

시물레이션을 통한 시내버스 수요 기반 유연형 버스 서비스의 효율성 연구

김재현 · 배장원[†]

Study on Enhancing Efficiency of City Bus with Demand-Based Flexible Services through Simulation

Jae Hyun Kim · Jang Won Bae[†]

ABSTRACT

City buses in South Korea have accumulated financial deficits due to high operating costs and low fares, placing a financial burden on many cities. One of the main causes of these deficits is inefficient bus routes. These inefficiencies arise not only from the goal of accommodating large passenger demand but also from maintaining routes in low-demand areas to ensure the public accessibility of transportation services. This study examines the effectiveness of flexible bus services that dynamically omit specific route segments based on real-time passenger demand. Cheonan City's Bus Route 405 is selected as a case study, and the effectiveness of the flexible bus service is analyzed through experiments using the AnyLogic simulator. The simulation incorporates actual boarding and alighting data at each stop and reflects time-specific demand patterns, replicating the operation of partially omitting route segments based on demand. The experimental results confirm that operational efficiency improves when low-demand, winding segments are skipped, particularly by reducing driving distances, fuel consumption, and operating costs. These findings suggest that, in the long term, flexible bus services can help mitigate the financial burden on public transportation systems.

Key words : Transportation Simulation, Operational Efficiency of Buses, Route Curvature, City Bus, Flexible Bus Services

요 약

국내 시내버스는 높은 운행 원가, 낮은 요금 등으로 재정적자가 누적되고 있으며, 여러 도시에서 시내버스 적자에 대한 재정적 부담을 감당하고 있다. 특히 비효율적인 노선 경로는 시내버스 적자의 주된 원인 중 하나로 지목된다. 이러한 비효율적인 노선 경로는 단순히 많은 승객 수요를 흡수하기 위한 목적뿐 아니라, 대중교통 서비스의 공공성 확보를 위해 수요가 적은 지역의 노선을 유지하는 과정에서 발생하기도 한다. 본 연구에서는 비효율이 발생하는 노선을 대상으로 승객 수요를 실시간으로 반영하여 노선의 특정 경로를 유연하게 생략 운행하는 유연형 버스 서비스의 효과성을 확인한다. 천안시 시내버스 405번 노선을 사례로 선정하고, AnyLogic 시물레이터를 활용한 실험을 통해 유연형 버스 서비스의 효과성을 분석한다. 실제 정류장별 승하차 인원수 데이터를 기반으로 시간대별 수요 패턴을 반영하였으며, 수요에 따라 노선 경로를 부분적으로 생략하는 운행을 재현하였다. 실험 결과, 굴곡 경로를 수요에 따라 생략함으로써 노선의 운행 효율성이 개선되는 점, 특히 주행 거리 단축에 따른 연료 소비량 및 운영 비용 감소 등의 효과를 확인할 수 있었다. 이는 장기적으로 대중교통 재정 부담 완화에도 기여할 것으로 기대한다.

주요어 : 교통 시물레이션, 버스 운행 효율성, 노선 굴곡도, 시내버스, 유연형 버스 서비스

Received: 9 February 2025, Revised: 20 April 2025,
Accepted: 24 April 2025

[†] **Corresponding Author**: Jang Won Bae
E-mail: jangwon_bae@koreatech.ac.kr
Korea University of Technology and Education
School of Industrial Management

1. 서론

시내버스는 대표적인 대중교통 수단으로서 시민의 이동을 지원하는 공공재적 성격을 갖는다(변설원, 2022). 한국은 급격한 도시화 과정에서 인구가 밀집한 지역과

그렇지 않은 지역으로 구분되었으며, 특히 인구감소와 고령화가 진행 중인 저밀도 지역에서는 시내버스 서비스 공급에 있어 비효율이 발생하고 있다(오상진 등, 2022). 이러한 비효율은 저밀도 지역에서의 통행 수요가 불규칙적이고 널리 분포된 특성에서 기인한다.

버스 운영 업체는 수익 극대화를 추구하며 비효율이 발생하는 저밀도 지역의 노선 운행을 기피하는 경향이 있다. 이를 해결하고 시내버스의 공공재적 기능을 강화하기 위해 여러 지자체는 기존 민영제로 운영되던 시내버스를 준공영제로 전환하여 운영하거나 버스 운영 업체에 적자 노선에 대한 손실 보조금을 지급하고 있다(성우용, 2011). 2004년 서울시가 버스 노선의 공공성 강화와 안정적인 서비스 제공을 목적으로 준공영제를 처음 도입하였으며, 이후 대전, 광주, 대구, 부산, 제주 등 다른 지자체에서도 유사한 목적으로 준공영제를 시행하였다. 해당 지자체들은 노선체계 개편을 통해 공공성을 유지하는 한편, 수입금 공동관리제를 도입하여 수요 고밀도 지역에서 대중교통 제공업체 간의 과도한 경쟁과 중복 운행 문제를 완화하였다. 또한 시내버스 운영 업체의 적자에 대한 재정 지원을 제공하는 것으로 운영의 지속 가능성을 도모하였다. 그러나 시내버스 운송 수익은 꾸준히 감소하는 추세를 보여 각 지자체의 적자 보전을 위한 보조금 지급 규모는 지속적으로 확대되고 있다. 서울시 시내버스 재정지원액 규모는 2010년 2,097억 원에서 2018년에는 5,402억 원으로 증가하였으며, 대전시의 경우는 2010년 390억 원에서 2018년 575억 원으로 증가하였다. 이러한 상황은 지방 재정 부담을 가중시키고 있어 문제 해결을 위한 방안 마련이 시급하다.

시내버스 운영 업체에 대한 재정 지원으로 발생하고 있는 재정 부담 문제를 해소하기 위해 각 지자체는 기존 버스 노선을 개편하거나 출퇴근 시간대나 공휴일 등 수요에 따라 배차 간격을 유연하게 조정하는 등 다양한 해법을 탐색, 도입하고 있다(성우용, 2011; 이원규, 2009). 광주의 경우 2016년 매년 증가하는 시내버스 운영 적자 지원량 절감 및 신규 대중교통 수요에 대처하기 위하여 노선을 개편하였다. 98개 노선 중 49개 노선이 조정, 분리, 통합되었다. 청주시의 경우는 재정 지원으로 인한 부담을 해결하기 위하여 노선 신설 및 조정 등을 시도하고 있으며, 대중교통 수요가 상대적으로 적은 주말에는 일부 노선에 감축 운행을 시행하여 효율성을 개선하고 있다(양정훈 등, 2024).

