

세종시 공공자전거 ‘어울링’의 이용행태와 대중교통 연계성에 대한 공간회귀분석*

김재현 · 배장원[†]

한국기술교육대학교 산업경영학과

Spatial Regression Analysis on Usage Patterns and Public Transportation Connectivity of the Public Bicycle ‘Eoulling’ in Sejong City*

Jae Hyun Kim · Jang Won Bae

School of Industrial Management

Korea University of Technology and Education

■ Abstract ■

Public bicycles are known to enhance accessibility to public transportation and promote its use. In Sejong City, the public bicycle system ‘Eoulling’ was introduced with this goal in mind. A review of annual modal shares revealed that following the launch of Eoulling, bicycle usage increased, while bus usage declined.

This study aimed to investigate this phenomenon by analyzing the usage patterns of Eoulling through spatial regression analysis. Voronoi diagrams were used to set the space for each rental station, and data on land use and bus usage were utilized to analyze the purpose of Eoulling use and its connection with public transportation. The analysis was conducted separately for weekdays, weekends, and the entire period.

The results indicate that on weekdays, the presence of commercial facilities and bus usage significantly and positively affect Eoulling usage. This suggests that Eoulling is utilized for visiting commercial areas and serves as a First mile/Last mile mobility during weekdays. On the other hand, on weekends, a significant positive relationship with theme parks was observed, indicating that Eoulling is used for leisure purposes. Based on these findings, policy supplements are proposed to strengthen the integration of Eoulling with public transportation.

Keywords : Eoulling, Public Bicycle, Spatial Regression, Voronoi Diagram

논문접수일 : 2024년 11월 26일 논문게재확정일 : 2025년 04월 25일

논문수정일 : 2025년 03월 07일

* 이 논문은 2025년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

[†] 교신저자, jangwon_bae@koreatech.ac.kr

1. 서 론

공공자전거는 일정 요금을 지불하여 설치된 스테이션에서 자전거를 대여하고 반환할 수 있는 서비스를 제공하는 교통 시스템이다[5]. 1965년 네덜란드 Amsterdam에서 처음으로 공공자전거 서비스가 시도된 이후, 유인 대여소와 보증금 제도 등 다양한 변화를 거쳐 현재에 이르렀다[21]. 공공자전거는 주로 단거리 통행에 사용되며, 특히 출발지에서 대중교통 승차 지점까지의 과정(First Mile, FM)과 대중교통 하차 후 최종 목적지까지의 과정(Last Mile, LM)에서 이동 수단으로 활용되며 대중교통 이용을 촉진한다.

국내에서는 서울의 일부 지역에서 먼저 공공자전거 서비스가 도입되었고, 2008년 창원시에서 ‘누비자’라는 이름으로 공공자전거 정책이 시작되었다[11]. 이후 대전시 ‘타슈’, 고양시 ‘피프틴’, 서울시 ‘따릉이’, 세종시 ‘어울링’ 등 공공자전거 서비스가 전국적으로 확대되었다. 이러한 확산과 더불어 공공자전거 관련 연구도 활발히 진행되고 있으며, 자전거 재배치 문제와 이용 행태 분석 등 다양한 주제를 다루고 있다[6, 13, 15, 16].

세종시는 도시 설계 단계부터 대중교통 중심도시를 목표로 계획되었으며, 자전거 등 녹색 교통을 포함한 대중교통 수송 분담률이 70% 이상이 되는 것을 목표로 하고 있다[10]. 여기서 수송 분담률이란 총수송량에서 각 수송 부문별 수송량이 차지하는 비율을 의미한다[17]. 그러나 세종시의 대중교통 수송 분담률은 전국 각 지역과 비교하여 볼 때 낮은 수준이다[3]. <표 1>은 세종시의 연도별 수송 분담률을 나타낸다.

세종시는 대중교통 수송 분담률 목표 달성을 위해

<표 1> 세종시의 연도별 수송 분담률(%)

연도	17년	18년	19년	20년	21년
승용차	44	43.1	41	42	46.3
도보	40.4	42	44.5	45.4	42.2
버스	9.7	9.3	7	5.2	5.3
철도	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3
자전거	0.8	0.6	2.8	2.9	2.6
택시	3.3	3.4	2.8	2.6	2.2
기타	1.6	1.5	1.8	1.8	1.1

자전거 정책을 시행하고 있다[1]. 이 정책은 자전거 이용률 자체의 향상과 함께, 자전거를 FM/LM 이동 수단으로 작용하게 하여 대중교통 접근성 개선을 목적으로 하고 있다. 그 일환으로 2014년부터 공공자전거 ‘어울링’이 운영되고 있다. 그러나 <표 1>의 버스와의 자전거 수송 분담률에서 나타난 것처럼 어울링 도입 이후 자전거 이용은 증가하였지만, 버스 이용은 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 자전거가 FM/LM 이동 수단으로 작용하여 대중교통 접근성을 개선하는 역할을 충분히 하지 못하고, 독립적인 교통수단으로 사용되었을 가능성을 시사한다. 본 연구는 어울링 도입 이후 세종시 버스 수송분담률이 오히려 낮아진 현상을 규명하고자 어울링의 이용 행태를 공간회귀분석(Spatial Regression)을 통해 분석하고자 한다.

