

보건용 마스크 재사용을 위한 가열과 자외선 살균이 마스크의 안면부 흡기저항 및 섬유구조에 미치는 영향

정재연¹⁾ · 이주영^{1,2)†}

¹⁾서울대학교 의류학과

²⁾서울대학교 생활과학연구소

Effects of Heating and UV Sterilization of Repeatedly Reused Face Masks on Inhalation Resistance and Fiber Structure

Jae-Yeon Jung¹⁾ and Joo-Young Lee^{1,2)†}

¹⁾Dept. of Textiles, Merchandising, and Fashion Design, Seoul National University; Seoul, Korea

²⁾Research Institute for Human Ecology, Seoul National University; Seoul, Korea

Abstract: This study aimed to evaluate the inhalation resistance(IR) and fiber structure of disposable masks when exposed to repeated heating and ultraviolet(UV) sterilization. The experiments consisted of a lab-scale and a field test. For the lab-scale test, KF94 and N95 masks were selected and a trial was composed of three repetitions of an 80-min sterilization. For the field test, a subject participated over four days, of which a KF94 was worn without sterilization, and the same trial was conducted during the next four days with daily sterilization. The results showed that the IR of the KF94 mask(9.5 Pa) gradually increased according to the sterilization up to the second repetition(15.6 Pa) but decreased at the third treatment(9.7 Pa). However, the N95 mask did not show any tendency of IR during the repetitions. Microscope photos showed several warped or blackened fibers in the stiffener layer after the repeated sterilization. After wearing a KF94 mask for four consecutive days, its IR decreased until the three days but increased the fourth day, whereas another KF94 mask with sterilization showed an increase in IR for the four days. In the microscope-photos after the consecutive four days, outside fibers and stiffener layers were warped or became less dense. In summary, the IR of the KF94 mask slightly increased through the three~four rounds of heating and UV sterilizations, but the fiber structures were not significantly deformed by the repeated sterilization. To reduce discarded mask waste, the repeated sterilization of masks can be recommended.

Key words: face mask (보건용 마스크), COVID-19 (코로나19 바이러스), inhalation resistance (흡기저항), heating and UV sterilization (가열 및 자외선 살균), reuse (재사용)

1. 서 론

식품의약품안전처의 인증을 받아 판매되는 국내 보건용 마스크(KF80, KF94, KF99)는 본래 일회 착용 후 폐기를 원칙으로 하기 때문에 재사용에 따른 살균법을 별도로 제시하지 않는다. 그러나 2020년 4월 이후 전세계로 확산된 코로나 바이러스(COVID-19)의 대유행으로 일상 생활 중 마스크 착용이 의무화되면서 일회용 보건용 마스크를 장기간 재사용하는 사례가 늘고 있다. 2019년 상반기 국내 성인남녀 총 2,012명을 대상으로

수행된 설문조사에 따르면 당시 고농도 미세먼지 시준임에도 일회용 보건용 마스크를 착용해본 적이 전혀 없다는 응답자가 무려 응답자 중 28%(Lee et al., 2020)였다는 사실로 볼 때, 지난 2년 간 COVID-19로 인해 일상생활의 변화가 얼마나 급격히 이루어졌는지 체감할 수 있다. 현재, 코로나 바이러스 감염 위험을 줄이기 위해 사회적 거리 두기와 백신 접종과 같은 정책이 함께 시행되고 있으나 마스크 의무 착용 정책도 당분간 유지될 것으로 예상된다.

일회용으로 판매되는 보건용 마스크를 1회만 착용하고 폐기하는 대신 여러 번 착용하는 사례는 국내에서 이루어진 설문조사 연구에서도 확인된다. 2020년 8월에 발표된 Kwon et al. (2020)의 연구에 따르면 보건용 마스크 한 개를 1회만 착용하고 폐기한다는 응답은 23.6%에 불과하였던 반면, 2~3일 착용하고 폐기한다는 응답자는 전체 응답자의 54.7%로 가장 많았다. 사실, COVID-19 이전 국내 고농도 미세먼지 대응 마스크 착용 행동을 조사했던 Lee et al.(2020)의 연구에서는 응답자의

†Corresponding author; Joo-Young Lee

Tel. +82-2-880-8746

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

© 2021 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

26%가 2일 이상 연속 착용한다고 응답하였으며, 2018년 보건 통계조사(Consumer Korea, 2018)에서도 마스크 착용자들 중 51%가 이미 사용한 마스크를 재사용한다고 응답했고, 재사용 횟수로는 2회 사용 후 폐기한다는 응답이 가장 높았다. Cho et al.(2020)은 마스크 반복 사용에 따른 성능 변화를 평가하기 위해 2인의 피험자를 대상으로 KF94 마스크를 매일 두 시간씩 연속 4일 착용하게 하면서 마스크의 분진포집효율 변화를 측정하였다. 측정 결과, 최초 80%의 분진포집효율을 보였던 마스크는 4일 연속 착용 후 50%의 차단율을 보였다. 이는 피험자 2인이 특정 브랜드의 마스크를 착용하여 얻어진 결과이기 때문에 모든 마스크에 대해 일반화할 수는 없으나, 하루 2시간씩 4일 연속 착용에 의해 마스크의 분진포집효율이 상당히 저하될 수 있음을 시사한다.

한편, 2020년 COVID-19의 대규모 확산 초기 미국에서는 자국 내 마스크 공급 부족으로 인해 일회용 부직포 마스크(N95 마스크)의 효과적 재사용에 관한 연구들이 다수 보고되었다(Celina et al., 2020; Gertsman et al., 2020; Juang & Tsai, 2020; O’Hearn et al., 2020; Ou et al., 2020; Rubio-Romero et al., 2020; Zorko et al., 2020). 특히, 바이러스 노출 위험이 가장 높은 의료진들이 병원 현장에서 마스크를 재사용해야 할 경우, 마스크의 오염을 효과적으로 제거하면서 분진포집효율 저하를 최소화할 수 있는 살균 처리 방법에 대한 연구들이 연속 출판되었다(Grinshpun et al. 2020; Ibanez-Cervantes et al., 2020). 그러나, 2021년 COVID-19 범유행이 장기화되면서 전 세계적으로 매일 버려지는 폴리프로필렌 소재인 일회용 마스크의 양이 기하급수적으로 증가했고, 지난 1년 동안 국내 마스크 생산량도 67억장에 이른다(Lee, 2021). 이로 인해, 일회용 마스크 폐기물이 환경오염에 미치는 영향을 어떻게 해결할 수 있는지에 대한 논의들이 더 큰 이슈가 되고 있다. 즉, 2020년 초반 마스크 공급 부족으로 인한 재사용 방법 개발에서, 2021년 현재 마스크 공급 과잉으로 인한 폐기물 감소 관점에서의 재사용 방법으로 연구자들의 관심이 이동하였다.

