

착용 기간에 따른 KF94 마스크 세균여과효율 변화 연구

박종민^{1*} · 양예람^{1*} · 박성준^{1,2} · 이기영^{1,3} · 이정훈^{1,3†} · 윤충식^{1,3†}

¹서울대학교 보건대학원 환경보건학과, ²서울대학교 생명공학공동연구원, ³서울대학교 보건환경연구소

Bacterial Filtration Efficiencies of KF94 Masks According to Wearing Duration

Jongmin Park^{1*} · Yeram Yang^{1*} · SungJun Park^{1,2} · Kiyoung Lee^{1,3} · Cheonghoon Lee^{1,3†} · Chungsik Yoon^{1,3†}

¹Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health,
Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

²N-Bio, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

³Institute of Health and Environment, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

Objectives: The coronavirus pandemic that began in 2019(COVID-19) has been one of the worst pandemics of the 21st century. Masks have been used to prevent COVID-19, but there are currently no standards for the long-term use of masks in the Republic of Korea. This study was conducted to assess the microbiological safety of KF94(Korea Filter 94) disposable face masks according to wearing duration by evaluating the bacterial filtration efficiencies of masks worn by research participants.

Methods: A commercially available KF94 mask certified by the Ministry of Food and Drug Safety(MFDS) in the Republic of Korea was selected as the test mask. The research participants(n = 15) wore masks for the durations of one, three, and seven days. Participants also reported several parameters, including wearing time, makeup frequency, and storage. Bacterial filtration efficiencies of the worn masks were measured by a mask bioaerosol filtration tester. *Staphylococcus aureus(S. aureus)* was used as the test bacteria and quantitatively measured through the cultivation method. Then, bacterial filtration efficiency was calculated using the formula suggested by the MFDS.

Results: All worn masks showed over 99.98% of mean bacterial filtration efficiency for *S. aureus*. There were no significant differences among bacterial filtration efficiencies of face masks according to wearing duration. There was also no significant difference among bacterial filtration efficiencies among participants. There was no correlation between the results of bacterial filtration efficiencies and reported parameters from participants.

Conclusions: In the absence of significant external damage to the mask, the bacterial filtration efficiency of the mask can be maintained even after seven days of wearing. This result suggests that KF94 masks certified by the MFDS can be used repeatedly for about a week without loss of bacterial filtration efficiency.


Key words: bacteria, bacterial filtration efficiency, COVID-19, disposable face mask, wearing duration


*These authors contributed equally to this work.


†Corresponding author: Cheonghoon Lee, Tel: 02-880-2900, E-mail: shota2@snu.ac.kr
Graduate School of Public Health and Institute of Health and Environment, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea


†Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2824, E-mail: csyoon@snu.ac.kr
Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea

Received: January 10, 2024, Revised: February 3, 2024, Accepted: March 1, 2024


 Jongmin Park <http://orcid.org/0009-0008-4649-345X>

 Yeram Yang <http://orcid.org/0000-0001-6102-1591>

 SungJun Park <http://orcid.org/0000-0002-9582-8681>

 Kiyoung Lee <http://orcid.org/0000-0003-4792-190X>

 Cheonghoon Lee <http://orcid.org/0000-0002-6382-5611>

 Chungsik Yoon <http://orcid.org/0000-0001-7822-0079>

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.

I. 서 론

세계보건기구(World Health Organization)가 2020년 1월 신종 코로나바이러스감염증(코로나-19)에 대한 국제적 공중보건 비상사태(Public Health Emergency of International Concern)를 선언하고 코로나-19를 대유행(pandemic)으로 규정한 이후, 2023년 12월까지 전 세계에서 코로나-19 확진 수는 약 7억7천명에 이르렀으며 7백만명의 사망자가 발생하였다(WHO, 2024). 한국에서도 2023년 10월 기준, 약 3천 5백만명의 확진자와 3만 6천명의 사망자가 보고되고 있다(WHO, 2024). 2023년 5월 국제적 공중보건 비상사태는 해제되었으나(WHO, 2023), 아직도 지역별 유행(endemic)은 계속되고 있는 실정이다.

코로나-19를 유발하는 사스 코로나바이러스-2(SARS-CoV-2)와 같은 호흡기 바이러스 및 세균은 비말 등의 바이오에어로졸을 통해 감염되는 형태를 보인다(CDC, 2006; Otter et al., 2016). 보건용 마스크 착용은 호흡기 비말에서 검출되는 코로나바이러스의 양을 줄일 뿐 아니라(Leung et al., 2020), 비말의 확산을 막아(Dbouk et al., 2020; Lindsley et al., 2021) 바이러스의 전염을 방지하는데 효과가 있다(Chu et al., 2020; Leung et al., 2020). 따라서 코로나-19 예방을 위한 가장 효과적인 방법은 마스크와 같은 개인보호구 착용(Cheng et al., 2021)이며, 국가적으로 2023년 1월까지 보건용 마스크 착용을 의무화하였다.

