ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 2: June 2022 pp. 23-35
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.2.023

서울시 대중교통 내 SARS-CoV-2 RNA와 PM-2.5 오염도 실증연구

서 민 정[1] · 홍 주 희[1] · 이 호 준[1] · 박 진 솔[1] · 임 학 명[1] · 박 명 규[1] · 민 병 철[1] · 박 은 선[1] · 이 상 훈[1] · 김 한 준[1] · 하 광 태[1] · 권 승 미[1] · 신 진 호[1]* · 이 재 인[1] · 황 영 옥[1] · 오 영 희[1] · 신 용 승[1]

[1]서울특별시보건환경연구원

(2022년 2월 4일 투고, 2022년 3월 30일 수정, 2022년 4월 1일 게재확정)

Investigation on the SARS-CoV-2 RNA and PM-2.5 inside Public Transportations in Seoul

Minjeong Seo[1] · Juhee Hong[1] · Hojun Rhee[1] · Jinsol Park[1] · Hakmyeong Lim[1] · Myung Kyu Park[1] · Byungchul Min[1] · Eun Sun Park[1] · Sanghoon Lee[1] · Hanjun Kim[1] · Kwangtae Ha[1] · Seungmi Kwon[1] · Jinho Shin[1]* · Jaein Lee[1] · Youngok Hwang[1] · Younghee Oh[1] · Yongseung Shin[1]

[1]*Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment*

(Received 4 Feb 2022; Revised 30 Mar 2022; Accepted 1 Apr 2022)

Abstract

Recently, passengers using public transport are concerned about the effects of COVID-19 and fine dust. Therefore, from February 2020 to February 2021, we investigated whether SARS-CoV-2 RNA was detected even after disinfection in 55 public transportation places visited by confirmed patients in Seoul. 34 air samples and 702 object surface samples were collected and tested with RT-PCR, one surface sample was positive. In addition, preemptive investigations were conducted in 22 subway trains that passengers were being on board at that time. 1,018 preemptive tests were performed, and all were negative. Although PM-2.5 is dangerous in itself, it can be a potential carrier of viruses. It seemed that a solution was needed as one line continuously exceeded the criteria of PM-2.5. Through this study, it is judged that cluster infection in public transportation can be prevented if efforts to reduce the concentration of fine dust, appropriate disinfection management, and personal disinfection such as wearing a mask in public transportations.

Keywords: COVID-19, SARS-CoV-2, Subway, Indoor Air Quality, Public Transportation, PM-2.5

*Corresponding author.
Tel : +82-2-570-3300, Fax : +82-2-570-3301
Email : sjh81@seoul.go.kr

1. 서론

Coronavirus Disease 2019(COVID-19)가 장기간에 걸쳐 전 세계적으로 확산되면서 사람들의 생활 방식이 많이 달라졌다. 재택근무를 하는 직장인이 늘어났으며, 학교는 원격수업을 시행하게 되었다. 그러나 사람들은 여전히 이동수단으로 대중교통을 많이 이용하고 있다. 대중교통은 불특정 다수의 사람들을 마주칠 수 있는 대표적인 실내공간이기 때문에 바이러스 감염에 대해 우려하는 사람들이 많다(Moreno et al., 2021). 대중교통에서 감염병 확산에 대한 이해는 전파경로를 파악하면 가능하다. COVID-19는 사람 간 직접 접촉에 의해 주로 이루어진다. 확진자가 기침, 재채기, 말할 때 발생하는 비말이 퍼지면 같은 공간에 있던 사람들이 에어로졸에 의한 공기 감염이 이루어질 수 있다(Kampf et al.,2021; Lv et al.,2020). 뿐만 아니라 환기가 잘 이루어지지 않으면 확진자가 그 공간을 떠난 후에도 바이러스가 포함된 에어로졸이 부유하고 있어 공기 전파가 가능하다(CDC, 2021; UN, 2020). 바이러스가 포함된 비말이 뿌려진 사물표면을 손으로 접촉하고 호흡기를 만질 경우 표면 접촉에 의한 2차 감염이 일어날 수 있다(Vincente et al., 2021).

에어로졸에 함유된 Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus-2(SARS-CoV-2)는 공기 중에서 3시간(Doremalen et al., 2020) 이상 생존하는 것으로 밝혀졌다(Fears et al., 2020; Moriarty et al., 2020). 무생물 표면에 부착된 SARS-CoV-2의 감염성에 관한 연구에 따르면, 바이러스의 안정성은 매개체의 종류와 표면 상태에 따라 수 시간에서 수일까지 다양할 수 있다(Vincente et al., 2021; Kampf et al., 2020; Wang et al., 2020). 표면의 종류에 따라 살펴보면, 구리 표면에서 4시간, 스테인리스 스틸에서 48시간, 플라스틱 표면에서 72시간, 종이, 나무 및 천에서 몇 시간에서 며칠 동안 안정적이라는 연구결과가 보고되었다(Doremalen et al.,2020; Kampf et al.,2020; Wang et al.,2020; Chin et al.,2020; Virtanen et al.,2021).

확진자가 대중교통을 이용했다는 것이 역학조사를 통해 확인되더라도, 해당 역사를 며칠에 걸쳐 폐쇄하는 것이 불가능하기 때문에 소독 후에 SARS-CoV-2가 검출되는지 확인한 후 승객들에게 이용하게 하여야 안전하다. 뿐만 아니라 승객들의 안전을 위한 더 적극적인 방법인 선제적 대응이 필요하다. 이 연구에서 언급되는 선제적 조사란 확진자 발생 전 승객들이 탑승 중인 대중교통 내에 있는 사물 표면에 바이러스가 검출되는지를 조사하여 대중교통을 안심하고 이용할 수 있도록 안전성을 확인하고, 동시에 초미세먼지 농도를 함께 측정하여 살펴보고자 한 것을 의미한다.

코로나 바이러스 확산방지 및 실내공기질 관리를 위해서는 대중교통 내 적절한 환기가 필수이나, 외기의 미세먼지 농도가 높으면 환기 시 실내로 미세먼지가 유입될 수 있는 위험성이 있다. 코로나 바이러스가 부착된 미세먼지는 공기 중에 부유하면서 바이러스의 이동거리를 길게 할 수 있는 매개역할을 할 수 있으므로(Nor et al., 2021), 대중교통에서의 바이러스 영향을 살펴보기 위해서는 미세먼지 농도도 함께 살펴볼 필요가 있다. 서울의 대표적인 대중교통 수단인 지하철은 대부분 지하로 운행되어 빠르고 정확하지만(Seoul, 2020), 직접적인 자연환기가 어렵다. 지하철은 운행 시 레일과 차륜 사이의 마찰과, 전력공급선과 집장장치의 마찰 등으로 미세먼지가 다량 발생한다(Lee et al., 2016). 발생원을 줄이고 발생된 미세먼지를 잘 제거하지 않으면 지하철 내 미세먼지 농도가 높아질 수 있다. 열차 내 미세먼지가 높은 경우 출퇴근 시 지하철을 정기적으로 이용하는 사람들은 미세먼지에 장기적으로 노출될 수 있다. 따라서 지하철 객차 내 미세먼지 농도를 정기적으로 측정하여 실태를 파악해 볼 필요가 있다.

