

시간대에 따른 공공 자전거 네트워크의 동적 변화 탐색: 서울시 사례*

서 일 정(제1저자)

경기대학교 소프트웨어경영대학 산업경영정보공학과 (교수)

Exploring Dynamic Change in Public Bicycle Networks over Time of Day: The case of Seoul

Seo, Il-Jung(First Author)

College of Software and Management, Kyonggi University (Professor)

Abstract

This study examined the structural features of public bicycle networks at different times of day. The data comprised 10,113,919 travels between 2,741 bicycle stations in Seoul during October 2023. The networks were constructed on the basis of this data and their structure was subsequently analysed. Our findings indicate that the degree distribution does not adhere to a power law consistently across all times of day. Furthermore, the networks exhibit small-world properties throughout all times of day, with small-world coefficients correlating with average travel distances. Stations are geographically clustered, with the distribution and size of these clusters varying by time of day. Ultimately, we consolidated these station-level networks into cluster-level networks, enabling a visual representation of inter-cluster travel and revealing key patterns.

* 본고는 한국서비스경영학회 2024년 춘계학술발표대회에서 발표한 내용을 기반으로 재작성한 것임

Keywords : Public Bicycle, Network Dynamics, Network Analysis, Seoul
 접수일(2024년 05월 13일), 수정일(2024년 06월 17일), 게재확정일(2024년 06월 25일)

I. 서론

공공 자전거는 지하철과 버스 등 기존의 대중교통수단을 연계 또는 대체하고 소음 공해와 대기오염을 줄일 수 있는 친환경 교통수단으로 인식되면서 암스테르담, 파리, 몬트리올, 뉴욕, 보스턴, 워싱턴, 상하이 등 전 세계 도시에서 도입 및 운영되고 있다. 국내의 경우 공공 자전거 구축사업이 2008년에 국가지원 중점사업으로 지정되면서 서울시를 포함하여 2022년 말 기준 전국 71개 지방자치단체에서 공공 자전거 서비스를 운영하고 있다(행정안전부, 2023). 공공 자전거 서비스의 효율적인 관리와 운영을 위해서는 공공 자전거 이용자들의 이동 패턴을 파악하고 이를 기반으로 서비스를 제공하는 것이 중요하다. 공공 자전거 이용을 네트워크로 구조화하고 그 네트워크의 구조적 특성을 이해하면 공공 자전거 서비스의 이용 패턴을 파악하고 최적화하는 데 도움이 될 수 있다(Wu and Kim, 2020). 네트워크 분석은 시스템의 구조와 동작을 이해하는 데 매우 효과적인 방법으로, 자전거 대여소(노드)와 이들을 연결하는 경로(링크)를 시각적으로 표현하고 분석할 수 있다. 이를 통해 공공 자전거의 이동 패턴과 전체 시스템의 구조를 포괄적으로 이해할 수 있다. 이러한 배경으로 네트워크 분석 방법을 이용하여 공공 자전거 서비스의 이용 패턴을 분석한 다수의 연구가 수행되었다(예를 들어, 심형욱과 이영인, 2019; Wu and Kim, 2020; 서일정과 조재희, 2021; Builes-Jaramillo and Lotero, 2022).

지금까지 공공 자전거 네트워크에 대한 연구는 주로 공공 자전거를 이용한 이동의 지리공간적 분석에 집중되었고 시간적 변화에 대한 고려가 상대적으로 부족하였다. 이에 본 연구는 공공 자전거 네트워크의 동적 변화에 초점을 맞추어 시간대에 따라 네트워크의 구조적 변화를 살펴보았다. 하루 중 시간대에 따라 공공 자전거를 이용하는 목적이 상식에 기반하여 다르다고 가정할 수 있다. 예를 들어, 아침에는 주로 출근이나 등교를 위해 공공 자전거를 이용하고 저녁에는 귀가 또는 여가를 즐기기 위해 공공 자전거를 이용할 수 있다. 이러한 목적의 차이는 공공 자전거의 시간대별 이용 패턴에 영향을 미치고 네트워크의 구조에 반영될 것이다. 따라서 시간대별 공공 자전거 네트워크 분석을 통한 공공 자전거 이용 패턴에 대한 이해는 공공 자전거 서비스의 관리와 운영에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 본 연구의 구체적인 목적은 1) 시간대별로 공공 자전거 네트워크의 구조적 특성을 분석하고, 2) 시간대별 특성의

차이가 공공 자전거 서비스 운영에 시사하는 바를 논의하는 것이다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해, 서울시에서 운영하는 공공 자전거 서비스인 따릉이를 대상으로 데이터를 수집하고 분석하였다. 2015년 10월 정식으로 운영을 시작한 따릉이는 서울시민의 생활교통수단으로 자리 잡아 가면서 매년 이용이 증가하고 있다. 서울시는 2023년 현재 45,000여 대의 자전거와 2,762여 개의 대여소를 운영 중이다. 2장에서는 공공 자전거 네트워크에 대한 선행 연구들을 소개하였다. 3장에서는 데이터 수집 및 전처리 과정을 서술하고, 공공 자전거 네트워크의 구조적 특성을 측정하는 지표들을 소개하고 측정 결과를 제시하였다. 그리고 4장에는 연결정도 분포 분석, 작은 세상 네트워크 분석, 군집 분석을 실시한 결과를 기술하고 해석하였다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 시사점을 논하였다.

II. 선행 연구

공공 자전거 시스템은 자전거 이동에 관한 복잡한 네트워크 구조를 가지며, 이를 최적화하고 분석하기 위해 다양한 네트워크 분석 방법이 적용되었다. 본 장에서는 네트워크 분석을 활용한 공공 자전거 시스템에 관한 주요 연구들을 살펴보았다.

2.1 이동 패턴 분석

이동 패턴 분석은 정류장 간 자전거 이동의 경로와 양을 분석하여, 네트워크 내에서 자전거의 주요 이동을 이해하는 데 사용되었다.

