


종 설	Review
-----	--------

사스-코로나바이러스-2 공기 중 부유 전파이론과 에어로졸 제어기술

이병욱[†] 
건국대학교 교수

Control Methods for Aerosols and Airborne Spreading Theory of SARS-CoV-2

Byung Uk Lee[†]
Konkuk University

ABSTRACT

Objectives: Control methods against severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) aerosols have been introduced. Airborne spreading theories for SARS-CoV-2 were analyzed in this study.

Methods: Control methods for airborne microorganisms were discussed. Studies on theoretical estimations for airborne spreading of SARS-CoV-2 were presented and analyzed. Analytic calculations were conducted for explaining control techniques for airborne microorganisms.

Results: Control methods for SARS-CoV-2 aerosols can include physical or biological procedures. Characterization of SARS-CoV-2 aerosols and massive clustering infection cases of COVID-19 support the airborne spreading theories of SARS-CoV-2. It is necessary to consider the disadvantages of control methods for airborne microorganisms.

Conclusions: A study on control methods against bioaerosols is necessary to prevent the spreading of viruses. Airborne spreading theories of SARS-CoV-2 were supported by the current evidence, but further studies are needed to confirm these theories.

Key words: SARS-CoV-2, airborne spreading, control method, aerosol, droplet

I. 서 론

2021년 1월에 보고된, 이란에서 수행된 측정 실험 결과에 따르면, 공항, 지하철, 공공시설 등의 공기 중에서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 유전자가 발견되었다.¹⁾ 이는 2019년 중국 우한에서 시작되어 코로나바이러스감염증-19 (코비드19, COVID-19)라는 질병을 일으키면서 2020년부터 전세계적인 대유행(pandemic) 및 사회문제를 일으키고 있는, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)가 그 전파경

로에 대해서 다양한 측면의 연구를 필요로 하는 성질을 갖는다는 것을 말해준다.¹⁻³⁾ 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 주요 전파 경로의 한 가지로서 공기 중 부유 전파(airborne spreading)가 의심되고 있으며, 특히 2020년을 거치면서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유폭포는 그 실험적, 이론적 증거가 적지 않게 제시되고 있다.⁴⁻⁵⁾ 본 연구를 통해서, 현재까지의 그 과학적 증거들을 분석해 보고, 이를 통해 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파 이론의 타당성을 고찰

[†]**Corresponding author:** Department of Mechanical and Aerospace Engineering, College of Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea, Tel: +82-2-450-4091; E-mail: leebu@konkuk.ac.kr

Received: 3 March 2021, Revised: 19 March 2021, Accepted: 22 March 2021

해 보고자 한다. 또한 코로나바이러스 공기 중 부유 전파가 활발히 발생할 경우 그 전파 차단을 위해 사용할 수 있는 제어기술들을 분석해 보고자 한다.

II. 연구방법

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)에 대한 연구는, 바이러스의 유전자(genetic information) 및 단백질(protein) 등 특성 자체에 대한 연구, 진단기술(detection)에 대한 연구, 백신(vaccine) 연구, 치료제 연구, 전파경로 연구 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전파경로에 대해서 집중하여 분석 연구를 수행하였다.

전파경로에 대한 연구들 중에서도 공기 부유 입자(airborne particles), 즉 에어로졸(aerosol) 등에 대한 내용을 선택하여 주로 다루었다. 공기 부유 입자 및 공기 부유 생물입자에 대한 제어기술은 약 2010년부터 2021년까지 발표된 연구들을 분석하여 기술하였다. 구체적으로는 부유 입자 및 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)에의 제어 가능성이 있다고 판단되는 연구들을 선별하여 분석 연구를 하였다. 주로 인용횟수가 10회 이상인 연구들에 중점을 두었다. 바이러스 공기 중 부유 전파 이론에 대한 연구들은 2020년과 2021년에 발표된 연구들을 중심으로 분석하였으며, 2020년 시행된 세계보건기구(World Health Organization, WHO)와 질병관리청(Korea Disease Control and Prevention Agency, KDCA)의 일부 발표 자료도 분석하였다. 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파에 대한 기본적 용어에 대해서 분석 연구하였다. 또한 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파 경로 사례에 대한 자료들을 분석 연구하였다. 전체적으로 30여개 이상의 관련 주요 참고문헌의 자료를 분석하였다. 구체적 참고문헌 목록은 후술하는 참고문헌 부분에 상세히 나열하였다.