현재는 코로나바이러스 감염문제가 해결해야 가장 중요한 문제점 중 하나이지만, 코로나 시대 이전에 가장 우려하던 환경 문제점 중 하나는 대기 및 실내 환경의 고농도 미세먼지였다. 이 연구는 현 시점에서 승객들이 가장 우려하고 있는 대중교통 실내 환경에서 SARS-CoV-2 RNA 검출 가능성 여부를 파악하고, 바이러스 운반체 역할을 하는 미세먼지 농도 실태를 조사하여 알림으로써 현안 문제점들을 해결하기 위한 참고자료가 되는 것이 목적이다.

2. 방법

2.1 연구 설계

서울은 우리나라에서 대중교통이 가장 활성화 되어있는 도시 중 하나이다. 2018년 기준으로 서울시의 교통수단별 일일 수송 분담률은 대중교통 65.1%, 승용차 24.5%, 택시 6.3%, 기타 4.1%로 대중교통이 절반 이상이다(Seoul, 2020; Seoul, 2021). 대중교통이 차지하는 수송분담율 65.1% 중에서 지하철이 차지하는 수송분담률은 40.7%, 버스는 24.4%로 지하철의 수송분담율이 버스보다 1.7배정도 높다(Seoul, 2020; Seoul, 2021). 수도권을 관통하는 지하철 노선은 총 23개 노선이며 그 중에서 서울을 주로 운행하는 노선은 11개이다.

대중교통 차량의 실내공기질 법정 의무 검사 대상은 도시철도, 철도, 시외버스가 해당되며, 서울시 관할 내에서 적용되는 대상은 도시철도인 지하철이다(Ministry of Environment, 2020a). 서울시를 주로 관통하는 지하철 11개 노선을 대상으로 상하반기 연 2회 오염도 검사를 시행하여 지하철 객차 내 실내공기질 적정성 여부를 조사하였다.

대중교통은 이용객 수가 많고, 시민들의 안전에 대한 신속한 보장이 중요하므로 COVID-19가 서울에서 발생하기 시작한 2020년 1월말부터 2021년 2월까지 서울에서 운행하는 지하철, 버스, 택시에서 COVID-19 확진자가 발생 시 공기 및 사물표면에서 SARS-CoV-2 RNA가 검출되는지 조사하였다. 뿐만 아니라 2021년 1월, 일일 확진자수가 1,000명을 넘어서게 되어(KCDC, 2021) 확산을 방지하고자 선제적 대응을 위해, 2021년 2월 17일부터 24일까지 서울시내 주요 11개 지하철 노선에서 실제 승객들이 탑승중인 객차 내 사물표면에서 SARS-CoV-2 RNA 검출 여부를 조사하였으며, 동시에 같은 객차 내에서 초미세먼지 농도를 측정하였다.

2.2 대중교통 내 SARS-CoV-2 RNA 오염도 조사

SARS-CoV-2 RNA를 확인하기 위한 시료채취는 두 가지 방식으로 시행하였다. 하나는 공기중 바이러스 유무를 검사하는 것으로, 공기를 흡입하여 젤라틴 멤브레인 필터(80mm diameter, 3μm pores, Disposable Gelatine Membrane Filters, Sartorius Stedim Biotech, Germany)에 통과시켜 바이러스를 포집하는 에어스캐너(Sartorius Stedim Biotech GmbH AirPort MD8)를 사용하여 공기중에 포함된 SARS-CoV-2 바이러스를 포집하는 방법이다(Rahmani et al., 2020). 공기포집기는 1.5 m 높이에 설치하고 10분 동안 50 L/min의 유속(Kim et al., 2016)으로 두세번 정도 공기를 흡입하여 멤브레인 필터에 포집하였다.

사물표면에서 SARS-CoV-2 RNA가 검출되는지 확인하기 위해서 N-Pipette Swab Plus (Pipette Swab Plus+, 3M, USA)를 이용하여 대중교통 내 사물 표면을 문질러서 샘플링하였고, 그 프로토콜은 World Health Organization(WHO)와 질병관리청에서 제안하는 방법을 참고하여 시행하였다(WHO, 2020; KCDC, 2020). 두 가지 샘플링 방식에 대해 표 1에서 간단히 비교하여 나타내었고, 그림 1과 같이 대중교통 현장에서 샘플링하였다(Seo et al, 2021).

모든 샘플은 실험실로 옮기기 전에 4℃를 유지하기 위해 아이스박스에 넣어 운반되었다. 샘플은 Biosafety Levels(BL)-2 및 BL-3 실험실에서 즉시 전처리하고 24시간 내에 분석되었다. RNA 추출 전에 공기 샘플 용 젤라틴 필터를 절단 한 후 50 mL conical 튜브에 넣고 16 mL 버퍼 용액 (3% bsa-0.01 M PBS)을 추가하였다. conical 튜브를 볼

Table 1. Sampling methods of SARS-CoV-2 RNA

Types	Surface sample	Air sample
Target	Surface of objects	Airborne
Instruments	Pipette Swab Sampler(3M)	Air scanner(MD8, Sartorius) with a disposable gelatin membrane filter
Sampling method	Collect the sample by rubbing the surface of the object with the swab soaked in the buffer solution.	MD8 was installed at a height of 1.5 m and used to take two separate samples with an air intake flow rate of 50 L/min for 20 min.

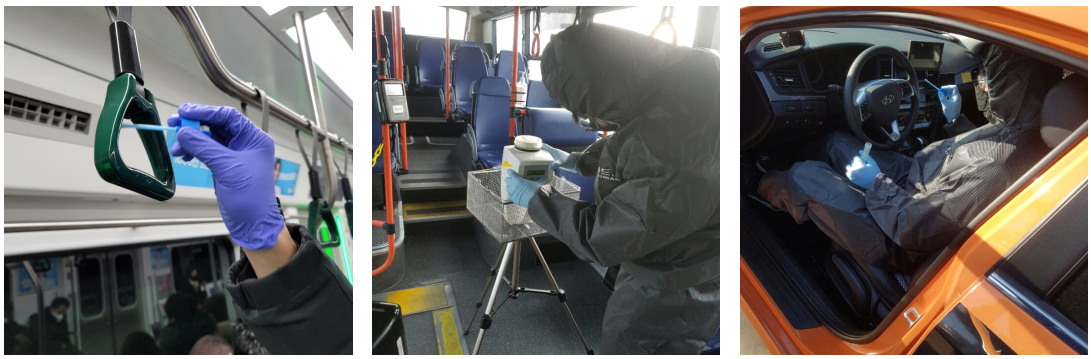

Figure 1. Surface sample of subway handle (left), air sample collection in bus (center), surface sample in taxi (right)

텍싱하고 37℃ 상태의 배양기에서 용해시켜 액상이 되도록 한 후 실험하였다. 표면 샘플은 버퍼 펩톤 브로스 액에 담겨있는 면봉 형태의 Swab Sampler를 이용하여 시행하였다.