Rodriguez-Martinez et al.(2020)의 리뷰에 따르면 호흡기 보호구 마스크에 부착된 인플루엔자 바이러스는 약 6일이 지난 이후에도 발견된 바 있기 때문에, 재사용할 경우 마스크에 부착된 오염물질을 효과적으로 살균할 수 있는 방법이 적용되어야 한다. Rodriguez-Martinez et al.(2020)은 보건용 마스크 살균법을 평가한 총 15개의 논문을 리뷰하면서 다음과 같이 총 14종의 살균법을 정리하였는데 이중 자외선 살균(UV-C, 254 nm 파장, 30분~60분 노출)과 기화 과산화수소 처리가 가장 효과적인 방법으로 추천된다: ① 자외선(ultraviolet irradiation), ② 기화 과산화수소(vaporized hydrogen peroxide), ③ 에틸렌 옥사이드(ethylene oxide), ④ 전자렌지(microwave oven), ⑤ 표백제(bleach), ⑥ 열처리 (heat treatment), ⑦ 에탄올(ethanol), ⑧ 액상 과산화수소(liquid hydrogen peroxide), ⑨ 고온고압기 (autoclave), ⑩ 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol), ⑪ 살균(청소용) 티슈(wipe products), ⑫ 수도물 세척(tap water), ⑬

비누 세척(soap and water), ⑭ 전통적 전기 밥솥(traditional electric rice cooker).

Boskoski et al.(2020)도 리뷰를 통해 재사용된 마스크 살균에 가장 효과적인 방법으로 자외선 살균법을 제안했다. 전자렌지, 표백제, 에탄올, 액상 과산화수소, 이소프로필 알코올, 비누 세척법 등을 보건용 마스크에 적용한 경우, 분진포집효율의 저하 혹은 마스크의 외관 손상 등이 관찰된 반면, 자외선 살균이나 기화 과산화수소를 처리한 경우에는 마스크의 분진포집효율이 손상되지 않으면서 생물학적 오염이 효과적으로 제거되었다. UV-C 살균법(약 15분)은 현재 미국 University of Nebraska의 메디컬 센터에서 일회용 N95 마스크에 대해 사용되고 있다(Mackenzie, 2020). 가정에서도 쉽게 시도해 볼 수 있는 전자렌지 살균법의 경우 세균과 바이러스 제거에는 효과적이었지만 마스크 내부 코 부위의 클립과 같은 금속 구성요소들이 녹아 살균법으로 추천되지는 않았다. Tech et al.(2020)은 자외선 조사와 가열법을 조합한 하이브리드 살균법을 적용한 경우 분진포집효율 성능이 유지되면서 살균력도 높았다고 보고하였다.

이처럼 보건용 마스크 재사용을 위한 살균법을 다룬 연구들은 대체로 살균법 적용이 여과효율(분진포집효율)이나 마스크의 외관 변화에 미치는 영향을 다루고 있으며, 마스크의 흡기 저항이나 미세 섬유 구조에 미치는 영향을 보고한 연구는 상대적으로 드물다. 그러나 일상생활 중 마스크를 재사용할 경우 볼거릴 수 있는 불쾌감은 호흡 시 발생된 수분이나 오염물 축적으로 인한 흡기저항 증가 여부와 관련된다. Purushothaman et al.(2021)은 COVID-19 범유행 동안 N95 마스크 및 서지컬 마스크를 착용하고 병원에서 근무하는 의료진 250명을 대상으로 설문조사를 실시하였고, 조사 결과 병원의료진들 중 58%가 마스크의 장시간 착용으로 인해 호흡이 어렵다고 응답하였다. 이는 마스크를 교체하지 않고 연속 장시간 착용하면서 마스크의 흡기저항이 증가했기 때문인 것으로 유추해 볼 수 있다. 마스크의 흡기저항이란 식품의약품안전처의 보건용 마스크 인증 기준 항목 중 하나로, 공기를 흡입할 때 마스크 내부와 인체 호흡기 간에 증가하는 압력으로, 마스크 필터의 여과효율이 높을수록 흡기저항이 증가하는 경향이 있으나, 마스크 필터 소재 자체의 특성 뿐만 아니라 마스크의 디자인과 얼굴 맞음새, 착용법 등에도 큰 영향을 받는다고 알려져 있다. 마스크에 살균법을 적용하면서 재사용하게 될 경우, 생물학적 살균 효과와 함께, 마스크 필터의 여과효율 손상이 적으면서, 흡기저항을 감소시킬 수 있는 살균법을 적용할 수 있다면, 정부 차원에서 보건용 마스크의 재사용을 상황에 맞게 권장할 수 있을 것이다. 이는 폐기된 보건용 마스크 쓰레기에 의한 환경 오염 감소 측면에서도 충분히 권장될 만 하다.

한편, 대부분의 마스크 재사용을 다룬 선행 연구들은 미사용된 새 마스크를 이용하여 실시된 연구들로 실제 착용자의 호흡 및 외부 오염 물질 등에 의해 오염된 마스크를 실험 시료로 사용한 연구는 상대적으로 매우 드물다. 그러나 실험용 박테리아 혹은 바이러스에만 노출된 미사용된 새 마스크를 대상으로

얻어진 결과를 실제 사람이 수일간 사용한 마스크에 대해 바로 적용할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 현재 보건용 마스크 필터의 여과효율을 손상시키지 않는 살균법으로 잘 알려진 가열법과 자외선 살균법을 조합한 방법으로 보건용 마스크를 연속 살균할 경우 마스크의 흡기저항의 변화를 관찰하였다. 동시에, 실제 피험자가 동일한 마스크를 4일 연속 착용하고 일상생활을 수행하는 동안 살균법 처치 유무가 마스크의 흡기저항에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 연구방법

