

논문

코로나19 바이러스의 공기감염 확산 방지를 위한 학교용 공기청정기의 적용성 분석

Analysis on Applicability of Air Purifiers in Schools to Prevent the Spread of Airborne Infection of SARS-CoV-2

한방우*, 김상복, 이건희, 홍기정, 박인용, 김학준, 이예완, 김용진, 정성현, 심성훈, 김진태, 노선아, 민태진, 신환호
한국기계연구원 환경기계연구실

접수일 2020년 12월 1일
수정일 2020년 12월 9일
채택일 2020년 12월 14일

Received 1 December 2020
Revised 9 December 2020
Accepted 14 December 2020

*Corresponding author
Tel : +82-42-868-7068
E-mail : bhan@kimm.re.kr

Bangwoo Han*, Sang-Bok Kim, Gunhee Lee, Gi-Jeong Hong, In-Yong Park, Hak-Joon Kim, Ye-Wan Lee, Yong-Jin Kim, Sang-Hyeon Jeong, Seong-Hoon Shim, Jin-Tae Kim, Seon-Ah Roh, Tae-Jin Min, Wan-Ho Shin

Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Republic of Korea

Abstract The social and economic losses caused by viruses such as SARS-CoV, MERS-CoV, and SARS-CoV-2 has been serious. In this study, the size of airborne droplet nuclei particles and the number of virions generated by speaking or coughing were analyzed. Particle collection efficiencies of E11 and H13 grade air filters used in commercial air purifiers were evaluated for different particle sizes and the possibility of removing the airborne droplet nuclei particles by air purifiers was studied. In addition, the reduction of SARS-CoV-2 virion concentration and dose by using air purifiers was theoretically investigated for elementary school classrooms. When an infected student continuously emits virions with a rate of 6.0×10^5 virions/h in a 165 m^3 -sized classroom, the virion concentration and dose was estimated to be reduced by more than 60% by using an air purifier of clean air delivery rate (CADR) $780 \text{ m}^3/\text{hr}$ and by more than 70% by using two air purifiers (that is, CADR $1560 \text{ m}^3/\text{h}$) compared to when not in use of the air purifier. However, to prevent the spread of infection by the air stream generated by the air purifier, it is necessary to operate an instruction for using the air purifier such as facing the air outlet toward the ceiling and installing at least 50 cm away from occupants.

Key words: SARS-CoV-2, School, Air purifier, Clean air delivery rate (CADR), Instruction

1. 서론

사스, 메르스, 코로나19 등 바이러스로 인한 인류의 위협이 이어지고 있다. 특히 2019년 말에 발생하여 전 세계로 확산되고 있는 코로나19 바이러스의 경우 세계보건기구에서 2020년 3월 11일 팬데믹을 선언한 이래로 아직까지도 확산세가 꺾이지 않고 있어 이로 인한 사회 경제적 피해가 막대하다. 코로나19는 SARS-CoV-2 바이러스에 의해 발생하는 동물 기원의

바이러스성 호흡기 질환을 의미한다. 코로나 바이러스의 변이된 바이러스로서 사스나 메르스와 형태가 비슷한 것으로 알려지고 있다. 주로 감염된 사람이 말하거나 기침할 때 그리고 호흡할 때 나오는 비말에 의해서 감염되는 비말감염이 주요 전파 요인이다. 비말감염(droplet transmission)은 $5 \mu\text{m}$ 이상의 비말(주로 기침하거나 재채기할 때 수십 μm 에서 수백 μm 크기로 발생)이 날아가서 주변의 사람들을 감염시키는데 수백 μm 의 큰 비말의 경우 비말이 금방 침강하기

때문에 수 m 거리를 둘 경우 감염 확률을 상당히 줄일 수 있다. 참고로 Han *et al.* (2013)에서 재채기할 때 주로 발생하는 크기로 알려진 약 360 μm 비말의 경우 침강속도가 3.9 m/s이므로 1초 이내에 바닥으로 침강한다. 2 m 이상의 사회적 거리두기를 수행하는 이유가 이러한 비말감염의 위험성을 줄이고자 하는 이유이다. 한편 공기감염 (airborne transmission)은 말할 때 발생하는 5 μm 이하의 건조된 비말입자가 공기 중에 떠다니면서 주변의 비감염자를 감염시키는 방식을 말한다. 현재까지 공기감염을 유발하는 바이러스로는 결핵, 홍역, 수두 정도로만 알려지고 있다 (CDC, 2003). 하지만 코로나19와 관련하여 최근의 조사에 의하면 밀폐된 환경에서 노출이 오래될 경우 공기감염의 위험성도 존재한다는 연구들이 많이 보고되고 있다. Shen *et al.* (2020)은 중국 저장성에서 버스 내에서의 집단 감염이 감염자로부터 멀리 떨어진 좌석의 승객까지 진행되어 에어컨 기류에 의한 공기감염의 가능성을 제시하였다. Nissen *et al.* (2020)은 스웨덴의 Uppsala 대학 병원에서 환자 구역에서 멀리 떨어진 중앙 환기 시스템에서 바이러스가 검출된 것으로부터 코로나19가 에어로졸로 확산될 수 있음을 보고하였다. 이러한 이유로 전 세계 239명의 전문가가 코로나19 바이러스의 공기감염 위험성을 인정해야 한다고 세계보건기구에 공개 서한을 보내기도 하였다.

