

서울시 공공자전거 시스템 운영을 위한 효율적 관리 구역 설정

Optimal Clustering of Stations for the Bike Sharing System in Seoul

저자 (Authors)	이상복, 임희중, 정광현 Sangbok Lee, Heejong Lim, Kwanghun Chung
출처 (Source)	경영과학 35(1), 2018.3, 55-67(13 pages) KOREAN MANAGEMENT SCIENCE REVIEW 35(1) , 2018.3, 55-67(13 pages)
발행처 (Publisher)	한국경영과학회 The Korean Operations Research and Management Science Society
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07407702
APA Style	이상복, 임희중, 정광현 (2018). 서울시 공공자전거 시스템 운영을 위한 효율적 관리 구역 설정. 경영과학, 35(1), 55-67
이용정보 (Accessed)	서울대학교 147.46.182.*** 2020/10/27 10:03 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

서울시 공공자전거 시스템 운영을 위한 효율적 관리 구역 설정*

이상복¹ · 임희중² · 정광헌^{3†}

¹한성대학교 산업경영공학과, ²서울시립대학교 경영학부, ³홍익대학교 경영학부

Optimal Clustering of Stations for the Bike Sharing System in Seoul*

Sangbok Lee¹ · Heejong Lim² · Kwanghun Chung^{3†}

¹Department of Industrial and Management Engineering, Hansung University

²College of Business Administration, University of Seoul

³College of Business Administration, Hongik University

■ Abstract ■

Like many other cities around the world, Seoul has been operating a bike sharing system since 2015, which is aiming at reducing traffic and pollution at the same time. As the use of shared bicycles increases, managerial issues such as relocation and maintenance of bicycles have been raised to offer better service to the users. In this paper, we develop a mixed-integer programming model for finding optimal clusters of bike stations for the relocation of bikes. From each bike station, net demand is obtained from user pickup and return data at 210 stations in Seoul. Then, we perform computational experiments with historical data to propose better clustering for efficient management of bike sharing systems. Computational results show that optimal clusters reduce the workload deviation among clusters.

Keywords : Shared Bicycle, Clustering, Mixed-Integer Programming

논문접수일 : 2017년 12월 28일 논문게재확정일 : 2018년 03월 13일

논문수정일 : 2018년 02월 14일

* 이 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015S1A5A8016627).

† 교신저자, khchung@hongik.ac.kr

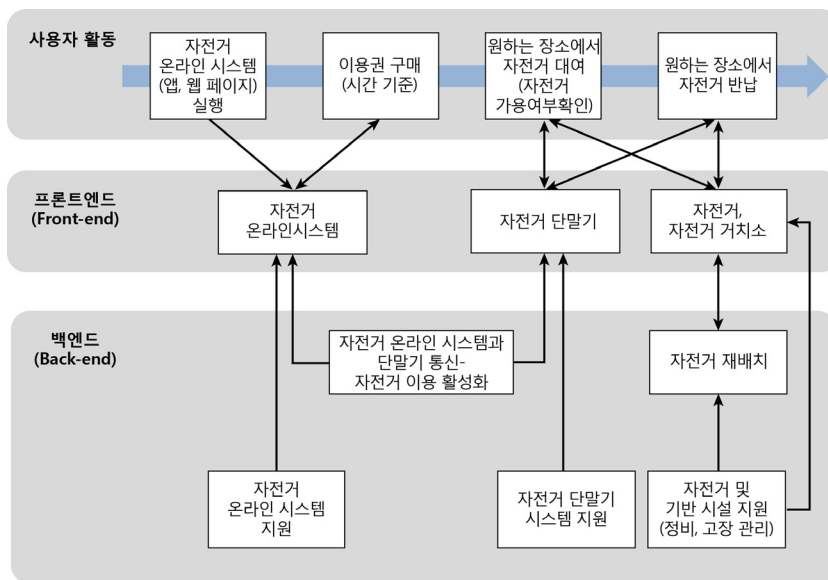
1. 서 론

오늘날 많은 국가, 많은 도시에서 공공자전거 시스템을 도입하여 운영하고 있다. 네덜란드에서 시작된 공공자전거 시스템은 발전된 IT기술을 적용하여 점차 진화하고 있으며 높은 수준의 사용자 만족을 이끌어내고 있다. 실례로 프랑스 파리의 ‘벨리브(Vélib)’의 경우 파리 전역에서 서비스가 이루어지고 있고, 많은 시민들이 이용하며 이용자의 90% 이상이 벨리브에 대해 만족하고 있는 것으로 밝혀졌다. 뿐만 아니라 벨리브는 파리를 방문하는 여행객들도 편하게 사용하는 교통수단으로 자리 잡고 있다고 한다[1]. 공공자전거 시스템은 공통적으로 대중교통 시스템과의 연계를 통한 시민들의 대중교통 이용의 활성화, 시민의 여가 생활 지원 및 대기 오염문제의 완화 등의 목적을 가지고 운영되고 있다[1, 2, 3]. 이러한 까닭에 대한민국에서도 2008년 창원시 ‘누비자’를 시작으로 순천시, 대전시, 고양시 등에 공공자전거 시스템이 도입되어 현재 확산되고 있다. 서울시에서도 2015년에 공공자전거 시스템 ‘따릉이’를 도입하였고 현재 사용자의 수가 매우 빠르게 증가하고 있다. 2016년 11월

