

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 2: June 2021 pp. 37-42

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.2.037>

밀폐공간에서 비말 가림막 높이에 따른 감염성 비말 공기전파 차단능력 평가

허 지 은 · 조 희 주 · 박 현 설 · 신 동 호 · 심 준 목 · 조 윤 행*

한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

(투고 2021년 6월 1일, 수정 2021년 6월 8일, 게재확정 2021년 6월 15일)

Effect of droplet protection screen height on the prevention ability of infectious droplet airborne transmission in closed space

Jieun Heo · Hee-joo Cho · Hyun-Seol Park · Dongho Shin · Joonmok Shim · Yun-Haeng Joe*

Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research

(Received 1 June 2021; Revised 8 June 2021; Accepted 15 June 2021)

Abstract

Although the installation of droplet protection screen (DPS) is known to prevent droplet transmission, there is still a lack of knowledge in effectiveness of DPS installation to block the airborne transmission. In this study, the prevention ability of DPS against airborne transmission was evaluated according to the DPS height. When the DPS was not installed, the maximum concentration of PM1.0 at the location opposite to infected person was 35% of that at the infected person location. When the DPS was installed, the DPS effectively prevented the airborne transmission, consequently approximately 7% of generated particles were measured at the opposite location from particle generation position (infected person location). The prevention ability of DPS increased with DPS height, the maximum prevention efficiency of 95.1% was obtained when the DPS height was 900mm. Moreover, the speed of airborne transmission was delayed by installation of DPS, and the delay time increased with DPS height.

Keywords: Airborne transmission, Droplet protection screen, Prevention ability, Infectious droplet, Closed space

*Corresponding author.

Tel : +82-42-860-3636

Email : yhjoe@kier.re.kr

1. 서론

중국 우한에서 처음 보고된 SARS-CoV-2는 2021년 5월 현재까지 세계적으로 약 1억 6천만명을 감염시켰으며, 이중 3백만명 이상이 사망하였다. COVID-19의 확산세가 지속되자 2020년 3월 11일 세계보건기구(WHO, World Health Organization)는 팬데믹(pandemic)을 선언하였고, 이에 따라 각 국가는 다양한 방역 대책을 내놓고 있다. 하지만 2021년 5월 현재까지 COVID-19의 세계적 대유행은 지속되고 있으며 세계적으로 막대한 사회적, 경제적 문제를 초래하고 있다.

COVID-19의 감염경로는 크게 비말감염(droplet infection)과 공기감염(airborne infection)으로 분류할 수 있다 (Talier et al., 2019; Hadei et al., 2020; Hasio et al., 2020; Morawska and Cao, 2020; Prathe et al., 2020; Setti et al., 2020; Van Doremalen et al., 2020). 비말감염은 감염자와 밀접하게 위치한 사람이 감염자의 기침, 재채기, 대화에 의해 발생된 감염성 비말(바이러스가 포함된 비말)에 직간접적으로 노출될 시 발생되며, 주로 직경 5 μm 이상인 비교적 큰 비말 입자들이 그 원인인 것으로 알려져 있다. 이에 반해, 공기감염은 에어로졸화(aerosolization)된 직경 5 μm 이하 감염성 비말이 실내 기류를 타고 부유하며 감염자와 이격되어 있는 재실자의 호흡기계, 안구 점막 등에 부착되며 발생할 수 있다. 에어로졸화 된 감염성 비말은 실내 환경에서 수일 간 부유하며 그 감염성을 유지할 수 있어(Kumar et al., 2019; Eissenberg et al., 2020; Domingo et al., 2020) COVID-19과 같은 호흡기계 감염성 질환의 전파를 차단하기 위해서는 공기감염 대응 기술이 필요하다.

감염병 확산 방지를 위해 마스크 착용, 실내 공간 환기, 공기청정기 사용에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. Eikenberry and Steffen E (2020)와 Li and Tom (2020)은 시뮬레이션을 통해 마스크 착용 시 무증상 감염자로부터 발생하는 감염을 감소시켜 사망자 수를 줄일 수 있다는 연구 결과를 제시하였으며, Bhagat and Rajesh (2020), Sun and Zhiqiang (2020)는 실내공간에서 환기 위치에 따른 SARS-CoV-2의 거동을 평가하는 연구를 수행하였다. 국내에서는 COVID-19의 감염자 수를 줄이기

위해 환기의 필요성을 강조하고 있으며, 감염률을 낮추기 위한 예방책으로 식당 및 카페 등 다중이용시설에서 비말 가림막(DPS, Droplet Protection Screen) 설치를 권장하고 있다. 하지만 아직 비말 가림막의 성능 인증 기준이 마련되지 않아, 시중에는 다양한 형상을 가진 비말 가림막이 판매 및 사용되고 있다. 일반적인 비말 가림막 설치 환경을 고려하였을 때 비말 가림막은 방역을 위한 최후의 수단이므로 호흡기계 감염병 확산 방지를 위해서는 과학적 결과가 뒷받침된 비말 가림막 기준마련이 시급하다.

