

수리모델링을 이용한 코로나바이러스감염증-19 발생 단기 예측

질병관리청 위기대응연구담당관 백수진, 김연주, 권동혁
건국대학교 수학과 고영석, 이종민, 정은옥*

*교신저자 : junge@konkuk.ac.kr, 043-719-7740

초 록

우리나라 코로나바이러스감염증-19(이하 코로나19) 발생은 2020년 1월 20일 중국 우한에서 입국한 해외 유입 사례를 시작으로 2월 16일 국내 지역사회 전파가 처음으로 보고된 후, 종교시설 및 사회복지시설, 의료기관, 방문 판매 등 집단사례가 지속적으로 발생하고 있다.

본 연구에서는 수리모델링을 이용하여 코로나19의 지역사회 전파 양상을 파악하고 유행 규모를 예측하고자 하였다. 감염재생산지수를 정부 방역 정책기간에 따라 추정한 수리모델(SEIQR)과 확진자수에 따른 행동변화를 고려한 수리모델을 사용하였다. 코로나19 수리모델링 결과, 감염재생산지수는 사회적 거리두기 단계에 따라 변동하여 8월 초 종교활동, 집회, 집단발생 등으로 증가하였으나 8월 23일 사회적 거리두기 시행 이후 크게 감소하여 현재(9월 13일~10월 13일) 감염재생산지수는 0.88로 감염병 유행 감소 상태에 있다. 수리모델링 예측 결과, 현 상황 유지 시 10월 27일까지 일일 신규 확진자가 약 50~60명이 지속적으로 발생할 것으로 추정되어 적극적인 방역 조치 및 개인위생 관리 철저 등이 필요하다.

주요 검색어 : 코로나바이러스감염증-19, 수리모델링, 수학적 모델링, 행동변화, 단기 예측

들어가는 말

코로나바이러스감염증-19(이하 코로나 19)은 2019년 12월 중국 후베이성 우한시에서 처음 보고된 이후 전 세계적으로 확산됨에 따라 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 3월 11일(현지 시각) 세계적 감염병 대유행인 '판데믹(pandemic)'을 선언하였다. WHO에 따르면(10월 13일 기준), 전 세계적으로 약 3,742만 명이 넘는 코로나19 확진자가 발생하였고 107만 명이 사망하였다. 국가별로는 미국(7,636,803건), 인도(7,120,538건), 브라질(5,082,637건), 러시아(1,312,310건) 순으로 발생하였다[1].

우리나라는 2020년 1월 20일 중국 우한에서 유입된 코로나19 첫 환자 발생 이후 10월 13일까지 총 24,805명(국내 20,370명, 해외유입 3,435명)이 발생하였다. 현재 감염병 위기단계는 「심각」수준으로 국무총리를 본부장으로 하는

중앙재난안전대책본부를 가동하여 범정부적 방역체계를 유지하고 있다. 정부는 코로나19 발생 추이에 따라 사회적 거리두기를 단계별로 시행하며 밀접접촉자 추적 및 관리와 방역활동을 진행하고 있고, 국민들은 손 씻기, 마스크 착용 등 개인위생 관리 등을 통하여 감염전파 차단을 위해 노력하고 있다.

본 연구는 코로나19가 국내 지역사회 감염이 본격적으로 시작된 2월 16일부터 병원 격리 및 행동변화를 고려한 수리모델을 적용하여 감염 전파양상을 파악하고 유행의 규모와 최대 격리자 수를 예측하였다.

몸 말

우리나라 정부는 2월 16일 종로구 복지회관 관련 사례와 2월 18일 대구 신천지 관련 사례가 발생한 이후 전국적 확산 가능성에 대비한 선제적 조치로 감염병 위기단계를 「심각」으로 격상하여 법정부적 방역체계를 강화하였다(2월 23일). 2월 29일에는 종교시설 및 사회복지시설 등을 중심으로 지역사회 전파가 확산되어 909명으로 최다 발생을 기록하였고 사회적 거리두기 방역체계(2월 29일~3월 21일) 도입 및 지속된 강화된 사회적 거리두기(3월 22일~5월 5일) 영향으로 점차 감소하여 4월 중에는 일 평균 15명 이하 수준까지 감소하였다.

이후 생활 속 거리두기(5월 6일~8월 22일)로 전환하였으나 5~7월에는 클럽, 방문 판매, 종교활동, 소모임 등 통한 지역사회 전파로 일 평균 30명 수준으로 환자 발생이 증가하였으며, 8월 초 종교활동, 집회, 집단발생 등 증가로 2차 유행이 발생하여 8월 27일 434명이 발생하였다. 이에 수도권 거리두기 2단계(8월 16일~8월 22일), 전국 사회적 거리두기 2단계(8월 23일~8월 29일), 수도권

사회적 거리두기 2.5단계(8월 30일~9월 12일), 전국 사회적 거리두기 2단계(9월 13일~)가 시행 중이며, 이러한 강화된 방역 조치로 인해 최근의 발생 규모는 감소되었으나(일 평균 약 80명) 환자 발생 증감이 반복되고 있는 상황이다(그림 1).