말 기준으로 따릉이 회원 가입자 수는 21만 명, 대여건수는 162만 건에 육박하고 있으며, 따릉이 누적 주행거리도 552만km가량 되어 이에 따르는 이산화탄소 절감량도 1,281톤으로 추정되고 있다.

공공자전거 시스템은 초기 구축비용이 적기 때문에 도입 및 확산이 다른 대중교통 시스템에 비해서 상대적으로 용이하다[3]. 그러나 규모가 커짐에 따라 사용자의 만족과 자전거 및 시스템 자원의 효율적 사용을 위한 운영관리의 필요성이 점차 부각되고 있다. 서울시는 공공자전거 확대 구축을 위하여 이용자 사용 편의성 향상, 안전제고, 만족도 향상 등에 있어 다양한 활동을 전개하고 있다. 이들은 서비스 운영 구조 형태로 분류하면 사용자와 만나게 되는 프론트엔드(frontend) 부분인 공공자전거 대여소, 공공자전거 대여 단말기, 그리고 공공자전거 등에 대한 관리, 백엔드(backend) 부분인 사용자 앱 개선, 자전거 및 기반 시설 정비, 고장 점검, 단말기 시스템관리 등으로 나뉘어 진다(<그림 1> 참조).

IT기술을 적용한 공공자전거 시스템의 서비스 운영 구조의 일반적인 형태는 <그림 1>과 같다. 사용자는 회원/비회원 여부에 상관없이 앱이나 웹 페이지

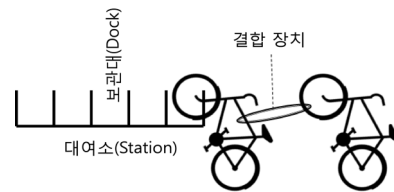


〈그림 1〉 공공자전거 시스템의 서비스 운영 구조

같은 온라인 시스템을 통하여 이용료를 지불한 뒤 원하는 장소의 자전거 대여소에서 자전거를 대여하고, 이용이 끝나면 목적지 근방의 대여소에 반납을 한다. 특히 자전거 온라인 시스템은 신용카드와 같은 결제 시스템과 연동되어 있어 사용자가 쉽게 결제를 할 수 있도록 한다. 이후 실제 자전거 대여 시, 사용자들이 결제 완료 후 받게 되는 대여 번호를 자전거마다 달려 있는 단말기에 입력하게 되면 자전거가 거치대에서 분리되어 이용 가능한 상태가 된다. 사용자는 대여 장소와 다른 곳에 반납할 수도 있으며 자전거를 해당 거치대에 결속시키면 시스템은 자전거 사용 종료 상태로 변경된다. 이와 같이 자전거의 편도 이용이 가능하기 때문에 자전거의 재배치 문제가 발생하게 되고, 운영 부서는 트럭과 같은 운송수단으로 자전거를 이동시켜 사용자들이 원하는 곳에서 쉽게 자전거를 대여할 수 있도록 노력한다. 추가적으로 공공자전거 서비스 시스템의 전 과정에 있어 자전거와 단말기, 자전거 거치대와 같은 하드웨어와 자전거 온라인 시스템, 단말기 시스템과 같은 소프트웨어의 유지, 보수, 및 지원과 같은 활동을 통하여 이용 편의성 향상을 도모한다.