마스크 수급 부족으로 인하여, 코로나-19 대유행 초기 일회용 마스크의 다회 사용을 권장한 바 있다. 마스크 착용에 대한 설문 조사 결과, 보건용 마스크를 1회만 착용하고 폐기한다는 응답은 23.6%인데 반해 2~3일 착용하고 버린다는 설문자는 54.7%, 6일 이상 착용 역시 10% 이상으로 조사되는 등, 많은 소비자들이 마스크를 다회 착용하고 있다(Consumers Korea, 2020).

보건용, 수술용 및 비말차단용 마스크 등 의료용 호흡기보호구에 적용되고 있는 한국의 현행 기준은, 유럽연합 기준을 바탕으로 제시한 염화 나트륨 및 파라핀 오일의 여과효율 기준(MFDS, 2022)과 폴리프로필렌 필터 부직포의 표준 세균인 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus*)에 대한 여과효율 평가 기준(ASTM International, 2019; CEN, 2019; MFDS, 2022)을 적용하고 있다. 또한 한국은 유럽연합의 기

준을 바탕으로 염화나트륨 및 파라핀 오일의 필터 효율을 고려하여, Korea Filter(KF)80 및 KF94, KF99 등으로 분류하고 있다(CEN, 2019; MFDS, 2022). 그러나, 마스크를 다회 착용할 경우 물리화학적 변성이 일어날 수 있으므로 인증된 마스크의 여과효율이 떨어질 수 있다. 실제 4일까지 착용한 보건용 KF94 마스크의 염화나트륨과 파라핀 오일을 사용한 여과효율 평가 결과에서 평균 여과효율이 약 6% 감소하는 결과를 확인하였다(Kim, 2021). 현재까지의 마스크 다회 사용 관련 연구는 주로 염화 나트륨 및 파라핀 오일 입자 여과효율 변화를 기반으로 한 성능 평가법을 활용하여 진행되었으며(Charvet et al., 2022; Whyte et al., 2022) 세균여과효율 평가 관련 연구는 부족한 실정이다(Luksamijarulkul et al., 2014). 실제 많은 소비자들이 마스크 구입 후 다회 착용하는 형태를 보이기에(Consumers Korea, 2020), 현재 가장 널리 사용되고 있는 KF94 마스크를 반복 사용한 후 세균여과효율을 평가한 결과는 충분한 보건학적 함의를 가질 수 있다.

본 연구는 시중에서 구입 가능한 KF94 마스크를 실험 참가자들에게 1일, 3일, 7일 동안 다회 착용하게 한 후 착용 기간 별 마스크의 세균여과효율 변화 양상을 파악하였으며, 이 결과를 통해 KF94 마스크를 다회 착용할 시의 미생물학적 안전성 확보에 대한 기초 정보를 제공하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 대상 마스크 및 실험용 세균

시중에서 구입 가능한 식품의약품안전처 인증 KF94 마스크(201A, Dobu Mask, Republic of Korea)를 확보하여 세균여과효율 평가에 사용하였다. 시료 준비 및 채취 등에 사용한 모든 도구들은 고압증기멸균기를 이용하여 121°C에서 15분 동안 멸균과정을 거쳤다.

실험용 세균으로, 황색포도상구균(American Type Culture Collection [ATCC] 6538)을 사용하였다. 먼저, 대두카제인소화액배지(tryptic soy broth)(MB-T1053, MBcell, Kisanbio, Republic of Korea)에 황색포도상구균을 접종하고, 진탕배양기(150 rpm) 내에서 37°C로 24시간 배양하였다. 이후 10배 단계 희석법으로 대두카제인소화한천배지(tryptic soy agar)(MB-T1052, MBcell, Kisanbio, Republic of Korea)에 접종하고

배양기에서 37°C로 24시간 배양한 후, 평판계수법으로 계수하여 농도를 확인하였다. 배양한 황색포도상구균의 농도를 약 1×10^6 colony-forming units(CFU)/mL로 맞추어 실험 전까지 냉장고(4°C)에 보관하였으며, 이때 보관 기간은 최대 2일이 넘지 않도록 하여 황색포도상구균의 사멸을 방지하였다.

2. 연구 참여자 모집

본 연구는 서울대학교 임상연구심의위원회의 승인(IRB No. 2209/002-020)을 받아 진행하였다. 경제활동 연령인 만 19세에서 만 64세 사이의 성인 남녀를 대상으로 모집하였으며, 모집원들에게 연구 배경과 개요를 대면 혹은 온라인(화상회의) 및 전화로 설명하였다. 설명을 들은 후 최종 참여 의사를 자발적으로 표명한 연구참여자에 한정하여 대면으로 연구 참여 방법을 설명하였으며, 서면 동의서를 수취했다. 결과, 본 연구에는 총 15명(남 7명, 여 8명)의 연구참여자가 참여하였으며, 인구학 및 일반적 특성에 대한 정보들을 확보하였다.

