

코로나19 백신접종이 사회적 거리두기 효과에 미치는 영향분석

문수찬

대전대학교 한의과대학 침구학교실 대학원생

The Effect Analysis of COVID-19 vaccination on social distancing

Su Chan Moon

Graduate Student, Dept of Acupuncture & Moxibustion Medicine, College of Korean Medicine, Daejeon University

요약 이 연구의 목적은 현재 운영되고 있는 코로나19 예방을 위한 거리두기 체계의 과학적 근거 보완으로 적절한 관리방안을 제시하고자 함이다. 현재의 수리 모델들은 연립 상미분방정식으로 표현되어 소상공인이나 영세업자들의 출입자 관리에 사용하기는 어려운 문제가 있다. 본 고에서는 이러한 점을 보완하기 위하여 집합 공간에 주어지는 허용위험도와 기초감염재생산지수, 백신접종에 의한 위험도 감소율을 고려하여 집합하는 사람들에 의한 감염위험도를 정량적으로 표현하는 방법을 제시하였다. 백신접종 상황(미접종, 1차 접종, 완전 접종)에 따른 감염 위험성 정도와 바이러스의 유행상황을 함께 고려하여 방문자의 집합에 따른 감염자 발생 가능성을 확률론적인 차원에서 관리하는 간단한 정량적 모델을 개발하였다. 모델을 사용하여 주어진 예에서 20%의 미접종자가 완전 접종으로 전환될 경우 위험도는 55% 수준으로 감소되는 것을 보였고, 기초감염재생산지수와 백신접종에 의한 감염위험도 감소 개선 효과를 비교하여 의학적인 관리보다 방역 측면에서의 관리가 더 큰 효과를 얻을 수 있다는 점을 제시하였다. 이를 바탕으로 백신의 종류와 확진자 발생 정도를 고려한 다양한 상황에서 적용할 수 있는 일반화 모델도 제시하였다. 이 모델을 적용하면 백신의 종류, 접종 정도, 접종 후 시간 경과에 따른 실시간 개인별 위험도를 산출할 수 있고, 이를 통해 주어진 공간의 집합 인원수에 따른 위험도 관리에 이용할 수 있다.

주제어 : 코로나19, 백신접종, 영향분석, 수리 모델, 사회적 거리두기

Abstract The purpose of this study is to present an appropriate management plan as a supplement to the scientific evidence of the currently operated distancing system for preventing COVID-19. The currently being used mathematical models are expressed as simultaneous ordinary differential equations, there is a problem in that it is difficult to use them for the management of entry and exit of small business owners. In order to supplement this point, in this paper, a method for quantitatively expressing the risk of infection by people who gather is presented in consideration of the allowable risk given to the gathering space, the basic infection reproduction index, and the risk reduction rate due to vaccination. A simple quantitative model was developed that manages the probability of infection in a probabilistic level according to a set of visitors by considering both the degree of infection risk according to the vaccination status (non-vaccinated, primary inoculation, and complete vaccination) and the epidemic status of the virus. In a given example using the model, the risk was reduced to 55% when 20% of non-vaccinated people were converted to full vaccination. It was suggested that management in terms of quarantine can obtain a greater effect than medical treatment. Based on this, a generalized model that can be applied to various situations in consideration of the type of vaccination and the degree of occurrence of confirmed cases was also presented. This model can be used to manage the total risk of people gathered at a certain space in a real time, by calculating individual risk according to the type of vaccine, the degree of inoculation, and the lapse of time after inoculation.

Key Words : COVID-19, Vaccination, Impact Analysis, Mathematical Model, Social Distancing

*Corresponding Author : Su Chan Moon(chjoo1@naver.com)

1. 서론

2019년 말에 발생한 코로나19로 인하여 우리나라는 22개월 동안 4차례 대유행을 겪으면서도 개방성, 투명성, 민주성을 유지하는 방법으로 대체로 무난하게 대응하였다는 평가를 받고 있다[1]. 미국의 CDC(Centers for Disease Control and Prevention)에 의하면 코로나19는 감염자가 방출하는 작은 입자나 비말 또는 바이러스가 묻은 물체 표면에 손, 눈, 코, 입 등 신체 일부가 접촉할 때 전파되는 것으로 알려져 있다. 따라서 코로나19의 전파를 막는 방법으로 ①접촉을 최소화하는 사회적 거리두기, ②백신접종으로 저항력 향상하기, ③확진자의 증상개선을 위한 치료제 보급을 들 수 있다. 이러한 방법들은 상호보완적인 관계로서 모두 병행 또는 동시 적용이 이루어지고 있다. 그중에서 특히 ①사회적 거리두기는 백신이나 치료제와 같이 시간이 필요한 방법보다 우선적으로 적용될 수 있는 방법이다. 사회적 거리두기를 실행하는 주체는 국민 전체이므로 보다 명확하게 객관적인 근거를 바탕으로 기준을 제시하고, 쉽게 이해할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 사회적 거리두기(Social Distancing)란 감염 관리 중 하나이며, 사회적 거리두기의 목표는 감염이 된 사람과 감염되지 않은 사람 사이의 접촉 가능성을 감소시켜 질병의 전파를 늦추고 궁극적으로 사망률을 최소화하는 것이다. 개인과 개인의 접촉을 최소화하는 규모부터 고위험군과 저위험군 인구집단을 분리시키는 방법까지 다양한 층위의 방식이 존재한다. 우리나라는 3단계 관리(2020.06.28 ~ 2020.11.06.)와 5단계 관리(2020.11.07 ~ 2021.07.11)를 거쳐 4단계 관리(2021.07.01. ~ 2021.10.31)를 하다가 단계적 일상 회복 단계를 시행하게 되었다. 단계적 일상 회복 단계에서는 운영시간, 사적 모임 인원 제한, 취식, 공간 크기, 백신접종 여부 등에 따라 집합 인원이 결정되도록 하였다. 사회적 거리두기의 단계는 확진자와 중증 환자, 사망자 등의 발생상황에 따라 탄력적으로 관리하며 확진자 발생은 수리 모델을 활용하여 사전 예측을 하고 있다.