Real time RT-PCR(reverse transcription polymerase chain reaction) 전에 표면 샘플의 완충액을 1분 동안 볼텍싱 하였다(Rahmani et al., 2020). 270 μL의 샘플을 270 μL의 lysis buffer에 넣어 섞고, 실온에서 10분 동안 반응시킨 다음, 500 μL을 카트리지에 넣고 MagNA Pure 96 기계로 추출했다.

RT-PCR 키트(PowerChek™ 2019-nCoV Real-time PCR Kit, Kogenebiotech, South Korea)를 사용하여 샘플을 테스트 하였고 SARS-CoV-2의 target gene은 인체 확진 판정과 동일한 방법인 envelope(*E*) gene과 *RdRp*(RNA-dependent RNA polymerase) gene을 선택하였으며, *E* gene과 *RdRp*에 대해 각각 PCR 혼합물을 준비 하였다(Biryukov et al., 2020; Corman et al., 2020; Kampf, 2021; Wolfel et al., 2020). 반응 조건은 50 ℃에서 300분 동안 1 cycle, 95℃에서 10분 동안 1 cycle을 거쳐서, 95℃에서 15초 동안 40 cycles, 60℃에서 1분 동안 40 cycles 반응시켜 *E* gene과 *RdRp* 모두 fluorescence 반응이 발현될 경우 양성판정 하였다.

2.3 대중교통 PM-2.5 농도 실태 조사

대중교통 차량은 혼잡도에 따라 실내공기질 오염도가 달라지므로(Yun, 2020), 환경부 실내공기질 관리법 시행규칙 별표 4의3에 의거하여, 도시철도의 경우, 출퇴근 시간대인 혼잡시간대(07:30~09:30, 18:00~20:00)와 혼잡시간대를 제외한 시간대인 비혼잡 시간대로 나눠서 측정하였다(Ministry of Environment, 2020a). 대중교통 실내공기질 검사 항목 중 하나인 초미세먼지(PM-2.5)의 기준은 혼잡시간대와 비혼잡 시간대 모두 50 μg/㎥이다.(Ministry of Environment, 2020a)

시료채취 및 분석은 환경부고시 실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작·운행 관리지침에서 제시하는 대중교통차량의 실내공기질 측정방법에 근거하여 시행하였다(Ministry of Environment, 2020b). 측정지점은 대상 차량 내 실내공기질을 대표하면서도 승객의 이용에 불편함을 주지 않도록 하기 위해 좌석이 설치되어 있지 않은 여유 공간이나 승객 호흡기 위치인 좌석에서 1.0~1.5 m 높이에 설치하였다(Ministry of Environment, 2020b). 초미세먼지는 각 노선 출발지에서 도착지까지 정상운행하는 동안 연속적으로 시료를 채취하였고 1분 간격으로 자료를 수집하였다(Ministry of Environment, 2020b). 초미세먼지 분석은 분진 및 에어로졸을 실시간으로 측정하는 Grimm Dust Spectrometer 1109 장비를 사용하여 광산란법으로 시행하였다. 광산란법은 대기중에 부유하고 있는 입자상 물질에 의해 빛이 산란하는 양을 측정하고 그 값으로부터 입자상 물질의 양을 연속적으로 측정하는 방식이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대중교통 내 SARS-CoV-2 RNA 오염도 조사

확진자가 발생한 대중교통 시설 중 지하철은 지하역사 18개 시설, 3개의 열차, 역무원만 출입할 수 있는 휴게실 등 제한구역 3군데 시설에서 각각 343건, 72건, 266건을 검사하였다(표 2). 버스는 버스차량 22대 내부와 버스정류장 한 곳에서 480건의 환경 검체를 검사하였고, 택시차량 7대 내부에서 49건, 택시차고지에서 6건을 검사하여 총 55건을 검사하였다. 확진자가 발생한 지하철, 버스, 택시 내부 현장에 직접 방문하여 공기시료와 표면시료를 샘플링 하였고, 그 결과 공기 시료는 모두 음성이었다. 확진자가 떠난 후 일정 시간이 지나면 공기 중의 감염 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다(Seo et al, 2021). 표면 시료는 확진자 발생 후 소독방역을 실시하고 샘플링하였으며, 1건의 양성반응이 나왔다. RNA가 검출된 시료는 소독 후 이틀이 지난 후 샘플링 한 직원휴게 공간 내 샤워실에서 채취되었으며, 그 대상 사물은 샤워실에 걸려있었고, 샘플링 당시 마르지 않은 상태의 수건이었다. 직원 샤워실은 창문이 없어서 외기에 의한 자연환기가 어려운 실내공간이었다. 해당 시설은 검출 판정 후 즉시 추가 소독하였고, 샤워실 내부에 있는 수건을 포함한 세탁기, 세면대 수도꼭지 등 24가지 사물표면을 재검사한 결과 모두 불검출이었다. 샤워실은 지하역사에서 일하는 직원들이 사용하는 휴게공간으로 대중교통 이용객들이 사용할 수 없는 제한구역이었기 때문에 승객들이 이용하는 대중교통으로 분류하기는 어렵지만, 확진자가 오래 머물렀던 공간에 대해서는 세심한 소독관리가 필요해 보인다. 물론, 바이러스 감염성은 환경검체에서 얻은 바이러스를 배양해 봐야 명확히 확인할 수 있으므로 real time RT-PCR에 의한 SARS-CoV-2 RNA의 검출이 반드시 인체 감염성을 의미하는 것은 아니다(Moreno et al., 2021).

