

# 공공 자전거 시스템의 효율적 운영을 위한 모델링 및 시물레이션: 세종시 사례 중심

배장원 · 최선한<sup>†</sup> · 이천희 · 백의현

## Modeling and Simulation for Analyzing Efficient Operations on Public Bike System: A Case Study of Sejong City

Jang Won Bae · Seon Han Choi<sup>†</sup> · Chun-Hee Lee · Euihyun Paik

### ABSTRACT

In recent years, public bicycle systems are widely spread over the world according to the development of ICT technology. Since the public bicycle systems in large cities need to secure both publicity and convenience for citizens, analysis of various their issues from introduction to operation is required. In addition, it is also necessary to prepare for various scenarios for coexistence with the PM business, which is recently in the spotlight as a last mile means and normally managed privately. This paper introduces modeling and simulation for efficient operations of public bicycle systems. In particular, the proposed method was developed in a form that can be easily used in other cities by modeling the general structure and behavior of the public bicycle system, and it was developed to facilitate modification and expansion of the future model with a component-based model configuration. This paper provides a case study of the propose method, which is the public bicycle simulation in Sejong City. The simulation results were derived by applying the data from the public bicycle system of Sejong City, and they were verified with the associated real data of Sejong City. Using the verified model, it is expected that it can be used as a tool to design and analyze various services on the public bicycle systems, which were especially suitable for Sejong City.

**Key words** : ballistic missile, interceptor, intercept debris, flight test, safety area, modeling, simulation

### 요 약

최근 정보통신기술의 발달에 따른 공공 자전거 시스템 운영 사례가 증가하고 있다. 대도시의 공공 자전거 시스템은 시민에 대한 공공성과 편리성을 모두 확보해야하기 때문에, 도입부터 운영까지 다양한 이슈에 대한 분석이 필요하다. 또한, 최근 라스트 마일 수단으로 각광받고 있는 개인 모빌리티 사업과의 공존을 위한 다양한 시나리오 역시 대비할 필요가 있다. 본 논문은 공공 자전거 시스템의 효율적 운영 관리를 위한 시물레이션 모델을 제안한다. 특히, 제안한 방법은 공공 자전거 시스템의 일반적인 구조와 행태를 모델링 하여 다른 도시에 쉽게 활용할 수 있는 형태로 개발하였고, 컴포넌트 기반의 모델 구성으로 향후 모델의 수정 및 확장이 용이하도록 개발하였다. 본 논문에서는 제안된 방법의 사례로 세종시 공공 자전거 시물레이션을 수행하였다. 세종시 공공 자전거 시스템의 데이터를 적용하여 시물레이션 결과를 도출하고, 도출된 결과를 세종시 실데이터와 비교하여 검증하였다. 검증된 모델을 이용하여, 세종시에 적합한 공공 자전거 서비스를 설계하고 분석할 수 있는 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**주요어** : 공공 자전거 시스템, 라스트 마일, 모델링, 시물레이션

\* 이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 신임교수 연구과제 지원에 의하여 연구되었음

**Received:** 11 January 2021, **Revised:** 18 February 2021,  
**Accepted:** 6 March 2021

<sup>†</sup> **Corresponding Author:** Seon Han Choi  
E-mail: shchoi@pknu.ac.kr  
Dept. of IT Convergence and Application Engineering  
Pukyong National University

## 1. 서론

공공 자전거 시스템(Public Bike System)은 전 세계적으로 약 130여개 도시에서 운영 중인 대표적인 자전거 서비스이다. 역사적으로는 1998년 프랑스의 렌느(Rennes)에서 처음 시작되었고, 이후 세계의 대도시에서 다양한

형태로 도입되었다.

공공 자전거 시스템이 기존 대여자전거와 다른 점은 크게 두 가지로 들 수 있다. 우선, 대여와 반납이 한 곳에서만 이루어지는 기존 대여자전거와는 다르게 공공 자전거 시스템은 여러 대여소를 운영하여 이용자들의 편리성을 도모하고 있다. 또한, 최신 ICT 기술(전자 요금 지불, 위치 추적, 자동잠금장치 등)을 활용하여 높은 질의 대여 서비스를 제공하는 시스템이다.

이러한 공공 자전거 시스템은 우리나라의 많은 대도시에 설치되고 운영되고 있다. 현재 우리나라의 서울, 대전 등의 대도시들은 도시 목적에 맞는 공공 자전거 시스템을 운영하고 있다. 또한, 2012년 행정 도시로 건설된 세종시 역시 시민들의 이동 편의성을 위해 공공 자전거 시스템을 운영하고 있다. 이러한 대도시들의 공공 자전거 시스템은 주로 도시 관광과 출퇴근을 위한 대중교통 활성화를 목적으로 하고 있다.

대도시의 공공 자전거 시스템은 일반적으로 24시간 개방형 시스템으로 운영되는 특징이 있다. 즉, 모든 시민이 사용할 수 있고, 자동 대여 및 반납 시스템으로 24시간 운영된다. 또한, 자전거를 대여하는 대여소가 도심의 중요지점에 다수 설치되어 시내 이동에 이용하기 편리하다는 장점이 있다. 공공 자전거 시스템은 시민의 건강이나 레저 용도로 활용되기도 하지만, 요즘은 또 하나의 대중교통으로 인식되어 라스트 마일(Last mile, 버스, 전철 등의 주요 대중교통으로 역까지 이동한 후, 목적지까지 남은 1마일)의 수단으로 활용되고 있다(이재영 등, 2012).

이러한 추세를 고려할 때, 앞으로 더 많은 도시들이 공공 자전거 시스템을 도입할 것으로 예상된다. 그러나 성공적인 공공 자전거 시스템의 도입 및 운영을 위해서는 도시 특성을 고려한 효율적인 운영이 필수적이다. 예를 들어, 도시의 인구 이동 데이터를 분석하여 운영할 공공 자전거의 수를 결정하는 것부터 공공 자전거 사용이 많을 것으로 예상되는 지점에 대여소를 건설하는 것이 필요하다. 더 나아가서, 공공 서비스인 만큼 시민 모두에게 혜택이 갈 수 있도록 설계 운영되어야 하며, 향후 민간에서 운영하는 PM(Personal Mobility) 사업 등과의 공존을 위한 전략적인 부분에 대한 고려도 필요하다.

