

## 국내 출시 마스크의 바이오에어로졸 여과효율 평가

최수은<sup>1</sup> , 최도선<sup>1</sup>, 장성재<sup>1</sup>, 박성준<sup>1,2</sup> , 윤충식<sup>1,3</sup> , 이기영<sup>1,3</sup> , 고광표<sup>1,2,3</sup> , 이정훈<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 보건대학원 환경보건학과, <sup>2</sup>서울대학교 생명공학공동연구원, <sup>3</sup>서울대학교 보건환경연구소

## Filtration Efficiencies of Commercial Face Masks in Korea for Biological Aerosols

Sueun Choi<sup>1</sup>, Doseon Choi<sup>1</sup>, Sung Jae Jang<sup>1</sup>, SungJun Park<sup>1,2</sup>, Chungsik Yoon<sup>1,3</sup>, Kiyoung Lee<sup>1,3</sup>, GwangPyo Ko<sup>1,2,3</sup>,  
 and Cheonghoon Lee<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, <sup>2</sup>N-Bio, Seoul National University, <sup>3</sup>Institute of Health and Environment, Seoul National University

### ABSTRACT

**Background:** The recent COVID-19 pandemic is one of the worst disease outbreaks of the 21th century. Due to a lack of reliable antiviral therapeutics, wearing face masks is recommended to prevent airborne infection originating from virus-contaminated bioaerosols.

**Objectives:** The aim of this study was to evaluate the filtration efficiencies of face masks that are commercially available in South Korea for a biological aerosol of *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and murine coronavirus, a well-known surrogate for human coronaviruses.

**Methods:** We collected six different kinds of commercial masks: two Korea Filter (KF)94 (KF94-1, KF94-2) masks, one surgical (Surgical-1) mask, one anti-droplet (KF-AD-1) mask, and two dust (Dust-1, Dust-2) face masks. *S. aureus* (ATCC 6538), a well-performing test bacteria and murine coronavirus (ATCC VR-764) were prepared under a suitable culture condition. Then, a mask biological filtration tester was used to examine the microbial filtration efficiencies of masks. Test microorganisms were quantitatively measured via cultivation methods and microbial filtration efficiencies were calculated appropriately.

**Results:** All face masks showed over 99.6% filtration efficiency for *S. aureus* or murine coronavirus. There were no significant differences among the bacterial filtration efficiencies of the face masks. KF94-1 (99.97±0.08%) and Dust-1 mask (99.97±0.07%) showed the highest (over 99.9%) filtration efficiency for murine coronavirus. KF94-1 or Dust-1 masks showed a significant virus filtration efficiency compared to Surgical-1 mask ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney *U* test).

**Conclusions:** All the commercially available face masks used in this study can filter *S. aureus* or murine coronavirus in bioaerosols efficiently, regardless of the mask type. Therefore, our results suggest that wearing a certified face mask is a reliable means to prevent the transmission of infectious airborne diseases via biological aerosols.

**Key words:** Biological aerosol, bacteria, coronavirus, face mask, filtration efficiency

Received March 8, 2022

Revised April 10, 2022

Accepted April 19, 2022

### Highlights:

- Filtration efficiencies of commercial face masks for biological aerosols were evaluated.
- The filtration efficiency of the tested masks was high (>99.6%) for biological aerosols.
- Certified commercial face masks are useful for preventing infectious airborne diseases.

### \*Corresponding author:

Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea  
 Tel: +82-2-880-2900  
 Fax: +82-2-745-9104  
 E-mail: shota2@snu.ac.kr

## 1. 서 론

신종 코로나바이러스(COVID-19, 코로나-19)감염증은 21세기 최대 대유행 감염증(pandemic)으로 간주되고 있으며, 높은 감염률과 사망률 등으로 인한 보건학적 중대성과 더불어 급속

한 사회문화적 변화까지 야기하고 있다. 2022년 3월 4일 기준, 전세계 확진자는 4억 4천 2백 4십만명에 달하며, 6백만명 이상의 사망자가 보고되었다.<sup>1)</sup> 한국에서도 2022년 3월 3일 기준 3백 9십만명 이상의 확진자와 8천 5백명 이상의 사망자가 보고되었다.<sup>2)</sup>