본 연구는 식당 및 카페와 같이 마스크를 착용하지 못하는 상황에서 비말 가림막에 의한 공기감염 전파 차단 능력을 평가하였다. 밀폐된 시험 공간 내 하나의 테이블에 감염자와 피감염자가 마주 보고 앉아서 대화하는 상황을 모사하였으며, 비말 가림막 설치 여부에 따라 감염자의 위치 및 피감염자의 위치에서 시간에 따른 PM1.0 농도 변화를 살펴보았다. 또한 비말 가림막의 높이를 다양화하여 높이별 비말 가림막의 공기감염 전파 차단 능력을 정량화하였다.

2. 실험방법

본 연구는 너비 3.2 m, 길이 6.6 m, 높이 2.7 m의 공간 내에서 이루어졌다(그림 1a). 실험 공간은 건물 공조시스템(HVAC, Heating, Ventilating and Air Conditioning)과 분리된 독립된 공간이었으며, 외기 유입 및 내기 유출로 인한 실험 오차 최소화를 위해 창문, 출입문 등의 틈새를 최소화 하였다. 챔버 중앙에 너비 1.2 m, 길이 1.2 m, 높이 0.7 m의 테이블을 위치시켰으며, 테이블 중앙에는 I자형상의 비말 가림막을 설치하였다(그림 1b). 본 연구에 사용된 비말 가림막은 감염자와 재실자의 중앙에 0.6 m 너비로 설치되었으며, 양 측에 너비 0.6 m의 날개 부분을 갖도록 설계되었다. 비말 가림막의 높이는 0.1 m 단위로 조절 가능하도록 제작되었다.

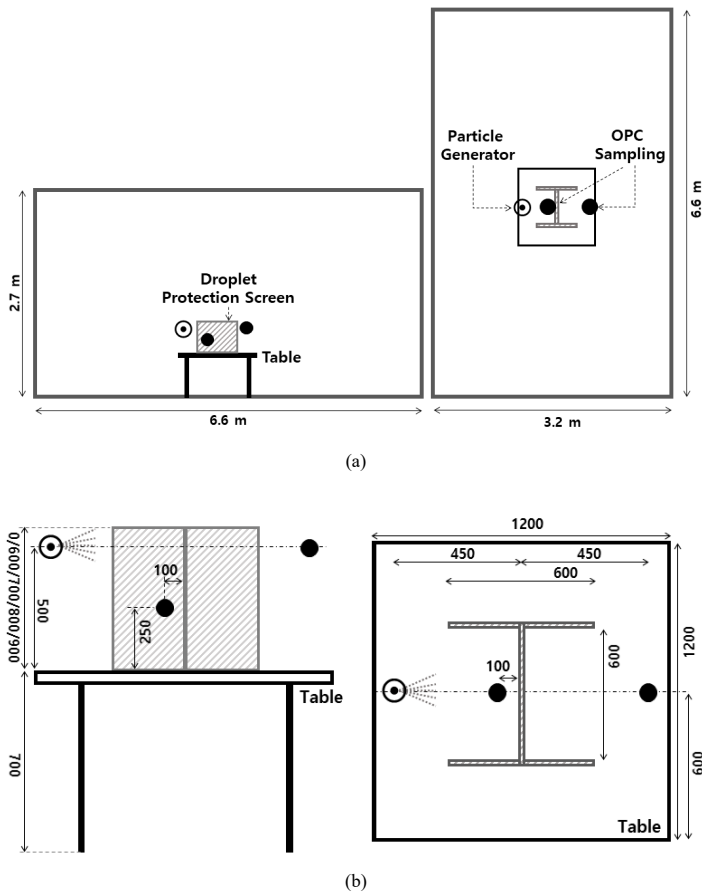


Fig. 1. Experimental setup: schematics of (a) experimental chamber and (b) experimental table.

