

# 코로나바이러스감염증-19의 시공간적 확산 패턴 및 지역 간 감염 네트워크 분석

## Spatiotemporal Evolution and the Diffusion Pattern of COVID-19 in South Korea in Three Waves

이진희 Lee Jin Hui\*, 박민숙 Park Min Sook\*\*, 이상원 Lee Sangwon\*\*\*

### Abstract

This study aims to uncover cross-district transmission patterns of COVID-19 outbreaks in South Korea in three waves. To this end, a total of 93,755 reported cases that local governments published online were firstly mapped and analyzed the spatial diffusion patterns using ArcMap 10.5. Secondly, network analyses method was employed to discover the directions of transmission as well as the relationships between urban hierarchy and transmission patterns of the virus in three waves. In network analysis, 28,365 cases, that contain information of both origin and destination of individual cases, were analyzed and visualized using Gephi. The analyses unveiled the differences among three outbreak waves in their transmission scales, speed, and directions. At an overall level, the Seoul Metropolitan Areas (SMA) found to be the super-spreader and instrumental in spreading the virus throughout the pandemic. But the second and third waves were more diverse and heterogeneous while the transmission of the first wave was concentrated around the SMA. Districts with over 1 million population found to have contributed to widespread and rapid transmission of the virus. The findings of this study contribute to developing and deploying area-specific prevention and intervention measures against future epidemics.

Keywords: COVID-19, Spatial Diffusion, Network Analysis, Spatial Epidemiology

### I. 서론

2019년 12월 말 중국 후베이성 우한에서 처음 보고된 호흡기 감염질환인 코로나바이러스감염증-19(COVID-19, 이하 코로나19)는 중국을 건너 전 세계로 확산되어 전례 없던 인적·사회경제적 피해를 야기하고 있다. 중국에서 첫 확진자가 보고된 이후 코로나19 감염은 여

행 등 지역 간 통행 패턴을 따라 폭발적으로 증가한 것으로 알려졌다(Cuadros, Xiao and Mukandavire et al. 2020, 1; Kim and Castro 2020, 328). 세계보건기구 자료에 의하면 중국에서 처음 코로나19 감염이 보고된 이후 타국에서 첫 감염사례가 확인된 것은 약 보름 이후인 2020년 1월 13일이며, 그 후 2개월 정도 지난 3월 말, 전 세계 200개 이상의 국가로 바이러스가 확

\* 국토연구원 부연구위원(제1저자, 교신저자) | Associate Research Fellow, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements | Primary Author & Corresponding Author | jhlee@krihs.re.kr

\*\* 위스콘신-밀워키 대학교 교수 | Assistant Prof., School of Information Studies, Univ. of Wisconsin-Milwaukee | minsook@uwm.edu

\*\*\* 연세대학교 도시공학 석사과정 | Master Student, Urban Planning and Engineering, Yonsei Univ. | alaks123@yonsei.ac.kr

산되었다(WHO COVID-19 dashboard)<sup>1)</sup>. 국내의 경우 2020년 1월 20일 확인된 첫 코로나19 감염자는 해외 유입자로, 2차 감염이 처음 보고된 것은 그로부터 열흘이 지난 후였다. 2021년 6월 30일 기준 국내 누적 확진자는 약 15만 7천 명에 육박하며, 사망자 역시 2천 명을 넘어섰다(질병관리청)<sup>2)</sup>.

코로나19가 전 세계적으로 유례없는 빠른 전파력을 보이는 이유는 감염자와의 직·간접적 접촉이나 감염자에게서 나온 비말을 통해 쉽게 전파되는 호흡기 감염병의 특성 때문인 것으로 알려져 있다(허중연 2020, 68; 이진희, 박민숙, 이상원 2021, 9에서 재인용). 동시에 무증상 전파가 가능하고 바이러스 배출 기간이 길기 때문에 타 감염병과 달리 짧은 시간 동안 대규모 확산이 발생한다(Lai, Shih, Ko and Tang et al. 2020; 박수은 2020; 허중연 2020). 바이러스 자체의 특성과 더불어 교통수단이 발달하여 지역 간 교류가 증가하고, 도시화로 인해 인구가 밀집하면서 접촉 수단과 빈도가 늘어난 사실 역시 코로나19 확산의 주요 원인으로 지적된다(최병두 2015; Cheong and Jones 2020; Congdon 2016; Sabel, Pringle and Schærström 2010; Saraswathi, Mukhopadhyay, Shah and Ranganath 2020). 또한 대도시로부터의 거리나 광역권 위치, 도시 규모, 도시 위계 등을 포함한 지리적 공간 구조도 바이러스 확산에 영향을 미치는 요인이라는 사실이 확인되었다(Adler, Florida and Hartt 2020; Fortaleza, Guimarães, Catão and Ferreira et al. 2021; Hamidi, Sabouri and Ewing 2020; Teller 2021). 따라서 백신이나 치료제와 같이 코로나19 바이러스에 직접적으로 대응할 수 있는 방법이 개발되기 이전에는 교류를 최소화하는 등 일정 거리 내에서 감염자

와의 물리적인 접촉을 차단하는 것이 중요하다. 기존 연구에서 도시 위계와 같은 공간적 특성이 바이러스 전파와 상관관계가 있는 것으로 밝혀진 만큼, 지역적 특성이 코로나19 확산에 어떻게 영향을 미쳤는지 이해할 필요가 있다.

코로나19와 같은 호흡기 감염병의 공간적 확산을 파악하는 일반적 방법은 특정 시점에 어느 지역에서 해당 질환 감염자가 얼마만큼 발생하였는가를 도면화하는 것이다(Zhu, Ye and Manson 2021, 8396). 이를 통해 시간이 흐르면서 코로나19가 공간적으로 어떻게 확산되는가를 탐색적으로 확인할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 특정 지역에서 집계된 감염자 발생 건수에만 의존하기 때문에 해당 발생지역이 가진 특성 및 지역 간 관계성을 이해하는 데 한계가 있다. 특히 도시 위계성과 같은 지역의 구조적 특성 및 질병 확산의 방향성을 이해하기 어렵다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문은 먼저 시기에 따라 어느 지역에서 코로나19 감염이 발생하였는가를 파악, 코로나19의 시공간적 확산 패턴 확인을 첫 번째 목표로 한다. 이를 위해 2020년 1월 20일부터 2021년 4월 30일까지 코로나19 확진자 현황 자료 중 발생지 확인이 가능한 사례에 대하여 시·군·구 단위에서 발생지와 거주지 자료를 구축하였다. 다음으로 분석 기간을 유행 시기별로 구분하고, 각 시기에 따른 코로나19 감염 발생을 공간상에 표현하여 감염병이 시공간적으로 어떻게 확산되었는가를 탐색적으로 파악하였다.

도면화 방법과 더불어 네트워크 분석을 통하여 확진자의 거주지 및 감염 발생지의 위계성 및 지역 간 코로나19의 확산 방향성 등을 파악하는 것이 본 논문

1) <https://covid19.who.int/info/> (2021년 5월 24일 검색)

2) <http://ncov.mohw.go.kr/> (2021년 6월 30일 검색)

의 두 번째 목표이다. 이를 위해 먼저 시·군·구 단위의 발생지와 거주지가 확인된 사례를 지역 규모와 위계에 따라 재코딩하였다. 그 후 다차원적 네트워크 분석기법을 이용하여 지역 간 코로나19 확산 패턴을 확인하였다.

감염병의 시공간적 확산 추이와 특성을 확인하는 것은 방역에 있어 매우 중요한 요소이다. 하지만 최근 코로나19 관련 연구에서는 시간에 따른 확산세나 사회적 거리두기와 같은 방역의 영향에 초점이 맞춰져 있다(Ayoub, Chemaitelly, Seedat and Mumtaz et al. 2020; Hellewell, Abbott, Gimma and Bosse et al. 2020; Kucharski, Russell, Diamond and Liu et al. 2020; Mukandavire, Nyabadza and Malunguza et al. 2020). 따라서 코로나19 발생을 시공간적으로 추적하고, 지역의 특성에 따른 관계성 분석을 시도했다는 점에서 본 연구는 기존 연구와 차별된다. 또한 시공간적 확산 패턴을 정밀하게 확인하는 것은 사회적 거리두기를 포함한 정부의 코로나19 방역 지침 개선안 마련에 중요한 근거가 될 것이다.

## II. 이론적 고찰 및 선행연구

### 1. 감염병의 공간적 확산

감염병은 바이러스나 박테리아와 같이 생물체에 해를 입히는 주요 동인인 병원체가 감염원으로부터 탈출, 전파되어 새로운 숙주인 생물체 안으로 침입하여 감염을 일으키는 질환을 의미한다(강영희 2014; 이진희, 박정호, 이경주 2020, 17에서 재인용). 코로나19와 같은 호흡기 감염병의 경우 일반적으로 감염자가 호흡이나 기침, 재채기하는 과정에서 나온 비밀이 공기 중에 머물다가 새로운 생물체의 호흡기를 통하여 침입하거나 감염자와의 직·간접적 접촉 과정에서 전파된

다(Sabel, Pringle and Schærström 2010, 114; 이진희, 박정호, 이경주 2020, 18). 감염병이 사람을 포함한 생물체 사이에 전파되는 것이 확산의 첫 단계이나, 시간이 흐르면서 한 지역에서 다른 지역으로 조직적으로 전파되는 것을 공간적 확산(spatial diffusion) 또는 전파라 한다(Jones 2021, 1). 감염병의 공간적 확산 패턴을 파악하는 것은 팬데믹 상황에서 감염병의 지리적 전파를 최대한 예방하여 보다 선제적인 대응을 하는데 도움이 될 수 있다. 감염병의 공간적 확산을 이해하기 위해서는 지리학적 관점에서 처음 감염병을 전파시킨 감염자의 위치(origin), 즉 발생지와 새로 감염된 사람이 이동한 위치인 도착지(destination), 어떠한 경로(pathway)로 어떻게(mode) 확산되었는가, 확산 과정에서의 추진력(force driving)이 무엇이었는가에 대한 정보가 필요하다(Sabel, Pringle and Schærström 2010, 118).

감염병이 어떠한 방법으로 확산되는가의 문제는 연구자에 따라 다양하게 논의되어왔다. 먼저 감염병의 공간적 확산은 크게 두 가지 유형, 이전형(relocational)과 팽창형(expansory)으로 구분된다. 이전형 확산은 마치 이주민이 본래의 거주지를 나와 새로운 정착지를 찾는 것과 같이 감염병이 초기 발생지를 완전히 벗어나서 새로운 지역으로 이동하는 방법으로 매우 드물게 확인된다(Cliff, Ord, Haggett and Versey 1981, 6; Hornsby 2003, 2; Jones 2021, 3). 반면에 팽창형 확산은 초기 발생지를 벗어나지 않은 채 주변으로 확산되는 보다 일반적인 방법으로, 위계적(hierarchical)과 전염성(contagious) 확산으로 세분된다(Jones 2021, 3).

