JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(3) : 253-259 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.253

전자선 조사에 따른 안면마스크의 모폴로지 및 필터성능 영향 평가

윤진문, 김희수, 임윤묵, 김병남*

한국원자력연구원 첨단방사선연구소

The Morphological and Filtration Effects of Respiratory Mask by Electron Beam Irradiation

Jin-Mun Yun, Huisu Kim, Youn-Mook Lim and Byungnam Kim*

Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabul-do 56212, Republic of Korea

Abstract This study was to investigate the effect of ionizing radiation on the structure and filtration performance of KF94 respiratory mask using the 2.5 MeV electron beam accelerator. From the SEM and TGA analyses, all filters showed no significant and measurable structural changes irradiated up to 24 kGy in air and vacuum conditions. However, compared to the pristine KF94 mask, filtration efficiency of electron beam treated KF94 masks was decreased from 99.4% to ~55~67% due to the reduction of electrostatic force by ionizing radiation.

Key words: Respiratory mask, Electron beam, Morphological effect, Filtration efficiency, KF94 mask

1. 서 론

2019년 12월 중국 우한시에서 발생한 코로나바이러스 감염병(COVID-19)이 전 세계적으로 급속히 확산되었고, 2020년 3월 세계보건기구(world health organization, WHO)에서는 공식적으로 팬데믹을 선언하기에 이르렀다. 이러한 팬데믹 상황에서 각 국가의 보건 의료 체계는 급속히 붕괴되었으며, 개인보호구(perosonal protective equipment, PPE) 중 하나인 안면마스크(respiratory mask)에 대한 수요 증가 및 공급 부족 사태를 유발하게 되었고 마스크 가격 폭등 사태를 겪게 되었다. 이로 인하여 각 국가에서는 COVID-19 대응용으로 사용된 안면마스크를 재사용할 수 있는 기술 및 방법에 대해서 국제원자력기구(international atomic energy agency, IAEA)에 문의가 폭증하게 되었으며, 재사용 가능 기술 및 방법에 대해서 IAEA 회원국 과학자들과 재사용 가능성에 대해서 긴급히 연구 구룹을 구성하여 방안을 찾기에 이르렀다.

감염병 확산 방지에 사용된 개인보호구 특히 마스크를 재사용하기 위해서 고려해야 할 사항으로는 첫 번째로 사용한 마스크에 남아있을 수 있는 감염성 오염원을 효과적으로 제거해야 한다. 두 번째로는 멸균 처리 후 마스크를 구성하는 필터의 구조변화나 필터성능에 영향을 미치지 않아야 한다. 마지막으로 현재와 같은 팬데믹 상황에 효과적으로 대처하기 위해서 대용량 처리가 가능해야 한다는 점이다.

상기 요구조건을 고려할 때, 사용한 마스크의 재사용 기술로는 전통적으로 이용되고 있는 열처리법, UV 처리법, 이오가스를 이용한 방법 그리고 방사선 조사법 등을 들 수

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Byungnam Kim
Tel. +82-63-570-3432 Fax. +82-63-570-3068 E-mail. bnkim@kaeri.re.kr

Received 2 September 2022 Revised 27 September 2022 Accepted 28 September 2022

있다. 먼저 열처리법의 경우, 마스크 필터를 구성하는 저분자량 폴리프로필렌 섬유의 손상을 야기하는 단점이 있으며, UV 처리법의 경우, UV의 투과깊이가 낮아 표면만 살균이 된다는 점과 무엇보다 대용량 처리에 어려움이 있다. 에틸렌 옥사이드 가스를 이용한 이오가스 멸균법의 경우, 의료용 제품 멸균에 산업적으로 활용이 되고 있지만, 독성이 매우 강한 가스 사용 및 가스 잔류 문제점이 큰 단점으로 작용한다. 마지막으로 전자선 및 방사선을 이용한 멸균법의 경우, 산업적으로 매우 널리 사용되고 있으며, 대용량 처리에도 적합한 장점이 있으나, 현재까지 사용한 마스크의 재활용 기술로서 이용된 선례가 없어 이에 대한 연구가 반드시 필요한 상황이다. 하지만 방사선 멸균법의 경우 방사선 조사 시에 마스크를 구성하는 소재의 손상을 야기하는지와 조사 후 마스크 성능에 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요한 상황이다[1,2].