먼저 보로노이 다각형(Voronoi Diagram)을 활용하여 세종시를 각 어울링 대여소별 공간으로 세분화하였다. 그 후, 각 공간 내의 토지이용 정보와 버스 이용량 데이터를 바탕으로 어울링이 어떤 목적으로 이용되는지, 그리고 버스와의 연계성이 있는지를 확인하였다. 또한, 어울링 이용 패턴이 평일과 주말에 다르기 때문에 평일과 주말을 구분하지 않은 경우, 평일, 주말로 나누어 총 3가지 경우로 분석을 수행하였다.

본 연구는 공간회귀분석을 활용하여 세종시 공공자전거 어울링의 이용 행태를 정량적으로 분석하였다. 공간회귀분석 과정에서 공간 의존성(Spatial Dependence) 문제를 통제하여 분석을 수행하였다는 점과, 어울링과 대중교통 간의 연계가 어떻게 이루어지는지 파악할 수 있다는 점에 의의가 있다. 이를 통해 세종시의 공공자전거와 대중교통의 상호보완적 관계를 강화할 수 있는 정책적 시사점을 제공할 수 있다. 특히 주중과 주말의 이용 패턴 차이를 분석하여, 평일과 주말 각각의 이용 목적에 맞춘 정책 제안을 가능하게 한다.

2. 배경지식

2.1 선행연구

공공자전거의 FM/LM 이동 수단으로서 역할을 하

는지에 대한 기존 연구는 문헌 연구, 설문조사 기반 연구, 실증분석 등 다양한 방법론을 통해 진행되었다.

문헌 연구로는 Shaheen et al.[21]의 연구가 있다. 이들은 공유 모빌리티(카셰어링, 공공자전거 등)가 FM/LM에 미치는 영향을 종합적으로 검토하였다. 그 결과, 공공자전거가 FM/LM 이동 수단으로 활용되지만, 항상 그렇지는 않으며, 때로는 버스를 보완하기보다 대체하는 역할을 수행하기도 한다고 분석하였다.

설문조사 기반 연구로는 남궁옥 외[6]의 연구가 있다. 이들은 서울시 공공자전거 '따릉이' 회원을 대상으로 설문조사를 실시하여 공공자전거의 이용 패턴과 이용 목적 등을 파악하였다. 설문 결과, 약 20%의 이용자가 대중교통 환승 목적으로 따릉이를 사용하고 있어, 서울에서도 FM/LM 이동 수단으로 공공자전거를 이용하고 있음을 확인하였다.

실증분석으로는 안민수, 이창효[12], Radzimski et al.[20]의 연구가 있다. 두 연구 모두 공간회귀분석을 활용하여 공공자전거의 이용 행태를 분석하였다. 안민수와 이창효는 대전시의 '타슈'를 대상으로 대여, 반납, 첨두시간, 비첨두시간, 평일, 주말의 6가지 측면으로, 법정동을 기준으로 공간을 구분하여 공간회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 평일에는 통학 목적, 주말에는 레저 목적으로 공공자전거가 이용된다는 것을 확인하였다. 그러나, 공간회귀분석을 위한 공간 구분이 법정동을 기준으로 이루어졌기에, 관측치에 비해 설명변수가 많다는 한계점이 존재한다. 이는 계수 추정의 오류를 야기할 수 있다.

Radzimski et al.[20]은 폴란드 Poznań에서 공공자전거가 도시 이동의 공간 패턴에 어떻게 기여하는지를 분석하였다. 공공자전거 데이터와 버스 데이터를 활용하여 공간회귀분석을 수행하고, 보로노이 다각형을 활용하여 대여소별 공간을 설정하였다. 또한 대학, 극장, 쇼핑몰 등의 여부를 독립변수로 포함하여 공공자전거의 이용 목적을 파악하였다. 연구 결과, Poznań시에서는 공공자전거가 대중교통과 유의미한 관계가 있으며, 레저용으로 주로 사용된다는 결과를 얻었다. 그러나 이 연구는 시간적 요인을 고려하

지 못했다는 한계점이 있다.

본 연구는 세종시를 대상으로 연구를 수행하며 기존 실증연구에서 나타난 한계점을 보완하고자 한다. 법정동 단위로 분석할 경우 관측치가 부족하다는 한계점을 보완하고자 보로노이 다각형을 활용하여 각 대여소의 공간을 구축하여 연구를 수행하였다. 또한 시간적 요인을 고려하기 위해 평일과 주말을 구분하여 연구를 수행하였으며, 이용 패턴을 확인할 때 독립변수로 특정 시설의 유무 대신 토지이용 정보를 활용함으로써 공공자전거 이용 목적과 공간적 특성 간의 관계를 명확히 파악하고자 하였다.