Lathia et al.(2012)은 런던의 공공 자전거 시스템에서 자전거 이동 경로와 사용 패턴을 분석하여, 자전거 이동의 주요 흐름을 파악하였다. 시간대별 자전거 이동 패턴을 분석하여, 자전거가 주로 어떤 경로를 통해 이동하는지를 시각화하였다.

Fishman et al.(2015)은 호주의 멜버른과 브리즈번에서 공공 자전거 사용자의 인구 통계를 분석하여, 사용자들이 주로 젊은 성인들이며, 중간 거리의 이동에 공공 자전거를 사용하는 경향이 있음을 보여주었다. 또한 공공 자전거 사용은 대중교통과의 통합을 통해 증가할 수 있음을 강조하였다.

2.2 네트워크 중심성 분석

네트워크 중심성 분석은 공공 자전거 시스템에서 중요한 대여소를 식별하고, 자전

거 이동의 주요 경로를 파악하는 데 사용되었다.

García-Palomares et al.(2012)는 마드리드의 공공 자전거 시스템을 분석하여, 네트워크 내 대여소의 위치와 자전거의 회전율을 최적화하기 위한 공간적 분석을 수행하였다. 대여소의 위치와 네트워크 구조가 자전거 이용의 효율성에 중요한 영향을 미친다는 것을 발견하였다.

Lin et al.에(2013)은 대만 타이베이시의 공공 자전거 시스템을 분석하여, 대여소의 위치와 네트워크 연결성이 자전거 이용에 미치는 영향을 평가하였다. 대여소의 최적 위치 선정이 공공 자전거 시스템의 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 제안하였다.

심형욱과 이영인(2019)은 따릉이 서비스의 이용률 개선을 위해 네트워크 중심성 지표를 활용한 대여소별 자전거 보유대수 선정 방안을 제안하였다. 서울시 종로구를 대상으로 1년 동안 발생한 따릉이 서비스를 이용한 대여소별 통행 정보를 분석하였다. 대여소별 위세 중심성을 측정하고 추세분석과 상관분석을 실시하였다.

2.3 네트워크 특성 분석

네트워크 특성 분석은 공공 자전거 시스템이 효율적으로 작동하는 데 필요한 구조적 특성을 이해하고, 이를 기반으로 시스템을 최적화하는 데 사용되었다.

Yao et al.(2019)는 자전거 공유 시스템의 특성을 이해하기 위해 네트워크 방법을 적용하여 중국 난징의 자전거 공유 시스템의 대여소 간 관계를 분석하였다. 공공 자전거 시스템의 실시간 데이터를 기반으로 여러 지역의 공공 자전거 네트워크를 구축하고, 연결정도, 강도, 방사 거리, 군집 구조를 분석하고 비교하였다.

Wu and Kim(2020)은 네트워크 이론과 공간적 자기상관관계 분석 접근법을 사용하여 자전거 공유 시스템의 구조적 특성과 공간적 군집 패턴을 살펴보았다. 미국, 캐나다, 중국에서 운영하는 자전거 공유 시스템의 네트워크를 분석한 결과에 의하면, 규모가 큰 네트워크가 중간 규모의 네트워크에 비해 대여소의 연결성과 접근성이 상대적으로 낮았으며, 연결성과 접근성이 높은 대여소는 도심에 집중되어있는 것으로 나타났다.

서일정과 조재희(2021)는 코로나19 전후로 따릉이 이용의 패턴 변화를 탐색하기 위하여 기술통계와 네트워크 분석을 이용하였다. 분석 결과에 의하면, 코로나19 이후 평균가중연결과 평균군집계수는 감소하였고 모듈성은 증가한 것으로 나타났다. 그리고 커뮤니티 분석을 통해 서울시 북쪽에 위치한 군집들은 코로나19 전후의 지리적 분포가 비슷한 반면, 남쪽에 위치한 군집들은 지리적 분포가 변화한 것을 보여주었다.

Builes-Jaramillo and Lotero(2022)는 콜롬비아 메데인의 자전거 공유 시스템을 탐색적 데이터 분석과 네트워크 이론 접근법을 이용하여 분석하였다. 사용자 특성(성별, 연령 등)에 따라 네트워크를 구분하였고 특성을 비교하였다. 분석 결과에 의하면, 여성 사용자 네트

워크는 남성 사용자 네트워크와 비교하여 평균연결, 평균가중연결, 밀도 및 평균군집계수는 뚜렷하게 낮은 반면, 지름과 평균경로길이는 높은 것으로 나타났다.

Li-Na and Jiang-Long(2023)은 Citi Bike 시스템을 통해 시간에 따라 변화하는 자전거 네트워크의 위상적 특성을 분석하였다. 네트워크 분석 모델을 사용하여 자전거 접근성을 연구하고 시간에 따른 네트워크 구조의 변화가 사용자 행동에 미치는 영향을 조사하였다.

III. 연구 방법

3.1 데이터 수집 및 처리

서울시에서 운영하는 공공 데이터 공유 서비스인 열린데이터광장에서 분석에 필요한 데이터를 수집하였다. ‘대여소 데이터’는 공공 자전거 대여소에 대한 데이터로 대여소 번호, 주소, 경도좌표, 위도좌표로 구성된 3,270개의 레코드가 포함되어 있다. ‘주행 데이터’는 5분 단위로 공공 자전거 주행을 집계한 데이터로, 공공 자전거를 대여한 날짜 및 시간, 출발지, 도착지, 주행건수, 주행시간, 주행거리가 포함되어 있다. 본 연구에서는 2023년 10월에 발생한 10,113,919개의 레코드가 포함되어 있는 주행 데이터를 사용하였다.