해외 유입을 제외하고 수리모델링을 이용한 국내 지역사회 코로나19 사례는 2월 16일부터 10월 13일까지 총 23,170명이다. 코로나19 단기 예측을 위한 감염 확산 수리모델링은 결정론적 모델(SEIR 모델)을 기반으로 병원 격리 그룹을 고려한 SEIQR 모델을 사용하였다. SEIQR 모델은 전체 인구(N)는 감수성 그룹(S), 바이러스 잠복 그룹(E), 증상발현 그룹(I), 병원격리 그룹(Q), 그리고 회복 그룹(R)으로 구성된다. 감수성 그룹(S)은 감염환자와의 접촉을 통해 바이러스에 노출된 사람들은 바이러스 잠복 그룹(E)으로 이동하고 바이러스 잠복기간을 거쳐 증상이 발현(I)된다. 증상발현 후 의료기관에 내원하여 확진 및 병원 격리(Q)가 진행되고 회복기간을 거쳐 회복 그룹(R)으로 이동한다. 확진과 동시에 병원 격리되어 다른 사람을 감염시키지 않는다고 가정하였고, 검역에서 확진된 환자는 분석에서 제외, 입국 후 확진 사례는 포함하였다. 감염전파율(β)은

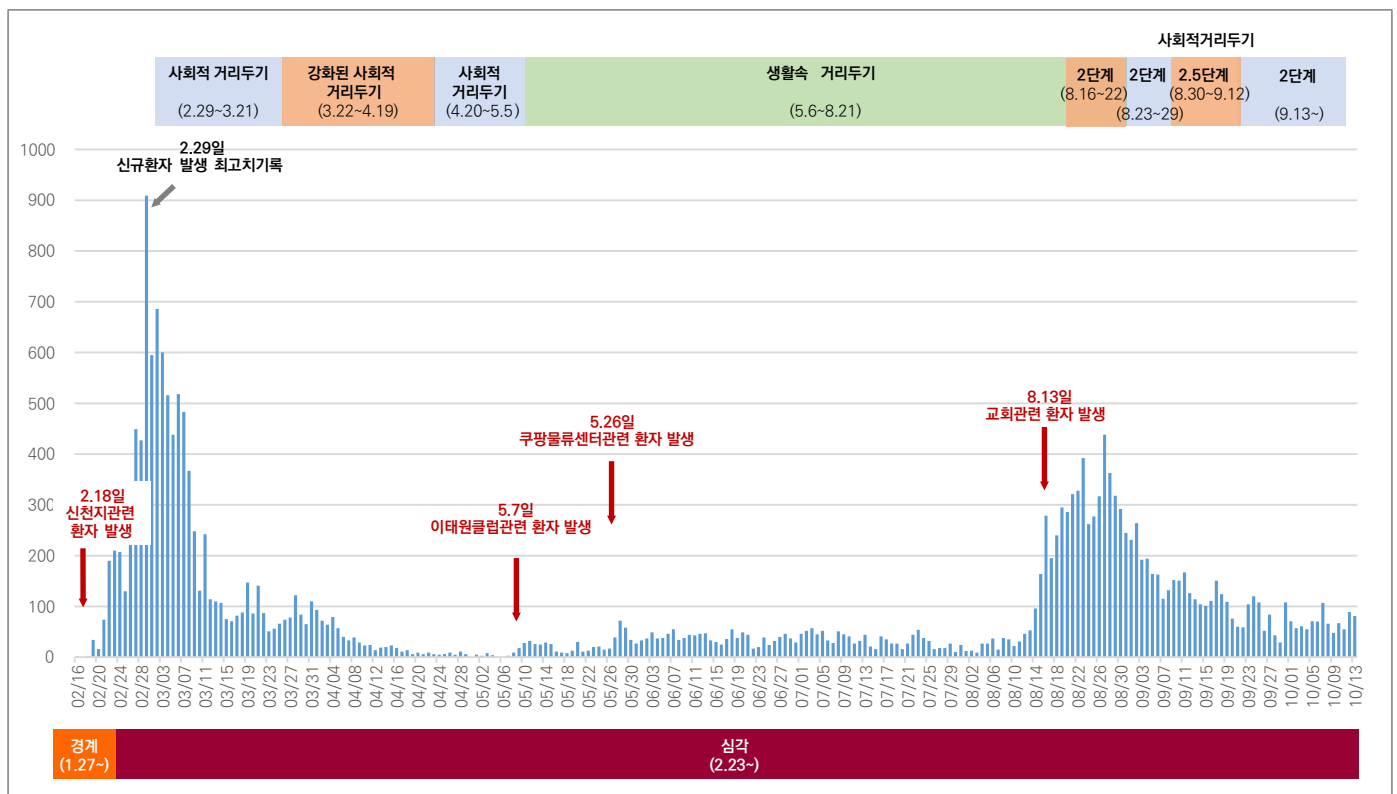


그림 1. 우리나라 코로나바이러스감염증-19 발생 현황(해외유입 제외)