코로나-19를 비롯한 호흡기 바이러스 및 세균은 일반적으로 기침이나 대화 중에서 발생하는 비말 등의 바이오에어로졸(bioaerosol)과 사람-사람 간 접촉 등의 경로를 통해 전파되는 양상을 보인다.<sup>3,4)</sup> 대다수의 현대인은 하루 중 대부분을 실내에서 지내고 있어 집단 감염에 매우 취약하다. 현재까지 제시되어 있는 호흡기 감염 미생물 예방 방안으로는 마스크 및 개인위생 관리, 사회적 거리두기, 백신 접종 등이 있으며, 치료 방안으로는 항바이러스제가 있다. 그러나 코로나-19의 경우 델타 및 오미크론 변이 등 다양한 변이(variants)로 인한 백신접종 완료자의 돌파감염 사례가 계속 보고되고 있으며, 전 연령층을 대상으로 적용할 수 있는 항바이러스제 역시 한계가 있는 상황이다. 또한 백신 부작용이나 불신 등으로 인한 안티 백신(anti-vaxxer)의 활동과 개발도상국의 백신 미확보 등은 전 세계적인 백신 접종률을 낮추는 원인이 되고 있다.<sup>5)</sup> 이렇듯 확고한 제어 방안이 미비한 현 상황에서, 코로나-19 감염을 예방하기 위한 가장 기본적이고 효과적인 방법은 마스크 등의 개인보호구 착용이다.<sup>6)</sup> 특히 마스크 착용을 의무화하지 않는 국가 내 확진자가 급증하여 착용을 재차 권장하고 있는 실정을 고려할 때, 마스크 착용은 국내 및 전 세계에서 상당기간 지속될 전망이다.

마스크 인증 기준은 미국 및 유럽연합의 기준이 대표적이며, 한국 역시 유럽연합의 기준을 토대로 연화나트륨 및 파라핀 오일의 필터효율을 고려하여 Korea filter (KF)80, KF94 및 KF99로 나눈 바 있다.<sup>7)</sup> 또한 최근 코로나-19 대유행에 맞추어, 유럽연합 및 미국의 마스크 세균 여과효율 평가 역시 포함하게 되었다.<sup>7-9)</sup> 그러나 주로 사용하는 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*)의 크기는 약 3.0 μm로 코로나바이러스(약 0.1 μm)에 비해 훨씬 크며, 세균과 바이러스의 세포벽, 모양 등 특성이 다양하게 다르기 때문에

여과효율이 크게 다를 수 있다.<sup>10,11)</sup> 따라서, 표준 세균인 황색포도상구균 외 코로나바이러스 등의 주요 호흡기 바이러스에 대한 마스크 여과효율을 평가할 필요가 있다.







현재 국내에는 KF80 및 KF94 등의 KF인증 마스크 이외에도 외과용 마스크(surgical mask), 비말차단용 마스크(KF-AD mask) 및 방진 마스크(dust mask) 등 실로 다양한 마스크가 유통되고 있으며, 이는 외부 재질과 필터 유무, 필터 종류 등에 있어 큰 차이를 보인다. 이에 코로나-19 등 공기매개 감염증 전파를 예방하기 위한 목적으로써, 세균 및 호흡기 바이러스를 포함한 바이오에어로졸을 적절히 여과할 수 있는, 검증된 마스크를 선택하고 착용하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는, 시중에서 구입 가능한 6종의 마스크를 선택하여, 황색포도상구균 및 사람코로나바이러스(human coronavirus)의 주요한 대체바이러스(surrogate)인 쥐코로나바이러스(murine coronavirus)를 포함한 바이오에어로졸 여과효율을 평가함으로써, 호흡기 감염증 전파를 방지할 수 있는 올바른 마스크 선택 및 마스크 착용에 따른 미생물학적 안전성 확보와 관련한 기초 정보를 제시하고자 하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 대상 마스크

현재 국내에서 인증 받은 제품 중, 시중에서 구입 가능한 보건용 KF94 마스크 2종(KF94-1: 컵[cup]형, KF94-2: 접이[flat fold]형) 및 보건용 이외로 사용하는 의약외품 마스크 덴탈(외과용) 마스크 1종(Surgical-1: 덴탈[flat]형) 및 비말차단용 마스크 1종(KF-AD-1: 덴탈형)과 1급 방진 마스크<sup>12)</sup> 2종(Dust-1: 컵형, Dust-2: 접이형)을 확보하여 바이오에어로졸 여과효율 평가에 사용하였다(Table 1). 모든 마스크들은 국내에서 가장 많이 사용되는 제품 중 하나로서, 동일 종류의 마스크는 형태 역

Table 1. Features of commercial face masks used in this study

	Mask					
	KF94-1	KF94-2	Surgical-1	KF-AD-1	Dust-1	Dust-2
						
Approved class	KF94	KF94	Surgical	KF-AD	Class 1*	Class 1
Shape	Cup	Flat fold	Flat and flexible with 3 pleats	Flat and flexible with 3 pleats	Cup	Flat fold
Valve	No	No	No	No	Yes	Yes
Layer(s) <sup>†</sup>	2	2	1	1	3	3

\*Classified following the public notice from Ministry of Employment and Labor (2020).<sup>12)</sup>

<sup>†</sup>Without inner and outer layers.