전체 주행 데이터에서 출발지 또는 도착지가 유효하지 않은 행(자전거 정비센터)을 삭제하였다. 출발지, 도착지, 날짜, 시간을 기준으로 주행건수, 주행시간, 주행거리의 합계를 계산하였다. 그리고 주행거리의 합계를 주행시간의 합계로 나누어 주행속도를 계산하고 주행속도가 유효하지 않은 행(1분 미만 또는 240분 초과)을 삭제하였다. 날짜를 기준으로 주중과 주말로 데이터를 분리하였다. 주말 데이터에는 토요일과 일요일뿐만 아니라 공휴일(개천절과 한글날)을 포함시켰다. 주중과 주말 데이터 각각을 시간에 따라 야간(0시~5시), 오전(6시~11시), 오후(12시~17시), 저녁(18시~23시)으로 분류하였다. 대여소를 노드로 하고 대여소 사이의 이동을 연결로 하였으며, 주행건수를 연결의 가중 값으로 하는 방향성이 있는 가중 네트워크를 구성하였다. 시간대별 공공 자전거 네트워크의 크기를 정리한 <표 1>을 보면, 노드 수는 시간대별로 큰 차이가 없지만, 연결 수와 가중 값 합계는 주중에는 저녁에 가장 많고 주말에는 오후에 가장 많은 것을 알 수 있다. 그리고 주중과 주말 모두 야간 시간대에 연결 수와 가중 값 합계가 가장 적은 것으로 나타났다.

<표 1> 시간대별 공공 자전거 네트워크의 크기

지표	주중				주말			
	야간	아침	오후	저녁	야간	아침	오후	저녁
노드 수	2,726	2,741	2,739	2,734	2,719	2,734	2,734	2,733
연결 수	61,719	168,352	246,395	263,220	58,071	116,070	216,979	180,983
가중 값 합계	246,071	2,003,600	2,187,532	2,580,076	181,123	600,805	1,600,905	1,266,806

3.2 주행과 네트워크 특성의 측정

3.2.1 주행 특성

주행 특성을 정리한 <표 2>를 보면, 오후와 저녁이 야간과 아침에 비하여 평균주행시간과 평균주행거리는 늘어나고 평균주행속도는 줄어든 것을 알 수 있다.

<표 2> 시간대별 공공 자전거의 주행 특성

지표	주중				주말			
	야간	아침	오후	저녁	야간	아침	오후	저녁
평균주행시간(분)	21	24	32	31	22	26	34	31
평균주행거리(미터)	2,845	3,233	4,115	5,350	3,050	3,371	4,375	4,108
평균주행속도(km/h)	9.30	8.70	8.04	8.52	9.18	8.64	7.98	8.16

3.2.2 네트워크 특성

네트워크의 구조적 특성을 확인할 수 있는 다양한 지표를 선정하여 측정하였다. 평균경로길이(L)는 전체 네트워크에 존재하는 모든 노드 쌍의 최단 경로에 존재하는 연결 수의 평균으로 측정하였다(Watts and Strogatz, 1998).

$$\text{<식 1> } L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$$

<식 1>에서 n 은 전체 노드의 개수이고 d_{ij} 는 노드 i 와 노드 j 사이의 최단 경로를

통과하는 연결 수이다. 공공 자전거 네트워크에서 경로는 사람의 이동이 아닌 자전거의 이동으로 간주하는 것이 타당하다. 예를 들어, 'a→b→c' 경로에서 a에 있던 자전거가 b를 거쳐 c에 있을 수 있지만, a에 있던 사람이 b를 경유하여 c로 이동하는 것은 아니기 때문이다. 따라서 공공 자전거 네트워크에서 평균경로길이가 짧다는 것은 특정 자전거가 전체 네트워크에 전역적으로 위치할 가능성이 높다는 것을 의미한다.

군집계수는 노드 사이의 군집 정도를 측정하는 것으로 각 노드의 지역 군집계수 (C_i)는 이웃들이 연결될 수 있는 확률로 측정하였다(Watts and Strogatz, 1998).

$$\text{<식 2> } C_i = \frac{l_i}{n_i(n_i - 1)}$$

<식 2>에서 l_i 는 노드 i 의 이웃 노드 사이의 실제 연결 수이고 n_i 는 노드 i 에 연결된 이웃의 수이다. 각 노드의 지역 군집계수를 평균하여 네트워크 수준의 전역 군집계수를 구하였다. 전역 군집계수는 전이성(transitivity)으로도 측정되며, 네트워크에 존재하는 전체 삼중항(triplet) 수에 대한 닫힌 삼중항(closed triplet) 수의 비율로 계산된다(Wasserman and Faust, 1994). 군집계수의 값이 클수록 이웃 노드들이 긴밀하게 연결되어 네트워크가 군집을 형성하는 경향이 있음을 의미한다.

작은 세상 네트워크는 군집계수가 높음에도 불구하고 평균경로길이가 짧은 특징을 갖는다(Watts and Strogatz, 1998). 네트워크의 작은 세상 특성을 정량화하는 시그마(σ)는 주어진 네트워크의 평균군집계수와 평균경로길이를 동등한 무작위 네트워크(equivalent random network)와 비교하여 계산된다(Humphries and Gruneý, 2008).

$$\text{<식 3> } \sigma = \frac{C/C_r}{L/L_r}$$

<식 3>에서 군집계수 C 와 평균경로길이 L 은 주어진 네트워크의 값이고, C_r 와 L_r 은 동등한 무작위 네트워크의 군집계수와 평균경로길이의 값이다. 시그마가 1보다 크면 네트워크가 작은 세상 네트워크의 특성이 있음을 의미한다. 네트워크의 작은 세상 특성을 정량화하는 또 다른 방법인 오메가(ω)는 네트워크의 군집계수를 동등한 격자 네트워크(equivalent lattice network)와 비교하고 평균경로길이를 동등한 무작위 네트워크와 비교하여 계산된다(Telesford et al., 2011).

$$\text{<식 4> } \omega = \frac{L_r}{L} - \frac{C}{C_l}$$

<식 4>에서 C_T 은 동등한 격자 네트워크의 군집계수이다. 오메가는 주어진 네트워크가 격자 네트워크 또는 무작위 네트워크와 얼마나 유사한지를 측정하는 값이다. 음수 값은 주어진 네트워크가 격자 네트워크와 유사하다는 것을 의미하며, 양수 값은 무작위 네트워크와 유사하다는 것을 의미한다. 0에 가까운 값은 주어진 네트워크가 작은 세상 네트워크의 특성이 있음을 의미한다.

