

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 3: September 2022 pp. 51-59

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.3.051>

지하역사 승강장에서 코로나19 바이러스 공기감염 대응 공기조화기와 공기청정기의 적용 효과 비교

이 건 희¹⁾ · 김 상 복¹⁾ · 박 인 용¹⁾ · 홍 기 정¹⁾ · 이 예 완¹⁾ · 김 학 준¹⁾ · 김 용 진¹⁾ · 한 방 우^{1)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구실

(2022년 1월 26일 투고, 2022년 4월 23일 수정, 2022년 4월 23일 게재확정)

Comparison of applicability of HVAC and air cleaners in a subway station platform against airborne infection of SARS-CoV-2

Gunhee Lee¹⁾ · Sang Bok Kim¹⁾ · Inyong Park¹⁾ · Kee Jung Hong¹⁾ · Yeawan Lee¹⁾ ·
Hak-Joon Kim¹⁾ · Yong-Jin Kim¹⁾ · Bangwoo Han^{1)*}

¹⁾*Department of Sustainable Environmental Research, Korea Institute of Machinery & Materials*

(Received 26 Jan 2022; Revised 23 Apr 2022; Accepted 23 Apr 2022)

Abstract

In this work, virion concentration and its dose changes by HVAC and air cleaners were estimated in a subway station platform to control airborne infection of SARS-CoV-2. Collection efficiencies with particle size were measured for the air filter equipped in a HVAC in one subway station in Daejeon. Indoor PM_{2.5} changes according to outdoor PM_{2.5} with time were also measured to estimate air infiltration rate in the subway station platform. When infected persons generate virions by 10⁴, 10⁵, 10⁶, 3 × 10⁶ and 5 × 10⁶ h⁻¹ in a 2,400 m³ volume platform, the concentration and dose were estimated as 9, 92, 275 and 458 virions/m³ and 4, 43, 130 and 217 virions after 1 hour exposure, respectively. The concentration and dose were reduced by 70%, and 64%, respectively by operations of both HVAC (with a flow rate of 16,000 m³/h, MERV 11) and ten air cleaners(with total CADR 10,740 m³/h) compared to those without operation of both HVAC and air cleaners. However, virion dose in the platform was estimated to be too low at the general conditions due to a large space, a high air infiltration (3 h⁻¹) and a short residence time (usually < 10 mins) in the platform irrespective of the operations of HVAC or air cleaners. HVAC with filters and air cleaners would be more necessary in the concourse or shopping areas in the subway stations to reduce the infection dose from a few hundred to several tens virions in a hour.

Keywords: SARS-CoV-2, Subway, HVAC, Air cleaner, Clean air delivery rate (CADR)

*Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284

Email : bhan@kimm.re.kr

1. 서론

2019년 말에 시작되어 전 세계에 걸쳐 유행하고 있는 코로나19 바이러스로 인해 국가적으로 사회·경제적 피해가 지속되고 있다. 바이러스는 다른 생명체에서만 기생하는 전염성 감염원으로서 DNA나 RNA로 만들어진 유전 물질을 가지고 있다. 특히 코로나19 바이러스는 단일 가닥 RNA 바이러스로서 입자 1개의 직경이 대략 0.05 - 0.2 μm (평균 0.1 μm) 크기로 알려져 있다(Y.M. Bar-On et al., 2020). 2 m 반경 이내에서 호흡기 비말에 의한 밀접 접촉을 통해 주로 전파되는 것으로 알려져 있다. 하지만 수 μm 이하 크기의 작은 비말핵 입자들이 공기 중에 오랫동안 부유하면서 전파시키는 공기감염의 위험성도 존재한다. 최근 코로나19 바이러스의 공기감염 전파를 밝히기 위해 바이러스를 포함한 공기 부유 입자의 역학 모델을 개발한 연구들이 보고되고 있다(Morawska and Cao, 2020; Chowdhury et al., 2021). 이러한 이유로 전 세계 239명의 전문가가 세계보건기구에 코로나19 바이러스의 공기감염의 위험성을 인정하라는 공개 서한을 보내기도 하였다.

일반 대중이 이용하는 병원이나 터미널 등의 대중이용시설에서 공기감염 전파 위험을 줄이기 위한 방안으로 UV-C(Buonanno et al., 2020; Biasin et al., 2021)나 플라즈마 방식(Chen et al., 2020; Filipić et al., 2020)을 이용하는 방법들이 시도되고 있으나 아직까지 확실한 효과를 입증하고 있지 못하고 있는 상태이다. 가장 잘 알려진 방법은 신선한 외기를 도입하는 환기를 통한 바이러스 농도의 희석 방법이다(Morawska, et al., 2020). 공조기나 공기청정기를 사용하는 방법들도 제안되고 있지만 필터 성능이나 기류에 의한 확산 우려가 있는 일부 있는 상태이다(Ham, 2020). 한편 394개의 논문을 조사하여 병원에서 적절한 필터 방식의 공조기를 운영하는 것이 코로나19 상황에서 병원의 공기질을 관리하는데 매우 유용한 방법임을 제시한 연구가 있다(Mousavi et al., 2021). 해파필터가 설치된 공기청정기 역시 감염 확산을 억제하는 유용한 관리 수단이라고 제시한 연구도 있다(Zhao et al., 2020; Christopherson et al., 2020).