이러한 노선 개편이나 감축 운행과 같은 정책은 시내버스 운영 효율성에 기여할 수 있지만, 동시에 기존의 버

스 수요를 충족하고 공공성을 유지할 수 있는지 고려할 필요가 있다. 공공성까지 고려하기 위해서 중국의 여러 버스 운영 업체들은 매일 승객들의 수요를 확인하여 노선을 개편하고, 승객들에게 투표를 받아 노선 개편을 최종적으로 확정하거나 실시간으로 수요에 따라 노선을 유연하게 조정하며 운영된다(Pei 등, 2019).

본 연구에서는 시내버스 운영 효율화 방안으로 유연형 버스 서비스를 고려하고, 이를 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석한다. 특히 경제성과 공공성이라는 두 요소를 동시에 고려하여, 실제 버스 운행 데이터를 기반으로 유연형 버스 서비스 도입 효과를 현 시스템과 비교하였다. 시뮬레이션에는 천안시 405번 시내버스의 실제 운행 데이터를 반영하였으며, 정류장별 승·하차 수요를 토대로 수요가 적고 우회거리가 긴 구간을 생략 운행하는 형태로 모델링하였다.

본 연구는 실제로 도입되지 않은 유연형 버스 서비스를 실제 데이터 기반의 시뮬레이션으로 모델링하고, 기존 운영 방식과 비교 분석을 수행했다는 점에 의의가 있다. 나아가 이는 추후 관련 정책을 고려할 때 필요한 여러 데이터를 제공할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 관련 선행연구를 검토하고 유연형 버스 서비스를 소개한다. 3장에서는 천안시 405번 노선을 대상으로 유연형 버스 서비스 효율성을 분석하는 과정을 소개한다. 4장에서는 시뮬레이션 설계 및 구현 과정을 설명하고, 5장에서 시뮬레이션 실험 과정 및 결과를 보인다. 마지막으로 6장에서는 연구 결과를 요약하고 시사점 및 향후 개선점을 제시한다. 3장 및 5장의 세부 챕터는 각 과정의 순서에 따라 구성하였다.

2. 선행연구

기존 선행연구들은 주로 버스 운영 효율성에 초점을 맞추어 분석을 진행했으며, 특히 버스 운영체제나 노선별로 구분하여 효율성을 분석한 경우가 많았다. 공공성은 연구자가 임의로 정의를 내린 후 그 정의에 맞게 해당 노선이나 운영 방식이 이를 충족하였는지를 분석하였다.

최승현 등(2024)은 국내 16개 지자체를 대상으로 버스 운영체제에 초점을 맞추어 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA) 및 맘퀴스트 생산성지수(Malmquist Productivity Index) 분석을 수행하였다. 분석 결과 민영제 지역 대비 준공영제 지역에서의 운영 효율성이 높게 나타났으며, 민영제 지역이라도 인구밀도가 높아 수송 규모가 큰 대도시 지역은 효율성이 높게 나타났다. 즉, 인구

밀도가 낮은 지역에서는 비효율성이 두드러지며, 이를 개선하기 위해 서비스 규모를 확대하여야 하지만 현실적인 제약으로 인해 수요 응답형 대중교통과 같은 다른 방안을 권고하였다.

양정훈 등(2024)은 매년 증가하는 버스 준공영제 운영 비용으로 어려움을 겪는 청주시를 대상으로 자료포락분석 및 토빗 회귀분석(Tobit Regression)을 활용하여 버스 운영 효율성을 분석하였다. 이 연구는 평일 대비 주말의 낮은 버스 이용량에 주목하여 평일과 주말의 효율성을 비교하였다. 분석 결과 평일 대비 주말의 효율성이 낮게 나타났으며, 주말에 감축 운영을 시행하는 노선은 그 효율성이 증가했다는 결과가 나타났다. 또한 효율성에 영향을 주는 요인으로 운행 횟수, 운행 거리, 정류장 수, 노선 굴곡도가 제시되었다.

Kim과 Paul(2012)은 버스 서비스를 고정형 서비스(conventional service)와 유연형 서비스(flexible service)로 나누어 비교·분석하고, 고정형과 유연형 서비스를 결합한 가변형 서비스(variable-type service)를 제안하였다. 수요 고밀도 지역에서는 고정형 서비스가 적합하고, 수요 저밀도 지역에서는 유연형 서비스가 적합하다고 분석하였다. 또한 수요가 변화하는 지역의 경우 가변형 서비스가 적절한 것으로 분석하였다.

Pei 등(2019)은 승객의 실시간 수요에 따라 유연하게 버스 노선을 조정하는 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 수요에 따라 노선의 회차 지점을 조정하거나 수요가 없는 정류장을 생략하여 운행하도록 설계되었다. 이들은 MATLAB을 활용하여 광저우(Guangzhou) 14번 버스를 대상으로 시물레이션을 제작하고, 제안한 시스템의 효과성을 검증하였다. 시물레이션 결과, 승객들의 총 이동 시간이 단축되고 수요 저밀도 지점에서의 효율성이 향상되었다. 연구에서는 특히 제안한 시스템이 버스 대수가 적고 운행 간격이 길며 승객 수요가 적은 곳에서 효과적이라고 강조하였다.

김숙희 등(2016)은 수원시의 시내버스를 대상으로 노선별 수익성 지수를 산출하고, 버스 서비스 평가 시 수익성만을 기준으로 하는 것의 한계를 지적하며 노선별 공공성을 추가로 평가하였다. 수익성이 낮은 노선의 주요 원인은 수요 저밀도 지역을 운행하기 때문이라고 분석하였으며, 이러한 노선들은 수익성에 초점을 맞추기보다 공공성을 확보하기 위한 접근이 필요하다고 주장하였다. 공공성을 평가하기 위해선 주차 환경이나 대중교통환경, 경제환경, 문화환경 등이 열악한 지역에 투입되고 있는지와 교통약자의 수요에 대응하는지 정도를 평가지표로 활용하였다.

용하였다.

