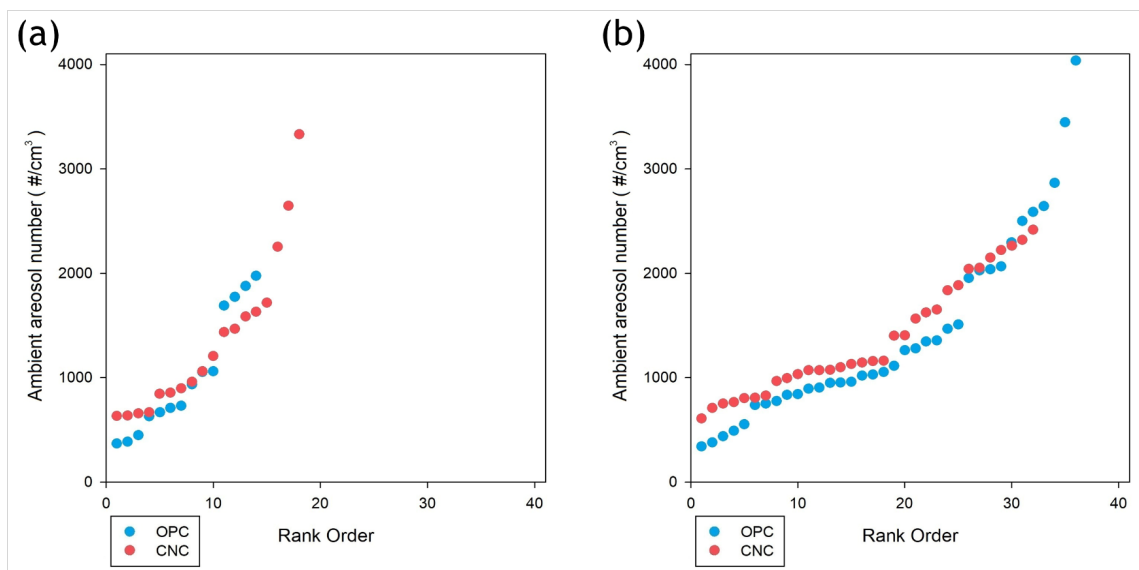


Figure 5. Rank order of ambient aerosol in : (a) passed, (b) failed Fit test

였으며 OPC 장비 모델은 14건(28.0%)이었다(Table 4). CNC 장비 모델로 성공한 밀착계수 값은 OPC 장비 모델에 비해 높은 평균값을 기록하였을 뿐만 아니라 실패한 경우에서도 OPC 장비 모델보다 높았다(Figure 4). CNC 장비모델은 635-3332#/cm<sup>3</sup>에서 성공하였고 609-2418#/cm<sup>3</sup>에서 실패하여 비슷한 구간을 보인 반면 OPC 장비 모델은 368-1976#/cm<sup>3</sup>에서 성공하였지만 343-4036#/cm<sup>3</sup>에서 실패하였다. 이와 같은 양상을 Figure 5 에서 확인할 수 있는데 CNC 장비 모델로

시험에 성공 또는 실패한 경우 밀착계수는 OPC 장비 모델에 비해 높았으며 시험환경 내 입자수가 높았던 구간에서 OPC 장비 모델의 성공사례는 CNC 장비 모델보다 더 적었다. OPC 장비 모델로 성공한 입자 구간은 368-1976#/cm<sup>3</sup>이며 중앙값(median) 833#/cm<sup>3</sup>로 대부분 2000#/cm<sup>3</sup>이하에서 성공하였다(Table 4).

그러므로 CNC 장비는 시험환경 내 입자수에 따른 밀착 성능 차이가 없었지만 OPC 모델은 입자수에 따라 성공 및 실패 경향이 달랐던 것으로 확인되었다(Figure 6).