제어기술 중에서 추가적 설명이 필요한 부분은 사례에 대한 정량적 계산을 통한 분석을 수행하였다. 이러한 분석 연구결과를 토대로 공기 중 입자에 대한 제어기술과 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파 경로에 대해서, 고찰을 통한 결론을 도출하였다.

III. 연구 결과

1. 비말(droplet)과 에어로졸(aerosol)의 용어 분석과 공기 중 부유 전파 이론의 관계

사스-코로나바이러스-2(SARS-CoV-2)의 전파경로에 대한 분석의 핵심내용에는 그 용어들(vocabularies)의 혼동에 대한 논란이 존재한다. 호흡기 바이러스의 전파에 대해서는 비말(droplet) 전파와 에어로졸(aerosol) 전파라는 용어를 사용해 왔으며, 이에 대한 토론이 오랜 세월 계속되어 왔다. 이러한 용어를 사용하는 것 자체가 오류라는 주장도 제시되고 있지만, 일단은 이에 대한 구분을 한 후에 추가적인 분석을 하는 것이 필요하다.⁵⁻⁶ 호흡기 바이러스에 감염된 환자는 주로 호흡기 분비물을 통해서 바이러스를 배출한다. 이 때 호흡기 분비물 속에 바이러스가 포함되는데, 바이러스를 포함한 호흡기 분비물이 인체 외부에 나왔을 때, 그 크기에 따라서 다음과 같이 비말(droplet)과 에어로졸(aerosol)로 구분해 왔다.

첫째, 비말(droplet)은 직경이 5 μm 보다 큰 호흡기 분비물 입자를 말하는 것으로서, 인체 외부로 나왔을 때, 중력의 영향을 받아서 지표면으로 침강(sedimentation)하는 입자를 말한다. 흔히 커다란 침방울이라고 생각할 수 있다.

둘째, 에어로졸(aerosol)입자는 직경이 5 μm 보다 작은 호흡기 분비물 입자를 말하는 것으로서, 인체 외부로 나왔을 때 중력에 의해서 지표면으로 침강하기 전에, 입자를 이루는 수분(moisture)이 먼저 증발하여, 5 μm 보다 작았던 입자의 직경이 더욱 감소하여 결국 공기 중에 장기간 부유 될 수 있는(airborne) 형태로 변화되는 입자를 말한다. 다시 말하면 이 경우는 입자의 수분(moisture)이 증발된 상태에서, 입자 내부에 있던 바이러스 입자가 남아서, 공기 중에 떠 있는 상태로 존재하는 것이라고도 생각할 수 있다. 이를 다른 말로는 비말핵(droplet nuclei)이라고 부르기도 한다.

그러나, 위와 같이 인체에서 나온 호흡기입자를 구분하는 것에 대해서 적합하지 않다는 지적이 많다.⁵⁻⁷ 그 원인 및 이유에 대한 분석은 여러 측면으로 있다. 예를 들면, 일단 입자 에어로졸 과학분야(aerosol science) 관점에서는 공기 중에 부유된 것들은 모두 학술적으로 에어로졸(aerosol)이라고 정의한다.⁸ 따

라서 비말(droplet)이라는 단어는 에어로졸 과학 관점에서는 학술적으로 존재하는 용어라고 보기 어렵다. 또한 5 μm 라는 기준도 적절치 않다는 지적이 있다.^{6,7)} 실제 공기 중 부유 시간을 계산해 보면, 10 μm 이상이 더 적합한 기준이며, 100 μm 정도를 기준으로 봐야 한다는 주장도 있다.⁷⁾

호흡기 바이러스의 주요 전파경로로서 호흡기 분비물이 간주되고 있으며, 이 호흡기 분비물은 공기를 매개하여 퍼져 나가고 있다는 점은 논란의 여지가 없다. 다만, 인체 밖으로 배출된 호흡기 분비물 입자를 이를 비말(droplet)이라는 용어를 사용할 것인지 에어로졸(aerosol)이라는 용어를 사용할 것인지는 토론의 여지가 있다.

본 연구에서는 일단은 크기가 크거나 입자 표면의 수분이 증발할 시간이 부족하여 입자가 그대로 지표면으로 떨어지는 것을 비말이라고 정의하고, 반면에 크기가 작거나 또는 수분이 증발하여 공기 중에 부유될 수 있는 것을 에어로졸이라고 정의한 상태에서 분석을 이어 나가겠다.