이러한 배경에 근거하여 본 연구에서는 방사선 조사에 따른 안면마스크의 구조변화 유무를 다양한 분석 방법을 이용하여 분석을 실시하였다. 이를 통하여 향후 펜데믹 상황하에서 개인보호구에 대한 방사선 멸균 처리 적용 유무를 판단하는 데 있어 기준으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 안면마스크는 KF94 마스크를 사용하였고, KF94 마스크는 아래와 같이 4층 구조를 갖는다. KF94 마스크는 4층의 서로 다른 필터로 구성되어 있으며, 국내의 경우 Melt-Blown 방법으로 대부분 제조하고 있다. 필터를 이루는 성분은 폴리프로필렌이며 Melt-Blown 방법으로 제조가 가능하여야 하므로 저분자량의 폴리프로필렌이 사용된다[3]. KF94를 구성하는 4중 필터는 Inner filter, Electrostatic filter, Middle filter, Outer filter로 구분할 수 있으며, Inner filter의 경우 안면부에 밀착하여 사용되므로 비말 차단 역할을 할 수 있는 중간 크기의 직경으로 구성된 폴리프로필렌 섬유 다발로 구성되어 있다. Electrostatic filter의 경우, 가장 직경이 작은 폴리프로필렌 섬유로 이루어져 있으며, 제조 과정 중 고전압하에서 corona-discharge 방법에 의해 제조되므로 정전기 특성이 추가적으로 부여되게 된다. 따라서 필터링은 Pore size 및 Electrostatic force에 의해서 발생하게 되므로 마스크의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부분이라고 할 수 있다. Middle filter의 경우, 중간 크기의 미세분진 및 비말을 제거하며 Outer filter는 Macrosize의 분진, 외부 액체 침투 방지 및 마스크 형상 유지 역할을 한다.

일반적으로 공기 중에서 방사선 조사를 진행할 경우, 산소의 해리 및 라디칼 형성에 의해서 반응성이 높은 산소 라디칼이나 오존이 발생하게 된다[4].

이와 같이 형성된 반응종에 의해서 마스크를 구성하는 주 성분인 폴리프로필렌과 추가적인 화학반응을 형성할 가능성이 존재하므로 방사선 조사를 진행할 KF94 마스크를 알루미늄 파우치에 진공포장을 실시한 후 방사선 조사를 실시하였다. 또한 진공포장을 하지 않은 샘플 역시 진공포장한 마스크 샘플과 동일한 조사 조건하에서 방사선 조사를 진행하여 반응성 산소 종에 대한 영향을 분석하고자 하였다.

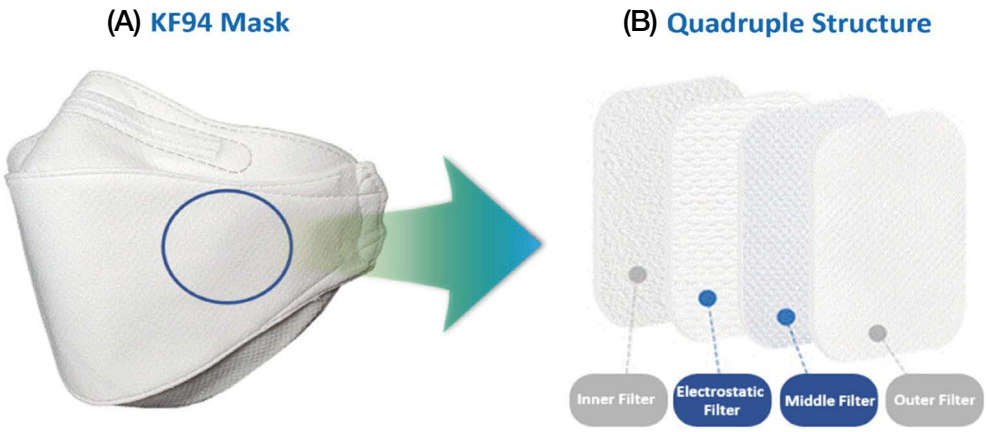

Fig. 1. (A) Photograph of a commercial KF94 mask and (B) the corresponding images of each protection filter.