3. 마스크, 설문지 배포 및 회수

각 연구참여자에게 설문지와 식품의약품안전처 인증 KF94 마스크(201A, Dobu Mask, Republic of Korea) 3개 및 사용한 마스크를 담을 수 있는 멸균백을 배부하였다. 설문지는 키 및 몸무게, 성별 등 연구참여자들의 기본 정보 및 마스크 착용시간(총 착용시간 및 활동 중 착용시간), 사용시 보관 방법 등 주요 정량·정성적 지표(parameter)를 포함하여 구성하였다. 마스크를 2~3일 착용하는 사람은 전체의 59.4%, 6일 이상 착용하는 사람은 11.6%로 조사된 설문조사 결과를 토대로, 마스크 착용 기간을 설정하였다(Consumers Korea, 2020). 연구참여자들은 3개의 마스크를 각각 7일, 3일, 1일 동안 지속 사용한 뒤, 추가적인 세균 오염 등을 방지하기 위해 멸균백에 넣어 작성한 설문지와 함께 연구자에게 제출하였다. 회수한 마스크는 실험 전까지 냉장고(4°C)에 보관하였다.

4. 착용한 마스크의 세균여과효율 평가

국내의 표준시험법을 일부 변형하여 착용한 마스크의 세균여과효율을 평가하였다(Choi et al., 2022). 연구참여자들에게 회수한 마스크들을 $21 \pm 5^\circ\text{C}$ 및 상대습도 $85 \pm 5\%$ 의 배양기에 하룻밤 정치하여 사용하였으며, 미

착용 마스크(0일)를 대조군으로 설정하였다. 먼저 각 마스크의 코편 및 고정용 끈을 제거한 뒤, 마스크 전체를 세균여과효율 평가에 사용하였다(ASTM International, 2019; CEN, 2019; MFDS, 2022). $1 \times$ phosphate-buffered saline(PR2004-000-74, Biosesang, Republic of Korea)을 사용하여, 각 시험 당 황색포도상구균 수가 1,700~3,000 CFU가 검출되도록 세균현탁액을 준비하였다. 이후 세균여과효율 시험장치(BFET-1853, ART Plus, Republic of Korea) (평균 입경: $3.0 \pm 0.3 \mu\text{m}$; 펌프 유량: 28.3 L/분)를 준비한 뒤, 세균현탁액을 분사기에 넣고 6단형 Andersen type cascade impactor(다단포집장치; TE-10-830, Tisch Environmental, USA)의 각 층에 배지를 넣었다. 마스크를 장착하지 않은 상태에서 에어로졸 발생기와 진공펌프를 1분간 작동한 뒤 다단포집장치를 1분간 작동하였으며 배지를 회수하고 해당 층수를 표시하여 양성대조군 a로 설정하였다. 각 착용 마스크의 코편 및 고정용 끈을 제거한 후 세균여과효율 시험장치에 장착한 뒤에 동일한 과정을 실시하였으며, 끝으로 시험 마스크를 장착하지 않은 상태에서 시험하여 양성대조군 b로 설정하였다. 에어로졸 발생기를 가동하지 않고 다단포집장치만 2분간 작동하여 확보한 배지로부터 얻은 결과를 음성대조군으로 설정하였다. 시험이 끝난 후, 배지를 배양기에서 $37 \pm 2^\circ\text{C}$, 48 ± 4시간 동안 배양하여 CFU값을 계수하였다.

5. 세균여과효율 계산 및 통계 분석

아래의 식 1에 따라 세균여과효율(%)을 구하였다(MFDS, 2022).

$$E = \frac{(C-T)}{C} \times 100 \quad (\text{Eq 1.})$$

E: 여과효율(%)

C: 양성대조군 a와 양성대조군 b의 평균 CFU

T: 시험군(각 연구참여자가 착용한 마스크)에서 측정된 총 CFU

실험 결과에 대해 각 착용 기간(0일, 1일, 3일, 7일)에 따른 세균여과효율의 평균과 표준오차를 구하였다. Prism ver. 9.0.0(Graphpad Software, USA)을 이용하여 각 착용 기간 결과의 통계적 차이를 분산분석으로 검증하고, 유의한 차이가 있는 항목에 대해 Dunn's post hoc test를 통해 검정하였다. 또한 스피어만 상관

분석을 통해 CFU값 및 정량·정성적 지표 간의 상관성을 확인하였다. P-값(P) 이 0.05 미만일 때 통계적으로 유의한 것으로 판단하였다.