실제 운행되어 승객이 탑승하고 있는 지하철 객차 내 코로나19 바이러스의 환경적 오염이 있는지

Table 2. SARS-CoV-2 RNA test results in public transportations where the confirmed case occurred in Seoul(Between February 2020 and February 2021)

Type of Transpo -tation	Surface Samples (Positives, %)	Facilities No.	Surface Samples (Positives, %)	Air Samples (Positives)	Total Samples (Positives)	Positive/ Total (%)
Subway	Station	18	323(0)	20(0)	343(0)	0(0%)
	Train	3	62(0)	10(0)	72(0)	0(0%)
	Restricted Area	3	262(1, 0.38%)	4(0)	266(1)	1(0.376%)
	Total	24	647(0)	34(0)	681(0)	1(0%)
Bus	Bus	22	468(0)	9(0)	477(0)	0(0%)
	Bus station	1	3(0)	0(0)	3(0)	0(0%)
	Total	23	471(0)	9(0)	480(0)	0(0%)
Taxi	Taxi	7	49(0)	0(0)	49(0)	0(0%)
	Taxi Garage	1	6(0)	0(0)	6(0)	0(0%)
	Total	8	55(0)	0(0)	55(0)	0(0%)
Total		55	702(1, 0.142%)	34(0)	736(1)	1(0.136%)

알아본 선제적검사 결과 11개 전노선 혼잡시간대와 비혼잡시간대 모두 불검출이었다.(표 3) 승객의 비말이 튈 만하거나 빈번이 손으로 접촉할 만한 사물인 지하철 출입문, 고리손잡이, 봉손잡이, 승객의자, 객차 이동 통로문, 문버튼, 문손잡이를 대상으로 표면시료를 채취하였고, 혼잡시간대에 495건, 비혼잡 시간대에 523건을 합하여 총1,018건을 검사하였다.(표 3) 선제적 검사 결과 환경검체에서 모두 불검출로, 객차 내 소독방역 관리가 적절히 되고 있다고 판단되었다.(표 3) 실질적으로 대중교통 이용객들은 지하철, 버스, 택시 내부에서 마스크를 반드시 착용하도록 되어있고 식음료 등 섭취가 금지되기 때문에, 비말이 공기 중이나 사물표면에 뿌려지거나 확산되기는 어렵다. 마스크 착용 등 개인방역이 잘 이루어지고 있기 때문에 확진자가 이용한 승객이 접근할 수 있는 대중교통 공간에서는 소독 전후 모두 음성반응이 나온 것으로 판단된다.

3.2 대중교통 PM-2.5 농도 실태 조사

미세먼지는 눈에 보이지 않을 정도로 아주 작은 입자로 폐 깊숙이 들어가 폐의 기능을 떨어뜨리고 인체 면역력을 약하게 하는 등 그 자체로도 유해하다. 작은 입자는 쉽게 가라앉지 않고 공기 중에 부유하여 바이러스가 부착 시 더 멀리 퍼져나갈 수 있는 매개 역할을 하므로(Nor et al., 2021) 대중교통 내 정기적인 미세먼지 농도 측정과 관리는 바이러스 확산 방지 및 저감을 위해서도 필요한 사항이다.

그림 2에서 보면 객차 내 PM-2.5 농도와 외부 대기의 PM-2.5 농도의 비인 In/Out(I/O) ratio가 대부분 1 ~ 5.2 사이 값을 보이므로 외기보다 객차 내부 미세먼지 농도가 높은 경향이 나타남을 알 수 있다. 즉, 미세먼지 발생원이 지하철 내부에 있는 것으로 해석되며, 외기 미세먼지 농도가 낮을 때에는 객차 내 환기 횟수 및 환기량을 늘릴 필요가 있다. 노선 평균값을 나타내는 그림2를 보면 D라인의 경우는 측정기간 내 I/O ratio가 가장 높은 라인 중에 하나이며, 20년 10월 21년 2월 D라인 평균은 혼잡/비혼잡 시간대 모두 기준을 초과하였다. 따라서 측정 시작점부터 시간대별 미세먼지 데이터의 흐름을 D라인만 자세히 표현한 그림 3을 추하가였고, 2020년 10월과 2021년 2월경 측정한

Table 3. Preemptive inspection of SARS-CoV-2 RNA was conducted on trains in operation with passengers on board in Seoul.(February 2021)

Line	Surface Samples of Peak Time	Surface Samples of Off-Peak Time	Total Samples	Kind of Samples
A	24	20	44	Door(120), Ring Handle(385), Stick Handle(256), Chair(180), Carriage Aisle Door(50), Door Button(8), Door Handle(19)
B	17	23	40	
C	43	47	90	
D	33	33	66	
E	47	48	95	
F	46	42	88	
G	94	108	202	
H	50	55	105	
I	41	47	88	
J	42	42	84	
K	58	58	116	
Total	495	523	1,018	