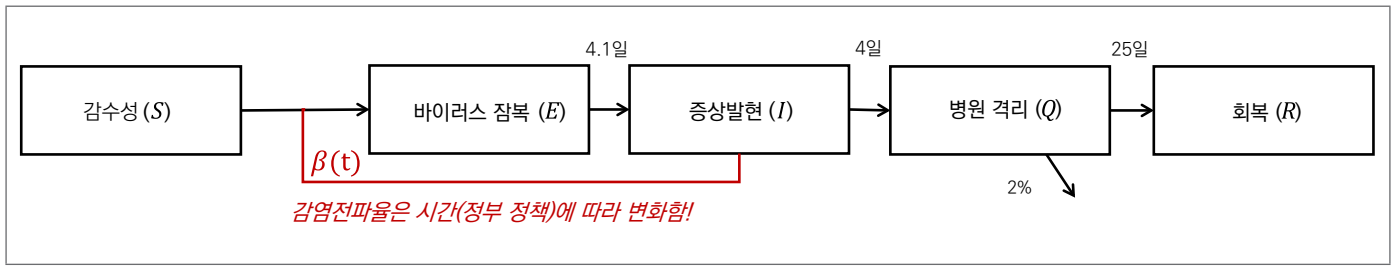


그림 2. 코로나바이러스감염증-19 전파모델 (SEIQR)

정부의 방역 조치 변화를 기준으로 기간을 구분하여 확진자 데이터에 피팅을 사용하여 역추정하였다. 바이러스 평균 잠복기는 4.1일, 증상발현부터 확진 및 격리까지의 평균 기간은 4일로 그리고 병원격리 후 회복까지의 평균 기간은 25일로 설정하였다. 치명률은 2% 이다. 코로나19의 감염전파 흐름도는 다음과 같다(그림 2).

사회적 또는 생활 속 거리두기 단계별 시행에 따른 코로나19 전파 속도는 감염병 예측 모델(SEIQR)의 기간별 감염재생산지수 추정을 통해 파악할 수 있다. 감염재생산지수는 한 명의 감염병 환자가 평균 감염기간 동안 감염시키는 평균 환자 수로 R_0 값이 1 초과이면 유행 지속, 1 미만이면 발생 감소, 1 이면 풍토병을 의미한다. 어떤 감염병에 대한 면역이 없는 인구집단에서 해당 감염병이 발생하고 이 감염병에 대한 관리, 중재가 아직 도입되지 않았을 때의 감염재생산지수를 기초 감염재생산지수(Basic

reproduction number, R_0)라 하며 사스는 2~4, 메르스는 1미만, 코로나19는 평균 3.28(1.4~6.49)로 알려져 있다[2,3].

본 연구에서는 질병 특성에 따른 전파속도(R_0 적용)에 격리 및 접촉감소로 인한 중재 영향을 반영한 전파속도(R_t 적용)를 분석하였다. 기간별 감염재생산지수는 첫 지역사회 전파 사례가 확인된 2월 16일부터 감염병 위기단계가 격상된 2월 23일까지 6.09로 가장 높았으며 강화된 사회적 거리두기가 시작된 3월 22일부터 사회적 거리두기로 전환된 4월 19일까지 감염재생산지수는 0.38로 가장 낮았다. 8월 이후 기간별 감염재생산지수는 수도권 중심 재확산 시기(8월 2일~8월 15일)에는 2.94, 수도권 거리두기 2단계(8월 16일~8월 22일) 1.57, 전국 사회적 거리두기 2단계(8월 23일~8월 29일) 0.53, 수도권 거리두기 2.5단계(8월 30일~9월 12일) 0.51, 전국 사회적 거리두기 2단계(9월