공기감염 바이러스의 확산을 방지하기 위한 방법으로는 환기, 필터, 양압 및 기류 제어 등이 있다. 필터 방법으로는 마스크와 공기청정기, 공조시스템에 설치되는 HEPA 필터가 있을 수 있다. 하지만 최근 국내의 한 연구진이 공기청정기의 설치 위치에 따라 바이러스의 확산 위험성이 존재한다고 보고를 하였고 (Ham, 2020), 교육부에서는 이러한 가능성을 우려하여 학교에서 교실에 설치된 공기청정기의 사용을 전면 중단하는 지침을 내리고 시행하고 있다. Ham (2020) 연구에 따르면 공기청정기 토출구 방향으로 비말을 배출했을 때 공기청정기 기류에 의해 바이러스가 확산될 수 있다는 내용으로서 공기청정기 설치

위치에 주의가 필요하다는 의미로 해석을 해야 할 것이다. 하지만 바이러스 위험에 대해 공포가 확산되면서 실내에서 공기청정기를 사용하면 공기감염이 확산될 수 있다는 식으로 오해가 되고 있다. 만약 이러한 이유로 공기청정기 사용이 문제가 된다면 Ahn (2020)이 언급했듯이 창문을 열고 환기할 때 감염자가 창문 쪽에 있으면 감염을 확산시킬 수 있으므로 환기를 하면 안 된다는 논리와 같다고 할 수 있다.

해외에서는 바이러스 확산 대응과 관련하여 공기청정기의 사용이 유용하다는 의견이 많다. Zhao *et al.* (2020)는 Covid-19 팬데믹 시기에 치과 병원에서 감염 확산을 억제하는 보조 수단으로 공기청정기의 사용이 매우 유용하다고 보고하고 있고, Christopher *et al.* (2020) 또한 HEPA 필터가 장착된 공기청정기에 대해 HEPA 필터의 기능과 한계를 염두에 두면서 부가적인 감염 관리 조치로 고려해야 한다고 보고하였다. Mousavi *et al.* (2020)은 코로나19 바이러스와 관련하여 병원에서의 필터 사용과 공기 재순환의 안전성과 관련된 394개의 문헌을 리뷰하였고 적절한 필터 방식의 사용은 코로나19 팬데믹 상황에서 병원에서 실내 공기 청정도를 유지하는데 중요한 방법 중 하나임을 보고하였다. 이러한 이유로 미국 EPA에서도 CDC에서 권고하는 방법과 병행하여 공기청정기를 사용할 때 바이러스 확산을 억제하는 보조 수단이 될 수 있다고 홈페이지 (www.epa.gov/coronavirus/air-cleaners-hvac-filters-and-coronavirus-covid-19)에 제시하고 있다. 다만 공기청정기 사용만으로 바이러스 감염 확산을 절대적으로 억제하기는 어려우므로 공기청정기 사용에만 의존하지 말라는 주의도 같이 표현하고 있다. 본 연구에서는 공기감염의 가능성이 있는 수 μm 급의 비말 입자를 대상으로 학교 교실에서 감염자가 존재할 때 바이러스 발생량을 추정해보고 시간에 따른 바이러스 농도 변화를 살펴보고자 한다. 또한 학교용 공기청정기를 1대 및 2대 사용할 때의 교실 내의 바이러스 농도 변화와 비감염자의 바이러스 노출량 변화를 살펴보고자 한다.

2. 연구 방법 및 결과

2.1 비말 입자의 크기

바이러스 크기는 20 nm부터 300 nm까지 다양한 크기를 갖는 것으로 알려져 있다(Hinds, 1999). 사스 바이러스는 60~120 nm (Groneberg *et al.*, 2005), 메르스는 150~320 nm (Algahtani *et al.*, 2016), 코로나19는 50~200 nm (Chen *et al.*, 2020) 정도로 보고되고 있다. 하지만 바이러스는 침방울과 함께 배출되기 때문에 바이러스 하나의 크기만으로 공기 중에 떠다니기는 쉽지가 않다. 침방울에는 증발하기 어려운 전해질, 당, 효소, DNA, 상피 세포 및 백혈구 잔재 등 다양한 성분이 포함하고 있고 질량분율로 적게는 1%에서 많게는 5%를 함유하고 있다(Stadnytskyi *et al.*, 2020).

초기 비말 액적 크기와 최종 건조 비말 입자 크기의 상관 관계식은 아래의 두 식으로 표현할 수 있다.

$$(\pi/6)\rho_2 d_2^3 / \{(\pi/6)\rho_1 d_1^3 + (\pi/6)\rho_2 d_2^3\} = x \quad (1)$$

$$(\pi/6)d_1^3 + (\pi/6)d_2^3 = (\pi/6)d^3 \quad (2)$$

여기서 ρ_1 은 물의 밀도(1000 kg/m³), ρ_2 는 최종 건조 비말 입자의 밀도(kg/m³), d_1 은 초기 비말에 포함된 물의 직경(μ m), d_2 는 최종 건조 비말입자의 직경(μ m), d 는 초기 비말 액적의 직경(μ m), x 는 비말 내의 비휘발 성분의 질량분율(0.01~0.05)을 의미한다.