시 추가 고려하여 최종 선정하였다. 국내의 표준시험법에 따라, 각 마스크 시편(10×10 cm)을 6개씩 준비하고, 21±5°C 및 상대습도 85±5%의 멸균된 환경에 하룻밤 방치하여 사용하였다.<sup>7-9)</sup> 시료 준비 및 채취 등에 사용한 모든 도구 및 장비는 고압증기멸균기를 이용하여 멸균을 실시하였다(121°C, 15분).

## 2. 시험용 세균 및 바이러스

시험용 세균으로, 미국 및 유럽연합, 국내 시험법에서 제시하고 있는 황색포도상구균(American Type Culture Collection [ATCC] 6538)을 사용하였다.<sup>7-9)</sup> 대두카제인소화액체배지(tryptic soy broth; MBcell, 기산바이오)에 황색포도상구균을 접종하고 37°C에서 24시간 배양하였다. 이후 10배 단계 희석법으로 대두카제인소화한천배지(tryptic soy agar; MBcell, 기산바이오)에 접종하고 37°C에서 24시간 배양한 후, 평판계수법으로 계수하여 농도를 확인하였다. 이후 실험 전까지 배양한 세균을 냉장고(4°C)에 보관하였다.

시험용 바이러스로, 사람코로나바이러스의 주요 대체바이러스인 쥐코로나바이러스(murine coronavirus [murine hepatitis virus, ATCC VR-764])를 사용하였다. 숙주세포 및 바이러스 배양법은 ATCC가 제시한 방법을 일부 변형하여 사용하였다. L2 세포주를 10% 우태아혈청(fetal bovine serum; Thermo Fisher Scientific) 및 10 mM HEPES (Thermo Fisher Scientific), 10 mM 탄산수소나트륨(sodium bicarbonate; Thermo Fisher Scientific), 10 mM 비필수아미노산(non-essential amino acids; Thermo Fisher Scientific), 50 µg/µL 젠타마이신(gentamicin reagent; Thermo Fisher Scientific)를 포함한 Dulbecco's modified Eagle's medium (DMEM, Gibco)을 활용하여 37°C 및 5% CO<sub>2</sub> 조건에서 배양하였다. 완전히 자라 단층을 형성한 L2 세포에 바이러스를 접종하여 2일간 37°C 및 5% CO<sub>2</sub> 조건에서 배양하였다. 바이러스의 세포 탈출을 돕기 위해, 감염된 세포는 얼림과 녹임을 세 번 반복하였다. 배양액을 회수하여 4°C에서 원심분리하고(5,000×g, 20분), Stericup filter unit (0.22 µm, Merck Millipore)를 사용하여 세포 파편(cell debris)을 제거하였다. 이후, 한외여과기(Amicon Ultra-15 tube, Millipore)로 농축하여 고농도의 바이러스를 확보하였고, 실험 전까지 초저온냉동고(-80°C)에 보관하였다.

## 3. 세균 바이오에어로졸 여과효율 평가

마스크의 세균 바이오에어로졸 여과효율은, 국내의 표준시험법을 일부 변형하여 평가하였다.<sup>7-9)</sup> 황색포도상구균을 펩톤염화나트륨완충액(buffered sodium chloride-peptone solution, pH 7.0)으로 희석하여 각 시험 회당 세균 수를 1,700~3,000 colony forming unit (CFU)로 유지하였다. 여과효율 시험장치(mask bacterial filtration efficiency tester, 에이알티플러스, BFET-1853)를 사용하여 여과효율을 평가하였으며, 이때 평균