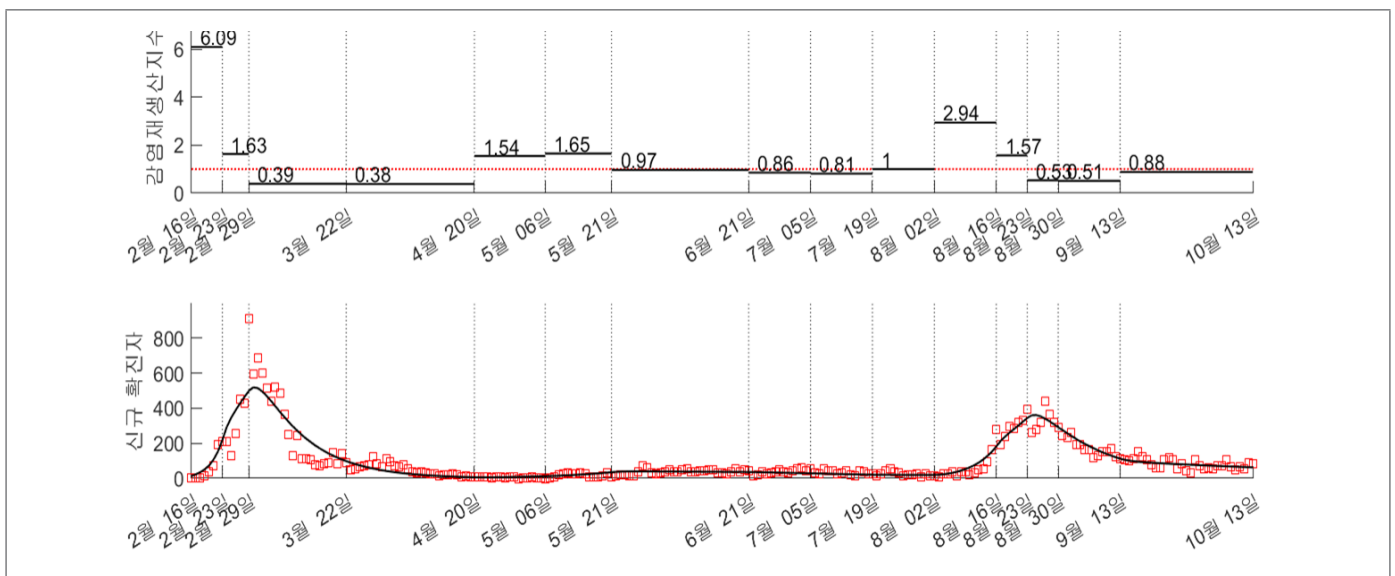


그림 3. 우리나라 코로나바이러스감염증-19 기간별 감염재생산지수

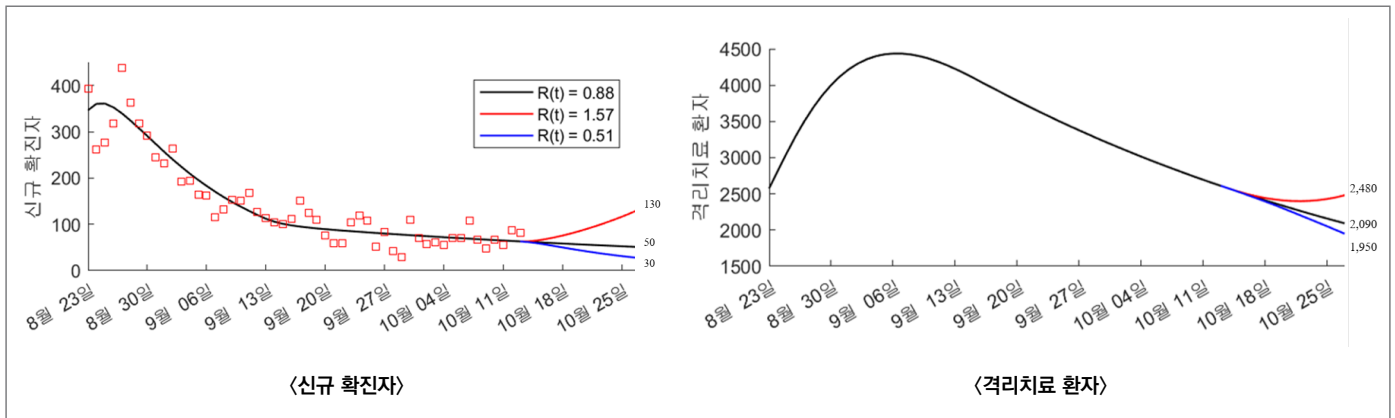


그림 4. 기간별 감염재생산지수를 이용한 우리나라 코로나19 발생 및 격리자 수 단기 예측

13일~10월 13일)인 현재까지 0.88 수준으로 코로나19 전파 속도는 감소하고 있다(그림 3).

기간별 감염재생산지수를 이용한 2주 후(10월 27일 기준) 국내 코로나19 예측 환자는 현 수준 조치 유지 시($R(t)=0.88$) 약 50명의 신규 환자(격리치료 환자 수는 약 2,090명)가 발생할 것으로 추정되며 사회적 거리두기 조치 수준에 따라 일 최소 30명(사회적 거리두기 2.5단계 수준, $R(t)=0.51$), 최대 130명(8월 사회적 거리두기 시행 전 수준, $R(t)=1.57$)으로 예측되었고 이에 따른 일별 격리치료 환자는 일 최소 1,950명에서 최대 2,480명으로 추정되었다(그림 4).

앞에서 보여준 모델은 방역 정책 기간을 나누어 짧은 기간 동안의 감염전파율을 추정하여 감염재생산지수(감염전파율·평균감염기간) 계산한 수리모델링이다. 이러한

수리모델은 특정 짧은 기간의 감염재생산지수 추정은 적합하지만, 장기간(즉 사회적 거리두기와 생활 속 거리두기가 섞여 있는 장기 정책 기간) 데이터에 근거한 수리모델링에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 장기간 동안의 코로나19 유행을 수리모델링하기 위하여 SEIQR 모델을 기반으로 사회적 거리두기 등 감염전파율 감소를 위해 노력하는 행동변화 영향을 고려한 수리모델을 구성하였다. 감수성 그룹(S)을 '강화된 사회적 거리두기 그룹(S_F)'과 '생활방역 그룹(S_L)'으로 나누어 행동변화 집단에 따른 영향 예측이 가능하도록 하였다. 확진자 수가 증가함에 따라서 감수성 인구가 바이러스 전파에 대한 인지 또는 공포심(Fear)을 가지고 마스크 착용 등의 개인위생 관리, 대규모 집회나 모임 자제 등 사회적 거리두기를 통해 행동 변화 감수성 그룹으로 이동한다(그림 5). 행동변화 모수인 δ_F 는 δ_L 와 S_F 와 S_L 집단에서의 감염전파율 감소를 나타내는