2.1. 새 (미착용) 마스크에 대한 자외선·가열 혼합 살균 반복 처리의 영향

국내 시판 중인 KF94 마스크(사이즈 Large, 3 panels, 가로 접이형, 6개)와 미국 NIOSH 인증 N95 마스크(1870+ Aura, 3M, 6개)를 실험 시료로 선정하였다(Table 1). 미국 N95 마스크를 추가 선정 한 이유는 현재 마스크 재사용과 살균을 다룬 대부분의 선행연구들이 N95 마스크를 시료로 하기 때문이다. 즉, 선행연구들과의 비교 분석을 위해 미국 N95 마스크를 본 연구의 시료에 추가하였다. 본 연구에서 선정한 살균법은 Tech et al.(2020)의 연구에서 제시된 방법을 바탕으로, 가열과 자외선 살균 기능을 모두 가지고 있는 열풍건조기(HDD-9000, Hanil, Korea)를 이용하여, 가열(40분)과 자외선 살균(40분)이

조합된 방법(마스크 한 개당 총 80분 살균)이었다. 실험용 마스크 여섯 개 중 반은 가열법을 먼저 적용하였고, 나머지 반에는 자외선 조사법을 먼저 적용하여, 가열법과 자외선 조사법의 적용 순서에 의해 초래될 수도 있는 영향을 배제하였다. 자외선 살균은 열풍건조기 내 부착된 UV-C 램프(15 W)로 254 nm의 파장에서 시행되었고, 가열은 60°C에서 실시되었다. 이러한 80분 혼합 살균 처리 프로토콜은 총 3회 연속 시행되었고, 혼합 살균 처리 시행 전(미처리)과 1회차, 2회차, 3회차 살균법 적용 직후 각 마스크(KF94 마스크 6개, N95 마스크 6개)의 안면부 흡기저항을 측정하여 마스크당 총 4회씩 측정되었다(Fig. 1).

측정방법은 식품의약품안전처 기준에 따라 흡기유량 30 liter per minute (LPM)에서 시행되었다. 흡기저항 측정을 위해 안면부 흡기저항 측정 기기(ART-1651, ARTplus Co, Korea)를 이용하였으며, 측정이 이루어진 실험실의 환경온도와 습도는 각각 20~25°C, 40~60%RH로 유지되었다. 실험용 KF 마스크 6개와 N95 마스크 6개 중 각 1개씩을 선택하여 주사전자현미경(JSM-7800F Prime, JEOL Ltd, Japan) 사진을 총 3회(살균 처리 전, 살균 2회차, 살균 3회차) 촬영하였다. 예비 측정 결과, 1회 살균 후 마스크 구조에 현저한 변화는 발견되지 않았기 때문에, 실험 설계의 경제성을 고려하여 본 실험의 살균 1회차 SEM 사진은 촬영하지 않았다. 마스크 한 개당 마스크의 정중앙 부분에서 총 3장 (겉감, 중간재[스티프너], 필터)의 시료(개당 1 cm

Table 1. Physical characteristics of KF94 and N95 masks used in this study

	KF94	N95
Face mask		
Dry mass (g)	4.4	8.9
Design	Horizontal 3 panels	Horizontal 3 panels
Band type	Ear loop	Head band
Size	Large	Large
Filtration level (%)	≥ 94	≥ 95
Material	Melt-blown polypropylene (PP), Spun-bonded PP	Melt-blown PP, Spun-bonded PP
Dead space (mm ³) ^a	106,627	145,924
Surface area of mask (cm ²)	219	276

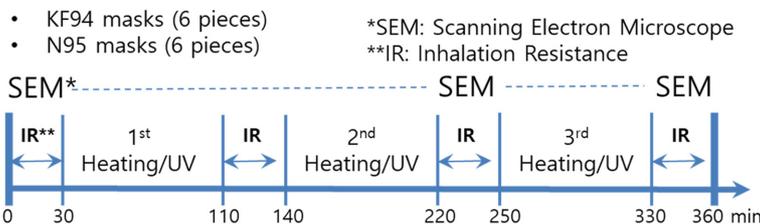


Fig. 1. Experimental protocol of measuring inhalation resistance according to the heating and UV sterilization of KF94 and N95 masks.

× 1 cm)를 채취하여 전자현미경 사진을 촬영하였다. 각 시료당 앞면과 뒷면을 모두 촬영하였고 주사전자현미경 사진의 해상도는 150배로 표현하였다. 즉, 주사전자현미경 촬영에서 얻어진 사진은 총 36장이었다(마스크 2종 × 3부위 × 앞면과 뒷면 × 3회 촬영 = 2 × 3 × 2 × 3 = 36장). 추가로, 살균처리 횟수가 증가하면서 마스크 섬유구조 손상 등으로 인해 중량이 감소하는지 확인하기 위해 전자저울(F150S, Satorius, Germany)을 사용하여 살균처리 전과 각 살균처리 단계별 마스크 중량을 측정하였다.

2.2. 일상생활 중 연속 착용 시 자외선·가열 혼합 살균 처리의 영향

호흡기 및 얼굴 피부 질환이 없는 건강한 20대 여성 1인이 피험자로 참여하였다. 국내 KF94 마스크 (3 panel, 가로접이형, ear loop) 2개를 시료로 사용하였다. 마스크 한 개는 자외선·가온 혼합 살균 처리 없이 4일 연속 착용에 사용되었으며, 다른 한 개는 매일 오전 자외선·살균 처리 후 4일 연속 착용 실험에 사용되었다(실험 진행 상, 마스크를 종일 사용한 직후인 저녁에 살균 처리를 하지 않고 당일 아침 착용 전에 매일 살균 함). 매일 아침 9시 30분~10시 사이 해당 마스크의 안면부 흡

기저항을 측정한 후, 오전 10시부터 오후 5시까지 1일 7시간 동안 마스크를 착용하였고, 살균 조건인 경우 다음날 아침 흡기저항 측정 전 80분 동안 마스크를 살균하였다(Table 2). 주사 전자현미경 사진은 마스크 착용 1일차와 4일차 저녁 6시~7시 사이에 이루어졌다. 흡기저항 측정 및 전자현미경 사진 촬영은 실험 1과 동일한 방법으로 측정되었다. 주사전자현미경 촬영에서 얻어진 사진은 총 16장이었다(마스크 1종 × 4부위 × 앞뒤 × 2회 = 4 × 2 × 2 = 16장).