모듈성(modularity)은 네트워크를 모듈 또는 군집으로 나누는 강도를 측정하는 지표이다(Newman, 2006). 모듈성은 같은 군집 내의 노드가 다른 군집의 노드에 비해서 얼마나 밀접하게 연결되어 있는지를 평가하는 것으로, 군집 내 실제 연결 수와 연결이 무작위로 분포된 경우 같은 군집에서 예상되는 연결 수 사이의 차이를 측정한다. 모듈성은 일반적으로 다음 공식을 사용하여 계산된다.

$$\text{<식 5> } Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \frac{s_i s_j + 1}{2}$$

<식 5>에서 m 은 네트워크에 존재하는 모든 연결 수이고, A_{ij} 는 노드 i 와 j 사이의 연결 수이다. k_i 와 k_j 는 각각 노드 i 와 j 의 연결 수이다. 그리고 네트워크를 두 개의 군집으로 나누었을 때 노드 i 가 군집 1에 속하면 s_i 는 1이 되고 그렇지 않으면 s_i 는 -1이 된다. 모듈성 값이 1에 가까울수록 네트워크가 군집 내 노드 간 연결은 많은 반면 군집 간 노드의 연결은 적은 군집 구조를 갖는다는 것을 의미한다. 군집 분석을 위해 모듈성을 최적화하는 루베인 알고리즘(Blondel et al., 2008)을 사용하였다.

연결동류성(degree assortativity)은 연결정도가 비슷한 노드 사이에 연결하려는 경향을 측정한다(Newman, 2003). 연결동류성은 상관계수를 사용하여 계산되고, 값의 범위는 -1에서 +1까지이다. 연결동류성 값이 +1에 가까우면 허브 사이의 연결이 존재하는 계층적 구조의 네트워크가 형성되었음을 나타내고, -1에 가까우면 네트워크의 연결이 고르게 분산되어 있음을 나타낸다. 0에 가까운 값은 무작위로 연결이 이루어지는 것으로, 연결정도가 노드의 연결에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

상호성(reciprocity)은 방향성 네트워크에서 노드들이 상호 연결될 가능성을 측정하는 지표이다(Garlaschelli and Loffredo, 2004). 상호성은 네트워크의 총 연결 수에 대한 상호 연결 수의 비율로 계산된다. 상호성 값이 0이면 상호성이 없음을 나타내며, 이는 네트워크의 연결이 완전히 단방향임을 의미한다. 상호성 값이 1이면 완벽한 상호성을 나타내며, 이는 네트워크의 모든 연결이 상호 또는 양방향임을 의미한다.

<표 3> 시간대별 공공 자전거 네트워크의 특성

지표	주중				주말			
	야간	아침	오후	저녁	야간	아침	오후	저녁
평균연결	22.64	61.42	89.96	96.28	21.36	42.46	79.36	66.22
평균경로길이	3.25	2.67	2.40	2.34	3.20	2.81	2.43	2.53
평균군집계수	0.29	0.41	0.44	0.43	0.28	0.36	0.43	0.42
전이성	0.20	0.34	0.33	0.31	0.17	0.28	0.32	0.29
모듈성	0.76	0.77	0.75	0.72	0.74	0.77	0.73	0.73
연결동류성	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.14	0.11	0.13
상호성	0.32	0.39	0.54	0.51	0.30	0.45	0.54	0.51

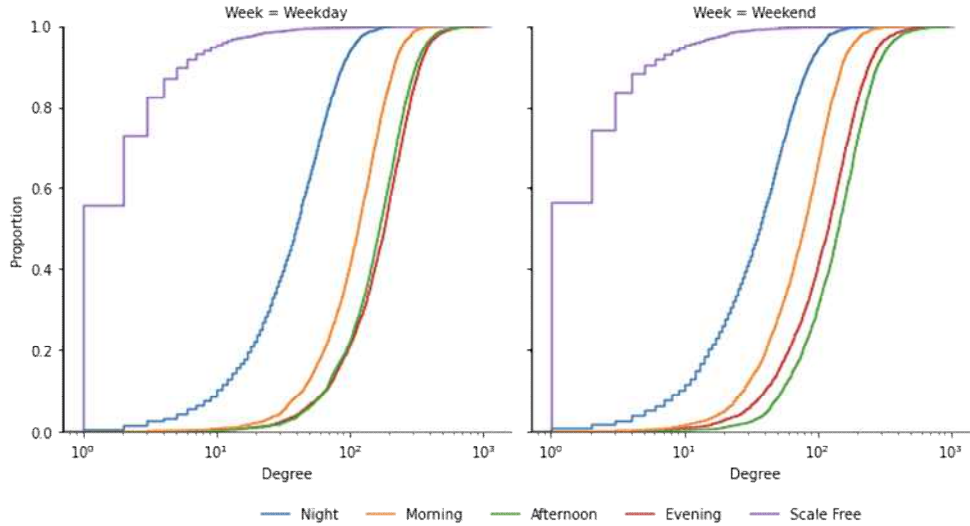
IV. 분석 결과

4.1 연결정도 분포 분석

연결정도(degree)는 특정 노드에 인접한 연결의 수이고(Barabási and Albert, 1999), 연결정도 분포 $P(k)$ 는 네트워크에서 연결정도가 k 인 노드의 비율로 정의된다. 네트워크의 연결정도 분포가 멱 법칙을 따르면 척도 없는 네트워크(scale-free network)라고 한다(Barabási and Albert, 1999). 척도 없는 네트워크는 연결정도가 낮은 노드가 대부분을 차지하고 연결정도가 높은 소수의 허브가 존재한다.