입경은 3.0±0.3 µm으로, 펌프 유량은 28.3 L/분으로 조절하였다. 황색포도상구균 세균현탁액을 펌프를 이용하여 분사기에 넣고 다단포집장치의 각 층에 대두카제인소화한천배지를 넣은 다음, 마스크를 장착하지 않은 상태에서 황색포도상구균 에어로졸 발생기와 진공펌프를 작동시켰다. 매 회 에어로졸 발생기를 1분 가동 후 다단포집장치를 1분간 작동하였으며, 시험 종료 후 다단포집장치에서 배지를 회수하고 해당 층수를 표시하여 양성대조군 a로 설정하였다. 이후 마스크 시편을 장착한 뒤 동일한 과정을 6회 반복하여 시험군으로 설정하였으며, 끝으로 마스크 시편을 장착하지 않은 상태에서 시험하여 양성대조군 b로 설정하였다. 황색포도상구균 에어로졸을 발생시키지 않고 다단포집장치만 2분간 작동한 뒤 확보한 배지로부터 얻은 결과를 음성대조군으로 설정하였다. 각 시험이 끝난 후, 확보한 배지는 37±2°C 배양기에서 48±4시간 동안 배양하여 CFU 값을 계수하였다.

## 4. 바이러스 바이오에어로졸 여과효율 평가

마스크의 바이러스 바이오에어로졸 여과효율에 대해 현재까지 표준화된 시험법이 없는 바, 국내의 표준시험법을 바이러스에 맞게 변형하여 평가하였다.<sup>7-9)</sup> 배양 후 쥐코로나바이러스를 1× 인산완충생리식염수(1× phosphate-buffered saline)로 희석하여 각 시험 회당 바이러스 수를 1,700~3,000 plaque forming unit (PFU)로 유지하였다. 세균과 동일한 여과효율 시험장치를 사용하여 여과효율을 평가하였으며, 이때 평균 입경은 3.0±0.6 µm으로, 펌프 유량은 28.3 L/분으로 조절하였다. 바이러스를 적절히 포집하기 위해, 포집배지를 제작하여 다단포집장치에 넣었다. 포집배지는 37°C 상에서, 100 cm<sup>2</sup> 멸균 페트리디쉬에 1× DMEM 및 7% 젤라틴 용액(gelatin, Sigma-Aldrich)을 1:1로 혼합한 용액 15 mL를 넣은 후, 4°C에서 고체화시켜 제작하였다. 이후 세균 여과효율 평가와 동일하게 양성대조군 a, 시험군, 양성대조군 b 및 음성대조군 시험을 진행한 후, 회수한 포집배지를 37°C 배양기에서 20분 동안 정치하여 액상화하였다. 액상화 한 시료의 바이러스 농도 계산을 위한 플라크 어세이(plaque assay) 과정을 살펴보면 다음과 같다. 배양한 L2 세포를 수확하여 세포 배양용 100 cm<sup>2</sup> 디쉬에 분주 후, 2일간 37°C 및 5% CO<sub>2</sub> 조건에서 배양하였다. 이후 시료를 DMEM으로 10배 단계 희석하여 2.5 mL씩 접종하고, 37°C 및 5% CO<sub>2</sub> 조건에서 15분마다 한 번씩 흔들어주며 총 60분 동안 감염시켰다. 다음으로 접종용 배지를 제거하고, 2% 우태아혈청을 포함한 2× DMEM 및 SeaPlaque agarose (Lonza)를 혼합하여 만든 유지용 배지를 12 mL 첨가하여 40분간 실온에 두어 완전히 굳혔다. 이후 37°C 및 5% CO<sub>2</sub> 조건의 항온배양기에서 48시간 배양 후 나타난 플라크를 계수하여 각 시료 내 바이러스 수(PFU)를 계산하였다. 실험 여건으로 인하여 Dust-2 마스크의 바이러스 여과효율 측정은 생략하였다.

### 5. 미생물 여과효율 계산 및 통계 분석

하기 식 (1)에 따라 미생물 여과효율(%)을 구하였고, 음성대조군으로 보정하였다.

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

E: 여과효율(%)

C: 양성대조군 a와 양성대조군 b의 평균 CFU 또는 PFU

T: 시험군에서 측정된 총 CFU 또는 PFU

여과효율 자료에 대해 Prism ver. 9.0.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA)을 활용하여 평균, 표준편차를 구하였다. 또한 Mann-Whitney U test를 실시하여, 마스크 종류에 따른 여과효율 차이 또는 특정 마스크에서의 세균 또는 바이러스 여과효율 차이 등을 비교 분석하였다. p-값(p-value, p) <0.05를 통계적으로 유의한 것으로 판단하였다.