위계적 확산은 계층이나 지역의 위계에 따라 발생하는 확산 방식이다(Cliff, Ord, Haggett and Versey 1981, 26; Goulb, Gorr and Gould 1993, 86; Hornsby 2003, 2; Sabel, Pringle and Schærström 2010, 119).

이에 따르면 감염병은 일반적으로 큰 도시나 고차원적 활동이 이루어지는 공간에서 처음 발생한 다음 중간 규모의 도시를 거쳐 마지막으로 소규모 도시로 전파된다(Jones 2021, 3). 이진희, 박정호, 이경주(2020, 22)에 의하면 감염병이 위계적으로 확산될 경우 감염병 발생 빈도는 최초 감염지에서 멀수록 낮아지나, 최근에는 거리의 영향은 줄어든 반면 교통수단, 특히 도로나 공항을 중심으로 더 빠르게 확산될 수 있다.

감염병이 감염자와의 직접적인 접촉이나 매개를 통해 일어나는 전염성 확산의 경우(Hornsby 2003, 2), 위계적 확산과 같이 주로 도심에서 감염병이 발생한 다음 사람들의 공간적 접촉을 통하여 전파되는 과정을 거친다(Sabel, Pringle and Schærström 2010, 118). 하지만 최초 감염지로부터의 거리가 매우 중요한 거리소멸 이론에 기반하고 있어, 위계적 확산보다 거리에 더 민감하다(Jones 2021, 3). 1852년 브로드거리의 콜레라 발생이 전염성 방식으로 확산된 대표적인 사례로 알려져 있다(이진희, 박정호, 이경주 2020, 22).

## 2. 코로나19 발생의 시공간적 추적

기존 호흡기 감염병과 달리 코로나19 팬데믹 상황이 장기화되면서 코로나19의 공간적 확산을 추적하거나 예측하고자 하는 연구가 다수 진행되었다. 이는 감염병 확산을 지리적 측면에서 추적하거나 지역의 인문 및 자연환경 요인과 개인의 건강 상태와의 상관성을 분석하는 학문인 공간역학(Spatial Epidemiology)이 코로나19와 같이 높은 전파력을 가진 질환을 대응하는데 매우 유용하기 때문이다(박선엽, 한대권 2012).

먼저 Zhu, Ye and Manson(2021)은 네트워크 모델을

활용하여 코로나19 팬데믹이 시공간적으로 어떻게 변화하는가를 미국 전역을 대상으로 조사하였다. 이를 위해 코로나19가 처음 전 세계적으로 확산된 2020년 1월 말부터 국가적 재난 선포나 사회적 거리두기 방침 강화, 확진자 수 증가 등 주요 시기마다 각 주(state)별 확산세를 표현한 도면을 작성, 그 변화 과정을 확인하였다. 또한 트위터 사용자 자료를 토대로 뉴욕주와 캘리포니아주, 텍사스주, 일리노이주 등 주요 지역 간 사람들의 이동 패턴을 확인하여 지역 내 및 장거리 교류가 코로나19의 시공간적 확산 변화에 미치는 영향을 확인하였다. 비슷한 배경에서 Jones(2021)는 시간중력모형을 활용하여 도시 규모나 인구 밀도, 대도시로부터의 거리 등의 지역 특성에 따라 코로나19가 어떻게 시공간적으로 확산되는가를 미국 텍사스주를 대상으로 분석하였다. 그는 위계적 확산을 전제로 하여 주요 도시로의 거리와 인구 규모가 코로나19 확산 추이를 설명할 수 있다고 주장하였다. DeFries, Agarwala, Baquie and Choksi et al.(2020) 역시 인도 도시의 코로나19 확산에 대한 분석 결과, 대도시에서 소도시로 위계적 감염병 전파가 이루어졌으며, 특히 계절성 노동자들이 돌아오는 마을과의 거리와 그들과의 교류 정도가 코로나19 유행과 관계가 있음을 확인하였다.

## 3. 코로나19 확산의 지역적 특성 분석

코로나19의 공간적 확산에 가장 주요한 역할을 한 지역에 대한 연구 역시 코로나19 대유행을 지리학적 측면에서 분석한 시도이다. Liu, Gu and Liu(2021)는 시공간 연결분석 방식을 적용, 홍콩을 대상으로 약 일 년 동안 확진 케이스의 지역 간 그리고 연령과 성별 등 인구학적 확산 패턴을 분석하였다. 그 결과 유행 시기별, 인구특성에 따른 확산 패턴에 차이가 있으며,

대다수의 확진 케이스가 지역적으로 확산된 것으로 나타났다. 특히 확산 범위가 컸던 4차 유행 시기에 주요 거점이 된 지역의 경우 인구 밀도와 밀접한 관련이 있음이 밝혀졌다. Liu, Hao, Sun and Shi(2021)은 네트워크 분석 방법을 활용하여 중국 42개 지역에서의 코로나19 초기 확산을 시뮬레이션하여 인구 밀집도가 높을수록 바이러스 확산 범위가 넓고 빠르다는 것을 확인했다. Yi, Ng, Farwin and Pei Ting Low et al.(2021) 역시 네트워크 분석방법을 활용하여 근로자들의 거주지와 방문지 이동 데이터를 분석, 코로나19에 대한 노출이 비업무적 지리공간 환경, 사회적 관계, 그리고 방문 지역과 관련이 있다는 것을 알아냈다. Saraswathi, Mukhopadhyay, Shah and Ranganath (2020)은 소셜 네트워크 분석 기법을 활용하여 인도 카르나타카에서 발생한 코로나19 감염을 공간적으로 분석, 델리(Delhi)에서 발생한 감염 사례가 가장 외생적인 감염인 반면, 확진 사례가 가장 많은 벵가로스(Bangalore city)에서는 집단감염 빈도가 오히려 낮음을 밝혔다.

이렇듯 기존 연구에서는 코로나19의 공간적 확산이 위계적 특성을 띄며, 특히 도심이나 주요 도시와의 거리, 인구 규모가 감염병의 공간적 전파에 큰 영향을 미칠 수 있음을 밝혔다. 또한 주요 도시와의 교류가 많거나 연결성이 높은 지역일수록 코로나19 확산이 더욱 빠르게 일어나는 경향이 있다. 선행연구 결과를 토대

로 시간이 지날수록 서울이나 수도권으로부터 인접한 지역으로 코로나19가 확산되며, 특히 도로나 철도 등의 교통수단을 통해 수도권과 밀접하게 연결되어 있거나 실제 교류가 많은 지역일수록 코로나19 확산에 중요한 역할을 할 것으로 예측할 수 있다.

### III. 연구의 틀

#### 1. 자료 측정

본 논문의 첫 번째 목적은 코로나19의 시공간적 확산 패턴을 분석하는 것이다. 이를 위해 국내 첫 감염자가 발생한 2020년 1월 20일부터 2021년 4월 30일까지 각 지방자치단체에서 인터넷으로 제공하는<sup>3)</sup> 확진자 현황 자료를 이용하였다. 인터넷상에서 구득한 자료에는 대부분 감염자의 거주지가 포함되어 있으며, 역학조사가 완료되면 접촉력 항목에서 대면접촉이나 해외 유입이 아닌 경우 구체적인 감염경로(예: ○○병원, △△구 ▽▽학원 등)가 제시되어 있다. 본 연구에서는 이러한 사례에 대해 시·도 및 시·군·구 단위에서 발생지를 파악하였다. 다만 부산광역시와 대구광역시, 강원도와 충청남도, 경상북도, 제주특별자치도와 같이 감염경로에서의 접촉자가 파악된 경우 전체 확진자 자료를 공개하지 않거나, 일정 기간 동안만 확진자 자료를 공개하는 경우, 그리고 정보가

3) 서울특별시 코로나19 확진자 현황 (<https://www.seoul.go.kr/coronaV/coronaStatus.do>)  
 인천광역시 코로나19 확진자 현황 (<https://www.incheon.go.kr/covid19/index>)  
 광주광역시 코로나19 확진자 현황 (<https://www.gwangju.go.kr/c19/contentsView.do?pageId=corona29>)  
 대전광역시 코로나19 확진자 현황 (<https://www.daejeon.go.kr/corona19/index.do?menuId=0002>)  
 울산광역시 코로나19 확진자 현황 (<https://covid19.ulsan.go.kr/index.do>)  
 세종특별자치시 코로나19 확진자 현황 (<https://www.sejong.go.kr/bbs/R3620/list.do>)  
 경기도 코로나19 확진자 현황 ([https://gnews.gg.go.kr/briefing/brief\\_covid19.do](https://gnews.gg.go.kr/briefing/brief_covid19.do))  
 충청북도 코로나19 확진자 현황 (<https://www.chungbuk.go.kr/covid-19/index.do>)  
 전라북도 코로나19 확진자 현황 ([https://www.jeonbuk.go.kr/board/list.jeonbuk?boardId=BBS\\_0000116&menuCd=DOM\\_000000110010000000&contentsSid=1266&cpath=](https://www.jeonbuk.go.kr/board/list.jeonbuk?boardId=BBS_0000116&menuCd=DOM_000000110010000000&contentsSid=1266&cpath=))  
 전라남도 코로나19 확진자 현황 (<https://www.jeonnam.go.kr/coronaMainPage.do>)  
 경상남도 코로나19 확진자 현황 (<http://코로나19경남.kr/main/main.do#close>)

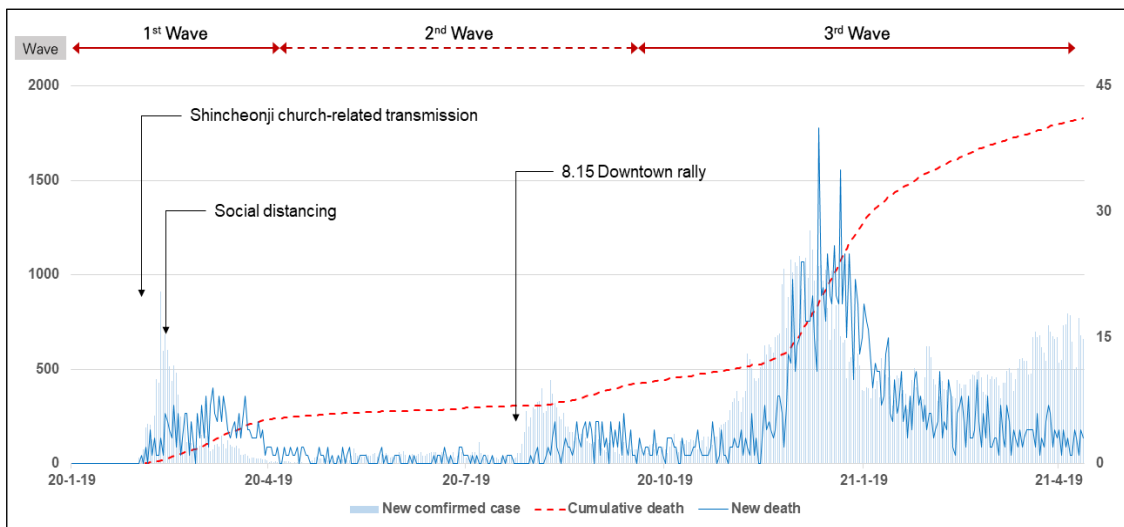
제한되어 있어 발생지 확인이 어려운 사례는 분석에서 제외하였다.