한 대의 입자 분사장치(atomizer, model 9302, TSI Inc.)를 테이블 너비 방향에서 0.45 m, 지면으로부터 1.2 m(테이블 상단에서부터 0.5 m)에 설치하여 감염자의 대화 시 발생하는 비말을 모사하였으며, 입자 발생에는 10 wt.%의 KCl 용액을 사용하였다. 감염자로부터 발생된 감염성 비말의 공기감염 전파 가능성을 평가하기 위해 실험 시작 후 입자 분사 장치를 이용하여 10분간 입자를 발생 시키고, 두 대의 광학 측정 장치(OPC, Optical Particle Counter, Model 1.109, Grimm)를 이용하여 30분간 시험 공간 내 PM1.0 농도 변화를 살펴보았다. 이때, 한 대의 광학 측정 장치는 테이블 중앙에 설치된 비말 가림막에서 입자 분사장치가 설치된 너비 방향으로 0.1 m, 테이블 상부면으로부터 높이 0.25 m에 설치하여 감염자에서부터 발생된 PM1.0 감염성 비말이 비말

가림막으로 도달되는 농도를 측정하였으며(감염자 위치, source position), 다른 한 대의 광학 측정 장치는 입자 분사장치 설치 반대 방향으로 테이블 중앙으로부터 0.45 m, 테이블 상부면으로부터 높이 0.5 m에 설치하여 비말 가림막에 의해 차단되지 않고 재실자에게 도달되는 PM1.0 농도를 측정하였다(재실자 위치, counter position). 실험은 비말 가림막 높이를 0.6 m부터 0.9 m까지 변화시켜가며 진행하였으며, 모든 실험은 선행된 실험 종료 후 공기청정기를 사용하여 시험 공간 내 잔류한 입자를 제거해 후행되는 실험에서의 오차를 최소화 하였다.

한편, 비말 가림막 높이별 시간에 따른 PM1.0 농도변화 비교평가 시, 실험별로 시험 입자 발생량에 차이가 발생하므로 각각 독립적으로 실행되어 도출된 데이터 간의 직접비교는 분석에 오차를 일

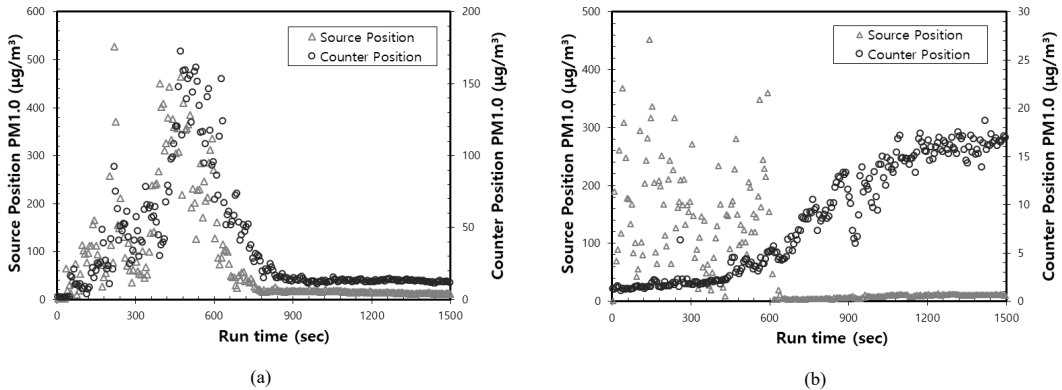


Fig. 2. PM1.0 concentrations at source and counter positions : (a) without a droplet protection screen, (b) installation of a droplet protection screen having 600mm of height.

으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시간에 따른 PM1.0 농도 변화 데이터 분석 시, 아래 수식을 통해 도출된 보정 농도(calibration concentration, C^*)를 사용하였다.

$$C^*(t) = \frac{C_{counter}(t)}{avg(C_{source})} \quad (1)$$

여기서, $C_{counter}$ 는 측정 시간 t 일 때 재실자 위치에서 측정된 PM1.0 농도를 의미하며, $avg(C_{source})$ 는 입자가 발생된 10 분간 감염자 위치에서 측정된 PM1.0 농도의 시간 평균 값을 의미한다. 높이별 비말 가림막 차단효율(prevention efficiency, $\eta_{prevent}$)은 30분간 측정된 재실자 위치에서의 PM1.0 시간 평균($avg(C_{counter})$)을 이용하여 평가하였으며, 아래 식을 통해 계산하였다.

$$\eta_{prevent}(\%) = \left(1 - \frac{avg(C_{counter})}{avg(C_{source})}\right) \times 100 \quad (2)$$

3. 실험결과

3.1 비말 가림막의 감염성 비말 전파 차단 효과

비말 가림막 설치 유무에 따라 감염자 위치 및 재실자 위치에서 측정되는 PM1.0 입자 농도를 그

림 2에 나타냈다.

