

승강기 내 공기전파감염원 노출 시나리오에 따른 감염확률 변화

Infection Probability Variation by Airborne Pathogen Exposure Scenarios in Elevators

○오 동 환* 이 정 훈** 정창헌***
Oh, Dong-Hwan Lee, Jeong-Hoon Cheong, Chang-Heon

Abstract

The COVID-19 pandemic has highlighted the risk of airborne transmission in confined spaces such as elevators. This study used the Wells-Riley model to evaluate infection probability under 16 scenarios with varying quanta generation, exposure time, and mask-wearing conditions. Results show that ventilation is decisive: increasing the rate from 0.5 ACH to 10 ACH under a high-risk condition (100 quanta/h, 60 s, no masks) reduced infection probability from 26.2% to 1.5%. Mask-wearing was also effective; with KF94 masks in the same scenario, infection probability fell from 21.7% to 2.7%. These findings demonstrate that maintaining 10 ACH ventilation together with mask use provides strong protection and should be emphasized as essential measures for preventing airborne transmission in elevators.

키워드 : 승강기, Wells-Riley 모델, 체류시간, 감염확률, 환기, 마스크

Keywords : Elevator, Wells-Riley model, Residence time, Infection probability, Ventilation, Mask

1. 서론

1.1 연구의 목적

코로나19 팬데믹은 전 세계적으로 대규모 감염 확산을 초래하며, 밀폐된 실내 공간에서의 비말 및 공기전파 위험성을 사회 전반에 각인시켰다. 특히 승강기는 일상생활에서 불가피하게 이용되는 교통수단으로, 짧은 시간 동안 다수의 인원이 한정된 공간에 밀집하여 탑승한다는 특성 때문에 감염 전파에 취약할 수 있다. 더불어 국내 다수의 승강기 환기 설비는 기계식 환기장치가 미흡하거나 실제 운영 여건상 설계 환기 성능을 충분히 확보하기 어려운 경우가 많아, 효율적인 환기 대책이 요구된다. 해외 연구에서도 승강기 내 감염 위험성에 대한 분석이 보고된 바 있다. Liu and Deng(2023)은 승강기 내부에서 기침이 발생하는 상황을 CFD로 시뮬레이션하여, 이용객의 체류시간이 길어질수록 공기전파감염 확률이 뚜렷이 증가함을 제시하였다. 또한 Cheong, C.-H., & Hwang, S.-H. (2021)은 Wells-Riley 모델을 초등학교 환경에 적용한 연구를 통해 환기율과 마스크 착용 여부가 공기전파 감염 확산위험 억제에 핵심적인 변수임을 확인하였다.

이러한 선행 연구를 바탕으로, 본 연구는 승강기 내 환기량 및 체류시간 등을 핵심 변수로 설정하고, 환기장치의 설치유무에 따라 승강기 내 공기전파감염확률 변화에 대한 분석을 진행하였다. 이를 통해 quanta 배출량, 환기율, 마스크 착용 조건의 상호작용에 따른 승강기 내 공기전파 감염확률 변화를 정량적으로 규명하고자 한다. 나아가 승강기 내 적정 환기량 확보와 마스크 착용의 필요성을 과학적 수치로 입증함으로써, 밀폐된 공간에서의 공기전파 감염 위험을 근본적으로 저감할 수 있는 효과적이고 실질적인 대응 전략을 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 연구 목표와 범위

본 연구의 목표는 밀폐된 승강기 내에서 체류시간, quanta 배출량, 환기량, 마스크 착용 여부에 따른 공기전파감염 확률 변화를 Wells-Riley 모델을 통해 정량적으로 규명하는 것이다.

2.2 공기전파감염 확률 분석 모델

기본 Wells-Riley 모델은 식 (1)과 같이 표현되고(Wells, 1955; Rudnick & Milton, 2003). 본 연구에서는 마스크 착용 효율을 반영하기 위하여 식(1)을 식(2)와 같이 변형하여 사용하였다.(Cheong & Hwang, 2021; Dai & Zhao, 2020)

* 경상국립대 건축공학부 학부생
** 경상국립대 건축공학부 부교수
*** 경상국립대 건축공학부 교수

(Corresponding author : Professor, School of Architectural

Engineering, Gyeongsang National University, changheon@gnu.ac.kr)

$$P = 1 - e^{-\frac{I \cdot q \cdot p \cdot t}{Q}} \quad (1)$$

$$P = 1 - e^{-\frac{I \cdot q \cdot (1 - m_1) \cdot p \cdot (1 - m_2) \cdot t}{Q}} \quad (2)$$

P: Infection probability

I: Number of infectious individuals

q: Quanta generation rate

p: Pulmonary ventilation rate

t: Exposure time

Q: Room ventilation rate

m_1, m_2 : Mask filtration efficiency

2.3 해석 시나리오 설정

본 연구는 quanta 배출량, 체류시간, 마스크 착용 여부를 변수로 하여 총 16개의 시나리오를 구성하였다. S1은 승강기 내 별도의 환기장치가 설치되지 않은 기존의 상태를 반영한 조건이며, 침기 조건 0.5 ACH로 설정하였다. 한편, 침기조건에서 승강기 문이 개방되면서 자연환기가 일어나는 조건은 1.0 ACH와 2.0 ACH의 공기교환이 일어나는 것으로 가정하였고, 이는 S2, S3조건에 해당한다.