본 연구는 최승현 등의 연구에서 제기된 문제를 바탕으로, 인구밀도가 낮은 지역에서 수송 서비스 규모를 확대하지 않고도 운영 효율성을 개선할 수 있는 유연형 버스 서비스에 주목한다. 유연형 버스 서비스는 수요에 따라 노선을 일부 생략하거나 조정할 수 있어 양정훈 등의 연구에서 제시된 운행 거리, 정류장 수, 노선 굴곡도와 같은 효율성 영향 요인까지 고려할 수 있다. 동시에 노선의 기본 틀과 승객 유형은 바뀌지 않기에 기존의 버스 수요를 충족시키는 수준으로 유지할 수 있어 공공성을 확보하는 데 유리하다.

본 연구에서는 시물레이션을 통해 현재 도입되지 않은 유연형 버스 서비스의 효과를 정량적으로 분석한다. 기존의 유연형 버스 서비스 관련 시물레이션 연구들은 시물레이션 상 수요를 표현할 때 여러 가정이나 설문 기반 데이터를 활용하는 경우가 많았던 반면, 본 연구는 실제 버스 승·하차 데이터를 기반으로 시간대별 수요를 반영하여, 더욱 현실적인 조건에서 유연형 버스 서비스의 효율성을 분석한다. 아울러 일부 선행연구들에서 상대적으로 덜 다루어진 공공성 측면을 주목하여, 유연형 버스 서비스 도입 전후의 승객 수요 충족 여부를 정량적으로 비교함으로써 기존 승객들의 서비스 접근성이 유지되는지를 확인한다. 이를 통해 본 연구는 단순한 운영 효율성 개선을 넘어, 공공성 유지라는 대중교통의 본질적 가치를 함께 검토했다는 점에서 기존 연구들과 차별점을 갖는다.

3. 유연형 버스 서비스 효율성 분석 과정

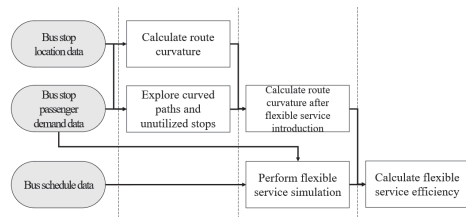


Fig. 1. Research flowchart

본 연구에서 제안하는 유연형 버스 서비스 효율성 분석 과정은 노선에 대한 굴곡도와 굴곡도를 급격히 증가시키는 굴곡 경로 및 정류장 탐색으로 시작한다. 이후 굴곡 경로를 생략할 시 굴곡도가 개선되는 정도를 파악한다. 마지막으로, 굴곡 경로를 생략하는 상황을 시물레이션으로 구현하여 실제 유연형 버스 서비스의 효과성을 계산한다. 이 과정은 Figure 1로 도식화하였다. 이 과정은 천

안시 405번 시내버스를 대상으로, 운행 경로의 일부를 수요에 따라 생각하는 유연형 버스 서비스를 가정하여 수행하였다.

3.1 이용 데이터

이용 데이터는 Table 1로 정리하였다. 버스정류장 위치데이터(Bus stop location data)는 국토교통부, 정류장별 승·하차 인원수 데이터(Bus stop passenger demand data)는 교통카드빅데이터시스템, 버스 스케줄 데이터(Bus schedule data)는 천안교통정보센터에서 획득하였다. 해당 데이터 중 2024년 10월 데이터를 활용하였다.

Table 1. Description of data columns used

Dataset name	Column name	Description
Bus stop location data	Bus stop name	Name of each bus stop
	Latitude /Longitude	Latitude and longitude of each bus stop
Bus stop passenger demand data	Bus stop name	Name of each bus stop
	Route	Route name visiting the bus stop
	Date	Date of the bus stop visit
	User type	Type of bus stop user
	00~23 (Boarding)	Number of passengers boarding during per hour interval
	00~23 (Alighting)	Number of passengers alighting during per hour interval
Bus schedule data	Route	Bus route name
	Weekday departure time	Departure time from the starting point on weekdays
	Weekend departure time	Departure time from the starting point on weekends

3.2 노선 굴곡도 계산(Calculate route curvature)

노선 굴곡도는 버스 노선 효율성 평가 시 자주 고려되는 지표로, 노선의 실제 운행 거리와 기·종점 간 지도상의 최단 거리 비율로 정의된다(박민철 등, 2019). 노선 굴곡도가 높은 노선일수록 경로에서 우회하는 구간이 많으며, 이는 정시성과 통행시간 관리 등에서 문제를 일으켜 효율성이 떨어질 수 있다. 노선 굴곡도는 더 많은 통행수요에 대응하기 위해 다양한 지점을 경유하는 과정에서 주로 증가한다(박준식 등, 2017). 그러나 시내버스는 단

순히 많은 수요에 대응하는 것을 넘어 공공성까지 고려해야 하므로, 이러한 과정에서도 노선 굴곡도가 증가할 수 있다.

버스정류장 위치데이터를 통해 확인한 결과, 405번 노선의 경우 기·종점 간 직선거리가 약 15.0km, 노선의 전체 운행 거리는 약 24.7km이다. 즉, 405번의 노선 굴곡도는 약 1.647로 나타났다.

3.3 굴곡 경로 및 이용 미비 정류장 탐색

(Explore curved paths and unutilized stops)



Fig. 2. Full route map of bus 405

The blue circles indicate curved routes that are assumed to be flexibly skipped during the simulation

버스정류장 위치데이터를 활용하여 노선 굴곡도를 급격히 증가시키는 부분인 굴곡 경로를 찾고, 정류장별 승·하차 인원수 데이터를 활용하여 이용이 미비한 정류장들을 탐색한다. 본 연구에선 확인한 결과 405번 버스 전체 노선도를 나타내는 Figure 2의 파란 원 안의 정류장인 ‘운전1리’, ‘천안실버타운’, ‘천안종합휴양관광지’, ‘천안예술의전당’에 주목하였다.