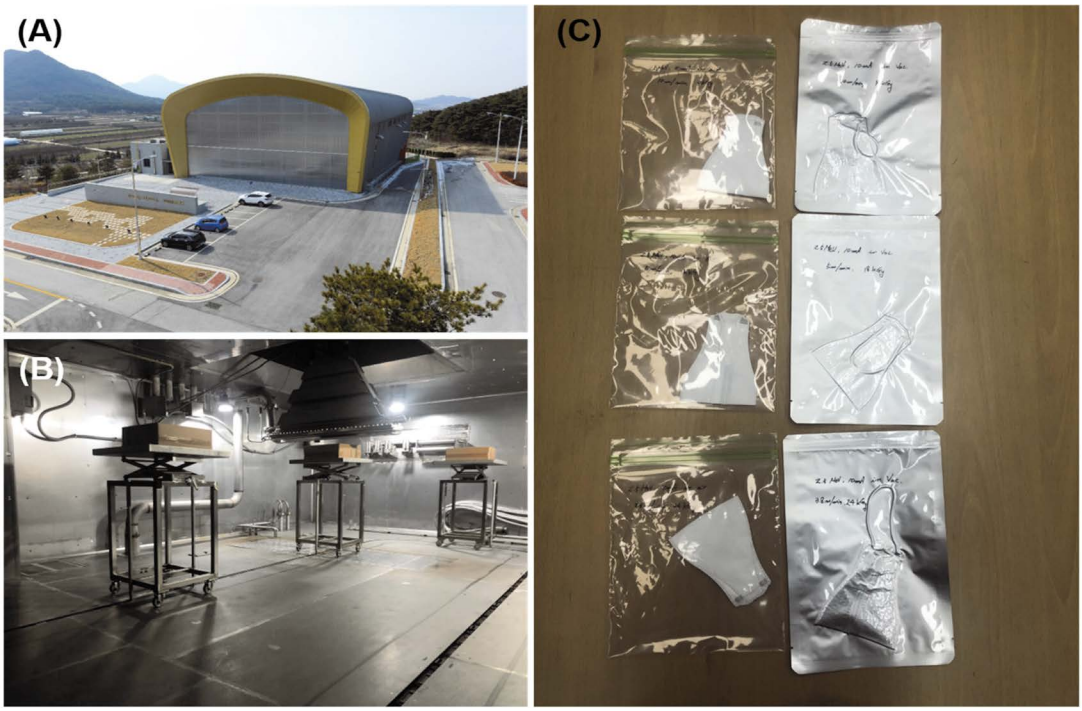

Fig. 2. (A) Electron beam demonstration and research building, (B) 2.5 MeV electron beam accelerator (Model: ELV-8, Manufacturer: EB-Tech, Korea), and (C) Samples before electron beam and gamma irradiation under air (left) and vacuum (right) condition.

Table 1. Detailed electron beam treatment conditions using the ELV-8 (2.5 MeV, 100 kW)

Dose (kGy)	Energy (MeV)	Dose rate (kGy s^{-1})	Remarks
–	–	–	Commercial KF94 mask
9	2.5	18	Air/vacuum condition
18	2.5	18	Air/vacuum condition
24	2.5	18	Air/vacuum condition

방사선 조사의 경우, 산업적으로 널리 사용되고 있는 2.5 MeV 전자가속기를 사용하여 진행하였고, Dose rate (kGy h^{-1})의 경우, Table 1과 같이 설정하여 각각 진행하였다. 또한 흡수선량의 경우, 식약처 의료기기 멸균 기준인 25 kGy 이내 범위인 9, 18, 24 kGy로 설정한 후 방사선 조사를 실시하였다. 그리고 조사를 실시할 마스크의 경우, 현재 감염성 오염원 차단에 효과적이며 국제적으로 널리 사용되는 필터효율이 90% 이상인 KF94 마스크(필터효율: 99% 이상)를 사용하였다. 특히 마스크 제조사별로 필터성능에 차이가 있기 때문에 정확한 필터성능 평가를 위해서 동일한 제품(제품명: 더조은 마스크)을 사용하여 본 연구를 진행하였다.