본 연구에서 제안한 신규 환기장치의 환기량은 선행 연구에 근거하여 설정하였다.

Liu and Deng(2023)은 체적 9.75 m³ 인 승강기 모델을 대상으로 CFD 시뮬레이션을 수행할 때 약 11.28 의 환기량을 적용하였다. 본 연구에서는 이 선행연구를 참조하여 10 ACH 환기 조건을 개선된 환기량 수준으로 설정하였는데, 이는 기술적·경제적 실현 가능성과 감염 저감 효과간의 균형을 고려한 값이다.

구체적인 환기량 조건은 Figure 1에 도시되어 있다. Table 1은 설정된 전체 시나리오를 보여준다. S1-S3은 침기 조건(S1) 및 승강기 문 개방에 따른 자연환기 조건(S2-S3) 및 유증상 감염자(100 quanta/h) 고려한 것이다. S4-S9은 10 ACH 환기 조건에, 무증상 감염자(5 quanta/h), S10-S16 은 10 ACH 환기 조건에서 유증상 감염자를 고려한 조건이다. S16은 S1의 조건에 감염자와 비감염자 모두 KF94 마스크를 착용한 조건이다.

첫째, 승강기에 동승한 감염자의 quanta 배출량은 Cheong, Chang-Heon, Hwang, Seok-Ho. (2021). 연구에서 제시한 값을 참고하여, 무증상 감염자는 5 quanta/h, 일반적인 유증상 감염자는 100 quanta/h로 설정하였다. 이 값은 Buonanno et al.(2020)이 보고한 폭넓은 quanta 발생 범위와도 맥락을 같이 한다.

Table 1. Simulation scenarios for infection probability analysis

No.	q	Exposure Time (s)	ACH	Q (m³ /h)	Mask efficiency	
					infector	Susceptible
S1	100	60	0.5	2.75	0	0
S2			1	5.5	0	0
S3			2	11	0	0
S4	5	30	10	55.0	0.70	0.70
S5					0.70	0.00
S6					0.00	0.00
S7		60			0.70	0.70
S8					0.70	0.00
S9					0.00	0.00
S10	100	30			0.70	0.70
S11					0.70	0.00
S12					0.00	0.00
S13		60			0.70	0.70
S14					0.70	0.00
S15					0.00	0.00
S16	100	60	0.5	2.75	0.70	0.70

*q: quanta generation(quanta/h)

둘째, 감염자와 비감염자의 동시 체류시간은 승강기 평균 체류 시간을 가정하여 30초(0.0083 h)와 60초(0.0167 h)로 구분하였다.

셋째, 설정된 승강기의 환기량은 15인승 승강기(체적 약 5.5 m³)를 기준으로 기존 연구 문헌을 참고하여 10 ACH로 설정하였다. (Peng et al. 2021)

넷째, 마스크 착용 조건은 모두 착용, 감염자만 착용, 모두 미착용의 세 가지로 설정하였다. 마스크 조건은 KF94로 통일하였고, Tomkins et al.(2025)이 보고한 실제 착용 상황에서의 평균 실효 여과 효율(평균값에 근접한 70%)을 반영하여 마스크 효율값을 0.70으로 설정하였다.