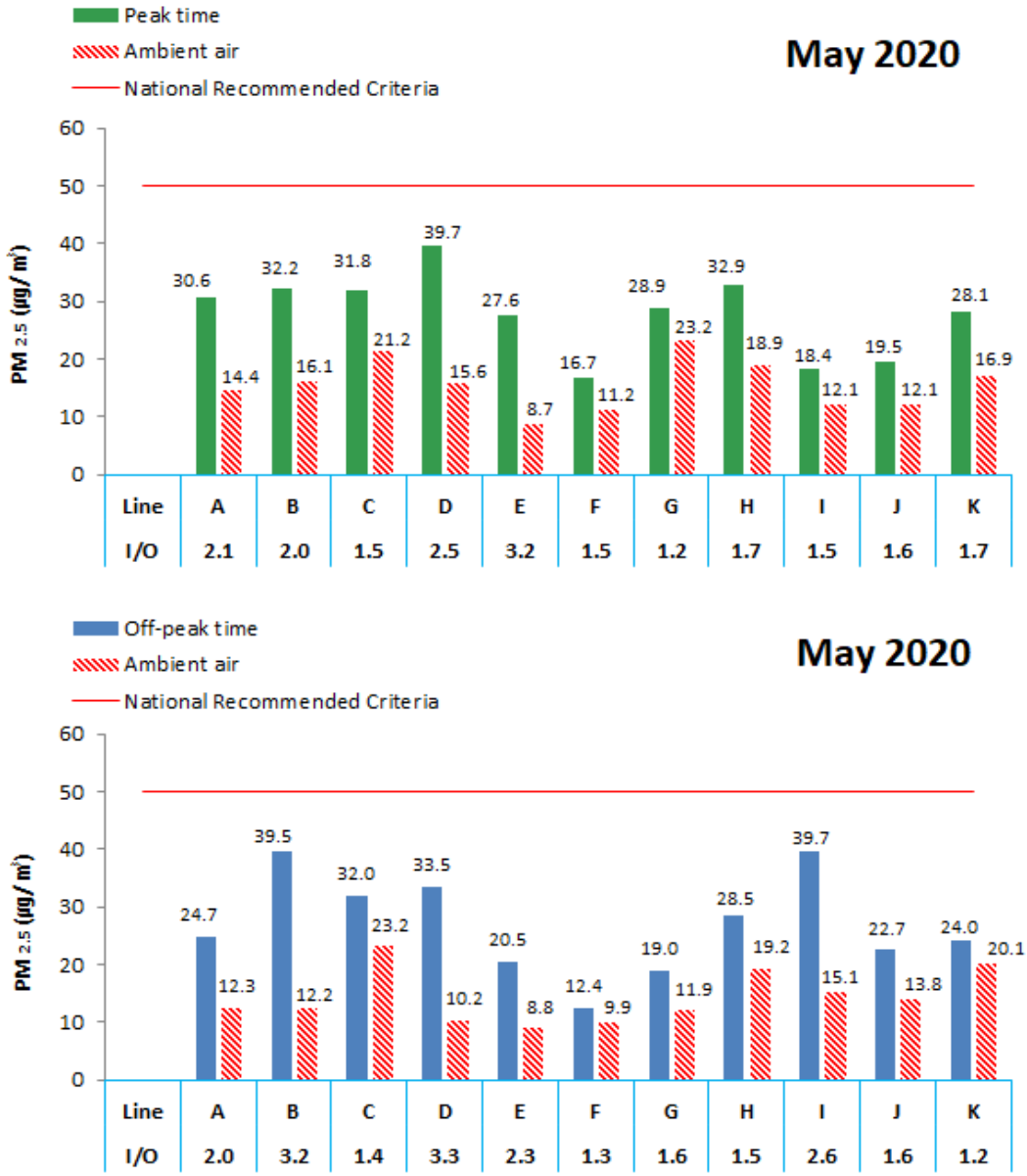

Figure 2-(1). Average of PM-2.5 concentration in subway and ambient air in May 2020.

결과를 보면 운행 중 대부분의 역에서 기준을 초과하였다. 그림 3은 D라인의 혼잡/비혼잡 시간대별, 측정 시기별 데이터 값을 표현하였고, x축의 시간 값은 한 번 운행 시 2~3분 간격으로 출입문이 열고 닫히므로, 동일 노선에서 순차적로 나열된 역을 의미한다. 외부 대기 미세먼지 농도가 짧은 시간 내 크게 변화하지 않는 한 객차 내 PM-2.5 농도가 수시로 변화하는 이유는 역사의 승하차문 개폐 시 터널 먼지가 객차 내로 유입되는 것으로 판단된다(Lee et al, 2016).

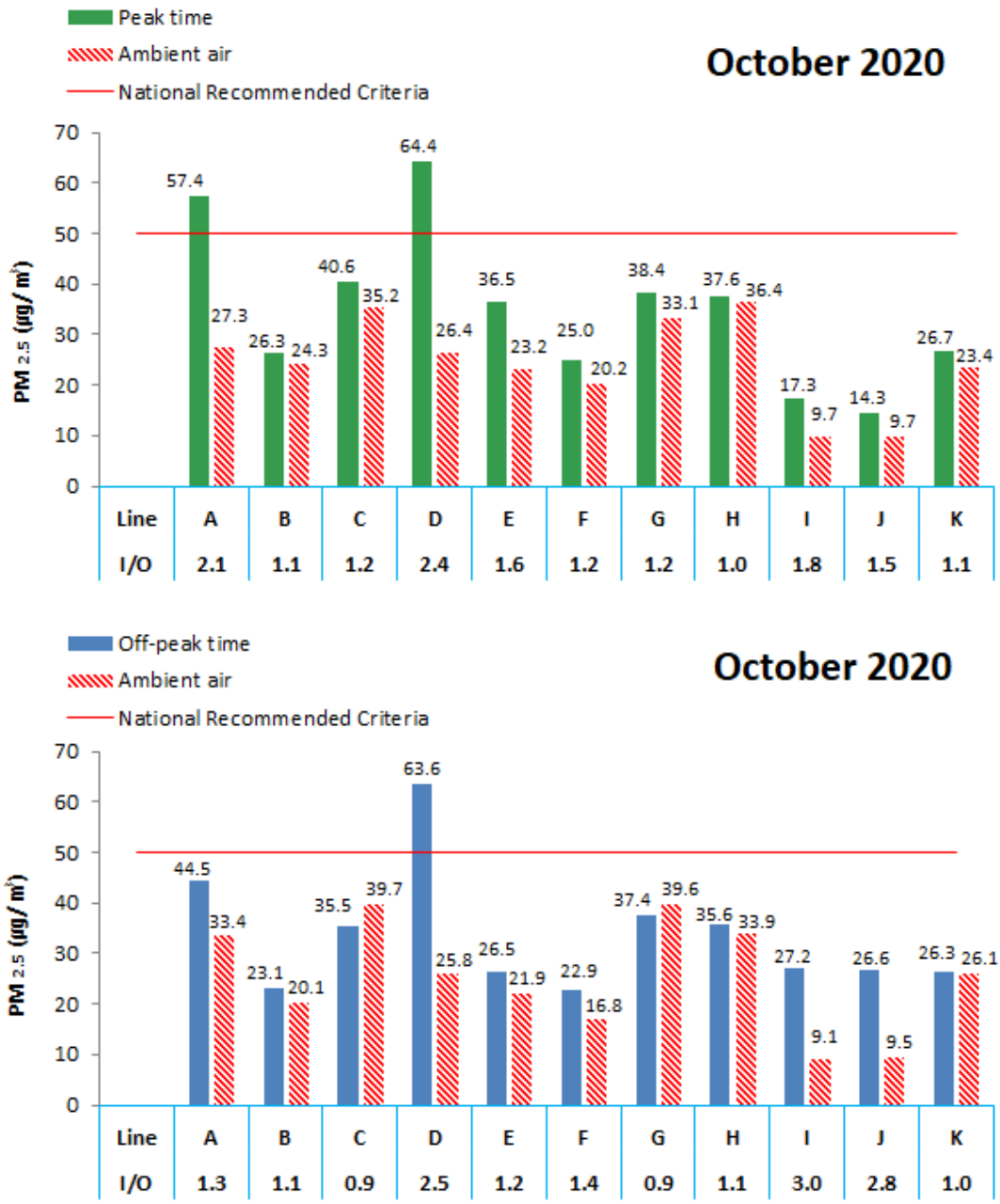

Figure 2–(2). Average of PM–2.5 concentration in subway and ambient air in October 2020.