405번 노선은 굴곡 경로 내의 네 정류장을 방문하기 위해 운행마다 약 3.8km를 추가로 운행하지만, 정류장별 승·하차 인원수 데이터를 확인한 결과 해당 정류장들의 승·하차 수요는 적은 것으로 나타났다. Table 2는 2024년 10월 기준 405번 버스의 굴곡 경로 내 정류장들의 시간대별 승·하차량 합계를 보여주며, 이를 통해 비효율적인 운행 구조를 정량적으로 확인할 수 있다. 굴곡 경로 내의 정류장의 이용량을 모두 합산하면 시간당 평균 약 1~3명 수준에 불과하며, 네 정류장을 모두 이용하지 않은 시간대도 유관순열사유적지행은 약 28.3%, 종합터미널행은 약 37.1%인 것을 확인할 수 있다. 즉, 405번 노선에서는 승·하차 수요가 없음에도 굴곡 경로를 운행하며 비효율이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 2. Basic statistics of total boarding and alighting passengers at bus stops within curved routes of bus 405 during operation hours(6 AM to 12 AM) as of October 2024

Category	Toward ‘유관순열사 유적지’	Toward ‘종합터미널’
Average number of passengers per hour interval	1.28	2.14
Standard deviation of passengers per hour interval	1.21	2.99
Maximum	14	25
Non-Usage time ratio	28.3%	37.1%

3.4 유연형 버스 서비스 도입 후 노선 굴곡도 계산 (Calculate route curvature after flexible bus service introduction)

405번 노선에 대해 유연형 버스 서비스를 도입한 후, 굴곡 경로 내 수요가 없어 해당 경로를 생각하면 약 3.8km의 운행 거리가 단축된다. 즉, 노선 전체 운행 거리는 기존 24.7km에서 약 20.9km가 된다. 이를 바탕으로 다시 계산할 때 노선 굴곡도는 약 1.393으로 개선되며, 굴곡도 측면에서 약 15%의 효율성 향상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 개선은 연료비와 유지 보수 비용 절감을 유도할 뿐 아니라, 승객의 시간 비용 절감에도 기여할 것으로 기대된다.

4. 유연형 버스 서비스 시물레이션

유연형 버스 서비스의 효과성을 평가하고자 시물레이터를 제작하였으며, 천안시 405번 버스의 실제 운행 데이터를 활용하였다. 시물레이션 구현 방식으로는 직접 코딩을 통한 개발 방식과 상용 소프트웨어를 활용하는 Tool 기반 방식이 존재하나, 본 연구에서는 Tool 기반 시물레이션 방식인 AnyLogic을 활용하였다.

AnyLogic은 도로교통, 보행자, 자원 스케줄링 등 다양한 시물레이션 요소를 라이브러리 형태로 모듈화하여 제공하기 때문에, 복잡한 모델도 신속하고 효율적으로 구현할 수 있다. 또한 직관적인 사용자 인터페이스와 시물레이션 결과 시각화 기능을 갖추고 있어, 모델의 동작 과정을 실시간으로 확인하고 분석할 수 있는 장점이 있다(정다희 등, 2020). 실제로 버스 정류장 승객 대기 시물레이션이나 도시 대중교통 환승역 시물레이션 등 여러 교통문제를 시물레이션으로 표현하기 위해 AnyLogic이 활용

되고 있다(이종성, 2021; Liu, 2021). 본 연구에서도 승객의 시간대별 수요 반영, 정류장별 승하차 모델링 등의 다양한 요소를 모듈화된 라이브러리를 기반으로 구성함으로써 시물레이션을 효과적으로 구현하였다.

설계 과정에서는 노선을 굴곡 경로 진입 전, 굴곡 경로 내, 굴곡 경로 이후의 세 구간으로 구분하여 모델링하였다. 굴곡 경로 진입 전 구간에서는 버스의 출발부터 굴곡 경로 진입 지점까지의 이동 및 이동 시간, 승객의 탑승을 구현하였다. 이는 굴곡 경로 내 정류장에서 하차하고자 하는 승객이 반드시 해당 지점 이전에 탑승하므로 이들을 묘사하고, 또한 버스가 기점에서 출발하여 굴곡 경로 진입 지점까지 이동할 때 걸리는 시간을 반영하기 위함이다. 굴곡 경로 내 구간은 유연형 서비스의 핵심 구간으로, 해당 경로의 진입 여부를 판단하는 조건 로직, 굴곡 경로 내 승차 및 하차 처리, 버스의 이동을 모두 구현하였다. 반면 굴곡 경로 이후 구간에서는 기존 시내버스 운영 정책과 차이가 없어 버스의 단순 이동만을 반영하였다. 구현한 내용은 Figure 3에 도식화하였다.

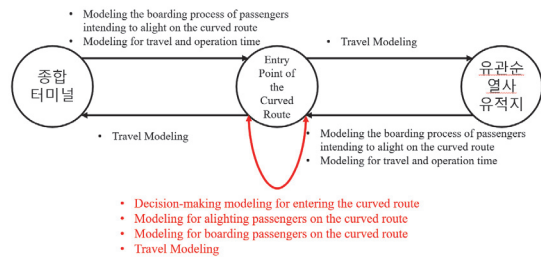


Fig. 3. Simulation implementation contents
The red section represents the curved route modeling

Figure 4는 구현한 시물레이터의 모습이다. 시물레이터는 크게 Source, Queue, Pickup, Delay, SelectOutput, Dropoff, Sink 블록으로 구성된다.

Source 블록은 시물레이터 내에서 에이전트를 생성하는 역할을 하며, 모델 내에는 ‘유적지행버스’, ‘굴곡경로하차희망자_유적지행’, ‘터미널행버스’, ‘굴곡경로하차희망자_터미널행’, ‘굴곡경로승차희망자_유적지행’, ‘굴곡경로승차희망자_터미널행’의 6가지가 존재한다. ‘유적지행버스’와 ‘터미널행버스’ Source 블록은 각기 유관순열사 유적지행과 종합터미널행 버스 에이전트를 생성하고 기타 Source 블록은 굴곡 경로 내 정류장에서 승·하차하려는 승객을 생성한다. 버스 에이전트와 승객 에이전트가 생성되는 시간과 양은 Schedule 블록에 사용자가 직접 설정한다.