본 논문에서는 상술한 다양한 공공 자전거 시스템의 문제에 대해서 종합적이고 총괄적으로 분석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 제안한다. 공공 자전거 서비스에 대한 데이터가 많지 않은 현 상황에서, 시뮬레이션 방법은 다양한 시나리오를 반영한 what-if 분석을 통해서 공공 자전거 시스템에 통찰을 줄 수 있다. 특히, 제안된 시뮬레이

션 모델은 공공 자전거 시스템의 컴포넌트 조합으로 표현하여, 다양한 대도시의 특성을 반영할 수 있는 일반적인 방법인 동시에 향후 모델의 확장 및 수정이 용이하도록 개발되었다.

본 논문에서는 제안된 방법의 사례 연구로 세종시의 공공 자전거 시스템인 ‘어울링’의 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 제안한 모델링 방법에 어울링의 자전거 대여/반납 이력 및 대여소 데이터를 활용하여, 어울링 시스템의 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 도출된 결과의 신뢰성을 확인하기 위해, 실험데이터와 시뮬레이션 결과의 검증(Validation)을 수행하였고, 검증 결과로 실험데이터와 시뮬레이션 결과의 많은 유사성이 확인하였다. 또한, 대여 성공률을 기반으로 효과도 분석을 수행하였고, 분석 결과를 바탕으로 세종시 어울링의 개선 방안에 대해서 논하였다. 본 연구 결과가 향후 공공 자전거 서비스에서 고려되는 자전거 재배치, 재고 관리 문제와 같은 다양한 공공 자전거 서비스 분석에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 배경 지식

현재 공공 자전거 시스템을 운영하고 있는 세종시의 관점으로 공공 자전거 시스템의 중요성과 문제점을 분석하고, 공공 자전거 시스템에 대한 관련 연구의 진행 사항을 분석하여, 본 논문의 연구의의를 설명한다.

### 2.1 세종시: 대중교통 중심 도시

대중교통이 얼마나 대중적으로 이용되고 있는지를 나타내는 지표 중의 하나로 대중교통수송분담률을 활용할 수 있다. 대중교통수송분담률이란 우리나라의 경우 특히 육상으로 통행하는 교통수단의 총 여객수송실적 중, 대중교통수단의 여객수송실적의 비율을 의미한다. 여기서, 대중교통수단이란 철도, 버스, 자전거, 보행자 도로 등을 의미한다(국가지표체계, 2020). 이러한 대중교통수송분담률은 사회적으로는 저소득층과 교통약자를 위한 사회복지차원에서 중요한 의미가 있고, 요즘 더욱 중요하게 다뤄지고 있는 환경적인 측면에서는 개인 차량 이용을 줄여 에너지 소비와 오염물질 배출을 줄여 삶의 질과 환경의 지속 가능성(Sustainability)을 의미하기도 한다.

우리나라의 대중교통수송분담률은 평균 40.4%(2018년 기준)를 보이고 있으며, OECD의 다른 국가들에 비해서 2배 이상 높은 수치를 보이고 있다. 특히, 서울의 대중교통수송분담률은 74%(2012년 기준)로 세계적 도시의 대중교통 수준을 보여주고 있다(서울연구데이터서비스, 2015).

우리나라의 행정중심도시인 세종시는 가장 최근에 만들어진 계획도시인 만큼, 설립 초기부터 대중교통수송분담률 70%를 목표로 하고 있다(한국교통연구원, 2013). 이를 위해서 세종시는 도로의 구조와 규모들을 설계부터 고려하였다. 그러나 세종시의 현재 대중교통수송분담률은 목표치에 많이 모자라고 있는 실정이다. 이를 개선하기 위해서, 세종시는 각 대중교통 분야에 대한 세부적인 목표를 설정하였고, 특히 세종시는 현재 운영 중인 공공자전거에 대해서는 2030년 분담률 20% 달성을 위해 노력 중이다.

## 2.2 어울링: 세종시 공공자전거 시스템

많은 대도시들이 도시 환경이나 시민 건강을 위해서 공공 자전거 시스템을 운영 중에 있다. 세종시는 2014년 10월부터 ‘어울링’이라고 하는 공공 자전거 서비스를 시행 중이다<sup>4)</sup>. 어울링은 자전거 대여소 중심의 공공 자전거 대여/반납 시스템이다. 즉, 자전거 대여소에서 무인으로 공공 자전거 ‘어울링’의 대여와 반납이 이루어지는 형태로 운영되고 있다. 따라서 사용자는 온라인 사이트를 통해 회원가입을 한 후 임의의 대여소에 가서 자전거를 대여하고 이동한 후, 다른 임의의 대여소에 반납하는 방식으로 어울링 서비스를 이용할 수 있다.

또한, 이용 편의성을 높이기 위해 세종시는 온라인 사이트와 앱을 통해서 어울링 대여소의 위치와 현재 거치되어 있는 자전거 수에 대한 정보를 제공하고 있다(Fig. 1. 참고).

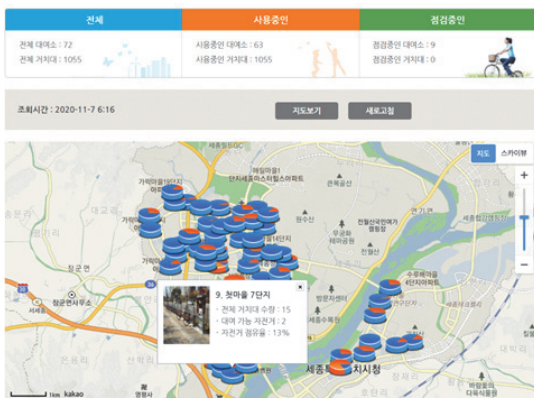


Fig. 1. Screen shot of Sejong bike site (www.sejongBike.kr)

세종시는 2014년 10월 어울링 서비스를 시작한 이래로, 자전거와 대여소를 지속적으로 늘리는 한편 더욱 편리한 공공자전거 시스템 도입을 추진하고 있다. 2018년

8월 기존 어울링(이후 구 어울링이라고 칭함)에서 더욱 개선된 새로운 어울링(이후 뉴 어울링이라고 칭함)을 도입하였다. 구/뉴 어울링의 가장 큰 차이점은 대여소 반납을 강제하지 않아 사용자가 더욱 편리하게 이용할 수 있게 되었다는 점이다. 이후, 2019년 09월에는 전기 자전거인 일레클을 도입하였다. 특히, 일레클은 민간에서 운영하는 자전거 서비스이니 만큼, 공공 자전거 서비스인 어울링과의 공존에 더욱 많은 고려가 필요하게 되었다. 일레클 도입을 시작으로 세종시는 다양한 형태의 PM의 도입을 추진하고 있다.