2021년 1월부터 겨울철을 맞아 확진자 수가 급격하게 늘어 확진자 발생 전 코로나19 바이러스와 초미세먼지 오염도 조사를 동시에 시행한 선제적 검사 결과 코로나19 바이러스는 지하철 객차 내에서 모두 검출되지 않았으나(표 3), 측정시기 중 운행 평균값에서 국가기준을 초과하는 노선이 있었

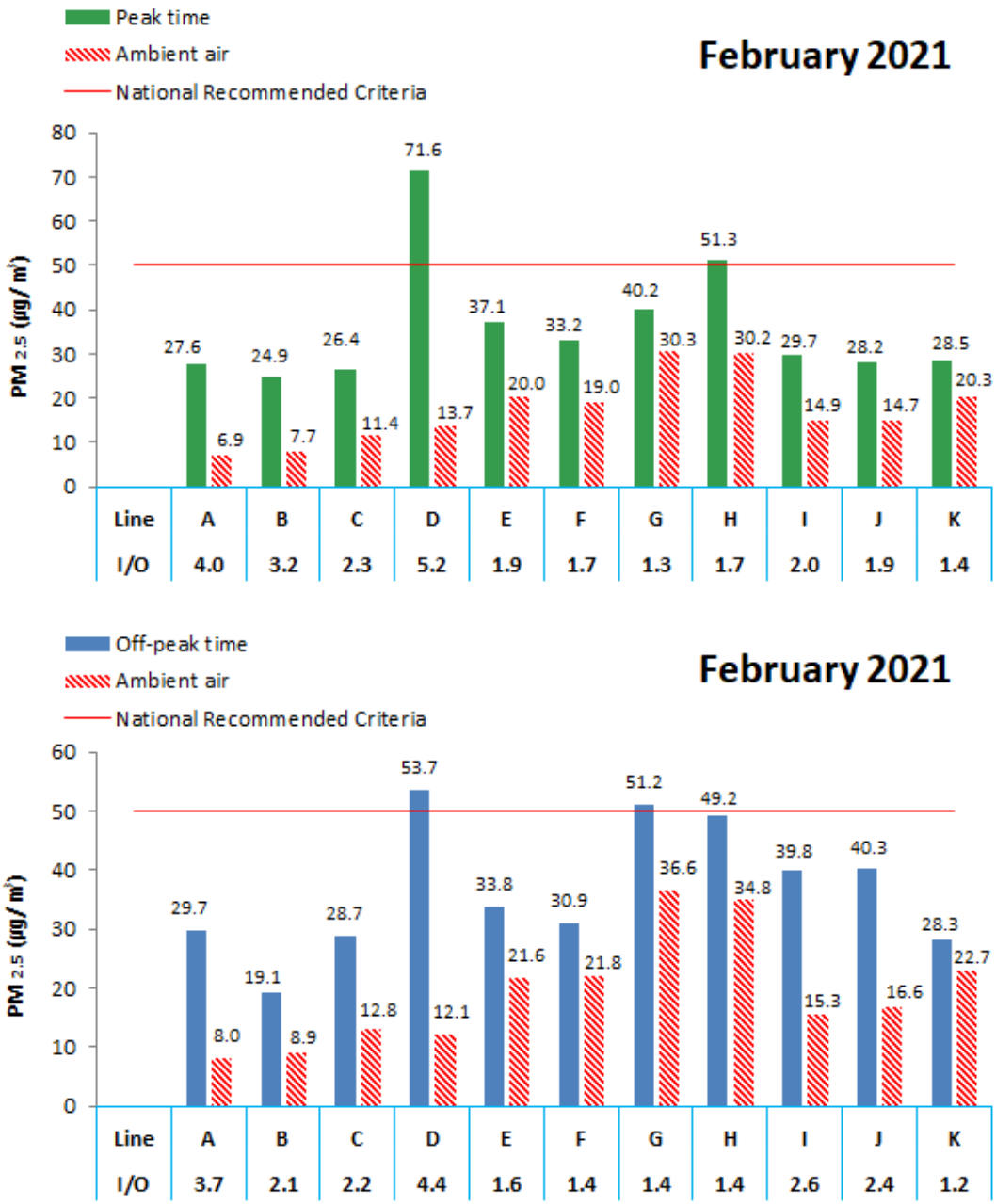

Figure 2–(3). Average of PM–2.5 concentration in subway and ambient air in February 2021.

다(그림 2). 2020년 초 COVID-19가 확산된 이후에 재택근무 시행 등의 요인으로 대중교통 승객수가 줄어들어 혼잡도가 낮아졌으며, 측정시기의 외기 농도가 좋았음에도 불구하고(그림 2) 2021년 2월 D라인 혼잡시간대 평균은 국가기준의 43%를 초과하였다. 초미세먼지 기준 초과 구간에 해당되는 역