## III. 결 과

### 1. 마스크의 세균 바이오에어로졸 여과효율 평가

다양한 마스크를 대상으로 황색포도상구균 바이오에어로졸 여과효율을 평가한 결과는 Table 2와 같다. 실험한 모든 마스크들이 99.7% 이상의 높은 여과효율을 보였으며, 특히 2종의 KF94 마스크 및 2종의 방진 마스크는 99.9% 이상의 효율을 나타냈다. 덴탈 마스크인 Surgical-1의 경우 상대적으로 가장 낮은 효율을 보였으나, 대상 마스크들의 황색포도상구균 여과효율을 비교한 결과 통계적인 차이를 확인할 수 없었다.

### 2. 마스크의 바이러스 바이오에어로졸 여과효율 평가

다양한 마스크를 대상으로 쥐코로나바이러스를 포함한 바이오에어로졸 여과효율을 평가하였으며, 실험한 모든 마스크들이 99.6% 이상의 높은 여과효율을 보이는 것으로 확인되었다 (Table 2). 특히 KF94-1 및 Dust-1 등 2종의 마스크는 99.9% 이상의 가장 높은 효율을 보였는데, 이것은 Surgical-1 마스크 (99.76±0.15%)와 비교했을 때 통계적으로 유의하게 높은 결

과였다(p<0.05; Mann-Whitney U test).

### 3. 각 마스크의 세균 및 바이러스 바이오에어로졸 여과효율 비교

각 마스크의 황색포도상구균 및 쥐코로나바이러스 바이오에어로졸 여과효율을 비교한 결과를 나타내고 있다. KF94-1 및 Dust-1 마스크는 두 종의 바이오에어로졸에 대해 99.9% 이상의 가장 높은 여과효율을 보였다(Table 2). 또한 KF94-2 마스크는 세균(99.91±0.19%) 및 바이러스 바이오에어로졸 여과효율(99.66±0.76%)이 소폭 차이를 보였다. 그러나 전반적으로 동일 마스크 상 황색포도상구균과 쥐코로나바이러스의 여과효율은 통계적인 차이를 확인할 수 없었다.

## IV. 고 찰

한국은 현 코로나-19 대유행 중, 확고한 바이러스 제어 방안이 없는 상황에서 전파 예방 및 통제를 위해 개인 위생, 사회적 거리두기 및 의약외품에 해당하는 마스크 착용을 권고하고 있다.<sup>13-15</sup> 모델 분석<sup>6</sup> 및 역학조사<sup>16,17</sup> 등을 통해 마스크 착용이 코로나-19 전파를 줄이는데 효과적임이 제시되고 있으나, 실제 바이러스에 대한 마스크의 여과효율을 확인한 연구 결과는 아직까지 보고된 사례가 많지 않다.<sup>18,19</sup> 특히, 국내에서 구입 가능한 의약외품 마스크들을 대상으로 한 바이러스 여과효율 평가는 전무한 실정이다. 비록 현재 국내외에 제시되어 있는 표준 마스크 인증 기준들이 실험 편의를 고려하여 황색포도상구균으로 제정되어 있으나, 실제 바이러스들은 세균과 완전히 다른 형태 및 분자생물학적 특성을 지니고 있음을 간과할 수 없다. 이에, 특히 바이러스 감염의 주된 전파 예방 방법 중 하나인 마스크 착용의 안전성을 담보하고 권장하기 위해서, 연구 기관들은 마스크의 바이러스 여과효율을 검증할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 시중에서 구입 가능한 주요 마스크들에 대한 세균 및 바이러스 바이오에어로졸 여과효율을 평가하였으며 평가한 모든 마스크가 매우 높은 효율을 지니고 있음을 확인하였다.

**Table 2.** Filtration efficiencies of face masks for biological aerosols

Biological aerosol*	Mask <sup>†‡</sup>					
	KF94-1	KF94-2	Surgical-1	KF-AD-1	Dust-1	Dust-2
<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538)	99.99±0.02 <sup>†</sup>	99.91±0.19	99.74±0.33	99.93±0.06	99.92±0.19	99.92±0.15
Murine coronavirus (ATCC VR-764)	99.97±0.08 <sup>a</sup>	99.66±0.76	99.76±0.15 <sup>ab</sup>	99.84±0.25	99.97±0.07 <sup>b</sup>	-

\*Biological aerosol containing test microorganism.

<sup>†</sup>Presented as mean±standard deviation (n=6).

<sup>‡</sup>Lower-case letters indicate statistical significance for comparisons between masks (p<0.05; Mann-Whitney U test).