다양한 자전거 시스템의 도입은 세종 시민들의 대중교통 분담률을 높일 수 있는 요인이 될 수 있겠으나, 운영과 관리의 주체인 세종시에게는 많은 이슈를 던져주고 있다. 예를 들어, 구/뉴 어울링의 경우 자전거 거치 방법이 다르기 때문에 자전거 대여소도 구분되어 운영된다. 즉, 구 어울링 자전거는 뉴 어울링 거치소에 거치가 불가능하여, 사용자 입장에서는 이 둘을 구분하여 이용해야 한다는 불편함이 있다. 또한 뉴 어울링이 상대적으로 편의성이 좋기 때문에, 구 어울링의 사용률은 점차 줄어들고 있는 실정이다. 따라서 세종시 입장에서는 구 어울링을 그대로 유지해야 하는지 혹은 폐지하고 모두 뉴 어울링으로 교체해야 하는지에 대한 고민이 있을 수 있다.

또한, 점차 민간 자전거 서비스가 도입됨에 따라 공공 서비스와의 공존 방법에 대해서도 다양한 각도의 분석이 필요하게 되었다. 세종 시민을 대상으로 한 제로섬 게임에서 민간과 공공 자전거 서비스는 서로 경쟁적인 위치가 될 가능성이 농후하다. 그러나 민간 자전거 서비스는 경제적인 효과를 아무래도 가장 중요하게 생각하기 마련인 반면, 공공 자전거 서비스는 경제적인 효과 보다는 시민 복지 차원의 정책을 고려해야 하는 특성이 있다. 따라서 세종시는 민간/공공 자전거 서비스 운용에 대한 다양한 상황을 고려해야만 한다.

## 2.3 관련 연구

많은 대도시가 자전거 이용을 장려하고 있는 만큼, 자전거 서비스에 대한 다양한 연구 분석이 진행되었다. 특히, 이런 이슈에 대해서 자전거 관련 데이터를 활용한 다양한 연구들이 이루어지고 있다.

예를 들어, 공공 자전거 정비소의 재고 관리를 최적화하는 내용에 대한 연구가 있었다(임희중 등, 2020). 이 연구에서는 확률적 동적 계획법(Stochastic Dynamic Programming)을 이용하여 정비센터에서 보유해야할 여분의 공공자전거에 대한 최적 재고관리 방안을 제안하였

다. 이를 위해 서울시 공공 자전거의 고장 통계치를 활용하여 모델을 피팅하였다.

새로운 형태의 자전거 서비스인 거치 장소가 없는 공유 자전거의 통행 특성을 분석한 연구가 있다(김숙희 등, 2019). 이 연구는 스테이션 없는 공유자전거가 도입된 수월시의 사용자의 대여 반납 이력 데이터를 이용하여, 자전거 이용현황과 통행 특성, 그리고 이동 경로 분석을 수행하였다. 이러한 분석 결과는 향후 자전거 서비스의 운영 정책 수립에 기여할 수 있다.

공공 자전거 이용 데이터를 이용하여 공공 자전거 서비스 개선에 활용된 예로 공공 자전거의 재배치 전략을 수립하는 연구가 있다(이은탁 등, 2019). 공공 자전거는 사용자가 임의의 대여소에서 다른 대여소로 이동함에 따라, 자전거 재배치라고 하는 과정이 반드시 필요하다. 이 재배치 전략을 효율적으로 수립하기 위해서 각 대여소의 이용 특성을 분석하여 예측 수요를 추정하고, 이를 바탕으로 일정 수준의 거치를 유지하는 계획법을 제안하였다.

위에서 언급한 연구 외에도, 다양한 연구들이 자전거 이용행태 분석(이석준 등, 2018; 장재민 등, 2016)과 자전거 재배치 방안(임동순, 2016; 정인웅 등, 2018) 등의 문제를 실제 데이터를 이용하여 다루었다.

기존의 공공 자전거 관련 연구는 자전거 이용 데이터를 기반으로 하여 다양한 문제를 분석하는데 활용되었다. 그러나 기존 연구들은 특정 문제에 대한 분석을 위해서 제안되고 개발된 한계점을 갖고 있다. 즉, 사용한 데이터는 모두 유사하지만, 분석 모델의 일반화(Generality)에서 한계가 있다는 것이다. 본 연구는 이런 한계점을 타개하기 위해서 자전거 사용 이력 데이터를 입력으로 이용하는 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 이를 활용하여 다양한 도시의 공공 자전거 이용 행태를 분석할 수 있도록 개발하였다.

### 3. 시뮬레이션 모델 개발

이번 장에서는 공공 자전거의 효율적 운용을 분석하기 위한 시뮬레이션 모델의 구조와 기능에 대해서 설명한다. 특히, 모델의 구조를 계층화하여 추후 모델의 관리 및 확장성이 용이하도록 하였고, 모델 내부에는 자전거 사용 이력 데이터를 활용한 확률적 모델링이 적용되었다.

#### 3.1 자전거 이용 시나리오

모델링의 이해를 돕기 위해, 우선 자전거 이용 시뮬레이션의 시나리오에 대해서 설명한다. 앞의 배경지식에서

살펴본 바와 같이, 공공 자전거의 이용은 거치소에서 자전거 대여, 대여한 자전거로의 이동, 다른 거치소로의 반납의 순서로 진행된다. Fig. 2는 본 연구에서 고려하는 자전거 이용 시나리오를 설명한다.

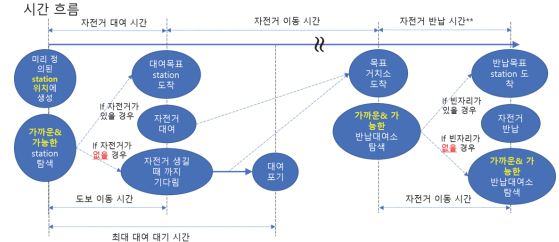


Fig. 2. Simulation scenario of bike usages

자전거 이용 시뮬레이션은 하루를 기준으로 하여 24 시간 동안의 자전거 대여 및 반납 행위를 표현한다. 구체적으로, 시뮬레이션 시나리오를 설명하면 아래와 같다.