분석 기간 동안 각 지방자치단체에서 제공한 자료의 확진자는 총 93,755명으로, 이는 2021년 4월 30일 전국 누적 확진자 122,634명의 76.45%이다. 당시 서울을 포함한 수도권 확진자는 전체의 63.7%에 해당하며, 자료를 구득하지 못한 지역의 확진자는 20.4%, 검역소에서 확인된 확진자는 전체의 2.8%를 차지한다(질병관리청). 확진자 접촉이나 해외유입, 미분류와 같이 발생지 확인이 어려운 사례를 제외한 자료 중 거주지와 발생지가 모두 확인되어 네트워크 분석에 이용된 사례는 28,365명으로 전체 자료의 29.05%에 해당한다. 본 논문에서 살펴본 분석 기간 동안 확진자

발생 추이는 <Figure 1>과 같다.

지역 위계는 도시계획시설 관련 기준을 비롯하여 「지방자치법」에 따른 대도시 및 중소도시 구분 기준(이진희 2016, 36)과 선행연구(김상조, 정윤희, 이진희 2012, 54; Lee and Lim 2018, 119)를 토대로 인구 규모에 따라 시·군·구 단위에서 각각 <Table 1>과 같이 구분하였다. 위계성이란 인구 규모를 바탕으로 소단위 거주지부터 대도시까지 각 도시의 위계를 표현하는 이론이다. 일반적으로 피라미드 형식으로 표현되며 가장 상위에는 대도시가, 하단에는 소단위 거주지역이 위치한다(Warf 2010). 인구 규모 관련 자료는 행정안전부 주민등록 인구통계를 사용하였고, 2020년 1월을 기준으로 하였다.

Figure 1\_ Situation of the COVID-19 Pandemic



Source: Written by the author based on WHO COVID-19 dashboard (<https://covid19.who.int/WHO-COVID-19-global-data.csv>) and Lee, Park and Lee(2021, 12 <Table 2>).

Table 1\_ Hierarchical Categories Based on Population Size

(unit: person)

Population size	Si·Gun·Gu Level	Population size	Si·Gun·Gu Level
1,000,000 or more	4	100,000 ~ 300,000	2
300,000 ~ 1,000,000	3	100,000 or less	1

Source: Written by the author based on Lee(2016), Kim, Jeong and Lee(2012), and Lee and Lim(2018, 119 <Table 1>).

**Table 2\_** Duration of Each Wave of the COVID-19 Pandemic and Associated Major Social Issues

Wave	Start date of the wave	End date of the wave	Main issue
1 <sup>st</sup> Wave	2020. 1. 20	2020. 4. 20	Shincheonji church-related clusters
2 <sup>nd</sup> Wave	2020. 4. 21	2020. 9. 28	8.15 Downtown rally
3 <sup>rd</sup> Wave	2020. 9. 29	2021. 4. 30	The average number of daily new cases in a week was larger than 400

Source: Lee, Park and Lee(2021, 12), Written by the author based on <Table 2>.

코로나19 유행 시기를 구분하는 기준은 연구자마다 다르다. 일반적으로 지금까지 총 세 차례의 유행이 발생한 것으로 알려져 있으며, 1차 유행은 신천지발 집단감염이 발생한 2020년 3월, 2차 유행은 8.15 도심 집회가 진행된 2020년 8월, 3차 유행은 코로나19가 전국적으로 확산된 2020년 말부터로 구분한다(장진화, 김영화, 김유연, 염한솔 외 2021, 483; 이진희, 박민숙, 이상원 2021, 12). 본 논문에서는 선행연구를 토대로 <Table 2>와 같이 구분하였다. 실제 유행 시기 구분은 세 차례의 유행이 발생하기 이전 시기까지 더 세분화될 수 있으나, 본 연구에서는 시기별 확산 패턴 확인을 위해 이전 시기를 모두 유행 시기로 포함하여 크게 세 시기로 나누어 분석을 진행하였다.

## 2. 분석 방법

### 1) 시공간적 코로나19 확산 분석

본 논문의 첫 번째 목표인 코로나19의 시공간적 확산 패턴을 확인하기 위해 시·군·구 단위에서 발생지가 확인된 감염 사례를 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 공간상에 표현하였다. 도면화를 위해서는 ArcMap 10.5 프로그램을 이용하였고, 유행 시기를 세 차례로 구분하여 발생 빈도에 따라 시·군·구 색상을 달리하여 시간이 갈수록 코로나19가 공간적으로 어떻게 확산되는가를 탐색적으로 파악하였다. 시기별 확산 현

황을 스냅 사진 형태로 비교하여 확산의 방향과 정도를 진단하는 방법은 코로나19를 비롯한 감염병 확산과 관련된 다수의 연구에서 사용되어 왔다(Cao, Yang, Wang and Guo et al. 2016; Mao, He, Zhu and Liu et al. 2020; Zhu, Ye and Manson 2021).

### 2) 네트워크 분석

코로나19의 지역 간 전파 영향 정도를 파악하고 지역적 위계성을 반영하기 위해 네트워크 분석 방법을 도입하였다. 네트워크 분석은 그래프 이론에 기반한 데이터 분석 방법으로 개인과 집단 등 분석 단위가 되는 노드(node)와 해당 분석 단위 간의 관계를 나타내는 연결선(edge)을 계량화하여 노드 간 관계에 나타나는 패턴 혹은 규칙성을 분석하는 연구방법으로, 공간구조 연구뿐 아니라 정치, 경제, 사회과학 등에 광범위하게 사용되고 있다(Rabino and Occelli 1997; Wasserman and Faust 1994). 특히 지리학적 공간구조 연구에서는 공간 간의 상호작용 내에서 공간의 다양한 역할과 상호작용의 복잡한 특성을 이해하는데 효과적이다(Rabino and Occelli 1997).

본 논문에서 각 노드는 각 시·군·구를 대표하며, 연결선은 확진자의 거주지와 발생지의 관계를 나타낸다. 예를 들어, 서울시 종로구 거주자가 부산시 북구에서 코로나19 확진자와 접촉하여 감염된 경우 해당 거주지(종로구)와 발생지(북구)가 그래프 상에 각 노

드로 표기되고, 확진자의 지역 간의 관계인 이동경로를 타나내기 위해 두 노드 간에 연결선이 생성된다. 각 연결선의 가중치(weight)는 특정 두 지역 간에 발생한 확진 건수의 합으로 계산하였다.

지역 간 바이러스 확산 다이내믹스를 이해하기 위해 방향성이 있는 그래프를 사용하였다. 또한 네트워크의 특성(attributes)은 다음 지표표를 사용하여 해석하였다. 네트워크 밀집도(density)란 한 네트워크에서 나올 수 있는 모든 연결선의 개수와 실제 연결선 수의 비를 의미한다. 평균 연결선 길이(mean path length)는 모든 노드 쌍 거리의 평균 거리(distance)로 두 노드로 도달할 수 있는 가장 짧은 거리를 의미한다. 평균 집단화계수(mean clustering coefficient)는 네트워크 상의 노드들 간의 평균 상호 연결 정도를 나타내며, 0에서 1사이의 값을 가질 수 있다.

각 지역, 즉 노드의 중심성(centrality)은 아래의 지표표를 사용하여 계산하였다.

- 외향 중심성(outdegree centrality): 하나의 특정 노드에서 다른 노드로 직접 연결되는 연결선의 총합으로 해당 노드의 타 노드에 대한 영향력을 나타낸다. 본 논문에서는 한 지역에서 타 지역으로 직접 전파가 일어난 정도를 나타내며, 가중치를 적용하여  $C_{w\_out}$ 으로 표기되었다.
- 내향 중심성(indegree centrality): 타 노드에서 특정 노드로 직접 연결되는 연결선 수의 합계로 타 노드에서 받은 영향 정도를 나타낸다. 본 논문에서는 타 지역에서 특정 지역으로 코로나19 전파가 일어난 정도를 나타내며, 가중치를 적용하여  $C_{w\_in}$ 으로 표기되었다.
- 근접 중심성(closeness centrality): 한 노드에서 네트워크상 그 외 노드에 도달하는 경로의 최단 거리를 계산하여 특정 노드의 타 노드에 대한 간접적 연결성 혹은 영향력을 측정하는 지표로 0에서

1사이의 수치로 계산된다. 경로의 길이가 짧을수록, 즉 수치가 높을수록, 특정 노드의 타 노드에 대한 영향력이 큰 것을 의미한다. 본 논문에서는 특정 지역이 코로나19 확산에 있어 전국의 타 시·군·구에 미친 영향력 정도를 나타내며,  $C_{close}$ 로 표기되었다.

- 매개중심성(betweenness centrality): 타 노드 간에 최단 거리 경로가 되는 횟수를 나타낸다. 본 논문에서는 특정 지역이 직접 전파가 일어나지 않은 타 지역으로 코로나19를 전파하는 데 얼마나 교량 역할을 했는지를 나타내며,  $C_{bw}$ 으로 표기되었다.
- 페이지랭크 중심성(PageRank centrality): 특정 노드와 이웃 관계를 갖는 타 노드의 중심성을 반영하여 특정 노드의 중요성을 측정하는 방식 중 하나인 고유 벡터 중심성의 변형으로, 방향성이 있는 네트워크에서 사용할 수 있는 중심성 지표이다. 본 논문에서는 probability 0.85로 계산되었으며, 특정 지역과 연결성을 가진 기타 지역의 중심성을 바탕으로 코로나19 확산의 핫스팟을 파악하는 데 사용되었고,  $PR$ 로 표기되었다.