현재까지 개발된 수리 모델들은 국가 전체 또는 특정 집단을 대상으로 각종 대응책들의 영향분석과 확진자 발생, 중증 환자 진행예측 등에 활용되고 있지만, 대부분 복잡한 수학(상미분방정식)을 바탕으로 하고 있어 소상공인들을 대상으로 적용할 수 있는 거리두기 관리방안으로 활용하기가 어려운 실정이다.

우리나라는 코로나19 대응 과정에서 백신 확보와 조

기 접종이 다소 늦었음에도 불구하고 확진자 발생이 안정적으로 관리되고 있는 것은 사회적 거리두기에 적극적으로 협조하고 있는 국민들의 높은 의식 수준이 가장 큰 원인이다. 그러나 장기간 지속되고 있는 사회적 거리두기로 인하여 자영업자와 소상공인의 영업 피해, 학생들의 학습손실 등 사회 각 분야에서 피로감이 누적되는 현상이 나타나고 있다.

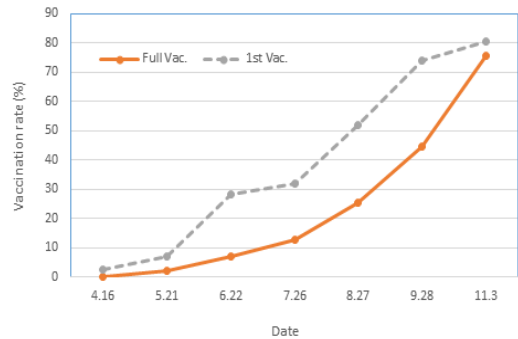


Fig. 1. Cumulative vaccination in Korea(2021.11)

방역 당국에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 백신접종이 2021년 4월 접종을 시작한 이래로 11월 현재 전국 1차 접종 80.4%(42,269,453), 완전 접종 75.7% (38,895,232) 까지 높아지고 있는 상황을 감안하여 2021년 11월부터 단계적 일상 회복 계획을 발표하였다[2].

단계적 일상 회복 이행계획은 기존의 확진자 억제를 위한 보편적 규제에서 벗어나 중증, 사망 발생 억제를 목적으로 접종 완료자를 최대한 늘리고 미접종자 및 취약계층으로의 전파 차단을 핵심 내용으로 하고 있다. 실내외 마스크 착용, 전자출입명부(QR코드)인증 등 일상 속의 실천을 강화하는 것은 변함이 없지만 자영업자들에게 많은 영향[3]을 주는 사회적 거리두기와 시간제한은 완화되었다. 이상과 같은 방역 대책들은 그동안 발생한 확진자와 중증 및 사망자 숫자 추이를 감안하여 방역 당국에서 결정, 발표를 하고 있으나 국민들의 입장에서 어떠한 기준과 과정을 거쳐서 이렇게 결정되는지에 대한 궁금증을 가지지 않을 수 없다. 더욱이 이러한 결정이 객관적인 과학적 기준에서 이루어지는지, 백신접종을 함으로써 어느 정도 완화된 기준으로 전환될지에 대한 의문이 해소되기를 기대하고 있다. 따라서 집합도가 높은 대학 강의실[4]과 기숙사[5]에서 이루어지는 실습수업[6]과 비대면 수업[7]의 영향에 대한 연구가 진행되기도

하였고, 코로나 이후의 인재 양성[8]에 대한 검토도 이루어지고 있다. 이러한 의문에 대한 설명 또는 해답이 주어질 때 더 적극적인 국민적 협조를 얻어내어 코로나 19를 슬기롭게 극복할 것이다[9]. 본 고에서는 기존의 거리두기 기준 설정 방식에서 백신접종에 의한 효과를 감안한 확률론적인 개념이 추가되었을 때 더 큰 효과를 거둘 수 있음을 보여주고자 한다.

2. 선행연구(수리 모델)

2.1 SIR 모델

SIR(Susceptible-Infectious-Recovered) 모델은 1927년 영국의 Kermack and McKendrick[10]이 제안한 상미분방정식 형태의 수리 모델로서 감염병 수리 모델의 원형이라 볼 수 있다. 감염병 수리 모델의 구축은 인구 집단을 감염병 노출 또는 전염 상황에 따라 구분하는 것으로 시작되는데, 코로나19의 경우는 감수성(Suceptible, S), 바이러스 노출(Exposed, E), 감염전파(Infectious, I), 격리 치료(Quarantine, Q), 회복(Recovered, R)으로 나눌 수 있다(SEIQR 모델). 격리 치료는 확진 판정 후 격리되어 감염전파력을 상실한다고 가정하며, 격리 치료 후 일정 비율의 환자는 사망한다고 하고 가정한다. 이와 같은 논리를 바탕으로 구성된 SEIQR 모델의 수리 모델 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