(1) **자전거 대여:** 특정 시점에 특정 거치소에 도착한 이용자를 스케줄링함

- (1-1) 만약 대여가 일어날 것을 기대했던 대여소의 특정 시점에 자전거가 없어서 대여가 발생하지 않을 수 있음. 이 경우 이용자는 홈페이지 혹은 애플리케이션을 통해 다른 거치소를 쉽게 찾는다는 가정으로, 가장 가깝고 자전거 대여가 가능한 거치소로 걸어서 이동함
- (1-2) 새롭게 이동한 거치소에 자전거가 있다면 바로 대여 행위를 시작하겠으나, 그렇지 않은 경우에는 자전거를 찾아서 이동하거나 현재 거치소에서 대기하는 행동을 확률적으로 선택할 수 있음

- (1-3) (1-1) ~ (1-2)의 절차는 에이전트 개인에게 부여된 최대 대여 시간까지 반복됨. 그럼에도 불구하고 자전거를 대여하지 못하면, 대여 실패 에이전트로 분류됨

(2) **자전거 이동:** 사용자가 자전거 대여에 성공하면, 미리 결정된 목표 대여소까지 자전거를 타고 이동함. 이때, 목적지 및 이동 시간은 대여 이력 데이터를 기반으로 하여 확률적으로 결정됨

(3) **자전거 반납:** 목표 거치소에 이동하면, 사용자는 자전거 반납을 시도함. 자전거 반납은 목표 거치소의 현재 자전거 보유 수와 거치 가능 자전거 수에 의해 성공 혹은 실패가 결정됨

- (3-1) 반납이 가능한 경우, 해당 거치소에 자전거를

반납하여 자전거 보유 수가 증가하고, 사용자는 행동을 종료함

- (3-2) 반납이 불가능한 경우, 해당 거치소에서 가깝고 반납 가능한 대여소로 이동해서 반납을 시도함. (3-1) ~ (3-2)를 자전거 반납 할 때까지 시도함

### 3.2 자전거 이용 시뮬레이션 구조 모델링

앞 절에서 소개한 시뮬레이션 시나리오를 반영하여, 자전거 이용 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 자전거 이용 시뮬레이션 모델은 구조적(Structural) 부분과 행태적(Behavioral) 부분으로 구분하여 설계하였고, 이를 통해 향후 모델의 확장성을 고려하였다.

자전거 이용 시뮬레이션 모델의 컴포넌트는 자전거를 이용자인 BikeAgent, 자전거의 대여 및 반납을 지원하는 대여소인 BikeStation, 그리고 BikeAgent와 BikeStation의 이동 관계를 표현하는 BikeRoadNetwork로 구성되어 있다. BikeRoadNetwork는 BikeAgent가 BikeStation을 통해 자전거를 대여, 이동, 반납하는 환경을 제공함과 동시에 BikeStation 사이의 거리 및 이동 시간 정보를 관리한다. 또한, 개발의 관점에서는 BikeAgent와 BikeStation을 느슨하게 결합(Loosely coupled)시켜 줌으로써 이후 모델의 유지 보수 및 확장을 수월하게 해준다는 장점이 있다. Fig. 3은 자전거 이용 시뮬레이션 모델의 구조 모델링 과정을 설명한다.

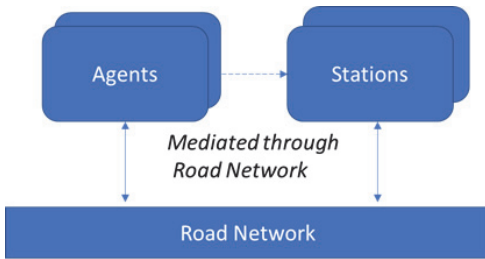


Fig. 3. Structure of bike usage simulation model

Fig. 4는 위에서 설명한 시나리오를 반영한 BikeAgent, BikeStation, 그리고 BikeRoadNetwork 사이의 상호작용을 시퀀스 다이어그램으로 설명 한다: 1) 거치소의 이용 데이터를 바탕으로 거치소의 시점별 이용자를 추정하고, 이를 BikeAgent로 생성한다. 2) BikeAgent는 자전거 대여 시점에 BikeRoadNetwork를 이용하여 자전거 대여 가능성을 체크한다. 3) 대여가 가능하다고 판단되면, 자전거를 이용하여 목적지로 이동한다. 그러지 않으면, 일

정 시점 후 자전거 대여를 다시 시도한다. 4) 목적 거치소 도착 후, 자전거의 반납 가능성을 BikeRoadNetwork를 이용하여 확인한다. 5) 반납 가능하다고 판단되면, 목적 거치소에 반납한다. 그렇지 않으면, 다른 거치소로 이동해서 다시 반납을 시도한다.

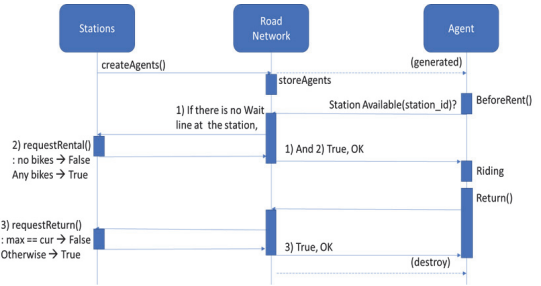


Fig. 4. Sequence diagram among components in bike usage simulation

### 3.3 자전거 이용 시뮬레이션 행태 모델링

시뮬레이션 결과의 신빙성을 높이기 위해서, 자전거 이용과 관련된 세부 행태는 실데이터를 반영하여 모델링 하였다. 특히, BikeAgent 이용 시점 및 거치소 결정, 목적 거치소 선정, 그리고 자전거 이동 시간은 관련 데이터를 분석하여 확률적으로 모델링하였다.

행태 모델링 역시 일반적인 방법으로 활용될 수 있으나, 본 논문에서는 설명의 용이성 및 명확성을 위해, 세종시 공공 자전거 시스템의 데이터를 이용하여 모델링 과정을 설명한다.