본 논문에서는 공개용 소프트웨어인 Gephi 0.9.2 (Bastian, Heymann and Jacomy 2009)와 Fruchterman Reingold 레이아웃 알고리즘(Fruchterman and Reingold 1991)을 사용하여 지표 계량화 및 시각화를 진행하였다.

## IV. 연구 결과

### 1. 시기별 코로나19 확산 패턴 분석

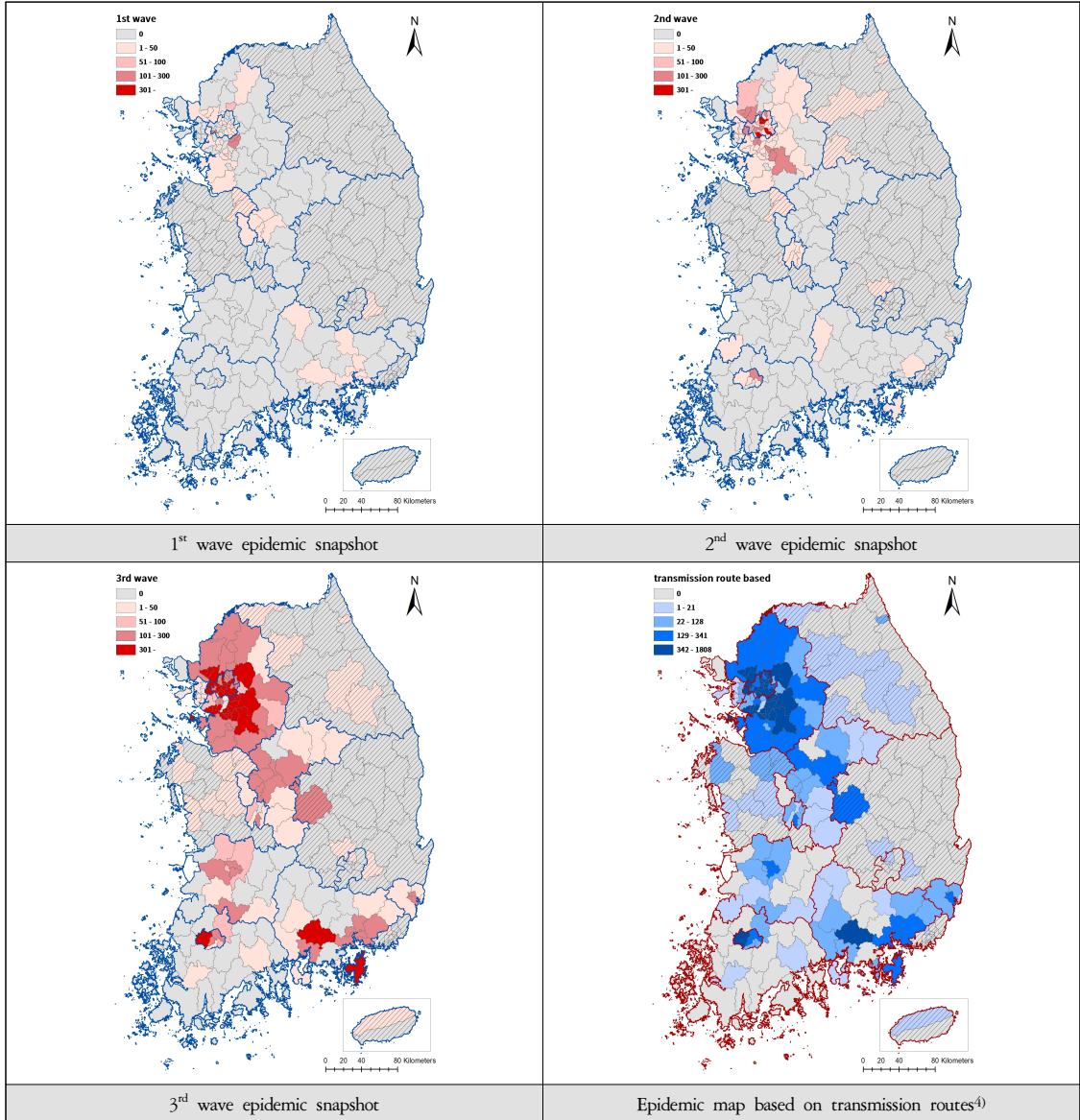
#### 1) 시기별 코로나19 확산 방향

코로나19의 시공간적 확산 추이를 확인하기 위하여 시기별로 발생 빈도를 탐색하여 이를 도면화한 결과,

<Figure 2>와 같이 1차 유행 시기에는 코로나19 발생이 서울을 포함한 수도권과 충청권 일부, 경상남도 지역에서 약하게 나타났으나, 2차 유행 시기에는 수

도권을 중심으로 확대된 이후, 3차 유행 시기에는 전국적으로 퍼져나갔다. 1차 유행 시기는 대구와 경북을 중심으로 한 신천지발 집단감염이 주요 원인으로

Figure 2\_ Epidemic Snapshots and Epidemic Map Based on Transmission Routes



Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

4) <Figure 2>의 우측 하단 그림은 전 기간 동안 발생한 코로나19 빈도를 표현함. 빗금 표시는 확진자 현황 자료 구득이 불가능한 시·도(부산광역시, 대구광역시, 강원도, 충청남도, 경상북도, 제주특별자치도)를 표현함.

지적되었으나, 대구광역시와 경상북도의 자료가 제외되어 본 연구에서는 해당 지역에서의 확산이 확인되지는 않았다<sup>5)</sup>. 하지만 서울 도심에서의 집회가 주요 원인이 된 2차 유행 시기부터는 서울을 중심으로 코로나19가 확산되는 모습을 보였으며, 특히 전국적으로 코로나19가 확대된 3차 유행 시기에는 서울과 수도권을 중심으로 한 확산세와 광주 및 경남권 중심의 확산세가 포착되었다. 따라서 시간이 지날수록 서울 중심에서 인접한 지역을 거쳐 먼 지역으로 코로나19가 확대되는 위계적 확산이 일어난 것으로 해석할 수 있다.

유행 시기별 주요 발생지를 보다 구체적으로 살펴보면, 1차 유행에는 서울시 구로구를 포함, 경기 남부권에 코로나19 발생 빈도가 높았다. 2차 시기에는 1차와 비교할 때 서울시에서의 발생 빈도가 증가했으며, 서울과 인접한 경기도 시군에서도 다수의 감염이 확인되었다.

수도권의 확산 패턴을 집중적으로 살펴보면, 2차 유행 시기에서는 서울 중심부와 서울과 인접한 경기도 시·군으로 코로나19 발생이 확산되는 것이 확인된다. 특히 2차 유행에는 서울과 경계가 인접한 부천시와 고양시, 안양시에서 코로나19가 다수 발생하였으며, 지하철 및 도로 교통 연결성이 높은 용인시에서도 높은 수준의 코로나19 발생이 확인되었다. 3차 유행에는 코로나19 발생이 전국적으로 확대된 가운데, 서울 및 서울과 인접한 경기도 시·군에서 집단적인 코로나19 발생이 확인된다. 특히 서울 남부 지역을 비롯하여 서울과의 교통 연결성이 높은 경기 용인시와 성남시, 부천시와 고양시에서의 발생 빈도가 높았다. 이러한 확산 패턴을 통해 거리 인접성과 함께 교통수단 등을 통한 높은 연결성이 확산에 큰 영향을 미친다는 위계적 확산 모델이 국내 코로나19 전파에도 어느 정

도 적용될 수 있음을 알 수 있다.

## 2) 시기별 코로나19 확산 구조

각 유행 시기별 코로나19의 확산 구조를 네트워크 분석을 통해 살펴보면, 1~3차 유행 시기를 지나면서 전반적으로 지역 간 전파 속도가 빨라지고 원거리 지역까지 확대되는 모습이 확인되었다. 네트워크 특성에 대한 <Table 3>을 보면, 네트워크의 밀집도, 평균 연결선 길이, 집단화 계수 모두 유행 시기가 진행될수록 점차 확대되었다. 먼저 밀집도와 집단화 계수를 살펴보면, 1차 유행 시기에는 0.005 및 0.066에서 2차에는 0.031 및 0.227, 그리고 3차 유행에서는 각각 0.059와 0.366으로 증가하였다. 즉 지역을 대표하고 있는 노드들이 1차 시기에는 0.5% 가량의 연결성을 보인 반면, 2차에는 약 3%, 3차 유행에는 약 5.9%의 노드가 서로 연결되어 있어, 2·3차 유행 시기에는 다수의 지역에서 코로나19가 전파된 지역 범위가 크게 확대된 것을 알 수 있다.

마찬가지로 인접한 두 개 노드와의 근접 가능성을 나타내는 평균 집단화 계수도 3차 유행에 가까워지면서 상승하는 모습이 보이는데, 이는 지역 간 전파 속도가 빨라졌음을 의미한다. 또한 연결선의 수와 연결된 노드들의 최단거리 중 가장 긴 연결선의 길이를 나타내는 네트워크의 지름, 연결된 모든 노드에 다다를 수 있는 평균 스텝 수를 나타내는 평균 연결선 길이 역시 3차에 근접할수록 높아져 한정된 지역을 중심으로 확산이 이루어졌던 1차와 달리, 3차 유행 시기에는 전파 대상 지역이 넓고 커졌음이 확인된다 (<Table 3> 및 <Figure 3> 참조).

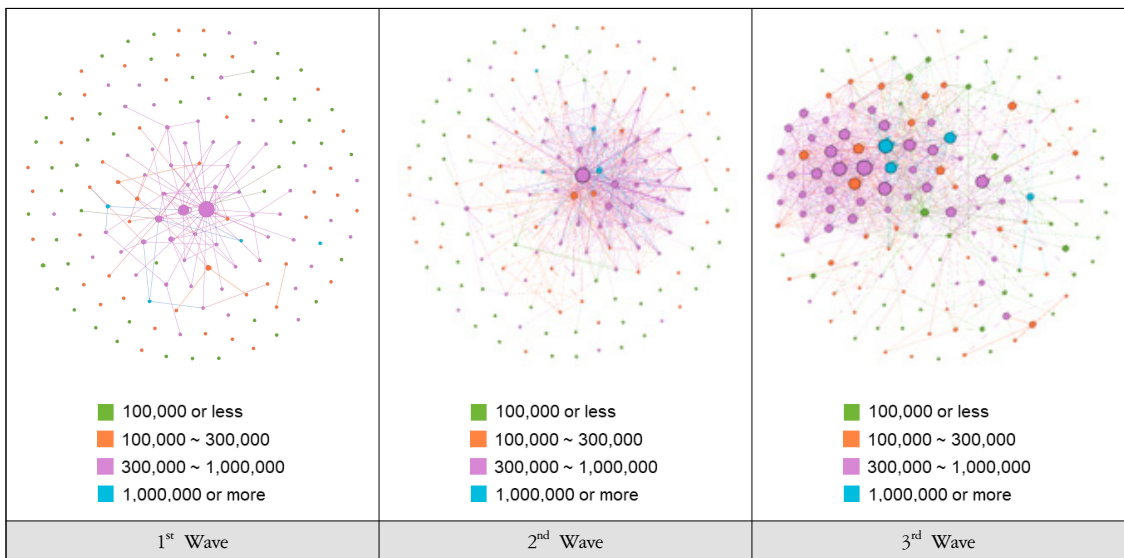
5) 본 논문에서 1차 유행 시기로 구분한 2020년 4월 20일까지 대구에서 보고된 확진자는 총 6,835명으로, 이는 분석 기간인 2021년 4월 30일까지의 대구 내 확진자 9,363명의 약 73%에 해당함. 따라서 본 분석결과와 달리 1차 유행 시기에는 대구에 집중된 확산세가 확인되었을 것이나, 그 이후에는 대구에서 확산되는 모습은 크게 강조되지 않았을 것으로 예상된다.