본 논문은 공공자전거 시스템의 서비스 운영 구조 가운데 자전거 재배치에 초점을 맞추고 있다. 공공자전거는 'SoCar'나 'Zipcar'와 같은 공유 자동차 시스템과 달리 편도 대여가 가능하기 때문에 좀더 많은 사용자가 원하는 시간에 자전거를 이용할 수 있도록 하기 위해서는 인위적인 자전거 재배치가 필요하다. 자전거 재배치가 이루어지지 않을 경우 특정 시간 어느 대여소(Station)에는 자전거가 하나도 없을 수도 있고, 다른 어느 대여소에는 대여소의 보관대(Dock) 개수보다 더 많은 자전거가 있을 수 있다. 예를 들면, 출근 시간에 주거지역에서 출발한 자전거가 특정 업무 지역에 모두 반납된다고 가정한다면, 업무 지역의 자전거 거치대에는 매우 많은 대여 가능 자전거가 위치함과 동시에 주거지역의 자전거 거치대에는 이후 수요를 만족시킬 만큼의 대여 가능 자전거가 아예 없거나 부족할 수 있다. 따라서, 자전거를 업무지역에서 주거지역으로 재배치하여 사용자들의 자전거 수요가

원활히 충족될 수 있도록 관리해야 한다. 여기서 추가로 고려해야 하는 상황은 자전거 반납이다. 자전거를 반납할 때 대여소의 보관대가 가득 차서 자전거를 반납하지 못하는 경우를 막기 위해 서울시 따릉이는 <그림 2>와 같은 형태로 구성되어 있다. <그림 2>에 서처럼 자전거는 보관대에 위치할 수도 있고, 보관대에 위치한 자전거에 결합장치로 연결되어 위치할 수도 있다. 이러한 구조로 되어 있기 때문에 특정 시간 어느 대여소에는 대여 가능 자전거가 보관대의 수보다 많이 거치될 수도 있다. 즉, 재배치할 때도 어느 특정 대여소의 수요가 늘어날 것으로 예상된다면 보관대의 수보다 많은 자전거를 배치하는 것도 고려할 수 있다.



<그림 2> 자전거 대여소(Station)의 구조

공공자전거 시스템을 연구한 여러 논문에서도 자전거 재배치를 비롯한 운영 관리의 문제를 지적하고 있다. 기존의 연구 논문들은 크게 두 분류로 구분할 수 있는데, 한 가지는 자전거의 운용 데이터를 이용하여 사용자 이용 패턴, 사용자 이동 경로 등을 분석하고 이를 바탕으로 공공자전거 시스템의 발전 방향을 제시하는 논문들이며, 다른 한 가지는 분석적 모형을 이용하여 자전거 재배치, 대여소 위치, 자전거 대수 등의 문제를 해결하는 논문들이다. O'Brien et al.[10]은 전 세계에 있는 38개의 공공자전거 시스템의 데이터를 수집하여 지역별 자전거 대여소들 간의 간격, 대여소 별 자전거 대수, 가용 자전거 대수, 자전거 밀집도, 사용자 요구량, 사용자의 자전거 이동거리 등에 대해 분석하고 지역별 특징 및 공통점에 대해 논하였다. Vogel et al.[13]은 자전거 대여 서비스 사용자와 지리적 정보를 이용하여 사용자들의 이용 패턴을 분석하고 이를 시각화 하였다. Vogel et al.[13]은 오스트리

아 빈의 공공자전거 시스템에서 대여소 별 하루 및 한주 동안의 대여 및 반납 건수 변동과 지역적 특성을 결합하여 대여소 지역 군집화(clustering)를 실시하였고 이를 기반으로 자전거 재배치 계획을 수립할 수 있음을 제안하였다. Kaltenbrunner et al.[6]도 바르셀로나의 'Bicing'에서 Vogel et al.[13]과 유사한 공간적 분석을 실시하였고, 이를 각 대여소별 시간대 별 사용자 수요에 대한 예측에 적용하였다. Borgnat et al.[4]은 프랑스 리옹의 'Vélo'v' 데이터를 분석하였고, 국내에서도 문현수, 이영석[1]은 대전 '타슈'를, 장재민 외[2]는 서울 따릉이의 사용자 이용 패턴을 분석하였다. 이상의 연구 문헌들은 공통적으로 데이터마ining을 통해 얻어진 사용자 이용 패턴 분석 결과, 대여소 군집화 결과 등을 자전거 대여소 위치, 자전거 대수 결정, 자전거 재배치 문제 등과 같은 운영의 문제에 적용시킬 수 있음을 언급하였다.

분석적 방법을 적용한 연구 논문들은 주로 자전거 사용자의 입장에서 자전거 가용성을 확보할 수 있도록 자전거 시스템의 서비스 수준(service level)에 대한 고려가 모델에 반영된다. 분석적 방법을 적용한 논문들은 크게 두 종류로 분류할 수 있는데, 자전거 대여소 결정의 문제와 자전거 재배치 문제로 나눌 수 있다. 자전거 대여소 결정의 문제는 주로 대여소가 어느 범위의 사용자까지 서비스를 제공하는가에 주로 초점을 맞추고 있고, 자전거 재배치 문제는 재배치 관리구역 설정 혹은 재배치 운용 효율성에 집중하고 있다. Lin and Yang[9]과 Lin et al.[8]은 사용자의 자전거 가용성 최대화를 위하여 공공자전거 시스템을 설계하는 과정에서 자전거 대여소를 결정하는 문제를 다루었다. 여기서 서비스 수준은 한 자전거 대여소에서 담당하게 되는 지역과 자전거 가용성으로 결정된다. Lin and Yang[9]과 Lin et al.[8]은 가상으로 만들어진 공유 자전거 사용자 지도에서 최적의 자전거 대여소 대수와 위치를 결정하는 모형을 개발하고 최적해를 찾는 방법을 제시하였다.