코로나19의 확산에 따라 좁은 공간에서 불특정 다수가 이용하는 대중교통 수단에서의 감염 전파의

우려가 높을 수 있다(Kim et al., 2021). 본 연구에서는 서울시의 가장 중요한 교통수단 중 하나인 지하철에 대해 지하역사에서의 감염 확산 위험성을 살펴보고자 한다. 특히 공기감염의 원인이 될 수 있는 10 μm 이하의 비말핵 입자를 대상으로 지하역사 승강장에 감염자가 존재할 때 바이러스 농도를 살펴보고 시간에 따른 농도 변화를 살펴보고자 한다. 또한 공조기와 공기청정기의 사용여부에 따른 승강장에서의 농도 변화와 그에 따른 바이러스 노출량 변화를 살펴보고자 한다.

2. 연구방법 및 결과

2.1 비말 액적 크기와 비말 내 바이러스 농도

비말 액적의 크기와 발생 농도는 사람이 숨쉴 때, 말할 때, 기침 할 때 그리고 재채기할 때 등 상황에 따라 다르고 주변 온도와 상대습도에 따라서도 크게 달라질 수 있다. 정상적인 온도 및 습도 조건에서 비말 액적의 크기는 대략 50 - 150 μm 정도로 알려져 있다(Xie et al., 2007). 말하거나 기침할 때 1.6, 2.5 및 145 μm 및 1.6, 1.7 및 123 μm 의 세 크기 모드에서 액적이 발생한다는 연구 결과가 있다(Johnson et al., 2011). 말할 때는 1-10 μm , 기침할 때는 1-10 μm 와 100-1000 μm 크기가 동시에 발생한다는 연구 결과도 있다(Smith et al., 2020). 10 μm 이하의 작은 크기 영역에서는 독감 환자에게서 0.35-9 μm 영역의 액적이 발생하고 주로 대부분 0.35-2.5 μm 에서 수농도가 높게 나타난다는 연구(Lindsley et al. 2012), 기침할 때 1-10 μm 영역대와 0.3 μm 이하 영역에서 비말 액적이 관찰되고 수농도로 0.3 μm 이하가 대부분인 연구(Lee et al., 2019), 말할 때 약 4 μm 크기가 다수 발생한다는 연구(Stadnytskyi et al., 2020), 말할 때나 숨쉴 때 0.8 μm 크기로 다수 발생한다는 연구도 있다(Morawska et al. (2009). 여기에서 100 μm 이상의 비말 입자는 중력에 의해 쉽게 침강을 하므로 공기 감염보다는 비말 감염의 주요 원인이 될 것으로 보인다. 한편 상대적으로 작은 10 μm 이하의 비말의 경우는 공기 중에 상대적으로 오랫동안 부유한 상태로 유지할 수 있어 공기감염의 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공기감염의 위험성이 있는 10 μm 이하의

비말에 대해서만 고려하기로 한다. 특히 Lee et al. (2019), Johnson et al. (2011) 및 Stadnytskyi et al. (2020) 등의 연구결과를 바탕으로 최종 건조된 비말핵 입자를 대략 0.3 μm의 경우와 3 μm의 두 가지 경우로 구분하여 진행하였다. 한편 최근 연구에 의하면 비말 내에는 증발하기 어려운 전해질, 효소, DNA, 백혈구 등을 질량분율로 1-5% 정도를 포함하고 있어 최종 비말핵의 크기는 초기 비말 크기의 약 1/5-1/3 수준으로 감소하는 것으로 알려지고 있다(Stadnytskyi et al., 2020). 즉, 4 μm 크기의 비말핵의 경우 초기 액적 크기는 12 μm에서 21 μm 크기로 추정된다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서도 최종 비말핵의 크기는 초기 비말 크기의 1/4 수준으로 감소하는 것으로 가정하였다.

최근 연구에 의하면 코로나19 바이러스의 경우 바이러스 개수가 비말 1 ml 당 평균 7×10^6 copies, 최대 2.35×10^9 copies인 것으로 보고되었다(Wölfel et al., 2020). 3 μm 크기의 비말의 경우 초기 비말 크기가 12 μm 정도로 예상되므로 평균적으로 비말 한 방울 내의 바이러스 개수는 6.33×10^3 개이고 최대의 경우 2.13개까지 이를 수 있다. 여기에서 비말 한 방울 내에 바이러스 개수 6.33×10^3 개는 12 μm 액적이 158개 존재할 때 그 중 한 개가 바이러스를 포함하고 있다는 것을 의미한다. 이는 매우 적은 양이라고도 생각될 수도 있지만 말할 때 초당 2,300개의 액적이 생성된다고 할 때 바이러스 개수는 분당 1000개 정도 발생시킬 수 있고(Stadnytskyi et al., 2020) 슈퍼 전파자의 경우 이보다 100배 많은 분당 100,000개까지도 생성시킬 수 있으니(Prather et al., 2020) 결코 적은 양이 아니라고 할 수 있다. 본 연구에서는 말할 때 바이러스를 분당 10^3 , 10^4 및 10^5 개 배출하는 경우로 나누어 계산해 보았고, 숨쉴 때는 말할 때의 1/10의 수준으로 비말이 발생한다고 가정하였다. 만약 1시간 동안 90% 숨쉬고 10% 말한다고 가정하면 3 μm 크기의 비말에 의한 1시간 당 바이러스 발생량은 평균적으로 약 10^4 개, 슈퍼 전파자의 경우 10^6 개까지도 될 수 있다.

