

은평구 교통 최적화와 경제적 영향 분석  
: 교통 공학과 버스노선을 중심으로

이향기 · 김민주 · 김보영 · 박준혁

하나고등학교

Optimization of Transportation and  
Economic Impact Analysis in Eunpyeong  
: Focusing on Traffic Engineering and Bus Routes

Hyang-Gi Lee · Min-Joo Kim · Bo-Young Kim · Jun-Hyuk Park

Hana Academy Seoul

**Abstract** This study was conducted to address the severe traffic congestion around Yeonseo Market in Eunpyeong and the congestion caused by hikers visiting Bukhansan during the hiking season. The causes and conditions of traffic congestion at Yeonseo Market were analyzed using traffic flow theory, and a plan was proposed to efficiently manage the movement of floating populations through bus route optimization. Additionally, the economic benefits of this plan were predicted based on theories such as comparative advantage, new economic geography, and dynamic general equilibrium modeling. While road expansion could resolve the congestion, it is not feasible in practice. Instead, optimizing bus routes to reduce traffic volume was implemented, confirming its positive impact on alleviating congestion and revitalizing the local economy.

**Key words:** Traffic congestion, Traffic flow theory, Bus route optimization, Comparative advantage, New economic geography, Dynamic general equilibrium modeling

## 1. 서론

현대 도시 환경에서는 교통 체증이 주민들의 삶의 질에 큰 영향을 미치며, 지역 경제와 사회적 활동의 효율성을 저하시킨다. 특히 서울 은평구의 연서시장은 전통시장으로서 지역 경제에 중요한 역할을 담당하고 있으나, 주변 교통 체증 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 등산철에는 북한산을 찾는 등산객들로 인해 방문객 수가 증가하면서 시장과 인근 지역의 교통 혼잡이 심화된다

. 이와 같은 상황은 단순히 불편함을 초래하는 것을 넘어, 시장의 접근성을 저하시키고 지역 경제 활동을 위축시키는 요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 과학적인 교통류 분석과 문제 해결 방안의 도출이 필요하다.

은평구 연서시장 주변의 교통 체증 문제는 단순히 일시적으로 발생하는 현상이 아니라, 구조적이고 지속적인 문제로 판단된다. 특히 등산철에는 북한산을 찾는 등산객과 지역 주민의 이동이 집중되면서 교통 혼잡이 극심해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 단순히 현상을 이해하는 것을 넘어, 교통류 이론을 활용한 체계적이고 과학적인 분석이 필수적이다. 데이터 기반의 접근 방식을 통해 교통 체증의 원인과 정도를 분석하고, 이를 바탕으로 버스 노선 최적화를 통해 유동 인구의 이동을 효율적으로 관리하는 방안을 제안하고자 한다. 이미 북한산 등산객들을 위한 8772번 버스가 존재하지만, 구파발역 등의 한정적인 접근성을 가지고 있어 이를 보완하고자 한다. 따라서 북한산 관광객 또는 등산객들을 위한 접근성 높은 버스 노선을 제안하고자 한다. 또한, 이를 통해 도출된 개선안이 지역 경제에 미치는 효과를 비교우위론, 신경제지리학, 동태일반균형모형을 활용하여 분석함으로써 경제적 효용과 정책적 가치를 평가할 것이다. 이러한 연구는 교통 문제 해결뿐만 아니라 전통시장 활성화와 주민 삶의 질 향상이라는 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

## 2. 이론적 배경

교통 체증 해결을 위한 교통 최적화는 우선 현재 연서시장 도로의 문제점이 파악되어야 한다. 교통 흐름이 저하되고, 도로가 원활하게 진행되지 못하고 정체되는 현상은 도로의 물리적 용량, 차량 밀도, 그리고 운전자의 행동 등 복합적인 요소들의 결합으로 인해 나타난다. 이때 교통류 이론을 적용함으로써, 차량의 속도-밀도-흐름 관계를 설명할 수 있으며, 체증을 발생시키는 근본 원인을 밝힐 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 총 3가지 이론을 적용해 연서시장 도로의 교통 혼잡을 분석하였다.

### 2.1. 나겔-슈레켄버그 모델 (Nagel-Schreckenberg Model)

나겔-슈레켄버그 모델은 고속도로의 교통 시뮬레이션을 위한 이론적 모델이다. 이 이론으로 도로가 혼잡할 때 평균 자동차 속도가 느려짐을 계산할 수 있으며, 특정 구간에서의 개별 차량 행동, 교통 신호 대기열, 병목 구간의 혼잡도를 시뮬레이션할 수 있다.

나겔-슈레켄버그 모델은 시간은 시간 단계로 이산화되고, 공간은 공간 단계로 이산화되는데, 공간과 시간 모두에서의 이산화는 셀룰러 오토마타를 생성한다. 셀은 몇 대의 자동차 길이이고, 최대 속도는 도로의 속도 제한이다. 이 모델은 주변 자동차 간의 상호 작용으로 인해 자동차가 속도를 늦추는 방식을 보여줌으로써 교통 체증의 특징을 이해하거나 모델링한다. 각 시간 단계에서 절차는 다음과 같다.