Raviv et al.[11]은 자전거 재배치의 문제에 집중하였는데, 서비스 수준을 사용자 요구가 만족되는 정도로 정의하고 사용자 요구에서 자전거의 대여

요구와 반납 요구, 두 가지를 고려하였다. 여기서 자전거 반납 요구 미충족은 사용자가 자전거를 목적지에 반납하려고 할 때, 보관대가 비어있지 않아서 반납을 못하는 경우를 의미한다. Raviv et al.[11]은 사용자 요구가 만족되지 않을 기대값을 계산하고 이를 비용화하였으며, 여기에 자전거 재배치 관리를 위한 운송 차량의 운영비용을 합하여 이를 최소화하는 것에 목적을 두었다. Raviv et al.[11]은 관리 구역의 군집화(clustering)는 고려하지 않았으며 하나의 구역 내에서 서비스 수준과 관리 차량의 운영 효율성에 초점을 맞추었다. Schuijbroek et al.[12]은 사용자 서비스 수준을 고려하여 재배치 관리 구역을 설정하고 구역 내 자전거 재배치를 위한 운송 차량의 경로를 해결하는 문제를 다루었다. 사용자 서비스 수준은 대여를 원하는 사용자 대비 대여 가능 자전거 대수와 반납을 원하는 사용자 대비 반납 가능 보관대 수의 두 가지를 가지고 정의하였다. 재배치 관리 구역은 구역 내에서 사용자 서비스 수준이 자체적으로 만족되도록 설정하였고, 구역 내 차량의 경로(routing)는 혼합정수계획(Mixed Integer Programming)문제로 모델링하였다. Raviv et al.[11]과 Schuijbroek et al.[12]는 서비스 수준을 정의할 때 자전거 대여소에 반납 가능한 보관대가 없으면 반납을 할 수 없다고 가정하였는데, 이는 본 연구에서 다루고 있는 공공자전거 시스템과 차이가 있다. 반납 가능한 보관대가 없으면 보관대에 거치되어 있는 자전거에 결합장치로 연결시키면 반납이 가능하므로 하나의 대여소에 반납 가능한 자전거의 수는 대여소에 있는 보관대의 수보다 훨씬 클 수가 있으며 동시에 대여 가능한 자전거의 수도 마찬가지로 보관대의 수보다 클 수 있다(<그림 2> 참조).

본 논문에서는 서울시 따릉이의 자전거 재배치를 고려하여 효율적인 관리구역을 설정하는 문제를 최적화 모델을 통해 해결하고자 한다. 현재 서울시 따릉이는 도시교통본부 자전거정책과에서 종합적인 관리를 담당하고 있는데, 자전거 재배치를 위한 관리 구역은 일반적으로 각 구(區)별로, 자치구의 크기와 대여소의 수에 따라 설정되어 있다. 본 연구에서 효율적인

관리구역 설정은 운송 차량의 이동 범위를 고려하여 관리 구역 내 자전거 대여와 반납의 균형을 맞출 수 있도록 자전거 거치대를 군집화(clustering)하는 것을 의미한다. 관리구역 설정은 전략단계-운영단계의 의사 결정 구조에서 전략 단계의 의사 결정 문제라고 할 수 있다. 가용 자전거 현황은 실시간으로 변하는 값이며, 실시간 현황을 바탕으로 실시간 재배치를 수행하는 것은 운영 단계의 의사 결정이라고 볼 수 있다. 전략 단계의 의사 결정에서는 실시간 변동, 매일 매일의 변동보다 큰 시간 단위를 고려한다. 본 논문은 서울시 자전거 이용 데이터에서 대여소별 한 달간 대여 자전거 수와 반납된 자전거 수를 이용하여 순 수요(net-demand)를 다음과 같이 계산한다.

$$\text{순 수요(net-demand)} = (\text{일별 대여 자전거 수}) - (\text{일별 반납된 자전거 수}) \quad (1)$$