방사선 조사 전 후 마스크를 구성하는 필터의 구조 분석을 위해서 탁상형 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 사용하였고, 마스크를 구성하는 4종류의 필터, 즉 Inner filter, Electrostatic filter, Middle filter, Outer filter 각각에 대해서 조사 선량별(0, 9, 18, 24 kGy) 모폴로지 분석을 실시하였다. 확대 배율의 경우, Electrostatic filter를 구성하는 폴리프로필렌 섬유의 직경이 가장 작기 때문에 100배 및 500배 확대 이미지 분석을 진행하였으며, 그 이외의 경우에는 50배 및 100배 이미지 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전자선 조사된 KF94 마스크 필터의 SEM 분석

먼저 Inner filter의 경우, 신체와 직접적으로 접촉되는 부위로서 착용감 향상 및 타액 비산 방지를 위해서 Outer filter보다 직경이 작은 섬유로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 필터 간 고정을 위해서 마름모꼴 형태의 주기적인 Melting 격자를 Fig. 3(A)에서 확인할 수 있다. 전자선 조사 선량을 9, 18, 24 kGy까지 진행한 결과, 조사를 진행하지

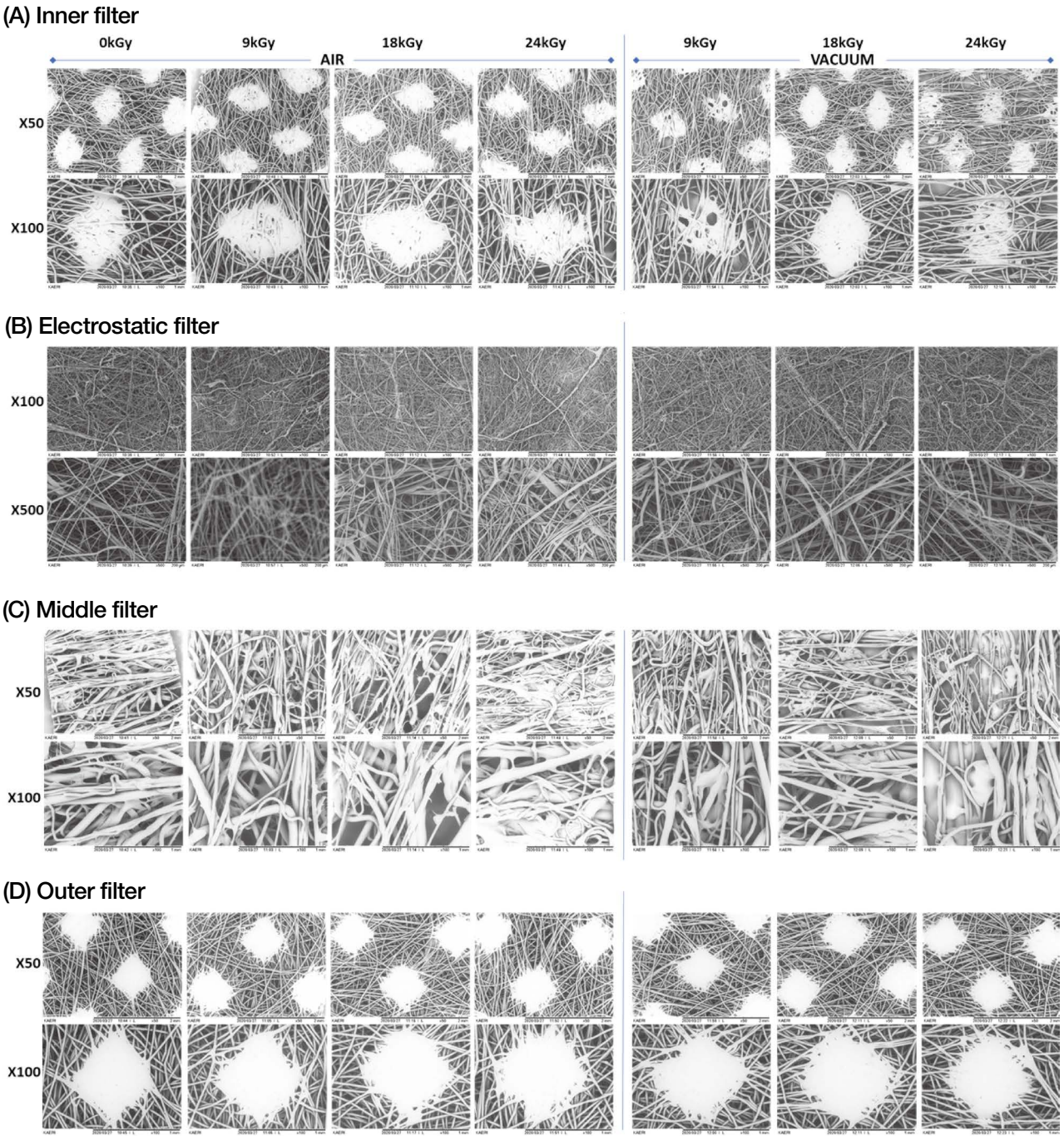

Fig. 3. SEM images of (A) inner, (B) electrostatic, (C) middle, and (D) outer filters before and after gamma irradiation.

않은 Inner filter의 모폴로지가 거시적 관점에서 큰 차이점이 없음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 방사선 조사에 의해서 Inner filter의 구성성분인 폴리프로필렌 섬유의 가교 또는 분해 반응이 24 kGy까지 일어나지 않음을 의미한다. 또한 진공포장 유무에 상관없이 Inner filter의 구조변화 역시 관찰할 수 없었고 이는 전자선 조사 시 반응성 산소종의 영향을 고려하지 않아도 됨을 의미한다.

