

inBDS Lab Semina

# Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

2025.08.01.Fri



부산대학교 의생명융합공학부  
데이터사이언스전공  
김진

## Introduction

- **배경 : 팬데믹 이후의 변화**

- 백신, 치료제 중증·사망률 감소에 기여
- 그러나 변이 출현으로 인해 감염 예방 효과 감소로 **비약물적 개입(NPI)** 여전히 중요

- **격리의 효과성과 문제점**

- 효과적이지만 개인과 사회에 큰 부담
- 감염력 소실 시점을 알 수 없어 불필요한 격리 발생

- **기존 격리 방식**

- 고정 기간(**Fixed-period**): 단순하지만 과도한 격리 발생
- 검사 기반(**Test-based**): 정밀하지만 비용과 인프라 부담 큼

## Methods

- 바이러스 동역학 모델 개발
  - SARS-CoV-2 Delta 변이 환자의 실제 바이럴 로드 데이터 기반
  - 연령, 백신 접종 여부를 고려한 개별화된 파라미터 학습
- 격리 지침 시뮬레이션
  - 고정 기간(fixed-period) vs. 변동 기간(variable-period) 정책 적용
  - 생성된 가상 바이럴 로드 데이터를 기반으로 시뮬레이션
- 정책 성능 비교 및 최적화
  - 목표: 10% 이하 leaking risk,  $Re \leq 1$  조건에서
  - 불필요한 격리 부담 최소화하는 기간 도출

## 02

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

### Methods

- 대상: Delta 변이 감염 증상자 ( $n \geq 3$  PCR)
- 기간: 2021.04.01 ~ 2021.06.14
- 검사: Ct 값 기반 바이러스 농도 산출
- 변환식

$$\log_{10} (\text{viral load [copies/mL]}) = -0.32 \times C_t \text{ values [cycles]} + 14.11$$

## Methods

- 사용 모델: Target-cell limited model

$$\frac{df(t)}{dt} = -\beta f(t) V(t)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \gamma f(t) V(t) - \delta V(t)$$

- 파라미터:
  - $\beta$ : 감염률
  - $\gamma$ : 바이러스 복제 속도
  - $\delta$ : 감염세포 소멸률
- 연령과 백신 여부를 공변량으로 고려

## Methods

- Leaking Risk

$$\text{Leaking Risk} = \frac{1}{N} \sum_i I(V_i(s_i) > \text{infectiousness threshold})$$

- Effective Reproduction Number

$$R_e = pR_{e,A} + (1 - p)R_{e,S}$$

$$R_e = p \frac{\sum_i \int_{K_i} \theta P_i(s) ds}{N} + (1 - p) \frac{\sum_i \int_{L_i} \theta P_i(s) ds}{N} \quad P_i(s) = \frac{V_i(s)^\alpha}{V_i(s)^\alpha + \lambda^\alpha}$$

- Excess Isolation Burden

$$\frac{1}{N} \sum_i (s_i - u_i)$$

## 03

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

## Results

- 분석 대상: 증상자 + PCR 3회 이상 (N=134)
- 백신·연령별 Viral Load 차이 확인
- 맞춤형 격리 기준 설계의 근거 확보

**Table 1 Summary of clinical data from SARS-CoV-2 Delta patients**

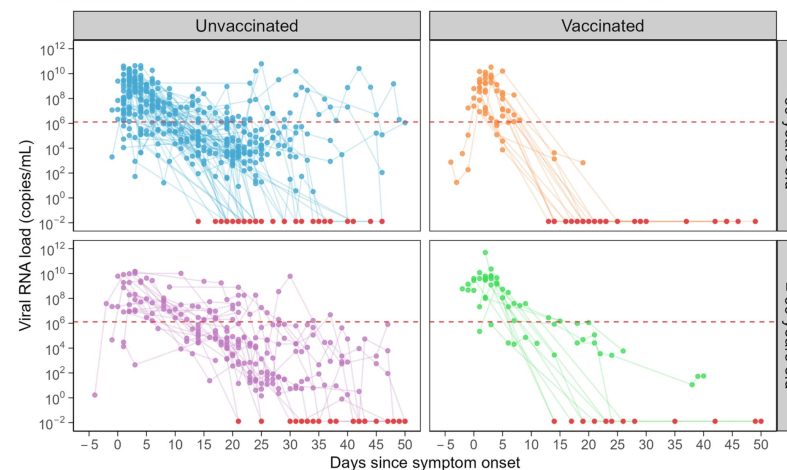
From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)