1. 가속: 최대 속도가 아닌 모든 차량은 속도가 1 단위 증가

2. 감속: 앞 차량과의 거리가 현재 속도보다 작은지 확인하여, 거리가 속도보다 작으면 충돌을 피하기 위해 차량 앞의 빈 셀 수로 속도가 감소
3. 무작위화: 속도가 최소 1 인 모든 자동차의 속도는  $p$  의 확률로 1 단위 감소
4. 자동차 운동: 모든 자동차는 속도와 같은 셀 수만큼 앞으로 이동

## 2.2. 충격파 이론

충격파 이론은 교통의 흐름을 유체역학의 관점에서 분석하며, 서로 다른 교통 흐름 간에 속도 변화로 발생하는 파동을 중심으로 분석한다. 이 이론을 통하여, 정량적으로 정체 현상과 자동차 흐름의 급격한 변화를 분석할 수 있으며, 교통 정체의 전파 속도와 길이를 계산하거나, 특정 구간의 병목현상의 원인을 분석할 수 있다.

충격파 이론과 나겔-슈레켄버그 모델의 차이점은 충격파 이론은 거시적 흐름을 기반으로 교통 정체를 분석하고 정체 구간의 전파 속도와 영향을 계산하는 반면, 나겔-슈레켄버그 모델은 미시적 차량 행동을 시뮬레이션하여 교통 신호, 도로 설계, 그리고 병목 구간의 세부적인 정체 양상을 분석한다.

충격파 이론에서 사용하는 공식은 다음과 같다.

$$w = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad (1)$$

$q_2$ 는 정체 상태에서의 흐름,  $q_1$ 은 자유 흐름 상태에서의 흐름,  $k_2$ 는 정체 상태에서의 밀도,  $k_1$ 은 자유 흐름 상태에서의 밀도를 뜻한다.

$$L_{jam} = |w| \times t_{red} \quad (2)$$

$L_{jam}$ 은 정체구간의 길이,  $t_{red}$ 는 적색 신호로 차량이 멈추는 시간을 뜻한다.

## 2.3. 삼상 교통 이론 (Kerner's Three Phase Traffic Theory)

삼상 교통 이론은 기존의 교통류 이론과 달리 교통 상태를 3 가지 상태로 나누어, 그 상태 간의 전환 메커니즘을 제시하는 이론이다. 3 가지 상태에는 자유 흐름(free flow), 동기화 흐름(synchronized flow), 광역 정체(wide moving jam)가 있다.

자유 흐름(F)은 차량들이 도로를 방해 없이 주행하는 상태로, 높은 평균 속도를 유지한다. 차량 간 상호 작용이 거의 없고 밀도가 낮으며, 갑작스러운 외부 요인에 쉽게 방해받지 않는다. 이때 교통량이 급격히 증가하거나, 병목 현상(큰 차로가 특정 부분부터 대폭 줄어들어 발생하는 교통 체증 현상) 등이 발생하면 그 다음 상태인 동기화 흐름 상태로 전환된다.

동기화 흐름(S) 상태에서는 속도가 떨어지면, 여러 차선에서 차량들이 비슷한 속도로 이동하기 시작한다. 차량 밀도가 높아지면서 차량 간 상호 작용이 증가하지만, 정체는 발생하지 않는다. 이 상태는 외부 요인에 의해 정체로 쉽게 전환되며, 이 전환은 비선형적이고 갑작스럽게 발생한다.

광역 정체(W) 상태에서는 교통량이 극도로 감소하고, 차량의 평균 속도가 매우 낮아진다. 차량의 정체가 하나의 덩어리처럼 형성되며, 차량 간 간격이 좁아지고 혼잡 구간의 길이가 시간에 따라 증가하거나 감소한다. 이 정체 구간은 함께 이동하며 도로의 다른 구간에도 영향을 미친다.

주로 사용하는 공식은 다음과 같다.

$$q = \rho v \quad (3)$$

$q$ 는 교통량,  $\rho$ 는 교통 밀도,  $v$ 는 속도를 뜻한다.

$$v = v_{\text{free}} \cdot \exp(-k \cdot (\rho - \rho_c)^2) \quad (4)$$

수식 (4)는 속도를 계산하는 함수이다.

$$\rho_{\text{jam}} \approx \frac{1}{L_{\text{vehicle}} + g} \quad (5)$$

수식 (5)은 정체 교통 밀도를 계산할 때 사용된다.  $L$ 은 평균 차량 길이,  $g$ 는 차량 간 최소 간격을 뜻한다.

$$\rho_{\text{critical}} = \frac{\rho_{\text{jam}}}{(\text{number of lanes})} \quad (6)$$

수식 (6)은 일반적인 임계 밀도를 나타내며 최대 교통량을 가질 때의 값이다.

위에서 공식을 이용해 구한 값으로 아래 표와 값이 현재를 상태를 나눌 수 있다.

Table 1. Traffic Flow Classification Based on Density, Speed, and Traffic

	Free flow	Synchronized flow	Wide moving jam
Density	$\rho < \rho_c$	$\rho_c \leq \rho < \rho_{\text{jam}}$	$\rho_{\text{jam}} \leq \rho$
Speed	$v_{\text{free}}$	$v = f(\rho)$	$v \approx 0$
Trffic	$q = \rho \cdot v_{\text{free}}$	$q = \rho \cdot f(\rho)$	$q \approx 0$

본 연구에서는 문제상황을 외판원 문제로 설정하고, 비트마스크를 활용한 동적 계획법을 이용하여 버스 노선 최적화를 진행하였다.