3. 결 과

3.1. 미사용 KF 마스크에 대한 자외선·가열 혼합 살균 반복 처리의 영향

미사용 KF94 마스크에 자외선·가온 혼합 살균 처리를 반복한 경우, 1~2회 반복 처리시까지 흡기저항은 점점 상승하였으나, 3회 살균처리 직후 흡기저항은 감소하였다(Fig. 2a). 반면, 미사용 N95 마스크의 흡기저항은 3회 살균 처리 동안 큰 변화 없이 초기 수준이 유지되었다(Fig. 2b). KF94 마스크와 N95 마스크의 초기 중량은 3회의 살균 처리 동안 크게 변하지 않

Table 2. Time processes of mask wear trials during the control and experimental conditions for the consecutive four days

Condition	Process	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4
No treatment (Control)	Inhalation resistance	09:30-10:00	09:30-10:00	09:30-10:00	09:30-10:00
	Wearing mask	10:00-17:00	10:00-17:00	10:00-17:00	10:00-17:00
	SEM*	18:00-19:00			18:00-19:00
UV+Heating hybrid condition	UV+Heating (80 min)	08:10-09:30	08:10-09:30	08:10-09:30	08:10-09:30
	Inhalation resistance	09:30-10:00	09:30-10:00	09:30-10:00	09:30-10:00
	Wearing mask	10:00-17:00	10:00-17:00	10:00-17:00	10:00-17:00
	SEM	18:00-19:00			18:00-19:00

*SEM : Scanning Electron Microscope.

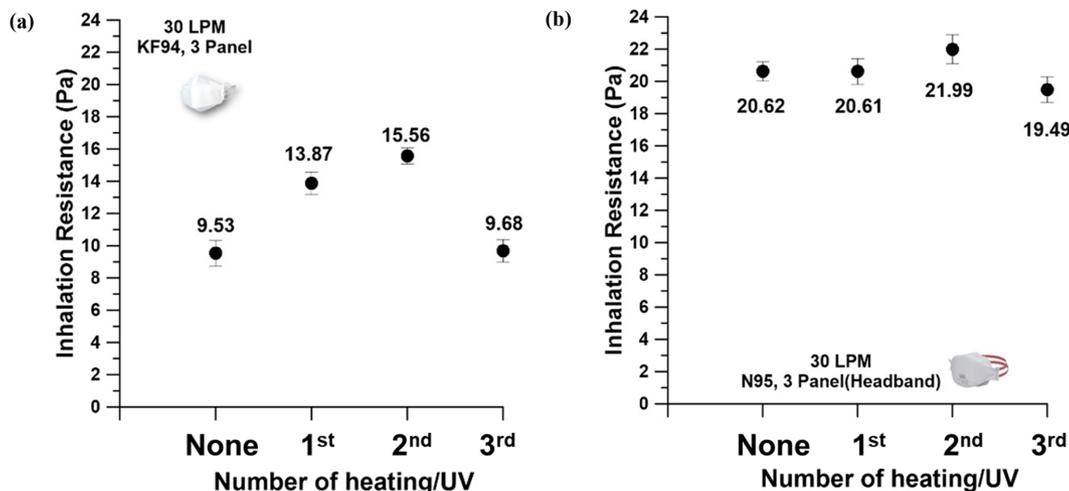
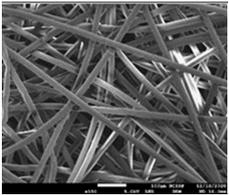
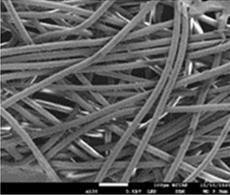
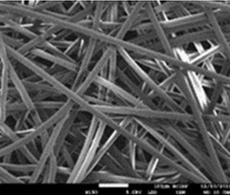
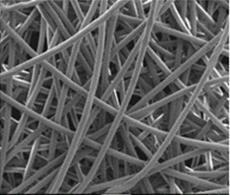
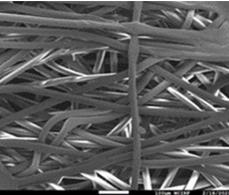
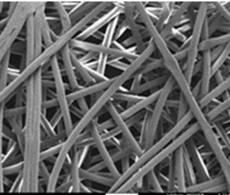
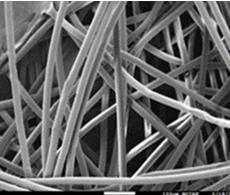
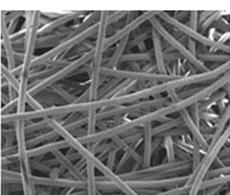
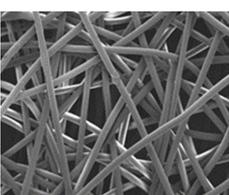
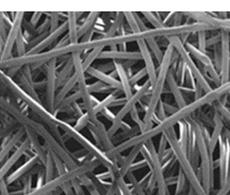
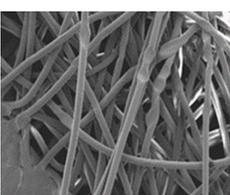


Fig. 2. Changes in inhalation resistance according to UV·heating hybrid treatments for consecutive three times: KF94 mask (a) and N95 mask (b). The 1st value was measured from masks with no UV·heating treatment (N = 6 for KF94 and N = 6 for N95; Data are expressed as mean ± SD).

Table 3. Changes in the 1st-layer structures (spun-bonded polypropylene, SB PP) of KF94 and N95 masks according to consecutive heat and ultraviolet hybrid treatments

	SB PP_Outside (×150)		SB PP_Inside (×150)	
	KF94 mask	N95 mask	KF94 mask	N95 mask
Pre-treatment				
After 2 nd treatment				
After 3 rd treatment				

*Note: Particular damage or changes after the 3rd treatment were not found in the the outer layer of KF94 and N95 masks.

았으며, 총 3회의 살균처리 과정 중 4회 측정된 마스크의 중량 및 표준편차는 N95 마스크 9.1 ± 0.2 g, KF94 마스크 4.2 ± 0.2 g로 살균처리 횟수 증가에 따른 큰 차이는 관찰되지 않았다.