공공 자전거 네트워크가 척도 없는 네트워크인지 확인하기 위하여 연결정도의 분포를 분석하였다. <그림 1>은 무작위로 생성한 척도 없는 네트워크($N=2741$)와 시간대별 네트워크의 연결정도에 대한 경험적 누적 분포 함수(Empirical Cumulative Distribution Function)를 시각화한 것이다. 네트워크의 연결정도 분포는 척도 없는 네트워크의 연결정도 분포와 모양과 위치가 확연히 다름을 알 수 있다. 따라서 네트워크에는 허브가 존재하지 않는다고 할 수 있다. 이러한 결과는 <표 3>에서 제시한 연결동류성의 값이 모든 시간대에서 0에 가까운 것과 일치한다. 네트워크의 연결정도 분포를 시간대별로 비교해 보면, 모양은 비슷하고 분포의 위치가 다른 것을 확인할 수 있다. 이는 <표 3>에서 보는 바와 같이 평균연결의 차이로 설명할 수 있다.

<그림 1> 공공 자전거 네트워크의 연결정도 분포



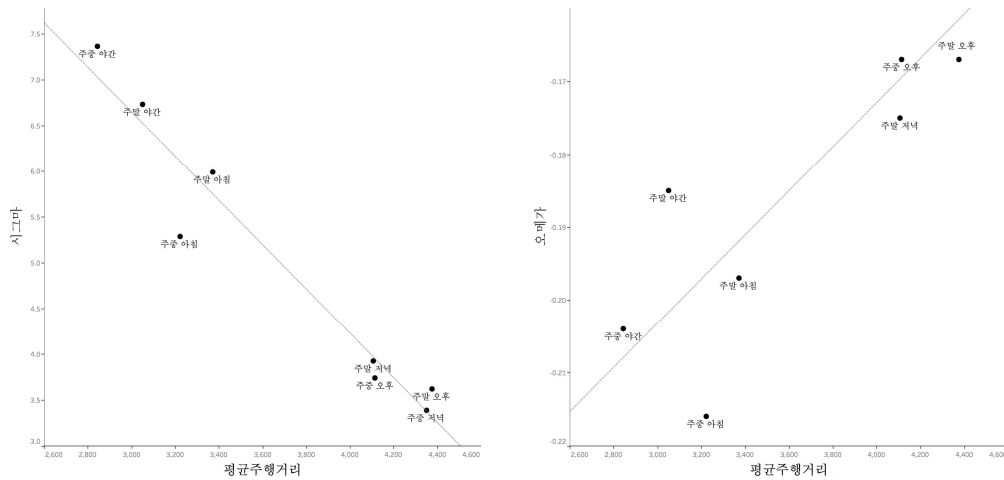
4.2 작은 세상 네트워크 분석

공공 자전거 네트워크가 작은 세상 네트워크의 특성을 갖는지 확인하기 위하여, 작은세계계수인 시그마(σ)와 오메가(ω)를 구하였다. <표 4>를 보면, 전체적으로 시그마 값은 1보다 크고 오메가 값은 음수 값으로 0에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 모든 시간대에 걸쳐 공공 자전거 네트워크는 작은 세상 네트워크라고 할 수 있다. 그런데 시간대별로 작은세계계수 값의 차이가 있는데, 주중에는 시간이 지나면서 시그마 값이 작아지고 오메가 값은 점점 더 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 주말에는 시그마 값이 오후까지 작아지다가 저녁에 약간 커진다. 그리고 오메가 값은 아침까지는 0에서 멀어지다가 오후에 0에 가까워지고 저녁에 다시 0에서 멀어진다. 작은세계계수와 평균주행거리 사이의 관계를 시각화한 <그림 2>를 보면, 평균주행거리가 길어지면서 시그마 값은 작아지고 오메가 값은 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

<표 4> 작은 세상 네트워크 특성

지표	주중				주말			
	야간	아침	오후	저녁	야간	아침	오후	저녁
시그마	7.36	5.29	3.74	3.39	6.73	5.99	3.62	3.92
오메가	-0.20	-0.22	-0.17	-0.15	-0.19	-0.20	-0.17	-0.18

<그림 2> 작은세상계수와 평균주행거리의 관계



1. 평균주행거리와 시그마의 관계

2. 평균주행거리와 오메가의 관계

4.3 군집 분석

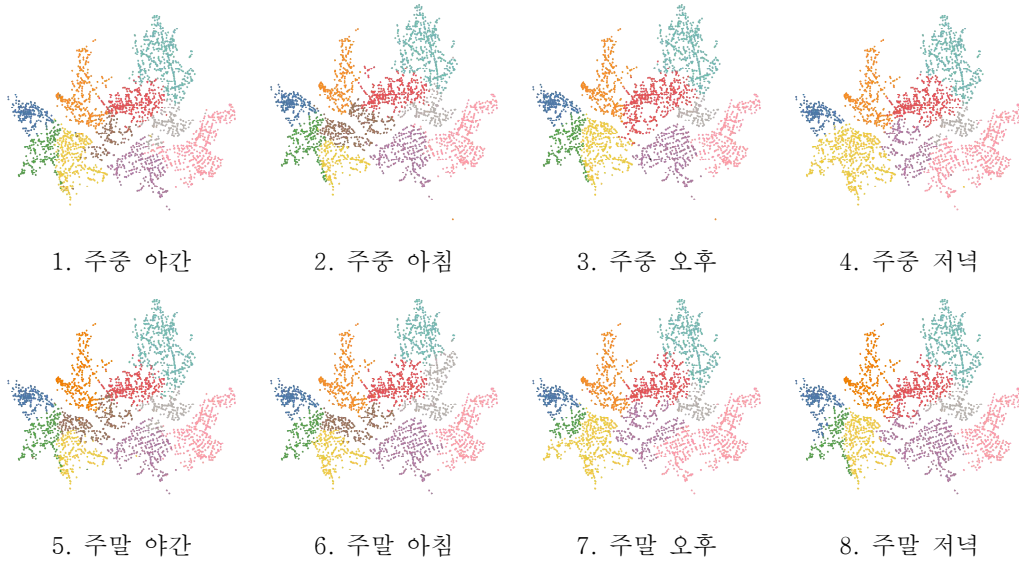
<그림 3>은 군집 분석의 결과를 지리적으로 시각화한 것으로, 시간대별 공공 자전거 네트워크에서 군집의 지리적 분포와 크기를 확인할 수 있다. 점은 대여소의 지리적 위치(경위도 좌표)를 나타내고 색상은 대여소의 군집을 나타낸다. 주중 저녁에는 녹색 군집과 노란색 군집이 합쳐져서 하나의 군집이 되었고, 보라색 군집과 분홍색 군집이 합쳐져서 하나의 군집이 되었다. 이는 주중 저녁에 두 지역 사이의 이동이 증가하면서 하나의 ‘이동 권역’이 되었다는 것을 의미한다. 갈색 군집은 군집의 위치와 크기의 변화가 가장 역동적인데 주중 아침에 남서쪽으로 커졌다가 오후에 사라지고, 저녁에 다시 등장하면서 오전과 비교하여 남동쪽으로 이동하였다. 주말에도 갈색 군