Variables	Overall sample (N=192)	Analyzed sample <sup>a</sup> (N=134)
Symptomatic cases (%)	161 (83.9%)	134 (100%)
Vaccinated cases (%)	62 (32.3%)	32 (23.9%)
Age range in years	[17, 94]	[19, 94]
Mean age in years (SD)	48.0 (18.8)	47.9 (19.1)
<60 years old (%)	139 (72.4%)	96 (71.6%)
≥60 years old (%)	53 (27.6%)	38 (28.4%)
Mean number of viral load measurements (SD)	5.42 (4.25)	6.48 (4.53)
Mean days from symptom onset till the first test (SD)	2.15 (3.06)	2.44 (3.46)

<sup>a</sup>consists of symptomatic patients with three or more observations.

**Fig. 1: Viral load trajectories of symptomatic SARS-CoV-2 Delta patients.**

From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)



## 03

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

## Results

- 백신 접종 시: 감염 속도 ↓, 초기 바이러스양 ↓, 감소 속도 ↑
- 고령자: 감염은 느리게 시작되지만 바이러스 오래 유지
- 미접종자: 바이러스 많고 오래 지속 → 격리 기간 길어짐
- → 나이 & 백신 정보 기반 **맞춤형 격리 기간 설계** 타당

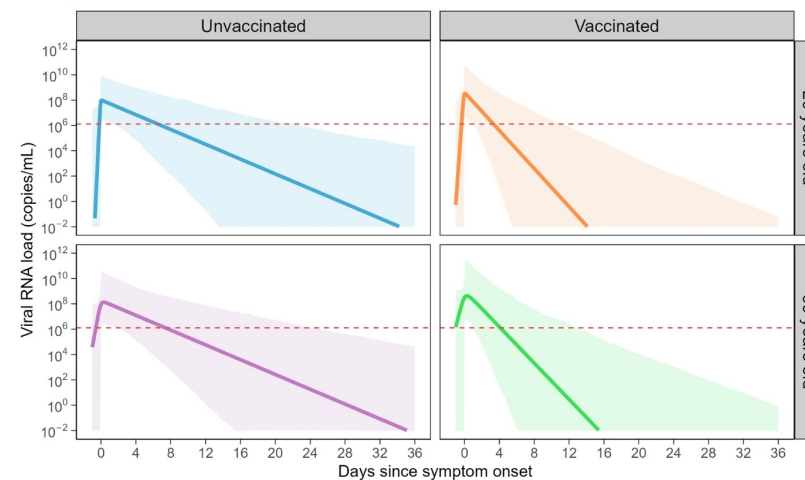
**Table 2 Estimated parameters for the SARS-CoV-2 viral dynamics model**

From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)

Parameters	Symbol	Unit	Median of fixed effect <sup>a</sup> (SE)	Covariate effect per year of age (SE)	Covariate effect of vaccination status <sup>b</sup> (SE)	Standard deviation of random effect <sup>c</sup> (SE)
Maximum rate constant for viral replication	$\gamma$	day <sup>-1</sup>	4.25 (9.12)	-	-	3.05 (1.89)
Death rate of infected cells	$\delta$	day <sup>-1</sup>	0.67 (0.04)	-	0.95 (0.14)	0.48 (0.05)
Rate constant for virus infection	$\beta$	(copies/mL) <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>	$8.03 \times 10^{-7}$ ( $8.24 \times 10^{-7}$ )	-0.05 (0.02)	-1.81 (1.03)	0.77 (0.57)
Viral load at symptom onset	$V(0)$	log <sub>10</sub> (copies/mL)	$8.98 \times 10^7$ ( $4.64 \times 10^7$ )	-	1.26 (0.96)	2.29 (0.61)