2.2 보로노이 다각형(Voronoi Diagram)

보로노이 다각형은 평면 위에 존재하는 여러 점을 기준으로, 각 점에 가장 가까운 영역들로 분할한 것을 말한다[19]. 즉, 각 점은 그 점을 중심으로 하는 영역을 형성하며, 해당 영역 내의 모든 위치는 그 중심점이 전체 점 중 가장 가까운 점이 된다. 보로노이 다각형은 공간을 효율적으로 분할하는 도구로 활용되며, 소방서 담당구역 분할과 같이 실제 관할구역 분할 용도로 활용되기도 한다[4].

본 연구에서는 보로노이 다각형을 활용하여 공공자전거 대여소별 공간을 설정, 분할한 공간을 바탕으로 각 대여소 주변의 토지이용 및 버스 이용량을 분석하고, 이를 공간회귀분석에 적용하였다. 행정동과 같은 인위적인 경계를 기준으로 공간을 나눌 경우, 자전거 대여소가 실제로 담당하는 공간과 불일치할 수 있다. 반면, 보로노이 다각형을 이용하면 각 대여소에서 접근할 수 있는 가장 가까운 공간을 자연스럽게 정의할 수 있어 실제 공공자전거 이용자들이 가장 가까운 대여소를 찾는 현상을 반영할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 Radzimski et al.[20]의 연구에서도 각 공공자전거 대여소별 영역을 구분할 때 보로노이 다각형이 활용되었다. 또한, 보로노이 다각형을 적용하면 관측치가 많아지므로 안민수, 이창효의 연구[12]에서 지적된 법정동 기준 공간 분할 시 관측치에 비해 설명변수가 과도하게 많아지는 문제를 해소할 수 있다.

2.3 공간회귀분석(Spatial Regression Analysis)

본 연구에서는 세종시에서 어울링이 어떤 목적으로 이용되는지를 파악하기 위해 공간회귀분석을 수행하였다. 공간회귀분석은 회귀분석을 통해 공간의 의존 관계를 분석하는 것이다[2]. 공간 의존성(Spatial Dependence)이란 변수의 값이 서로 다른 공간 간에 서로 관련되어 있는 것을 의미하며, 공간적 요소가 포함된 데이터를 분석할 때 지리적 위치나 인접성 등의 공간적 요인으로 인해 공간 의존성이 발생할 수 있다. 일기예보에서 특정 지역의 정보가 제공되지 않을 때 인접 지역의 날씨를 참고하여 해당 지역의 날씨를 유추하는 사례를 공간 의존성의 예시로 볼 수 있다.

전통적인 회귀분석모델인 최소제곱법(Ordinary Least Square, OLS)은 각 관측치가 독립적이라고 가정한다. 그러나 공간 의존성이 존재하는 경우, 인접한 공간의 관측치들이 상호 연관되어 독립적이지 않으므로, OLS 모델을 적용할 경우 결과가 편향될 수 있다. 따라서 공간 의존성을 고려할 수 있는 공간회귀분석이 대안으로 사용된다[9]. 공간회귀분석에는 크게 공간시차모델(Spatial lag model, SLM)과 공간오차모델(Spatial error model, SEM)이 존재하며, 공간 의존성의 발생 위치에 따라 적절한 모델을 선택하여 사용한다.

2.3.1 공간자기상관(Spatial autocorrelation)

공간 의존성의 존재 여부를 객관적으로 판단하기 위해 일반적으로 공간자기상관을 검증하며, 그 대표적 방법으로 Moran's I 검정이 활용된다[14]. Moran's I 검정 식은 식 (1)로 정의된다.

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

N : 공간 수

x_i, x_j : i, j 공간의 관측치

$\bar{x}$: 모든 공간에서의 관측치 x 평균값

W : 공간가중치 행렬

W_{ij} : 공간가중치 행렬의 요소, i, j 공간 의존성에 대한 가중치를 의미

공간가중치 행렬 W 는 공간 간의 관계를 행렬 형태로 표현한 것으로 인접 여부나 거리 등을 기반으로 구성할 수 있다. Moran's I 검정 값은 -1부터 1 사이로 나타나며, 값이 0이라면 공간자기상관이 없는 것으로, 절댓값이 1에 가깝다면 가까울수록 공간자기상관이 강한 것으로 해석할 수 있다. 공간자기상관이 존재한다면 공간 의존성이 존재한다고 판단하여 공간회귀분석을 수행한다.

2.3.2 SLM(Spatial Lag Model)

SLM은 종속변수의 공간 의존성을 고려하는 모델이다. 이 모델은 인접 공간들의 종속변수 값이 해당 공간의 종속변수에 영향을 미친다고 가정하여 그 영향력을 새로운 독립변수로 추가한 모델이다. SLM은 식 (2)로 정의된다.

$$y = \rho W y + x \beta + \epsilon \quad (2)$$

W : 공간가중치 행렬

y : 종속변수 벡터, ρ : 공간 시차 계수

x : 독립변수 벡터, β : 독립변수 계수

ϵ : 오차 벡터

2.3.3 SEM(Spatial Error Model)

SEM은 종속변수 대신 오차항에서 공간 의존성이 발생하는 경우 사용된다. 이 모델은 독립변수로 설명되지 않는 공간 의존성이 존재할 때, 이를 오차항에서 반영해 모델의 정확성을 높이도록 설계한 것이다. 따라서 모델에서 고려하지 못한 공간적 특징들이 있을 때 사용하기에 적합하다. SEM은 식 (3)으로 정의된다.