따라서, 식(1)과 (2)로부터 최종 건조 비말 입자의 크기는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$d_2 = \left(\frac{x\rho_1}{x\rho_1 + (1-x)\rho_2} \right)^{1/3} d \quad (3)$$

만약 최종 건조 비말 입자의 밀도를 1300 kg/m³으로 가정할 때(Stadnytskyi *et al.*, 2020), 10 μ m 침방울이 공기 중으로 배출되었을 때 순식간에 증발하여 건조된 비말입자로 축소되는데 최종 크기는 비휘발 성분의 함유율이 1%인 경우 초기 크기의 19.8%인 약 2.0 μ m로, 비휘발 성분 함유율이 5%인 경우는 초기 크기의 33.9%인 약 3.4 μ m로 작아지게 된다.

최근 연구에 의하면 주로 말할 때는 1~10 μ m 크기

로, 기침할 때는 1~10 μ m와 100~1000 μ m의 bi-modal로 침방울이 배출되는 것으로 보고가 되었다(Smith *et al.*, 2020). 또한, Stadnytskyi *et al.* (2020)의 연구에서도 말할 때 약 4 μ m 입자가 초당 2,600개 정도 발생하는 것으로 나타났다. 이는 Smith *et al.* (2020) 연구에서의 1~10 μ m 크기 영역의 입자에 해당하는 것으로 볼 수 있다. 100~1000 μ m의 침방울의 경우 중력에 의한 침강 속도가 빨라서 에어로졸 형태로 오래 유지할 수 없기 때문에 주로 비말감염의 원인으로 보는 것이 합리적일 것이다. 본 연구에서는 공기 감염의 가능성이 상대적으로 높은 1~10 μ m 비말에 대해서만 한정하기로 한다. 만약 최종 건조된 비말 입자의 크기가 4 μ m라고 할 때 초기 비말 액적의 크기는 식(3)에 의해 약 12 μ m ($x=0.05$)에서 20 μ m ($x=0.01$) 정도로 추정할 수 있다. 한편 Lee *et al.* (2019)의 연구에서는 기침할 때 발생하는 입자의 수농도 분포를 분석하였더니 1~10 μ m 영역대 이외에도 0.3 μ m 이하의 영역에서도 농도가 관찰되는 것으로 보고하였다. 0.3 μ m 이하의 크기 영역대는 바이러스 1개 수준의 크기로서 단일 바이러스가 공기 중에 떠다니는 경우도 생각해볼 수 있으나 타액 내에 존재하는 바이러스의 개수를 고려할 때 바이러스를 함유할 확률은 높지 않다. 본 연구에서는 공기감염 가능성이 상대적으로 높은 4 μ m 비말 건조입자에 대해 바이러스 발생량을 분석해 보았다.

2.2 비말 입자 내의 바이러스 개수

최근 Wölfel *et al.* (2020)에 의하면 코로나19 바이러스의 감염자 타액 내 바이러스 수가 평균 7×10^6 copies/mL이고 최대 2.35×10^9 copies/mL인 것으로 보고되고 있다. 만약 타액에 바이러스 농도가 보고된 개수만큼 존재할 때 초기 발생 비말 크기에 따른 비말 내의 바이러스 개수를 추정해보면 그림 1과 같다. 타액 내의 바이러스 수가 7×10^6 copies/mL이고, 최종 건조 비말 입자 4 μ m일 경우 초기 비말 액적 12 μ m의 비말 한방울 내의 바이러스 개수는 6.33×10^{-3} 개이고 20 μ m 액적 내의 개수는 2.93×10^{-2} 개임을 확인할 수 있다. 이는 12 μ m 액적이 158개 존재할 때 1개 정

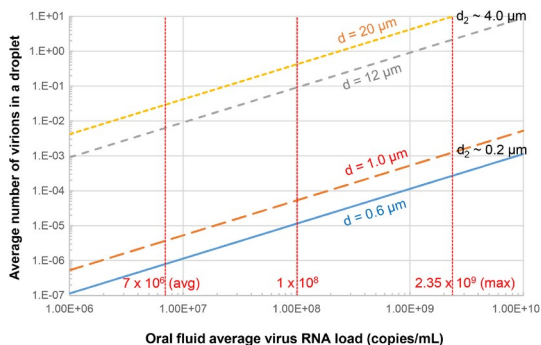


Fig. 1. Average number of virions in a droplet for 0.2 μm and 4 μm dried droplet nuclei.

도만 바이러스를 포함하고 있고 20 μm 액적의 경우는 34개 중 하나가 바이러스 1개를 포함하고 있음으로 의미한다. 말할 때 초당 2,600개의 입자를 발생시키고 숨쉴 때는 말할 때의 1/10 수준으로 입자를 발생시킨다고 가정하고, 1시간 동안 10분 정도를 말한다고 가정하면 감염자가 1시간 동안에 14,800개에서 68,600개까지 바이러스를 발생시킬 수 있음으로 의미한다.

한편 0.2 μm 의 비말입자의 경우는 초기 액적크기가 0.6 μm 에서 1 μm 에 해당하고 0.6 μm 입자 내의 바이러스 개수가 7.9×10^{-7} 개 및 1.0 μm 에서 3.7×10^{-6} 개로서 수십만 개의 이상 비말입자가 발생할 때 그 중 한 개가 바이러스를 포함할 수 있음을 의미하므로 이렇게 작은 비말입자에서는 바이러스를 함유할 가능성이 매우 낮음으로 알 수 있다. 0.2 μm 와 4 μm 비말 입자의 바이러스 함유 비율은 1:8000이 되고 0.2 μm 입자의 농도가 4 μm 입자에 비해 약 40배 높다고 하더라도 (Lee *et al.*, 2019) 바이러스 배출량은 1:200이 되므로 4 μm 입자의 감염성이 훨씬 높음을 추정할 수 있다.