#### 3.3.1 자전거 이용 실데이터 분석

세부적인 모델링 내용을 소개하기에 앞서, 활용한 실데이터에 대해서 설명한다. 본 연구에서 사용한 실데이터는 세종시의 공공 자전거인 어울링 관련 데이터이다. 특히, 어울링의 경우 사용자 변화의 안정화가 이루어지는 시점을 고려하여 2019년 5월 1일부터 2020년 4월 30일 까지의 데이터를 사용하였다.

우선적으로 사용한 데이터는 어울링의 대여반납 이력 데이터이다. 대여반납 이력데이터에는 이용한 자전거, 사용자, 대여 일시, 대여/반납 거치소, 이용 시간 등의 정보가 기록되어 있다. 위의 기간 동안의 대여반납이력 데이터는 약 76만 건이 존재하였고, 데이터 분석을 통해서 뉴/구 어울링 사용과 휴일(토, 일요일과 공휴일)/평일 이용의 구분이 필요하다고 파악하였다. 따라서 아래 그림과 같이 네 가지 경우로 데이터를 분류하여 자전거 이용자의 행태

를 모델링 하였다. 분류된 데이터는 각 경우의 BikeAgent의 대여/이동/반납 세부 행동 모델링에 활용되었다. 상세한 모델링 결과는 다음 절에서 소개한다.

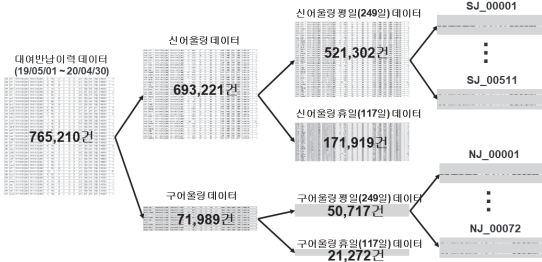


Fig. 5. Separation of rental/return records bikes with respect to date and bike types

또한, 자전거 대여소 데이터를 BikeStation의 초기 데이터 값(예를 들어, 대여소 위치 및 자전거 거치대 수 등)로 활용하였다. 자전거 대여소 데이터에는 대여소의 위치와 대여소 거치대 수 등의 정보가 기록되어 있다. 해당 기간 동안에 구 어울링 거치소는 총 72개, 뉴 어울링 거치소는 총 511개가 운영되었다. 또한, 자전거 이용 데이터를 활용하여, 기간 동안 이용된 구/뉴 어울링 자전거는 평일 평균 510/1,136대 휴일 평균 508/1,157대 활용된 것으로 파악하였다(Fig. 5 참고).

3.3.2 자전거 이용 행태 확률 모델링

자전거 이용 시뮬레이션 모델에서 대여/이동/반납 행동에서 BikeAgent의 행동 결정은 데이터 기반의 확률 모델링으로 개발되었다.

- **자전거 대여 장소 및 시점 결정:** BikeAgent가 어느 시점에 어느 거치소에서 자전거를 대여할 것인지를 결정하는 모델이다. 이는 대여반납 이력데이터를 이용한 푸아송 과정 (Poisson Process)을 이용하여 확률 모델링으로 구현되었다. 푸아송 과정은 일반적으로 특정 기간 동안에 발생하는 이벤트의 수를 추정하는데 이용하는 방법임으로, 자전거 대여 행동을 모델링하기에 적합한 방법이다. 자전거 이용 시뮬레이션에서는 1시간 단위로 특정 거치소에 방문하는 사용자의 수를 추정하기 위해 푸아송 과정을 적용하였으며, 이를 통하여 BikeAgent가 특정 시점에 특정 거치소로 자전거 대여를 시도하는 것을 결정하였다. 이를 추정하기 위해 대여반납이력 데이터의 거치소별 대여 데이터를 활용하였다.

- **자전거 이동 목적지 결정:** BikeAgent는 자전거를 대여하는 과정에서 이동 목적지를 결정해야 한다. 이동 목적지 역시 대여반납 이력 데이터를 이용하여 모델링 하였다. 대여반납 이력데이터의 출발/도착 거치소 정보를 이용하여 이산 확률 분포로 모델링하였다. 따라서 BikeAgent는 출발 거치소 및 시점을 고려하여 도착 거치소를 확률적으로 결정할 수 있다.
- **자전거 이동 시간 추정:** BikeAgent가 자전거를 대여하고, 목적지를 결정한 후에는 실제로 이동을 수행한다. 현재 모델에서, BikeAgent의 이동은 자전거라고 하는 자원(resource) 한 개를 일정 시간 동안 사용할 수 없게 만들고 동시에 다른 위치의 거치소(이동 목적지 결정 과정)로 옮기는 시스템의 변화를 초래한다. 자전거의 이동 시간 역시 대여반납 이력 데이터의 출발-목적 거치소의 이동시간 정보를 활용한다. 특히, 제안하는 모델에서는 와이블 분포(Weibull distribution)를 이용하여 자전거 이동 시간을 모델링 하였다. 즉, 대여반납이력 데이터로부터 거치소간의 이동 정보를 시간과 확률의 그래프로 표현하고, 이를 가장 잘 표현하는 와이블 분포의 파라미터를 추정하였다. 예를 들어, Fig. 6은 평일 9시의 뉴 어울링 1번 거치소에서 270번 거치소로 반납하는 사용자 28건의 데이터를 그래프로 표현하고, 이를 가장 잘 표현하는 와이블 파라미터를(15.883, 10.297)로 추정하였다.

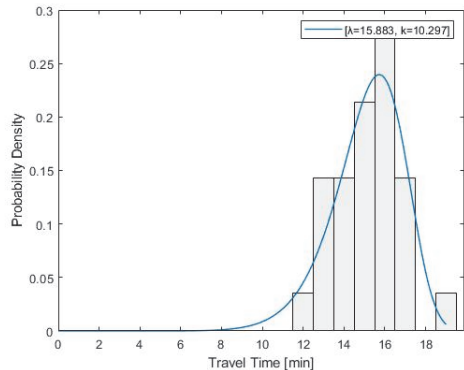


Fig. 6. Fitting result of Weibull distribution using rental/return bike usage records

그러나 대여반납이력 데이터에 모든 거치소에 대한 이동 내역이 없기 때문에 다음의 과정으로 세분화하여 진행하였다.