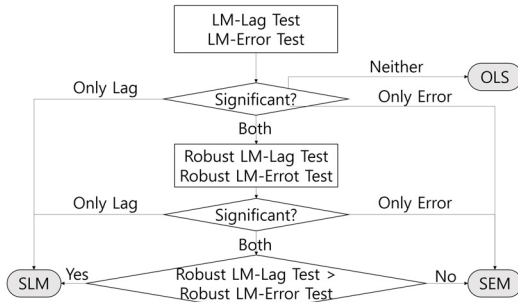
$$y = x \beta + u, \quad (3)$$

where $u = \lambda W u + \epsilon$

y : 종속변수 벡터,

x : 독립변수 벡터, β : 독립변수 계수
 u : 오차 벡터, λ : 공간 오차 계수, ϵ : 잔차
 W : 공간가중치 행렬

2.3.4 공간회귀모델의 선정



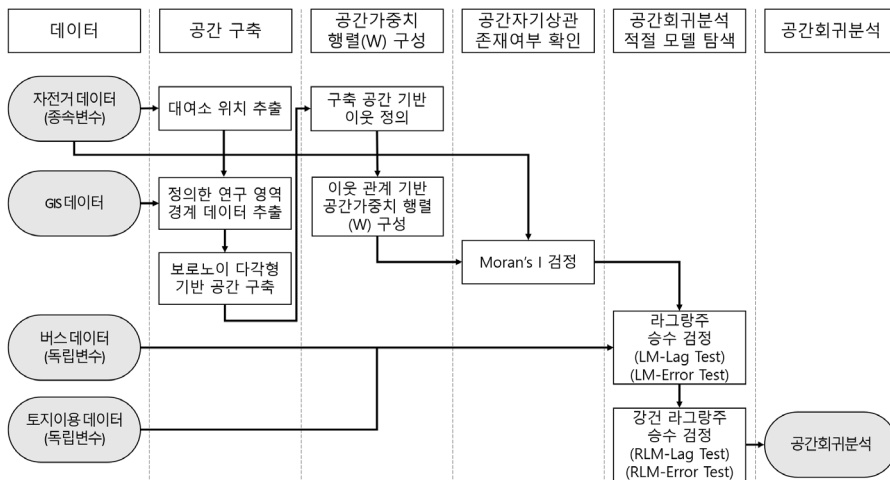
〈그림 1〉 공간회귀모델 선정 과정

종속변수에 대하여 Moran's I 검정을 수행하여 공간자기상관을 확인한 경우, 공간회귀모델로서 SLM과 SEM 중 적절한 모델을 선택해야 한다. 이를 위해 주로 라그랑주 승수 검정(Lagrange Multiplier Test, LM Test)과 강건 라그랑주 승수 검정(Robust Lagrange Multiplier Test, Robust LM Test)이 활용된다. 모델 선정 과정은 그림 1에 도식화하였다. 먼저 종속변수에 공간 의존성이 존재하는지(LM-Lag

Test)와 오차항에 공간 의존성이 존재하는지(LM-Error Test)에 대한 검정을 수행하고, 결과에 따라 유의한 모델을 선택한다. 만약 두 모델 모두 유의할 경우, 추가로 강건 라그랑주 승수 검정을 추가로 수행하고, 라그랑주 승수 검정과 동일하게 유의한 모델을 선택해 그 모델을 활용하게 된다(Robust LM-Lag Test, Robust LM-Error Test). 만약 강건 라그랑주 승수 검정에서도 두 모델이 모두 유의할 경우, 검정 값이 더 큰 모델을 최종적으로 선택하여 사용한다[18].

3. 연구방법

본 연구의 전체적인 흐름은 <그림 2>로 도식화하였다. 먼저 어울링 대여소를 기준으로 보로노이 다각형을 생성하여 세종시를 세분화하여 대여소별 공간을 구축한다. 그 후 생성된 보로노이 다각형을 기반으로 공간가중치 행렬(W)을 구성한다. 생성한 공간가중치 행렬과 종속변수인 어울링 이용량을 통해 Moran's I 검정을 수행하여 공간자기상관이 존재함을 확인하였고 이에 적절한 공간회귀분석 모델을 탐색하였다. SLM이 적절한 모델로 나타났으며 이에 SLM을 통해 분석을 수행하였다.



〈그림 2〉 전체 연구 흐름도

3.1 분석 모델 및 변수 설정

본 연구는 어울링의 이용 행태를 파악하고, 특히 FM/LM 이동 수단으로서의 활용 여부를 확인하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 종속변수를 어울링 대여소별 이용량으로 설정하고, 독립변수로는 어울링 대여소 주변의 대중교통 이용량과 각 토지이용의 존재 여부로 선정하였다. 세종시의 경우 대중교통 수단이 버스에 한정되므로, 각 어울링 대여소 주변 버스 정류장의 이용량을 변수로 활용하였다. 이를 위해 보로노이 다각형을 기반으로 한 대여소별 공간에 속한 버스 정류장 이용량을 추출하였다.