III. 결 과

1. 일반적 특성

총 15명(남 7명, 여 8명)의 연구참여자 대부분(87%)이 얼굴용 화장품은 사용하였으나, 입술용 화장품은 여

성만 사용하는 것을 확인하였다(Table 1). 연구참여자의 다수(67%)는 마스크를 접어서 보관하는 것으로 확인되었으며, 응답하지 않은 1명을 제외한 모든 연구참여자가 실내에서 상온으로 마스크를 보관하는 것으로 조사되었다(Table 1). 평균적으로 1일 동안 432분, 3일 동안 1,195분, 7일 동안 2,661분가량 마스크를 착용하며, 총 마스크 착용 시간의 절반(49%~55%) 정도가 운동 및 출퇴근, 대화 등의 활동 중에 해당되는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 1. Research participant demographics (n = 15)

		Number (%)	
Sex	Male	7 (47)	
	Female	8 (53)	
Makeup	For face	Yes	13 (87)
		No	2 (13)
	For lip	Yes	8 (53)
		No	7 (47)
Mask storage	Folded or unfolded	Folded	10 (67)
		Unfolded	4 (27)
		No answer	1 (7)
	Temperature	Room temperature	14 (93)
		Other temperature	0
		No answer	1 (7)
	Indoor or outdoor	Indoor	14 (93)
		Outdoor	0
		No answer	1 (7)

Table 2. Parameters of all research participants (n = 15)

	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Wearing time (min)					
				Total		With activity*			
				1-day use	3-day use	7-day use	1-day use	3-day use	7-day use
Average ± Standard Error	31 ± 2	169 ± 2	68 ± 4	432 ± 53	1,195 ± 131	2,661 ± 289	238 ± 34	630 ± 89	1,299 ± 154

*Activity includes exercise, commuting, and speaking.

2. 착용 기간에 따른 세균여과효율 차이

미착용 마스크 및 1, 3, 7일 착용한 마스크의 세균여과효율 결과를 Table 3에 나타내었다. 착용 기간과는 관계없이, 모든 마스크에서, 99.98%에서 99.99%에 달하는 아주 높은 황색포도상구균 여과효율을 보였다. 3일 및 7일 착용한 마스크에서 평균 0.01% 수준의 아주 낮은 세균여과효율 감소치를 보였으나, 통계적 유의성을 확인할 수 없었다($P > 0.05$). 연구참여자 중 8명(53%)이 착용한 마스크 모두에서 착용 기간과 무관하게 100.00%의 세균여과효율을 보였으며, 7명(47%)이 착용한 마스크 1개 또는 2개에서 100.00%보다 감소한 세균여과효율 결과값을 확인하였다(Figure 1). 모든 마스크들 중 최소 세균여과효율 값은 99.88% 이었다. 평균적으로 각 연구참여자 간 최대 약 0.06%의 유의하지 않은 차이를 보였다($P > 0.05$; Figure 1).

3. 세균여과효율과 정량 · 정성적 지표들 사이의 상관성 분석

마스크의 세균여과효율은 성별, 키, 체중 등과 같은 정량적 지표 뿐 아니라 얼굴 및 입술 화장품 사용 여부, 마스크 보관 방법, 착용 시간 등의 정성적 지표와도 유의한 상관성을 보이지 않았다($P > 0.05$; Table 4). 또한, 1일, 3일, 7일 동안 착용한 마스크 간의 세균여과효율 값 역시 유의한 상관성을 확인할 수 없었다($P > 0.05$; Table 4).

IV. 고찰

마스크는 미생물학적 위험성을 방지할 수 있는 중요한 개인 보호구로 코로나-19 유행 기간 동안 착용이 권장된 바 있다(Cheng at al., 2021). 세균여과효율이 마

Table 3. Bacterial filtration efficiencies of face masks from research participants (n = 15) according to wearing duration

Wearing duration	0-day use (control)	1-day use	3-day use	7-day use
Average ± Standard error(%)	99.99 ± 0.01	99.99 ± 0.01	99.98 ± 0.01	99.98 ± 0.01