- Case 1: 대여/반납 이력 데이터에 출발 시간에 출발/도착 거치소의 데이터가 존재하는 경우, 데이터로부터 추정된 와이בל 분포를 이용하여 이동 시간 추정
- Case 2: Case 1의 데이터가 존재하지 않는 경우, 출발 시간을 고려하지 않고 출발/도착 거치소의 정보만으로 와이בל 분포를 이용한 이동 시간 추정
- Case 3: Case 1, 2 모두 실패한 경우, 이동 시간 추정관련 실패데이터가 존재하지 않는 것으로 판단. 거치소의 위치 정보(위경도 정보)를 이용한 직선거리를 고려하여 이동 시간 추정

#### 4. 시뮬레이션 결과

이번 장에서는 자전거 이용 시뮬레이션 모델의 결과를 관련 실패데이터와 비교한 검증 결과를 설명한다. 위에서 설명한 모델링 결과는 한국전자통신연구원에서 개발한 repast HPC(Coller 등, 2012) 기반 시뮬레이션 엔진을 이용하여 구현하였고, 구현된 모델을 이용하여 아래 소개될 실험을 진행하였다. 자세한 결과 전에, 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있는 출력 데이터를 설명한다.

##### 4.1 시뮬레이션 입/출력 데이터

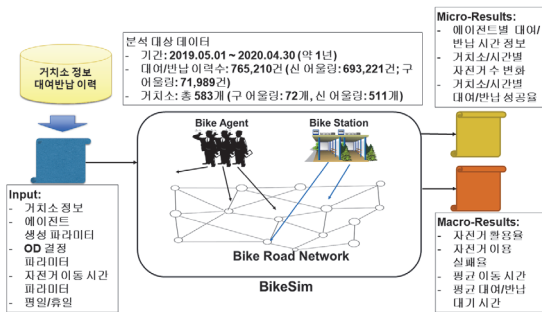


Fig. 7. Input/output of bike usage simulation

Fig. 7은 자전거 이용 시뮬레이션 모델의 입력과 출력 데이터를 보여준다. 실험에서 고려한 네트워크는 세종시에서 운영하는 총 583개의 거치소 사이의 거리를 나타낸다. 입력 데이터는 실패데이터인 대여반납 이력과 거치소 정보를 반영한 BikeAgent와 BikeStation의 초기 값과 자전거 이용 행동과 관련한 파라미터 추정 값으로 구성되어 있다. 결과 데이터는 BikeAgent의 생성 시점, 출발/도착 정보, 대여 성공 여부, 그리고 대여/이동/반납에 소요된 시간을 측정하고, BikeStation의 시간별 자전거 수, 반납/

대여 수, 반납/대여 성공률, 대여/반납 시간 등을 기록한다.

##### 4.2 시뮬레이션 검증: 세종시 데이터와 비교 분석

위에서 제시한 시뮬레이션 출력 데이터를 이용하여 자전거 이용 시뮬레이션 모델의 검증을 수행하였다. 시뮬레이션 모델 검증은 시뮬레이션 결과를 두 가지 지표로 변환하여, 대응되는 실제 데이터와 비교하는 방식으로 수행하였다.

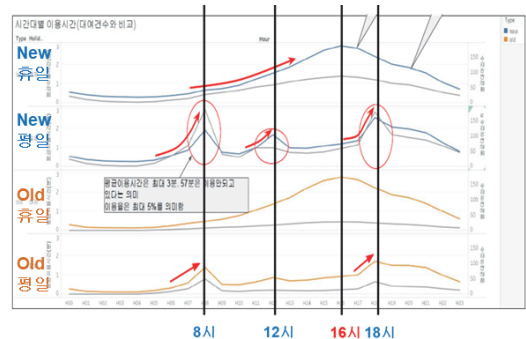


Fig. 8. Average of bike usage time from real-data

첫 번째로 비교한 지표는 시간별 평균 자전거 이용 시간이다. 데이터 분석 결과에 따라서 모델링이 어울링의 종류(구/뉴 어울링)와 평일/휴일에 따라 구분되었기 때문에, 실패데이터의 평균 자전거 이용 시간 역시 네 개의 경우로 구분되어 Fig. 8과 같이 표기되었다. 데이터 상 뉴 어울링의 이용 횟수가 구 어울링에 비해 월등히 높은 것으로 분석하였지만, 평균 이용 시간에서는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 오히려, 휴일과 평일에 평균 자전거 이용 시간의 패턴이 차이가 있었다. 자전거 종류와 관계없이, 평일에는 출퇴근 시간으로 보이는 8시와 18시에 사용시간이 늘어나는 패턴을 보였다. 또한, 점심시간으로 보이는 12시에도 평균 이용 시간이 증가하는 특징이 보이나, 이는 뉴 어울링의 경우에만 확인되었다. 이는 아마도 뉴 어울링 거치소의 위치가 더 근무지와 가깝게 배치된 것에 비롯된 것으로 보인다. 반면에, 휴일의 평균 자전거 이용 시간은 8시 이후에 사용시간이 증가하여 16시에 최고치를 찍고 감소하는 패턴을 보인다. 이 패턴은 자전거 종류와 관계없이 나타났다. 이는 휴일의 자전거는 레저 등의 활동에 지속적으로 사용되고 있는 것으로 보인다.

자전거 이용 시뮬레이션 결과 중, BikeAgent의 이동 소요된 시간을 취합하여 시간별 그리고 자전거 종류별 평균 자전거 이용 시간을 계산하였다(Fig. 9 참고). Fig.8

과 Fig. 9를 비교해 볼 때, 시뮬레이션 결과로 생성한 평균 자전거 이용 시간과 실데이터로 계산한 평균 자전거 이용 시간이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 특히, 특이한 이용 패턴을 보이는 평일의 출퇴근 시간(8시, 18시)과 점심시간(12시), 그리고 휴일의 자전거 이용 피크 시간(16시)은 그래프가 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

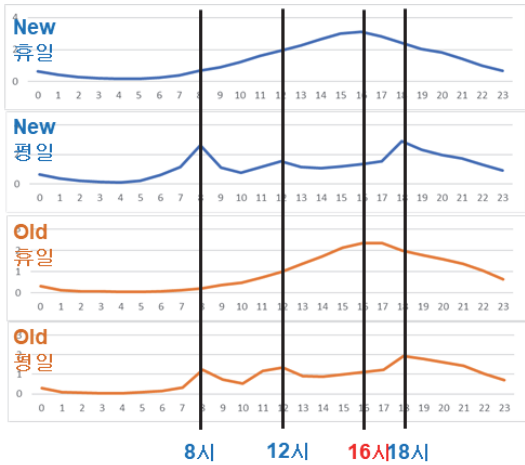


Fig. 9. Average of bike usage time from simulation results

두 번째로 비교한 지표는 하루 평균 자전거 대여 건수이다. 이 지표 역시 자전거 종류와 평일/휴일을 구분하여 추산하였다. 실데이터로 생성한 지표는 대여반납 이력 데이터를 가공하여 일별 자전거 대여 건수를 확인하고, 이를 기간 전체로 평균하여 수치화하였다. 또한, 시뮬레이션으로 생성한 지표는 출력 데이터 중, BikeStation의 대여 건수를 모두 합하여 산출하였다. 아래 테이블에 실데이터와 시뮬레이션 결과에서 생성한 자전거 대여 건수를 비교하였다.