공공자전거의 이용 행태는 평일과 주말에 차이가 있으므로 평일과 주말, 둘을 합친 형태로 총 세 개의 공간회귀모형을 구축하였다[7].

3.2 활용 데이터

본 연구에서는 2021년 5월부터 2022년 4월까지의 어울링 이용 이력 데이터 1,663,834건을 바탕으로 각 어울링 대여소별 이용량을 산출하였다. 이 이용량은 Min-Max Scaling을 통해 값을 0과 1 사이로 표준화하였다. 또한, 어울링 대여소 위치정보를 활용하여 보로노이 다각형을 생성하고, 각 대여소의 공간을 구축하였다. 이 과정에서 세종시 행정중심복합도시 영역을 OpenStreetMap에서 제공하는 GIS 데이터를 활용하여 식별하였고, 이를 바탕으로 보로노이 다각형의 외각 경계를 설정하였다.

독립변수로 활용되는 토지이용 데이터는 국토교통부 택지정보자료제공에서 제공하는 세종시 토지이용 계획도(2022년 6월 기준)를 기반으로 하였다. 이를 바탕으로 보로노이 다각형마다 각 토지이용의 존재 여부를 확인하여 분석에 반영하였다. 세종시, 특히 연구에서 고려하는 행정중심복합도시의 경우 정부 청사가 밀집한 특징이 있기에 정부시설을 하나의 독립변수로 설정하였다. 또한 세종시는 생활권 주변의 공원 외에도 세종호수공원과 같은 다양한 유형의 공원이 존재하기에 도시공원 및 녹지에 관한 법률에 근거

하여 공원을 주제공원과 녹지 및 생활권공원으로 구분하여 각각 독립변수로 설정하였다. 이외에도 주거시설, 산업시설, 상업시설, 문화시설, 학교시설, 기타 용지를 변수로 포함하여 분석을 진행하였다.

세종시 버스 이용 데이터는 세종시 교통정보 빅데이터 시스템에서 제공하는 2021년 5월부터 2022년 4월까지의 버스 승차량 데이터를 활용하였다. 이 데이터는 일자별로 버스 정류장별 승차 횟수에 대한 정보를 포함하고 있으며, 총 7,190,231건의 승차 정보를 포함한다. 또한 세종시 버스 정류장의 위치정보는 공공데이터포털에서 제공하는 2021년 9월 24일 기준 데이터를 참조하였으며, 총 1,214개의 정류장이 포함되었다. 버스 정류장별 승차 데이터와 위치정보를 활용하여 각 보로노이 다각형 내의 버스 승차량을 계산하여 독립변수로 활용하였다. 버스 승차량 역시 Min-Max Scaling 과정을 거쳐 값을 0과 1의 범위로 변환하였다.

본 연구는 공공자전거와 대중교통 간 연계성 파악을 목적으로 하고 있다. 그러나 사용하고 있는 버스 이용 데이터가 승차량만을 다루고 있어, 대중교통과의 연계를 고려하여 어울링 이용량의 경우 하차량 데이터만을 고려하였다. 변수를 구성한 방법은 <표 2>에 나타내었으며, 변수의 기술통계는 <표 3>에 요약하였다.

3.3 전체 연구 방법

3.3.1 공간 구축

현재 어울링은 세종시에서 행정구역이 밀집된 ‘행정중심복합도시’ 구역과 조치원 일대에서 운행되고 있다. 그러나 어울링 전체 이용량 중 98% 이상이 행정중심복합도시 내에서 발생하고 있어, 본 연구는 행정중심복합도시 내의 어울링 이용에 초점을 맞추었다. <그림 3>의 ①은 세종시 전체 영역과 행정중심복합도시 영역을 나타낸다.

본 연구에서는 어울링 대여소를 기준으로 보로노이 다각형을 생성해 공간을 구분하였다. 이를 통해 각 어울링 대여소별 거리 기반의 공간을 설정하였다.

〈표 2〉 분석 모델에 적용한 변수

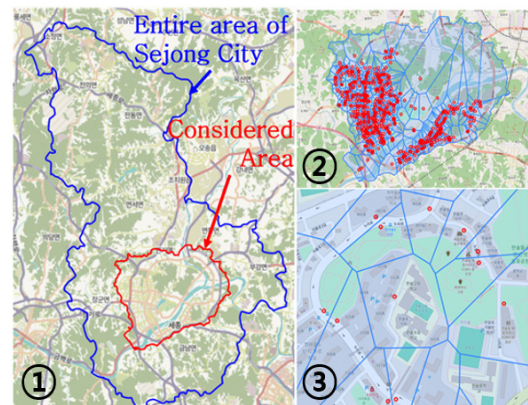
구분	변수	범위	내용
종속변수	자전거 이용량	0~1	각 어울링 대여소별 하차량에 Min-Max Scaling을 적용한 값
독립변수	버스 이용량	0~1	각 보로노이 다각형 내 존재하는 버스 정류장 승차량 합계에 Min-Max Scaling을 적용한 값
	정부시설 존재 여부	0 or 1	공공청사, 정부출연연구기관 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	주거시설 존재 여부	0 or 1	저밀저층, 중밀중층, 도시형생활주택용지, 아파트, 주거용지 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	산업시설 존재 여부	0 or 1	연구시설, 업무시설기타, 산업용지, 복합용지 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	상업시설 존재 여부	0 or 1	상업업무용지, 근린생활시설용지, 농수산물도매시장 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	문화시설 존재 여부	0 or 1	문화시설, 도서관, 운동장, 종교시설용지, 체육시설 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	주제공원 존재 여부	0 or 1	역사공원, 문화공원, 수변공원, 묘지공원, 체육공원, 공원기타 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0[8]
	생활권공원, 녹지 존재 여부	0 or 1	녹지, 경관녹지, 완충녹지, 하천, 연결녹지, 근린공원, 어린이공원, 소공원 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	학교시설 존재 여부	0 or 1	대학, 초등학교, 중학교, 고등학교, 학교, 학교 기타 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0
	기타 용지 존재 여부	0 or 1	토지이용계획 중 분류되지 않은 기타 용지가 각 보로노이 다각형에 존재하는 경우 1, 존재하지 않는 경우 0