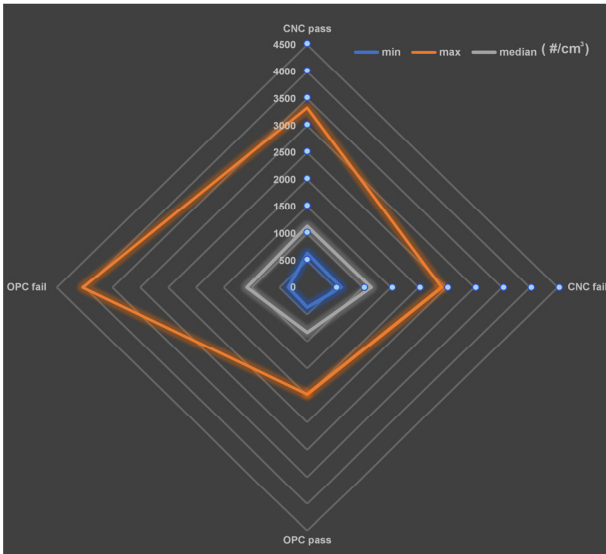


Figure 6. Radar chart of fit performance of the two instruments

#### IV. 고 찰

이 연구에서는 바이오 에어로졸 노출이 의심되는 의료기관에서 주로 사용하고 있는 두 장비에 대하여 밀착 성능과 시험환경 내 입자수 상관성을 평가하였다. CNC 장비 모델은 0.02~1 μm 이상 크기입자를 계수하며 OPC 장비 모델은 0.3 μm 또는 0.5 μm 이상 크기 입자를 계수하지만 밀착계수 산출 방식은 같다(OSHAct, 2021). 이 연구에서 사용한 OPC 장비 모델은 CNC 장비와 같은 운영방식을 통해 밀착성능을 평가하는 장비인데, 우리가 사용한 동일 모델에 대하여 CNC 장비 모델의 대안으로 사용 가능한지를 평가한 이전 연구가 있었다(Wu et al., 2018). 하지만 두 장비를 동시에 구동하여 같은 시험환경 내 입자수와 밀착성능을 비교한 연구는 현재까지 없었다. 일부 학회에서는 측정 원리가 다른 두 장비로 측정된 밀착계수를 비교하였으며(Wu et al., 2017; Wu et al., 2018; Itaya et al., 2019), 국내 연구자들도 연구 필요성을 제기하고 있다. 이번 연구에서 사용한 두 장비 간 밀착계수는 선행연구(Wu et al., 2018) 결과 같이 신뢰성이 있었다. 그러나 Y자로 연결된 노즐을 통해 동일 환경 내에서 동시 산출된 두 장비 밀착계수는 동시 성공하거나 또는 동시 실패한 경우가 84%이었으며 나머지 16%는 두 장비에서 동일한 결과를 보이지 않았다.

그러므로 밀착시험에서 성공한 경우 및 실패한 경우

로 구분하여 시험환경 입자수와 상관성을 분석한 결과 OPC 장비 모델로 성공한 경우 시험환경 내 입자수와 상관있는 것으로 분석되었다. 하지만 CNC 장비 모델은 시험환경 입자수에 따라 밀착 성공 여부가 다르지 않았다. 같은 환경에서 동시에 측정한 마스크 밀착 성능이 장비에 따라 달랐는데 CNC 장비 모델에서 더 높은 성공을 보였으며 밀착계수도 높았다. 반면 OPC 장비 모델로 밀착시험을 실패한 경우 시험환경 입자수는 CNC 장비 모델보다 더 높거나 낮았는데, 성공한 경우 대부분 2000#/cm<sup>3</sup>보다 낮은 것으로 확인되었다.

Wu et al.(2017) 연구에서 최대 10<sup>4</sup>#/cm<sup>3</sup>까지 측정하는 OPC 장비 모델에 비해 2.5 x 10<sup>5</sup>#/cm<sup>3</sup>까지 측정하는 CNC 장비 모델은 이소프로필 알콜로 포화된 챔버에서 입자를 더 쉽게 감지할 수 있으므로 빛으로 산란된 입자를 계수하는 OPC 장비 모델보다 더 높은 밀착성능을 보일 수 있다고 하였다. 우리 연구 또한 CNC 장비 모델보다 OPC 장비 모델의 평균 입자수는 다소 낮았으며 밀착성능도 다소 낮게 측정되었다. 하지만 시험에 실패한 경우 입자수는 CNC 장비 모델보다 OPC 장비 모델에서 더 많았으며 성공한 경우에는 더 적었다. 시험에 성공하거나 실패한 경우의 시험환경 내 입자수를 밀착성능과 비교한 결과는 두 장비에서 상이하였다. OPC 장비 모델로 성공한 경우 시험환경 내 입자수와 높은 상관성이 있었지만 CNC 장비 모델은 성공 여부와 상관성이 없었다. CNC 장비 모델은 635-3332#/cm<sup>3</sup>에서 시험이 성공한 반면, OPC 장비 모델은 368-1976#/cm<sup>3</sup>로 낮은 구간에서 시험이 성공하였다. 성공과 실패가 시험환경 내 입자수와 상관없던 CNC 장비 모델과 달리 OPC 장비 모델은 2000#/cm<sup>3</sup> 이하 입자수가 시험 성공과 관련 있는 것으로 분석되었으므로 입자수 이외 다른 영향이 있는지 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