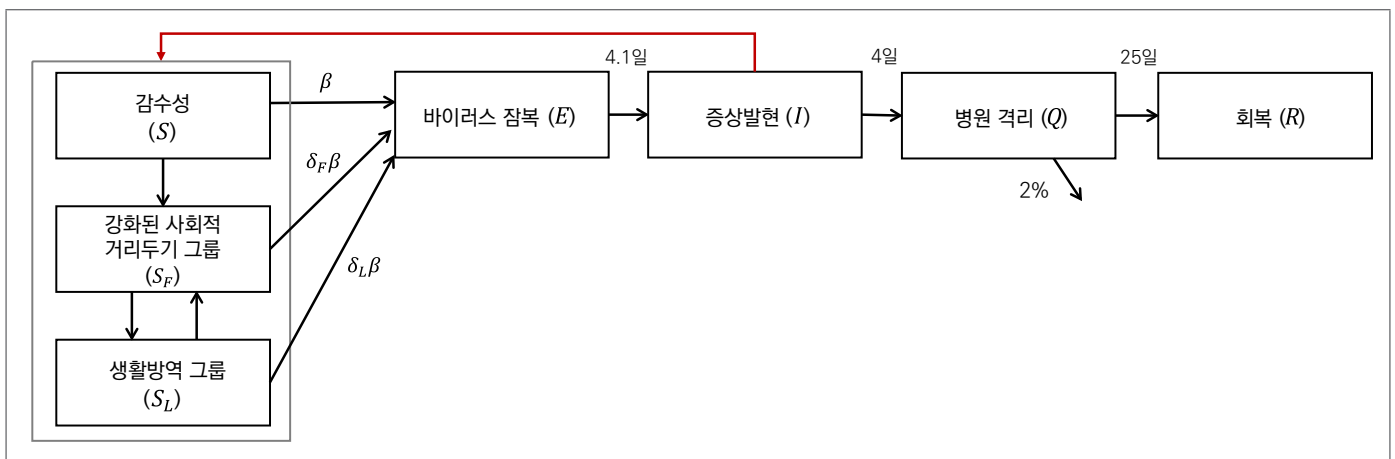


그림 5. 코로나바이러스감염증-19 전파모델(행동변화를 고려한 SEIQR)

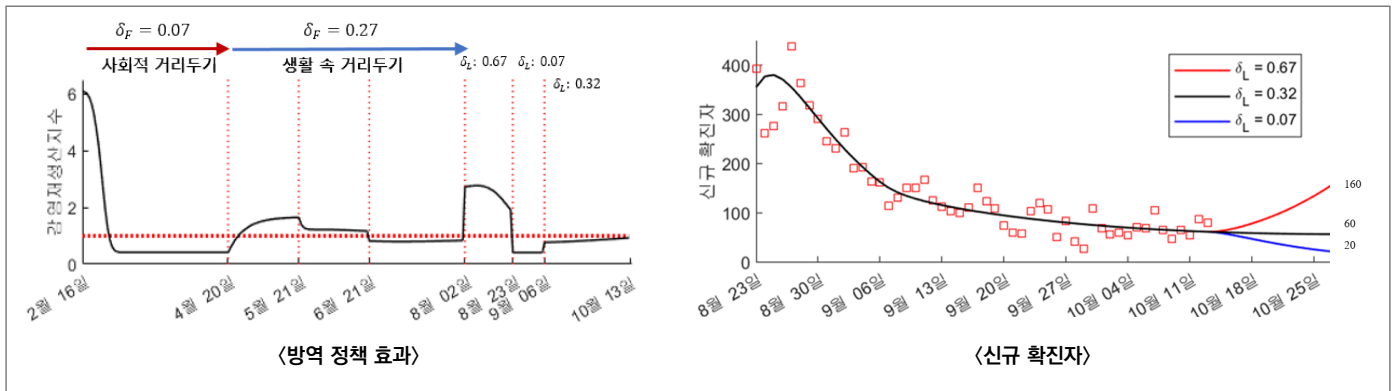


그림 6. 행동변화를 고려한 코로나19 단기 예측

모수이다. 예를 들어, 사회적 거리두기 기간 동안 $\delta_F=0.07$ 이 의미하는 것은 코로나19 초기 상태(2월 16일)에 밀접접촉자수가 하루 평균 100명인 사람이 사회적 거리두기 기간 동안 평균 7명 정도를 만난다는 것을 의미한다.

행동변화를 고려한 코로나19 수리모델링은 감염재생산지수 추정 및 유행 예측 뿐 아니라 확진자 발생 추이에 따른 국민들의 행동변화 수준을 수치적으로 분석하여 방역정책에 과학적 근거를 제시하고 있다.

행동변화를 고려한 코로나19 감염 전파 수리모델링 결과, 생활방역 행동변화(대인 접촉 변화)에 따라 10월 27일 기준 일일 신규환자 최소 20명(거리두기 강화 수준, 접촉율 7%)에서 최대 160명(코로나19 재확산 시기수준, 접촉율 67%)이 발생 가능성이 있으며 현 상황 유지시 60명(접촉율 32%) 발생할 것으로 예측하였다(그림 6). 이에 따른 격리치료 환자 수는 최소 1,910명에서 최대 2,570명으로 예측되었다.

단기 예측 결과, 현 상황 유지 시 10월 말까지 약 50~60명의 코로나19 환자가 지속적으로 발생할 것으로 추정하였다.

① 이전에 알려진 내용은?

수학적 분석 통해 감염병 발생 예측함으로써 정책효과를 파악하고 즉시 필요한 조치 및 필요자원 추계의 근거 마련이 가능하다.

② 새로이 알게 된 내용은?

사회적 거리두기 등 정부의 강력한 방역 정책에 따라 코로나바이러스감염증-19 전파 속도는 감소하였으나, 현 상황 유지 시 10월 말까지 약 50~60명의 환자가 지속적으로 발생할 것으로 예측되었다.

③ 시사점은?

감염병 전파 차단을 위해 정부의 적극적 방역 정책과 더불어 올바른 손씻기 및 마스크 착용 등 개인의 행동변화의 중요성을 확인할 수 있다. 향후 생활방역 등 코로나19 방역 조치가 전환 되더라도 지속적인 예방수칙 홍보와 교육이 필요할 것이다.