다음으로 전자선 조사 전 후 Electrostatic filter에 대한 SEM 분석을 실시하였다. Electrostatic filter의 경우, 마스크의 성능을 좌우하는 가장 핵심적인 필터로서 가장 직경이 작은 폴리프로필렌 섬유로 구성되어 있으며, 제조 공정 중 고전압하에서 제조되기 때문에 정전기 특성이 추가되

어 있어 마이크로 미터 이하의 미세 분진, 미세비말 등을 효과적으로 제거가 가능하다. Electrostatic filter의 SEM 분석을 500배까지 확대하여 실시한 결과 Inner filter와 동일하게 조사 선량 및 진공포장 유무에 상관없이 섬유의 가교나 분해가 발생하지 않음을 확인할 수 있었고, 이는 감마선 조사에 의해 Electrostatic filter의 구조에 영향을 미치지 않음을 의미한다고 할 수 있다.

이와 같은 경향은 흡/배기 수월성 향상 및 마크로 사이즈의 분진 및 비말 제거 역할을 하는 Middle filter와 마스크 외형 유지 및 커다란 분진 및 비말의 1차적인 제거 역할을 하는 Outer filter의 SEM 결과에서도 일관되게 확인할 수 있었다. 결론적으로 KF94 마스크에 전자선 조사를 공기 중 및 진공포장 상태에서 9, 18, 24 kGy 범위까지 실시하여도 마스크를 구성하는 폴리프로필렌 섬유의 구조변화를 야기하지 않음을 알 수 있다.

3.2. 전자선 조사된 KF94 마스크 필터의 열분석 결과

KF94 마스크에 전자선 조사를 24 kGy까지 진행하여도 마스크 필터의 모폴로지에 영향이 없음을 SEM 분석을 통하여 확인하였으나, 미시적 관점에서 국소 가교 또는 분해 반응이 일어났는지의 여부에 대한 확인이 필요하므로 thermal gravimetric analysis (TGA) 분석을 추가적으로 실시하였다. 방사선 선원별로 마스크의 모폴로지 영향이 없음을 SEM 분석을 통하여 이미 확인하였기 때문에 TGA 분석부터는 전자선 조사된 마스크에 대해서만 추가적으로 실시하였다. 또한 마스크의 성능에 가장 큰 영향을 미치며 가장 직경이 작은 폴리프로필렌 섬유로 구성되어 있어 가교 또는 분해 반응이 일어나기 쉬운 Electrostatic filter에 대해서 열분석을 실시하였다.