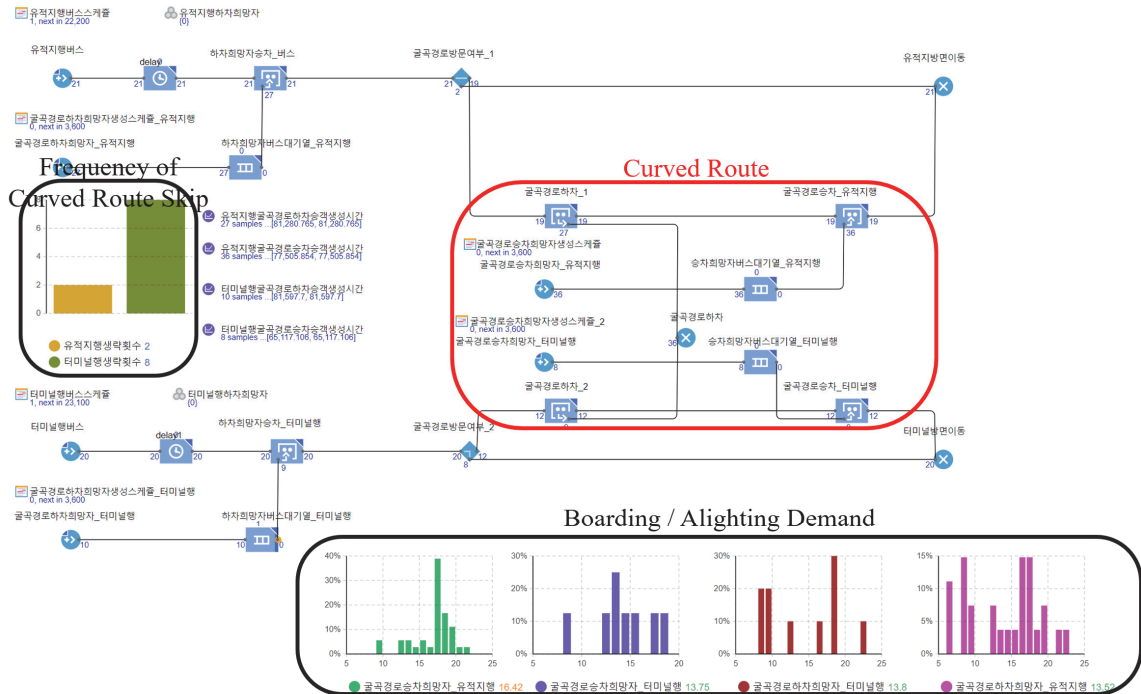


Fig. 4. Structure of the designed AnyLogic simulator

Queue 블록은 에이전트를 대기열에 모아두는 역할을 한다. 모델 내에는 ‘하차희망자버스대기열_유적지행’, ‘하차희망자버스대기열_터미널행’, ‘승차희망자버스대기열_유적지행’, ‘승차희망자버스대기열_터미널행’의 네 블록이 존재한다. 이들은 승객 에이전트가 생성된 후 버스가 도착할 때까지 대기하는 모습을 묘사한다.

Pickup 블록은 Queue 블록에서 대기하는 에이전트를 들어오는 에이전트에 옮기는 역할을 한다. 모델 내에는 ‘하차희망자승차_유적지행’, ‘하차희망자승차_터미널행’, ‘굴곡경로승차_유적지행’, ‘굴곡경로승차_터미널행’의 네 블록이 존재한다. 이들은 각기 Queue 블록에서 대기하는 승객 에이전트를 버스 에이전트에 옮기며 버스 승차 과정을 묘사한다.

Delay 블록은 설정한 시간만큼 에이전트를 지연시키는 역할을 한다. 모델에는 ‘delay’, ‘delay1’의 두 블록이 존재하는데 이들은 각각 유관순열사유적지행 버스와 종합터미널행 버스가 기점에서 출발하여 굴곡 경로 진입 지점까지 이동하는 시간을 묘사한다.

SelectOutput 블록은 에이전트를 설정한 조건이나 확률에 따라 두 개의 출력으로 나누어 보낸다. 모델에는 ‘굴곡경로방문여부_1’, ‘굴곡경로방문여부_2’의 두 블록이

존재하며, 이들은 각 버스가 굴곡 경로에 진입하는지 여부를 판단하는 역할을 한다. 버스 내 굴곡 경로 내 정류장에서 하차하려는 승객이 1명이라도 있거나, 굴곡 경로 내에서 해당 버스에 탑승하기 위해 대기하는 승객이 1명이라도 있는 경우 굴곡 경로에 진입하도록 설정하였다.

Dropoff 블록은 Pickup 블록과 반대로, 특정 에이전트에 포함된 에이전트들을 제거하는 역할을 한다. 모델에는 ‘굴곡경로하차_1’, ‘굴곡경로하차_2’가 있으며 이들은 버스 에이전트에서 승객 에이전트를 제거하며 굴곡 경로 내에서 하차하는 상황을 묘사한다.

Sink 블록은 에이전트가 종료되거나 사라지는 지점을 의미한다. 모델에는 ‘굴곡경로하차’, ‘병천방면이동’, ‘터미널방면이동’의 세 블록이 있다. ‘굴곡경로하차’는 굴곡 경로 내에서 하차한 승객 에이전트를 종료시키는 역할을 하며, ‘병천방면이동’, ‘터미널방면이동’은 각 버스 에이전트를 종료시키는 역할을 한다.

Figure 4의 하단에 그래프 네 개는 시뮬레이션 내의 유관순열사유적지행과 종합터미널행 각각의 굴곡 경로 내 승·하차 수요를 보여준다. 이 수요를 실제 버스 운행 데이터의 승·하차 수요 데이터와 비교하는 것으로 모델에 대한 검증을 수행할 수 있다.

5. 유연형 버스 서비스 시물레이션 실험 수행

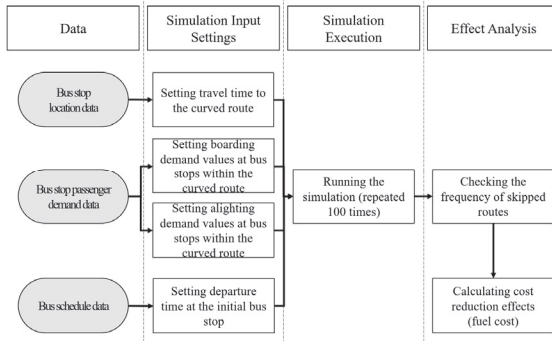


Fig. 5. Flowchart of the simulation experiment

유연형 버스 서비스 시물레이션 실험의 구체적인 과정은 Figure 5로 정리하였다. 실험은 천안시 405번 시내버스의 실제 운행 데이터를 반영하기 위한 값을 입력하는 것으로 시작된다. 이후 시물레이션을 신뢰도 있게 수행하기 위해 동일 조건으로 총 100회 반복 실행하였다. 이후 시물레이션 결과를 통해 굴곡 경로 생략 횟수를 확인하고, 이로 인한 비용 절감 효과를 산출한다.