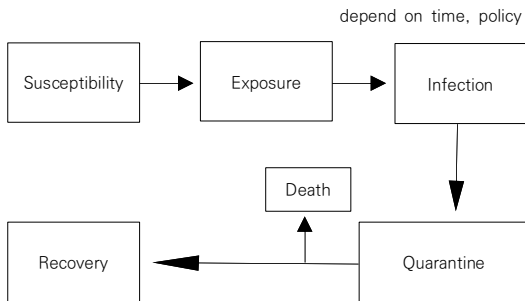


Fig. 2. COVID-19 Math. Model Flow Diagram

모델을 구성하는 모수 중에 감염 증상발현부터 격리까지 소요되는 기간, 바이러스 노출자가 전염성을 가지는데 소요되는 기간, 격리 치료자의 회복 기간은 역학적 분석을 통하여 평균 기간으로 추정하고 감염전파율과 같이 역학적 자료가 없는 모수는 최소자승법(Least Square Mean)을 사용하여 역으로 추정한다. 기초감염재생산지수는 감염전파율 × 평균 감염 기간으로 나타낼 수 있다. 신종 감

염병이 발생하면 사회적 거리두기, 개인위생, 확진자 격리 등의 대응이 진행되기 때문에 감염전파율이나 평균 감염 기간이 변할 수 있다. 코로나19 역시 대응에 따른 변화가 있으므로 이에 맞추어 SEIQR 수리 모델을 구성하여 정책 구간별로 감염전파율과 감염재생산지수를 계산할 수 있으므로 이를 사용하여 단기 유행예측이 가능하다.

2.2 행동 변화를 고려한 코로나19 수리 모델

코로나19가 확산되는 상황에서 백신이나 치료제 외에 마스크 착용, 손 씻기, 거리두기, 집합 금지 등 행동에 다양한 변화가 유발되었다. 이러한 변화를 수리 모델에 반영하기 위해 감수성 집단을 강화된 사회적 거리두기(S_H), 생활속 거리두기 그룹(S_L)으로 나누어 고려하였다. 감염병의 확산이 심해지면 강화된 사회적 거리두기 그룹을 제외한 감수성 그룹의 사람들은 강화된 사회적 거리두기 그룹으로 이동한다고 가정하였다. 강화된 사회적 거리두기 그룹 중에서 강화된 행동 수준을 지속할 수 없는 사람들은 생활영역 그룹으로 이동하고 반대의 경우도 성립하는 것으로 가정하였다.

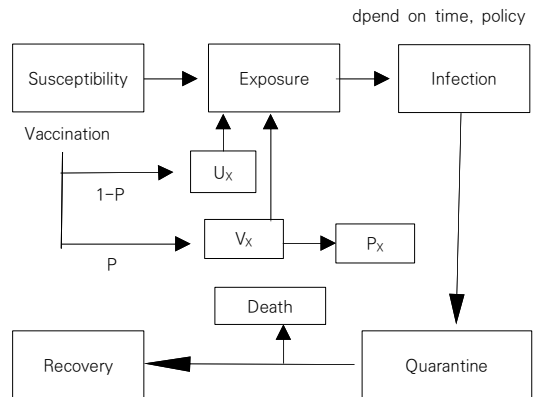


Fig. 3. Flow Diagram of COVID-19 Math. Model Considering Behavior Changes

이 모델의 경우, 감염전파율뿐만 아니라 추가적으로 두 가지 행동 변화율과 행동 변화 그룹들의 감염전파 감소를 추정한다. 이 과정에서 두 가지 행동 변화율은 하나의 역학 현상을 나타내지만 상호 역의 관계에 있는 모수이기 때문에 전문가의 자문으로 한 가지 모수를 가정하게 된다. 행동 변화를 고려한 코로나19 수리 모델은 유행의 예측뿐만 아니라 사회적 거리두기 방역 정책으로 인한 사람들의 행동 변화 강도와 속도가 모델의 변수에 포함되어 있으므로 사회적 거리두기의 효과분석이 가능하다[11].

2.3 집단이질성을 고려한 코로나19 수리 모델

집단별로 감염전파 이질성이 있는 경우를 고려하기 위하여 SEIQR 코로나19 수리 모델의 인구집단을 수리 확률적인 방법인 최대 우도 추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)에 의하여 4가지 그룹으로 구분하였다. 각 그룹의 구분에는 질병관리청이 제공하는 코로나19 확진자의 개별 감염정보(연령, 감염추정일, 증상발현일, 진단일)를 사용하였고 각 그룹 간 감염전파 매트릭스를 구축하였다. 각 그룹 내에서 감염된 구성원과 감염되지 않은 구성원으로 나누고 일정 시간까지 다른 사람에게 감염시킬 확률을 구하였다. 또한 그룹 간에도 일정 시간까지 감염전파 확률을 구하였다[12].

2.4 백신접종을 고려한 코로나19 수리 모델

집단별 이질성에 백신접종 상태를 추가하여 코로나19 수리 모델을 수립하면 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다.