한편 코로나19의 경우 감염을 유발시킬 수 있는 바이러스 최소 감염량(minimum infective dose)에 대한 정확한 정보는 존재하지 않는다. 최근 논문에 의하면 코로나19의 경우 100개 보다는 크고 H1N1 인플루엔자의 700개 보다는 다소 작을 것이라고 추정하고 있

다 (Karimzadeh *et al.*, 2020). 사실 동일한 바이러스 감염량에 노출되더라도 사람의 면역상태에 따라 감염이 되기도 되지 않기도 하므로 감염률이 바이러스 농도만의 함수가 아님은 숙지할 필요가 있다.

2.3 공기청정기 필터의 집진효율

공기청정기에는 EN 1822-1:2019 규격으로 E11 등급에서 H13 등급의 필터가 사용되고 있다. E11은 필터가 포집하기 가장 어려운 입자영역(MPPS; most penetration particle size)에서 95% 이상 포집하는 필터이고 H13은 MPPS에서 99.95% 이상 포집할 수 있는 필터를 의미한다. 필터는 MPPS 크기(주로 0.1 μm 와 0.3 μm 사이에 존재)를 중심으로 U자 형태의 효율 곡선을 그린다. 그림 2는 E11 및 H13 등급의 공기청정기 필터에 대해 입경별 집진효율을 측정된 결과를 보여주고 있다. 아토마이저로 발생시킨 염화칼륨(KCl) 입자에 대해 필터 전후단에서 OPC (optical particle counter, 1.109, GRIMM)로 농도를 측정하였다. OPC는 0.25 μm ~32 μm 의 측정범위를 갖고 있어 0.25 μm 이하의 효율은 확인하기 어렵지만 (Burkart *et al.*, 2010) 0.3 μm 이상에서 입경이 커질수록 집진효율이 증가하고 2 μm 이상에서는 거의 100%에 가까운 수준의 집진효율을 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 4 μm 크기의 비말 입자의 경우는 공기청정기용 필터로 거의 대부분 제거가 된다고 볼 수 있다.

2.4 교실에서의 공기청정기 효과 분석

교실 내 바이러스 발생 상황에서 공기청정기 가동에 따른 특성을 살펴보고자 타액 내 바이러스 농도를 평균 (7×10^6 copies/mL) 보다 조금 높은 1×10^8 copies/mL로 설정하였다. 학생수 25명, 교실 크기 165 m^3 (6.6 m \times 10 m \times 2.5 m)의 서울의 한 초등학교 교실을 대상으로 하였고, 공기청정기는 교육부의 사용지침에 따라 적용면적 (66 m^2)의 1.5배에 해당하는 100 m^2 의 성능을 갖는 CADR (clean air delivery rate) 780 m^3/h 을 사용하는 것으로 하였으며, 공기청정기를 1대 사용할 때와 2대 (CADR 1,560 m^3/h) 사용할 때의

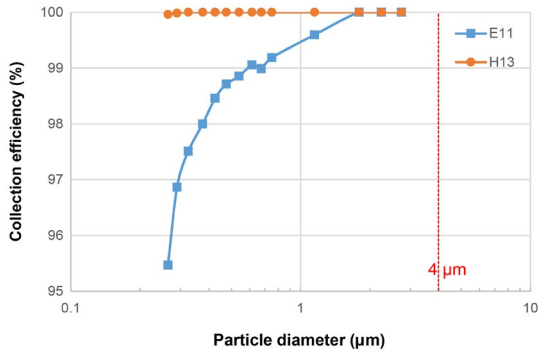


Fig. 2. Collection efficiencies with particle size for E11 and H13 filters used in air cleaners.

경우를 비교해 보았다. 환기장치는 $21.6 \text{ m}^3/(\text{인}\cdot\text{h})$ 기준에 따라 풍량 $540 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 장치를 사용하는 것으로 하였다. 또한 이를 음압병실의 환기 횟수 기준인 6 회/h의 환기 조건의 경우와도 비교해 보았다.

식 (4)는 바이러스 농도에 대한 질량 밸런스 식을 보여주고 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = (1 - \eta_V) Q_V C_o + V k_{inf} C_o - Q_V C - \epsilon \eta_A Q_A C - V k_{dep} C - k_{exf} C + \dot{M} \quad (4)$$

여기서 C 는 교실 내 바이러스 농도 (m^{-3}), C_o 는 외부의 바이러스 농도 (m^{-3}), V 는 교실 부피 (m^3), Q_V 와 Q_A 는 각각 환기장치와 공기청정기의 풍량 (m^3/h), η_V 와 η_A 는 각각 환기장치와 공기청정기 필터의 집진 효율 (-), ϵ 는 혼합지수(완전혼합의 경우 1), k_{dep} 은 침착에 의한 손실 (h^{-1}), k_{inf} 와 k_{exf} 는 기밀 누설에 의한 외부 공기의 침투 및 내부 공기의 유출 손실 (h^{-1})을 의미한다.