5.1 시물레이션 입력값 설정

시물레이션에 적용할 입력값에는 버스가 굴곡 경로 진입 지점까지 운행하는 데 소요되는 시간, 굴곡 경로 내 정류장의 승·하차 수요, 버스의 기점 출발 시간이 있다. 각 입력값의 의미와 적용 방법은 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Simulation input settings

Input Settings	Real data	How to apply from real data
Travel time to the curved route	Bus stop location data & total route travel time	Time was proportionally distributed across segments and applied
Boarding/Alighting demand (curved route)	Passenger count data	Hourly average demand per day was calculated and applied
Bus departure time	Bus schedule data	Scheduled departure times were directly applied

굴곡 경로 진입 지점까지의 운행 시간은 버스가 기점에서 출발하여 굴곡 경로까지 이동할 때 걸리는 시간을 구현하기 위해 사용하며, 구간별 운행 거리와 노선의 전체

운행 시간을 종합하여 산정하였다. 구간은 종합터미널부터 굴곡 경로 진입 지점까지, 굴곡 경로 구간, 굴곡 경로 진입 지점에서 유관순열사유적지까지의 세 부분으로 나누었다. 각 구간의 거리는 약 13.8km, 3.8km, 7.1km이며, 이를 천안교통정보센터에서 제시하는 405번 버스의 총운행 시간인 60분을 거리 비율에 따라 배분하였다. 그 결과, 종합터미널에서 굴곡 경로 진입 지점까지는 약 33.52분, 유관순열사유적지에서 굴곡 경로 진입 지점까지는 약 17.24분이 걸리는 것으로 설정하였다.

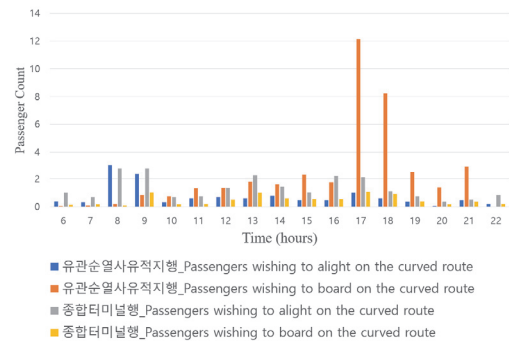


Fig. 6. Boarding and alighting demand inputs by time interval at bus stops within the curved route

굴곡 경로 내 정류장 승·하차 수요 입력값은 정류장별 승·하차 인원수 데이터를 바탕으로 설정한다. 먼저 굴곡 경로 내 정류장들의 수요를 확인한 뒤, 이를 시간대별 수요로 구성된 표 형태로 정리하였다. 본 연구에서는 2024년 10월 1일부터 31일까지의 굴곡 경로 내 정류장별 승·하차 수요를 통해 굴곡 경로 내 정류장들의 하루 평균 승·하차 수요 합계를 계산하고 이를 시간대별로 적용하였다. Figure 6은 시물레이터에 적용한 유관순열사유적지행 버스와 종합터미널행 버스의 승·하차 수요 입력값을 나타낸 것이다. 시물레이터에서는 이 입력값을 토대로 포아송 분포를 활용하여 시간대별 승객 승·하차 수요가 발생하도록 설정하였다.

버스 기점 출발 시간 값은 버스 스케줄 데이터를 활용하였다. 버스 스케줄 데이터를 통해 기점에서 출발하는 시간을 시물레이션에도 반영하여, 해당 시간마다 버스를 생성하도록 하였다. 데이터에서는 정해진 시간마다 유관순열사유적지 방면으로 하루 21회, 종합터미널 방면으로 하루 20회 출발하며 시물레이터에서도 해당 시간마다 버스 에이전트가 생성되도록 설정하였다. 이를 통해 현실의 버스 운행 주기를 반영하였다.

5.2 시뮬레이터 실행 및 검증, 효과 분석

시뮬레이터는 하루 단위로 작동하며, 이를 총 100회 반복 실행하였다. 각 기점에서는 정해진 시간마다 버스가 생성되며, 버스가 생성될 때마다 Source블록에서 카운트가 이루어진다. 이를 통해 매 반복마다 두 방향의 버스가 스케줄 상 각 기점에서 출발하는 수만큼 생성되었는지를 확인하였다. 또한, 생성된 버스는 이동 후 Sink 블록에서 소멸되며, 이 역시 카운트하여 생성된 버스가 모두 정상적으로 운행을 마쳤는지를 검증하였다.

승객은 실제 승·하차 데이터를 기반으로 설정한 시간대별 수요를 바탕으로 포아송 분포를 활용하여 생성하였다. 시뮬레이션 내 승객은 유관순열사유적지행_굴곡경로_승차승객, 유관순열사유적지행_굴곡경로_하차승객, 종합터미널행_굴곡경로_승차승객, 종합터미널행_굴곡경로_하차승객의 네 종류가 존재한다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해, 100회 반복 실행되는 동안 생성된 승객들의 시간대별 분포를 확인한 뒤, 이를 하루 평균으로 환산한 후 입력으로 사용했던 시간대별 수요 값과 비교하여 평균 절대 비율 오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)를 계산하였다. Table 4는 계산한 MAPE 값을 보여준다. 모든 승객 유형에 대해 MAPE가 모두 97%에서 99% 사이로 나타나, 시뮬레이션 상에서 생성되는 승객 수요가 실제 데이터를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다.