본 연구에서 사용한 국내 출시 마스크들의 여과효율은 세균 및 바이러스 모두 99.66% 이상으로(Table 2), 95% 이상인 국내 세균 여과효율 기준 뿐만 아니라 미국 및 유럽연합이 제시하고 있는 최고 수준(98% 이상) 역시 만족하고 있다.<sup>7-9)</sup> 기존 연구결과들을 살펴보면, 바이러스 여과효율은 KF94 마스크와 동등한 등급의 N95 마스크 및 FFP-2 마스크에서 각각 99.3~99.9% 및 98.1%, 덴탈 마스크에서 94.7~99.9%로 현재 제시되어 있는 세균 여과효율 기준에 근접하거나 만족하는 것으로 보고한 바 있다.<sup>18,19)</sup> 반면에, 면이나 실크 재질로 만든 천 마스크(fabric mask)나 캔버스 직조 면 재질로 만든 패션 마스크(community mask)는 90% 미만의 바이러스 여과효율을 보여, 상대적으로 여과 효과가 떨어졌다.<sup>18,19)</sup> 따라서 국내에서 권고하는 필터를 포함한 KF94, 덴탈, 비말차단용 등의 의약외품 마스크가 천 및 패션 마스크보다 코로나-19 전파 감소에 보다 크게 기여할 수 있을 것이라 여겨진다. 또한 바이러스를 포함한 에어로졸에 대한 연구 결과로 미루어 볼 때(Table 2), 병원 및 요양시설 등 고위험 장소에는 본 연구에서 사용한 마스크와 같이 식품의약품안전처와 같은 규제기관으로부터 여과효율이 검증된 마스크를 권장할 필요성이 있다.

현재 표준화된 바이러스 여과효율 측정법이 없는 관계로, 연구 결과들이 차이를 보일 수 있는 여지가 있다. 실제 본 연구에서는 임팩터(impactor) 방식<sup>18)</sup>을 사용한 기기를 활용하였기에, 임핀지(impinge) 등의 다른 포집 방식<sup>19)</sup> 및 별도 기기를 활용하여 측정할 경우 바이러스 회수율이 차이가 날 수 있으며, 이는 여과효율 결과 값에 영향을 미칠 수 있다.<sup>20)</sup> 또한 본 연구는 코로나바이러스의 대체미생물로서 쥐코로나바이러스를 사용한 반면, MS2 파지(phage)<sup>18)</sup> 나 고양이코로나바이러스(feline coronavirus)<sup>19)</sup> 등을 사용하는 등, 각 연구마다 활용한 시험용 바이러스가 다르다. 각 바이러스들은 크기 및 모양 등에 차이가 있어, 마스크의 여과효율에 영향을 미칠 수 있다.<sup>11)</sup> 따라서 향후 마스크 종류나 제조회사 등에 의한 여과효율의 차이는, 향후 국가 또는 글로벌 수준에서 제시된 통일된 표준시험법으로 평가했을 때 보다 큰 신뢰성을 담보할 수 있을 것으로 여겨진다.

본 연구에서 사용한 바이러스 여과효율 시험 방법은 기존에 제시된 바 있는 세균 여과효율 시험 방법과 전반적으로 동일하되, 숙주가 있어야 증식할 수 있는 바이러스의 특성을 고려하여 포집배지를 통한 바이러스 포집 후 플라크 어세이로 계수하도록 변화를 주었다. 또한 세균 여과효율 시험장치와 동일한 장치를 사용할 수 있어 호환성이 높다는 장점이 있다. 코로나-19와 진화적으로 유사하여, 다양한 용도에서 성공적인 코로나-19의 대체바이러스로 활용하고 있는 쥐코로나바이러스를 대상 바이러스로 사용했다는 부분 역시 향후 활용성을 높일 수 있는 부분이다.<sup>21-23)</sup> 따라서 본 연구 방법 및 결과는 차후 국내 및 국제적으로 마스크 바이러스 여과효율 평가에 대한 표

준시험법을 제정할 시 기초 자료로써 사용될 수 있을 것이다.