2. 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 배출량(shedding)과 공기 중 부유 전파이론의 연관관계

바이러스에 감염된 환자에게서 바이러스가 배출되는 것을 배출현상 또는 shedding이라고 부른다. 이 shedding 즉 바이러스 배출량이 많으면 바이러스의 전파 경로 중에서 에어로졸 전파의 확률이 높아지는 이론이 있다.⁵⁾ 그 제시된 이론을 다양한 관점에서 분석해 보겠다.

통상 인체에서는 다양한 크기의 호흡기 분비물이 나온다. 주로 입과 코를 통해 나오는 데, 그 호흡기 분비물들의 크기를 측정한 실험들이 계속 수행되어 왔다.^{9,10)} 호흡기 분비물들은 그 직경(diameter)이 아주 작은 것은 100 nm 이하이며 큰 것은 몇 mm에 이른다. 호흡기 분비물들은, 수분이 포함되어 있어서 수분의 표면장력(surface tension)의 영향으로 구형(sphere) 등의 형태를 가진다고 분석·추정 할 수 있다. 이러한 호흡기 분비물 중에서 바이러스가 포함된 수십마이크로미터 이하의 입자가 많아야 공기 중 부유전파의 가능성이 있다. 왜냐하면, 앞에서 용어의 분석에서 말했듯이 수십마이크로미터 이하의 입자가 되어야 겉표면의 수분이 증발하여 공기 환경 중에 오랜 시간 부유할 수 있는 형태가 되기 때문이다.

바이러스가 인체 세포에서 나와서 호흡기 분비물로 이동했을 경우, 바이러스 배출량이 많으면, 호흡기 분비물 중 바이러스의 농도(바이러스부피/분비물부피)가 높아지게 된다. 여기서, 일단 배출된 바이러스입자가 호흡기 분비물속에서 균일하게 퍼진다고 가정하게 되면, 직경이 큰 호흡기 분비물 입자에는 바이러스가 여러 개 포함되는 반면에, 직경이 작은 호흡기 분비물 입자에는 적은 수의 바이러스가 포함되거나 아예 들어가지 않게 된다. 만일 바이러스 shedding(shedding)량이 많아서 호흡기 분비물 속의 바이러스의 양이 증가한다면, 직경이 수 마이크로미터 이하인 작은 호흡기 분비물 입자들에 바이러스가 포함될 확률이 증가하게 된다.

예를 들면, 바이러스의 크기를 70 나노미터(nm)라고 가정하고,¹¹⁾ 호흡기 분비물중에서 바이러스가 차지하는 부피가 0.1%, 즉 천분의 일 이라고 가정했을 경우, 바이러스(virion) 한 개를 포함할 수 있는 호흡기 분비물 입자의 직경은 약 0.7 μm 가 된다.⁵⁾ 바이러스의 배출량(shedding)이 증가할 수록 호흡기 분비물 중에서 바이러스의 농도는 증가하게 되고, 이에 따라 바이러스를 포함할 수 있는 호흡기 분비물 입자의 직경이 작아지게 된다.⁵⁾ 호흡기 분비물 입자의 직경이 작아지게 되면, 해당 분비물 입자가 외부로 배출되었을 경우, 결국 수분증발을 통해서 에어로졸(aerosol)로서 변환되어 공기 중에 장시간 부유되어 있을 수 있게 된다. 에어로졸 과학(aerosol science)관점에서 분석하면, 크기가 커서 중력침강속도가 큰 호흡기 분비물 에어로졸 입자가, 크기가 작아져서 중력침강속도가 줄어들어서 보다 장시간 공기 중에 부유할 수 있는 에어로졸 입자로 변화되었다고 표현할 수 있다.

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 경우, 구체적인 바이러스 배출량(shedding, shedding)을 보고한 연구들이 있다.¹²⁻¹⁴⁾ 그 값들 중에서 높은 수치의 값을 부피비로 환산해 보면 비율이, $\sim 10^{-5}$ 정도가 된다.⁵⁾ 즉 호흡기 분비물 유체 중에서 바이러스가 차지하는 비율이 $\sim 10^{-5}$ 정도로 계산된다는 의미이다. 이 수치를 활용하여 바이러스를 포함할 수 있는 호흡기 분비물 입자를 구하면 이는 대략 수 마이크로미터 안팎의 크기로서 계산된다.⁵⁾ 따라서, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 경우는, 바이러스 배출량(shedding)이 많아서 호흡기 분비물 내에서 바