가림막을 설치하지 않은 경우 입자 발생 시점부터 감염자 위치와 재실자 위치에서 고농도의 PM1.0 입자가 측정되었으며, 입자 발생 종료(Run time 600초 지점) 후 급격히 그 양이 감소하였다. 최대 농도 발생 시점은 두 측정 위치 모두 입자 발생 후 약 500초로 동일하였으나, 그 농도는 감염자 위치에서 약 500 µg/m³, 재실자 위치에서 약 180 µg/m³로 재실자 위치에서의 최대 농도는 감염자 위치에서 최대 농도의 약 35% 수준이었다. 즉, 비말 가림막을 설치하지 않아도, 감염자로부터 발생한 PM1.0 비말의 반 이상은 발생과 함께 확산되며 1/3 수준의 비말 만이 반대편에 위치한 재실자에 도달하였다. 비말 가림막(높이: 600 mm)이 설치된 경우(그림 2b), 입자 발생 이후에 감염자 위치에서는 약 300 µg/m³ 수준의 고농도 PM1.0 입자가 측정되었음에 반해, 재실자의 위치에서 측정된 PM1.0의 농도는 최대 약 20 µg/m³로, 감염자 위치의 약 1/10 이하였다. 비말 가림막이 설치되지 않은 경우, 재실자 위치에서의 시간별 PM1.0 농도 그래프 변화 추이는 감염자 위치에서의 농도 변화 추이와 매우 유사한 경향을 보였으나, 비말 가림막이 설치된 경우 두 위치에서의 시간에 따른 PM1.0 농도 변화는 매우 다른 특성을 보였다. 비말 가림막이 설치된 경우 재실자의 위치에서 측정된 PM1.0 농도는 입자 발생 이후 약 300초 동안 큰 변화가 없었으며 500초 이후 완만한 기울기로 증

가하여 포화(saturation) 상태에 도달하였다. 이러한 비말 가림막 설치로 인해 야기되는 S자 형상의 PM1.0 농도 변화 특성은 감염자와의 대화 시, 감염자와 재실자 사이에 설치된 비말 가림막이 재실자 위치로 직접 전파되는 감염성 비말을 효과적으로 차단할 수 있다는 것을 의미하며, 확산에 의해 재실자에게 도달되는 감염성 비말의 농도는 발생량에 비해 현저히 적다는 것을 의미한다.

3.2 비말 가림막 높이에 따른 감염성 비말 전파 차단 효과

비말 가림막의 높이를 변화시켜가며 반복 실험을 수행하였으며, 식 (2)를 이용하여 비말 가림막의 높이별 차단효율을 산출하였다(표 1). 각 실험에서 감염자 위치에서의 평균 PM1.0 농도는 151 µg/m³에서 191 µg/m³수준으로 비교적 일정하였다. 비말 가림막 설치로 인해 재실자 위치에서 PM1.0 농도는 큰 폭으로 감소하였으며, 차단 효율은 비말 가림막의 높이가 높아질수록 증가하여 최대 95.1%를 보였다.

Table 1. Prevention efficiencies and PM1.0 concentrations.

		DPS height (mm)			
		600	700	800	900
PM1.0 (µg/m ³)	Source Position	150.8	174.1	168.6	190.8
	Counter Position	16.4	14.6	11.5	9.3
Efficiency (%)		89.1	91.6	93.2	95.1

식 (1)을 통해 계산된 시간에 따른 재실자 위치에서의 PM1.0 보정 농도를 그림 3에 나타냈다. 비말 가림막의 설치로 인해 나타나는 재실자 위치에서의 S형상 농도 변화 특성이 모든 실험에서 동일하게 나타났으나, 그 특징은 확연히 달랐다. 재실자 위치에서 PM1.0 입자가 관측되는 시점은 비말 가림막의 높이가 증가할수록 늦어졌으며, 포화 상태에서의 PM1.0 보정 농도는 비말 가림막의 높이와 반비례하였다. 또한 입자 관측 후 포화 상태에 도달할 때까지 입자농도가 증가하는 영역에서 시간에 따른 보정 농도 기울기는 비말 가림막의 높이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 즉 비말

가림막의 높이가 증가할수록 감염자 위치에서 발생한 고농도의 감염성 비말은 재실자의 위치로 더 늦게, 더 적은 양이 전파되었다.