한편 0.3 μm의 비말핵의 경우 초기 액적크기가 1.2 μm 정도에 해당하고 이는 12 μm 비말 부피의 1/1000에 해당하므로 비말 한 방울 내의 바이러스 개수는 6.33×10^6 개이고 이는 약 15만개의 비말

중 하나가 바이러스를 포함할 수 있다는 것을 의미한다. 0.3 μm 비말핵의 농도가 3 μm 보다 50배 정도 높다고 가정하더라도 (Lee et al., 2019) 바이러스 발생 개수는 1/20이 되므로 0.3 μm 입자에 의한 바이러스 발생량은 평균 5×10^2 개, 슈퍼 전파자의 경우 5×10^4 개로 설정할 수 있다.

2.2 비말 액적 크기와 비말 내 바이러스 농도

본 연구에서는 대전의 한 지하역사인 A역사를 대상으로 모델링을 진행하였다. A역사의 공조기에는 MERV 10등급의 필터가 장착되어 있다고 하였다. 참고로 MERV 10등급은 최소효율 곡선에서 1-3 μm 입자를 50-65%, 3-10 μm 입자를 80% 이상 처리하는 필터이다(ASHRAE 52.2, 2017). 그림 1은 실제 A역사의 공조기 전후단에서 필터에 대해 입경별 집진효율을 본 연구진이 직접 측정한 결과를 보여 주고 있다. 0.3 μm부터 입경이 커질수록 입자의 포집효율이 증가하고 3 μm 이상에서는 거의 90% 이상의 포집효율을 나타내었다. 입자 크기 구간별로 살펴보면 0.3-10 μm 영역에서 34.5%, 1.0-3.0 μm 영역에서 79.8%, 3.0-10 μm 영역에서 99.1%를 나타내고 있어 MERV 10이 아닌 MERV 11 등급 수준의 필터 성능을 나타내었다. 참고로 MERV 11등급은 최소효율 곡선에서 0.3-10 μm 입자를 20% 이상, 1-3 μm 입자를 65-80%, 3-10 μm 입자를 85% 이상 처리하는 필터이다. 본 연구에서는 그림 1의 결과를 이용하여 공조기의 필터 성능으로서 0.3 μm 크기에 대해서는 20%, 3.0 μm 크기에 대해서는 90%를 사용하였고, 공조기에 필터가 사용되지 않았을 때와도 비교해 보았다.

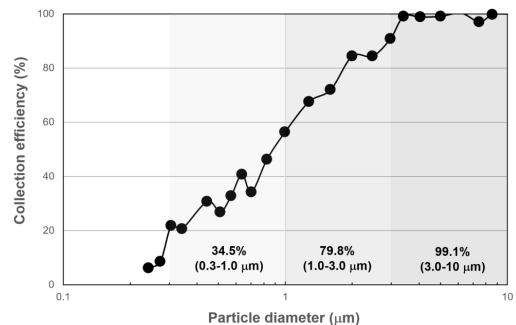


Figure 1. Collection efficiencies with particle size for an air filter used in HVAC in A subway station.

2.3 지하역사 승강장 적용 이론식 도출

그림 2는 본 연구에서 대상으로 하는 공조기와 공기청정기가 설치된 대전 A역사의 개략도를 나타내고 있다. 지하철 승강장의 크기는 승강장의 한 면만을 고려하여 전체 승강장 크기 4,800 m³의 반인 2,400 m³으로 한정하였다. 공조기 유량 또한 전체 승강장 공조기의 공급 유량 32,000 m³/h의 1/2인 16,000 m³/h로 설정하였고 내부순환율은 0.8(즉, 외기 20% 도입)로 진행하였다. 공기청정기는 CADR (clean air delivery rate) 기준으로 17.9 m³/min (=1,074 m³/h), 소비전력 71 W의 공기청정기를 10대 적용하는 경우를 비교해 보았다.

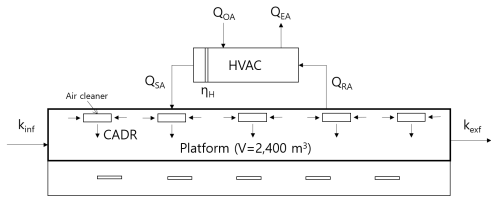


Figure 2. A schematic to simulate an A subway station equipped with the HVAC system and air cleaners.