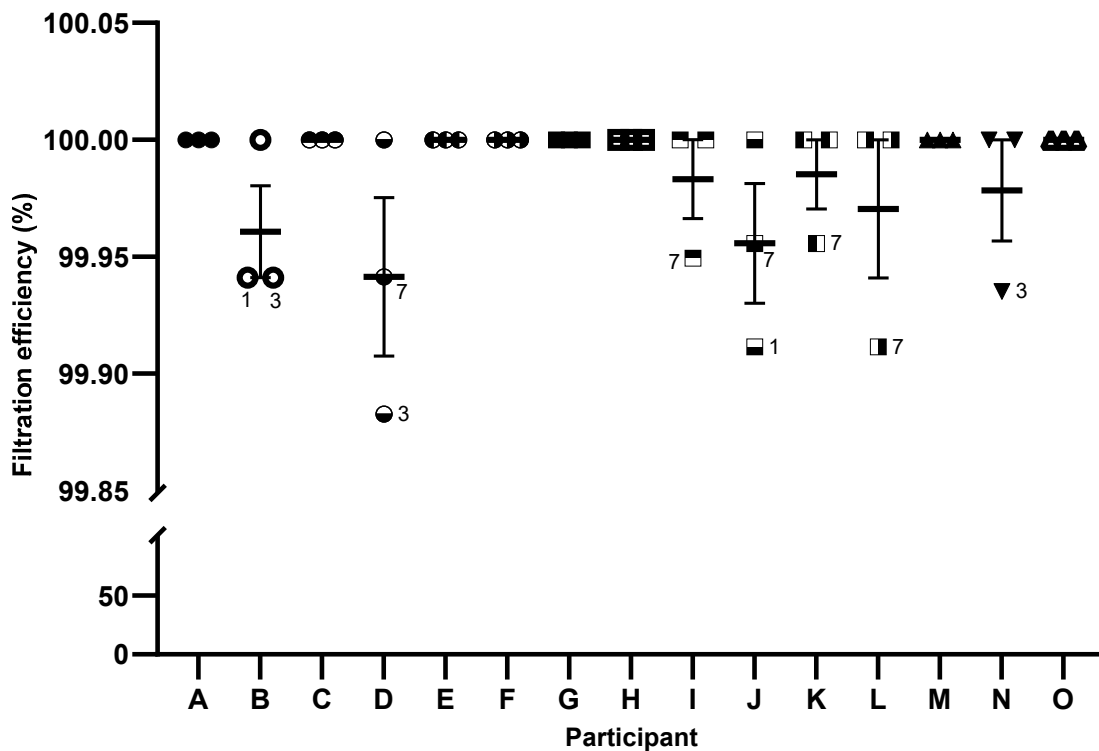


Figure 1. Bacterial filtration efficiencies of face masks collected from each research participant. Data are shown as scatter dot plot and bar with average ± standard error. Numbers (1, 3, and 7) denote 1-day use, 3-day use, and 7-day use of face masks, respectively.

Table 4. Correlation coefficients between bacterial filtration efficiencies and Parameters (Spearman correlation)

	Sex	Age	Height	Weight	Cosmetic		Storage (folded/ unfolded)	Wearing time								
					Face	Lip		BFE			Total			With activity		
								1-day use	3-day use	7-day use	1-day use	3-day use	7-day use	1-day use	3-day use	7-day use
BFE (1-day use)	0.00	0.38	-0.13	-0.042	-0.15	0.00	-0.25	-	0.20	0.076	0.20	0.31	0.33	-0.35	-0.16	-0.30
BFE (3-day use)	-0.18	0.46	0.28	0.50	-0.19	-0.18	-0.090	0.20	-	0.097	0.17	0.32	-0.041	0.26	0.29	-0.12
BFE (7-day use)	-0.018	0.064	-0.20	-0.0021	-0.27	-0.018	-0.076	0.076	0.097	-	-0.15	0.036	-0.27	-0.32	0.11	-0.44

P values of all coefficients are above 0.05; BFE: Bacterial filtration efficiency

스크의 중요한 지표로서 기능하는 이유는 마스크가 인체 등에서 유래한 타액 및 콧물 등의 미생물을 과량 포함할 비말로 인한 감염을 차단하는 효과가 있기 때문이다. 실제 코로나-19 대유행에 맞추어, 한국은 유럽연합 및 미국의 마스크 세균여과효율 평가를 추가적인 기준으로 포함하였다(ASTM International, 2019; CEN, 2019; MFDS, 2022). 코로나-19 대유행시 3일 이상 마스크를 착용하는 사람이 46%로 조사되는 등 마스크를 다회 사용하는 빈도가 높다는 설문조사(Consumer Korea, 2020) 등으로 미루어 볼 때, 실제 마스크를 반복 착용하는 비율은 높을 것으로 예상된다. 그러나 현재 주요한 규제기관으로부터의 마스크 반복 착용에 대한 기준이 없는 바, 본 연구에서는 착용 기간에 대한 미생물학적 안전성을 확보하기 위해 연구 참여자들이 1, 3, 7일간 다회 착용한 마스크를 대상으로 세균여과효율을 평가하였다.

연구 결과, 마스크 착용 기간에 따른 세균여과효율 저하가 매우 낮으며, 착용하지 않은 마스크의 여과효율과 비교하였을 때에도 통계적으로 유의하지 않음을 확인하였다(Table 3). 이는 염화나트륨, 파라핀 오일을 이용한 여과효율 실험(Kim, 2021)의 결과값과 상반된 것으로, 그 이유는 다음과 같이 고찰할 수 있다.