이러스의 농도가 높고, 따라서 바이러스를 포함하는 호흡기 분비물 입자의 크기가 작아져서 공기 중 부유 전파가 활발히 일어날 수 있는 여건을 갖추었다고 평가할 수 있다.⁹⁾

3. 에어로졸 상태의 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)에 대한 실험결과 분석 및 환경 중 탐지

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 경우, 인위적으로 공기 중으로 부유시켰을 경우, 그 생명성(감염력)을 확인하는 실험 연구가 실행되었다. 실험 결과들을 분석해 보면, 공기 중 부유 상태에서 그 생명성을 수시간 이상을 유지하는 것으로 측정되었다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 따라서, 이러한 실험결과를 토대로, 호흡기 분비물 속에 있다가 외부로 배출되어 공기 중에 부유 되었을 경우, 주변 공기 중에서 상당시간 감염력을 유지할 수도 있다는 추정이 가능하다고 분석할 수 있다. 그러나 이 실험결과의 해석은 한계를 고려할 수 있는 것들이 있다. 이 실험은 특수한 실험공간에서 수행된 것으로서, 여러 가지 환경변수(environmental parameters)가 존재하는 실외나 일반 환경 중에서의 현실과는 다소 차이 및 추가적 고려가 있을 수 있다. 구체적으로는, 공기 중 부유 미생물 중에서 세균이나 진균 등은 기온, 습도 등 변수 등에 영향을 받는 것이 보고되었다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 직전에서 기술한 이러한 한계에도 불구하고, 상기에 언급한 실험결과를, 실제로 환자 주변에서 감염력이 있는 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)를 탐지한 실험결과와 함께, 결국 한가지 이론의 근거로 평가될 수 있다.²⁰⁾ 즉, 실제로 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)가 공기 중에 부유되어 감염력을 유지한 상태에서 에어로졸 형태로 이동할 수 있다는 이론이다. 이 외에도 공기 중에서 채집한 에어로졸 샘플에서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 유전자를 검출한 연구들도 있다.¹²¹⁻²²⁾ 특히, 2021년 1월에 보고된 이란 테헤란에서의 측정결과에서는 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 유전자가 공항, 지하철, 공공시설 등 시설에서 검출되었다.¹⁾ 이란 테헤란 연구의 조건을 분석해 보면, 일부에서, 포집한 공기의 양이 4 m³ 이하인 상태에서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 유전자가 검출되었다.¹⁾ 즉, 많지 않은 양의 공기포집량(sampling amount)에서도 유전자가 검출되었다. 따라서, 해당 시설에는 일부, 바이러

Table 1. Clusters of SARS-CoV-2 infections

Cases of clusters of infections in Korea (2020) ²³⁾	Number of infected people
Location A (public facility)	756
Location B (private facility)	329
Location C (private facility)	256
Location D (hospital related)	244
Location E (private facility)	170
Location F (hospital related)	168
Location G (hospital related)	167
Location H (hospital related)	143
Location I (private facility)	107
Location J (hospital related)	102
Location K (private facility)	100

스 유전자가 공기 중에 퍼져있을 가능성이 있음을 추정할 수 있다. 다만, 실제적 농도값에 따라서 위험도가 달라지므로 위험도 평가에는 유의할 필요가 있다.

4. 한국의 집단감염 사례를 통한 공기 중 부유 전파의 가능성

한국의 집단감염 사례들 중에서 일부를 나열해 보도록 하겠다(Table 1).

위의 사례들을 분석해 보면, 그 감염자의 규모가 단일시설에서 수백명 단위로서, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파경로 중에서 공기 중 부유 전파가 아니고서는 단기간에 발생할 수 있는 규모로서 설명하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 특히 이 중에서 로케이션 E (location E)의 경우는 상세한 감염자의 위치가 분석되었다.²⁴⁾ 위의 사례 외에도 수십명에서 수백명 수준의 집단감염 사례가 한국에서 적지 않게 보고되었다. 만일 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파가 활발히 일어난다고 가정하게 되면, 입자가 누적(accumulation)되어 바이러스 에어로졸의 농도가 쉽게 축적 증가될 수 있는 밀폐된 실내에서 집단감염이 발생해야 한다. 그런데, 한국의 집단감염 사례들을 분석해 보면 실내 감염의 경우가 상당수인 것을 발견할 수 있어서, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파 이론의 실제적 가능성이 높음을 발견할 수 있다.