식 (1)은 바이러스 농도에 대한 질량 밸런스 식을 보여주고 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = (1 - \eta_H) Q_{OA} C_o + VPk_{inf} C_o + (1 - \eta_H)(Q_{RA} - Q_{EA}) C - Q_{RA} C - N(CADR) C - V k_{dep} C - V k_{exf} C + S \quad (1)$$

여기서 C는 지하철 승강장 내 바이러스 농도 (virions/m³), C₀는 외부의 바이러스 농도 (virions/m³), V는 승강장 부피 (m³), Q_{OA}, Q_{RA}, 및 Q_{EA}는 각각 공조기의 외기 도입량과 실내공기 회수량 및 외부로의 배기량(m³/h), η_H는 공조기 필터의 집진효율(-), CADR은 공기청정기의 청정화능력(m³/h), N은 공기청정기 대수, 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), P는 투과율, S는 단위 시간당 내부 바이러스 발생량(virions/h)을 의미한다.

공조기는 주로 Q_{OA}=Q_{EA}이고, 내부순환율이 x일

때 Q_{RA}-Q_{EA}=xQ_{RA}으로 표현할 수 있으며, 외부의 바이러스 농도 C₀는 0이고, k_{inf}와 k_{exf}는 같다고 가정하면 식 (1)은 아래의 식 (2)와 같이 정리가능하다.

$$V \frac{dC}{dt} = (1 - \eta_H) x Q_{RA} C - Q_{RA} C - N(CADR) C - V k_{dep} C - V k_{inf} C + S \quad (2)$$

2.4 지하역사 승강장의 공기 침투 손실의 산출

지하철 승강장에서 외부 공기의 침투 손실 k_{inf}는 기밀도에 의한 영향이므로 외기 PM_{2.5} 농도 변화에 따른 승강장 내의 PM_{2.5}의 농도 변화로부터 추정해 보았다. 공조기나 공기청정기가 가동되지 않는 상황에서 내부 발생원이 없다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = Pk_{inf} C_o - k_{dep} C - k_{inf} C \quad (3)$$

여기에서 C와 C₀는 바이러스 농도가 아니라 승강장과 외기의 PM_{2.5} 농도(μg/m³)이다. PM_{2.5}의 침투 손실 k_{exf}는 0.1에서 0.49 h⁻¹의 범위를 갖는 기존 연구 결과(Xiang et al., 2021)를 토대로 0.3 h⁻¹로 가정하였고 투과율 P는 1로 설정하고 진행하였다. 그림 3은 실제 지하역사 A역의 승강장에서 공조기를 운전시키다가 중단시키고 외기 농도에 따른 PM_{2.5} 미세먼지 농도 변화를 4회에 걸쳐 측정된 결과를 보여주고 있다. 공조기 가동으로 외기 농도 19.3-25.8 μg/m³ 보다 30-37% 감소된 농도 조건에서 시작하여 시간이 지날수록 외기 농도와 비슷해지는 것을 확인할 수가 있다. 이는 내부 오염발생원이 없다는 가정 하에서 외기 미세먼지가 승강장으로 유입되어 증가한 것이 주된 요인이라고 할 수 있다. 4회의 실험 결과에 대해 식 (3)에 k_{inf} = 2.3, 2.5, 3.3 및 3.8 h⁻¹을 사용하였을 때 실험 결과가 이론적으로 얻은 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 지하철 승강장에서의 열차풍 또는 기밀 누설에 의한 손실은 2.3-3.8 h⁻¹ 범위 정도를 나타낸다고 할 수 있고 이론 해석에서는 4회의 평균값인 k_{inf} = 3.0 h⁻¹을 사용하였다.

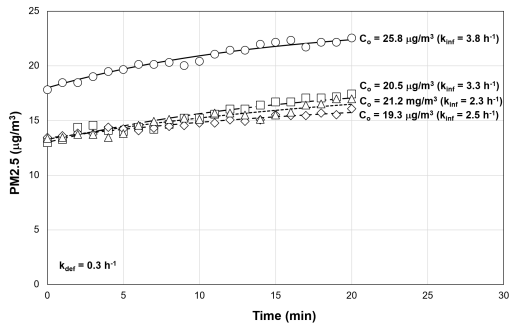


Figure 3. PM_{2.5} increase with time for a platform in A subway station when a HVAC system (flowrate 32,000 m³/h) is turned off.

2.5 지하역사 승강장의 바이러스 농도 해석

지하앞에서 언급한 것과 같이 바이러스 입자 발생량 S는 3 µm 크기에서 10⁴, 10⁵ 및 10⁶ virions/h, 0.3 µm 크기에서는 5 x 10², 5 x 10³, 5 x 10⁴ virions/h가 발생하는 것으로 하였고 승강장에 감염자가 동시에 1, 3, 및 5명이 존재할 때도 고려해 보았다. 비말 입자의 침착에 의한 손실 k_{dep}은 3 µm 크기에서 1.5 h⁻¹, 0.3 µm 크기에서 0.05 h⁻¹로 설정하여 계산하였다(Shaughnessy and Sextro, 2006).