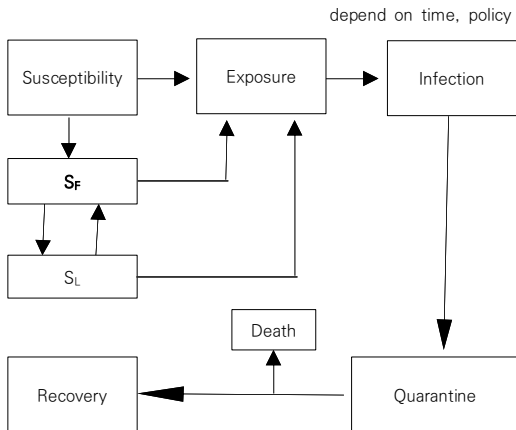


Fig. 4. Flow Diagram of COVID-19 Math. Model Considering Vaccination

백신접종이 되었지만 백신의 효과가 생기지 않은 그룹(U_X), 백신접종이 되었으며 백신의 효과가 나타나지만 아직 면역을 갖추지 못한 그룹(V_X), 접종 후 일정 시기가 지나 면역을 지니게 된 그룹(P_X)으로 구분할 때 백신 효용성을 P 라고 하였다. 각 그룹별로 바이러스에 노출되는 정도가 다르다는 전제를 가지고 계산을 한다.

2.5 중증도를 고려한 코로나19 수리 모델

앞에서 다룬 수리 모델들은 감수성에서 감염전파까지의 경로를 다양하게 검토한 것이라면 이번 모델은 감염과

회복 사이에서 다양한 경우를 고려한 수리 모델이라 할 수 있다. 중증도를 고려한 코로나19 수리 모델은 SEIQR 모델에서 확진 후 격리된 그룹인 Q 를 중증도로 구분하여 무증상, 임상 중증도 1, 2를 경증(Q_1), 임상 중증도 3, 4를 중증(Q_2), 임상 중증도 5, 6, 7을 위중(Q_3)으로 분류하였다. 각 격리 치료 집단 간의 이동은 없다고 가정하고 감염전파자는 각 중증도로 진행될 확률에 따라 세 집단으로 이동된다고 가정하였다. 격리 치료 환자들 중에서 무증상이나 경증의 경우는 위중증 환자 대비하여 상대적으로 빠르게 격리 해제되므로 위중증 환자의 비율은 각 중증도별 격리 기간으로 보정하여 위중증으로의 진행확률을 추정하였다. 이 모델을 이용하여 환자 한 명당 필요한 개인보호구 필요량의 범위를 계산한다.

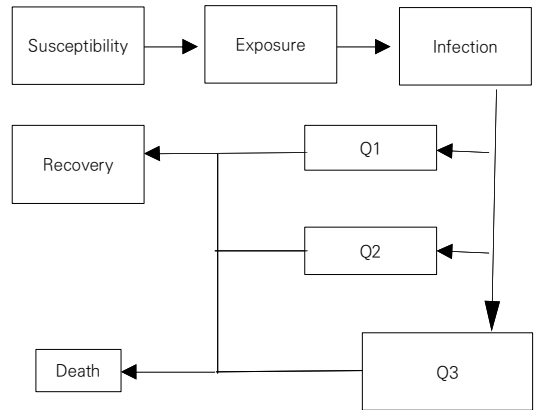


Fig. 5. Flow Diagram of COVID-19 Math. Model Considering Severity

3. 연구 방법

코로나의 감염은 바이러스를 가진 사람과 그러지 않은 사람의 접촉으로 이루어진다. 물론 엘리베이터, 손잡이, 테이블과 같은 시설물을 중간 매개체로 하여 감염이 이루어지는 경우도 있지만 시설물 관리가 철저히 이루어진다는 전제에서 사람 간의 접촉에 의한 직접 감염을 대상으로 하였다.

본 연구는 현재와 같이 백신접종 여부에 따라 yes or no로 판정하는 백신 패스 방법이 차별의 문제뿐만 아니라 해당 공간의 수용 규모와 무관하게 운영된다는 문제점을 개선하기 위하여 해당 공간의 허용위험도와 집합 인원의 감염위험도를 상호 연관 지어 결정하는 방법을 개발하였다.

사람들이 집합하는 공간의 허용 정도는 확진 환자 발

생상황에 따라 정부의 정책으로 결정하고, 주어진 공간에 집합하는 사람들 간의 감염위험도는 상호 접촉할 수 있는 경우의 수와 각자의 감염위험도(백신접종 상황에 따른 개별 위험도에 차등을 둠)를 곱하고 이들의 총합을 허용위험도와 비교하는 방법으로 진행하였다.

본 연구는 Fig. 4에 제시한 백신접종을 고려한 코로나 19 수리 모델에서 백신의 접종상황에 따라 확진자로 진행되는 비율이 달라진다는 점은 비슷하지만 방역 당국에서 주어지는 임상 결과 자료가 아니라 사전 예측이 가능한 방식을 제시한다는 점이 차이점이다.