**Fig. 2: Estimated viral load curves for symptomatic SARS-CoV-2 Delta patients with different age and vaccination status.**

From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)



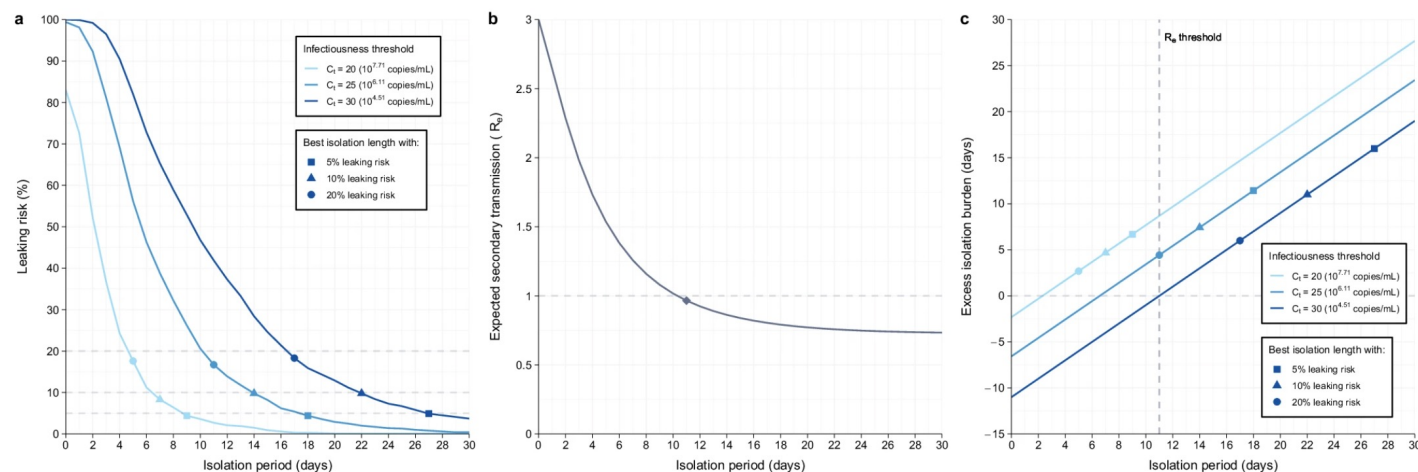


## Results

- 고정 격리 기간이 길어질수록 누출 위험(Leaking Risk)과  $R_e$ 는 감소
- 반면, 과잉 격리 부담(Excess Isolation Burden)은 증가
- $C_t=25$  기준,  $R_e < 1$  충족엔 **11일**, Leaking Risk < 10%엔 **14일** 필요

**Fig. 3: The fixed-period guideline.**

From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)