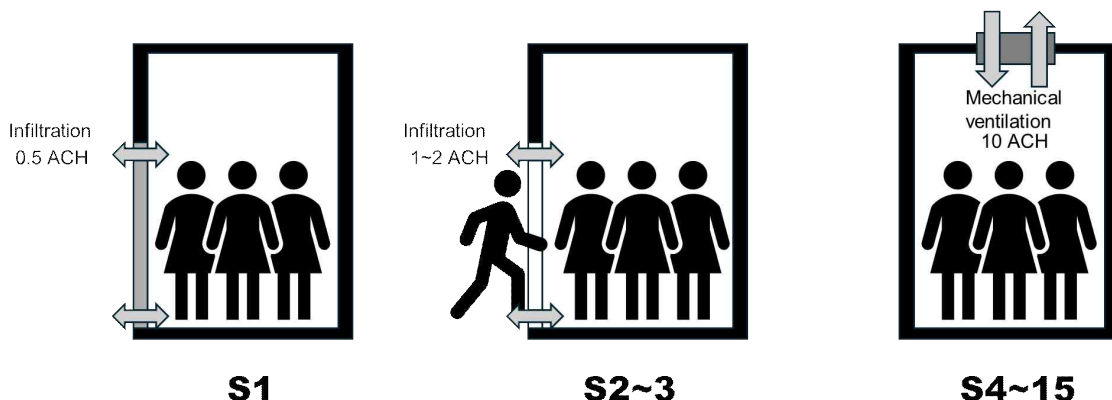


Figure 1. Infiltration and ventilation scenarios of target elevator

3. 결과

본 연구는 15인승 승강기(부피 5.5 m³, 환기량 10 ACH)를 기준으로 quanta 배출량, 체류시간, 마스크 착용 조건을 변수로 설정하여 총 16개 시나리오(S1~S16)를 분석하였다. 산출된 각 시나리오별 공기전파감염확률은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2. Airborne infection probability by overall scenario

No.	q	Exposure Time (s)	ACH	Mask Condition	Infection Probability (%)
S1	100	60	0.5	None	26.187
S2			1	None	14.086
S3			2	None	7.310
S4	5	30	10	Both masked	0.003
S5				Infector only	0.011
S6				None	0.038
S7		60		Both masked	0.007
S8				Infector only	0.023
S9				None	0.076
S10	100	30		Both masked	0.068
S11				Infector only	0.226
S12				None	0.752
S13		60		Both masked	0.137
S14				Infector only	0.454
S15				None	1.507
S16	100	60	0.5	Both masked	2.696

*q: quanta generation(quanta/h)

먼저 환기장치가 설치되어 있지 않은 조건을 모사한 S1(0.5 ACH)의 공기전파 감염확률은 26.2%이다. 이 조건은 유증상 감염자(100 quanta/h)와 비감염자 모두 마스크를 착용하지 않은 조건으로 60초 동시재실을 가정한 조건이며, 공기전파감염확률이 매우 높게 나타났다. 이 조건에서 승강기의 문이 개방되어 공기교환량이 1회~2회로 증가할 때 공기전파 감염확률은 14.086%, 7.310%로 낮아졌다.

S4~S15는 승강기에 강제환기장치를 적용한 조건이다

이 때, 비감염자가 무증상감염자와 동승한 S4~S9의 경우, 전반적인 공기전파감염 확률은 매우 낮았다. 체류시간 30초(S4~S6)에서는 모두 감염자 비감염자 모두 마스크를 미착용한 조건에서 약 0.038%(S6), 감염자만 착용 시 0.011%(S5), 양측 착용 시 0.003%(S4)로 나타났다. 체류시간을 60초로 늘린 S7~S9에서는 각각 0.007%(S7), 0.023%(S8), 0.076%(S9)로 증가하였지만 매우 낮은 수치로 공기전파감염가능성이 희박하다고 판단할 수 있다.

반면 quanta 배출량이 100 quanta/h인 경우에는 공기전파감염 위험도가 약간 상승하였다. 체류시간 30초(S10~S12)에서 모두 마스크 미착용 조건은 0.752%(S9), 감염자만 착용 시 0.226%(S8), 양측 모두 착용 시 0.068%(S7)로 산출되었다. 체류시간을 60초로 늘린 S13~S15에서는 각

각 공기전파감염확률은 0.137%(S10), 0.454%(S11), 1.507%(S12)로 증가하였지만, 이 역시 공기전파감염 위험도는 매우 낮은 수준이다

전체 시나리오를 비교한 결과, quanta 배출량과 체류시간은 감염 확률 변화에 직접적으로 영향을 주었으며, 특히 quanta 발생량과, 마스크 착용효과는 기존연구 결과들과 부합하는 양상을 보였다.

해석 결과에 가장 큰 영향을 미친 것은 환기량으로 나타났다. 환기장치가 설치되지 않은 기존 조건인 S1은 침기량 0.5 ACH 조건에서 유증상 감염자와 상호 마스크 없이 60초간 동승하는 조건이며, 최종 공기전파감염확률은 26.187%였다. 그러나, 동일 조건에서 환기량만 10 ACH로 변경된 S15의 경우, 공기전파 감염확률이 1.507%로 매우 낮게 나타났다. 이러한 결과는 승강기 내 10 ACH 정도의 환기장치를 사용함으로써, 공기전파감염원을 다량배출하는 유증상 환자와 60초 정도 함께 마스크 없이 재실하더라도, 공기전파감염에 대한 위험도를 걱정하지 않아도 될만한 수준으로 유지가능하다는 것을 의미한다. 단, 이 평가는 실내완전 확산농도를 기준으로 한 평가이기 때문에 극도로 인접한 상황에는 적용되지 않을 수 있다.