각각의 구역에서 수요와 공급간 균형 정도를 구역 내 모든 대여소 순 수요 합의 절대값으로 계산하고, 구역 별 균형 정도의 차이가 최소화될 수 있도록 구역을 설정하게 된다. 여기에서 순 수요는 대여소에 가용 자전거가 없는 경우 사용자가 대여할 수 없기 때문에 관측 중단(censoring)된 데이터라고 볼 수 있다. 그러나 서울시는 실시간으로 자전거 재배치를 수행하고 있고, 수요가 많은 곳에 대여소를 많이 설치하여 주변에서 자전거를 찾을 수 있도록 설계하였다. 뿐만 아니라 자전거 결합 장치를 통해 대여소의 보관대 수의 제약도 제거되어 있으므로 이 순 수요는 실제 사용자의 수요가 충분히 반영되어 있다고 판단된다. 본 논문의 연구 결과는 현재 서울시 자전거 관리 구역의 적절성을 재고하고, 효과적 대안 제시를 한다는 점에서 의의가 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 제2장에서는 따릉이 사용자 데이터 분석을 통해 그 특징을 살펴보고, 이를 바탕으로 왜 관리구역 설정을 위해 순 수요를 사용하였는지 설명한다. 제3장에서는 최적의 관리구역 설정을 위해 최적화 모형을 제시하고, 제4장에서는 서울시 5개 자치구의 순 수요를 기준으

로 관리구역에 대한 전산실험을 실시하고 그 결과를 정리한다. 마지막으로 제5장에서는 본 논문의 주요 결과를 정리하고, 향후 연구 방향에 대해 제시한다.

2. 서울시 공공자전거 시스템 따릉이 사용자 데이터

따릉이는 2015년 9월에 중구, 종로구, 서대문구 등 7개 자치구를 대상으로 150개의 대여소에 2,000대의 자전거로 시작되었으며, 2016년 7월부터 대여소와 자전거 대수를 증가시켜 현재는 중구, 종로구, 서대문구 등 11개 자치구를 대상으로 300개 대여소, 5,600대의 자전거를 운영하고 있다. 본 연구를 위해 쓰인 데이터는 이 기간 동안 자전거에 부착된 단말기를 통해 기록된 데이터인데, 사용자의 대여 및 반납 대여소, 사용자의 대여 시간 정보가 있으며 사용자의 신상 정보는 기록되어 있지 않다. 자전거 사용자 정보를 이용한 많은 연구 문헌[1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 13]에서 보인 바와 같이 자전거 수요에는 계절적 요인, 요일적 요인, 시간적 요인 등에 의해 변동이 계속해서 발생한다. 본 연구는 재배치 관리구역 설정에 계절효과(seasonal effect)를 포함한 하나의 보편적 최적해를 찾기 보다는 계절효과가 배제된 상태에서 최적의 해를 찾는다. 이를 위하여 자전거 수요의 추세 변동을 확인하고 수요가 많은 시점과 수요가 적은 시점을 선택한 뒤, 각각의 경우에서 최적 관리 구역을 찾는다.

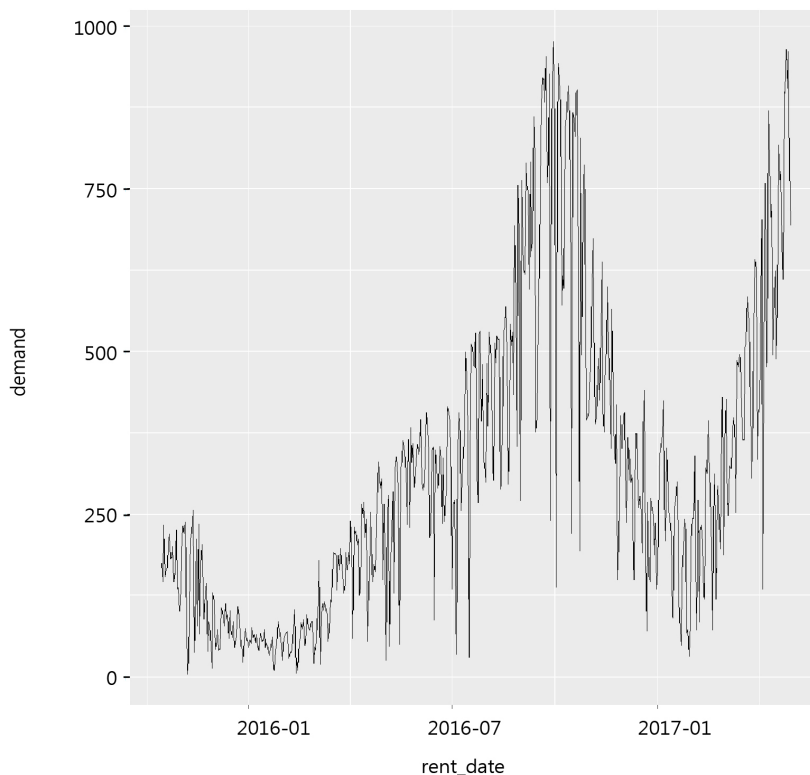
다음의 <그림 3>과 <그림 4>는 순서대로 서울시 중구와 서울시 마포구의 일별 따릉이 대여 건수 추세를 보여주고 있다. 중구는 통계청의 서울시 구별 종업원 수 비율을 바탕으로 보면 중심업무지구로 구분할 수 있으며, 마포구는 주거업무 복합지구라고 볼 수 있다. 두 자치구의 자전거 대여 건수를 보면 유사한 형태를 나타내는데, 2016년 7월부터 서울시에서 자전거 수를 늘리면서 전체 수요도 폭발적으로 증가하는 모습을 보인다. 그리고 2016년 10월 전후로 정점에 도달했다가 2017년 2월 전후로 저점에 도달하며 계절 요인에 의한 변동임을 확실히 보여주고 있다. 즉, 겨울에는 낮은 기온의 영향으로 자전거 수요가 매우 감