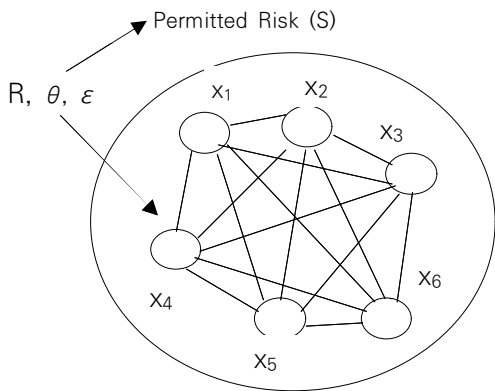


Fig. 6. Risk comparison between commision and gathering

즉, 백신 효율성을 각자의 백신접종 이력에 따라 부여하고 이를 바탕으로 감염위험도를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 2021년 7월 1일부터 2021년 10월 31일 사이에 있었던 4단계 관리가 종료되고 단계적 일상회복 단계로 전환되는 시점에서 그동안 발표된 기초감염재생산지수(R = 1.2), 백신접종으로 인한 감염 예방효과(1차 $\theta = 0.5$, 2차 $\epsilon = 0.3$) 등을 종합적으로 감안하여 평균치에 가까운 수치를 활용하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 집합 공간과 집합자의 위험도

집합 공간의 성격에 따라 단위 면적당 허용되는 위험도를 먼저 설정하고 전체 면적을 곱하여 해당 공간에 허용되는 위험도(S)를 먼저 설정한다. 그리고 해당 공간에 집합하는 사람들의 숫자와 백신접종 상태에 따른 위험도를 종합적으로 고려한 감염위험도(T)를 비교하여 $S > T$ 한도 내에

서 운영될 수 있도록 한다면 백신 미접종자에 대한 차별 시비를 완화할 수 있다. 집합 금지와 거리두기가 장기화됨에 따라 관광[13]과 같은 일상의 활동이 제한되어 정신건강과 수면[14]에 불안을 야기하는 경우가 잦아지고 있다 [15]. 이에 따라 코로나에 관한 전반적인 국가융합 R&D 기획[16]이 진행되고 그동안의 연구논문에 대한 분석[17]이 보고되고 있다. 이러한 다양한 연구 및 임상 결과를 바탕으로 방역 당국이 결정한 단계적 일상 회복 이행계획에 의하면 Table 1과 같은 현재의 거리두기 관리지침에서 시설별 인원 기준을 최소화(4㎡, 정원 50%)로 통합 관리하는 안을 제시하였다[18].

Table 1. Social distancing guideline up to now

Item	Present(㎡/Seat/ %)
·Amusement	step 1 : 8㎡, step 2-3 : 10㎡
·Restaurant, Caffe	step 1 : 6㎡당, step 2-4 : 8㎡
·Public bath	step 1 : 6㎡, step 2-4 : 8㎡
·Indoor sports	step 1 : 6㎡, step 2-4 : 8㎡
·Cinema	step 1 : -, step 2-4 : 1seat vacant
·Institute	step 3-4 : 2 seat vacant or 1person/6㎡
·Religion	step 1 : 50%, step 2 : 30%, step 3 : 20%, step 4 : 10%
·Museum	step 3-4 : 30-50% of 1person/6㎡

이러한 지침을 바탕으로 단위 면적당 허용위험도가 α (/㎡)인 공간의 면적이 A (㎡)인 경우에 해당 공간의 허용위험도는 S라고 할 수 있다.

$$S = \alpha (/m^2) \times A (m^2) \tag{1}$$

감염은 두 사람의 접촉으로 인하여 발생하는 것으로 한정하고 해당 공간에 모인 집합자의 백신접종 상황을 미접종자, 1차 접종자, 완전 접종자로 나누어 각각에 대한 감염위험도를 부여한다. 전체 집합자의 수가 N명이고 백신 미접종자가 M명, 1차 접종자가 P명, 완전 접종자가 Q명이라고 할 때 미접종자로 인한 기초감염재생산지수 (R, Basic reproduction number), 1차 접종에 의한 감소 효과(θ), 완전 접종에 의한 감소 효과(ϵ)로 표시하면 각각의 경우에 대한 기초감염재생산지수는 R, θR , ϵR 로 표시되

고 두 사람 사이의 접촉에 의한 감염위험도는 아래의 Table 2와 같이 계산된다.

각 case별 감염위험도는 만나는 두 사람의 각각 해당하는 재생산지수의 곱으로 표현될 수 있다. 즉, 백신 미접종자와 백신 미접종자 간의 만남인 경우에는 백신 미접종자가 지니는 재생산지수 R의 곱인 $R \times R = R^2$ 으로 나타낼 수 있으며 백신 미접종자의 전체 수(M)에서 2명을 선택하는 경우의 수는 ${}_M C_2$ 이므로 해당 case의 감염위험도는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

Table 2. Infectious risk according to vaccination

Case	MM	PP	QQ	MP	MQ	PQ
r^*	R^2	$\theta^2 R^2$	$\epsilon^2 R^2$	θR^2	ϵR^2	$\epsilon \theta R^2$
#	MC2	PC2	QC2	M×P	M×Q	P×Q
T**	MC2 × R ²	PC2 × θ ² R ²	QC2 × ε ² R ²	M×P × θ R ²	M×Q × ε R ²	P×Q × ε θ R ²

* Reproduction number

** Infectious risk

Number

$$T_{MM} = {}_M C_2 \times R^2 \tag{2}$$

$${}_M C_2 = \frac{M!}{(M-2)!2!} = \frac{M(M-1) \cdots 2 \cdot 1}{(M-2)(M-1) \cdots 1 \cdot 2} = \frac{M(M-1)}{2} \tag{3}$$

6가지 case에 대하여 마찬가지로의 방법으로 각각에 대한 감염위험도를 계산하고 모든 case의 감염위험도를 합한 값이 해당 공간에 집합한 사람들로 인하여 발생할 수 있는 감염위험도의 총합(T)이다. 이 값이 해당 공간에 허용된 위험도(S)를 넘지 않도록 관리하여야 할 것이다.

$$T = {}_M C_2 \times R^2 + {}_P C_2 \times \theta^2 R^2 + {}_Q C_2 \times \epsilon^2 R^2 + M \times P \times \theta R^2 + M \times Q \times \epsilon R^2 + P \times Q \times \epsilon \theta R^2 \tag{4}$$

상기와 같은 방법으로 감염위험도의 합(T)이 허용위험도를 넘지 않도록 거리두기 기준을 설정하고 관리하는 것은 나름대로 과학적인 근거와 논리를 바탕으로 하고 있으므로 국민들의 협조와 이해를 구하기가 용이해진다. 또한 백신 접종자가 많을수록 집합 허용 인원이 증가하므로 백신접종을 장려하는 효과도 거둘 수 있다[19].