**Table 3\_** Parameters of Transmission Networks of the Individual Three Waves of COVID-19

Wave	Centralities					Network Attributes				
	$C_{w\_out}$	$C_{w\_in}$	$C_{close}$	$C_{btw}$	$PR_c$	Diameter	Mean path length	Density	Mean clustering coef.	
1 <sup>st</sup> Wave	Range	0-190	0-84	0-1 1 (n=12) $0 < C_{close} < 1$ (n=13) 0 (n=132)	0-115.5	0.005-0.016	7	2.458	0.005	0.066
	Mean	3.567	3.567	0.117	3.000	0.005				
2 <sup>nd</sup> Wave	Range	0-1,098	0-209	0-1 1 (n=3) $0 < C_{close} < 1$ (n=64) 0 (n=90)	0-997.665	0.002-0.018	7	2.681	0.031	0.227
	Mean	30.153	30.153	0.188	57.427	0.004				
3 <sup>rd</sup> Wave	Range	0-796	0-816	0-1 1 (n=6) $0 < C_{close} < 1$ (n=109) 0 (n=42)	0-4087.539	0.001-0.021	9	3.5584	0.059	0.366
	Mean	139.739	139.739	0.246	210.064	0.004				

Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

**Figure 3\_** The Transmission Networks of the Individual Three Waves of COVID-19



Note: The duration of each wave was defined in Table 1 and Figure 1. The layout of each network was generated using Fruchterman Reingold. The size of node corresponds to the weighted outdegree of the node and the color of the node represents the population size of the node as described in the legend.

Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

## 2. 시기별 지역 간 영향력 변화 분석

### 1) 시기별 전파 변화

중심도를 토대로 각 지역의 전파력, 전파속도, 그리고 타 지역에 대한 간접적 영향 정도를 살펴보면, 특정 지역에서 타 지역으로의 직접적인 확산이 1~3차 유행 시기를 지나면서 더욱 강화된 것을 알 수 있다 (<Table 3> 참조). 먼저 특정 지역에서 타 지역으로 전파가 이루어졌거나 혹은 유입이 이뤄진 정도를 나타내는  $C_{w\_out}$ 과  $C_{w\_in}$ 의 평균값을 시기별로 살펴보면, 1차 시기에는 한 지역당 평균 약 3.5(Ave. of  $C_{w\_out}$ =3.567) 지역으로 전파가 이루어진 반면, 2차 및 3차 유행에서는 평균 약 30(Ave. of  $C_{w\_out}$  =30.153) 곳과 139.7(Ave. of  $C_{w\_out}$ =139.739)개 지역으로 전파가 이루어져 한 지역 당 타 지역으로의 코로나19 전파력이 크게 확대된 것이 확인된다. 특히 3차 시기의  $C_{w\_out}$ 과  $C_{w\_in}$  중심도 모두 다른 시기에 비해 월등히 높아 3차에 특히 지역 간 직접 전파가 다발적으로 일어난 것으로 보인다. 분석에 포함된 지역 수가 157개 인 것을 감안하면 특히 3차 유행에서 약 90%의 지역에 직접 바이러스 전파가 이루어져, 지역 간 직접 전파 범위가 대폭 확대되었다.

전파속도는 각 유행기별로 약 1.1(Ave. of  $C_{close}$  = 0.117), 1.8(Ave. of  $C_{close}$  = 0.188) 및 2.4(Ave. of  $C_{close}$  = 0.246)개 지역을 거치면 네트워크에 포함된 모든 지역으로 확산이 이루어진 것으로 나타났다 (<Table 3> 참고). 3차 시기에 다소 지역 간 전파 속도가 느려지기는 했으나, 이는 전파 지역 범위가 커졌기 때문인 것으로 보인다. 1차 유행에는 타 지역과의 거리가 짧았던 지역이 12개로( $C_{close}$ =1, n=12) 상대적으로 많은 반면, 2차와 3차 시기에는 각각 3( $C_{close}$ =1, n=3)개와 6( $C_{close}$ =1, n=6)개 지역으로 줄

어 들었으며, 이와 반대로  $C_{close}$ =0인 지역의 숫자는 각각 132개, 90개, 42개로 유행 시기에 따라 점차 줄어들었다. 이는 1차 유행에서는 특정 지역들을 중심으로 인근 지역으로 빠르게 코로나19가 확산된 반면, 2차와 3차 시기에는 특정한 몇몇 지역보다 약 절반 이상의 지역이 그 외 모든 지역에 대해 다소 높은 수준의 전파력을 가지면서 산발적으로 타 지역에 코로나19 전파가 이뤄지는 사례가 많았던 것으로 해석된다.

특정 지역이 타 지역 간 전파의 매개체 역할을 한 정도를 나타내는 매개 중심성( $C_{btw}$ ) 역시 1차 유행 시기에는 평균 값이 3에 불과했으나, 2차 및 3차 유행기를 지나면서 각각 57 및 210 이상으로 대폭 증가했다. 즉, 유행 시기를 지나면서 점점 더 많은 지역이 타 지역으로 바이러스가 전파되는데 중간 역할을 했다는 것을 의미하며, 이는 2·3차 유행기를 거치면서 산발적으로 다수의 지역으로 바이러스가 퍼져나간 것을 다시 한 번 확인시켜주는 결과이다.

유행 시기 전반에 걸쳐 특정 지역이 코로나19 전파에 강력한 핫스팟으로 작용한 경우는 두드러지지 않았던 것으로 나타났다. 2차 유행에  $PR_c$  중심도 평균값이 약간 높았으나, 0.01 값의 차이로 큰 차이는 보이지 않았다.

### 2) 지역 위계별 코로나19 확산 다이내믹스

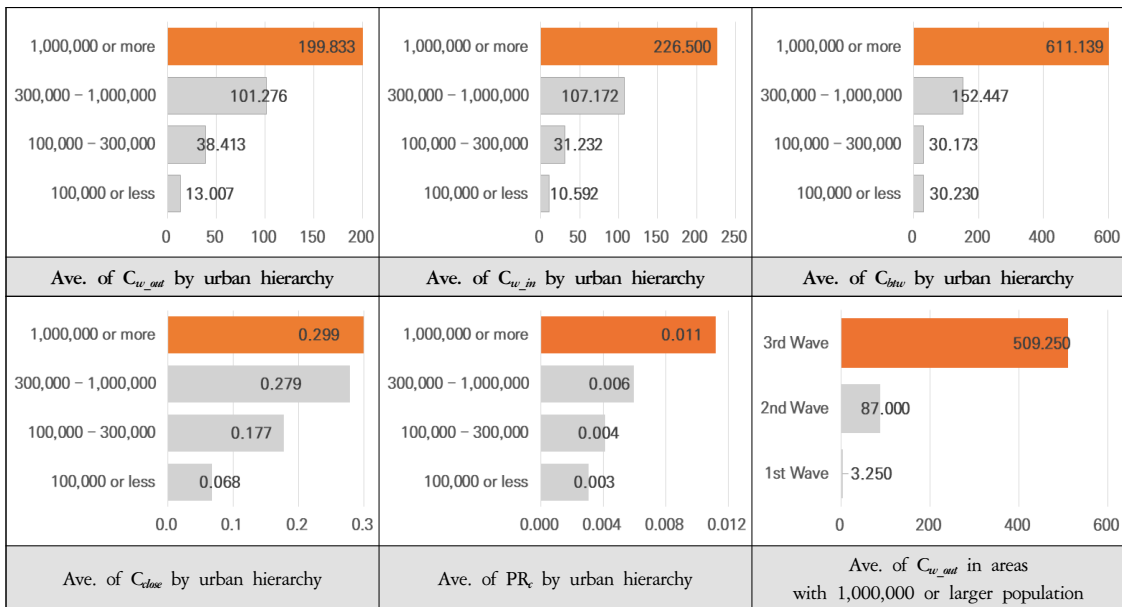
지역 위계성과 코로나19 확산 다이내믹스를 이해하기 위해 지역 위계별 중심성의 평균치를 비교하면 <Table 4> 및 <Figure 4>와 같다. 인구수 100만 명 이상 지역이 다른 인구 규모를 가진 지역들보다 4개의 평균 중심도( $C_{w\_out}$ =199.833,  $C_{w\_in}$ =226.500,  $C_{btw}$ =611.139,  $PR_c$ =0.011)에서 월등히 높은 지표수를 보였다. 이는 인구 100만 명 이상 지역의 경우, 코로나

**Table 4** \_ Distribution of Average Centrality Scores by Urban Hierarchy in Three Waves

Wave	Category	Ave. of $C_{w\_out}$	Ave. of $C_{w\_in}$	Ave. of $C_{close}$	Ave. of $C_{btw}$	Ave. of $PR_c$
1 <sup>st</sup> Wave	100,000 or less	0.224	0.388	0.000	0.000	0.005
	100,000 – 300,000	1.174	1.674	0.116	1.522	0.005
	300,000 – 1,000,000	8.310	7.707	0.208	6.776	0.006
	1,000,000 or more	3.250	4.250	0.250	2.000	0.008
2 <sup>nd</sup> Wave	100,000 or less	1.163	1.837	0.047	1.942	0.002
	100,000 – 300,000	16.435	12.913	0.148	33.955	0.004
	300,000 – 1,000,000	61.603	61.259	0.329	99.193	0.006
	1,000,000 or more	87.000	124.250	0.341	401.418	0.011
3 <sup>rd</sup> Wave	100,000 or less	37.633	29.551	0.156	88.747	0.002
	100,000 – 300,000	97.630	79.109	0.268	55.041	0.004
	300,000 – 1,000,000	233.914	252.552	0.299	351.371	0.006
	1,000,000 or more	509.250	551.000	0.306	1429.998	0.015

Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

**Figure 4** \_ Comparisons of Average Centralities by Urban Hierarchy



Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

19 바이러스를 타 지역으로 직접 확산하거나 바이러스가 타 지역에서 해당 지역으로 직접 유입된 경우가 월등히 높았던 것을 의미한다. 또한 직접 전파뿐 아니라 그 외 지역 간 코로나19 전파에도 해당 지역이 왕

성하게 교량 역할을 하였다는 사실을 말해준다. 또한 인구 100만 명 이상 지역의 경우, 특히 3차 유행 시기에 타 지역에 대한 직접 전파력이 1·2차 유행기에 월등히 강해진 것으로 나타났다.