2.5 MeV 전자가속기를 이용하여 마스크에 9, 18, 24 kGy 전자선 조사를 실시한 후 Electrostatic filter에 대해서 TGA 분석을 실시한 결과, 450도 구간까지 열분해 곡선이 전자선 조사 조건 및 유무에 상관없이 동일함을 확인할 수 있었다(450도 이상의 구간에서 TGA 곡선의 차이는 Loading 샘플의 무게 차이에 의해 최종 탄소 잔류량 차이에 의함임). 일반적으로 전자선 조사에 의해 가교 반응이 일어나게 되면 분자량 증가 효과에 의해서 열분해온도(thermal degradation temperature, T_d)가 증가하게 되고 반대로 분해 반응의 경우 분자량 감소 효과에 의해서 T_d 감소를 유발함을 고려하였을 때, 전자선 조사에 의하여 마스크의 Electrostatic filter의 미시적인 가교 및 분해 반응이 일어나지 않음을 추가적으로 확인할 수 있다. 또한 공기 및 진공상태에서 조사를 진행하여도 동일한 TGA 결과를 얻을 수 있었고, 이와 같은 결과는 상기 분석한 SEM 결과와도 일치함을 확인할 수 있다.

3.3. 전자선 조사된 KF94 마스크의 필터성능 평가

방사선 조사 전 후 마스크를 구성하는 필터에 대한 모폴로지, 열특성 분석을 SEM, TGA를 통하여 실시한 결과, 방사선에 의한 필터의 가교 또는 분해 반응이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다. 최종적으로 방사선을 이용하여 멸균처리된 마스크를 재사용할 수 있기 위해서는 방사선 처리 후 마스크의 필터성능 평가를 수행하여야 한다. 이를 위해서 현재 국내 식약처 마스크 성능 평가 기준에 준하여 필터성능 평가를 실시하였다[5].

식약처 필터성능 평가의 경우, 염화나트륨(NaCl)을 이

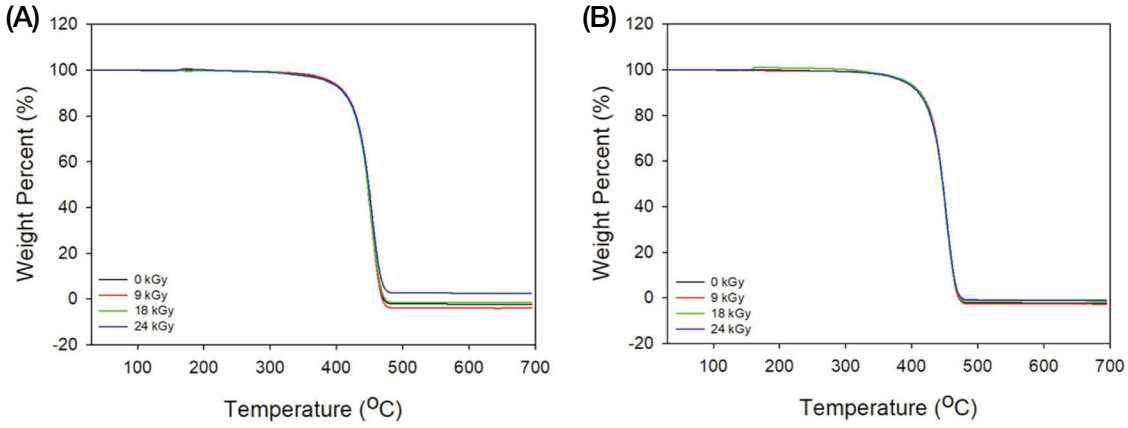

Fig. 4. TGA results of electron beam irradiated electrostatic filter under (A) air and (B) vacuum condition.