외부의 바이러스 농도 C_o 는 0으로 하고, k_{inf} 와 k_{exf} 는 같다고 가정하면 $\epsilon \eta_A Q_A$ 는 공기청정기의 CADR 값으로 표현 가능하므로 식 (4)는 아래의 식 (5)와 같이 정리가 가능하다.

$$V \frac{dC}{dt} = - Q_V C - \text{CDAR} C - V k_{dep} C - k_{inf} C + \dot{M} \quad (5)$$

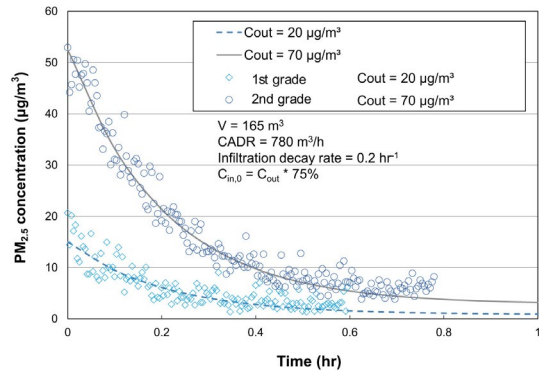


Fig. 3. $\text{PM}_{2.5}$ reductions with time in 1st and 2nd grade classrooms by operating an air cleaner (CADR $780 \text{ m}^3/\text{h}$) in an elementary school in Seoul.

타액 내 바이러스 농도를 $1 \times 10^8 \text{ copies/mL}$ 로 하였을 때 바이러스 입자 발생량 \dot{M} 은 $12 \mu\text{m}$ 크기에서 $2.1 \times 10^5 \text{ virions/h}$, $20 \mu\text{m}$ 크기에서 $9.8 \times 10^5 \text{ virions/h}$ 이므로 평균적으로 $6.0 \times 10^5 \text{ virions/h}$ 가 발생한다고 가정하였다.

교실 기밀도에 따른 외부 공기의 침투 손실 k_{inf} 은 실제 교실에서 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 측정값의 변화로부터 추정하였다. k_{inf} 은 입자 크기의 함수가 아닌 건물 기밀도에 의한 영향이므로 교실 내의 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 변화로부터 추정이 가능할 것으로 판단하였다. 그림 3은 실제 서울의 한 학교 1, 2학년 교실에 대해 CADR $780 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 공기청정기 가동 시 감소하는 $\text{PM}_{2.5}$ 미세먼지 농도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 식 (4)에 $k_{inf} = 0.2 \text{ h}^{-1}$ 을 사용하였을 때의 이론적으로 얻은 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 교실에서의 기밀 누설에 의한 손실은 $k_{inf} = 0.2 \text{ h}^{-1}$ 을 사용하였다. 한편 $4 \mu\text{m}$ 비말 입자의 침착에 의한 손실 k_{dep} 은 Shaughnessy and Sextro (2006)의 그림 5를 참조하여 2.6 h^{-1} 로 설정하였다.

그림 4부터 그림 7은 $4 \mu\text{m}$ 크기의 비말 입자에 대해 교실 내의 바이러스 농도 변화와 비감염자의 흡입량 변화를 식 (5)를 통해 해석한 결과를 보여주고 있다. 그림 4는 교실 내에 감염자가 1명 존재할 때 시간

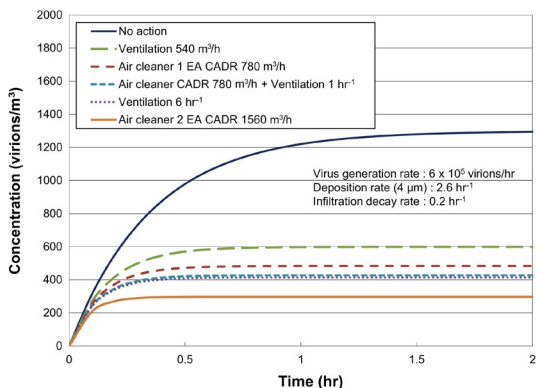


Fig. 4. Virion concentration changes in a classroom with an infected student for various air purifying methods.

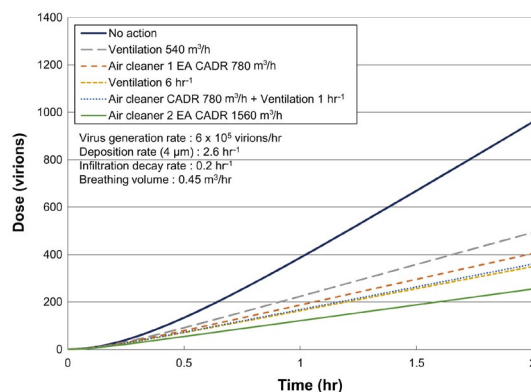


Fig. 5. Virus dose on uninfected students in a classroom with an infected student for various air purifying methods.