한편, S16의 조건은 환기장치가 설치되지 않은 현재 조건에서 감염자와 비감염자 모두 KF94마스크를 착용하는 조건이며, 이 경우 공기전파감염확률은 2.696%로 매우 낮은 감염확률을 보여, 공기전파감염원 확산방지에 있어 마스크 착용의 중요성을 보여주고 있다.

4. 논의

4.1 10 ACH 실현 가능성

본 연구에서 설정한 환기량 10 ACH는 일반 생활시설보다는 중증 감염 환자를 다루는 의료시설에서 주로 적용되는 수준으로, 실제 운영 환경에서는 다소 높은 값에 해당한다고 판단할 수 있다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 승강기의 체적은 5.5 m³로 매우 작은 편에 속하며, 이를 기준으로 할 때, 10 ACH의 환기량은 55 CMH에 불과하다. 일반적으로 공동주택의 화장실에 설치되는 배기팬의 용량이 40~100 CMH 정도에 해당하기 때문에, 본 연구에서 제시한 승강기 내 10 ACH의 환기량의 확보는 충분히 실현가능한 수준으로 판단된다. 한편, 에너지 소비량, 소음 등의 문제등을 고려하여, 환기장치를 재실자가 탑승한 기간을 중심으로 운영하되, 재실자 이탈 후 객실내에 존재할 수 있는 공기전파감염원의 배출을 위해 일정시간동안 추가적으로 운영하는 것을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.2 연구의 한계 및 개선방안

본 연구에서 사용한 Wells-Riley 식은 공간 내 감염원이 배출하는 공기전파감염원이 공간에 균일하게 확산된다고 가정한다. 그러나 실제 승강기 사용 환경에서는 감염자 인근에서 공기전파감염원 농도가 고농도로 형성되고, 가까운 위치의 탑승자가 이를 직접 흡입할 가능성이 높다. 따라서

본 연구에서 제시된 결과값은 실제 상황에서의 공기전파 감염 위험도를 다소 과소평가했을 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)과 같은 정밀한 해석 기법을 활용하여, 공간 내 공기전파감염원농도 분포 특성을 반영한 분석이 필요하다.

5. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

첫째, 본 연구 결과 승강기 내의 환기량을 10 ACH로 향상 시키는 조건은 마스크 착용유무와 무관하게 공기전파감염확률을 효과적으로 저감할 수 있는 방법으로 나타났다. 또한, 승강기의 10 ACH의 환기량은 현재 시중에 공급되는 환기장치만으로도 충분히 실현가능한 수준으로 판단된다.

둘째, 마스크 착용은 모든 조건에서 일관되게 효과적인 공기전파감염 확산 저감수단으로 확인되었다. 특히 환기장치를 적용하지 않고 유증상감염자와 마스크 없이 60초동안 함께 재실한 S1 대신 양측이 KF94 마스크를 착용한 경우 공기전파감염확률은 21.687 %에서 2.696%로 크게 감소했다. 따라서 승강기 내 공기전파감염 확산 관리에 있어 마스크 착용은 필수적 지침으로 제시될 필요가 있다.

종합하면, 승강기 내 공기전파감염 확률은 quanta 배출량, 체류시간, 마스크 착용, 환기율의 상호작용에 의해 결정되며, 이 중 마스크 착용과 환기 설비의 안정적 운영이 가장 효과적인 관리 전략임을 본 연구를 통해 확인하였다.

참고문헌

1. Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International*, 141, 105794. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>
2. Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), pp. 237 & # 8211; 245. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>
3. Peng, N. N., Chow, K. W., & Liu, C. H. (2021). Computational study on the transmission of the SARS-CoV-2 virus through aerosol in an elevator cabin: Effect of the ventilation system. *Physics of Fluids*, 33(10), 103325. <https://doi.org/10.1063/5.0068244>
4. Liu, S., & Deng, Z. (2023). Transmission and infection risk of COVID-19 when people coughing in an elevator. *Building and Environment*, 238, 110343. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110343>
5. Du, C., & Chen, Q. (2023). Impacts of respiratory activities on infection risk of COVID-19 in a passenger elevator. *E3S Web of Conferences*, 396, 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339601024>

6. Tomkins, A. A., Dulai, G., Dulai, R., Rassenberg, S., Lawless, D., Laengert, S., Rudman, R. S., Hasan, S., de Lannoy, C.-F., Drouillard, K. G., & Clase, C. M. (2025). Measuring the fitted filtration efficiency of cloth masks, medical masks and respirators. *PLOS ONE*, 20(4), e0301310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301310>
7. Cheong, Chang-Heon, Hwang, Seok-Ho. (2021). Priority Analysis of Airborne Infection Prevention Measures Using Wells-Riley Equation. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 15(4), 395-404. doi:10.22696/jkiaeb.20210034