실데이터와 시뮬레이션의 자전거 대여 건수는 거의 유사한 것으로 확인되었다. 자전거 대여 건수는 평일이 휴일 보다 많고, 뉴 어울링이 구 어울링보다 대여 건수가 많은 것이 특징인데, 이러한 특징이 시뮬레이션 결과에서도 동일하게 나타났다. 정량적으로 비교해 본다면, 실데이터에서 평일 기준 뉴 어울링과 구 어울링의 대여 건수 비율은 10.25:1로 나타난 반면, 시뮬레이션에서의 수치는 11.31:1로 약 10%의 오차가 나타나는 것으로 확인되었다. 휴일 기준으로는 실데이터의 뉴 어울링과 구 어울링의 대여 건수 비율은 8.12:1 이고, 시뮬레이션 결과는 8.35:1을 보여 약 3%의 오차를 보이는 것으로 확인되었다(Table 1 참고).

Table 1. Comparison of rental cases from real-data and simulation results (2019.05.01. ~ 2020.04.30.)

	하루 평균 대여 건수	뉴 어울링	구 어울링	비율 (뉴/구)
평일	실데이터	2,093	204	10.25:1
	시뮬레이션	2,230	197	11.31:1
휴일	실데이터	1,469	181	8.12:1
	시뮬레이션	1,645	197	8.35:1

이 두 지표를 이용한 비교 분석 결과를 종합해보면, 제안한 자전거 이용 시뮬레이션은 자전거 이용 시간과 대여 건수의 시간 별 변화에서 유사한 패턴과 값을 보이는 것을 확인하였다. 세종시의 공공자전거 이용 데이터를 입력 데이터로 활용한 시뮬레이션 모델은 최대 10%의 오차로 확인되었다. 10%의 오차는 시뮬레이션 방법에서 큰 오차는 아니지만, 시뮬레이션 검증의 기준은 도메인과 사용자의 목적에 따라 다를 수 있다. 따라서 검증 방법과 수치에 대해서는 상황에 따라 변경 적용할 필요가 있다.

### 4.3 시뮬레이션 활용: 세종시 어울링 효과도 분석

위의 실험 결과와 같이 시뮬레이션 모델이 검증되었다면, 이를 이용하여 시뮬레이션 기반 효과도 분석을 수행할 수 있다. 효과도 분석의 하나의 사례로써, 본 논문에서는 자전거 대여 성공률(Rent Success Rate)을 활용한 세종시 어울링 시스템의 분석 및 대안을 제시한다.

대여 성공률은 사용자가 특정 대여소에 도착하여 대여 시도 횟수 대비 성공한 비율이다. 이 값은 0과 1사이의 값을 가질 수 있다. 값이 1이라는 것은 모든 대여소에서 자전거 대여가 성공적으로 이루어진 것을 의미하고, 0이라는 것은 대여 시도는 있었으나 대여 가능 자전거가 없어서 대여를 하지 못한 경우이다. 또한, 예외적으로 특정 대여소에 대여 시도가 없는 경우는 -1로 표기하였다.

Fig. 10은 시뮬레이션이 진행되는 24시간 동안의 세종시 어울링 전체 583 거치소의 대여 성공률을 나타낸다. 거치소 ID 0부터 71번까지는 구 어울링 거치소이고, 그 이후는 뉴 어울링의 거치소이다. 구 어울링과 뉴 어울링 거치소의 평균대여 성공률은 각각 0.97과 0.71로 나타나, 전체적으로는 구 어울링이 조금 더 효율적으로 운영되었다고 분석할 수 있다.

위의 실험 결과를 자세히 분석해 보면, 더 다양한 정보를 확인할 수 있다. 대여 성공률이 0에 가까울수록, 특정 시점에 사용자 중 일부는 대여에 실패했다는 의미이기 때문에, 현재 자전거 초기 배치 및 재배치 방법의 개선이



필요하다는 것을 의미한다. 또한, 대여 성공률이 1인 거치소는 자전거가 필요할 때 충분히 존재했다는 것과 동시에 필요 이상의 자전거가 배치되었을지도 모른다는 것을 나타낸다. 따라서 특정 시점에 거치소의 최적의 자전거가 배치되었는지 확인해볼 필요가 있다.

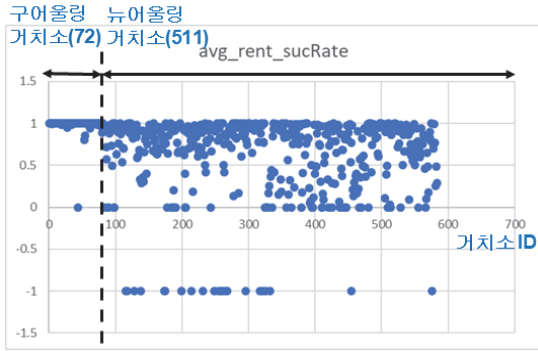


Fig. 10. Rental success rate of bike stations

이런 관점으로 구 어울링과 뉴 어울링 거치소의 대여 성공률을 분석해보면, 구 어울링의 거치소는 대부분의 대여 성공률이 1에 가깝기 때문에, 특정 시점에 거치소에 최적의 자전거가 배치되었는지 추가로 확인할 필요가 있다. 만약, 필요 이상의 자전거가 배치되어 있는 경우라면 다른 거치소로 자전거를 재배치하여 활용성을 높일 수도 있거나, 일부 자전거를 폐기하여 운영 비용을 줄일 수 있다.