인구 규모별로 살펴보면, 1차 유행 시기에는 인구 30만~100만 명 이상인 지역에서 활발한 코로나19 유행이 이루어진 반면, 2차와 3차 유행에서는 수도권에 위치한 인구 1백만 명 이상 지역을 통해 타 대도시로의 코로나19 확산이 더 뚜렷하게 확인된다. 지방 대도시 간 전파 역시 2차 유행에서 나타나기 시작해 3차 시기에 더욱 강하게 확인된다. 특히 3차 유행 시기에는 대도시지역뿐 아니라 중소도시에서도 코로나19의 확산이 이루어져, 코로나19 바이러스 전파 통로가 다양화되고 도시 간 확산세는 더욱 분명해지는 것을 알 수 있다.  $C_{close}$  중심도는 인구 100만 명 이상과 더불어 인구 30만~100만 명 지역 모두에서 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 인구 규모 30만 명 이상일 경우 코로나19 바이러스 전파 속도가 상대적으로 빠르고 주요 확산지와 강한 연관성을 가진 것으로 나타났다.

### 3) 지역별 코로나19 확산 영향력

<Table 5>와 같이 각 지역별 코로나19 확산 영향력을 유행 시기별로 살펴보면, 전체 기간에 걸쳐 서울과 경기 지역이 모든 중심성에 있어 타 지역보다 상대적으로 높은 중심성을 보였다. 이는 수도권을 중심으로 코로나19의 확산과 유입이 활발했다는 것으로 해석된다. 이를 도면화하면, <Figure 5>에서 보듯 1~3차 유행 시기 모두 수도권 지역에서 타 지역으로의 코로나19 확산이 우세했다.

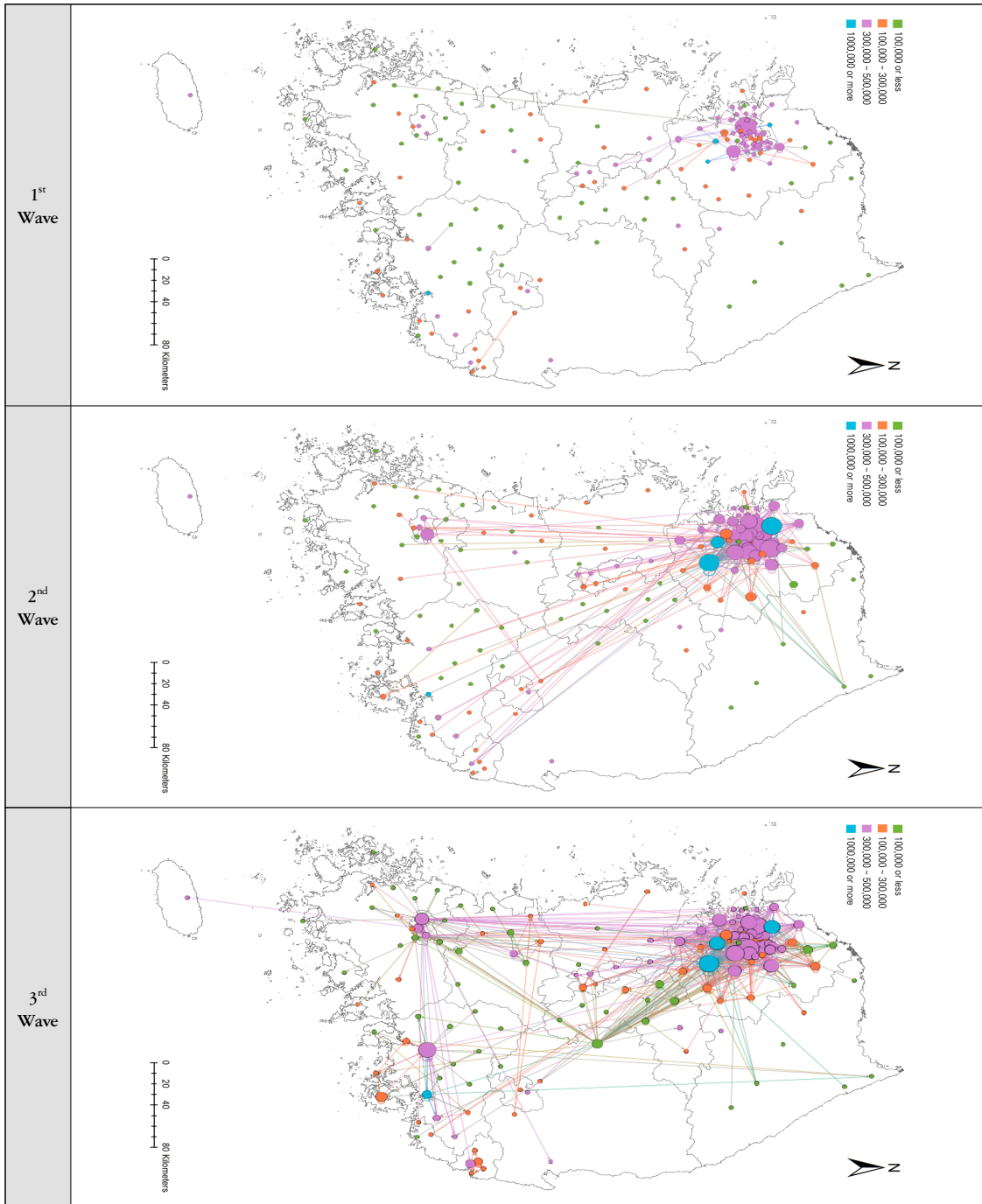
수도권 지역이 1·2차 유행 시기에 코로나19 확산에 주도적인 역할을 하고, 3차 유행에서 수도권 외 지역으로 확산의 중심지가 확대 되는 패턴은 <Table 5>에서도 확인된다. 각 중심성에서 상위를 차지한 지역을 토대로 확산 패턴을 살펴보면, 1차 유행에서는 서울과 경기도 지역이 모든 중심성 지표에서 상대적으로

**Table 5** \_ Top Five Districts(Si·Gun·Gu) Centrality Scores

Wave	$C_{w,out}$		$C_{w,in}$		$C_{close}$		$C_{flow}$		$PR_c$	
1 <sup>st</sup> Wave	(S)* Guro-gu	190	(G) Seongnam-si	84	(S) Dongdaemun-gu	1.000	(G) Uijeongbu-si	115.5	(G) Goyang-si	0.016
	(G) Seongnam-si	108	(G) Bucheon-si	36	(G) Pyeongtaek-si	1.000	(G) Seongnam-si	104	(S) Seongbuk-gu	0.013
	(G) Uijeongbu-si	53	(S) Guro-gu	30	(S) Seongdong-gu	1.000	(S) Gangnam-gu	71.5	(I) Namdong-gu	0.011
	(G) Gunpo-si	31	(G) Uijeongbu-si	30	(S) Jongno-gu	1.000	(G) Gunpo-si	62	(G) Hwaseong-si	0.010
	(S) Dongdaemun-gu	28	(G) Gunpo-si	29	(G) Suwon-si	1.000	(S) Seodaemun-gu	29	(S) Nowon-gu	0.009
2 <sup>nd</sup> Wave	(S) Seongbuk-gu	1,098	(S) Seongbuk-gu	209	(GJ) Buk-gu	1.000	(G) Yongin-si	997.665	(G) Yongin-si	0.018
	(S) Gangnam-gu	373	(S) Nowon-gu	193	(G) Icheon-si	1.000	(S) Seongbuk-gu	870.027	(G) Seongnam-si	0.017
	(S) Jongno-gu	351	(G) Yongin-si	190	(GN) Geoje-si	1.000	(S) Jongno-gu	851.826	(G) Goyang-si	0.013
	(S) Gwanak-gu	320	(G) Goyang-si	189	(S) Jongno-gu	0.796	(S) Yeongdeungpo-gu	500.852	(G) Siheung-si	0.012
	(G) Yongin-si	233	(S) Gwanak-gu	173	(S) Seongbuk-gu	0.726	(G) Goyang-si	478.257	(G) Gimpo-si	0.011
3 <sup>rd</sup> Wave	(S) Gangnam-gu	816	(G) Bucheon-si	796	(U) Nam-gu	1.000	(GJ) Gwangsan-gu	4,087.539	(G) Yongin-si	0.021
	(G) Yongin-si	731	(G) Yongin-si	722	(CB) Jincheon-gun	1.000	(GJ) Dong-gu	3,968.631	(G) Bucheon-si	0.020
	(S) Gangseo-gu	710	(G) Seongnam-si	652	(U) Jung-gu	1.000	(S) Gangnam-gu	3,830.876	(G) Goyang-si	0.020
	(G) Seongnam-si	655	(G) Suwon-si	628	(DJ) Dong-gu	1.000	(G) Yongin-si	3,533.674	(G) Pyeongtaek-si	0.018
	(GN) Jinju-si	629	(GN) Jinju-si	623	(JB) Jeongeup-si	1.000	(GN) Jinju-si	1,365.201	(G) Ansan-si	0.018

Note: \* S-Seoul, I-Incheon, DJ-Daejeon, U-Ulsan, GJ-Gwangju, G-Gyeonggi, CB-Chungbuk, JB-Jeonbuk, GN-Gyeongnam  
Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

Figure 5\_ COVID-19 Transmission Network in Geolayout in Three Waves of COVID-19



Note: The size of node corresponds to the weighted outdegree of the node and the color of the node represents the population size of the node as described in the legend.

Source: Written by the author based on reported confirmed cases that local governments (Seoul; Incheon; Gwangju; Daejeon; Ulsan; Sejong; Gyeonggi; Jeonbuk; Jeonnam; Gyeongnam) published online.