집은 야간과 아침에는 존재하다가 오후와 저녁에는 사라졌다. 갈색 군집은 여의도 지역으로 주중에는 아침과 저녁에 출퇴근을 위해 공공 자전거를 이용한 지역 내 이동이 활성화되고, 주말에는 여가를 위해 야간과 아침에 지역 내 이동이 활성화된다고 해석할 수 있다. 빨간색 군집은 주중 오후와 주말 저녁에 크기가 커졌고, 회색 군집은 주말 아침에 북동쪽으로 확장되었다. 파란색 군집, 주황색 군집, 청록색 군집은 주중과 주말 모두 시간대별로 위치와 크기에 큰 변화가 없었다. 이것은 이들 지역의 공공 자전거 이동은 주로 군집 내에서 이루어졌다는 것을 의미한다.

<표 5>는 시간대별로 군집의 밀도를 측정된 값으로 군집 내 이동의 정도를 확인할 수 있다. 전체적으로 오후, 저녁, 아침, 야간 순으로 군집의 평균 밀도가 높은 것을 확인할 수 있다. 파란색 군집과 회색 군집은 주중의 야간, 아침, 오후에 밀도가 높았다. 분홍색 군집과 녹색 군집은 이전 시간대와 비교하여 주중 저녁에 밀도가 급격히 낮아졌다. 주말의 경우, 야간에는 파란색과 회색, 아침에는 파란색과 녹색, 오후에는 녹색과 회색, 저녁에는 회색과 파란색의 밀도가 높았다.

<그림 4>는 대여소 수준의 네트워크를 군집 수준의 네트워크로 집계하여 군집 간 이동을 시각화한 것이다. 노드는 동일 군집의 대여소를 하나의 슈퍼 노드로 묶어서 표현한 군집이고, 연결은 군집 사이의 이동을 의미한다. 노드의 크기는 군집의 크기(대여소 개수)를 의미하고 노드의 위치는 군집의 중심이 되는 경위도 좌표에 표현하였다. 그리고 군집 사이의 이동량(주행건수)을 연결의 굵기로 표현하였다. 군집 네트워크에서 이동 패턴을 직관적으로 파악하기 위하여 주행건수가 1,000건 이상인 것만 연결로 표현하였다. 주요 패턴을 살펴보면, 주중에는 다른 시간대와 비교하여 야간에만 이동이 희박하지만 주말에는 야간과 아침의 이동이 희박한 것을 알 수 있다. 그리고 다른 시간대와 다르게 퇴근 시간대인 주중 저녁에 지리적으로 인접하지 않은 군집 사이의 연결(이동)을 확인할 수 있다. 마지막으로 주중에는 저녁의 이동이 가장 활발하고 주말에는 오후의 이동이 가장 활발한 것을 알 수 있다.