맺는 말

본 연구에서는 수리모델에 기반하여 사회적 거리두기 단계 적용에 따른 전파속도 변화 및 발생추이 파악하고 단기 예측을 통해 격리 치료 병상 등 의료자원 대비에 근거를 마련하고자 하였다. 현재 코로나19 전파 속도는 사회적 거리두기 2단계 시행 이후 급격히 감소하였고, 기간별 감염재생산지수 및 행동변화를 고려한 코로나19

참고문헌

1. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. <https://covid19.who.int/>
2. World Health Organization. (2003). Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS). World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/70863>
3. WHO MERS-CoV Global Summary and Assessment of Risk, August 2018 (WHO/MERS/RA/August18). Geneva, Switzerland: World Health Organization; 2018. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
4. Kim SY, *et al.* School Opening Delay Effect on Transmission Dynamics of Coronavirus Disease 2019 in Korea: Based on Mathematical Modeling and Simulation Study. J Korean Med Sci. 2020 Apr 6;35(13):e143.
5. Kim SY, *et al.* Risk estimation of the SARS-CoV-2 acute respiratory disease outbreak outside China. Theoretical Biology and Medical Modelling (2020) 17:9.
6. Kim SY, *et al.* Prediction of COVID-19 transmission dynamics using a mathematical model considering behavior changes in Korea. Epidemiol Health 2020;42:e2020026.

Abstract

COVID-19 2020 Forecasts in South Korea Using Mathematical Modeling of Infectious Diseases

Baek Soojin, Kim Yeonju, Kwon Donghyok

Division of Public Health Emergency Response Research, Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA)

Ko Youngsuk, Lee Jongmin, Jung Eunok

Department of Mathematics, Konkuk University

The outbreak of Coronavirus Infectious Disease-19 (COVID-19) in South Korea began on January 20, 2020 with a confirmed imported case from Wuhan, China. Following that, the first reported local outbreak of COVID-19 on February 16, 2020 was attributed to a mass gathering at a religious facility. Despite serving as an early warning that failing to practice social distancing and self-isolation would have grave consequences, cluster cases continued to occur in facilities such as medical institutions, sports facilities and call centers.

The aim of this study was to model the spread of COVID-19 to local communities and to predict the scale of the outbreak using the susceptible-exposed-infected-quarantined-recovered (SEIQR) epidemic model. The results indicated that the rate of transmission (i.e., the reproduction number) varied according to the social distancing level (South Korea implemented a three-level social distancing scheme on June 28, 2020) (see Figure 1), and increased due to major local cluster outbreaks, but significantly decreased after level 2 social distancing was implemented on August 23, 2020. Furthermore, the study found that on October 7, 2020 the infectious reproduction number was 0.92, which is a state of decreasing infectious disease prevalence. Based on this study's epidemic modeling prediction, If the current reproduction number (0.88) is maintained, 50 to 60 new confirmed cases will continue to occur per day until October 27. Therefore, this study recommended that active quarantine measures and thorough health and hygiene management be maintained (e.g., a combination of masks, hand-washing, and social distancing).

Keywords : COVID-19, Mathematical modeling, Behavior change, Model forecast, Model prediction