소하고 있고, 여름보다는 봄, 가을에 수요가 증가하고 있다. 다른 자치구의 수요 추세도 이와 동일한 형태를 보이며, 중구의 최대치(<1,000)와 마포구의 최대치(<3,750) 차이처럼 자치구마다 최대 수요량이 차이를 보인다.

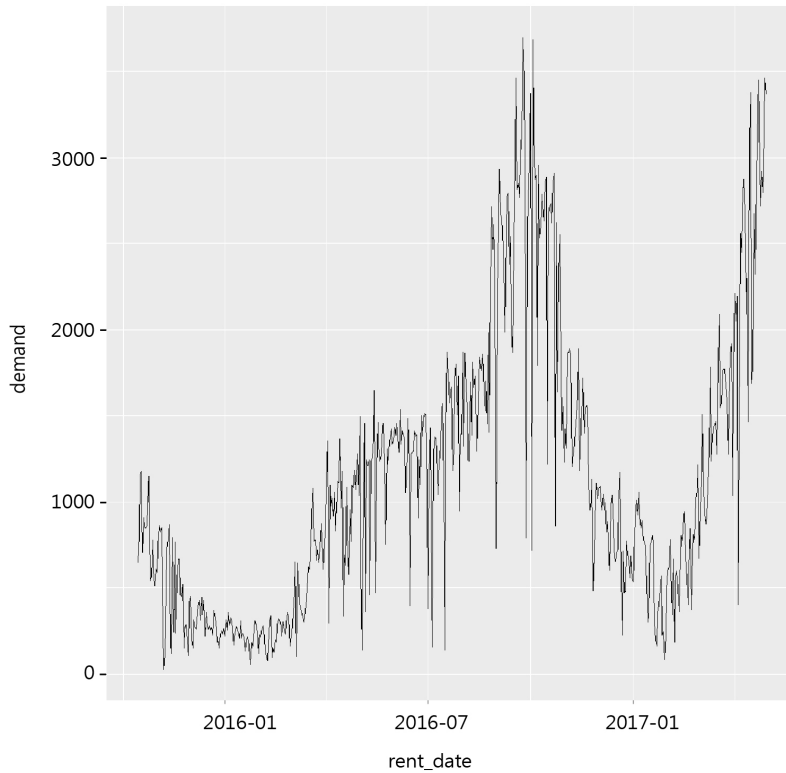
본 연구의 범위를 설정하기 위해 시간적, 지역적으로 제한을 가했다. 우선 시간적으로는 수요가 많은 시점과 수요가 적은 시점을 선택하였다. 시점 선택은 거치대 수가 증가한 이후의 최근 데이터를 이용하였으며 수요가 많은 시점을 2017년 4월, 수요가 적은 시점을 2017년 2월로 설정하고 각각의 관리구역 설정을 수행하였다. <그림 3>과 <그림 4>에서 보면, 겨울에 수요가 확실히 줄고 있는 모습을 보이며, 봄이나 가을에 가장 많은 수요를 보이고 있다. 이러한 계절적 변동 외에 한 달 안에서 계절효과가 없다고 가정하고, 겨울의 최저점에 속하는 2월과 봄의 최고점이자 최근

데이터인 4월 데이터를 선택하였다.