살균 처리 전과 살균 2회차, 살균 3회차를 마친 직후 촬영된 주사전자현미경 사진을 Table 3~5에 정리하였다(살균 1회차 촬

영은 생략하였다). 살균 미처리 상태인 새 마스크의 전자현미경 사진 구조를 보면, N95 마스크의 스티프너 섬유가 KF94 스티프너에 비해 좀더 균일하게 배열되어 있음을 알 수 있다 (Table 2). 살균 처리가 반복되면서 KF94 마스크의 스티프너 구조에서 변화가 두드러졌다(Table 3,4). 반면, KF94와 N95 마스크 모두 필터(MB PP)에서의 구조 변화는 크게 발견되지 않

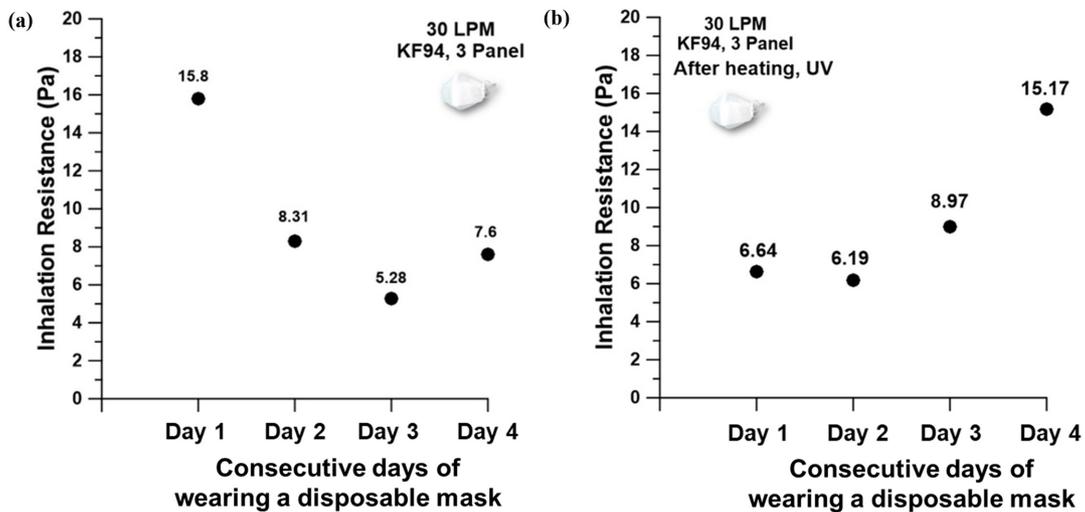
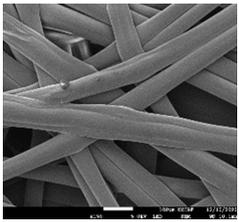
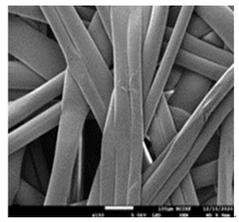
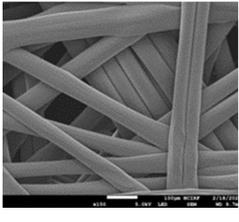
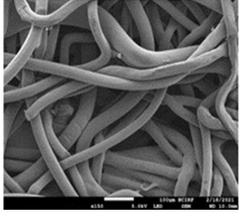
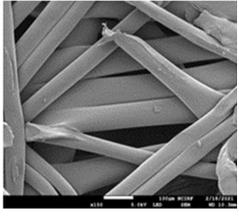
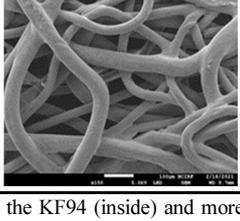
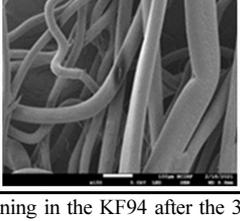


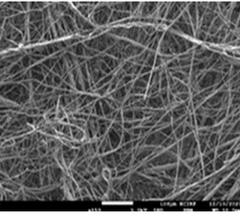
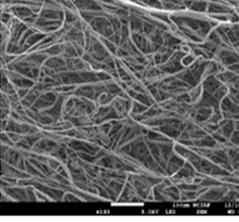
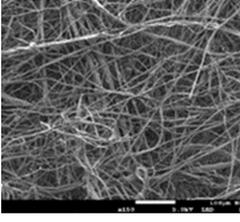
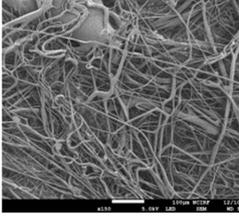
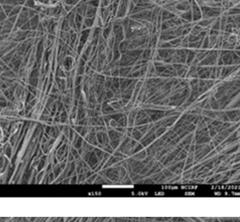
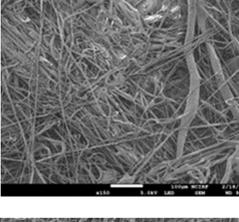
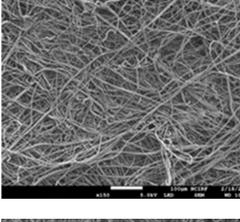
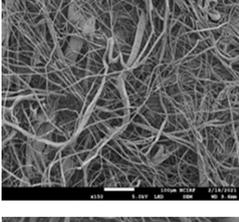
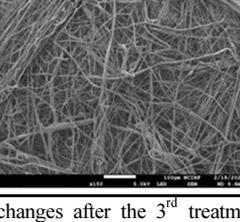
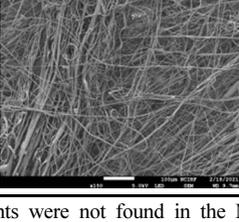
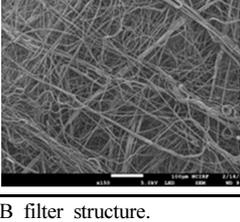
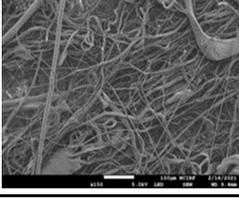
Fig. 3. Changes in the inhalation resistance of a KF94 face mask during wear trials for 4 days in daily lives: (a) Control, and (b) Treatment.

Table 4. Changes in stiffener-structures of KF94 and N95 masks according to consecutive heat and ultraviolet hybrid treatments

	Stiffener_Outside (×150)		Stiffener_Inside (×150)	
	KF94 mask	N95 mask	KF94 mask	N95 mask
Pre-treatment				
After 2 nd treatment				
After 3 rd treatment				

*Note: Particular burn spots in the KF94 (inside) and more twisted fibers with greater opening in the KF94 after the 3rd treatment were found in the stiffener structure, while particular damage or changes after the 3rd treatment were not found in the N95 stiffener structure.