본 연구는 여과효율의 측정에 있어 각 마스크들의 시편을 사용하여, 마스크 설계 자체의 오류 및 각 개인의 얼굴 모양 등에 따른 얼굴-마스크 간 밀착도의 차이를 고려하지 않은 바, 현실 상황을 완벽하게 반영한 조건을 구축하지 못한 한계점이 있다. 실제 마스크 밀착이 제대로 되지 않을 경우 여과효율이 크게 감소한다는 연구결과가 보고된 바 있다.<sup>24,25)</sup> 따라서, 마스크 밀착도를 고려한 후속 바이오에어로졸 여과효율 연구를 통하여 보다 현실적이고 실용적인 결과를 산출할 필요성이 있다. 또한 본 연구에서 적용한 미생물 현탁액의 에어로졸로 인해 발생한 액적(droplet)은 실제 침이나 콧물 등 다양한 성분들이 포함되어 있는 미생물 비말과 비교 시 그 성상이 다를 수 있으며, 건조 후 남은 잔여물 역시 미생물 이외의 성분들을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에 적용한 바이오에어로졸의 물리적 크기 및 분포가 현실을 대표한다고 가정하기에는 한계가 있어, 다양한 실험을 통해 보다 적합한 에어로졸 시험법을 제시할 필요성이 있다. 아울러 현재 시장에 출시된 마스크의 종류 및 특징들이 실로 다양한 바 본 연구에서 사용한 마스크들의 여과효율을 선불리 일반화할 수는 없으며, 이에 더욱 다양한 마스크들을 대상으로 한 충분한 규모의 후속 연구가 이루어질 필요성이 있다. 향후 보다 확고한 실험법을 바탕으로, 코로나-19 이후 올 수 있는 대규모 감염증들에 대비하기 위해 다양한 세균 및 바이러스에 대한 여과효율을 파악하여 마스크 착용의 보편성 및 정당성에 대한 자료를 확보할 필요가 있다.

## V. 결 론

본 연구는 국내에서 구입 가능한 6종의 마스크를 선택하여 세균 및 바이러스를 포함한 바이오에어로졸의 여과효율을 평가함으로써, 마스크 착용에서 기대할 수 있는 미생물학적 안전성 확보와 관련한 기초 정보를 확보하고자 수행되었다. 대상 마스크로 KF94 마스크 2종, 덴탈 마스크 1종, 비말차단용 마스크 1종 및 방진 마스크 2종을 선정하였으며, 시험용 세균으로 황색포도상구균을, 시험용 바이러스로 사람코로나바이러스의 주요한 대체미생물인 쥐코로나바이러스를 사용하였다. 실험한 모든 마스크들은 바이오에어로졸 내 황색포도상구균에 대해 99.7% 이상의 여과효율을 보였으며, 쥐코로나바이러스에 대해 99.6% 이상의 여과효율을 보였다. 특히 KF94-1 및 Dust-1 마스크는 두 종의 바이오에어로졸에 대해 가장 높은 여과효율을 보였다. 이는 기존 연구들에 비해 뛰어난 수치로, 특히 병원 및 요양시설 등의 고위험 장소에는 KF94 등 여과효율이 검증된 마스크를 권장할 필요성이 있다. 아울러 본 연구에서 사용한 바이러스 여과효율 시험 방법은 기존 세균 여과효율 시험 방법을 바이러스에 알맞게 변화를 주고 성

공적인 코로나-19 대체미생물인 쥐코로나바이러스를 적용한 것으로, 향후 바이러스 표준시험법 제정 시 기초 자료로 충분히 활용할 수 있다. 본 연구 결과로 미루어 볼 때, 현재까지 확보한 코로나-19 바이러스 제어 방안이 없는 상황에서, 검증된 마스크 작용은 이러한 호흡기 감염증들의 전파를 예방할 수 있는 주요한 방법으로 권고될 필요성이 있다고 사료된다.