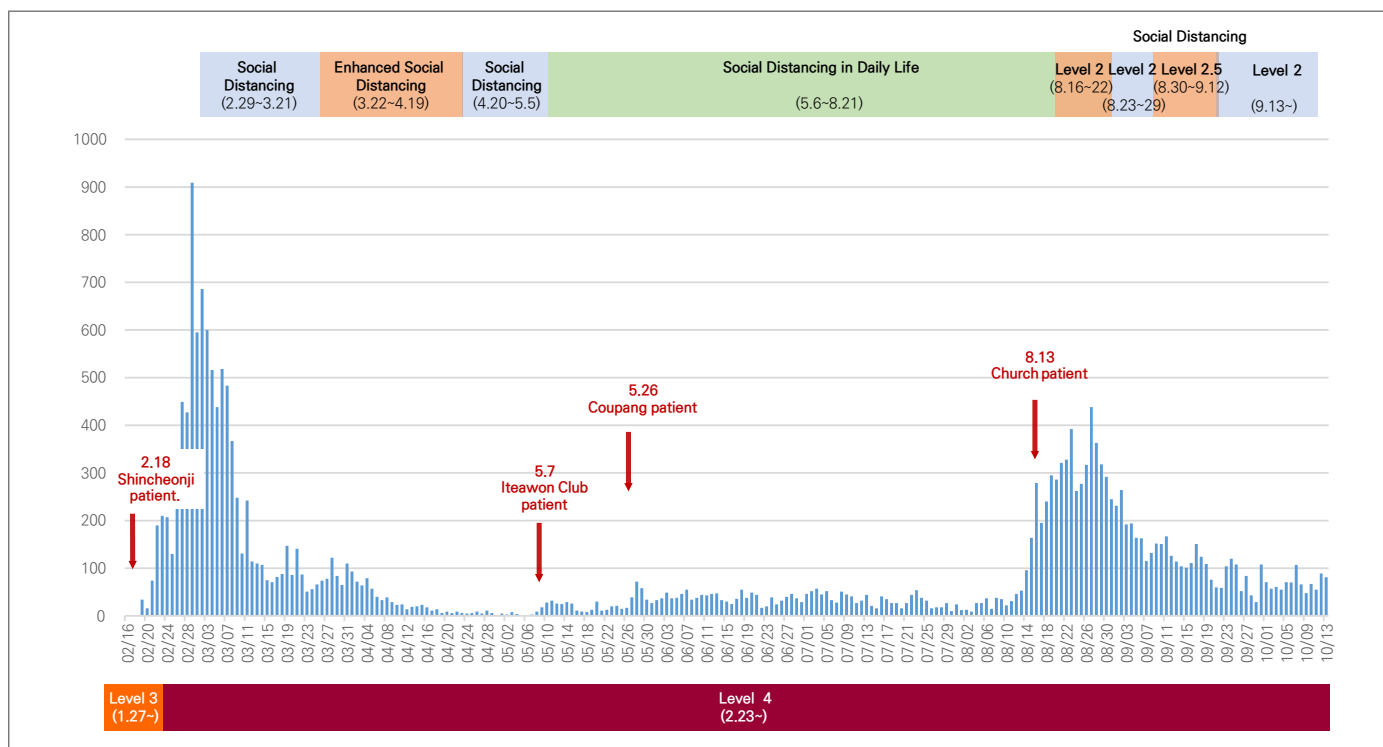


Figure 1. Daily confirmed COVID-19 cases excluding imported cases in Korea

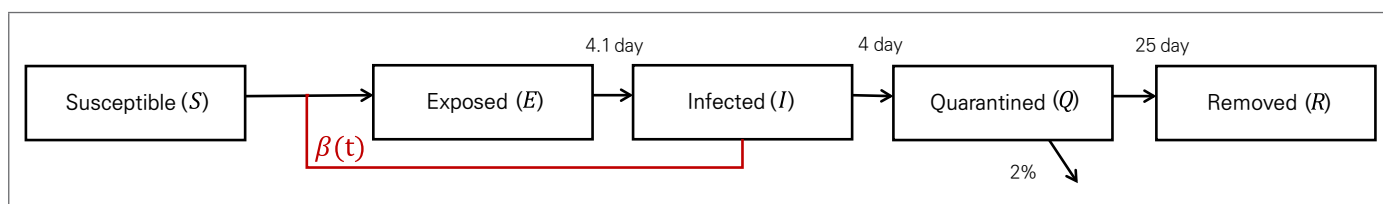


Figure 2. Flow diagram of COVID-19 transmission dynamics (SEIQR)