Table 5. Changes in the melt-blown(MB) polypropylene filters of KF94 and N95 masks according to consecutive heat and ultraviolet hybrid treatments

	MB filter_Outside area (×150)		MB filter_Inside area (×150)	
	KF94 mask	N95 mask	KF94 mask	N95 mask
Pre-treatment				
After 2 nd treatment				
After 3 rd treatment				

*Note: Particular damage or changes after the 3rd treatments were not found in the MB filter structure.

Table 6. The layer structures of a KF94 mask according to wearing consecutive four days: Comparison of consecutive heat and ultraviolet hybrid treatments and no treatment (control)

	Day 0 (New mask from Exp.1)	4-days later (Outside area ×150)		4-days later (Inside area ×150)	
	Outside×150	Control mask	Treatment mask	Control mask	Treatment mask
1 st layer_SB					
Stiffner					
MB filter					

*Note: More twisted fibers with greater opening in the KF94 after the 4-days were found in the stiffner structure, while particular damage or changes after the 4-days were not found in the 1st layer and MB filters.

았다(Table 5). 살균 3회차의 경우 KF94 마스크 안쪽 단면 촬영 사진에서 구성 섬유들이 휘어지고, 끊어지거나, 검정색으로 변한 부분들이 발견되었다.

3.2. 일상 생활 중 연속 4일 착용 시 자외선·가온 혼합 살균 처리 유무의 영향

살균 처리 없이 보건용 마스크 사용 전 흡기저항은 15.8 Pa 였으나, 하루 착용이 지난 2일차와 3일차 아침에 측정한 흡기 저항은 8.3 Pa과 5.3 Pa로 점점 낮아졌으며, 4일차 아침에 측정한 흡기저항은 전날에 비해 약간 증가하였다(Fig. 3a). 살균 처리를 한 경우, KF94 마스크의 흡기저항은 6.6 Pa였으며, 둘째 날 아침에는 유사한 흡기저항을 유지하다가, 3일차 아침 약간 증가하여 4일차 아침에는 1일차 아침의 두 배 이상 증가한 값을 보여주었다(Fig. 3b).

주사전자현미경 사진을 비교해 보면, 미처리 조건의 마스크 겉피와 내피 모두 4일 연속 사용하면서 섬유의 배열이 덜 촘촘해지며 섬유 중간 중간 이물질이 관찰되었다. 특히, 마스크 스티프너의 배열도 4일 사용한 경우 더 흐트러져 있었으며, 마스크 필터도 이물질로 인해 사진의 선명도가 떨어짐을 알 수 있다. 마스크의 내피도 4일 사용에 의해 섬유 배열이 비균일해지고 덜 촘촘해졌다. 마스크를 살균 처리한 경우와 미처리 조건 간 구조를 비교해 보면, 스티프너와 필터의 구조에서 가시적인 차이는 크지 않으나, 겉피 구조의 경우 4일간 매일 살균하여 착용한 마스크에 비해 살균처리 없이 4일 연속 착용한 마

스크에서 좀더 많은 기공이 발견되었다(Table 6).

4. 논 의

4.1. 가온과 자외선 혼합 살균 처리가 일회용 마스크의 흡기 저항에 영향을 주는가?

본 연구 결과를 토대로 볼 때 일회용 마스크의 종류에 따라 다른 결과가 얻어질 것이라 볼 수 있으나, KF94 마스크의 경우 살균 처리를 반복할수록 흡기저항이 증가하는 경향이 발견되었으며, 이는 40분의 가열과 40분의 자외선 노출에 의해 마스크 내부의 공극 구조가 어느 정도 무너져 공기의 흐름이 방해된 것으로 해석가능하다. 주사전자현미경 사진으로 해석해 볼 때 마스크 내부 MB 필터의 변화는 거의 보이지 않았기 때문에, 스티프너나 겉피(Spunbond PP)의 섬유 구조 변화로 흡기 저항이 증가한 것이라 해석해 볼 수 있다. 그러나, 실험실 측정 시 흡기저항은 초기 미사용 마스크 9.5 Pa에서 이를 두 번째 살균 처리한 직후 15.6 Pa로 증가하였고, 일상생활 중 착용 시 제 1일 미사용 마스크 6.6 Pa에서 4일째 착용 살균 처리 직후 15.2 Pa로 증가하였기 때문에, 식품의약품안전처의 KF94 마스크 흡기저항 승인 기준이 70 Pa 이하인 것을 고려해 볼 때 본 연구에서 얻어진 결과 모두 허용 가능한 증가이다.

KF94 마스크와 달리 N95 마스크의 흡기저항이 반복 살균에도 불구하고 큰 변화없이 유지되는 이유는 겉피나 스티프너, 필터의 섬유 구조가 상대적으로 더 촘촘하여 40분 자외선 노출

과 40분 가운에 큰 영향을 받지 않는 것으로 해석 가능하다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, KF94 마스크에 비해 상대적으로 덜 촘촘한 섬유 구조를 가지는 보건용 마스크들(예: 서지컬 마스크, KF80 마스크 등)의 반복 착용을 위한 살균 처리 시 흡기저항 증가가 본 연구에서 관찰된 값보다 클 수도 있을 것이라 예측해 볼 수 있으며, 본 결과의 확대 적용은 지양되어야 한다.

추가로, 한 회사에서 출시된 동일한 형태, 사이즈 및 재질의 KF94 마스크라 할 지라도 미사용 제품의 흡기저항이 다를 수 있음을 고려해야 한다. 본 연구에 사용된 KF94 마스크의 흡기저항은 실험실 실험에 사용된 마스크(미착용 새 제품)의 경우 9.5 Pa, 일상생활 착용에 사용된 마스크(미착용 새 제품)의 경우 15.8 Pa, 일상생활 착용 중 살균 조건에 사용된 마스크(미착용 새 제품)의 경우 6.5 Pa로 상당한 차이를 보여 주었다. 이는 마스크가 생산되는 로트(Lot)에 따른 차이로 해석해 볼 수 있다.

4.2. 일상생활 중 일회용 KF94 마스크의 4일 연속 착용이 흡기저항에 영향을 주는가?