에 따른 바이러스 농도 변화를 나타내고 있고, 또한 공기청정기, 환기장치, 환기 6회/h, 공기청정기와 환기 1회/h, 공기청정기 2대 조건에서의 바이러스 농도 변화를 보여주고 있다. 감염자가 시간당 6×10^5 개의 바이러스를 배출할 때 교실 공간에서 30분 정도면 $1,000\text{개}/\text{m}^3$ 가까운 농도를 발생시키고 2시간 정도면 $1,300\text{개}/\text{m}^3$ 까지 농도가 누적될 수 있음을 알 수 있다. 공기청정기를 1대 사용할 경우 사용하지 않을 때보다 약 63%의 바이러스 저감 효과가 있고, 2대를 사용할 경우에는 약 77%의 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 서울 초등학교 교실 미세먼지 실증 실험 연구에서 공기청정기를 1대 사용할 때 65%, 2대 사용할 때 78%의 미세먼지 농도 저감 효과를 나타낸 결과와 유사한 수준임을 알 수 있다(Han *et al.*, 2019). 또한, CADR $780\text{m}^3/\text{h}$ 공기청정기 1대는 약 4.7회/h의 공기청정회수를 나타내고 있어 1회/h의 환기조건에서 사용할 경우 음압병동에서 요구하는 6회/h의 환기 성능과 거의 유사한 수준을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 교실 내에 감염자가 1명 존재할 때 비감염자의 시간에 따른 바이러스 흡입량을 나타내고 있다. 어린 학생의 호흡량은 어른 호흡량인 $0.6\text{m}^3/\text{h}$ (Repace *et al.*, 2006) 보다 조금 작은 $0.45\text{m}^3/\text{min}$ 으로 가정하였다(Rivas *et al.*, 2016). 아무런 조치를 취하지

않을 때 2시간 이후면 코로나19 바이러스의 최소 감염량 보다 높을 것으로 추정되는 약 960개의 바이러스에 노출될 수 있음을 알 수 있다. 공기청정기 1대 사용 시 2시간 이후 400개(약 58% 저감), 환기 6회의 조건에서는 350개(약 64% 저감)로 노출량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 에너지 소비 문제로 환기장치의 지속적 사용이 어려울 경우 공기청정기를 사용하면서 환기 1회/h 조건만 유지해도 바이러스 노출량을 360개(약 62% 저감) 까지 줄일 수 있고, 공기청정기를 2대 사용할 경우에는 255개(약 73% 저감) 까지도 줄일 수 있음을 보여주고 있다.

그림 6은 교실 내에 감염자가 바이러스를 충분히 발생시킨 뒤 퇴실했을 때, 즉 바이러스 농도는 충분히 존재하지만 더 이상 바이러스 발생원은 존재하지 않을 때 시간에 따른 바이러스 농도 변화를 나타내고 있다. 아무런 조치를 취하지 않으면 15분 정도가 경과되어도 초기 농도의 1/2 수준의 농도가 잔류할 수 있음을 알 수 있다. 6회/h의 환기 조건에서는 10분 정도면 초기 농도 대비 23% 수준으로 농도를 크게 줄일 수 있고, 공기청정기 1대 사용 시 29%, 2대 사용 시 13% 수준까지 농도를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그림 7은 위와 같은 상황에서 교실 내의 비감염자의 시간에 따른 바이러스 흡입량을 보여주고 있다. 아무런 조치를 취하지 않을 경우 1시간 체류 시 약 200개

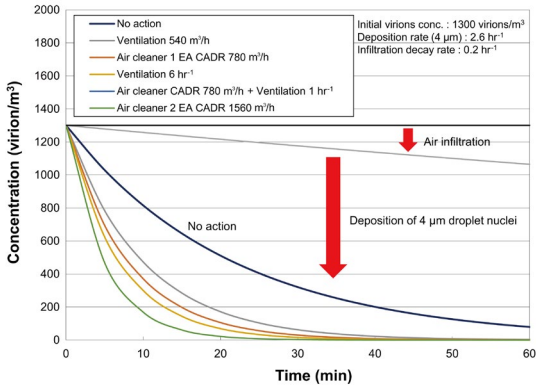


Fig. 6. Virion concentration changes in a classroom with initial concentration of 1300 virions/m³ without an infected student for various air purifying methods.

정도의 바이러스에 노출될 수 있음을 알 수 있다. 한편 6회/h 환기 조건에서는 70개 정도로(약 64% 저감) 노출량을 줄일 수 있고, 공기청정기 1대 사용 시 80개 정도로(약 59% 저감), 2대 사용 시 50개 정도(약 74% 저감) 까지 노출량을 줄이는 것으로 나타났다.

3. 고 찰

코로나19 바이러스는 공기감염보다는 접촉감염이나 비말감염이 주요 감염요인이므로 환기나 공기청정기 사용으로 감염 전파를 완벽하게 차단하기는 불가능하다. 다만 환기가 부족한 협소한 실내 환경에서는 바이러스가 지속적으로 농축되어 공기감염의 위험성이 높아질 수 있으므로 공기청정기를 보조 수단으로 사용하여 공기 중의 바이러스 농도를 줄여주는 것은 공기감염의 위험성을 낮춰주는 매우 적절한 관리 수단이 될 수 있다. 다만 Ham (2020)에서 언급했던 것과 같이 공기청정기의 설치 위치에 있어서는 주의를 기울일 필요는 있다. 공기청정기의 기류 해석을 통해서 전면 흡입 및 상부 노출형 공기청정기는 1,500 m³/h의 높은 풍량에서도 50 cm 이상만 떨어져도 공기청정기 기류에 의한 영향이 0.3 m/s 이하로 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 교실에서 공기청정기