로 높은 점수를 보여 타 지역에서의 코로나19 유입과 확산에 주도적인 역할을 했음을 나타낸다. 특히 2·3차 유행 시기와 달리 상대적으로 많은 지역의  $C_{close}$  값이 최댓값인 1로 나타나, 1차 유행 기간에는 인접 지역 간의 감염병 확산이 더욱 활발했던 것으로 해석된다. 또한 서울의 한 특정 지역의  $PR_c$  중심도가 1차 유행에서 상대적으로 높게 나타나 해당 지역이 코로나19 확산의 핫스팟 역할을 한 것으로 보인다.

2차 유행에서도 수도권 지역이 다양한 중심도에서 높은 값을 기록했으나,  $C_{w\_in}$ 와  $C_{w\_out}$  점수가 크게 증대되는 반면  $C_{close}$ 와  $PR_c$  중심도 값은 1차 유행에 비해 오히려 낮아졌다. 이는 각 지역으로의 코로나19 바이러스의 유입 및 유출은 더욱 활발해졌으나, 인접한 지역 간 전파보다는 수도권 외 지역으로의 확산이 1차 유행에 비해 더욱 활발해졌음을 보여준다. 1차 유행 시기에는 서울시 구로구, 2차 시기에는 종로구 및 성북구 등 특정 이벤트와 관련된 지역이 상대적으로 월등히 높은  $C_{w\_out}$  중심성을 보여, 타 지역으로 직접 확산에 영향을 준 것으로 나타났다.

3차 유행 시기에서는 2차 유행의 특성과 비슷한 확산 패턴을 보이나, 수도권 이 외 지역인 경남과 충북, 광주 지역에서 상대적으로 높은 중심성 값을 기록하여 코로나19 확산의 중심지가 다양화되고 지방 도시로 확대된 사실이 확인된다. 3차 유행 시기에는 특히  $C_{inw}$  중심성 값이 전반적으로 높아져 경기도와 서울, 광주 등이 새로운 매개 지역으로 떠올랐다.

## V. 결론

### 1. 연구의 의의 및 정책적 함의

본 논문에서는 구체적인 확진자 현황 자료를 활용하여 호흡기 감염병인 코로나19의 시공간적 확산 패턴

을 확인하고, 네트워크 분석을 적용하여 유행 시기별로 코로나19 확산의 방향성을 분석하였다. 코로나19 확산세가 1년 반이 넘도록 지속되고 있는 상황에서 바이러스의 공간적 확산의 구조를 지역의 위계성을 통해 이해함으로써 보다 효과적인 방향으로의 방역 정책 개선에 도움이 될 것으로 기대된다. 특히 최근 수도권을 중심으로 폭발적인 코로나19 발생이 증가하고 있는 상황에서 시간이 지날수록 코로나19의 공간적 확산이 어떠한 방향성을 가지고 진행되고 있는가를 이해하고 핫스팟을 파악하는 것은 지역 간 차등화된 방역 정책 적용의 근거가 될 수 있다.

2020년 1월부터 2021년 4월까지 코로나19 발생지가 확인된 자료를 도면화한 결과, 일반적인 감염병의 공간적 확산 모델인 위계적 확산이 확인되었다. 특히 강한 계기가 있었던 1차와 2차 유행 시기와 달리, 전국적으로 코로나19가 확산된 3차 시기에는 수도권이 코로나19 발생의 중심지로 떠올랐으며, 서울과 인접한 지역이나 교통수단 등으로 강한 연계성이 있는 지역으로 감염병이 확산된 것으로 확인되었다. 이러한 사실은 네트워크 분석 결과에서도 나타났는데, 3차 유행으로 갈수록 한정된 지역을 중심으로 한 코로나19 확산의 범위와 빈도가 늘어났고, 속도 역시 빨라졌음이 밝혀졌다. 또한 코로나19 확산의 매개 역할을 한 지역 역시 늘어나 바이러스가 산발적으로 퍼져나간 사실이 다시 한 번 확인되었다. 다만 코로나19 발생을 도면으로 확인하면 수도권의 역할이 유행 시기가 진행될수록 점차 강해진 것으로 표현된 반면, 중심도 값을 토대로 밝혀진 사실은 유행 초기에는 수도권이 코로나19 확산의 주요 역할을 하였으나 3차 유행 시기로 갈수록 지방 대도시의 역할 역시 강해졌다는 것이다. 이를 통해 코로나19 팬데믹이 장기화되면서 코로나19 바이러스 전파 통로가 보다 다양해지고 도시 간 확산세가 뚜렷해졌기 때문에 수도권 중심의 방역에

한계가 있음을 알 수 있다.

지역 위계별 확산 패턴에 있어서는 인구 규모가 큰 지역일수록 코로나19 유출과 유입 빈도가 높아 코로나19 확산에 중요한 역할을 한 것으로 나타났고, 직접적 전파뿐만 아니라 교량적 역할 역시 왕성하게 한 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 코로나19 역시 도시 규모와 역할에 따라 바이러스가 고차위 도시에서 퍼져 나간다는 위계적 확산 모델을 따르고 있다는 사실을 알려준다. 단순히 서울이나 수도권 지역에서 코로나19 발생 빈도가 높은 것이 아니라, 인구 규모가 큰 지방 도시가 시간이 지날수록 코로나19 핫스팟으로 대두된다는 사실은 단순히 수도권과 지방 도시로 구분해서 적용되는 방역 조치가 도시 위계에 맞춰 더욱 세분화되어야 하며, 특히 가장 큰 핫스팟인 수도권과의 관계를 함께 고려하여야 한다는 사실을 시사한다.

## 2. 연구의 한계 및 향후 과제

본 논문은 코로나19의 공간적 확산 패턴과 지역 간 감염 네트워크를 유형 시기별로 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 구득 가능한 지난 1년 4개월 동안의 확진자 발생 자료를 활용하여 코로나19를 발생지를 기준으로 도면화하고 발생지-도착지 간 네트워크를 시·군·구 단위로 분석하였다. 하지만 코로나19 자료는 역학 조사 완료 여부에 따라 구체적인 정보가 변동 가능하며, 감염경로상 지역 확인이 어렵거나 단순 대면접촉에 의한 전파의 경우 초기 발생지 확인이 매우 어렵기 때문에 전체 자료 중 약 30%만이 분석에 활용할 수 있었다. 또한 1차 시기에 가장 문제가 되었던 대구와 경북을 포함한 일부 지자체 자료가 제외되어 있어, 분석 결과 해석에 약간의 한계가 있다.

자료의 한계에도 불구하고, 코로나19의 공간적 확산 패턴과 구조를 시각화 자료와 수치로 확인한 논문은 선행연구와 차별되며, 향후 정부의 방역 정책 개선에 있어 매우 중요한 근거가 될 수 있다. 특히 바이러스 확산에 있어 실제 지역 간 관계를 확인하는 것은 코로나19의 지역 외 확산 방지에 큰 도움을 줄 수 있다. 따라서 단순히 코로나19 발생을 지역별 발생률로만 파악하기 보다는, 공간적 차원에서 코로나19의 확산이 어떻게 일어나고 있는가를 구체적으로 추적하고 분석하는 연구는 지속되어야 한다. 특히 최근 신규 확진자 수가 증폭하고 있으며, 여름휴가 등으로 인하여 지역 간 이동 빈도가 늘어나고 있는 시점에서 지역 간 코로나19 확산을 추적하고 전파를 차단하는 것은 우선적으로 이루어져야 하는 일이므로, 추가적인 자료 구축을 통하여 코로나19의 공간적 확산 패턴을 확인하는 것이 필요하다. 또한 코로나19 핫스팟 및 매개 지역으로 확인된 지역에서 높은 비중을 차지하는 감염 경로가 무엇인지를 확인하는 것은 보다 효과적인 방역을 위해 필수적이므로, 공간역학을 토대로 한 지역 간 코로나19 확산과 접촉 경로에 대한 보다 심도 있는 고찰이 요구된다. 이에 더해 지역 간 전파에 있어 통행 목적이 출퇴근이나 등교와 같이 정기적인 것인지, 쇼핑이나 여가 등과 같이 일시적인 것인지에 따라 방역 방법이나 효과 역시 달라질 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 바이러스 전파에 있어 통행 목적이나 시계열적 차이 등이 추가적으로 반영되면 보다 실효성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 김상조, 정운희, 이진희. 2012. 도시정책 전환기의 도시기본계획제도 개선을 위한 운용실태 분석 연구. 안양: 국토연구원.  
Kim Sang-Jo, Jeong Yun Hee and Lee Jin Hui. 2012.