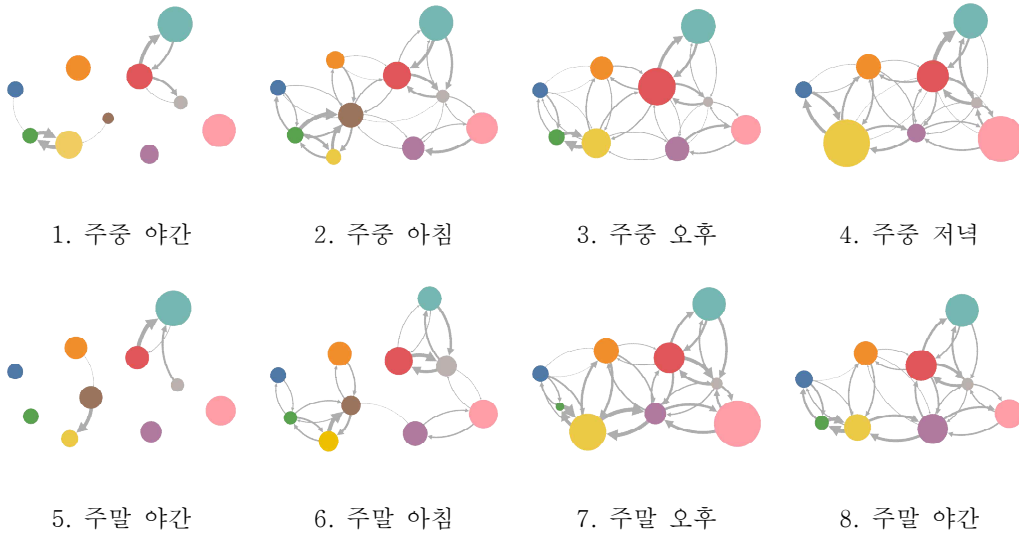
<그림 3> 시간대별 군집의 지리적 분포



<표 5> 시간대별 군집의 밀도

군집	주중				주말			
	야간	아침	오후	저녁	야간	아침	오후	저녁
파란색	0.13	0.38	0.46	0.45	0.12	0.25	0.39	0.28
주황색	0.05	0.20	0.22	0.22	0.06	0.11	0.19	0.16
빨간색	0.06	0.17	0.17	0.21	0.05	0.10	0.18	0.13
청록색	0.06	0.12	0.17	0.19	0.05	0.13	0.17	0.14
분홍색	0.05	0.14	0.20	0.14	0.05	0.11	0.12	0.16
자주색	0.05	0.12	0.17		0.04	0.07		0.09
노란색	0.06	0.20	0.19		0.08	0.12	0.14	0.16
녹색	0.09	0.21	0.27	0.15	0.08	0.19	0.51	0.22
갈색	0.06	0.14		0.20	0.05	0.12	0.16	
회색	0.12	0.31	0.54	0.46	0.11	0.14	0.45	0.36
평균	0.07	0.20	0.26	0.25	0.07	0.14	0.26	0.19

<그림 4> 시간대별 군집의 네트워크



V. 결 론

본 연구는 네트워크 분석 방법을 사용하여 공공 자전거 이용의 시간대별 특성과 패턴을 분석하였다. 이를 위하여 서울시 공공 자전거 서비스인 따릉이의 이용 데이터를 수집하여 시간대별로 네트워크를 구성하였다. 그리고 시간대별 네트워크의 구조적 특성에 관한 지표를 측정하고 연결정도 분포 분석, 작은 세상 네트워크 분석, 군집 분석을 실시하였다. 본 장에서는 분석 결과를 요약하고 그 시사점에 대해 논의한다.

첫째, 서울시 공공 자전거 네트워크의 연결정도 분포는 모든 시간대에서 멱 법칙을 따르지 않는 것으로 나타났다. 선행 연구(Zaltz et al., 2013; Yao et al., 2019)에서도 결과가 혼재되어 나타나는 것을 보면, 공공 자전거 네트워크의 연결정도 분포가 일반적으로 멱 법칙을 따른다고 할 수 없다. 이동 경로가 고정적인 다른 대중교통 시스템과 다르게 공공 자전거는 이동 경로를 이용자가 직접 선택하여 경로가 유동적이다(Wu and Kim, 2020). 공공 자전거를 이용한 이동이 다양한 경로에서 분산되어 발생한다면 경유 역할을 하는 허브가 존재하지 않을 수 있는 것이다. 다시 말해서, 공공 자전거 네트워크의 연결정도 분포가 전 시간대에 걸쳐 멱 법칙을 따르지 않는다는 것은 공공 자전거를 이용한 이동이 소수의 대여소에 집중되어 있는 것이 아니라 다수의 대여소에 분산되어 있다는 것을 의미한다. 따라서, 서울시 공공 자전거는 전 시간대에

걸쳐 다양한 경로에서 이용되고 있다고 해석할 수 있다.

둘째, 서울시 공공 자전거 네트워크는 모든 시간대에서 작은 세상 네트워크의 특성을 갖는 것으로 나타났다. 그런데 시간대별로 작은세상계수의 차이가 있는데, 이는 평균주행거리의 차이로 설명할 수 있다(시그마와 평균주행거리의 상관계수=-0.97, 오메가와 평균주행거리의 상관계수=0.85). 단거리 교통수단인 공공 자전거의 대여소는 지리적 근접성에 따라 군집이 형성된다. 그런데 주행거리가 길어지면 군집을 연결하는 군집 간 이동이 발생하고 결과적으로 공공 자전거 네트워크가 더 작은 세상 네트워크가 되는 것이다. 주행거리가 길어지는 오후와 저녁 시간대에 서울시 공공 자전거 네트워크는 더 작은 세상이 된다. 더 작은 세상이 된다는 것은 공공 자전거의 전역적 이동이 많아진다는 것을 의미한다. 따라서, 군집 간 장거리 이동이 많은 오후와 저녁 시간대에는 군집 사이에서 자전거를 배분하고, 군집 내 단거리 이동이 많은 야간과 아침 시간대에는 군집 내에서 자전거를 배분하는 것이 효과적일 수 있다.

셋째, 모든 시간대에서 모듈성 값이 높은 것으로 측정되어 서울시 공공 자전거 네트워크는 전 시간대에 걸쳐 군집 구조를 갖는다고 할 수 있다. 그리고 모듈성 값은 주중과 주말 모두 야간과 아침이 오후와 저녁과 비교하여 높은 것으로 나타났다. 이는 야간과 아침에는 통근 또는 통학을 목적으로 군집 내에서 단거리 이동이 많고, 오후와 저녁에는 운동 또는 레저를 목적으로 군집 사이의 이동이 많아지면서 발생한 결과라고 할 수 있다. 서울시설공단은 2024년 2월 29일 현재 자전거 정비와 배송을 위해 11개소의 지역센터를 권역(구)별로 운영하고 있다. 효율적인 자전거 정비와 배송을 위해 지역센터의 위치를 공공 자전거 네트워크의 하위 집단인 군집 단위로 재배치할 필요가 있다. 그리고 군집 간 이동이 많아지는 오후와 저녁에는 지역센터 사이의 유기적인 협업이 요구된다.

마지막으로, 군집 분석의 결과를 지리적으로 시각화하여 군집의 지리적 분포와 크기의 동적 변화를 확인하였으며 발견한 주요 패턴을 기술하였다. 또한 대여소 수준의 네트워크를 군집 수준의 네트워크로 집계 및 변환하여 군집 간 이동을 시각적으로 표현하였다. 이를 통해 군집간 이동의 패턴을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 파악한 시간대별 군집의 위치와 크기를 고려하여 지역센터를 설치하고 운영한다면, 공공 자전거 운영과 관리에 효율적일 것이다. 또한 군집 간 이동의 방향과 수량을 고려하여 자전거의 군집 간 배분에 활용한다면 효과적인 배분에 도움이 될 것이다.