이는 실제로 어울링과 버스 간 환승이 이루어질 때 가장 가까운 어울링 대여소와 버스 정류장 간 교류가 가장 활발할 것이라는 가정에 근거한 공간 구분 방식

〈표 3〉 회귀분석 변수들의 기술통계

구분	변수	평균	표준편차
독립 변수	자전거 이용량	평일	1997.973
		주말	571.298
		평일+ 주말	2569.271
종속 변수	버스 이용량	평일	5535.613
		주말	3546.088
		평일+ 주말	6716.702
	정부시설 여부	0.302	0.460
		0.720	0.450
		0.039	0.195
		0.476	0.500
		0.131	0.337
		0.395	0.489
		0.701	0.458
		0.268	0.443
		0.553	0.498

이다. <그림 3>의 ②와 ③은 생성한 보로노이 다각형 전체와 그 일부를 확대한 것이다. 최종적으로 전체 635개 어울링 대여소에 대하여 635개의 공간을 구축하였다.



〈그림 3〉 세종시 영역(①) 생성한 보로노이 다각형 전체(②) 보로노이 다각형을 확대한 모습(③) ②, ③의 빨간 점 : 어울링 대여소

3.3.2 공간가중치 행렬 구성

생성된 보로노이 다각형을 기반으로 공간가중치 행렬(W)을 구성하였다. 본 연구에서는 두 다각형이 한 점이라도 접하면 이웃한 것으로 정의하였다. 공간가중치 행렬은 각 다각형의 이웃 관계를 반영하여, 이웃한 경우는 1, 그렇지 않은 경우는 0으로 값을 설정하였다. 이는 수식 (4)로 정의된다.

$$w_{LSUB}ij = \begin{cases} 1, & \text{if } i \text{ and } j \text{ are adjacent} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

이후 행 표준화(row standardization)를 진행하여 행렬을 정규화하였다. 최종적으로 총 635개 공간에 대하여 635×635 형태의 공간가중치 행렬을 구성하였다.

3.3.3 공간자기상관 존재 여부 확인

본 연구에서 종속변수인 자전거 이용량에 대해 Moran's I 검정을 수행하여 공간자기상관의 존재 여부를 확인하였다. 그 결과는 <표 4>와 같다.

<표 4> Moran's I 검정 값

시기	Moran's I
평일	0.255***
주말	0.256***
전체	0.247***

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

검정 결과 항상 공간자기상관이 존재하는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 일반회귀분석 대신 공간회귀분석을 수행하였다.

3.3.4 공간회귀분석 적절 모델 탐색

공간자기상관이 발견됨에 따라, 적절한 공간회귀 모델을 선정하기 위해 라그랑주 승수 검정(LM Test)을 수행하였다. SLM(Spatial Lag Model)과 SEM(Spatial Error Model)에 대하여 라그랑주 승수 검정(LM-Lag Test, LM-Error Test)을 수행한 결과, 두 결과 모두 유의한 것으로 나타나 강건 라그랑주 승수 검정(Robust LM-Lag Test, Robust

LM-Error Test)을 추가로 진행하였다. 주말의 경우 SLM에 대한 강건 라그랑주 승수 검정만 유의하여 SLM이 적절한 모델임을 알 수 있었다. 전체기간과 평일의 경우 SLM, SEM에 대한 강건 라그랑주 승수 검정 모두 유의한 것으로 나타나, 검정 값을 추가로 비교, 검정 값이 더 높은 SLM이 적절한 모델임을 확인하였다. 검정 결과는 <표 5>에 정리되어 있다.

<표 5> LM Test, Robust LM Test 결과

시기	LM -Lag	LM -Error	RLM -Lag	RLM -Error
평일	69.802***	58.444***	17.052***	5.695*
주말	86.061***	78.154***	9.559**	1.652
평일+주말	67.326***	57.800***	13.708***	4.181*

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

3.4 공간회귀분석 결과

평일, 주말, 평일과 주말을 합친 경우의 총 세 가지 분석 결과는 <표 6>에 정리되어 있다.