유관순열사유적지 방면 버스 시뮬레이션 결과는 Table 5에, 종합터미널 방면 버스 시뮬레이션 결과는 Table 6에 정리하였다. 유관순열사유적지 방면 버스 운행 중 굴곡 경로 내에서 하차하고자 하는 승객은 하루 평균 22.12명, 굴곡 경로 내에서 승차하고자 하는 승객은 하루 평균 40.09명으로 나타났다. 굴곡 경로를 생략 운행하는 횟수는 하루 평균 3.44회로 분석되었다. 즉, 유관순열사유적지 방면 버스는 전체 운행 중 약 16%는 굴곡 경로를 생략할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 4. MAPE of simulated passenger demand

Passenger	MAPE(%)
유관순열사유적지행_Passengers wishing to board on the curved route	98.94
유관순열사유적지행_Passengers wishing to alight on the curved route	99.47
종합터미널행_Passengers wishing to board on the curved route	99.05
종합터미널행_Passengers wishing to alight on the curved route	97.58

Table 5. Daily averages from 100 simulation runs for buses toward ‘유관순열사유적지’

Category	Mean	STD. Dev	Max	Min
Alighting passengers (curved)	22.12	4.39	35	13
Boarding passengers (curved)	40.09	26.81	58	25
Route skips (Skip ratio of daily operations)	3.44 (16.38%)	1.66	11	0

Table 6. Daily averages from 100 simulation runs for buses toward ‘종합터미널’

Category	Mean	STD. Dev	Max	Min
Alighting passengers (curved)	12.87	3.53	21	5
Boarding passengers (curved)	8.07	2.98	16	2
Route skips (Skip ratio of daily operations)	8.49 (42.45%)	1.81	13	4

Table 7. Comparison of conventional and flexible scenarios

Category	Conventional	Flexible
Route travel distance	24.7 km	20.9 km
Fuel usage	472.81 MJ	400.12 MJ
Fuel cost	₩9212.12	₩7794.87
Route travel time	60 minutes	50.76 minutes
Number of bus stops visited	22 stops	18 stops
Passenger handling rate	100%	100%

종합터미널 방면 버스 운행 중 굴곡 경로 내에서 하차하고자 하는 승객은 하루 평균 12.87명, 굴곡 경로 내에서 승차하고자 하는 인원은 하루 평균 8.07명으로 나타났다. 굴곡 경로를 생략 운행하는 횟수는 하루 평균 8.49회로 나타났다. 즉, 종합터미널 방면 버스는 전체 운행 중 42%는 굴곡 경로를 생략할 수 있는 것으로 나타났다.

유연형 버스 서비스 도입 후 굴곡 경로를 생략 운행할 때 달라지는 점은 Table 7에 정리하였다. 생략 운행 시 3.8km를 생략 운행하므로 노선 전체 운행 거리는 20.9km로 줄어들며, 운행 시간 또한 약 9.24분 감소한다. 방문

정류장수는 4개가 줄어든다. 추가로 2024년 10월 기준 천연가스 도매 요금 19.5043원/MJ, 천연가스 연비 2.05km/m³ 자료를 활용하여 유류비 절감 효과를 측정하였다(한국가스공사 천연가스요금정보 ; 충남연구원, 2018). 굴곡 경로를 주행하기 위해 1.8537m³의 천연가스가 필요하며, 이는 약 72.69MJ에 해당한다. 이를 토대로 계산하면, 굴곡 경로를 한 번 생략할 때마다 약 1418.59원을 절감할 수 있다. 유관순열사유적지 방면 노선은 하루 평균 3.44회 생략 운행하므로 4879.95원의 유류비 절감 효과를 기대할 수 있으며, 종합터미널 방면 노선은 하루 평균 8.49회 생략 운행하므로 약 12043.83원을 절감할 수 있다. 이러한 결과는 노선의 효율성을 제고할 때 유의미하게 활용할 수 있으며, 유연형 버스 서비스가 비용 측면에서도 유의미한 개선 효과를 가져올 수 있음을 시사한다. 또한, 유연형 버스 서비스 도입 후 승객의 탑승 데이터를 분석한 결과, 기존에 생성된 모든 승객이 100% 정상적으로 버스에 탑승하는 것으로 나타났다. 이는 시내버스 운영 효율성을 추구하면서도 동시에 공공성은 해치지 않는 것을 나타낸다.

6. 결론

본 연구는 시내버스 운영 시 공공성을 유지하면서도 경제성을 개선할 수 있는 방안으로 유연형 버스 서비스를 고려하며, 시물레이션을 활용하여 그 효과성을 정량적으로 분석하였다. 시물레이션은 천안시 405번 시내버스를 대상으로 AnyLogic 시뮬레이터를 구축해 정류장별 승·하차 수요 및 운행 스케줄 데이터를 반영한 수요 기반의 탄력적 운행을 구현하였다. 그 결과 유관순열사유적지행은 전체 운행의 약 16%, 종합터미널행은 전체 운행의 약 42%가 굴곡 경로를 생략하여 운행할 수 있었으며, 이를 통해 하루 약 17,000원 수준의 유류비 절감 효과를 확인하였다. 또한 굴곡 경로를 생략하는 경우 운행 시간이 단축됨에 따라 승객의 재차 시간 및 대기시간이 감소할 가능성을 확인하였다. 이러한 변화는 향후 승객 만족도를 높이고, 시내버스 이용률 증가로 이어질 수 있는 잠재적 가능성을 시사한다. 더불어 유연형 버스 서비스를 적용한 경우에도 모든 승객의 수요가 충족되었음을 확인하여, 공공성 측면에서도 문제가 없음을 확인하였다. 이 결과는 실제로 운영되지 않은 유연형 버스 서비스를 기존 운영 방식과 비교하고, 관련한 데이터를 제공할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 노선 굴곡도를 통한 경제적인 효율성에 집

중하여 연구를 수행하여, 실제 버스 운행에서 고려해야 할 다양한 효율성과 공공성 측면의 요소들을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 또한 시물레이터 구축 시 정류장별 이동 시간을 정확한 데이터를 사용하지 않고 추정하는 등, 세부적인 요인들이 명확하지 못한 부분이 한계로 작용할 수 있다. 향후 연구에서는 이러한 세부 요인들을 보완하여 시물레이션 실험의 타당성과 신뢰성을 높일 필요가 있다. 아울러 본 연구에서는 데이터가 명확하여 승객들이 특정 정류장에서 405번 노선에 승·하차 하는 상황을 비교적 정확히 구현할 수 있었지만, 현실에서는 승객들이 자신의 수요를 표현하거나 요청하는 데 소요되는 시간, 요청하는 방법, 의사 결정 시점과 같은 다양한 현실적 요소들을 추가로 고려할 필요가 있다. 예를 들어, 승객은 버스가 정류장에 거의 도착한 시점에 정류장에 도착하여 탑승을 시도할 수 있으므로, 굴곡 노선 진입 여부를 사전에 결정하는 현재의 시물레이션 방식은 실제 상황을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 따라서 시물레이션 상에서 이러한 현실적 요소들을 추가적으로 반영한다면, 시물레이션 실험의 현실 적합성을 개선할 수 있을 것으로 보인다.