그림 4는 공조기와 공기청정기를 모두 가동하지 않았을 경우 감염자가 발생시키는 3 µm 비말 액적에 의한 승강장에서의 바이러스 농도 변화를 보여주고 있다. 승강장에 바이러스 감염자가 1명 존재할 때 평균 수준(7 x 10⁶ copies/ml)으로 바이러스를 배출한다고 하면(즉 S = 10⁴ virions/h) 그 발생 농도는 1시간 동안 배출하더라도 1 m³ 당 평균 1개도 채우지 못하는 것으로 나타났다. 이는 승강장이 충분히 크고 기밀 저하에 의한 환기 효과(k_{in,f})도 3 회/hr 정도 되어 1명의 감염자로 인해 발생하는 바이러스 농도는 매우 미약한 것을 의미한다. 한편 슈퍼 전파자가 1명 존재할 때(S = 10⁶ virions/h)에는 1시간 후에 평균 91 virions/m³ 정도로 농도가 증가할 수 있고, 슈퍼 전파자가 5명이 동시에 존재할 때에는 1시간 후에 평균 458 virions/m³ 까지도 증가할 수 있음을 보여주고 있다.

그림 5는 그림 4와 같이 승강장에서 감염자들이 바이러스를 배출할 때 비감염자 1명의 바이러스 노출량을 나타낸 것이다. 호흡량으로 성인 기준으

로 0.6 m³/h를 사용하였다(Repace et al., 2006). 평균 수준의 바이러스를 배출하는 감염자가 승강장에 1명 존재할 때에는 비감염자의 평균 바이러스 노출량이 1시간 동안에도 1개도 되지 않음을 알 수 있다. 슈퍼전파자가 1명, 3명 및 5명이 존재할 때에는 비감염자의 1시간 동안 누적 평균 노출량이 각각 43개, 130개 및 217개 정도로 나타났다. 하지만 보통 승강장에서 체류하는 시간이 길어야 10분 정도 되므로 실제 평균 노출량은 이의 6.3% 이하인 3개, 8개 및 14개 이하로 보는 것이 적절하다.

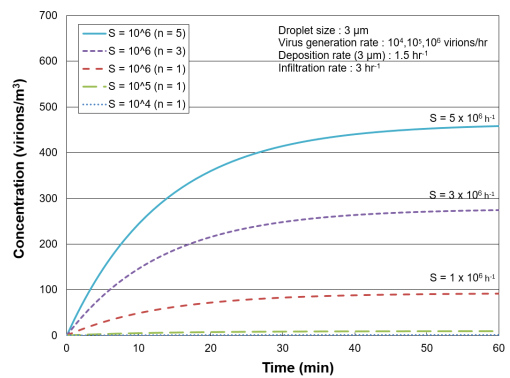


Figure 4. Simulation results of virion concentration changes in an A subway station platform with infected persons (3 µm droplets).

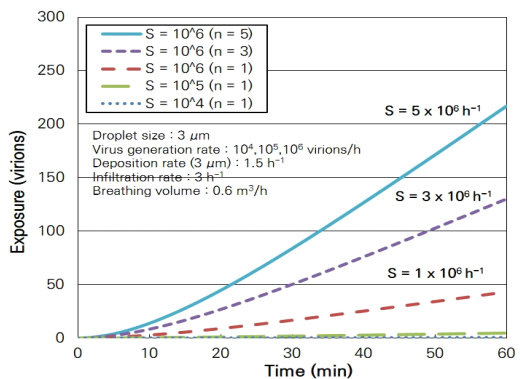


Figure 5. Simulation results of accumulated virus exposure quantity on a uninfected person in an A subway station platform with infected persons (3 µm droplets).

그림 6은 0.3 µm 비말이 바이러스의 전파의 주요 매개체라고 가정할 때 감염자들이 발생시키는 0.3

µm 비말에 의한 승강장에서의 바이러스 농도 변화를 보여주고 있다. 바이러스 발생량이 3 µm의 1/20 정도이므로 승강장에 누적되는 농도도 슈퍼 전파자가 1명에서 5명까지 존재할 때조차 수 개에서 수십 개 정도로 낮게 나타났다. 비감염자의 평균 노출량 또한 1시간 동안 많아야 14개 정도이고 10분 동안에는 1개에도 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 바이러스 발생량과 노출량을 고려할 때 감염을 일으킬 수 있는 비말은 0.3 µm 보다는 1-5 µm의 크기가 훨씬 중요하다는 것을 알 수 있다.

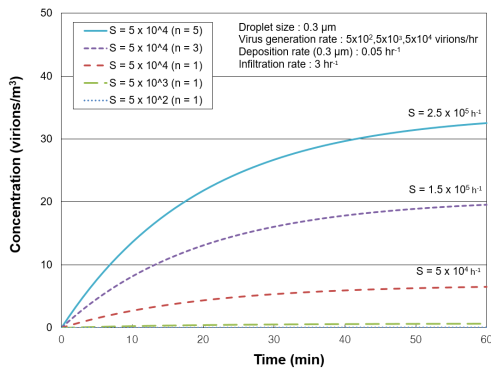


Figure 6. Simulation results of virion concentration changes in an A subway station platform with infected persons (0.3 µm droplets).