- Improving the Comprehensive Plan According to Varying Circumstances*. Anyang: Korea Research Institute for Human Settlements.
2. 박선엽, 한대권. 2012. 벡터매개 질병 공간역학을 중심으로 한 보건지리학의 최근 연구. *대한지리학회지* 47권, 5호: 677-699.  
Park Sunyurp and Han Daikwon. 2012. Reviews in medical geography: Spatial epidemiology of vector-borne diseases. *Journal of the Korean Geographical Society* 7, no.5: 677-699.
  3. 박수은. 2020. 코로나바이러스감염증-19의 바이러스 특징, 전파 및 임상 양상. *Pediatric Infection & Vaccine* 27권, 1호: 1-10.  
Park Su Eun. 2020. Epidemiology, virology, and clinical features of SARS-CoV-2. *Pediatric Infection & Vaccine* 27, no.1: 1-10.
  4. 이진희. 2016. 지역적 건강불평등과 개인 및 지역수준의 건강결정요인. *보건사회연구* 36권, 2호: 345-384.  
Lee Jin Hui. 2016. The regional health inequity, and individual and neighborhood level health determinants. *Health and Social Welfare Review* 36, no.2: 345-384.
  5. 이진희, 박민숙, 이상원. 2021. 수도권 지역 코로나바이러스 감염증-19 발생 시기별 감염경로 다이내믹스. *보건사회연구* 41권, 2호: 7-26.  
Lee Jin Hui, Park Min Sook and Lee Sangwon. 2021. The transmission dynamics of SARS-CoV-2 by settings in three waves in the Seoul Metropolitan Area in South Korea. *Health and Social Welfare Review* 41, no.2: 7-26.
  6. 이진희, 박정호, 이경주. 2020. 감염병 대응을 위한 공간정책 과제. 세종: 국토연구원.  
Lee Jin Hui, Park Jung Ho and Lee Gyoungju. 2020. *Planning Policy Agenda for Responding to Infectious Diseases*. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
  7. 장진화, 김영화, 김유연, 염한솔, 황인섭, 박광숙, 박영준 외. 2021. 코로나바이러스감염증-19 국내 주요 집단발생 1년간 특징, 주간 건강과 질병 14권, 9호: 482-495.  
Jang Jinhwa, Kim Younghwa, Kim Yoo-Yeon, Yeom Hansol, Hwang Insob, Park Kwangsuk and Park Youngjoon et al. 2021. Coronavirus Disease-19 one-year outbreak major cluster infection report as of January 19, 2021, in the Republic of Korea. *Journal of Korea Disease Control and Prevention Agency* 14, no.9: 482-495.
  8. 최병두. 2015. 메르스 사태의 지리학과 생명권력의 정치. *공간과 사회* 25권, 3호: 173-192.  
Choi Byung-Doo. 2015. Geography of MERS outbreak and politics of bio-power. *Korean Association of Space & Environment Research* 25, no.3: 173-192.
  9. 코로나바이러스감염증-19. <http://ncov.mohw.go.kr/> (2021년 6월 3일 검색).  
COVID-19. <http://ncov.mohw.go.kr/> (accessed June 3, 2021).
  10. 허중연. 2020. 코로나바이러스감염증-19 초기 유행의 임상 역학적 특성. *대한내과학회지* 95권, 2호: 67-73.  
Heo Jung Yeon. 2020. Clinical and epidemiological characteristics of coronavirus disease 2019 in the early stage of outbreak. *Korean J. Med.* 95, no.2: 67-73.
  11. Adler, P., Florida, R. and Hartt, M. 2020. Mega regions and pandemics. *Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie* 111, no.3: 465-481. <https://doi.org/10.1111/tesg.12449>
  12. Ayoub, H. H., Chemaitelly, H., Mumtaz, G. R., Seedat, S., Awad, S. F., Makhoul, M. and Abu-Raddad, L. J. 2020. Characterizing key attributes of the epidemiology of COVID-19 in China: Model-based estimations. *Global Epidemiology* 2: 100042. <https://doi.org/10.1016/j.gloepi.2020.100042>
  13. Bastian, M., Heymann, S. and Jacomy, M. 2009. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media* 3, no.1: 361-362. <https://ojs.aaai.org/index.php/ICWSM/article/view/13937>
  14. Cao, K., Yang, K., Wang, C., Guo, J., Tao, L., Liu, Q. and Gehendra, M. et al. 2016. Spatial - temporal epidemiology of tuberculosis in mainland China: an analysis based on Bayesian theory. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13, no.5: 469-477. <https://doi.org/10.3390/ijerph13050469>
  15. Cheong, K. H. and Jones, M. C. 2020. Introducing the 21st century's New four horsemen of the coronapocalypse. *BioEssays* 42, no.7: 2000063. <https://doi.org/10.1002/bies.202000063>
  16. Cliff, A. D., Ord, J. K., Haggett, P. and Versey, G. R. 1981. *Spatial Diffusion: an Historical Geography of Epidemics in an Island Community*. Cambridge: Cambridge University Press.
  17. Congdon, P. 2016. Spatiotemporal frameworks for infectious

- disease diffusion and epidemiology. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13, no.12: 1261. <https://doi.org/10.3390/ijerph13121261>
18. Cuadros, D. F., Xiao, Y., Mukandavire, Z., Correa-Agudelo, E., Hernández, A., Kim, H. and MacKinnon, N. J. 2020. Spatiotemporal transmission dynamics of the COVID-19 pandemic and its impact on critical healthcare capacity. *Health & Place* 64: 102404. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2020.102404>
  19. DeFries, R., Agarwala, M., Baquie, S., Choksi, P., Dogra, N., Preetha, G. S. and Khanwilkar, S. et al. 2020. Post-lockdown spread of COVID-19 from cities to vulnerable forest-fringe villages in Central India. *Current Science* 119, no.52: 52-58.
  20. Fortaleza, C. M., Guimarães, R. B., Catão, R. D., Ferreira, C. P., Berg de Almeida, G., Nogueira Vilches, T. and Pugliesi, E. 2021. The use of health geography modeling to understand early dispersion of COVID-19 in São Paulo, Brazil. *PLoS One* 16, no.1: e0245051. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245051>
  21. Fruchterman, T. M. and Reingold, E. M. 1991. Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience* 21, no.11: 1129-1164.
  22. Golub, A., Gorr, W. L. and Gould, P. R. 1993. Spatial diffusion of the HIV/AIDS epidemic: Modeling implications and case study of AIDS incidence in Ohio. *Geographical Analysis* 25, no.2: 85-100.
  23. Hamidi, S., Sabouri, S. and Ewing, R. 2020. Does density aggravate the COVID-19 pandemic? Early findings and lessons for planners. *Journal of the American Planning Association* 86, no.4: 495-509. <https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1777891>
  24. Hellewell, J., Abbott, S., Gimma, A., Bosse, N. I., Jarvis, C. I., Russell, T. W. and Munday, J. D. et al. 2020. Feasibility of controlling COVID-19 outbreaks by isolation of cases and contacts. *The Lancet Global Health* 8, no.4: e488-e496. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30074-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30074-7)
  25. Hornsby, K. 2003. Spatial diffusion: conceptualizations and formalizations. documento de trabajo del National Center for Geographic Information and Analysis and the Department of Spatial Information Science and Engineering, University of Maine. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.36.8177&rep=rep1&type=pdf>
  26. Jones, R. C. 2021. The spatial diffusion of covid-19 in Texas. *The Social Science Journal*. <https://doi.org/10.1080/03623319.2021.1926148>
  27. Kim, S. and Castro, M. C. 2020. Spatiotemporal pattern of COVID-19 and government response in South Korea (as of May 31, 2020). *International Journal of Infectious Diseases* 98: 328-333.
  28. Kucharski, A. J., Russell, T. W., Diamond, C., Liu, Y., Edmunds, J., Funk, S. and Eggo, R. M. 2020. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *The lancet Infectious Diseases* 20, no.5: 553-558.
  29. Lai, C. C., Shih, T. P., Ko, W. C., Tang, H. J. and Hsueh, P. R. 2020. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 and coronavirus disease-2019: The epidemic and the challenges. *International Journal of Antimicrobial Agents* 55, no.3: 105924. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>
  30. Lee Jin Hui and Lim Seunghoo. 2018. The selection of compact city policy instruments and their effects on energy consumption and greenhouse gas emissions in the transportation sector: The case of South Korea. *Sustainable Cities and Society* 37: 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.006>
  31. Liu, J., Hao, J., Sun, Y. and Shi, Z. 2021. Network analysis of population flow among major cities and its influence on COVID-19 transmission in China. *Cities* 112: 103138. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103138>
  32. Liu, Y., Gu, Z. and Liu, J. 2021. Uncovering transmission patterns of COVID-19 outbreaks: A region-wide comprehensive retrospective study in Hong Kong. *EClinicalMedicine*: 100929. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100929>
  33. Mao, Y., He, R., Zhu, B., Liu, J. and Zhang, N. 2020. Notifiable respiratory infectious diseases in China: a spatial - temporal epidemiology analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, no.7: 2301. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072301>
  34. Mukandavire, Z., Nyabadza, F., Malunguza, N. J., Cuadros, D. F., Shiri, T. and Musuka, G. 2020. Quantifying early

- COVID-19 outbreak transmission in South Africa and exploring vaccine efficacy scenarios. *PLoS One* 15, no.7: e0236003. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236003>
35. Rabino, G. A. and Occelli, S. 1997. Understanding spatial structure from network data: theoretical considerations and applications. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.2199>
36. Sabel, C. E., Pringle, D. and Schærström, A. 2010. Infectious disease diffusion. In *A Companion to Health and Medical Geography*, 111-132. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
37. Saraswathi, S., Mukhopadhyay, A., Shah, H. and Ranganath, T. S. 2020. Social network analysis of COVID-19 transmission in Karnataka, India. *Epidemiology & Infection*: 148. e230. <https://doi.org/10.1017/S095026882000223X>
38. Teller, J. 2021. Urban density and Covid-19: towards an adaptive approach. *Buildings and Cities* 2, no.1: 150-165. <http://doi.org/10.5334/bc.89>
39. Warf, B. 2010. Urban hierarchy. In *Encyclopedia of Geography* 1, 2950-2951. SAGE Publications, Inc.
40. Wasserman, S. and Faust, K. 1994. *Social Network Analysis: Methods and applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
41. Yi, H., Ng, S. T., Farwin, A., Pei Ting Low, A., Chang, C. M. and Lim, J. 2021. Health equity considerations in COVID-19: geospatial network analysis of the COVID-19 outbreak in the migrant population in Singapore. *Journal of Travel Medicine* 28, no.2: 159.
42. Zhu, D., Ye, X. and Manson, S. 2021. Revealing the spatial shifting pattern of COVID-19 pandemic in the United States. *Scientific Reports* 11, no.1: 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87902-8>
43. WHO COVID-19 dashboard. <https://covid19.who.int/info/> (accessed March 24, 2021).

- 논문 접수일: 2021. 7. 20.
- 심사 시작일: 2021. 8. 12.
- 심사 완료일: 2021. 9. 9.

## 요약

주제어: 코로나19, 공간적 확산, 네트워크 분석, 공간역학

본 논문의 목적은 코로나19 발생지 자료를 토대로 유행 시기별 코로나19의 공간적 확산 패턴과 방향성을 분석하는 것이다. 기존 연구와 달리 코로나19 발생지를 기준으로 감염병이 시간이 흐를수록 공간적으로 어떻게 확산되는지, 주요 역할을 하는 지역이 어디인지, 각 지역 간 영향력이 어떻게 되는가 등을 살펴보았다. 그 결과 코로나19는 서울 및 수도권을 중심으로 인접성과 연결성에 따라 공간적으로 확산되었으며, 3차 유행으로 갈수록 코로나19 확산의 범위와 빈도, 속도가 빨라졌다. 또한 팬데믹 초기에는 서울 및 수도권이 코로나19 확산에 가장 큰 역할을 하였으나,

시간이 지날수록 이러한 역할이 지방 대도시로 확산되면서 보다 산발적인 감염이 일어난 것으로 확인되었다. 이는 팬데믹 상황이 장기화될수록 코로나19 전파 통로가 다양해지고 도시 간 전파 역시 늘어나 특정 지역에 초점을 맞춘 방역에 한계가 있을 수 있음을 시사한다. 또한 지역 위계별로 인구 규모가 큰 지역일수록 코로나19 유출입 빈도가 높아 확산에 중요한 역할을 하였으며, 지역 간 전파에 있어서도 매개 지역이 된 것으로 나타났다. 이는 수도권과 지방으로 이분화된 방역 조치가 도시의 규모와 타 지역과의 연결성 등을 토대로 보다 세분화되어야 함을 알려준다.