지역적으로는 중구, 종로구, 서대문구, 마포구, 용산구의 5개 자치구를 연구 범위로 설정하였다. 중구, 종로구는 중심업무지역이며 따릉이의 5대 거점지역(여의도, 상암, 신촌, 4대문안, 성수)으로 들어있는 곳이다. 서대문구도 따릉이의 5대 거점지역 가운데 하나인 신촌을 포함하고 있는 자치구이다. 마포구 역시 5대 거점지역 가운데 하나인 상암을 포함하고 있을 뿐만 아니라, 이들 자치구와 인접하고, 또 다른 거점지역인 여의도로 연결되는 자치구이다. 마지막으로 용산구는 이들 4개 자치구와 인접하고 마포와 마찬가지로 한강에 인접한 자치구이다. 이들 5개 자치구는 중심업무지구와 주거업무복합지구로 나뉘어있으며 주거지역에서 업무지역으로 이동하며 출퇴근용으로 자전거를 이용하는 사용자, 한강 주변의 자전거 전용도로, 경의선 숲길 공원 등을 이용하는 여가형 사용



<그림 3> 2015년 7월부터 2017년 4월까지 서울시 중구의 일별 따릉이 대여 건수 추세



〈그림 4〉 2015년 7월부터 2017년 4월까지 서울시 마포구의 일별 따릉이 대여 건수 추세

자, 업무 지역 내 혹은 주거지역 내에서 간단히 자전거를 이용하는 사용자들의 특성을 포함할 수 있는 지역이라고 판단된다. 이들 5개 자치구에는 2017년 4월 현재 총 210개의 자전거 대여소가 있으며 총 8대의 재배치용 운송 차량을 운용하고 있다. 즉, 8개의 관리 구역이 있다고 볼 수 있는데, 중구와 종로구가 같이 관리되는 것을 제외하고는 대부분 각각의 자치구에서 관리가 이루어지고 있다.

3. 최적화 모형

본 장에서는 효율적 관리구역 설정을 위해 대여소들의 최적 클러스터링을 찾기 위한 최적화 모델을 제시하고자 한다. 본 모형에서 대여소들의 집합(관리구역)을 클러스터로 정의한다. 먼저 수리적 모델링을 위해 필요한 데이터를 정리하면 다음과 같다.

* Data

N = set of stations

K = set of clusters

d_{ij} = distance between station $i \in N$ and station $j \in N$

d_{\max} = maximum distance between two stations within a cluster

s_i = net demand of station $i \in N$

d_{ij} 는 두 대여소 $i \in N$ 와 $j \in N$ 간의 거리를 나타내는 데, 본 논문에서는 직선거리로 정의한다. 또한 d_{\max} 는 한 클러스터 내에 포함된 대여소들간에 허용가능한 최대 직선거리로 본 논문에서는 이 값이 최적 관리 구역 설정에 어떤 영향을 주는지 파악한다. 마지막으로 s_i 값은 1장의 식 (1)에 정의된 바와 같이 특정 대여소 $i \in N$ 의 월간 총 대여 자전거수에서 반납된 자

전거 수를 뺀 값을 사용한다.

본 최적화 모델을 통해 결정하고자 하는 변수는 다음과 같다.

* Decision Variables

x_{ik} = 1 if station $i \in N$ is assigned to cluster $k \in K$

v_k^+ = excess demand of cluster $k \in K$

v_k^- = deficiency demand of cluster $k \in K$

x_{ik} 는 이진변수로 특정 대여소 $i \in N$ 가 클러스터 $k \in K$ 에 할당되었으면 1이고 아니면 0 값을 갖는다. 하나의 클러스터 $k \in K$ 에 할당된 모든 대여소들에 대해 순 수요(net-demand)의 합이 전체 평균대비 얼마나 차이가 있는지를 정의하고자 비음조건을 갖는 두 변수 v_k^+ 와 v_k^- 를 정의하였다. 위에서 주어진 데이터와 결정변수를 이용하여 다음과 같은 혼합정수계획(Mixed-Integer Programming) 모델을 얻는다.

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in K} \frac{v_k^+ + v_k^-}{|K|}$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1 \quad \text{for all } i \in N \quad (1)$$

$$d_{ij}x_{ik}x_{jk} \leq d_{\max} \quad \text{for all } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2)$$

$$v_k^+ - v_k^- = \sum_{i \in N} s_i x_{ik} - \frac{\sum_{i \in N} s_i x_{ik}}{|K|} \quad \text{for all } k \in K \quad (3)$$

먼저 목적함수는 여러 가치를 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 클러스터별 Workload의 편차의 평균을 최소화하는 것으로 정의하였다. 이는 관리구역을 설정함에 있어서 자전거 수요가 많은 대여소와 자전거 수요가 적은 대여소를 같은 클러스터에 포함시키는 것이 자전거 Rebalancing을 위해 효과적이기 때문이다. 제약식 (1)은 모든 대여소들이 하나의 클러스터에 포함되어야 한다는 것이다. 제약식 (2)는 대여소 $i \in N$ 와 $j \in N$ 가 같은 클러스터 $k \in K$ 에 할당되었으면 최대 거리가 d_{\max} 보다 작거나 같다는 것이다. 이는 bilinear 제약식으로 비선형이나 x_{ik} 가 0/1 변수이므로,

로, 다음과 같이 선형화가 가능하다.

$$d_{ij}(x_{ik} + x_{jk} - 1) \leq d_{\max}$$

제약식 (3)은 하나의 클러스터 $k \in K$ 에 할당된 순 수요의 합이 전체 평균대비 얼마나 차이가 나는지를 두 변수 v_k^+ 와 v_k^- 로 나타낸다.