그림 7은 슈퍼 전파자가 승강장에 5명이 존재하는 경우(S = 5 x 10⁶ virions/h)에 대해 공조기나 공기청정기를 적용했을 경우에 대해 적용하지 않았을 경우와 바이러스 농도를 비교한 결과를 보여주고 있다. 공조기와 공기청정기를 운영하지 않았을 때의 승강장 내의 바이러스의 평균농도는 10분 기준으로 244 개/m³, 60분 기준으로 458 개/m³이었고, 필터가 없는 공조기를 운영했을 때에는 10분 후 222 개/m³ 및 60분 후 356 개/m³로 줄어 9% 및 22% 저감 효과를 보여주었다. 한편 MERV 11 등급의 필터가 설치된 공조기를 운영했을 때에는 10분 후 163 개/m³, 60분 후 196 개/m³가 되어 각각 33% 및 57% 저감 효과를 나타내었다. 한편 CADR 1,074 m³/h의 공기청정기 10대를 사용했을 경우 10분 후 180 개/m³, 60분 후 232 개/m³가 되어 각각 26% 및 49% 저감 효과를 나타내었다. 이는 공조기에 MERV11 등급의 필터를 사용할 경우 3 µm 크기의 비말 입자를 90% 정도 처리할 수 있어 3,200 m³/h의 외기 유입에 의한 환기 효과 3,200 m³/h / 2,400 m³ =

1.33 h⁻¹, 12,800 m³/h의 재순환 공기의 필터링에 의한 공기청정 효과 12,800 m³/h × 0.9 / 2,400 m³ = 4.8 h⁻¹가 더해져 약 6.13 h⁻¹의 환기 효과를 나타내고 있고, 공기청정기는 1,074 m³/h × 10 대 / 2,400 m³ = 4.48 h⁻¹의 공기청정 효과를 나타내어 공조기에 의한 효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 이러한 공조기(6.13 h⁻¹)와 공기청정기(4.48 h⁻¹)를 모두 동시에 운영하였을 때에는 10분 후 126 개/m³, 60분 후 138 개/m³가 되어 공조기나 공기청정기 비사용 대비 각각 48% 및 70% 저감 효과를 나타내었다.

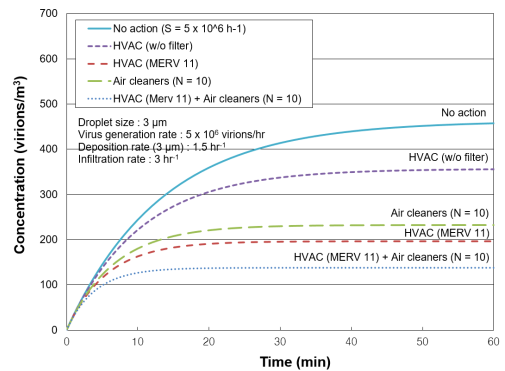


Figure 7. Simulation results of virus concentration changes in the A subway station platform with five super spreaders for various air purifying methods.

그림 8은 그림 7의 경우에 있어서 비감염자 1명의 바이러스 노출량을 비교한 결과를 보여주고 있다. 공조기나 공기청정기를 사용하지 않았을 때의 비감염자의 노출량은 10분 후에 14개, 60분 후에 216개이었고, 필터 없는 공조기를 가동했을 때에는 10분 후에 13개, 60분 후에 178개를 나타내어 노출량을 각각 6%, 18% 줄일 수 있었다. MERV 11 필터의 공조기를 사용했을 때에는 10분 후에 10개, 60분 후에 106개를 나타내어 노출량을 24%, 51% 줄일 수 있었고, 공기청정기를 10대 사용했을 때에는 10분 후에 11개, 60분 후에 124개를 나타내어 노출량을 19%, 43% 줄일 수 있었다. 한편, 공조기와 공기청정기를 모두 적용했을 때에는 10분 후에 9개, 60분 후에 77개로 나타나 노출량을 36%에서 64%까지 감소시킬 수 있었다.

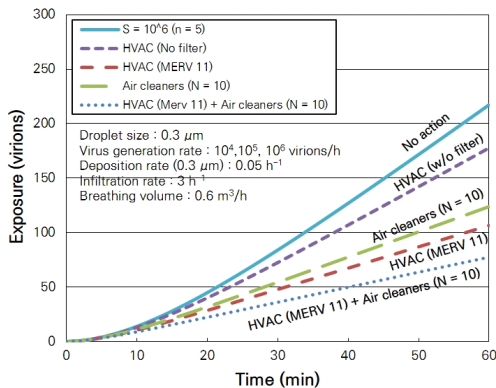


Figure 8. Simulation results of accumulated virus exposure quantity on the uninfected person in the A subway station platform with five super spreaders for various air purifying methods.

3. 고찰

코로나19 감염을 일으키는 바이러스 최소 노출량 (minimum infection dose)은 아직도 잘 알려지지 않은 상태이다. 100개 정도라고 예상하는 논문(Hussain et al., 2020)이나 100개 보다는 크지만 H1N1 바이러스의 700개 보다는 작을 것으로 추정하는 논문이 있는 정도이다(Karimzadeh et al., 2021).