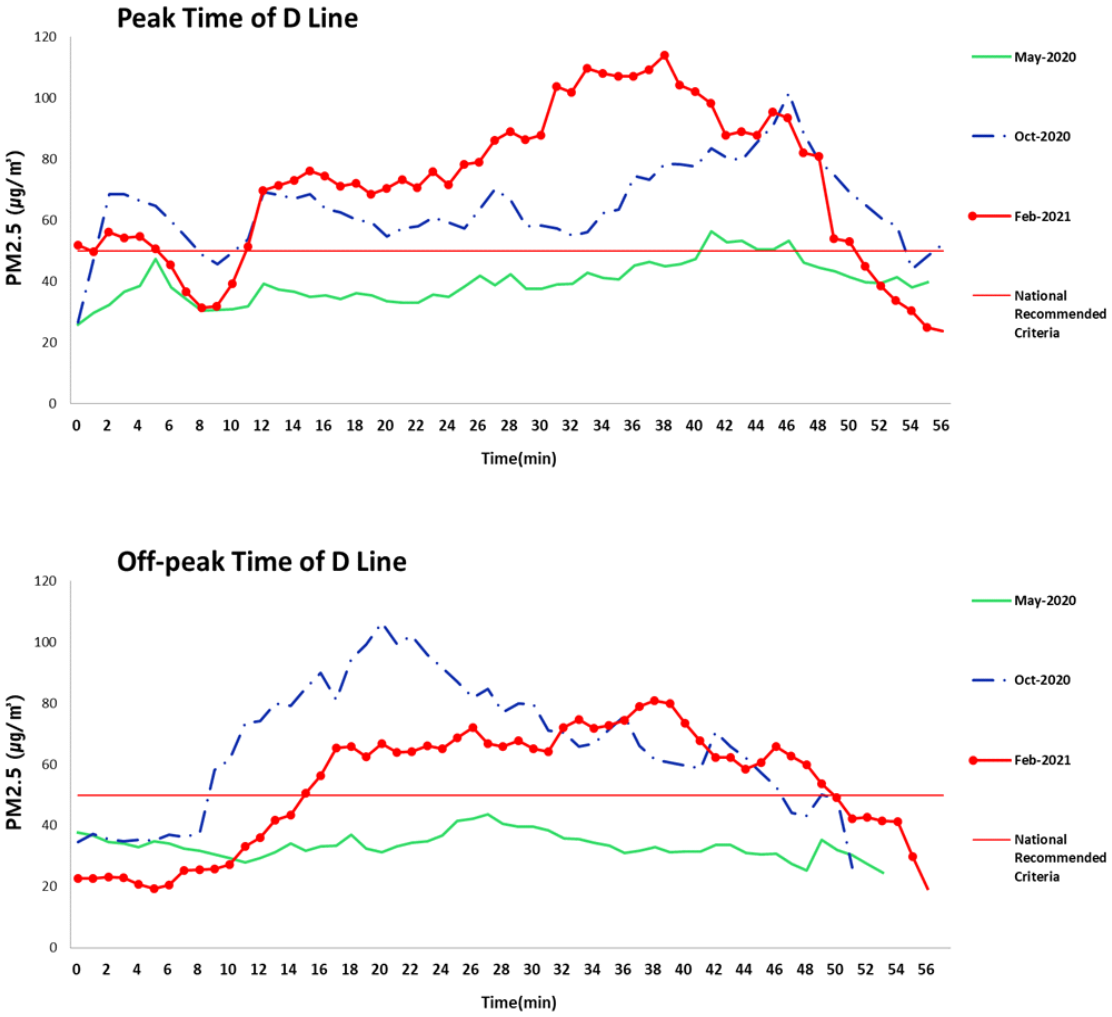

Figure 3. Continuous measurement of PM-2.5 value from departure station to arrival station for D-line operating within Seoul jurisdiction(2020~2021). Peak time(Upside) and Off-peak time(Downside)

사는 지하터널 내 오염도와 터널의 길이, 심도, 급배기량, 자연환기횟수, 도상, 외기오염도 등 다양한 요인들에 대한 심도 있는 조사와 연구가 필요하다(Lee et al, 2017). 이 조사결과 국가 기준을 꾸준히 초과한 구간의 역사는 터널의 수세 빈도를 증가시키고, 궁극적으로는 미세먼지를 발생시키는 자갈도상, 노후 된 철제레일을 교체(Lee et al, 2016)하는 등 발생원 제어를 위한 집중 관리가 필요해 보인다. 미세먼지가 코로나-19 바이러스 운반체(Nor et al., 2021)로 알려져 있고, 승객들은 대합실이나 승강장보다 객차 내에서 더 긴 시간을 머물기 때문에 객차 내 미세먼지 오염도는 매우 중요하다고 판단된다.

4. 결 론

장기간 지하철, 버스, 택시 등 대중교통 내

SARS-CoV-2 RNA 검출조사를 한 결과 승객이 접근할 수 없는 제한구역에서 양성반응이 나온 1건을 제외하고는 모두 음성이었다. 다만, 직원휴게소에서 양성반응이 나왔으므로, 역사에 근무하는 직원들의 안전을 위한 더 철저한 관리가 필요해 보인다. 확진자수가 수천명에 달하고 있는 현시점에도 지하철 객차 등 대중교통에서의 집단감염 사례는 아직까지 보고된 바 없다. 대중교통 이용객은 마스크를 반드시 착용하여 탑승하게 되어있고 큰 소리로 긴 시간 전화통화 하는 것을 자제하라고 권고받기 때문에 비말이 튈 가능성이 현저히 낮다. 미세먼지가 바이러스의 원거리 이동 매개 역할을 하므로 대중교통 내 미세먼지 농도는 이중적 위험요소이다. 지하철 객차 일정구간에서 초미세먼지 기준을 초과하는 결과를 보이기 때문에 해당 역사는 기준치 이하로 낮추기 위한 노력이 필요해 보인다. 이번 연구를 통해 대중교통 내 미세먼지 농도를 낮추기 위해 힘쓰고, 적절한 소독 관리와 마스크착용 등 개인방역을 잘 지킨다면, 앞으로도 대중교통 내 집단감염을 막을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

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

References

Biryukov, J., Boydston, J.A., Dunning, R.A., Yeager J.J., Wood, S., Reese, A.L., Ferris, A., Miller, D., Weaver, W., Zeitouni, N.E., Phillips, A., Freeburger, D., Idris Hooper, I., Shumate, S.R., Yolitz, J., Krause, M., Williams, G., Dawson, D.G., Herzog, A., Dabisch, P., Wahl, V., Hevey, M.C., and Altamura,L.A. (2020). Increasing temperature and relative humidity accelerates inactivation of SARS-CoV-2 on surfaces, mSphere, 5:e00441-20.

CDC(Centers for Disease Control and Prevention). (2021). Coronavirus disease 2019 (COVID-19). How COVID-19 spreads
https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html

Chin, A.W.H., Chu, J.T.S., Perera, M.R.A., Hui, K.P.Y., Yen, H., Chan, M.C.W., Peiris, M., Poon, L.L.M., (2020). Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions, The Lancet Microbe, vol. 1, no. 1, p.e10.

Corman, V.M., Landt, O., Kaiser, M., Molenkamp, R., Meijer, A., Chu, D.K.W., Bleicker, T., Brunink, S., Schneider, J., Schmidt, M.L., Mulders, D.G., Haagmans, B.L., Veer, B., Brink, S., Wijsman, L., Goderski, G., Romette, J.L., Ellis, J., Zambon, M., Peiris, M., Goossens, H., Reusken, C., Koopmans, M.P.G., and Drosten, C. (2020). Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. Euro Surveill, 25(3), 23-30.

Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G., Gamble, A., Williamson, B.N., Tamin, A., Harcourt, J.L., Thornburg, N.J., Gerber, S.I., Lloyd-Smith, J.O., Wit, E., and Munster, V.J. (2020) Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. N Engl J Med. 382:1564–7.

Fears, A.C., Klimstra, W.B., Duprex, P., Hartman, A., Weaver, S.C., Plante, K.C., Mirchandani, D., Plante, J.A., Aguilar, P.V., Fernandez, D., Nalca, A., Totura, A., Dyer, D., Kearney, B., Lackemeyer, M., Bohannon, J.K., Johnson, R., Garry, R.F., Reed, D.S., and Roy, C.J. (2020). medRxiv; doi: 10.1101/2020.04.13.20063784

Kampf, G.,Todt, D.,. Pfaender, S., and Steinmann, E. (2020). Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with bio-

cidal agents. J. Hosp. Infect. 104, 246–251.

Kampf, G., Lemmen, S., and Suchomel, M. (2021a) Ct values and infectivity of SARS-CoV-2 on surfaces. Lancet Infectious Diseases. Vol21, e141.

Kampf, G., Pfaender, S., Goldman. E., and Steinmann, E. (2021b). SARS-CoV-2 Detection Rates from Surface Samples Do Not Implicate Public Surfaces as Relevant Sources for Transmission, Hygiene, 1(1), 24–40.