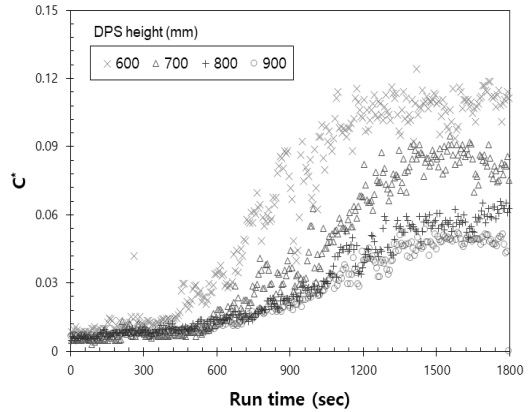


Fig. 3. PM1.0 concentrations over time at counter position with various droplet protection screen height.

4. 결론

본 연구에서는 비말 가림막 설치 유무 및 높이에 따른 감염성 비말 공기 전파 차단 효과를 비교 분석하였다.

비말 가림막을 설치하지 않은 경우 재실자 위치에서의 PM1.0의 최대 농도 관측 시점은 실험 시작 후 약 500초 이후로 감염자의 위치에서의 최대 농도 관측 시점과 동일하였지만, 비말 가림막을 설치한 경우 재실자 위치에서 최대 농도 관측 시점은 감염자 위치에서의 관측 시점에 비해 2배 이상 지연되었다. 또한, 비말 가림막을 설치하지 않은 경우 재실자 위치에서의 PM1.0 최대 농도는 감염자 위치에서 최대 농도의 35% 수준이었음에 반해, 비말 가림막 설치 시에는 감염자 위치 7% 수준의 비말이 재실자의 위치에서 측정되었다.

비말 가림막 설치로 인한 재실자 위치에서의 PM1.0 최대 농도 관측 시점은 비말 가림막의 높이가 증가할수록 지연 폭이 증가하였으며, 비말 차단 효율 또한 비말 가림막 높이가 높아질수록 증가하여 높이 900mm 조건에서 최대 95.1%를 보였다.

본 연구 결과 밀폐된 공간에서 비말 가림막 설치는 감염성 비말 입자가 채실자의 위치로 확산되는 전파속도 및 전파량을 효과적으로 감소시켜주는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구결과는 밀폐된 공간(사무실, 식당, 카페, 차량 등)에서 사용되는 비말 가림막의 최적 설계 및 인증 기준 마련에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20007027).

참고문헌

Bhagat, R.K., Wykes, M.D., Dalziel, S.B., and Linden, P.F. (2020). Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19, *Journal of Fluid Mechanics*, 903.

Eissenberg, T., Kanj, S.S., and Shihadeh, A.L. (2020). Treat COVID-19 as Though It Is Airborne: It May Be, *AANA Journal*, 88(3), 29-30.

Eikenberry, S.E., Mancuso, M., Iboi, E., Phan, T., Eikenberry, K., Kuang, Y., Kostelich E., and Gumel, A.B. (2020). To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic, *Infectious Disease Modelling*, 5, 293-308.

Hadei, M., Hopke, P.K., Jonidi, A., and Shahsavani, A. (2020). A letter about the airborne transmission of SARS-CoV-2 based on the current evidence, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(5), 911-914.

Hsiao, T.C., Chuang, H.C., Griffith, S.M., Chen, S.J., and Young, L.H. (2020). COVID-19: An aerosol's point of view from expiration to transmission to viral-mechanism, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(5), 905-910.

Kumar, P., and Morawska, L. (2019). Could Fighting

Airborne Transmission Be the Next Line of Defence Against COVID-19 Spread?, *City and Environment Interactions*, 4, 100033.

Li, T., Liu, Y., Li, M., Qian, X., and Dai, S.Y. (2020). Mask or no mask for COVID-19: A public health and market study, *PloS one*, 15(8), e0237691.

Morawska, L., and Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality, *Environment International*, 139, 105730.

Prather, K.A., Wang, C.C., and Schooley, R.T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2, *Science*, 368(6498), 1422-1424.

Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Perrone, M.G., Borelli, M., Palmisani, J., Gilio A.D., Piscitelli, P., and Miani, A. (2020). Airborne transmission route of COVID-19: why 2 meters/6 feet of inter-personal distance could not be enough, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2932.

Sun, C., and Zhai, Z. (2020). The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission, *Sustainable Cities and Society*, 62, 102390.

Tellier, R., Li, Y., Cowling, B.J., and Tang, J.W. (2019). Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary, *BMC Infectious Diseases*, 19(1), 1-9.

Van 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., De Wit, E., and Munster, V.J. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1, *New England Journal of Medicine*, 382(16), 1564-1567.