본 연구에서는 평균 수준으로 바이러스를 배출하는 감염자가 다수 존재할 때 공조기나 공기청정기를 사용하지 않더라도 지하역사의 큰 공간과 3회/h 정도의 외부공기 침투 효과로 인해 바이러스 노출량은 1시간이 지나더라도 수 개 수준으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 또한 대부분 승강장에서 체류하는 시간이 10분 이하로서 바이러스에 노출될 확률은 1시간 때보다 훨씬 더 떨어지므로 지하역사 승강장에서 공조기나 공기청정기 사용여부에 상관없이 바이러스 감염 확률은 매우 낮은 것으로 해석이 되었다. 바이러스를 평균 보다 100배 이상 배출하는 슈퍼 전파자가 3-5명 정도가 1시간 정도 승강장에 동시에 체류할 때에나 바이러스 노출량이 비로소 100-200개 이상을 나타내어 바이러스 최소 노출량 수준의 위험한 상황을 연출할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 이 역시 승강장에서 체류시간이 1시간이 되는 경우가 거의 없으

므로 일반적인 경우에 바이러스 노출량은 많아야 수 개에서 수 십개 수준으로 예상할 수 있다. 바이러스 감염자와 비감염자가 모두 마스크를 쓰고 있는 상황이라면 이 노출량도 거의 제로에 가까울 것으로 예상된다.

따라서 지하역사의 승강장에서는 공조기나 공기청정기의 사용 여부와 상관없이 바이러스 노출에 의한 감염 확률은 매우 낮다고 할 수 있다. 하지만 지하역사의 대합실이나 지하역사와 연결된 지하상가의 경우에는 1시간 가까이 또는 그 이상 체류하는 경우도 존재하므로 이런 경우에 있어서 공조기나 공기청정기의 효과는 매우 크다고 할 수 있다. 대중이 이용하는 지하역사의 실내 공간에서 바이러스 노출량이 100개 이상 되는 상황이 되었을 때 필터가 설치된 공조기와 공기청정기 운전을 통해 100개 미만으로 노출량을 줄일 수 있다는 것은 매우 의미있는 해석이 될 수 있다. 다만 본 연구의 경우 지하철 승강장에서 실제 바이러스 농도를 측정된 결과가 아닌 질량 밸런스 식을 통한 시뮬레이션 결과로, 감염자가 배출하는 비말이 공기 중에 급속히 확산하여 균일하게 섞인 상태를 가정해 분석을 진행하였다. 따라서 국부적인 영역에서 순간적으로 고농도의 바이러스가 발생하는 상황과 승강장내 기류 영향에 따른 바이러스 농도 변화 조건에 적용하기에는 한계가 있으며, 향후 이러한 다양한 변수들을 고려하여 정확도가 개선된 후속 연구 수행이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 지하역사 승강장에서 공조기와 공기청정기를 사용할 때 승강장에서의 바이러스 농도와 노출량에 대해 이론적으로 분석해 보았다. 이론의 정확도를 높이기 위해 대전의 한 지하역사에 대해 공조기에 설치된 에어필터의 포집효율을 직접 측정하였고, 공조기 가동 전후의 미세먼지 농도 변화를 통해 승강장에서의 공기 침투 손실(기밀 저하에 따른 환기 효과)을 실험적으로 얻을 수 있었다. 이를 통해 이론식을 도출하여 필터 없는 공조기를 사용할 때, MERV 11 등급 필터의 공조기를 사용할 때, CADR 17.9 m³/min의 공기청정기

를 10대 사용할 때, 공조기와 공기청정기를 같이 사용할 때에 대해 바이러스 농도와 노출량 변화를 살펴보고 이를 공조기와 공기청정기를 사용하지 않을 때와 비교하여 1시간 동안 바이러스 노출량을 각각 6%, 51%, 43% 및 64%를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

평균 수준으로 바이러스를 배출하는 감염자가 다수 존재하더라도 승강장에서의 바이러스 노출량은 수 개 이하로서 공조기나 공기청정기 사용 여부와 관계없이 그 개수가 미미하였고, 슈퍼 전파자가 존재하는 경우에도 승강장에서의 체류 시간이 짧으므로 감염 위험성은 매우 낮은 것으로 나타났다. 다만 지하역사 대합실이나 지하상가 등의 실내 공간에서는 공조기나 공기청정기를 사용하지 않을 경우 불특정 다수의 슈퍼 전파자가 존재할 때 1시간 이내 바이러스 노출량이 수 백 개 수준까지도 올라갈 수도 있으므로 공조기와 공기청정기를 동시에 사용하여 백 개 이하 수준으로 노출량을 줄이는 것은 매우 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

서울특별시 서울산업진흥원 <서울글로벌챌린지 2021>사업을 통해 우수 논문으로 선정되어 작성된 논문입니다.