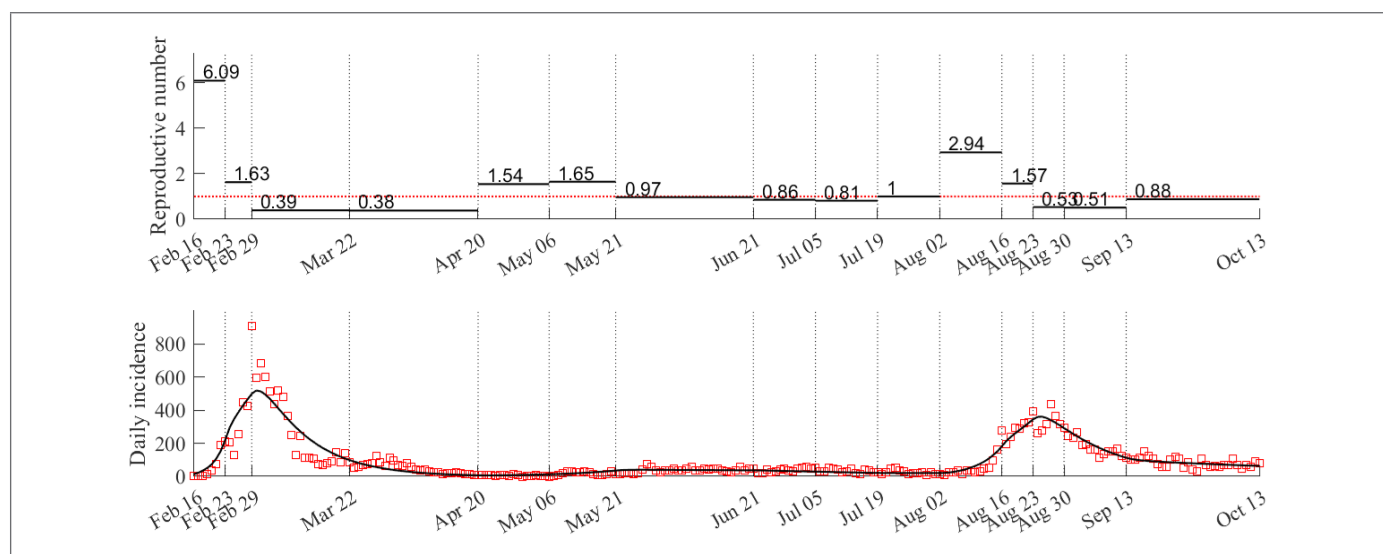


Figure 3. Effective reproduction number of COVID-19 in Korea

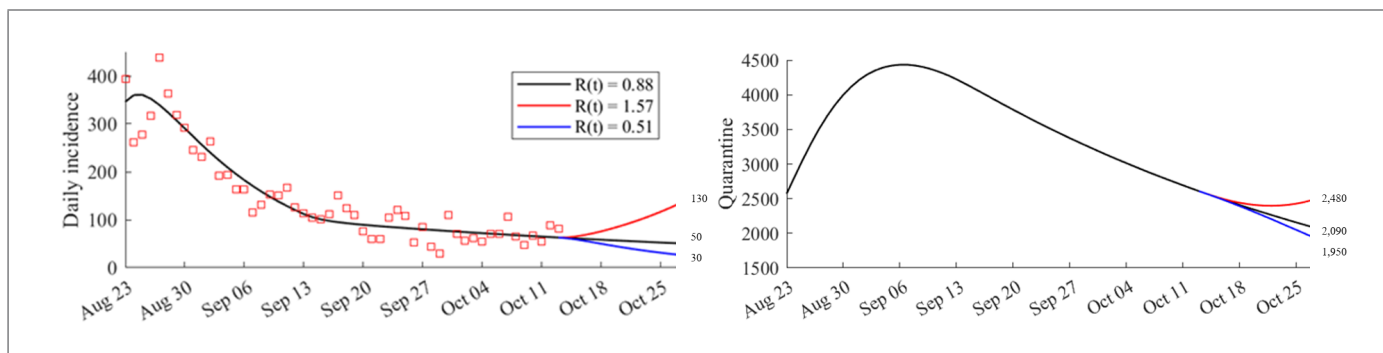


Figure 4. Forecasts of daily cases and quarantine cases of COVID-19 in Korea applying various reproduction number

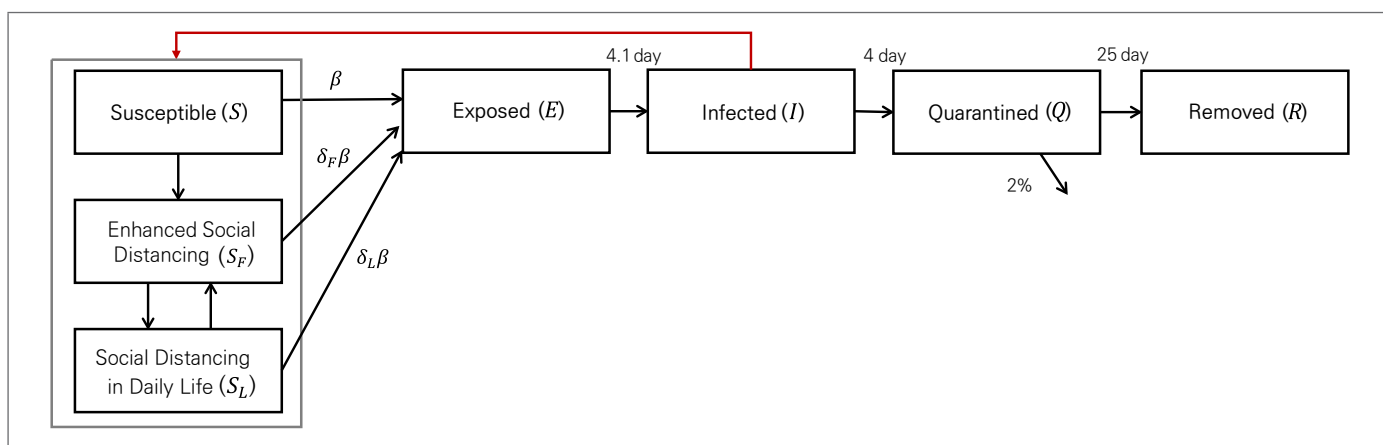


Figure 5. Flow diagram of COVID-19 transmission dynamics (Behavior changed SEIQR)

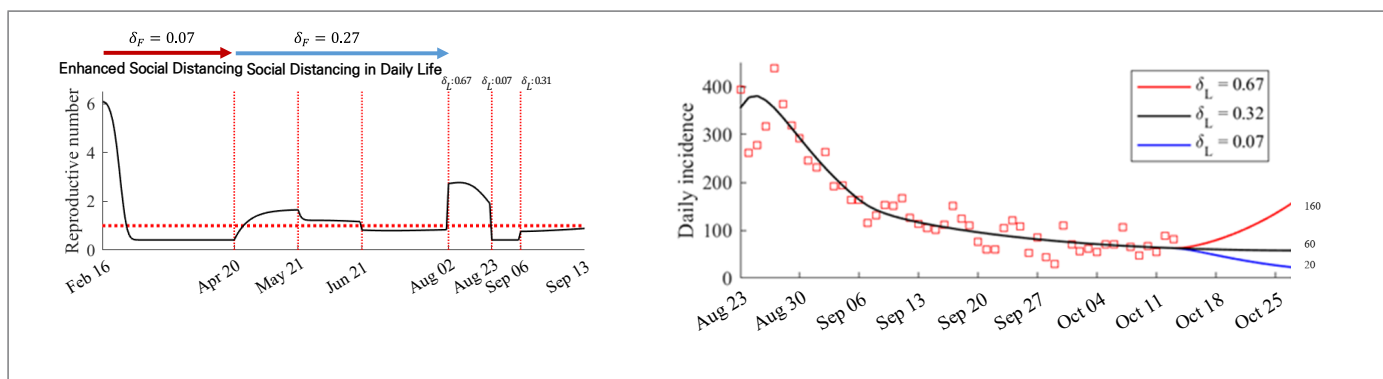


Figure 6. Forecasts of daily cases of COVID-19 in Korea applying various level of behavior changes