특히 수도권의 대형 식음료시설의 집단감염 사례는 에어로졸 전파의 가능성을 보다 확실히 보여준다고 평가된다. 조사된 바에 따르면, 확진자 소수 명이 해당 시설의 2층에서 수시간 동안 머물렀고, 이 시설을 방문한 사람 중에서 수십 명 이상이 확진되었다.²⁵⁾ 이 사례를 분석을 해보면 바이러스를 포함하는 호흡기 분비물입자가 2층에서 발생하여 공기 중으로 퍼져나갔고, 공기조화시설이 바이러스의 공기 중 부유전파를 크게 도운 것으로 해석할 수 있다. 집단감염 사례들은 상세한 감염자의 위치 정보가 공개될 경우 보다 자세한 전파경로의 해석연구가 가능할 것이다.^{24,26)}

5. 공기 중 부유 전파에 따른 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)에 대한 전파차단에방기술에 대한 분석

결국 앞선 분석들을 기반으로, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 부유 전파 이론의 가능성이 있다면, 이에 대한 전파차단 예방 기술을 분석할 수 있다.

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 에어로졸 전파를 차단하기 위해서는 크게 두가지 관점의 접근을 생각해 볼 수 있다고 분석할 수 있다. 첫째, 물리적으로 에어로졸의 농도를 감소시키는 기술을 생각할 수 있다. 감염자 주변에 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2) 에어로졸이 존재할 가능성이 있으니, 에어로졸 전체의 농도를 감소시켜서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2) 에어로졸을 제거하는 것이다. 구체적으로는 공기필터(air filter) 등 에어로졸 제어기술을 활용하여 전체 에어로졸의 농도를 감소시키는 방안이 있다.^{8,27)} 둘째, 생물학적인 제어기법을 활용하여, 공기 중 부유미생물(airborne micro-organism)의 생물학적 특성을 제거하는 방법이 있다. 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2) 에어로졸에 추가적인 처리를 가하여 감염력을 없애고 유전자를 파괴하는 기술을 적용할 수 있다. 구체적으로는 열에너지(thermal energy) 등을 활용하여 공기 중에 부유되어 있는 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 생명성에 직접적인 영향을 주는 방법을 적용할 수 있다.⁸⁾

유의할 점은 여러가지 제어기술들은 그 적용시, 각 기술마다의 단점들을 주의하고 고려할 필요가 있다.⁸⁾

액상 등에서 열에너지 등을 활용하여 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 제어연구를 수행한 사례가 있으나,²⁸⁾ 공기 중 부유상태에서의 연구 사례는 드물다. 공기 중 부유미생물의 경우 세균, 진균 등의 경우 열에너지 등을 활용하여 제어 연구를 하여 상당한 효율을 달성한 사례들이 보고되었다.^{8,29-31)}

제어기술로서 개인이 쉽게 할 수 있는 것으로 마스크(face-piece mask) 착용이 있다.^{3,32-33)} 마스크는 감염자가 호흡기 분비물 입자 중에서 큰 입자를 외부로 배출하는 것을 축소시켜주는 효과를 통해 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파의 가능성을 감소시키는 효과를 가진다. 그와 동시에, 마스크는 비감염자에 대해서, 외부 공기 중에 존재할 수도 있는 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)로부터의 노출 가능성을 감소시켜 주는 효과도 있다.

그러나, 마스크는 그 효율의 해석에 일정부분 제한 및 고려할 사항이 있다. 마스크의 효율은 대부분 순간적인 측정의 결과이며, 시간의 개념이 포함되지 않은 것이다. 즉, 예를 들어, 공기 중에 1 m³마다 0.1 μm 크기의 입자가 1,000개가 존재하는 경우를 분석하겠다. 사람이 이 중에서 0.3 m³의 공기를 호흡을 통해 흡입하게 되면, 300개의 0.1 μm 크기의 입자에 노출되게 된다. 해당 사람이 마스크를 사용하는 경우, 그 마스크가 0.1 μm 크기의 입자에 대하여 90%의 효율을 가진다고 가정하는 경우면, 이 사람은 0.3 m³의 공기를 흡입하는 동안 30개의 0.1 μm 크기의 입자에 노출되게 된다. 그러나 만일, 이 사람이 해당 공기 환경 중에 오랜 시간 머물러 3 m³의 공기를 흡입하게 되면, 마스크를 사용하고 있음에도 불구하고, 300개의 0.1 μm 크기의 입자에 노출되게 된다. 다시 기술하면, 마스크의 실제적인 차단효과를 분석할 때는 순간적인 필터효율(filtering efficiency) 뿐만이 아니라 해당 공기 중에서의 체류시간(residence time)을 감안해야 한다. 바이러스로 인한 오염의 정도가 높다고 추정되는 공기 환경 중에서는 고효율의 마스크를 사용하더라도 체류시간이 길면 실제로 노출되는 바이러스의 개수가 많아 질 수 있음을 인지해야 한다. 즉 순간적 효율과 체류시간을 고려한 실제적 노출 확률을 줄이는 노력이 필요하다. 근본적으로 마스크는 노출의 확률을 감소시켜주는 것으로 이해하고 사용하는 것이 적합하다고 판단된다. 특히, 마스크는 입자의 크기(particle diameter)마다 그에 대