먼저, 정전기 특성에 따른 차이가 존재할 것으로 여겨진다. 마스크에서 에어로졸의 흡착은 중력 침강, 정전기력, 확산 등 다양한 작용에 의해 발생한다(Chazelet et al., 2011). 마스크의 필터는 작은 입자를 효율적으로 거르기 위해 다수의 섬유필터층(fabric filter layer)을 결합하여 제작되며, 이는 작은 입자를 효율적으로 걸러줄 수 있다는 장점이 있지만 압력 강하를 증가시켜

착용자의 정상적인 호흡을 방해한다는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해, 1995년부터 관성 및 브라운 확산 등으로 여과할 수 없는 입자들을 정전기력을 활용하여 포집하는 기술이 활용되고 있다(Ahn, 1997; Murtadlo et al., 2019). 이때, 정전기력의 크기에 따른 염화나트륨과 파라핀 오일 여과 효율 변화가 일어날 수 있다는 연구가 보고된 바 있으나(Rengasamy et al., 2009; Hong, 2013), 정전기력에 따른 세균여과효율 변화는 현재까지 보고된 바 없다. 특히 숨을 내쉬는 등의 행동이나 습한 곳 등 에어로졸 상태의 수분을 접하게 되는 상황에서 정전기 필터의 정전기력이 감소되는 것이 보고된 바 있으며(Sugihara, 2020), 4일간 착용시의 필터 상 정전기력이 유의미하게 감소하는 연구 결과 또한 보고된 바 있다(Kim, 2021). 따라서 정전기력에 영향을 받는 염화나트륨과 파라핀 오일의 착용기간에 따른 마스크 여과효율 저하가 세균여과효율에 비해 더 클 것으로 판단된다.

두 번째로, 입자 크기의 차이가 주요한 요인이 될 수 있다. 식품의약품안전처에 따르면, KF94 인증은 평균 0.4 μm 크기의 입자를 94% 이상 걸러낼 수 있는 마스크에 주어진다(MFDS, 2022). 염화나트륨과 파라핀 오일의 평균 입자 크기는 각각 0.6 μm 및 0.4 μm 로, 6단형 다단포집장치의 측정범위인 0.65~10.0 μm 보다 작다. 황색포도상구균의 크기는 약 1.0 μm 에 달하나, 일반적으로 세균은 보다 직경이 큰 바이오에어로졸의 형태(평균 ~3.0 μm)로 체내에 유입된다(Thomas, 2013). 따라서, 입자의 크기가 작은 염화나트륨 및 파라핀 오일의 마스크 여과효율이 세균여과효율보다 낮게 나타났을 것이다.

또한 얼굴 및 입술 화장품 사용 여부 및 마스크 보관 방법과 같은 연구참여자들의 행동들은, 마스크의 세균 여과효율과의 약한 음의 상관성을 보였으나, 유의하지 않았다(Table 3). 본 경향은 마스크 착용 기간에 무관하게 나타나는 바, 실제 7일까지의 KF94 마스크 상 세균여과효율에 주는 영향이 크지 않다고 판단된다. 단, 해당 행동들은 실제 세균 오염 및 증식 등에 주요한 영향을 미칠 수 있으므로, 향후 마스크의 다회 활용에 미치는 영향을 분명하게 검증하기 위한 보다 큰 규모의 연구가 이루어질 필요성이 있다.

본 연구의 결과와 유사하게 마스크의 다회 사용이 입자 흡입에 영향을 주지 않거나, 오히려 장점이 있다는 기존 연구들 역시 보고된 바 있다. 최대 720시간까지 흡입 모사를 한 실험의 경우, 마스크를 720시간 동안 재사용 하는 것이 새 마스크를 착용하는 경우보다 미세 플라스틱 흡입 위험이 낮게 나타났다(Li et al., 2021). 또한 동일한 마스크를 3일 동안 착용한 연구참여자들을 대상으로 매일 프탈산 에스테르(phthalic acid ester) 대사 산물의 변화를 살펴본 결과, 유의한 차이를 확인할 수 없었다(Wang et al., 2022).

본 연구는 황색포도상구균 현탁액을 에어로졸 형태로 전환하는 방식을 채택하여 미생물 비말을 모사한 것으로, 콧물, 침 등 실제 바이오에어로졸과 성상이 다를 수 있기 때문에 본 연구 결과가 실제 현상을 대표한다고 가정하기에는 한계가 있다. 또한, 마스크의 피부 밀착도에 따라 마스크의 여과효율이 크게 감소한다는 연구결과가 있는 바(Konda et al., 2020; Ardon-Dryer et al., 2021), 마스크 시편을 이용하여 여과효율을 측정본 연구는 마스크 피부 밀착도를 고려하지 않았다는 한계가 존재한다. 또한 마스크의 다회 사용에 따른 미생물학적 안전성을 확실하게 담보하기 위해서, 향후 다양한 종류의 KF94 마스크들 및 KF94외의 보건용 마스크(예: KF-AD 및 텐탈 마스크)들에 대한 세균여과효율 감소 여부 역시 확인할 필요가 있다. 아울러, 향후 보건용 마스크 재사용 기준의 확립을 위한 기초 자료로써, 바이러스와 같이 황색포도상구균과는 다른 분자생물학적 특성을 지닌 다양한 미생물을 대상으로 한 여과효율 결과 역시 종합할 필요성이 있다.