두 장비가 측정할 수 있는 시험입자 크기가 서로 다르므로 측정되는 입자수는 다를 수 있고 입자수가 많았던 환경에서 주로 실패한 OPC 장비 모델에 대하여 입자 크기 등 다른 영향이 있었는지 추후 연구를 진행하고 확인하여야 한다. 그러므로 근로자에게 노출되는 입자 종류 및 크기, 수 농도 조건 등이 상이하게 다른 환경에서 밀착시험을 진행할 경우에 장비 원리에 따라 구분해서 사용할 필요가 있을지 고찰하여야 한다. 또한, 입자수 이외 입자 크기 및 입자 거동 환경 등에 대한 체계적인 연구를 진행하여 두 장비 사용에 대한 적절한

시험 환경 자료를 마련하여야 할 것이다.

이 연구에서는 몇 가지 제한점을 지니고 있다. 최근 밀착시험에 자주 사용하고 있는 두 장비를 선정하여 진행한 이 사례보고는 입자 생성에 대한 주의가 필요하였다. 시험환경 내 발생된 에어로졸을 안정화시키기 위해 노력하였지만 챔버 내 시험이 아니었으므로 입자 발생기에서 분무된 입자 이외 환경 중에서 자연적으로 발생한 불규칙하고 다양한 크기 입자가 존재했을 가능성이 있다. 그러므로 챔버 내 실험을 통해 변동이 적은 입자 조건을 설정한 후 입자 크기 분포 등을 고려하여 두 장비를 비교할 필요가 있다고 사료된다. 특히, 상대습도나 시험입자 생성조건 차이로 인한 입자크기 분포 왜곡이나 변동 등이 OPC 장비 모델 결과에 영향을 미칠 가능성이 있으므로 이러한 부분을 감안하여 입자 크기와 연관성을 검증할 필요가 있다. 또한, 시험 마스크를 여러 종류 호흡보호구로 확장할 필요도 있다. 이와 같이 장비 자체의 고유한 밀착 성능만을 비교하기 위해서는 결과에 영향을 미치는 변수들을 제어해야 하며 특히 입자 크기 및 입자의 대전 특성, 상대습도 등이 고려되어야 할 것이다.

따라서 시험환경 내 입자수에 따라 다른 밀착성능을 보인 두 장비 간 상관성이 확인된 이 연구 결과를 토대로 노출된 환경 내 입자 특성에 따라 각기 다른 장비를 사용하여 밀착시험을 하여야 하는지에 대한 후속 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 특히 현재 부각되고 있는 바이오에어로졸 입자 특성이 장비에 따라 밀착성능에 영향을 미치는지 확인하고 그에 따라 적절한 장비 사용이 보장되어야 할 것이다.

## V. 결 론

동일 시험환경 내 CNC 및 OPC 장비 모델에서 측정된 입자수 및 밀착성능은 다음과 같다.

1. 같은 시험환경에서 동시에 측정된 입자수는 원리가 다른 두 장비이므로 같지 않았다.
2. 동일 장소에서 동일 참가자가 동일 마스크로 측정된 두 장비의 밀착성능은 같지 않았지만 장비간 비교에서 비교적 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다.
3. CNC 장비 모델의 밀착시험 성공률은 OPC 장비 모델보다 높았고 밀착계수도 높았으며 시험환경 입자수에 따라 밀착성능은 영향을 받지 않았다.

4. OPC 장비 모델로 밀착시험에 성공한 경우 시험 환경 입자수와 관련 있는 것으로 분석되었다.
5. OPC 장비 모델은 입자 농도가 낮은 환경에서 성공한 것으로 분석되었고 입자수가 높은 경우 대부분 실패하였다.
6. OPC 장비 모델로 성공률이 높았던 입자수 구간은  $368-1976\#/cm^3$ 로 대부분  $2000\#/cm^3$  이하였다.

위와 같이 측정 원리가 다른 두 장비는 시험환경 입자수와 밀착성능에서 상이한 결과를 보였다. 특히 OPC 장비 모델로 시험에 성공한 경우는 시험환경내 입자수 농도가 대부분  $2000\#/cm^3$  이하였으므로 그 이상 환경에서는 신뢰성이 낮아질 수 있으므로 주의할 필요가 있겠다. 따라서 가능한  $2000\#/cm^3$  이하인 환경에서 사용하기를 권고한다.