계산 식 (4)에서 ϵ, θ, R 은 백신 공급사 또는 방역 당국에

서 광범위한 임상자료를 바탕으로 제공하는 수치이며 해당 공간의 집합자 중에서 백신접종 상황에 대한 인원수 M, N, P, Q는 사업장에서 확인할 사항이다. 이를 바탕으로 새롭게 입장하는 인원이 입구에서 자신의 백신접종 상황에 맞는 정보를 입력함과 동시에 입장 가능 여부를 판단할 수 있도록 간단한 프로그램을 개발, 보급한다면 자영업자와 소상공인의 관점에서 자율적인 방역관리가 가능할 것이다.

4.2 백신접종 효과 예측

기초감염재생산지수와 백신접종에 의한 감소 효과들은 확진자 발생상황과 백신의 종류에 따라 다르지만 그동안 발표된 자료들을 바탕으로 다음과 조건에서 비교하였다[20].

$$R = 1.2$$

$$\theta = 0.5$$

$$\epsilon = 0.3$$

$$\text{Case 1 : } N = 10, M = 2, P = 5, Q = 3$$

$$\text{Case 1 : } N = 10, M = 0, P = 5, Q = 5$$

한 예로 10명이 모여 있는 공간에서 미접종자 2명, 1차 접종자 5명, 2차 접종자 3명인 Case 1과 10명 중 2명 즉, 20%의 인원이 미접종 → 1차 접종 → 완전 접종으로 순차 전환된 Case 2를 비교하여 백신접종의 효과를 비교하였다[21].

Case 1과 Case 2의 차이는 미접종자의 20%가 완전 접종으로 전환된 것으로서 Case 1에서는 감염위험도가 18.43으로 새로운 확진자 수가 1.8배로 증가할 위험이 있다는 것을 의미한 반면 Case 2에서는 확진자 수가 현재 수준으로 유지됨을 알 수 있다. 즉, 주어진 조건에서 20%의 미접종자가 완전 접종으로 전환됨에 따라 신규 확진자의 발생위험이 약 55% 수준으로 감소되는 효과를 거둘 수 있다는 것으로 보여주고 있다.

Table 3. Comparison of the vaccination effect

Case	MM	PP	QQ	MP	MQ	PQ	Total
r	1.44	0.36	0.13	0.72	0.43	0.22	3.3
Case 1	#	1	10	3	10	6	15
	T	1.44	3.6	0.39	7.2	2.6	3.2
Case 2	#	0	10	10	0	0	25
	T	0	3.6	1.3	0	0	5.4

한편 20%의 미접종자가 완전 접종으로 전환되는 중간 과정에서 1차 접종 상태인 경우가 발생하는데 이때 감염위험도를 평가해 보면 감염위험도의 총합계 T가 12.57로

서 당초 18.43에 비하여 약 68.2% 수준으로 감소됨을 알 수 있다. 따라서 백신접종은 우선적으로 많은 사람들이 최소한 1차 접종이라도 맞을 수 있게 하는 것이 효과적이다.

4.3 변수의 영향분석

앞에서 예로 제시한 경우에 대하여 백신 미접종자가 완전 접종으로 20% 전환될 때 감염위험도가 약 55% 수준으로 감소된다는 것으로 보였다. 이외에도 변화될 수 있는 인자로 기초감염재생산지수의 개선($R = 1.2 \rightarrow 0.96$), 1차 접종에 의한 감염위험도 감소 효과의 개선($\theta = 0.5 \rightarrow 0.4$), 완전 접종에 의한 감염위험도 감소 효과의 개선($\epsilon = 0.3 \rightarrow 0.24$)에 대하여 각각 20% 개선되는 경우의 효과를 비교하였다.

방역 당국의 적절한 관리와 백신접종자의 증가로 기초감염재생산지수가 1.2에서 0.96으로 20% 개선되면, Table 4에서 보는 바와 같이 감염위험도가 개선 전에 비하여 64% 수준으로 낮아지는 것으로 나타났다. 이와 같은 감염위험도 감소 효과는 모든 접촉 형태에서 모두 효과를 보이는 것으로 알 수 있다. 즉, 기초감염재생산지수의 관리는 백신접종 여부와 관계없이 모든 경우의 접촉에 효과적임을 알 수 있다.