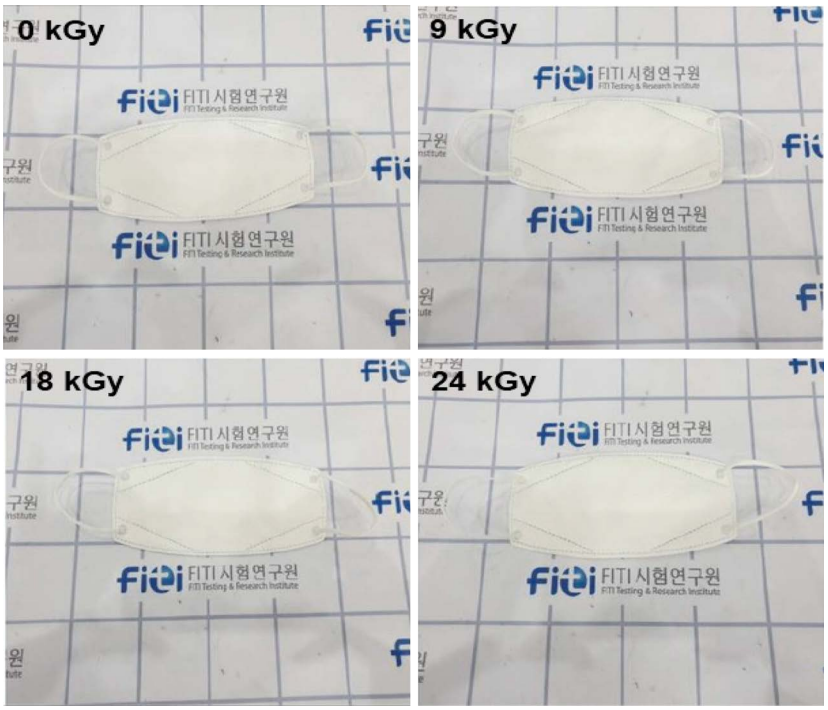

Fig. 5. Photographs of KF94 masks for NaCl aerosol-based filtration efficiency test.

용한 미세분진포집효율을 공인 분집포집효율 시험 항목으로 인정하고 있으며, 시험의 통계처리를 위하여 각 전자선 조사 조건(0, 9, 18, 24 kGy)당 3장의 마스크에 대해서 분진포집효율 시험을 실시하였다. 시험기관의 경우 식약처 공인인증기관인 FITI 시험연구원에서 공인시험절차에 의거하여 실시하였다.

전자선 조사를 진행하지 않은 샘플의 분진포집효율은 평균 99.3%이며, 이는 현재 KF94 마스크에 대한 성능과 동일함을 알 수 있다. 하지만, 전자선 조사 선량을 9, 18, 25 kGy로 증가시킴에 따라서 분진포집효율은 각각 57.9, 64.1, 67.6%로 급격히 감소함을 확인할 수 있었고, 이러한 결과는 기존 선행 연구와 일치함을 확인할 수 있었다[6]. 전자선 조사를 진행하게 되면 마스크 필터성능에 악영향을 미치게 됨을 필터성능 평가를 통해 확인할 수 있었고, 이와 같은 필터성능 감소의 원인을 다음과 같이 분석하였다.

먼저 마스크 필터성능의 경우, Electrostatic filter의 필터링 성능에 의해서 결정되므로 전자선 조사에 의해서 Electrostatic filter에 어떠한 영향을 미쳤을 것으로 유추하였다. 일반적으로 Electrostatic filter는 고전압하에서 Melt-blown 폴리프로필렌 용융액의 전기방사에 의해서 제조되

Table 2. NaCl aerosol-based filtration efficiency of KF94 masks before and after electron beam irradiation in air condition

	0 kGy	9 kGy	18 kGy	24 kGy
#1	99.2%	56.6%	61.9%	68.4%
#2	99.4%	57.5%	64.2%	67.9%
#3	99.4%	59.8%	66.1%	66.4%
Average	99.3%	57.9%	64.1%	67.6%

며, 제조 과정 중 고전압이 인가되기에 정전기 특성이 부여되게 된다. 이와 같이 형성된 Electrostatic force는 고에너지 방사선 조사에 의해서 상쇄되게 되어 전자선 조사 후 Electrostatic filter는 오직 Pore size 효과에 의한 필터링 특성만 존재하게 된다. 즉, Sub-micro 크기 및 이온을 띠게 되는 입자는 Electrostatic filter에 걸러지지 않고 내부 Diffusion에 의해서 마스크를 통과하게 되며, 그 결과 분진포집효율의 감소를 야기하는 것으로 판단된다. 따라서 현재 러시아, 중국, 유럽 일부 국가에서 마스크 제조 시 전자선 조사를 진행하는 경우 마스크의 필터성능 감소를 유발하게 됨을 알 수 있다. 또한 향후 마스크 재사용을 위하여 방사선 조사를 사용한 마스크에 실시할 경우, 마스크에 존재하는 바이러스를 효과적으로 멸균할 수는 있겠지만, 궁