References

- ASHARE (2017). ANSI/ASHRAE Standard 52.2, Method of Testing General Ventilation Air Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Biasin, M., Bianco, A., Pareschi, G. et al. (2021). UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication, *Scientific Report*, 11, 6260.
- Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I., and Brenner D. J. (2020). Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses, *Scientific Report*, 10, 10285.
- Chen, Z., Garcia Jr. G., Arumugaswami, V., and Wirz, R. E. (2020). Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation, *Physics of Fluids*, 32, 111702.
- Chowdhury, M. A., Shuvho, M. B. A., Shahid, M. A., Haque, A. K. M. M., Kashem, M. A., Lam, S. S., Ong, H. C., Uddin, M. A., and Mofijur, M. (2021). Prospect of Biobased Antiviral Face Mask to Limit the Coronavirus Outbreak, *Environmental Research*, 192, 110294.
- Christopherson, D.A., Yao, W.C., Lu, M., Vijayakumar, R., and 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.
- Filipić, A., Gutierrez-Aguirre, I., Primc, G., Mozetič, M. and Dobnik, D. (2020). Cold Plasma, a New Hope in the Field of Virus Inactivation, *Trends in Biotechnology*, 38(11), 1278-1291.
- Ham, S. (2020). Prevention of Exposure to and Spread of COVID-19 using Air Purifiers: Challenges and Concerns, *Epidemiol Health*, 42, e2020027.
- Hussain, A., Singhal, T., and EL-Hasani, S. (2020). Extent of infectious SARS-CoV-2 aerosolisation as a result of oesophagogastroduodenoscopy or colonoscopy, *British Journal of Hospital Medicine*, 81(7), 1-7.
- Johnson G.R., Morawska L., Ristovski Z.D., Hargreaves M., Mengersen K., Chao C.Y.H., Wan M.P., Li Y., Xie X., Katoshevski D., et al. (2011). Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42, 839-851.
- Karimzadeh, S., Bhopal, R., and Nguyen Tien, H. (2021). Review of Infective Dose, Routes of Transmission, and Outcome of COVID-19 Caused by the SARS-CoV-2 Virus: Comparison with Other Respiratory Viruses, *Epidemiology and Infection*, 149, e96, 1-8.
- Kim, J., Ki, D. and Lee, S. (2021). Analysis of Travel Mode Choice Change by the Spread of

- COVID-19 : The Case of Seoul, Korea, *Journal of Korea Planning Association*, 56(3), 113-129.
- Lee, J. Yoo, D., Ryu, S., Ham, S., Lee, K., Yeo, M., Min, K., and 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.
- Lindsley, W. G., Pearce, T. A., Hudnall, J. B., Davis, K. A., Davis, S. M., Fisher, M. A., Khakoo, R., Palmer, J. E., Clark, K. E., Celik, I., Coffey, C. C., Blachere, F. M., and Beezhold, D. H. (2012). Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness, *Journal of Occupational Environmental Hygiene*, 9(7), 443-449.
- Morawska, L., and Cao, J. (2020). Airborne Transmission of SARS-CoV-2: The World Should Face the Reality, *Environment International*, 139, 105730.
- Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D. et al. (2009). Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities, *Journal of Aerosol Science*, 40, 256-269.
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W. et al. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?, *Environment International*, 142, 105832.
- Mousavi, E.S., Kananizadeh, N., Martinello, R.A., and Sherman J.D. (2021). COVID-19 Outbreak and Hospital Air Quality: A Systematic Review of Evidence on Air Filtration and Recirculation, *Environmental Science and Technology*, 55(7), 4134-4147.
- Prather, K. A., Wang, C. C., and Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2, *Science*, 368(6498), 1422-1424.
- Repace, J., Al-Delaimy, W.K., and 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.
- Shaughnessy, R.J., and Sextro R.G. (2006). What is an Effective Portable Air Cleaning Device? A Review, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(4), 169-181.
- Smith, S.H., Somsen, G.A., van Rijn C., Kooij S., van der Hoek, L., Bem, R.A., and Bonn, D. (2020). Aerosol Persistence in Relation to Possible Transmission of SARS-CoV-2, *Physics of Fluids*, 32, 107108.
- Stadnytskyi, V., Bax, C.E., Bax, A., and Anfinrud, P. (2020). The Airborne Lifetime of Small Speech Droplets and Their Potential Importance in SARS-CoV-2 Transmission, *PNAS*, 117(22), 11875-11877.
- 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., Brünink, S., Schneider, J., Ehmann, R., Zwirgmaier, K., Drosten, C., and Wendtner, C. (2020). Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019, *Nature*, 581, 465-469.
- Xiang, J., Huang, C.-H., Shirai, J., Liu, Y., Carmona, N., Zuidema, C., Austin, E., Gould, T., Larson, T., and Seto, E. (2021). Field measurements of PM 2.5 infiltration factor and portable air cleaner effectiveness during wildfire episodes in US residences, *Science of the Total Environment*, 773, 145642.
- Xie, X., Li, Y., Chwang, A., Ho, P., and Seto, W. (2007). How far droplets can move in indoor environment-revisiting the wells evaporation-falling curve, *Indoor Air*, 17(3), 211-225.
- Y.M. Bar-On, A. Flamholz, R. Phillips and R. Milo (2020). SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers, *elifelife*, e57309.
- 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 and Hospital Epidemiology*, 1-2.