#### 2.4. 외판원 문제 (Traveling Salesman Problem)

외판원 문제는 한 도시에 출발하여 모든 도시를 한 번씩 방문한 후 다시 출발 도시로 돌아오는 최단 경로를 찾는 문제이다. 이 문제를 간단하게 나타내기 위해 그래프를 사용한다. 그래프란 노드와 각 노드를 연결하는 간선으로 이루어진 자료구조이다. 외판원 문제에서는 도시를 노드로, 도시를 잇는 경로를 간선으로 볼 수 있다. 이 때, 노드와 간선에는 가중치를 부여할 수 있다. 또한 시작점과 끝점이 동일하고, 모든 노드를 중복없이 지나야 하기 때문에 그래프 중에서도 해밀턴 회로에 해당한다고 볼 수 있다. 외판원 문제는 조합 최적화 문제의 일종으로, 노드 개수에 따라 지수적으로 시간복잡도가 증가하여 다항시간 내에 풀 수 없는 NP-hard 문제이다. 따라서 시간복잡도가 높기 때문에 효율적인 알고리즘을 사용하여 최적해 또는 근사해를 구하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 비트마스크를 활용한 동적 계획법을 사용하여 최적해를 구하였다.

#### 2.5. 동적 계획법 (Dynamic Programming)

동적 계획법은 하나의 큰 문제를 여러 개의 부분 문제로 나누고 그 결과를 저장하여 다른 문제를 풀 때 사용하여 푸는 방법이다. 이는 공간복잡도를 늘리는 대신 시간복잡도를 줄여준다. 동적 계획법과 일반적인 재귀(Naive Recursion)의 차이는 일반적인 재귀는 동일한 부분 문제들을 모두 반복적으로 풀어 해결하지만, 동적 계획법은 부분 문제의 결과값을 저장하고 동일한 부분 문제에 재사용하기 때문에 시간복잡도가 훨씬 작다. 동적 계획법을 사용하기 위해서는 동일한 부분 문제들이 반복해서 나타나는 문제여야 한다.(Overlapping Subproblem) 또한 부분 문제의 최적해로 전체 문제의 최적해를 도출할 수 있어야 한다.(Optimal Substructure) 예를 들어 A 부터 B 까지의 최적경로를 구하고자 할 때, A 부터 X 까지의 최적경로와 X 부터 B 까지의 최적경로를 합친 것이 A 부터 B 까지의 최적경로인 경우에 동적 계획법을 사용하여 최적경로를 구할 수 있다. 동적 계획법은 Top-Down 방식 또는 Bottom-Up 방식으로 구현한다. Top-Down 방식은 Memoization 이라고도 불리며, 재귀적으로 부분 문제의 결과를 저장해 재사용하는 방식으로 문제를 해결한다. Bottom-Up 방식은 Tabulation 이라고도 불리며, 작은 부분 문제를 반복적으로 해결하여 전체 문제를 해결하는 방식이다. 본 연구에서는 Top-Down 방식으로 외판원 문제를 해결하였다.

#### 2.6. 비트마스크 (BitMask)

비트마스크는 정수의 이진수 표현, 즉 이진법을 활용하여 자료구조를 나타내는 방법이다. 0 또는 1 로 하나의 비트(bit)를 표현하고, 이를 변환함으로써 연산과정을 나타낸다. 비트마스크는 시간복잡도가 작고, 메모리 사용량이 적어 매우 효율적인 방법이다.

교통활성화에 따른 경제적 영향을 설명하는 데에 활용 가능한 이론과 학문은 중심지 이론, 중력 모형, 네트워크 이론 등 매우 다양하다. 하지만 이러한 이론은 대부분 국가 간의 이동과 무역을 가정하는 등 광범위한 범위에 한해서 유의미한 결과를 낳는 경우가 대다수일 뿐 아니라, 활용 가능 데이터만으로는 결론 도출이 어려운 이론이 많다. 따라서 본 연구에서는 교통활성화에 따른 경제적 영향을 분석하기 위해 다양한 이론 중 은평구 규모의 지역에도 적용가능한 이론과 모델을 선정하였다.

은평구 내 교통활성화에 따른 경제적 영향을 분석하기 위해서는 먼저 교통활성화와 경제 발전 간의 일반적인 상관관계를 파악해야하며, 유의미한 상관관계가 나타날 경우 이를 바탕으로 은평구에 한정된 경제적 효과를 구체적으로 수치화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 비교우위론, 신경제지리학, 동태일반균형모형을 채택하였다. 이를 통해 교통활성화가 지역 내 경제 발전에 미치는 영향을 다양한 측면에서 분석하고, 특히 은평구의 교통 인프라 변화가 지역 총생산에 미치는 영향을 수치화하여 예측했다.

## 2.7. 비교우위론

비교우위론은 경제학자 데이비드 리카도가 제시한 이론으로, 주체 간의 교역이 이루어지는 과정에서 각 주체가 자신이 상대적으로 더 적은 기회비용으로 생산할 수 있는 상품에 특화할 경우, 상호 경제적 이익을 얻을 수 있음을 설명한다. 기존에 비교우위론은 국가 간 무역의 경제적 효과를 설명하는 데 사용되었으나, 본 연구에서는 비교우위론을 국가 간 무역에 국한하지 않고, 지역 내부의 물품 이동과 경제적 상호작용 분석에 사용하였다. 이는 비교우위론이 단순히 거래의 지역적 규모보다 주체 간의 상대적 생산 능력 차이에 중점을 두고 있기 때문이다. 은평구 내에서도 다양한 주체 간에 생산성과 자원 활용 능력에서 차이가 존재한다는 점을 가정하면, 교통 활성화가 경제에 미치는 영향을 비교우위론을 통해 분석할 수 있다.