반대로, 뉴 어울링의 거치소는 대여 성공률이 0과 1사이의 값을 갖는 경우가 많이 있으므로, 이는 자전거 재배치 방법의 개선 필요성을 의미한다. 또한 대여 성공률이 -1인 거치소가 확인되는데, 이는 대여 시도가 없었던 거치소이므로 향후 거치소 폐쇄 혹은 다른 지역으로 이전 등의 개선 방안을 고려할 수 있다.

### 5. 결론

많은 대도시에서 사용하는 공공 자전거 서비스는 공공성이라는 특징뿐만 아니라 이 후 도입될 PM들과의 경쟁을 고려하여 운용되어야 한다. 이러한 다양한 변화가 예상되는 공공 자전거 서비스를 효율적으로 관리하기 위해서는 공공 자전거 서비스의 특징과 다양한 시나리오를 선제적으로 분석할 수 있는 도구가 필요하다. 이러한 요구에 가장 잘 부합하는 분석 방법이 시뮬레이션 방법이다.

본 논문은 공공 자전거의 효율적 운영을 위한 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 특히, 제안된 모델은 일반적인

공공 자전거 시뮬레이션을 위한 것으로, 대부분의 공공 자전거 서비스에서 얻을 수 있는 일반적인 데이터를 입력으로 사용하였고, 서비스의 효율성을 판단하는데 도움이 될 수 있는 미시 데이터 (Micro-Data)를 획득할 수 있도록 출력 데이터를 설계하였다. 또한, 모델을 구조 모델과 행동 모델로 분리하여 확장성 및 유지보수에 효과적이도록 개발하였다. 제안된 모델은 세종시 공공 자전거 서비스 시뮬레이션에 적용되었고, 시뮬레이션 결과와 실데이터를 비교하여 패턴이나 수치가 매우 유사한 것을 확인하여 검증하였다. 또한, 검증된 모델을 이용하여 대여 성공률을 기준으로 세종시 어울링의 효과도를 분석하였다.

향후 실데이터와 검증된 제안된 모델은 세종시 공공 자전거 서비스의 효율적인 운영 방법 분석과 다양한 정책을 제안하고 실험하기 위한 도구로 활용될 수 있다. 또한, 다른 도시의 공공 자전거 서비스 역시 제안된 모델을 이용하여 효율성 분석이 가능하다. 즉, 세종시의 경우와 유사하게 그 도시의 공공 자전거 사용 데이터를 입력으로 적용하여 시뮬레이션 결과를 도출해내고, 이를 실데이터와의 유사성을 검증한 후에 각 도시의 특성과 목적에 맞게 공공 자전거 서비스를 설계하고 운영할 수 있는 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### References

국가지표체계 사이트, 대중교통수송분담률, <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4259>

한국교통연구원, *세종시 광역권 지방대중교통계획 최종 보고서*, 2013.09, <https://www.codil.or.kr?original?OTKCRK180344>

서울연구데이터서비스, 교통수단 분담율 <http://data.si.re.kr/2015br10-modal-share>

세종특별자치시 공공자전거 어울링 공식사이트, <https://www.sejongbike.kr/mainPageAction.do?process=mainPage>

임희중, 정광현 (2020), “확률적 동적 계획법을 이용한 공공자전거 정비소에서의 최적 재고관리”, *한국생산관리학회지*, 31(1), pp.15-28.

김숙희, 오세창, 최기주 (2019), “스테이션 없는 공유자전거 통행특성분석: 수원시사례를 중심으로”, *대한교통학회지*, 37(2), pp.110-123.

이은택, 손봉수 (2019), “이용수요 기반의 서울시 공공자전거 재배치전략 도출”, *대한교통학회지*, 37(1), pp.

27-38.  
이석준, 김지태, 권재운 (2018), “서울시 공공자전거 시스템 운영에 관한 이용경험 및 개선사항 분석”, *한국체육과학회지*, 27(6), pp.485-503.  
장재민, 김태형, 이무영 (2016), “서울시 공공자전거 이용 특성에 관한 연구”, *서울도시연구*, 17(4), pp.77-91.  
임동순 (2016), “공공 자전거 정적 재배치에의 VNS 알고리즘 적용”, *한국경영과학회지*, 41(1), pp.41-53.

정인용, 엄현섭, 이영훈 (2018), “공유 자전거 시스템의 수요기반 재배치”, *한국경영과학회지*, 43(4), pp.17-31.  
이재영, 박진희, 임운택 (2012), “도시특성에 따른 공공자전거 이용특성 및 정책방향 연구”, *국토계획*, 47(3), 295-308.  
Collier, Nicholson, and Michael North (2012), “Repast HPC: A platform for large-scale agent-based modeling”, *Large-Scale Computing* 10, pp.81-109.



**배 장 원** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059> / [jangwon\\_bae@koreatech.ac.kr](mailto:jangwon_bae@koreatech.ac.kr))

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사  
2009 한국과학기술원 전자공학과 석사  
2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사  
2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원  
2020~ 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수

관심분야 : 모델링, 시뮬레이션, 인공지능



**최 선 한** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3332-7723> / [shchoi@pknu.ac.kr](mailto:shchoi@pknu.ac.kr))

2012 KAIST 전기및전자공학과 학사  
2014 KAIST 전기및전자공학과 석사  
2018 KAIST 전기및전자공학부 박사  
2019 한국생산기술연구원 선임연구원  
2019~ 현재 부경대학교 IT융합응용공학과 조교수

관심분야 : 모델링 시뮬레이션, 시뮬레이션 기반 최적화, 기계학습



**이 천 희** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2668-8929> / [ch.lee@etri.re.kr](mailto:ch.lee@etri.re.kr))

2003 카이스트 전자전산학과 공학사  
2010 카이스트 전산학과 공학박사  
2011~ 2014 삼성전자 종합기술원 전문연구원  
2014~ 2016 싱가포르 난양공과대학교 Research Fellow  
2016~ 현재 한국전자통신연구원 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 대용량 데이터 분석 및 처리



**백 의 현** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7383-7341>/ [ehpaik@etri.re.kr](mailto:ehpaik@etri.re.kr))

1980 숭실대학교 전자계산학과 공학사  
1997 숭실대학교 전자계산학과 공학박사  
1987~ 현재 ETRI 시각지능연구실 책임연구원

관심분야 : 모사현실, 시뮬레이션, 데이터분석