<표 6> 공간회귀분석(SLM) 결과

변수	평일 + 주말	평일	주말
정부시설 여부	-0.002	0.004	-0.021*
주거시설 여부	-0.018	-0.018	-0.013
산업시설 여부	-0.026	-0.028	-0.015
상업시설 여부	0.027**	0.029**	0.015
문화시설 여부	0.009	0.007	0.015
주체공원 여부	0.008	0.005	0.016*
녹지, 생활권 공원 여부	-0.019*	-0.017	-0.020*
학교시설 여부	-0.002	-0.002	-0.002
기타 용지 여부	-0.007	-0.007	-0.004
버스 이용량	0.096*	0.112*	0.042
$\rho(\rho)$	0.391***	0.395***	0.444***
Pseudo R ²	0.190	0.198	0.208

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001.

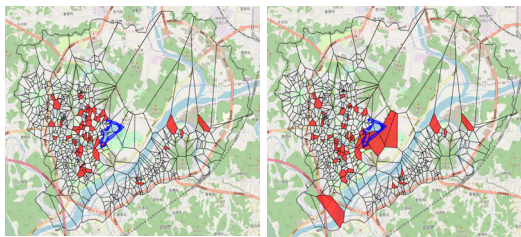
평일과 주말을 합친 경우, 상업시설(p<0.01, 계수=0.027)과 버스 이용량(p<0.05, 계수=0.096)은 어울링 이용량과 유의한 양의 관계를 보였다. 이는 어울링이 상업시설 이용을 위해 활용되고 있으며, FM/LM

역할을 수행하고 있음을 시사한다. 반면 녹지 및 생활권공원($p < 0.05$, 계수 = -0.019)은 어울링 이용량과 유의한 음의 관계를 보였는데, 이는 산이나 하천 등 자전거 이용이 어려운 지형으로 인한 것으로 예상된다.

평일만 분석한 결과에서는 상업시설($p < 0.01$, 계수 = -0.029)과 버스 이용량($p < 0.05$, 계수 = 0.112)이 어울링 이용량과 유의한 양의 관계를 보였다. 이는 어울링이 평일에 상업시설 이용을 위해 사용되며, FM/LM 역할을 수행, 대중교통과 연계되고 있음을 보여준다.

주말만 분석한 경우, 주재공원($p < 0.05$, 계수 = -0.016)과 어울링 이용량 사이에 유의한 양의 관계가 나타났지만, 정부시설($p < 0.05$, 계수 = -0.021), 녹지 및 생활권공원($p < 0.05$, 계수 = -0.020)은 어울링 이용량과 유의한 음의 관계가 나타났다. 이는 주말에 어울링 이용 행태가 평일과 달라지며, 주로 주재공원에서 레저 목적으로 이용되고 있음을 시사한다. 특히, 하천이나 산악 지형, 생활권 주변에 위치한 공원보다 특정한 주재의 공원에서 이용이 활발한 것으로 확인된다.

공간자기상관 계수(ρ)는 평일(0.395)보다 주말(0.444)에 더 크게 나타났다. 이는 주말에 특정 지역으로 이용량이 집중되었기 때문으로 예상된다. 이용이 집중된 지역을 탐색하고 가시화하기 위하여 보로노이 다각형별 이용량을 분석하여 이용이 많은 지역을 탐색하였으며, <그림 4>는 그 결과를 보여준다.



<그림 4> 이용 빈도 상위 10%(빨간 영역)
세종호수공원(파란 영역)
좌측 : 평일, 우측 : 주말

이용이 많은 상위 10% 지역을 확인한 결과, 평일보다 주말에 주재공원에 속하는 세종호수공원 지점에 이용이 집중되어 있음을 알 수 있었다. 이러한 이유로

공간자기상관 계수도 크게 나타난 것으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구는 세종시 어울링 이용 패턴을 분석하고, 어울링과 대중교통 간의 연계성을 파악하기 위해 공간회귀분석을 수행하였다. 특히, 공간적 요인이 어울링 이용에 미치는 영향을 확인하기 위해 보로노이 다각형을 기반으로 공간을 구분하고, 각 대역소의 거리 기반 공간을 설정하였다.