마스크의 외부 손상이 없을 경우 약 7일 간의 착용으로 인한 KF94 마스크의 세균여과효율은 큰 변화가 없는 것을 확인한 바, KF94 마스크는 세균여과효율 측면에서 다회 사용이 가능할 것이라 사료된다. 하지만 장

기간 사용으로 인한 마스크 표면의 정전기력 감소 및 염화나트륨 여과효율 감소 등의 연구 결과(Kim, 2021)가 제시된 바 있으며, 착용 시간이 증가할수록 마스크 표면에서 검출된 미생물 수 및 종류가 늘어난다는 연구 결과 역시 다수 보고된 바 있다(Liu et al., 2018; Liu et al., 2019; Ding et al., 2023). 뿐만 아니라, 마스크가 감염 경로 상 직접 접촉(direct-contact) 중 핵심적인 감염 매개체로써 작용할 수 있으므로(Pan et al., 2023), 오래 착용한 마스크는 세균 입자를 걸러내는 물리적 기전에서 무리가 없을 뿐, 손이나 기타 외부 표면과 접촉이 빈번한 KF94 마스크의 장기간 착용은 권장하기 힘들 것으로 여겨진다.

V. 결 론

본 연구는 국내에서 판매되고 있는 식품의약품안전처 인증 보건용 KF94 마스크를 선택하여, 연구참여자들이 다회 착용한 후의 세균여과효율을 평가함으로써 국내 보건용 마스크 반복 착용에 대한 미생물학적 안정성에 대한 기초 정보를 확보하고자 수행되었다. 모든 마스크는 최대 7일까지의 착용기간에 무관하게 매우 높은 세균여과효율을 보였다. 이는 세균여과효율 측면에서 최대 7일까지 식품의약품안전처 인증 KF94 마스크의 다회 사용이 가능함을 밝힌 것이라 하겠다. 하지만 입자 여과효율, 밀착도, 다양한 미생물 및 보건용 마스크 종류 등의 다양한 요인들을 통합적으로 고려한 후속 연구들을 바탕으로 보건용 마스크 재사용 기준에 대한 자료를 확보할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 발전기금(도부 학술장학금)의 재원으로 수행하는 연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Ahn KH. Aerosol filtration by electret and electrostatic filters. *Air-Conditioning Refrigeration Eng* 1997; 26(1):18-22
- Ardon-Dryer K, Warzywoda J, Tekin R, Biroš J, Almodovar S et al. Mask material filtration efficiency and mask