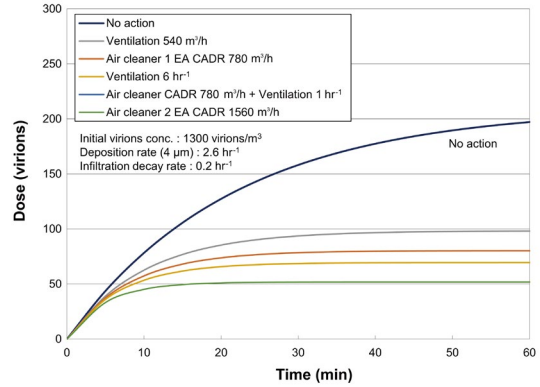


Fig. 7. Virus dose on uninfected students in a classroom with initial concentration of 1300 virions/m³ without an infected student for various air purifying methods.

를 사용할 때 공기 토출구는 천정으로 향하도록 하여 재실자가 기류에 직접 맞닿지 않게 하고 재실자들로부터 최소한 50 cm 이상(1 m 이상 추천) 충분히 거리를 이격하고 설치하도록 안내하며 공기청정기 주변으로는 접근하지 못하게 하는 등의 공기청정기 설치 및 운영기준을 마련할 필요가 있다. 다만 본 연구는 기존 문헌들에서 조사된 비말의 크기분포인 1~10 μm 영역과 100~1000 μm 영역 중 공기감염 가능성이 높은 1~10 μm 영역의 비말만을 대상으로 고려한 것이다. 만약 10~100 μm 영역의 비말이 존재할 경우 비말 내의 바이러스 농도는 증가하고 공기 중 체류시간은 감소하므로 그에 따른 영향 분석은 추가적으로 고려될 필요가 있다. 또한 이러한 비말이 존재할 때 공기청정기 기류에 의해 부유 시간이 증가할 수도 있으므로 기류 영향이 거의 없도록 공기청정기 이격 거리에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

학교 교실과 같은 실내환경에서는 감염자가 지속적으로 배출하는 바이러스에 의해 공기감염을 유발할 정도로 농도가 농축될 수가 있으므로 환기가 충분히 잘 이루어지도록 실내 환경을 관리할 필요가 있

다. 다만 계절적, 주변 환경적 요인으로 환기가 어려운 조건에서는 충분한 용량의 공기청정기를 사용하여 부족한 환기 횟수를 공기청정 횟수로 보완하여 관리하는 것이 필요하다. 교육부 기준인 적용면적의 1.5배에 해당하는 공기청정기를 환기 1회/h 조건에서 사용할 경우 음압시설의 환기 기준인 6회/h와 거의 유사한 성능을 얻을 수 있기 때문이다. 한편 공기청정기에 의한 기류의 영향을 줄이기 위해서는 재실자로부터 1 m 이상 충분히 이격하여 설치하여 기류로 인한 확산의 위험성을 최소화시킬 필요가 있다. 학교에 설치된 공기청정기를 무조건 사용하지 말라는 지침보다는 정확한 설치 위치와 토출구 방향 및 재실자와의 이격 유지 거리 등의 사용지침을 마련하고 적극적으로 사용하는 것이 코로나19 시대에 공기감염 확산을 억제하는 데 훨씬 도움을 줄 수 있을 것이다. 그리고 코로나19는 공기감염 보다는 비말감염이나 접촉감염에 의한 감염확률이 훨씬 크므로 실내 공간에서 공기청정기에만 무조건 의존하기 보다는 마스크 착용, 사회적 거리두기 및 손 씻기 등을 생활화하는 것이 무엇보다도 중요하다.

감사의 글

본 연구는 2020년 한국공기청정협회의 지원을 받아 수행하였고 이에 감사드립니다.

References

Ahn, K.-H. (2020) Aerosol, Respiratory Droplets, and COVID-19, *Particle and Aerosol Research*, 16(3), 61-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2020.16.3.061>

Algahtani, H., Subahi, A., Shirah, B. (2016) Neurological Complications of Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus: A Report of Two Cases and Review of the Literature, *Case Reports in Neurological Medicine*, 2016, 3502683. <https://doi.org/10.1155/2016/3502683>

Burkart, J., Moshammer, H., Neuberger, M., Steiner, G., Reischl,

G., Hitzengerger, R. (2010) Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.108 and OPC1.109) under urban conditions, *Journal of Aerosol Science*, 41(10), 953-962. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.07.007>

Centers for Disease Control and Prevention (2003) Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities: Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC). *MMWR*, 52 (RR-10), 1-48. cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/index.html

Chen, N., Zhou, M., Dong, X., Qu, J., Gong, F., Han, Y., Qiu, Y., Wang, J., Liu, Y., Wei, Y., Xia, J., Yu, T., Zhang, X., Zhang, L. (2020) Epidemiological and Clinical Characteristics of 99 Cases of 2019 Novel Coronavirus Pneumonia in Wuhan, China: A Descriptive Study, *The Lancet*, 395(10223), 507-513. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30211-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30211-7)

Christopherson, D.A., Yao, W.C., Lu, M., Vijayakumar, R., Sedaghat, A.R. (2020) High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy, *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 163(6), 1153-1155. <https://doi.org/10.1177/0194599820941838>

Groneberg, D.A., Hilgenfeld, R., Zabel, P. (2005) Molecular Mechanisms of Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS), *Respiratory Research*, 6(8), <https://doi.org/10.1186/1465-9921-6-8>