본 연구에 따르면 매일 7.5시간씩 4일 연속 착용하는 경우 3일째까지 흡기저항은 감소했지만 4일째 다시 증가하기 시작했다. 장시간 연속 착용 시 흡기저항이 감소한 이유는, 비록 주사전자현미경 사진으로 특이한 변화를 관찰할 수는 없었으나, 건조 상태로 출시된 부직포의 촘촘한 섬유 조직이 장시간 호기 가스 내 수분에 노출되어 일부 섬유의 수축이 발생하고 이로 인해 섬유 간 공극이 어느 정도 벌어지기 때문인 것으로 해석할 수 있으며, 4일째 흡기저항이 다시 증가한 이유는 공극 내에 호기 가스로부터의 수분이 축적되기 때문인 것으로 볼 수 있을 것이다. Lee et al.(2007)에 의하면 쾌적 안정 상태에서 호기 가스에 포함된 수분량은 $5\sim 6\text{ g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 이었다. 체표면적이 1.7 m^2 인 성인이 하루 8시간 연속 착용한다고 하는 경우 마스크에 닿는 수분량은 약 68~82g에 달한다고 볼 수 있다. 즉, KF94 마스크 한 개를 특별한 살균처리 없이 3~4일 이상 연속 착용하는 경우 약 200~300g 수분이 닿게 되므로 장시간 연속 착용은 지양되어야 한다. Juang and Tsai(2020)에 따르면, 한 개의 마스크를 3~4일 사용가능한 방법을 제안하기도 했는데, 이는 마스크를 3~4개 준비한 후 마스크에 1~4번까지의 번호를 매기고, 매일 준비된 3~4개의 마스크를 번호 순서대로 번갈아 착용하는 것이다. 단, 사용되지 않는 마스크는 중성 온습도 환경에 보관되어야 한다. 즉, 한 개의 마스크를 연속 착용하는 것이 아니라, 여러 개의 마스크를 준비한 후 순서대로 돌려가며 여러 번 착용하는 방법이 제안되었다.

4.3. KF94 마스크의 재사용을 권장할 수 있는가?

서론에 서술한 바와 같이 KF80, KF94, KF99 마스크는 부직포로 만들어진 일회용 마스크이기 때문에 원칙적으로 재사용을 권장할 수는 없다. 그러나 마스크 공급 부족 상황에서, 혹은 마스크 공급 과잉으로 인한 마스크 폐기물 처리 상황에서

효과적인 마스크 재사용법에 대해 제한적인 범위에서 과학적 논의가 이루어질 필요가 있다. 마스크 재사용을 위한 살균법은 마스크 필터의 여과효율 손상 없이, 생물학적 오염을 제거하면서, 흡기저항의 과도한 증가도 유발하지 않아야 할 것이다. Gertsman et al.(2020)은 일회용 마스크를 60분 이상 가열하면 병원균은 감소하나 분진포집효율이나 흡기저항은 손상되지 않는다고 보고했다. Rodriguez-Martinez et al.(2020)의 리뷰 및 Boskoski et al.(2020)의 리뷰에서도 가열 혹은 자외선 살균에 의해 일회용 마스크의 여과효율은 손상되지 않는다고 보고되었다. 본 연구에서의 실험 결과는 마스크의 반복 살균에 의해 흡기저항은 다소 증가할 수 있으나 그 증가량이 착용자의 호흡에 부담을 줄 정도는 아님을 보여준다. 본 연구 및 선행연구 결과들을 종합해 볼 때, KF94 마스크의 2~3일 재사용을 위해 가열과 자외선 혼합 살균이 적용될 수 있으며 이는 정부의 환경 오염 정책에도 효과적으로 활용될 수 있다.

5. 결론 및 제언

본 연구를 통한 새로운 발견은 첫째, 국내 KF94 마스크에 3~4회 반복 살균 처리를 하는 동안 마스크의 흡기저항 증가가 발견되었지만 식품의약품안전처의 KF94 마스크 기준을 초과하는 수준까지의 증가는 발견되지 않았다는 점, 둘째, 일상 생활 중 KF94 마스크 한 개를 4일 연속 착용하는 경우 흡기저항은 점점 감소하다 4일째 증가하기 시작하였다는 점, 셋째, KF94 마스크를 3~4회 반복 살균하는 동안 마스크 내부 MB 필터의 미세구조에서 현저한 변화는 발견되지 않았다는 점이다. 이러한 결과를 토대로 볼 때, KF94 마스크를 2~3일 연속 착용하고자 할 경우 매일 1회씩, 가열과 자외선 혼합 살균 처리를 해도 마스크의 흡기저항이나 필터에 유의한 변화가 발생하지는 않을 것이라 사료된다. 단, 4일 이상의 연속 착용은 흡기저항의 증가뿐만 아니라 기존 연구들에서 보고된 바와 같이 정전기 필터의 여과능력이 저하될 수 있으므로 권장되지 않는다. 본 결과는 최근 국내 환경 오염 이슈로 크게 대두되고 있는 일회용 마스크 폐기물 감소 정책에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 추가적으로, 본 연구는 피험자 1인을 대상으로 국내 KF94 마스크 (디자인 1종)를 대상으로 얻어진 결과이기 때문에 다양한 종류의 일회용 마스크 및 다양한 연령대와 성별에 확대 적용되어서는 안 되며, 다양한 종류의 일회용 마스크 및 충분한 수의 피험자들을 대상으로 한 후속연구를 통해 검증될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 식품의약품안전처의 '보건용 마스크의 안전관리 평가기술 개발 연구' 과제 (20172MFDS258)로 지원받았습니다. 본 연구의 행정 업무 및 영문 교정을 도와 준 허윤정, 오지영, Andrew Gorski에게 감사의 마음을 전합니다.