하지만 입자 크기에 대한 상관성은 확인되지 않았으므로 바이러스 등 크기가 작은 에어로졸이 부유하는 환경에서는 두 장비간 결과 차이가 있을 수 있으므로 이에 대한 후속 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 (사)한국호흡보호구학회 기초연구 활동으로 수행하였으며 연구비 지원 기관인 (주)태원시바타 에 감사드립니다. 또한 입자발생 환경 구축을 위한 실험에 도움을 준 (주)에이피엠엔지니어링 나상철 과장님과 통계 자문에 협조해 준 (국)한국한의학연구소 강병갑 박사님께 감사드립니다.

## References

- Australian Occupational Safety and Health Act(AOSH-Act). 2015
- Canada Occupational Health and Safety Regulations (Canada OHSR) (SOR/86-304). Canadian Minister of Justice. (Last amended on October 31, 2014)
- Canadian Standards Association (CSA). Standard Z94.4-02. Selection, use, and care of respirators. Toronto, Canada: CSA Group. 2011
- Charney W. Handbook of modern hospital safety. 2nd Edition, New York: CRC Press. ISBN-13: 987-1420047851 2009:18-1



- Eikenberry SE, Mancuso M, Iboi E, Phan T, Eikenberry K et al. To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic. *Infectious Disease Modelling* 2020;5: 293-308
- Eissenberg T, Kanj SS, Shihadeh AL. Treat COVID-19 as Though It Is Airborne: It May Be. *AANA Journal* 2020;88(3):29-30 ([www.anna.com/aaanjournalonline](http://www.anna.com/aaanjournalonline))
- Eoh WS, Choi Y, Shin CS. Comparison of Effects of Mask Style and Donning Training on Fit Factors of Particulate Filtering Facepiece Respirators. *J Korean Soc Saf* 2016;31(5):35-41
- Han DH, Kim HW, Jang YJ, Myong JP, Yang HS et al. A study on the actual results and draftings regulations of Fit testing(I) OSHRI. 2017-969. Available from: URL:<http://oshri.kosha.or.kr>
- International Standard Organization (ISO). ISO 16975-3: 2017(en) Respiratory protective devices - Selection, use and maintenance - Part 3: Fit-testing procedures (Accessed 20 March 2021). Available from: URL:<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16975:-3:ed-1:v1:en>
- Itaya Y, Tanihata S, Khi MM, Goto F, Murata M. Case report of Fit Test using Mask Fitting Tester, Abstract of lectures on research presentations related to Respiratory protection, International Society for Respiratory Protection(ISRP), Japan Branch/Japan Respirator Manufacturers Association co-hosted. 2019
- 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
- Kang JO. Occupational infections of Health Care Personnel in Korea, *Hanyang Medical Rew.* 2011; 31(3):200-210 (DOI: <https://doi.org/10.7599/hmr.2011.31.3.200>)
- Kim HW, Baek JU, Seo HK, Lee JE, Myong JP et al. Assessing real-time performance of N95 respirators for health care workers by simulated workplace protection factors, *Ind. Health.* 2015;53: 553-561 (doi: 10.2486/indhealth.2014-0259)
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Guidelines for selection, use and care of respirator. [Accessed 2020 oct 8] Available from: URL: <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>
- Kumar P & Morawska L. Could Fighting Airborne Transmission Be the Next Line of Defence Against COVID-19 Spread?, *City and Environment Interactions.* 2020;4 100033
- Lee BU. Airborne Transmission of the SARS -CoV-2 Delta Variant and the SARS-CoV-2 Omicron Variant, *Aerosol and Air Quality Research.* 2021;22(1);1-3 (<https://doi.org/10.4209/aaqr.210250>)
- Occupational Health and Safety Act (OSHAct). Respiratory protection. (Accessed 20 March 2021). Available from: URL:<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134>
- Standards Australia. Select- ion, use and maintenance of respiratory protective equipment. Sydney, Australia: Standar- ds Australia. AS/NZS 2009;1715
- Seo HK, Kwon YI, Myong JP, Kang BK. Fit comparison of Domestic N95 Medical Masks in a Fit test. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(1):94-104 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2021.31.1.94>)
- The Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA). KOSHA Guide H-82 Technical guidance on the use and management of individual protection.; 2020
- Wu B, Leppänen M, Yermakov M, Grinshpun SA. Evaluation of a New Instrument for Aerosol Quantitative Fit Testing. *J of ISRP* 2017;34(2): 111-127
- Wu B, Leppänen M, Yermakov M, Grinshpun SA. Utility of an Optical Particle Counting Instrument for Quantitative Respirator Fit Testing with N95 Filtering Facepieces. *J of ISRP* 2018;35(1):14-25

<저자정보>

서혜경(연구교수), 장호영(석사연구원), 심수아(학부연구생), 김희주(학부연구생), 한돈희(교수)