## 2.8. 신경제지리학

신경제지리학은 기존의 경제지리학이 지니는 한계를 보완하며 등장한 현대적 이론으로, 미시적 토대에 의거한 일반균형모형을 사용하여 경제활동의 공간적 분포에 대한 체계적인 규명을 시도하였다. 신경제지리학에 따르면, 교통 활성화에 따른 이동에 대한 비용의 감소는 경제 활동의 공간적 분포를 재조정한다. 또한 교통활성화는 접근성이 떨어졌던 외곽 지역에서 교통망 개선은 클러스터 형성을 유도하며, 이는 생산성 향상과 일자리 창출로 이어지며 경제에 긍정적인 영향을 준다는 내용을 담고 있다. 은평구는 서울의 외곽에 위치한 지역으로, 중심부에 비해 상대적으로 교통 접근성이 제한되어 있다. 따라서 신경제지리학을 통해 교통활성화가 경제 활동 공간적 분포를 재조정할 경우 미치는 영향을 분석할 수 있다.

## 2.9. 동태일반균형모형

동태일반균형모형은 경제 전반의 변수들이 시간에 따라 상호작용하며 균형을 이루는 과정을 분석하는 데 유용하게 이용된다. 이는 교통 최적화와 같은 정책의 변화가 장기적으로 경제 성장에 미치는 영향을 정량적으로 수치화하여 예측하고 평가하는 데 적합하다. 동태일반균형모형에 따르면, 교통망 개선에 대한 정책이 효과적으로 시행될 경우, 물류 비용을 절감하고 노동자의 출퇴근 시간을 단축시켜 생산성을 향상시키는 효과를 가져온다. 이러한 생산성 증대는 지역 경제 내 주요 산업의 총생산 증가로 이어질 수 있으며, 이는 지역 경제 전반에 걸쳐 파급 효과를 미친다. 동태일반균형모형에 은평구의 데이터를 대입함으로써 교통 활성화가 은평구 경제에 미치는 장기적인 기여도를 정량적으로 측정할 수 있다. 또한 동태일반균형모형은 정부의 교통 인프라에 대한 투자와 이에 따른 자원 배분 변화의 영향을 설명하는 데에도 유용하다. 교통 인프라 개선은 정부 예산의 상당 부분을 차지하는 투자 항목으로, 이는 다른 부문에서의 지출 감소를 유발할 수 있다. 동태일반균형모형은 이러한 정부 예산 내 자원 배분의 변화가 전체 경제에 미치는 영향을 분석하며, 교통 인프라 투자와 다른 공공 서비스 간의 경제적 균형 변화를 분석한다.

### 3. 연구 방법 및 절차

#### 3.1. 연구 방법

중격과 이론과 나겔-슈레켄버그 모델로 연서시장의 교통 혼잡류를 분석하기 위해서는 연서시장의 정체 구간의 길이, 해당 도로에서 신호 주기 내의 차량 처리수, 정체 패턴, 파랑 밀도와 흐름의 관계 등이 필요하다. 위 분석과정의 모든 데이터는 도시교통 정보센터, 도로명 주소안내 시스템, 서울 열린데이터 광장을 활용하여 수집하였다. 수집한 데이터를 바탕으로 수식(1),(2)에 대입하여 교통흐름을 분석하였다. 또한 파이썬을 활용해 나겔-슈레켄버그 모델에 수집한 데이터를 입력하여 정체 패턴분석 및 차량 밀도와 흐름의 관계를 도출하였다.

Kerner's three phase theory 를 연서시장의 도로에 적용하기 위해 필요한 실제 교통 정보와 직접 측정해야 하는 수치들은 다음과 같다.

1. 차선의 수
2. 교통밀도
3. 평균 속도
4. 평균 차량 길이
5. 차량 간 최소 간격

위 수치를 통해 임계 밀도와 정체 밀도를 계산해 현재 교통 상태를 판단하고, 교통량을 계산해 교통 흐름의 정도를 알 수 있다. 2,3 번의 데이터값은 도시 교통 정보 사이트 중 실시간 교통정보를 통해 필요한 값을 추출하고, 1,4,5 번의 데이터값은 직접 측정하였다. 계산이 복잡한 과정이므로 데이터값을 입력했을 때 현재의 교통 상태를 알아내어 파이썬을 활용하여

시각화하였다. 이를 통해 가장 정체가 심한 구간과 정체가 약화되는 구간의 값을 각각 입력하여 두 상태를 비교하고, 상태 간 전환 관계를 분석해 교통 체증의 원인을 알아낼 수 있었다.

버스 노선 최적화에 필요한 버스정류장의 승하차자수와 위치 데이터는 교통카드 빅데이터 통합정보 시스템과 서울 열린데이터광장에서 수집하였다. 모든 버스정류장별 승하차자수의 평균을 구하여 각 노드의 가중치로 설정하였다. 실제 지도를 기반으로 각 노드 간 간선을 설정하고, 경로길이를 고려하여 가중치를 부여하였다. 경로길이는 OpenRouteService 의 API 를 사용하여 구하였다. 이때 교통체증, 교통신호 등의 요소는 고려하지 않았다.

최적화한 버스 노선의 경제적 영향을 분석하기 위해 동태일반균형모형을 사용하였다. 동태일반균형모형에 대입할 값을 구하기 위해 ‘2023 년 제 4 회 은평구 사회조사 결과 보고서’, ‘2022 서울특별시 지역내총생산 보고서’를 통해 은평구의 총생산, 고용률 등의 경제적 지표, 인구통계학적 자료를 수집하였다. 위 데이터로부터 얻은 은평구 인구, 고용률, 총생산 등의 데이터를 R 코드를 통해 구현한 동태일반균형모형에 대입하여 경제적 영향을 분석하였다.