응하는 효율(efficiency)이 다르므로, 유의할 필요가 있다.³²⁾

제어기술로서 개인이 할 수 있는 또 다른 기술로서 투명 안면가리개가 있다. 안면가리개의 경우는, 인위적으로 만든 에어로졸입자 등을 활용한 정량적 제어 효율 연구를, 프랑스 및 미국을 중심으로 수행한 연구가 있다.³⁴⁾ 투명 안면가리개의 경우, 입자 배출량 감소 및 외부 입자로부터의 보호 측면에서의 효과 가능성이, 적지 않은 것으로 연구되었다.³⁴⁾ 투명 안면가리개의 경우, 얼굴 전면을 가리는 것에서부터, 얼굴의 일부를 가리는 것까지, 다양한 종류의 안면가리개가 존재하며, 추가적인 연구가 필요하다.

에어로졸에 대한 여러가지 제어기술들은 그 적용시, 각 기술마다의 단점과 특징들에 주의하고, 고려할 필요가 있다.⁸⁾

IV. 고 찰

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파에 대하여 긍정히는 견해의 증거로서 위와 같이 기술하였다.

그러나, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파에 반대하는 설에 의하면, 공기 중 부유 전파가 발생하게 되면 감염자의 규모가 훨씬 거대해야 한다고 주장한다. 이는 공기 중 부유 전파 및 일부 개념에 대한 오해로 인한 것으로 보인다. 바이러스의 공기 중 부유전파가 있더라도, 중요한 요인 중 하나는 공기 중 농도(concentration)라고 볼 수 있다. 사람이 노출되거나 흡입하는 공기의 부피(volume)와, 바이러스의 공기 중 농도(concentration)를 고려하고, 바이러스 감염을 일으키기 위한 인체에 대한 노출필요량까지 고려해야, 해당 전파 경로의 적절한 위험성을 판단할 수 있다. 따라서, 공기 중 부유 전파가 일어나더라도, 어떤 환경조건이, 이러한 여러 충분조건들을 충족하지 못한다면 거대한 규모의 바이러스 감염은 일어나지 않는 것으로 분석 및 해석할 수 있다. 기술한 이와 같은 분석 논리 전개는 타 호흡기 바이러스에도 적용될 수 있다고 분석된다.

앞에서도 분석했듯이 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파가 일어난다고 가정하면, 바이러스 에어로졸이 누적되어 농도가 쉽게 증

가할 수 있는 밀폐된 실내에서 집단감염이 발생해야 하는 데, 한국의 집단감염 사례들의 적지 않은 수가 그에 해당하는 것으로서 따라서 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파의 증거로서 고려될 수 있다.

바이러스 등으로 인한 전염병의 경우, 실제적인 위험도 분석에서는 다양한 측면의 항목(parameters)들에 대한 분석과 고려 사항이 있다. 예를 들어 어떤 바이러스를 가정하여, 10개 이상의 해당 바이러스에 인체 호흡기가 노출될 경우에 감염이 일어난다고 생각해 보겠다. 이 경우, 해당 바이러스의 공기 중 농도가 1개/m³라면 인체 호흡기가 10 m³의 공기에 노출되어야 감염의 가능성이 있다. 통상 사람의 호흡량이 분당 수십 리터 안팎인 것을 고려하면, 수시간 정도의 노출시간이 필요하다고 추정할 수 있다. 만일, 해당 바이러스의 공기 중 농도가 100개/m³라면 인체 호흡기가 0.1 m³ 정도의 공기에 노출되는 경우 감염의 가능성이 있으며, 통상의 사람의 호흡량을 고려하면, 수분 정도의 노출시간이면, 감염 위험성이 있다고 추정할 수 있다. 따라서, 바이러스의 실제적 위험성을 평가할 때는, 전파경로 뿐만이 아니라, 농도와 체류시간 등의 개념을 함께 고려할 필요가 있다.