Ham, S. (2020) Prevention of Exposure to and Spread of COVID-19 using Air Purifiers: Challenges and Concerns, *Epidemiol Health*, 42, e2020027. <https://doi.org/10.4178/epih.e2020027>

Han, B., Hong, K., Shin, D., Kim, H., Kim, Y., Kim, S., Kim, S., Hwang, C., Noh, K. (2019) Field Tests of Indoor Air Cleaners for Removal of PM_{2.5} and PM₁₀ in Elementary School's Classrooms in Seoul, Korea, *Particle and Aerosol Research*, 15(2), 79-90, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.2.079>

Han, Z.Y., Weng, W.G., Huang, Q.Y. (2013) Characterizations of Particle Size Distribution of the Droplets Exhaled by Sneeze, *Journal of The Royal Society Interface*, 10 (88), 20130560. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0560>

Hinds, W.C. (1999) *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Ed., Wiley, New York.

Karimzadeh, S., Bhopal, R., Nguyen Tien, H. (2020) Review of Infective Dose, Routes of Transmission, and Outcome of COVID-19 Caused by the SARS-CoV-2 Virus:

- Comparison with Other Respiratory Viruses, Preprints, 2020, 2020070613.
- Lee, J., Yoo, D., Ryu, S., Ham, S., Lee, K., Yeo, M., Min, K., Yoon, C. (2019) Quantity, Size Distribution, and Characteristics of Cough-Generated Aerosol Produced by Patients with an Upper Respiratory Tract Infection, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(4), 840-853. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.01.0031>
- Mousavi, E.S., Kananizadeh, N., Martinello, R.A., Sherman, J.D. (2020) COVID-19 Outbreak and Hospital Air Quality: A Systematic Review of Evidence on Air Filtration and Recirculation, *Environmental Science and Technology*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03247>
- Nissen, K., Krambrich, J., Akaberi, D., Hoffman, T., Ling, J., Lundkvist, Å., Svensson, L., Salaneck, E. (2020) Long-Distance Airborne Dispersal of SARS-CoV-2 in COVID-19 Wards, *Scientific Reports*, 10, 19589. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76442-2>
- Repace, J., Al-Delaimy, W.K., Bernert, J.T. (2006) Correlating Atmospheric and Biological Markers in Studies of Secondhand Tobacco Smoke Exposure and Dose in Children and Adults, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48(2), 181-194. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000184883.72902.d4>
- Rivas, I., Donaire-Gonzalez, D., Bouso, L., Esnaola, M., Pandolfi, M. de Castro, M., Viana, M., Alvarez-Pedrerol, M., Nieuwenhuijsen, M., Alastuey, A., Sunyer, J., Querol, X. (2016) Spatiotemporally Resolved Black Carbon Concentration, Schoolchildren's Exposure and Dose in Barcelona, *Indoor Air*, 26, 391-402. <https://doi.org/10.1111/ina.12214>
- Shaughnessy, R.J., Sextro, R.G. (2006) What is an Effective Portable Air Cleaning Device? A Review, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(4), 169-181. <https://doi.org/10.1080/15459620600580129>
- Shen, Y., Li, C., Dong, H., Wang, Z., Martinez, L., Sun, Z., Handel, A., Chen, Z., Chen, E., Ebell, M.H., Wang, F., Yi, B., Wang, H., Wang, X., Wang, A., Chen, B., Qi, Y., Liang, L., Li, Y., Ling, F., Chen, J., Xu, G. (2020) Community Outbreak Investigation of SARS-CoV-2 Transmission among Bus Riders in Eastern China, *JAMA Internal Medicine*, 180(12), 1665-1671. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.5225>
- Smith, S.H., Somsen, G.A., van Rijn, C., Kooij, S., van der Hoek, L., Bem, R.A., Bonn, D. (2020) Aerosol Persistence in Relation to Possible Transmission of SARS-CoV-2, *Physics of Fluids*, 32, 107108. <https://doi.org/10.1063/1.50027844>
- Stadnytskyi, V., Bax, C.E., Bax, A., Anfinrud, P. (2020) The Airborne Lifetime of Small Speech Droplets and Their Potential Importance in SARS-CoV-2 Transmission, *PNAS*, 117(22), 11875-11877. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006874117>
- Wölfel, R., Corman, V.M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Müller, M.A., Niemeyer, D., Jones, T.C., Vollmar, P., Rothe, C., Hoelscher, M., Bleicker, T., Brunink, S., Schneider, J., Ehmann, R., Wirzmaier, K., Drosten, C., Wendtner, C. (2020) Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019, *Nature*, 581, 465-469. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2196-x>
- Zhao, B., An, N., Chen, C. (2020) Using an Air Purifier as a Supplementary Protective Measure in Dental Clinics During the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic, *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 1-2. <https://doi.org/10.1017/ice.2020.292>

Authors Information

한방우(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 김상복(한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
 이건희(한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
 홍기정(한국기계연구원 환경기계연구실 선임기술원)
 박인용(한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
 김학준(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 이예완(한국기계연구원 환경기계연구실 연구원)
 김용진(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 정상현(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 심성훈(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 김진태(한국기계연구원 환경기계연구실 기술원)
 노선아(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 민태진(한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
 신완호(한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)