### 3.2. 연구 절차

본 연구는 다음과 같은 절차로 수행되었다. 연구는 먼저 충격파 이론, 나겔-슈레켄버그 모델, Kerner’s three phase theory 을 바탕으로 연서시장 부근의 도로를 분석하였다. 연구 대상인 연서시장 인근 도로는 약 0.27km 의 길이를 가지며, 신호 대기 시간은 37 초로 설정하였다. 충격파 이론을 바탕으로 분석한 결과, 차량 흐름 및 밀도를 나타내는  $k_2$  는 185.1km/h,  $k_1$  은 44.4 vehicles/km, 그리고 교통량을 나타내는  $q_2$  는 0.081 vehicles/h,  $q_1$  은 0.649 vehicles/h 임을 알 수 있었다.

나겔-슈레켄버그 모델을 분석하기 위해 측정하는 연서시장 도로 구간의 길이가 0.27km 이므로 이를 바탕으로 1 셀을 1.266m 로 설정하였다. 셀의 단위수를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\text{셀 단위수} = \frac{\text{도로 길이(m)}}{1 \text{ 셀의 실제 거리}\left(\frac{\text{m}}{\text{셀}}\right)} \quad (7)$$

은평구 자동차 평균 통행 속도인 20.4km/h 를 나겔-슈레켄버그 모델의 셀 속도로 재정의해주면 약 4.48 의 값으로 반올림하여 4 임을 알 수 있다.

$$\text{셀속도} = \frac{\text{초당 이동 거리}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{1 \text{ 셀의 길이}\left(\frac{\text{m}}{1 \text{ 셀}}\right)} \quad (8)$$



무작위 감속 확률은 일반적으로 빈번히 차가 막히는 상황임을 가정하였기에 0.4 의 값으로 가정하였고, 오전 8 시에서 10 시까지 약 2 시간 정체됨을 바탕으로 시뮬레이션을 실행하였다.

Kerner's three phase theory 를 바탕으로 분석을 진행하기 위해 데이터를 수집하고, 파이썬을 통한 계산을 통해 가장 정체가 심한 구간과 정체가 약화되는 구간의 값을 각각 입력하여 두 상태를 비교하여 상태 간 전환 관계를 분석해 교통 체증의 원인을 분석하였다.

연서시장이 시작되는 연신내역 바로 앞 구간을 관찰 대상으로 하여 금요일 오전 8 시경과 금요일 오전 1 시경을 비교하였다. 각 시간의 평균 차량 간의 거리와 차량의 길이 (5m 로 가정)를 이용해 각각의 정체 밀도( $\rho_{jam}$ )를 구하고, 임계 밀도는 2 차선 통행도로이므로  $\frac{\rho_{jam}}{2}$ 으로 계산했다.

위의 교통흐름을 분석한 결과를 바탕으로 버스 노선 최적화를 진행하였다. 북한산 등산객들을 위한 버스 노선이기 때문에 등산철인 2024 년 3 월 30 일, 31 일 데이터를 활용하였다. 또한 버스정류장의 범위를 은평구 북한산 인근으로 설정하고, 접근성을 높이기 위해 해당 범위의 지하철역(구파발역, 연신내역, 불광역, 녹번역, 독바위역)의 근처 버스정류장과 진관공영차고지를 필수 노드로 설정하고, 해당 범위의 노드 81 개 중 가중치와 노드 간 간격 등을 고려하여 총 12 개의 노드를 선정하였다. 이후, 동적 계획법을 이용해 각 상태에서의 최적 경로를 재귀적으로 탐색하면서 중복 계산을 줄였으며, 비트마스크를 활용하여 노드 방문 상태를 효율적으로 저장하였다. 또한 최적화한 버스노선을 지도에 시각화하였다.

위의 최적화한 버스 노선의 효용을 분석하기 위해 먼저, 교통 활성화와 경제적 영향을 설명하는 기존 이론을 검토하였으며, 지역 단위에서도 유효한 이론과 모형을 선정하였다. 연구의 이론적 틀로는 비교우위론, 신경제지리학, 동태일반균형모형을 채택하여 분석하였다. 동태일반균형모형은 수집한 데이터를 R 코드에 입력하여 그래프로 결과를 도출하였다.

## 4. 연구 결과

앞서 설명한 충격파 이론의 식을 대입해보면, 충격파의 속도(w)는  $-1.12310^{-3}m/s$  임을 알 수 있다. 충격파 속도(w)가 0 보다 작다면, 운전자의 관점에서는 뒤쪽에서 다가오는 차량이 더 많이 정체에 포함되어 신호 대기, 차선 축소, 또는 병목 지점에서 흔히 나타나게 된다. 정체 구간의 길이는 충격파 속도에서 적색 신호를 곱하면, 0.042m 임을 알 수 있다.