References

- Byun, S. W. (2022), "A study on the Revenue-Expense Matching and the Differential Patterns of Expense Recognition of Local Bus Transportation Industry", *Tax Accounting Research*, (72), 71-92.
- (변설원. (2022), "시내버스 운송업의 수익비용 대응 정도와 비용인식 패턴", *세무회계연구*, 72, 71-92.)
- Choi, S. H., Cho, G. S., Yoo, Y. S. and Do, M. S. (2024), "Analysis of the Operation Efficiency of the City Bus Industry: Focusing on Comparison between Semi-public and Private Operating systems", *Korean Society of Transportation*, 42(1), 94-106.
- (최승현, 조규석, 유연승, 도명식, (2024), "시내버스 운송업의 운영효율성 분석: 준공영제와 민영제 비교를 중심으로", *대한교통학회지*, 42(1), 94-106.)
- Jeong, D. H., Baek, J. E. and Choi, Y. S. (2020), "Simulation and Real-time Visualization of Truck-Loader Haulage Systems in an Open Pit Mine using AnyLogic", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(1), 45-57.

- (정다희, 백지은, 최요순. (2020), “애니로직을 이용한 노천광산 트럭-로더 운반시스템의 시뮬레이션 및 실시간 가시화”, 한국자원공학회지, 57(1), 45-57.)
- Kim, H. C. and Kim, Y. S. (2018), “Economic Impact Assessment of Introducing Eco-friendly Buses in Chungnam”, *Chungnam Institute*, 1-139.
- (김형철, 김윤식. (2018), “충남 친환경버스 도입에 따른 경제적 효과 검토”, 충남연구원, 1-139.)
- Kim, M. and Schonfeld, P. (2012), “Conventional, flexible, and variable-type bus services”, *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 263-273.
- Kim, S. H., Jang, J. M. and Lee, Y. J. (2016), “Improvement of Bus Route Operation for Strengthening Bus Publicity”, *Suwon Research Institute Research Report*, 1-146.
- (김숙희, 장재민, 이용주. (2016), “버스공공성 강화를 위한 노선운영 개선방안”, 수원시정연구원 연구보고서, 1-146.)
- Lee, J. S. (2021), “Bus stop passenger waiting simulation considering transfer passengers: A case study at Cheongju Intercity Bus Terminal”, *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(4), 217-228.
- (이종성. (2021), “환승객을 고려한 버스 정류장 승객 대기 시뮬레이션: 청주 시외 버스 터미널 정류장 사례 연구”, 한국융합학회논문지, 12(4), 217-228.)
- Lee, W. G., Kim, M. K., Kim, Y. S. and Lee, J. H. (2009), “A study on Implementation Measures for Flexible Dispatch Operation of City Buses”, *Busan Development Institute Research Report*, 1-194.
- (이원규, 김만경, 김울성, 이지훈. (2009), “시내버스 탄력배차 운영 시행방안 연구”, 부산발전연구원, 1-194.)
- Liu, W., Wang, F., Zhang, C., Zhang, J., and Wang, L. (2021), “A Simulation Study of Urban Public Transport Transfer Station Based on Anylogic”, *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 15(4), 1216-1231.
- Oh, S. J., Yoon, Y. H., Hong, S. H. and Jeong, Y. I. (2022), “Measures to Improve Operational Efficiency of Public Transport Deficit Routes”, *Chungbuk Research Institute Research Report*, 1-135.
- (오상진, 윤영한, 홍성호, 정용일. (2022), “대중교통 적자노선 운영 효율화 방안”, 충북연구원 연구보고서, 1-135.)
- Park, J. S., Kim, G. J., Go, S. R., Jeong, D. W. and Moon, J. H. (2017), “Analysis on the Curvature of the Long Distance City Bus Routes Operation in Metropolitan Areas”, *Korea Transport Institute Research Report*, 1-105.
- (박준식, 김거중, 고승렬, 정동우, 문지혜. (2017), “수도권 광역버스 노선 굴곡도 현황조사 및 개선방안 마련”, 한국교통연구원 수시연구보고서, 1-105.)
- Park, M. C., Ha, T. J., Kwon, S. D. and Oh, S. J. (2019), “Improvement of Bus Route System Considering Route Curvature”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 39(1), 93-103.
- (박민철, 하태준, 권성대, 오석진. (2019), “노선 굴곡도를 고려한 시내버스 체계 개선에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 39(1), 93-103.)
- Pei, M., Lin, P. and Ou, J. (2019), “Real-time optimal scheduling model for transit system with flexible bus line length”, *Transportation Research Record*, 2673(4), 800-810.
- Seong, W. Y. (2021), “The Impact of Public Transportation Policy Changes after the Implementation of the City Bus Quasi-Public Operation System: Focusing on the Policy Effectiveness of BRT and the Free Transfer Fare System”, *Doctoral dissertation, Pusan National University*, 1-161.
- (성우용. (2021), “시내버스 준공영제 실시 이후 대중교통 정책변화의 영향 연구: BRT와 무료환승요금제의 정책효과성을 중심으로”, 부산대학교 박사학위논문, 1-161.)
- Yang, J. H., Han, H. R., Kim, N. Y. and Song, T. J. (2024), “Efficiency Analysis for Cheongju City Bus Route using DER(Data Envelopment Analysis)”, *Journal of Transport Research*, 31(1), 51-65.
- (양정훈, 한효림, 김나연, 송태진. (2024), “자료포락 분석을 이용한 청주시 버스노선 효율성 분석: 주말 및 감축운행을 중심으로”, 교통연구, 31(1), 51-65.)



김 재 현 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0004-5953-5808> / braincom07@koreatech.ac.kr)

2024 한국기술교육대학교 산업경영학부 경영학사

2025~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학과 석사과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 빅데이터 분석



배 장 원 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059> / jangwon_bae@koreatech.ac.kr)

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사

2009 한국과학기술원 전자공학과 석사

2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사

2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원

2020~ 2023 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수

2023~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학부 부교수

관심분야 : 시스템 분석 및 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능