- fitting at the crossroad: implications during pandemic times. *Aerosol Air Qual Res* 2021;21:200571 (<https://doi.org/10.4209/aaqr.200571>)
- ASTM International. Standard test method for evaluating the bacterial filtration efficiency (BFE) of medical face mask materials, using a biological aerosol of *Staphylococcus aureus*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2019
- Centers for Disease Control and Prevention(CDC). Principles of epidemiology in public health practice: an introduction to applied epidemiology and biostatistics, 3rd ed.; 2006
- Charvet A, Bardin-Monnier N, Thomas D, Dufaud O, Pfrimmer M et al. Impact of washing cycles on the performances of face masks. *J Aerosol Sci* 2022; 160:105914 (<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105914>)
- Chazelet S, Bemmer D, Gripari F. Effect of the test aerosol charge on the penetration through electret filter. *Sep Purif Technol* 2011;79(3):352-356 (<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.021>)
- Cheng Y, Ma N, Witt C, Rapp S, Andreae MO et al. Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. *Science* 2021;372(6549):1339-1343 (<https://doi.org/10.1126/science.abg6296>)
- Choi S, Choi D, Jang SJ, Park SJ, Yoon CS et al. Filtration efficiencies of commercial face masks in Korea for biological aerosols. *J Environ Health Sci* 2022; 48(2):116-122 (<https://doi.org/10.5668/JEHS.2022.48.2.116>)
- Chu DK, Akl EA, Duda S, Solo K, Yaacoub S et al. Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Lancet* 2020;395(10242):1973-1987 ([https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31142-9))
- Consumers Korea. Consumers use masks on average for three days. *Sobijareport* 2020;10:12-15
- Dbouk T, Drikakis D. On respiratory droplets and face masks. *Phys Fluids* 2020;32(6):063303 (<https://doi.org/10.1063/5.0015044>)
- Ding G, Li G, Liu M, Sun P, Ren D et al. Bacterial contamination of medical face mask wearing duration and the optimal wearing time. *Front Cell Infect Microbiol* 2023;13:1231248 (<https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1231248>)
- European Committee for Standardization(CEN). SIST EN 14683:2019+AC:2019: Medical face masks - requirements and test methods. Brussels: CEN; 2019
- Hong YG. Functional finishing of nonwoven filter for dust-proof/medical masks by corona discharging treatment. *Text Color and Finish* 2013; 25(3):232-239 (<https://doi.org/10.5764/TCF.2013.25.3.232>)
- Kim JM. A Study on the correlation between static electricity and filtration efficiency of particulate respirators. Master's thesis, Seoul National University, Seoul. 2021
- Konda A, Prakash A, Moss GA, Schmoldt M, Grant GD et al. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano* 2020;14(5):6339-6347 (<https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03252>)
- Leung NHL, Chu DKW, Shiu EYC, Chan KH, McDevitt JJ et al. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat Med* 2020;26(5):676-680 (<https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>)
- Lindsley WG, Blachere FM, Law BF, Beezhold DH, Noti JD. Efficacy of face masks, neck gaiters and face shields for reducing the expulsion of simulated cough-generated aerosols. *Aerosol Sci Technol* 2021; 55(4):449-457 (<https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1862409>)
- Li L, Zhao X, Li Z, Song K. COVID-19: performance study of microplastic inhalation risk posed by wearing masks. *J Hazard Mater* 2021;441:124955 (<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124955>)
- Liu Z, Chang Y, Chu W, Yan M, Mao Y. Surgical masks as source of bacterial contamination during operative procedures. *J Orthop Translat* 2018;14:57-62 (<https://doi.org/10.1016/j.jot.2018.06.002>)
- Liu Z, Yu D, Ge Y, Wang L, Zhng J et al. Understanding the factors involved in determining the bioburdens of surgical masks. *Ann Transl Med* 2019;7(23):754 (<https://doi.org/10.21037/atm.2019.11.91>)
- Luksamijarulkul P, Aiempradit N, Vatanasomboon P. Microbial contamination on used surgical masks among hospital personnel and microbial air quality in their working wards: A hospital in Bangkok. *Oman Med J* 2014;29(5):346-350 (<http://doi.org/10.5001/omj.2014.92>)
- Ministry of Food and Drug Safety(MFDS). Korean standard and test method for quasi-drugs. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2022
- Murtadlo ZAA, Joe YH, Park SH, Park HS. Filtration efficiency of electrically charged air filters by a corona method. *Par Aerosol Res* 2019;15(1):15-25

- (<https://doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.1.015>)
- Otter JA, Donskey C, Yezli S, Douthwaite S, Goldenberg SD et al. Transmission of SARS and MERS coronaviruses and influenza virus in healthcare settings: the possible role of dry surface contamination. *J Hosp Infect* 2016;92(3):235–250 (<https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.08.027>)
- Pan J, Gmati S, Roper BA, Prussin AJ II, Hawks SA et al. Stability of aerosolized SARS-CoV-2 on masks and transfer to skin. *Environ Sci Technol* 2023; 57(28): 10193–10200 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01581>)
- Rengasamy S, Eimer BC, Shaffer RE. Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE-marked particulate filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg* 2009;53(2): 117–28 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/men086>)
- Sugihara K. Recharging N95 masks using a van de Graaff generator for safe recycling. *Soft Matter* 2021; 17:10–15 (<https://doi.org/10.1039/D0SM02004D>)
- Thomas RJ. Particle size and pathogenicity in the respiratory tract. *Virulence* 2013;4(8):847–858 (<https://doi.org/10.4161/viru.27172>)
- Wang X, Okoffo ED, Banks AP, Li Y, Thomas KV et al. Phthalate esters in face masks and associated inhalation exposure risk. *J Hazard Mater* 2022;423(Pt A):127001 (<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127001>)
- World Health Organization(WHO). WHO Director-General's opening remarks at the media briefing – 5 May 2023. [Cited 2024 Jan 2]. Available from: URL: <https://www.who.int/news-room/speeches/item/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing---5-may-2023>
- World Health Organization(WHO). COVID-19 Dashboard. [Cited 2024 Jan 2]. Available from: URL: <https://covid19.who.int/>
- Whyte HE, Joubert A, Leclerc L, Sarry G, Verhoeven P et al. Reusability of face masks: Influence of washing and comparison of performance between medical face masks and community face masks. *Environ Technol Innov* 2022;28:102710 (<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102710>)

<저자정보>

박종민(대학원생), 양예람(대학원생), 박성준(연구원), 이기영(교수), 이정훈(연구교수), 윤충식(교수)