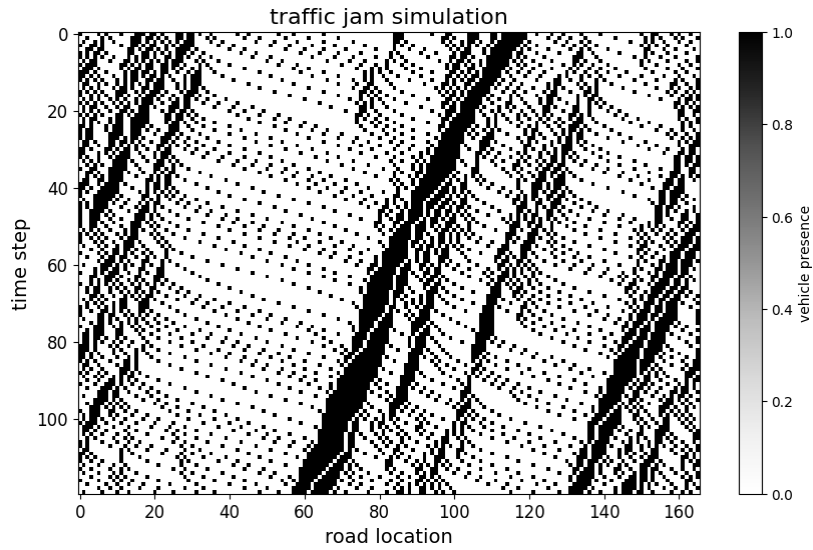


Figure 1. Traffic Jam Simulation

Figure1 은 나겔-슈레켄버그 모델을 적용하여 도출한 결론을 시각화한 것으로, 시간의 흐름에 따라 차량의 위치와 밀도의 변화를 나타낸다. 가로축(x 축)은 도로의 위치를, 세로축(y 축)은 시간의 흐름을 나타내며, 검정색은 해당 위치에 차량이 존재함을, 흰색은 차량이 없음을 뜻한다. 그래프에서 도로의 특정 구간에 차량이 몰려있는 검은 띠와 차량이 적은 흰색 띠가 교대로 나타나는 것은 교통 정체가 간헐적으로 발생하며, 혼잡 구간이 시간이 지남에 따라 도로 상류 방향(즉, 반대 방향)으로 이동하는 정체과 현상을 나타낸다. 시간이 지남에 따라 도로의 혼잡 패턴은 점진적으로 안정화되며, 차량이 원활히 이동하는 구간과 정체 구간이 명확히 분리된다. 차량 밀도가 높은 구간에서는 혼잡이 지속적으로 발생하며, 이는 차량 간 간격과 속도 변화의 영향을 나타낸다. 특히, 차량이 랜덤하게 속도를 줄이는 무작위 속도 감소(random deceleration)의 영향으로 혼잡 구간이 불규칙적으로 형성되며 이동한다. 따라서 교통량이 과도할 경우 정체가 발생할 가능성을 나타내며, 차량 밀도, 속도, 무작위 감소 확률 등의 변수에 따라 혼잡 패턴이 달라질 수 있음을 보여준다. 이 모델의 한계점은 도로의 길이가 너무 짧아 긴 도로의 흐름을 파악할 수 없고 사용한 모델들이 고속도로를 기준으로 한 것이기에, 신호가 존재하는 도로에서는 오차가 존재할 수 있다.

임계 밀도, 정체 밀도 값, 관찰 구간의 교통밀도, 평균 속도에 따른 자유 흐름, 동기화 흐름, 광역 정체 상태는 다음과 같다.

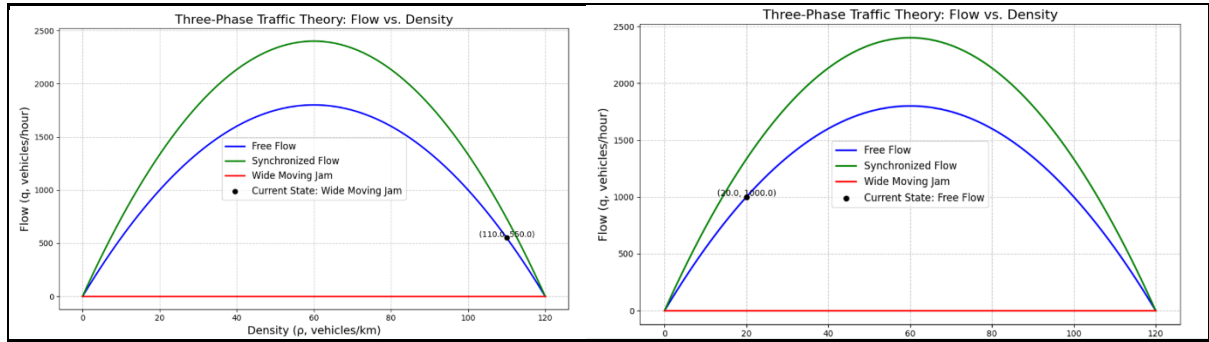


Figure 2. Three-Phase Traffic Theory: Flow vs. Density

Figure 2 의 왼쪽 그래프는 교통밀도 110 vehicles/km , 평균 속도는 5km/h 를 대입한 최대 정체 시간의 값이고, Current State 는 Wide Moving Jam state 이지만 교통 흐름은 약 550 vehicles/h 로 이론과 달리 아예 정지되어 있지 않다는 사실을 알 수 있었다. Figure 2 의 오른쪽 그래프는 교통밀도 20 vehicles/km , 평균 속도는 50km/h 를 대입한 정체 해소 구간의 값으로 Free Flow state 임을 알 수 있다. 이때의 교통 흐름은 1,000 vehicles/h 로 이론과 일치하는 값을 알 수 있다.

즉, 정체 구간은 광역 정체에서 자유 흐름 상태로 전환된다. 이러한 전환은 차량 밀도의 감소 또는 병목 현상의 제거로 발생하므로, 교차로에서 신호등이 초록불로 바뀌며 차량이 빠르게 빠져나갈 때 정체가 해소됨을 알 수 있다. 광역 정체가 시작되기 전 동기화 흐름 상태는 매우 짧게 존재하며, 이는 교통량의 증가와 갑작스러운 차량 유입이 거의 동시에 일어남을 의미한다. 이 구간의 교통 체증을 해소하기 위해서는 결국 도로의 확대가 필요하다. 그러나 이는 현실적으로 불가능한 해결책이기 때문에 본 연구에서는 도로의 확대가 아닌 교통량 축소를 위해 대중교통, 버스의 노선 최적화를 채택했다.