## 감사의 글

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

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

1. Worldometer. Reported cases and deaths by COVID-19 coronavirus pandemic. Available: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> [accessed 4 March 2022].
2. Statistics Korea. COVID-19 dashboard. Available: [https://kosis.kr/covid\\_eng/covid\\_index.do](https://kosis.kr/covid_eng/covid_index.do) [accessed 4 March 2022].
3. Centers for Disease Control and Prevention. Principles of epidemiology in public health practice: an introduction to applied epidemiology and biostatistics, 3rd ed. Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services; 2006.
4. Otter JA, Donskey C, Yezli S, Douthwaite S, Goldenberg SD, Weber DJ. 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.
5. Mathieu E, Ritchie H, Ortiz-Ospina E, Roser M, Hasell J, Appel C, et al. A global database of COVID-19 vaccinations. *Nat Hum Behav.* 2021; 5(7): 947-953. Erratum in: *Nat Hum Behav.* 2021; 5(7): 956-959.
6. Cheng Y, Ma N, Witt C, Rapp S, Wild PS, Andreae MO, et al. Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. *Science.* 2021; 372(6549): 1439-1443.
7. 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.
8. European Committee for Standardization (CEN). SIST EN 14683:2019+AC:2019: Medical face masks - requirements and test methods. Brussels: CEN; 2019.
9. Ministry of Food and Drug Safety. Korean standard and test method for quasi-drugs. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2021.
10. Jeong SB, Ko HS, Seo SC, Jung JH. Evaluation of filtration characteristics and microbial recovery rates of commercial filtering facepiece respirators against airborne bacterial particles. *Sci Total Environ.* 2019; 682: 729-736.
11. Tcharkhtchi A, Abbasnezhad N, Zarbini Seydani M, Zirak N, Farzaneh S, Shirinbayan M. An overview of filtration efficiency through the masks: mechanisms of the aerosols penetration. *Bioact Mater.* 2020; 6: 106-122.
12. Ministry of Employment and Labor. Public notice on safety certificate for protective equipment (notice no. 2020-35). Sejong: Ministry of Employment and Labor; 2020.
13. Jang JY, Kim SW. Evaluation of filtration performance efficiency of commercial cloth masks. *J Environ Health Sci.* 2015; 41(3): 203-215.
14. Kang S, Kim S, Yoon CS, Lee K. Evaluation of the filtration efficiency and facial inhalation resistance of various commercial masks. *J Environ Health Sci.* 2021; 47(3): 292-301.
15. Central Disaster and Safety Countermeasure Headquarters. Basic guidelines for distancing in daily life. Available: [http://ncov.mohw.go.kr/en/guidelineView.do?brdId=18&brdGubun=181&dataGubun=&ncvContSeq=2763&contSeq=2763&board\\_id=&gubun=#](http://ncov.mohw.go.kr/en/guidelineView.do?brdId=18&brdGubun=181&dataGubun=&ncvContSeq=2763&contSeq=2763&board_id=&gubun=#) [accessed 4 March 2022].
16. Zeng N, Li Z, Ng S, Chen D, Zhou H. Epidemiology reveals mask wearing by the public is crucial for COVID-19 control. *Med Microecol.* 2020; 4: 100015.
17. Filonets T, Solovchuk M, Gao W, Sheu TW. Investigation of the efficiency of mask wearing, contact tracing, and case isolation during the COVID-19 outbreak. *J Clin Med.* 2021; 10(13): 2761.
18. Whiley H, Keerthirathne TP, Nisar MA, White MAF, Ross KE. Viral filtration efficiency of fabric masks compared with surgical and N95 masks. *Pathogens.* 2020; 9(9): 762.
19. Siller P, Reissner J, Hansen S, Kühl M, Bartel A, Schmelzeisen D, et al. Innovative textiles used in face masks: filtration efficiency and self-disinfecting properties against coronaviruses. *Nanomaterials (Basel).* 2021; 11(8): 2088.
20. Raynor PC, Adesina A, Aboubakr HA, Yang M, Torremorell M, Goyal SM. Comparison of samplers collecting airborne influenza viruses: 1. Primarily impingers and cyclones. *PLoS One.* 2021; 16(1): e0244977.
21. Körner RW, Majjouti M, Alcazar MAA, Mahabir E. Of mice and men: the coronavirus MHV and mouse models as a translational approach to understand SARS-CoV-2. *Viruses.* 2020; 12(8): 880.
22. Ma B, Gundy PM, Gerba CP, Sobsey MD, Linden KG. UV inactivation of SARS-CoV-2 across the UVC spectrum: KrCl\* excimer, mercury-vapor, and light-emitting-diode (LED) sources. *Appl Environ Microbiol.* 2021; 87(22): e0153221.
23. String GM, White MR, Gute DM, Mühlberger E, Lantagne DS. Selection of a SARS-CoV-2 surrogate for use in surface disinfection efficacy studies with chlorine and antimicrobial surfaces. *Environ Sci Technol Lett.* 2021; 8(11): 995-1001.
24. Konda A, Prakash A, Moss GA, Schmoldt M, Grant GD, Guha S. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano.* 2020; 14(5): 6339-6347. Erratum

in: *ACS Nano*. 2020; 14(8): 10742-10743.

25. Ardon-Dryer K, Warzywoda J, Tekin R, Biros J, Almodovar S, Weeks BL, et al. Mask material filtration efficiency and mask fitting at the crossroads: implications during pandemic times. *Aerosol Air Qual Res*. 2021; 21(7): 200571.

#### 〈저자정보〉

최수은(박사과정), 최도선(석사과정), 장성재(박사과정), 박성준(연구원), 윤충식(교수), 이기영(교수), 고광표(교수), 이정훈(교수)