Kim, S.H., Chang, S.Y., Sung, M., Park, J.H., Kim, H.B., Lee, H., Choi, J.P., Choi, W.S., and Min, J.Y. (2016). Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome(MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards. Clinical Infectious Diseases, 63(3), 363–369.

KCDC(Korea Centers of Disease Control and Prevention). (2021). Korea Coronavirus Disease-19, Republic of Korea, Media Resources, Press release, http://ncov.mohw.go.kr/en/tcmBoardList.do?brdId=12&brdGubun=125&data-Gubun=&ncvContSeq=&contSeq=&board_id=&gubun=

KCDC(Korea Centers of Disease Control and Prevention). (2020). COVID-19 Disinfection Guidelines for Public-use Facilities and Multi-use Facilities 2020. 3-4thed. http://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20507020000&bid=0019

Lv, J., Yang, J., Xue, J., Zhu, P., Liu, L., and Li, S. (2020). Detection of SARS-CoV-2 RNA residue on object surfaces in nucleic acid testing laboratory using droplet digital PCR. Science of The Total Environment, 742, 140370.

Lee, E.S., Park, M.B., Lee, T.J., Kim, S.D., Park, D.S., and Kim, D.S. (2016). Characterizing Particle Matter on the Main Section of the Seoul Subway Line-2 and Developing Fine Particle Pollution Map. Korean Society for Atmospheric Environment, 32(2), 216-232

Lee, E.S., Lee, T.J., Park, M.B., Lee, T.J., Park, D.S., and Kim, D.S. (2017). Characteristics of particle matter concentration and classification of contamination patterns in the Seoul metropolitan subway tunnels. 33(6), 593-604

Moreno, T., Pinto, R.M., Bosch, A., Moreno, N., Alastuey, A., Minguillon, M.C., Anfruns-Estrada, E., Guix, S., Fuentes, C., Buonanno, G., Stabile, L., Morawska, L., Querola, X. (2020). Tracing surface and airborne SARS-CoV-2 RNA inside public buses and subway trains. Environment International, 147, 106326

Moriarty, L.F., Plucinski, M.M., Marston, B.J., Kurbatova, E.V., Knust, B., Murray, E.L,, Pesik, N., Rose, D., Fitter, D., Kobayashi, M., Toda, M., Cantey, P.T., Scheuer, T., Halsey, E.S., Cohen, N.J., Stockman, L., Wadford, D.A., Medley, A.M., Green, G., Regan, J.J., Tardivel, K., White, S., Brown, C., Morales, C., Yen, C., Wittry, B., Freeland, A., Naramore, S., Novak, R.T., Daigle, D., Weinberg, M., Acosta, A., Herzig, C., Kapella, B.K., Jacobson, K.R., Lamba, K., Ishizumi, A., Sarisky, J., Svendsen, E., Blocher, T., Wu, C., Charles, J., Wagner, R., Stewart, A., Mead, P.S., Kurylo, E., Campbell, S., Murray, R., Weidle, P., Cetron, M., and Friedman, C.R. (2020). Public health responses to COVID-19 outbreaks on cruise ships-Worldwide, February–March. Morbidity and Mortality Weekly Report(MMWR). 69(12), 347–352.

Ministry of Environment. (2020a). Enforcement Rules of

the Indoor Air Quality Management Act(abbreviation: Enforcement Rules of the Indoor Air Quality Act). Ministry of Environment Ordinance No. 918

Ministry of Environment. (2020b). Manufacture and operation management guidelines for public transportation vehicles for indoor air quality management. Ministry of Environment Notice No. 2020-64, 2020

Norefrina, S.M.N., Chee, W.Y., Nazlina, I., Mohd, H.J., Zetti, Z.R., Norlaila, M., Haris, H.A.H., Kuhan, C., Mohd, T.L., Phei, E.S., Chin, Y.L., Kemal, M.A., Jamal, H.H., and Mohd, S.M.N. (2021). Particulate matter (PM2.5) as a potential SARS-CoV-2 carrier. Scientific Reports, 2508.

Rahmani, A.R., Leili, M., Azarian, G., Poormohammadi, A. (2020). Sampling and detection of corona viruses in air: A mini review. Science of the Total Environment, 740, 1-8.

Seo, M., Lim, H., Park, M., Ha, G., Kwon, S., Shin, J., Lee, J., Hwang, Y., Oh, Y., and Shin, Y. (2021) Field study of the indoor environments for preventing the spread of the SARS-CoV-2 in Seoul. Indoor Air. 2021;00:1–13.

Seoul. (2020) Seoul transportation in 2020. ISBN : 9791165992736. 51-6110000-002504-01

Seoul. (2021). Major traffic statistics. https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/345

United Nations COVID-19 Response. How does COVID-19 spread?. (2020). https://www.un.org/en/coronavirus/ covid-19- faqs

Vania, A.V., Bruno, P.R.L., Maria, E.G., Caroline, P.B., Eduardo, B., Viviane de, S.G.F., Meri, B.N., Sonia, M.R., Katherine, A.T.C., Izadora, C.F., Morgana, F.V., Ramiro, G.E., Jacques, F.M., Vanete, T.S., and Emanuel, M.S. (2021). Environmental Detection of SARS-CoV-2 Virus RNA in Health Facilities in Brazil and a Systematic Review on Contamination Sources. Int. J. Environ. Res. Public Health, 18, 3824.

Virtanen, J., Aaltonen, K., Kivisto, I., and SironenJenni, T. (2021). Survival of SARS-CoV-2 on Clothing Materials. Hindawi Advances in Virology Volume 2021, Article ID 6623409.

Wang, D., Hu, B., Hu, C., Zhu, F., Liu, X., Zhang, J., Wang, B., Xiang, H., Cheng, Z., Xiong, Y., Zhao, Y., Li, Y., Wang, X., and Peng, Z. (2020). Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China. JAMA, 323, 1061–1069.

WHO(World Health Organization). (2020). Surface sampling of coronavirus disease (COVID-19): A practical “how to” protocol for health care and public health professionals. https://www.who.int/publications/i/item/surface-sampling-of-coronavirus-disease-(-covid-19)-a-practical-how-to-protocol-for-health-care-and-public-health-professionals

Wolfel, R., Corman, V.M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Muller, M.A., Niemeyer, D., Jones, T.C., Vollmar, P., Rothe, C., Hoelscher, M., Bleicker, T., Brunink, S., Schneider, J., Ehmann, R., Zwirglmaier, K., Drosten, C., and Wendtner, C. (2020). Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. Nature, 581, 465–469

Yun, S.J., Song, M.Y., Lee, J.H., and Chun, H.J. (2020). Performance assessment of air purification system on buses in Seoul. Seoul Institute of Technology, 2020-SR-05