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)와는 별도로, 마스크 등의 착용이 본격화한 2020년 기간 동안 감기 등 환자들이 감소한 일부 현상들은,³⁵⁾ 타 요인들도 존재하겠지만, 감기 등을 유발하는 다양한 바이러스들도 공기 중 부유의 형태인 에어로졸로 전파되어 왔을 가능성이 있음을 추정할 수 있게 해준다. 즉, 공기 중 부유 전파의 확률을 감소시키는 마스크 등이 이들 타 바이러스들의 공기 중 부유 전파에도 영향을 미쳤을 가능성 등을 분석 및 생각할 수 있다.

V. 결 론

사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파 이론은 바이러스 자체의 특성, 집단감염의 사례 등을 통해 그 근거가 제시된다. 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 공기 중 부유 전파를 감소시키기 위해서는 에어로졸 제어기법을 고려할 수 있으며, 공기필터(air filter)의 일종인 마스크를 비롯하여, 필터(filter) 기술 등 에어로졸 집진기술을 활용하여 물리적으로 제어할 수 있는 가능성이

있고, 열에너지(thermal energy) 등을 활용하여 생물학적으로 제어할 수 있는 가능성도 있다. 유의할 점은 제어기술은 적용시, 각 기술들의 단점들에 주의할 필요가 있다.⁸⁾ 공기 중 부유전파 이론과 실제적 위험성의 평가 사이에는 농도 등 여러 고려할 사항들이 존재한다는 것도 유의할 필요가 있다. 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 감염자를 줄이고 전염병을 예방하기 위해서는, 사스-코로나바이러스-2 (SARS-CoV-2)의 전파경로에 대한 다양한 측면의 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2021학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

This paper was written as part of Konkuk University's research support program for its faculty on sabbatical leave in 2021.

References

- Hadei M, Mohebbi SR, Hopke PK, Shahsavani A, Bazzazpour S, Alipour M, et al. Presence of SARS-CoV-2 in the air of public places and transportation. *Atmos Poll Res*. 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.12.016> [assessed January 16, 2021].
- Heo Y. Implication of environmental health on outbreak of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *J Environ Health Sci*. 2020; 46(1): 1-2.
- Park J, Cho YS. Conflict between human right and public health under current pandemic situation of the Coronavirus disease (COVID)-19. *J Environ Health Sci*. 2020; 46(5): 1-2.
- WHO. COVID-19 Weekly Epidemiological 3 January 2021. Available: <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update---5-january-2021> [accessed January 11, 2021].
- Lee BU. Minimum sizes of respiratory particles carrying SARS-CoV-2 and the possibility of aerosol generation. *Int J Environ Res Pub Health*. 2020; 17: 6960.
- Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19. *JAMA*. 2020; 323: 1837-1838.
- Prather KA, Marr LC, Schooley RT, McDiarmid MA, Wilson ME, Milton DK. Airborne transmission of SARS-CoV-2. *Science*. 2020; 370: 303.
- Lee BU. Life comes from the air: a short review on bioaerosol control. *Aerosol Air Qual Res*. 2011; 11: 921-927.
- Johnson GR, Morawska L, Ristovski ZD, Hargreaves M, Mengersen K, Chao CYH, et al. Modality of human expired aerosol size distributions. *J Aero Sci*. 2011; 42: 839-851.
- Lee J, Yoo D, Ryu S, Ham S, Lee K, Yeo M, et al. Quantity, size distribution, and characteristics of cough-generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection. *Aero Air Qual Res*. 2019; 19: 840-853.
- Ke Z, Oton J, Qu K, Cortese M, Zila V, McKeane L, et al. Structures and distributions of SARS-CoV-2 spike proteins on intact virions. *Nature*. 2020; 588: 498-502.
- Wölfel R, Corman VM, Guggemos W, Seilmaier M, Zange S, Müller MA, et al. Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*. 2020; 581: 465-469.
- Jacot D, Greub G, Jaton K, Opota O. Viral load of SARS-CoV-2 across patients and compared to other respiratory viruses. *Microbes Infecti*. 2020; 22(10): 617-621.
- Pan Y, Zhang D, Yang P, Poon LLM, Wang Q. Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples. *Lancet Infect Dis*. 2020; 20: 411-412.
- Fears AC, Klimstra WB, Duprex P, Hartman A, Weaver SC, Plante KS, et al. Persistence of severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2 in aerosol suspensions. *Emerg Infect Dis*. 2020; 26: 2168-2171.
- van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Phil M, Holbrook MG, Gamble A, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N Eng J Med*. 2020; 382: 1564-1567.
- Kang SM, Heo KJ, Lee B.U. Why does rain increase the concentrations of environmental bioaerosols during monsoon? *Aero Air Qual Res*. 2015; 15: 2320-2324.
- Lee BU, Lee G, Heo KJ. Concentration of culturable bioaerosols during winter. *J Aero Sci*. 2016; 94: 1-8.
- Seo, S. Health effects of exposure to indoor mold and the levels of mold in facilities with susceptible populations in Korea. *J Environ Health Sci*. 2020; 46(4): 359-367.
- Lednický JA, Lauzardo M, Fan ZH, Jutla AS, Tilly