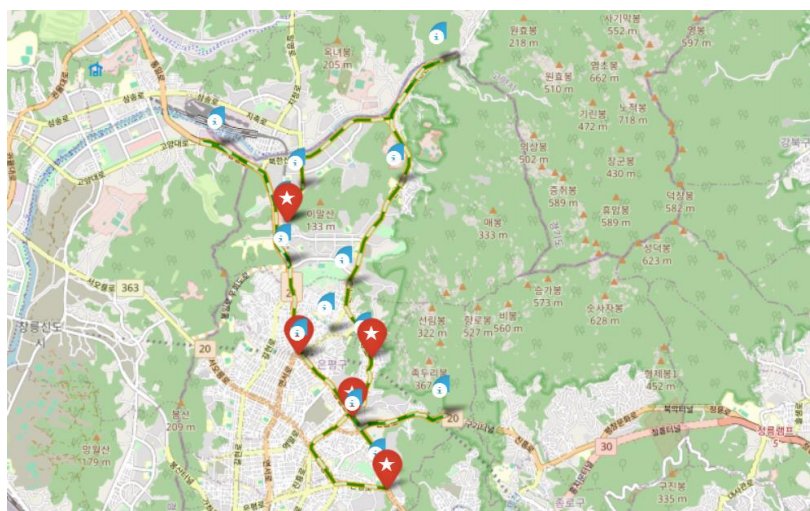


Figure 3. Bus Route Optimization

Figure3 은 최적화한 버스 노선을 지도에 시각화한 것이다. 빨간색 점은 지하철역(구파발역, 연신내역, 불광역, 녹번역, 독바위역)을 나타낸 것이고, 파란색 점은 노드를 나타낸 것이다. 최적화한 버스 경로는 다음과 같다.

진관공영차고지 → 구파발역 2번출구 → 래미안 909 동앞 → 북한산성입구 → 하나고.삼천사.진관사입구 → 은평경찰서 → 수리초등학교입구 → 불광역 3호선.서울혁신파크 → 녹번역 → 불광역 3호선.서울혁신파크 → 구기터널입구 → 불광역 3호선.서울혁신파크 → 연신내역.연서시장 → 박석고개.신도고등학교 → 진관공영차고지

총 버스 노선의 길이는 23.219km 이다. 지나가고자 하는 노드가 순환하는 형태로 위치하고 있어 버스 노선도 한방향으로 순환하는 형태로 최적화되었다. 다만 녹번역과 구기터널입구는 불광역 3호선.서울혁신파크와만 간선으로 연결되어 있어 다른 노드로 이동할 때 무조건 불광역 3호선.서울혁신파크를 지나야 한다는 한계가 존재한다. 이로 인해 해당 노드들을 지날 때는 시간이 불필요하게 많이 걸린다는 단점이 있다.

비교우위론을 지역 단위로 변형하여 교통 활성화에 따른 지역 경제 발전에 대해 분석한 결과, 교통망 개선은 은평구 내 경제 주체 간의 생산성 차이를 기반으로 자원의 효율적 배분을 가능하게 함을 알 수 있다. 교통 비용의 감소는 지역 경제 주체 간 상호작용을 촉진하며, 이는 은평구 내 경제 활동의 효율성을 높이고 지역 경제 성장을 촉발할 수 있음을 보여준다.

신경제지리학을 적용하여 분석한 결과, 교통 접근성의 향상이 특히 은평구와 같은 외곽 지역에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있었다. 교통 최적화에 따른 접근성의 향상은 경제 활동의 공간적 분포를 재조정하며, 외곽 지역에서의 클러스터 형성을 촉진한다. 이는 생산성 향상과 고용 창출로 이어져 지역 경제 활성화에 기여한다.

두 이론을 종합하면, 교통 활성화는 지역 경제 발전에 명확한 양의 상관관계를 가지며, 특히 교통 접근성이 제한적인 은평구와 같은 외곽 지역에서는 더 큰 긍정적 효과를 나타낸다. 이를 바탕으로 본 연구는 동태일반균형모형을 활용하여 교통 활성화가 은평구 경제에 미치는 구체적인 영향을 분석하였다. 은평구의 데이터를 대입한 R 코드를 통해 시뮬레이션한 결과, 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