References

- Boskoski, I. B., Gallo, C., Wallace, M. B., & Costamagna, G. (2020). COVID-19 pandemic and personal protective equipment shortage - Protective efficacy comparing masks and scientific methods for respirator reuse. *Gastrointestinal Endoscopy*, 92(3), 519-523. doi: 10.1016/j.gie.2020.04.048
- Celina, M. C., Martinez, E., Omana, M. A., Sanchez, A., Wiemann, D., Tezak, M., & Dargaville, T. R. (2020). Extended use of face masks during the COVID-19 pandemic - Thermal conditioning and spray-on surface disinfection. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109251. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2020.109251
- Cho, M. H., Kang, H. W., Shim, J. E., Lee, H. G., & Seo, S. C. (2020). Evaluation of performance change by multiple use of a disposable respirator. *Journal of Odor Indoor Environment*, 19(1), 66-73. doi:10.15250/joie.2020.19.1.66
- Consumer Korea. (2018, April). *National Public Health Statistics* 2018. Retrieved June 1, 2021 from <http://www.consumerskorea.org/soree/pdf/2018/201804.pdf>
- Gertsman, S., Agarwal, A., O'Hearn, K., Webster, R., Tsampalieros, A., Barrowman, N., Sampson, M., Sikora, L., Staykov, E., Ng, R., Gibson, J., Dinh, T., Agyei, K., Chamberlain, G., & McNally, J. D. (2020). Microwave- and heat-based decontamination of N95 filtering facepiece Respirators A systematic review. *Journal of Hospital Infection*, 106(3), 536-553. doi:10.1016/j.jhin.2020.08.016
- Grinshpun, S. A., Yermakov, M., & Khodoun, M. (2020). Autoclave sterilization and ethanol treatment of re-used surgical masks and N95 respirators during COVID-19 - Impact on their performance and integrity. *Journal of Hospital Infection*, 105, 608-614. doi:10.1016/j.jhin.2020.06.030
- Ibanez-Cervantes, G., Bravata-Alcantara, J. C., Najera-Cortes, A. S., Meneses-Cruz, S., Delgado-Balbuena, L., Cruz-Cruz, C., Manuel, E.M.D., Cureno-Diaz, M. A., Gomez-Zamora, E., Chavez-Ocana, S., Sosa-Hernandez, O., Aguilar-Roja, A., & Bello-Lopez, J. M. (2020). Disinfection of N95 masks artificially contaminated with SARS-CoV-2 and ESKAPE bacteria using hydrogen peroxide plasma: Impact on the reutilization of disposable devices. *American Journal of Infection Control*, 48, 1037-1041. doi:10.1016/j.ajic.2020.06.216
- Juang, P. S. C., & Tsai, P. (2020). N95 respirator cleaning and reuse methods proposed by the inventor of the N95 mask material. *The Journal of Emergency Medicine*, 58(5), 817-820. doi:10.1016/j.jemermed.2020.04.036
- Kwon, J. Y., Lim, G., Kim, S. H., Shin, H. J., & Lee, J. Y. (2020). Risk awareness to COVID-19 and wear behavior of protective masks between adults and adolescent living in Seoul and Gyunggi Province. *Korean Journal of Community Living Science*, 31(3), 335-351. doi:10.7856/kjels.2020.31.3.335
- Lee, J. Y., Choi, J. W., & Park, J. H. (2007). Relationships between insensible perspiration and thermo physiological factors during wearing seasonal clothing ensembles in comfort. *Korean Journal of Clothing & Textiles*, 31(12), 1700-1709. doi:10.5850/JKSC.2007.31.12.1700
- Lee, J. Y., Park, J., Baek, Y. J., Jung, D. H., Ko, Y., Jung, J. Y., Kang, J. H., Lee, T. K., Lee, Y. J., Song, E. Y., Son, S. Y., Kwon, J. Y., & Kim, S. H. (2020). Regional and sex differences in cognition and wear behavior concerning fine-dust protective masks during high concentration days. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 44(3), 516-538. doi: 10.5850/JKSC.2020.44.3.516
- Lee, J. Y. (2021, March 30). "COVID-19 disposable masks should also be considered for the environment". *Medical News*. Retrieved June 1, 2021, from <http://www.bosa.co.kr/news/articleView.html?idxno=2147336>
- Mackenzie, D. (2020). Reuse of N95 masks. *Engineering*, 6, 593-596. doi:10.1016/j.eng.2020.04.003
- O'Hearn, K., Gertsman, S., Sampson, M., Webster, R., Tsampalieros, A., Ng, R., Gibson, J., Lobos, A.T., Acharya, N., Agarwal, A., Boggs, S., Chamberlain, G., Staykov, E., Sikora, L., & McNally, J.D. (2020). Decontaminating N95 and SN95 masks with ultraviolet germicidal irradiation does not impair mask efficacy and safety. *Journal of Hospital Infection*, 106, 163-175. doi:10.1016/j.jhin.2020.07.014
- Ou, Q., Pei, C., Kim, S. C., Abell, E., & Pui, D. Y. H. (2020). Evaluation of decontamination methods for commercial and alternative respirator and mask materials - View from filtration aspect. *Journal of Aerosol Science*, 150, 105609. doi:10.1016/j.jaerosci.2020.105609
- Purushothaman, P. K., Priyanga, E., & Vaidhyswaran, R. (2021). Effects of prolonged use of facemask on healthcare workers in tertiary care hospital during COVID-19 pandemic. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, 73, 59-65. doi:10.1007/s12070-020-02124-0
- Rodriguez-Martinez, C. E., Sossa-Briceño, M. P., & Cortés, J. A. (2020). Decontamination and reuse of N95 filtering facemask respirators - A systematic review of the literature. *American Journal of Infection Control*, 48(12), 1520-1532. doi:10.1016/j.ajic.2020.07.004
- Tech, R. B. M., Tech, P. R. M., Das, S., & Paul, M. K. (2020). A hybrid model integrating warm heat and ultraviolet germicidal irradiation might efficiently disinfect respirators and personal protective equipment. *American Journal of Infection Control*, 49(3), 309-318. doi:10.1016/j.ajic.2020.07.022
- Rubio-Romero, J.C., Pardo-Ferreira, M. C., Torrecilla-García, J. A., & Calero-Castro, S. (2020). Disposable masks - Disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic. *Safety Science*, 129, 104830. doi:10.1016/j.ssci.2020.104830
- Zorko, D.J., Gertsman, S., O'Hearn, K., Timmerman, N., Ambu-Ali, N., Dinh, T., Sampson, M., Sikora, L., McNally, J.D., & Choong, K. (2020). Decontamination interventions for the reuse of surgical mask personal protective equipment - A systematic review. *Journal of Hospital Infection*, 106, 283-294. doi: 10.1016/j.jhin.2020.07.007

(Received 11 May, 2021; 1st Revised 17 May, 2021;
2nd Revised 7 June, Accepted 11 June, 2021)