- TB, Gangwar M, et al. Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients. *Int J Infect Dis.* 2020; 100: 476-482.
21. Chia PY, Coleman KK, Tan YK, Ong SWX, Gum M, Lau SK, et al. The Singapore 2019 Novel Coronavirus Outbreak Research Team. Detection of air and surface contamination by SARS-CoV-2 in hospital rooms of infected patients. *Nat Commun.* 2020; 11: 2800.
 22. Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature.* 2020; 582: 557-560.
 23. KDCA, Central Disease Control Headquarters, COVID-19 cases in Korea (December, 30th, 2020) Gov't briefs. (in Korean) Available: http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=&brdGubun=&dataGubun=&ncvContSeq=354099&contSeq=354099&board_id=&gubun=ALL [assessed January 16, 2021].
 24. Park SY, Kim YM, Yi S, Lee S, Na B, Kim CB, et al. Coronavirus disease outbreak in call center, South Korea. *Emerging Infectious Diseases.* 2020; 26: 1666-1670.
 25. KDCA, Central Disease Control Headquarters, COVID-19 cases in Korea (August, 20th, 2020) Gov't briefs. Available: http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=&brdGubun=&dataGubun=&ncvContSeq=359106&contSeq=359106&board_id=&gubun=ALL# [assessed January 16, 2021].
 26. Lu J, Gu J, Li K, Xu C, Su W, Lai Z, et al. COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China. *Emerg Infect Dis.* 2020; 26: 1628-1631.
 27. Lee BU, Yermakov M, Grinshpun SA. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Atmos Environ.* 2004; 38: 4815-4823.
 28. Xiling G, Yin C, Ling W, Xiaosong W, Jingjing F, Fang L, et al. In vitro inactivation of SARS-CoV-2 by commonly used disinfection products and methods. *Sci Rep.* 2021; 11: 2418.
 29. Grinshpun SA, Adhikaria A, Li C, Reponen T, Yermakov M, Schoenitz, M, et al. Thermal inactivation of airborne viable *Bacillus subtilis* spores by short-term exposure in axially heated air flow. *J Aero Sci.* 2010; 41: 352-363.
 30. Lee BU, Yun SH, Jung JH, Hwang GB, Bae GN. Application of UVAPS to real-time detection of inactivation of fungal bioaerosols due to thermal energy. *J Aero Sci.* 2010; 41: 694-701.
 31. Kim K, Kim W, Yun SH, Lee JH, Kim SS, Lee BU. Use of an electrospray for the generation of bacterial bioaerosols. *J Aero Sci.* 2008; 39: 365-372.
 32. Lee BU, Yermakov M, Grinshpun SA. Unipolar ion emission enhances respiratory protection against fine and ultrafine particles. *J Aerosol Sci.* 2004; 35: 1359-1368.
 33. Kang S, Guak S, Bataa A, Kim D, Jung Y, Shin J, et al. Mask-wearing characteristics and COVID-19 in indoor and outdoor environments in Seoul in 2020. *J Environ Health Sci.* 2020; 46(6): 750-756.
 34. Wendling JM, Fabacher T, Pébäy PP, Cosperec I, Rochoy, M. Experimental Efficacy of the Face Shield and the Mask against Emitted and Potentially Received Particles. *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18(4): 1942.
 35. Health insurance review & assessment service, the number of patients in 2020. Available: <http://opendata.hira.or.kr/op/opc/olapMsupInfo.do> [assessed March 16, 2021].

저자정보

이병육(교수)