Table 4. Effect of basic reproduction number control

Case	MM	PP	QQ	MP	MQ	PQ	Total
#	1	10	3	10	6	15	45
0.8R	r	0.926	0.230	0.083	0.461	0.277	2.115
	T	0.926	2.304	0.249	4.608	1.659	2.073

한편 백신의 성능이 향상되어 백신접종으로 인한 감염 위험도 감소 효과가 1차 접종 및 완전 접종에서 각각 20% 개선되는 경우를 비교하여 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Effect of 1st and 2nd vaccination performance increase

Case	MM	PP	QQ	MP	MQ	PQ	Total
#	1	10	3	10	6	15	45
0.8 θ	r	1.44	0.23	0.13	0.576	0.432	2.981
	T	1.44	2.3	0.39	5.76	2.592	2.592
0.8 ϵ	r	1.44	0.36	0.083	0.72	0.346	3.122
	T	1.44	3.6	0.249	7.2	2.074	2.592

백신접종에 따르는 감염위험도 감소 효과에서 개선이 있기 전의 감염위험도를 100%로 하였을 때 20% 성능개선의 영향력은 감염위험도가 93.1%인 2차(완전) 접종의 경우보다 81.8%인 1차 접종의 경우가 더 큰 것으로 나타났다.

이상에서 살펴본 바에 의하면 백신 미접종자의 20%를 완전 접종자로 전환하는 것이 가장 효과적이며 다음으로 기초감염재생산지수를 20% 개선하는 것이 효과를 크게 볼 수 있는 것을 알 수 있다. 백신의 성능개선에 의하여 접종에 의한 감염위험도 감소 효과 개선은 앞에서의 2가지 방안에 비하면 상대적으로 낮은 효과를 얻고 있다.

여기서 알 수 있는 것은 백신이라는 의학적 수단을 개발, 개선하는 것보다 기초감염재생산지수와 백신 접종자 관리와 같은 방역 수단이 더 큰 효과를 얻을 수 있다는 점이다. 이러한 점은 UNIST[22]에서 연령별 모델을 기반으로 데이터를 활용하여 정책 구간별 감염재생산지수를 추정하고, 강화된 사회적 거리두기를 유지하는 것이 감염자 수를 줄이는 데 중요 요인임을 강조한 점과 일치한다.

4.4 사례의 일반화

현재까지 국내에 도입, 접종된 백신은 화이자, 모더나, 얀센, 아스트라제네카가 대부분이며 각각의 백신에 대하여 미접종자, 1차 접종자, 완전 접종자(2차 접종 완료), 그리고 교차접종자 등이 있다. 이들 백신은 1차와 2차 접종에 의한 감염예방 효과가 서로 다르기 때문에 앞에서 언급한 사례를 단순하게 도입하기는 어려운 상황이다. 뿐만 아니라 다양한 변이가 지속적으로 발생하여 부스터 샷의 필요성도 제기되고 있기 때문에 다양한 감소 효과를 지닌 사람들로 구성되는 일반적인 경우를 고려하여야 할 것이다.

N명의 사람들이 집합된 공간에서 개개인이 지니는 감소 효과를 x_i 라고 하면 이들에 의한 감염위험도의 합은 앞에서 제시한 방법으로 계산하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_N &= \chi_1\chi_2 + \chi_1\chi_3 + \dots + \chi_1\chi_N + \chi_2\chi_3 \\
 &+ \dots + \chi_2\chi_N + \dots + \chi_{N-1}\chi_N \\
 &= \sum_{\substack{i=1 \\ j=2}}^{N-1} \chi_i\chi_j \quad (i < j)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

식 (5)로 계산되는 감염위험도와 해당 공간의 허용위험도를 비교하여 $T_N < S$ 인 상황으로 관리를 하여야 한다. N명의 인원이 집합되어 있는 공간에 추가로 N+1명 째의 사

람이 입장할 경우 입장 여부는 아래의 식 (6)으로 계산되는 T_{N+1} 이 허용위험도(S)를 넘지 않는 범위에서 결정될 수 있을 것이다.

$$T_{N+1} = \chi_{N+1} \sum_{i=1}^N \chi_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2}}^{N-1} \chi_i \chi_j \quad (i < j) \quad (6)$$

이와 같은 방법으로 신규 확진자 발생의 가능성을 최소화함으로써 보건의료자원의 효율적인 활용과 의료비를 절감하는 효과도 기대된다[23].