먼저 Moran's I 검정을 통해 어울링 이용량에 공간자기상관이 존재함을 확인하고, 이를 반영하기 위해 공간시차모형을 활용하여 분석을 진행하였다. 분석 결과, 토지이용의 경우 평일에는 상업시설, 주말에는 주재공원이 어울링 이용량과 유의한 양의 관계를 보였다. 이는 평일에는 주로 상업시설 이용을 위해, 주말에는 레저를 목적으로 어울링을 이용하는 것으로 해석할 수 있다. 버스 이용량의 경우 어울링 이용량과 전체기간 혹은 평일에만 유의한 양의 관계를 보였다. 즉, 어울링과 대중교통과의 상호보완적 관계는 주말에는 이루어지지 않는 것으로 해석할 수 있다. 어울링이 평일에 대중교통과 연계되어 이용되는 결과가 나왔음에도 불구하고 대중교통 수송 부담률에 주는 효과는 미비한 것으로 보인다. 이를 보완하기 위한 추가적인 정책이 필요할 것으로 예상된다. 주말에 어울링 이용량이 주재공원과 유의한 양의 관계를 보이며 레저 목적으로 이용되는 점을 고려하여 주요 공원 주변, 특히 이용이 밀집되는 세종호수공원 주변의 버스 시설과 연계될 수 있도록 자전거 거치소를 확충하는 방안을 고려할 수 있다. 또한 평일 및 전체기간에 어울링 이용량과 버스 이용량 간 유의한 양의 관계가 나타나므로, 버스 정류장과의 연계를 고려한 인프라 구축 및 환승 편의성을 높이는 다양한 방안을 검토할 수 있다. 아울러 같은 기간에 어울링 이용량과 상업시설 또한 유의한 양의 관계를 보이는 점을 고려해 상업시설 주변의 자전거 이용 환경을 개선하는 정책을 고려할 수 있다. 어울링 이용량과 버스 이용량 간 관계가 평일에만 유의하게 나타나는 점은 어울링이 통근 및

통학 시 FM/LM 이동 수단으로 활용되고 있을 가능성을 시사한다. 이에 대한 추가적인 분석이 수행된다면 보다 정교한 정책적 대응이 가능할 것이다.

본 연구에서 어울링과 버스 간 관계를 분석할 때, 데이터의 한계로 버스의 승차량과 어울링의 하차량만을 고려하였다. 그러나 이는 공공자전거가 대중교통 탑승까지의 이동수단으로 활용되는 FM에만 초점을 맞추게 되는 한계를 갖는다. 향후 연구에서는 공공자전거의 FM뿐만 아니라 LM을 함께 고려한 분석이 진행된다면 공공자전거와 대중교통 간의 상호작용을 더욱 정밀하게 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 2030 세종도시기본계획, 세종특별자치시, 2014.
- [2] 구본진, 장덕현(2021), “공간회귀분석을 이용한 부산지역 공공도서관 접근성 영향 요인 분석,” 한국문헌정보학회지, 55(4), 67-87.
- [3] 국가교통통계2022, 한국교통연구원, 2023.
- [4] 김대성, 윤상후(2020), “보로노이 다이어그램을 이용한 서울특별시 소방권역 분석,” 한국데이터정보과학회지, 31(5), 865-875.
- [5] 김숙희, 최기주, 김정화(2015), “공공자전거시스템의 사회적 가치와 자전거 특성의 관계성 연구,” 대한교통학회지, 33(2), 125-135.
- [6] 남궁옥, 박종한, 고준호(2021), “서울시 공공자전거 따릉이의 정성적 이용 행태 분석,” 교통기술과정책, 18(6), 52-59.
- [7] 도명식, 노윤승(2014), “대전시 공유자전거 이용수요에 영향을 미치는 요인에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 34(5), 1517-1524.
- [8] 도시공원 및 녹지 등에 관한 법률 부칙 (2024.2.13. 법률 제20309호) 제15조 제3항.
- [9] 변필성(2007), “공간계량경제모델링: 지리학의 제1법칙과 공간회귀모델,” 국토, 111-119.
- [10] 세종시 광역권 지방대중교통계획 최종보고서, 한국교통연구원, 2013.
- [11] 신상범(2016), “한국 지방 도시 공공자전거 정책의 도입과 지속 요인: 창원시 누비자 사례를 중심으로,” 대한지리학회지, 51(1), 89-108.
- [12] 안민수, 이창효(2022), “공공자전거 이용에 영향을 미치는 공간 특성 분석: 대전광역시 ‘타슈’를 대상으로,” 지역연구, 38(4), 75-91.
- [13] 이상복, 임희종, 정광현(2018), “서울시 공공자전거 시스템 운영을 위한 효율적 관리 구역 설정,” 경영과학, 35(1), 55-67.
- [14] 이석환(2014), “공간의존성에 대한 이해와 공간회귀분석의 활용,” 한국정책과학학회보, 18(3), 39-79.
- [15] 임동순(2016), “공공 자전거 정적 재배치에의 VNS 알고리즘 적용,” 한국경영과학회지, 41(1), 41-53.
- [16] 정인웅, 엄현섭, 이영훈(2018), “공유 자전거 시스템의 수요기반 재배치,” 한국경영과학회지, 43(4), 17-31.
- [17] e-나라지표(2024). “수송량 및 수송 분담률,” (https://www.index.go.kr/unity/portal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1245).
- [18] Anselin, L.(2005), “Exploring spatial data with GeoDaTM: A workbook,” Center for Spatially Integrated Social Science, 1963, 157.
- [19] Aurehammer, F.(1991), “Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure,” ACM Computing Surveys(CSUR), 23(3), 345-405.
- [20] Radzimski, A. and Dzięcielski, M.(2021), “Exploring the relationship between bike-sharing and public transport in Poznań, Poland,” Transportation research part A: policy and practice, 145, 189-202.
- [21] Shaheen, S. and Chan, N.(2016), “Mobility and the sharing economy: Potential to facilitate the first-and last-mile public transit connections,” Built Environment, 42(4), 573-588.