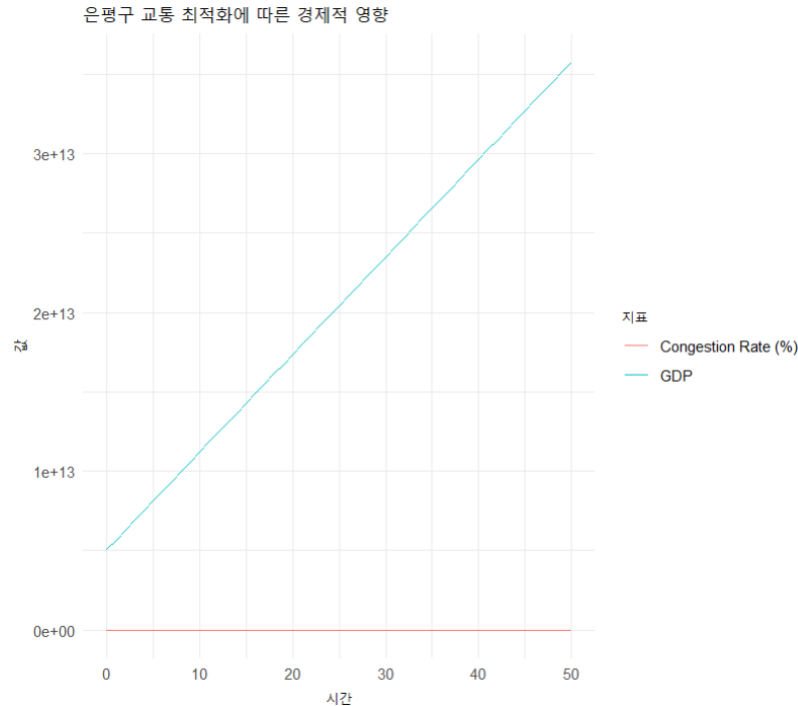


Figure 4. Economic Impact of Transportation Optimization in Eunpyeong

위 Figure4 는 R 코드를 통해 얻어진 그래프이다. 이를 통해 은평구의 지역내총생산은 교통망 최적화 이후 지속적으로 증가할 가능성이 높음을 알 수 있었다. 이는 교통 활성화가 물류비 절감, 노동 생산성 향상, 지역 경제 클러스터 형성 등 다양한 측면에서 긍정적인 영향을 미치기 때문으로 분석된다. 이 결과는 은평구가 교통 활성화를 통해 장기적인 경제 성장을 이뤄낼 수 있음을 시사한다.

## 5. 결론 및 논의

본 연구를 통해 은평구 연서시장 주변의 교통 체증 문제는 도로 확대를 통해 개선할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 도로 확대는 현실적으로 실현하기 어려워 교통량을 줄이는 해결방안을 제시하였다. 이를 위해 대중교통인 버스 노선 최적화를 진행하고 해당 방안을 통해 은평구의 교통 활성화를 효과적으로 달성할 수 있음을 확인하였다. 교통 활성화는 지역 경제 활성화와 주민들의 삶의 질 향상에 긍정적인 영향을 미칠 수 있으며, 특히 교통 접근성이 낮은 외곽 지역에서 그 효과가 더욱 크게 나타난다. 본 연구를 통해 은평구의 교통을 활성화하여 연서시장, 북한산 등의 관광지에 대한 접근성을 높이고 은평구민들의 이동을 더욱 원활하게 하여 지역 경제 활성화를 효과적으로 달성할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구는 교통 신호나 도로 확장과 같은 요소는 고려하지 않아, 이를 보완하기 위한 후속 연구가 필요하다. 향후 연구에서는 보다 정교한 데이터 수집과 분석을 통해 버스 최적화와 도로 확장을 동시에 실시하는 상황을 가정하여, 더 현실적이고 다각적인 교통 개선 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Kerner, Boris S. (2009) Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory. *Springer Science & Business Media*.
- Kerner, Boris S., Sergey L. Klenov, and Dietrich E. Wolf. (2002). "Cellular automata approach to three-phase traffic theory." *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 35.47: 9971.
- 이병준. (2015) Three Phase Theory 를 기반으로 한 램프미터링 알고리즘 연구. *국내석사학위논문 서울시립대학교*.
- Richard Johnsonbaugh. (2021). 이산수학(8th ed.). Pearson. 510-520.
- Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult and Pieter J. Swart, "Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX", in Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008), Gael Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman (Eds), (Pasadena, CA USA), pp. 11-15, Aug 2008
- Mozilla Developer Network. (n.d.). *API reference - MDN Web Docs*. Retrieved November 26, 2024, from <https://developer.mozilla.org/en/docs/Web/API>
- Bellman, R. (1962). "Dynamic Programming Treatment of the Traveling Salesman Problem." *Journal of the ACM*, 9(1), 61-63.
- Held, M., & Karp, R. M. (1962). "A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems." *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(1), 196-210.
- Seong, S.-W., & Mishra, P. (2006). A bitmask-based code compression technique for embedded systems. *In Proceedings of the 2006 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design* (pp. 159-164). IEEE.
- 차량 통행속도(월별/구별. 2023 년도 은평구):  
[https://stat.eseoul.go.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=201&tblId=DT\\_201004\\_I040003&conn\\_p\\_ath=I2&obj\\_var\\_id=&up\\_itm\\_id=](https://stat.eseoul.go.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=201&tblId=DT_201004_I040003&conn_p_ath=I2&obj_var_id=&up_itm_id=)
- 도시교통정보센터(cctv 연신내역, 정체카드): <https://www.utic.go.kr/main/main.do>
- 안내지도(서울특별시 은평구):  
<https://m1.juso.go.kr/gismap-new/MapIndex.do?code=113804133348|1738030&value=road&searchStr=%EC%97%B0%EC%84%9C%EB%A1%9C50%EA%B8%B8>
- 서울특별시 열린데이터광장. (2024). 서울시 버스정류소 위치정보. 서울특별시 교통정보과.
- 강보경. (2009). 중력모형을 이용한 동아시아 지역의 경제통합에 대한 무역창출효과 분석. *산업경제연구*, 22(4), 1961-1974.
- 김의준. (2013). 적정 교통투자 규모 산정: CGE 모형을 중심으로. *국토연구*, 79, 133-147.

- 남광희. (2017). 명목적, 실질적 마찰요인을 고려한 동태확률일반균형모형을 이용한 경기변동의 실증분석. 산업경제연구, 30(2), 331-358.
- 박삼욱. (2008). 경제지리학의 패러다임변화와 신경제지리학. *한국경제지리학회지*, 11(1), 8-23.
- 은평구청. (2023). 2023 년 제 4 회 은평구 사회조사 결과 보고서. 은평구청.
- 서울특별시. (2022). 2022 서울특별시 지역내총생산 보고서: 2020 년 기준. 서울특별시.