5. 결론

본 고에서는 코로나19에 대응하는 방법으로 채택하고 있는 사회적 거리두기 방법을 보다 과학적이고 합리적으로 결정하기 위하여 확률적인 개념을 도입하는 방안을 제시하고 있다. 백신의 접종에 따르는 감염위험도 감소 정도를 수치로 표현하여 공간과 집합자 숫자만이 아닌 집합자의 백신 접종상황을 함께 고려할 수 있게 하였다. 구체적으로는 기초감염재생산지수와 백신효과를 정량적인 지표로 표현하여 거리두기 정책의 기준으로 활용하는 방법을 고안, 제시하였다. 예를 들어 제시한 사례에서 20%의 미접종자가 완전 접종으로 전환될 경우 감염위험도는 55% 수준으로 감소됨을 보였다. 그리고 기초감염재생산지수, 백신접종에 의한 감염위험도 감소 개선 효과를 비교하여 의학적인 관리보다 방역 측면에서의 관리가 더 큰 효과를 얻을 수 있다는 점을 제시하였다. 또한 다양한 백신 종류와 접종상황에서 일반화할 수 있는 수식을 제시하여 향후 광범위한 임상 결과뿐만 아니라 백신 개발자가 공급하는 시기에 따른 백신효과 감소 등을 모두 반영한다면 더욱더 정교하고 합리적인 사회적 거리두기 방안으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] WHO Coronavirus Disease (COVID-19), (2020. 12. 2). *Republic of Korea: Success against COVID-19 based on innovation and public trust*, <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/republic-of-korea-success-against-covid-19-based-on-innovation-and-public-trust>
- [2] KDCA Vaccination, (2021. 11. 02). https://www.korea.kr/news/reporterView.do?newsId=1488_94970
- [3] J. H. Kim & J. Y. Kim, (2021), The analysis of correlation between COVID-19 and Seoul small business commercial districts. *Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*, 25(3), 384-388. DOI : 10.6109/jkiice.2021.25.3.384
- [4] K. A. Lee & H. W. Son. (2021), A Study on the College Adaptation and Core competencies of Students in Post Corona Era. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(5), 239-254. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.5.239
- [5] S. J. Han & J. H. Lee. (2021), Risk Perception and Preventive Behaviors of COVID-19 in University Students. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(7), 283-294. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.7.283
- [6] K. A. Choi. (2021). Health Exercise Biodata Analysis Education in the Corona 19 Pandemic Era: Cognitive Analysis of MZ Generation Face-to Face Practice Class Content. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(8), 317-325. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.8.317
- [7] W. S. Kim & JH. B. Choi, (2021), Analysis of class adaptation and satisfaction under untact educational environment caused by COVID-19: Handong Global University case. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(5), 109-119. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.5.109
- [8] E. B. Kim, D. Y. Cho, K. R. Roh, S. Y. Oh, K. B. Park, J. Ryoo & J. Y. Kim. (2021), A Study on the Policy Directions for the Development of Skill Convergence in the Post-COVID19 Era. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(3), 247-259. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.3.247
- [9] Y. R. Kim & A. Liu. (2022 on printing). Social distancing, trust and post-COVID-19 recovery. *Tourism Management*, 88, 104416. DOI : 10.1016/j.tourman.2021.104416
- [10] W. O. Kermack & A. G. McKendrick. (1927), Contributions to the mathematical theory of epidemics—I. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 115(772), 700-721.
- [11] S. Kim, Y. Ko, Y. J. Kim & E. Jung, (2020). The impact of social distancing and public behavior changes on COVID-19 transmission dynamics in the Republic of Korea. *Plos one*, 15(9), p.e0238684.

[2] KDCA Vaccination, (2021. 11. 02).

- [12] S. Kim, Y. B. Seo & E. Jung. (2020), Prediction of COVID-19 transmission dynamics using a mathematical model considering behavior changes in Korea, *Epidemiology and health*, 42
- [13] C. K. Jung, (2021), A Research on Setting up Cultural Tourism Festival Concepts to Revitalize Local Tourism in the Post-Corona era. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(10), 151-160.
DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.10.151
- [14] S. H. Shin. (2021). Mediating Effects of Mental Health and Sleep Problems in the Relationship between Fears of COVID-19 and Preventive Practices, *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(7), 337-347.
DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.7.337
- [15] S. Y. Kim. (2020). A Convergence Study of Stress Caused by the Epidemic of COVID-19, quality of life and positive psychological capital, *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(6), 423-431.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.6.423
- [16] D. Y. Lee, Y. S. Heo & K. H. Kim. (2020). Analyzing Global National Scientific Funds for Korea National R&D Planning: In Case of Coronaviruses. *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(4), 95-108.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.4.95
- [17] S. M. Heo & J. Y. Yang, (2021), A Convergence Study on the Topic and Sentiment of COVID19 Research in Korea Using Text Analysis, *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(4), 31-42.
DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.4.31
- [18] KDCA With corona. http://www.mohw.go.kr/react/al/sal0301vw.jsp?PAR_MENU_ID=04&MENU_ID=0403&BOARD_ID=140&BOARD_FLAG=00&CONT_SEQ=368300
- [19] M. Guillon & P. Kergall. (2021). Factors associated with COVID-19 vaccination intentions and attitudes in France, *Public Health*, 198, 200-207.
DOI : 10.1016/j.puhe.2021.07.035
- [20] MOHW Basic Reproduction Number, https://www.yna.co.kr/view/AKR20210702107051530?in_put =1195m
- [21] A. Fowlkes, M. Gaglani, K. Groover, M. S. Thiese, H. Tyner, K. Ellingson, H. R. Cohorts. (2021). Effectiveness of COVID-19 Vaccines in Preventing SARS-CoV-2 Infection Among Frontline Workers Before and During B.1.617.2 (Delta) Variant Predominance—Eight U.S. Locations, December 2020–August 2021, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 70(34), 1167-1169.
DOI : 10.15585/mmwr.mm7034e4
- [22] Y. Choi, J. S. Kim, H. Choi, H. Lee & C. H. Lee. (2020). Assessment of Social Distancing for Controlling COVID-19 in Korea: An Age-Structured Modeling Approach. *International journal of environmental research and public health*, 17(20), 7474.
DOI : 10.3390/ijerph17207474
- [23] W. J. Lee. (2020). Relationship of health care resources and cumulative preportion of COVID-19 cases, *Korean Public Health Research*, 46(4), 99. 41-51.
DOI : 10.22900/kpkr.2020.46.4.004

문 수 찬(Su Chan Moon)

[학생회원]



- 2019년 2월 : 대전대학교 한의학과(학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 한의학과(석사과정)
- 관심분야 : 한의학, 의학, 보건관리
- E-Mail : chjoo1@naver.com