극적으로 필터성능의 큰 감소를 야기하기 때문에 마스크 재활용을 위한 방법으로 사용되어서는 안됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 방사선 조사를 통한 KF94 마스크 재사용 가능성에 대하여 평가하였다. 방사선 조사는 2.5 MeV 전자가속기를 이용하여 실시하였고, 조사 선량을 식약처 의료용품 멸균 기준인 25 kGy 이내 범위인 9, 18, 24 kGy로 세분화하여 KF94 마스크에 각각 실시하였다. 또한 조사 중 공기의 이온화에 의한 영향을 평가하기 위해서 진공 및 공기 중에서 방사선 조사를 각각 실시하였다.

방사선 조사에 의해서 마스크를 구성하는 필터의 모폴로지에 미치는 영향을 분석하기 위해서 SEM 분석을 실시하였고, 그 결과 진공포장 유무 및 조사 선량에 상관없이 Inner, Electrostatic, Middle, Outer filter의 모폴로지에 영향이 없음을 거시적으로 확인할 수 있었다. 방사선 조사에 의해서 필터의 가교 또는 분해 반응 유무를 미시적으로 분석하기 위해서 TGA를 이용하였고, 동일한 T_d 값이 얻어짐을 확인하였고, 이를 통하여 KF94 마스크 필터에 방사선 조사에 의한 가교 및 분해 반응이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다.

최종적으로 방사선 조사 후 식약처 마스크 필터성능 평가 항목인 NaCl을 이용한 분진포집효율을 측정한 결과, 조사 전 99.3%인 분진포집효율이 9, 18, 24 kGy로 전자선 조사를 진행한 이후에 57.9, 64.1, 67.6%로 각각 감소됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 필터성능의 감소는 Electrostatic filter의 정전기 특성이 방사선 조사에 의해서 상쇄되게 됨에 의함임을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해서 현재와 같은 팬데믹 상황에서 개인보호구, 즉 마스크 재사용을 위한 방사선 조사법이 바이러스를 제거하는 데 효과적인 방법이 될 수 있지만, 마스크의 필터성능을 크게 감소시키므로 마스크 재사용을 위한 방법으로 사용되어서는 안됨을 확인할 수 있다. 특히 현재 전 세계적으로 마스크 공급 부족에 따른 마스크 재사용 기술에 대한 관심이 높은 상황에서 본 연구 결과가 마스크 재사용에 대한 기술적인 가이드라인을 제시하는 데 핵심자료로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 본 실험 결과는 향후 IAEA에서 방사선을 이용한 개인보호구 재활용 가이드라인을 작성하는 데 핵심 근거로 사용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국원자력연구원 연구운영비지원(R&D)(주요사업비) 첨단방사선연구기반 구축 사업 중 전자선실증 연구시설 운영 과제(과제고유번호: 1711174161)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rutala WA and Weber DJ. 2013. Disinfection and sterilization: an overview. *Am. J. Infect. Control* **41**:S2-S5.
2. Harrell CR, Djonov V, Fellabaum C and Volarevic V. 2018. Risks of Using Sterilization by Gamma Radiation:The Other Side of the Coin. *Int. J. Med. Sci.* **15**(3):274-279.
3. http://www.xn--hz2b19jzoas5b990b40dw2g.kr/bbs/sub5_1/34450.
4. Keene B, Bourham M, Viswanath V, Avci H and Kotek R. 2014. Characterization of Degradation of Polypropylene Nonwovens Irradiated by γ-Ray. *J. Appl. Polym. Sci.* **131**:33917.
5. https://www.fiti.re.kr/en.
6. Cramer A, Tian E, Yu SH, Galanek M, Lamere E, Li J, Gupta R and Short MP. 2020. Disposable N95 Masks Pass Qualitative Fit-Test But Have Decreased Filtration Efficiency After Cobalt-60 Gamma Irradiation. medRxiv preprint. https://doi.org/10.1101/2020.03.28.20043471.