선행 연구와 비교하여 본 연구의 차별점은 다음과 같다. 첫째, 기존 연구들이 시간적 측면에서 주중과 주말 간의 차이를 분석한 것에 비해, 본 연구는 하루 중 시간대에 따른 공공 자전거 네트워크의 동적 변화를 세밀하게 탐색하였다. 둘째, 측정의 복잡성으로 인하여 선행 연구에서 다루지 않은 시그마(σ)와 오메가(ω) 계수를 사용하여 공공 자전거 네트워크의 작은 세상 특성을 정량적으로 측정하였으며, 주행거리와의

인과 관계를 규명하였다. 셋째, 공공 자전거 네트워크 내의 군집을 식별하고 군집의 지리적 분포와 크기, 밀도를 시간대별로 분석하였다. 그리고 대여소 수준의 네트워크를 군집 수준으로 집계하고 시각적으로 표현하여 시간대별 군집 간 이동의 패턴을 확인하였다. 끝으로, 차별적인 분석의 결과를 기반으로 공공 자전거 서비스의 효율성과 만족도를 높일 수 있는 새로운 방안을 제시하였다.

본 연구의 한계점은 단일 도시를 대상으로 한 달 동안의 데이터를 분석하였다는 것이다. 본 연구에서는 계절적 요인으로 공공 자전거의 이용이 가장 많은 10월을 선택하여 시간대별 네트워크의 특성을 분석하였지만, 계절에 따라 공공 자전거의 이용 행태가 다르고 이를 반영한 네트워크 특성에도 차이가 있을 것이다. 그리고 향후에는 서울시 공공 자전거 시스템과 규모가 유사한 다른 도시의 공공 자전거 시스템과 비교하면서 유사점과 차이점을 살펴보는 것도 의의가 있을 것이다.

참고문헌

- 심형욱, 이영인 (2019), 네트워크 중심성 기반 서울시 공공자전거 서비스의 이용률 개선 방안 연구: 서울시 종로구 사례를 중심으로, *대한교통학회지*, 37(2), 124-134.
- 서일정, 조재희 (2021), 코로나 19 전후 서울시 공공 자전거 이용패턴의 변화, *한국빅데이터학회지*, 6(2), 139-149.
- 행정안전부 (2023), 2022년 기준 자전거 이용 현황, <https://www.mois.go.kr>.
- Barabási, A. L. and Albert, R. (1999), Emergence of scaling in random networks, *Science*, 286(5439), 509-512.
- Blondel, V. D., Guillaume, J. L., Lambiotte, R. and Lefebvre, E. (2008), Fast unfolding of communities in large networks, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10), P10008.
- Builes-Jaramillo, A. and Lotero, L. (2022), Spatial-temporal network analysis of the public bicycle sharing system in Medellín, Colombia, *Journal of Transport Geography*, 105, 103460.
- Fishman, E., Washington, S., Haworth, N. and Watson, A. (2015), Factors influencing bike share membership: An analysis of Melbourne and Brisbane, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 71, 17-30.
- García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J. and Latorre, M. (2012), Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach, *Applied Geography*, 35(1-2), 235-246.
- Garlaschelli, D. and Loffredo, M. I. (2004), Patterns of link reciprocity in directed networks, *Physical Review Letters*, 93(26), 268701.
- Humphries, M. D. and Gurney, K. (2008), Network 'small-world-ness': a quantitative method for determining canonical network equivalence, *PloS one*, 3(4), e0002051.
- Lathia, N., Ahmed, S. and Capra, L. (2012), Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 88-102.
- Lin, J. R., Yang, T. H. and Chang, Y. C. (2013), A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution, *Computers & Industrial Engineering*, 65(1), 77-86.

- Li-Na, W. and Jiang-Long, S. (2023), The time-varying of topological characteristics: Analysis based on the temporal network on public bikes, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Automation, Information and Computing*, 422-427.
- Newman, M. E. (2003), Mixing patterns in networks, *Physical Review E*, 67(2), 026126.
- Newman, M. E. (2006), Modularity and community structure in networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(23), 8577-8582.
- Telesford, Q. K., Joyce, K. E., Hayasaka, S., Burdette, J. H. and Laurienti, P. J. (2011), The ubiquity of small-world networks, *Brain Connectivity*, 1(5), 367-375.
- Wasserman, S. and Faust, K. (1994), *Social network analysis: Methods and applications*, Cambridge University Press.
- Watts, D. J. and Strogatz, S. H. (1998), Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, 393(6684), 440-442.
- Wei, S., Xu, J. and Ma, H. (2019), Exploring public bicycle network structure based on complex network theory and shortest path analysis: The public bicycle system in Yixing, China, *Transportation Planning and Technology*, 42(3), 293-307.
- Wu, C. and Kim, I. (2020), Analyzing the structural properties of bike-sharing networks: Evidence from the United States, Canada, and China, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 140, 52-71.
- Yao, Y., Zhang, Y., Tian, L., Zhou, N., Li, Z. and Wang, M. (2019), Analysis of network structure of urban bike-sharing system: A case study based on real-time data of a public bicycle system, *Sustainability*, 11(19), 5425.
- Zaltz Austwick, M., O'Brien, O., Strano, E. and Viana, M. (2013), The structure of spatial networks and communities in bicycle sharing systems, *PloS one*, 8(9), e74685.

*** 저자소개 ***

서 일 정 (ijseo@kyonggi.ac.kr)

광운대학교에서 경영학 박사학위를 취득하였다. 현재 경기대학교 소프트웨어경영대학 산업경영정보공학과 교수로 재직 중이다. 주요 연구 관심분야는 빅데이터, 데이터 시각화, 데이터 문해력, 네트워크 분석 등이다.