## 03

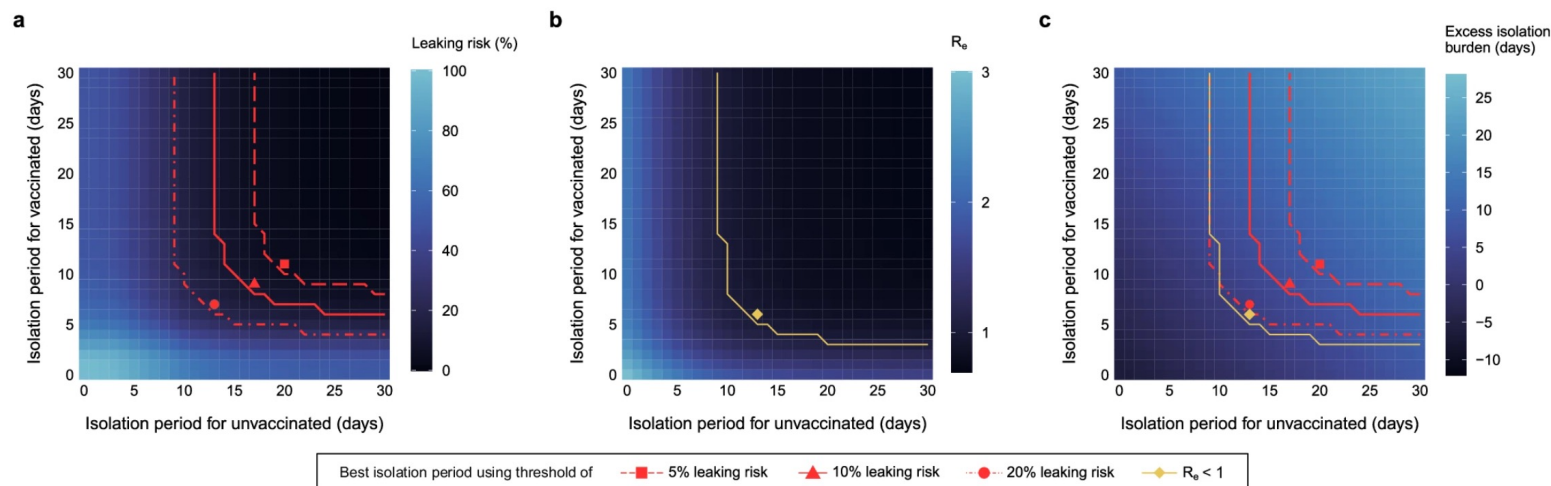
Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

## Results

- 격리 기간을 백신 여부 / 연령에 따라 조정 → 사회적 부담 감소
- 백신 미접종자: 더 길게 격리 / 접종자: 짧은 격리 가능
- 기준 만족하면서 과잉 격리 부담 최소화하는 조합 도출

**Fig. 4: The variable-period guideline.**

From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)



## 03

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

## Results

- 고정 격리: 불필요한 격리 기간 발생 (최대 7.4일)
- 백신/연령 기반 가변 격리: 과잉 격리 부담 최소화 (최소 2.6일)
- 전파 억제와 사회적 비용 최소화의 균형 필요

Table 3 Simulated excess isolation burden under different isolation guidelines<sup>a</sup>From: [Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore](#)

Criteria of acceptable leaking risk/ $R_e$	Isolation guidelines	Length of isolation (days)	Excess isolation burden (days)
Leaking risk <10%	Fixed-period	14	7.4
	Variable-period (vaccination status)	17 (unvaccinated)	6.4
		9 (vaccinated)	
	Variable-period (vaccination status, age)	16 (unvaccinated, <60) 14 (unvaccinated, >60) 10 (vaccinated, <60) 9 (vaccinated, >60)	6.0
$R_e < 1$	Fixed-period	11	4.4
	Variable-period	13 (unvaccinated)	2.9
		6 (vaccinated)	
	Variable-period (vaccination status, age)	12 (unvaccinated, <60) 13 (unvaccinated, >60) 6 (vaccinated, <60) 7 (vaccinated, >60)	2.6

<sup>a</sup>The infectiousness threshold was set as  $C_i=25$  ( $10^{6.11}$  copies/mL).

## 04

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

### Discussion

- 연령·백신 기반 가변 격리는 고정 격리보다 과잉 격리 부담 감소
- 개인 특성 반영한 격리 설계는 효과적이지만, 실현엔 한계 존재
- 테스트 기반 접근과 병행 시 효율성 극대화 가능

00

Age- and vaccination status-dependent isolation guidelines based on simulation of SARS-CoV-2 Delta cases in Singapore

End

감사합니다