4. 전산 실험

본 제4장에서는 전산실험을 통해서, 공공자전거 이용 실적을 제3장에서 개발한 최적화 모형에 적용하여 관리구역 설정 방안을 수립하고 현행 관리구역의 운영과 비교하였다. 제3장에서 개발된 모형은 IBM Cplex 12.7을 이용해서 Java로 구현하였다. 실험은 Dual Xeon X5690 cpu, 96GB Ram의 Linux Workstation에서 수행되었다. 문제를 푸는 시간은 관리구역의 수와 d_{\max} 에 따라 달라졌으며, 최대 79시간이 걸렸다. 문제 풀이 시간은 관리구역이 많을수록, 그리고 d_{\max} 가 작을수록 오래 걸렸다. 대상은 2017년 4월 30일 기준, 서울특별시 마포구, 용산구, 중구, 종로구, 서대문구의 5개 자치구에 설치된 210개의 자전거 대여소이며, 현행 8개의 관리구역이 설정되어 각 관리구역 별로 1대의 운송차량이 공공자전거를 재배분하고 있다. <그림 5>는 5개 대상 자치구에 설치된 대여소가 어떠한 그룹에 속해 있는지를 설명하고 있다. 주로, 자치구 별로 관리구역이 설정되어 있으며, 작업량이 많다고 판단되는 자치구는 관리구역을 추가해서 복수의 관리구역이 자치구에 설치된 대여소를 분리해서 운영하고 있다. <그림 5>에서 주목해야하는 것은 각 관리구역이 서로 겹치는 부분이 없다는 것이다.

본 실험에는 2017년 2월과 4월의 각 대여소별 월간 평균 순 수요를 사용하였다. 제2장에서 언급한 바와 같이 2월은 수요가 가장 적은 달이었고, 4월은 가장 수요가 많은 달 중의 하나였다. 현행 관리구역 설정에 의한 목적식(관리구역 별 Workload의 편차의 평균)의 목적값은 2월은 7.31, 4월은 19.55이었다. 참고로, 순 수요의 평균은 2월은 33.04, 4월은 45.96로 변동계수(Coefficient of Variance)는 각각 0.43, 0.22였다. 길

이가 가장 긴 마포구의 경우 약 9km의 길이를 가지므로, 현행 관리구역은 8개의 클러스터, $d_{\max} = 10\text{km}$ 을 기준으로 설정되어 있다고 볼 수 있다.

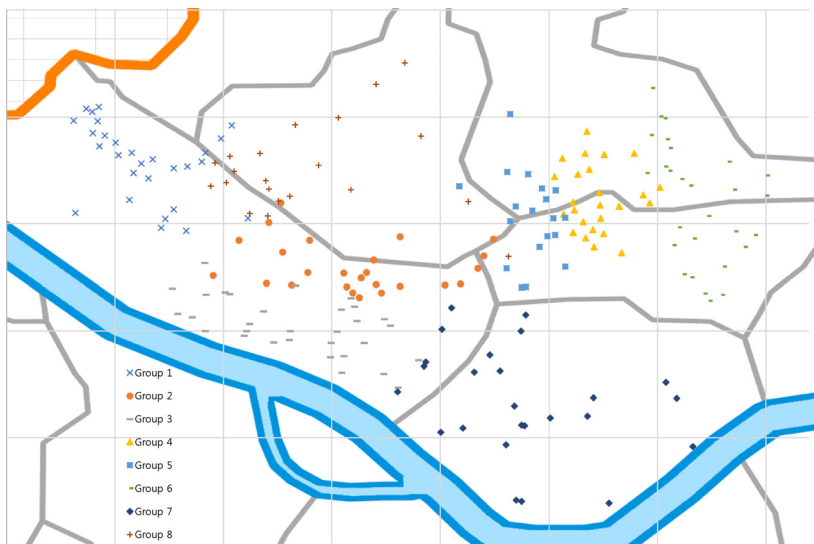
Workload의 편차를 최소화하는 최적 관리구역 설정 방안을 찾기 위해서, 관리구역의 수(K)와 관리구역의 최대 지름(d_{\max})을 달리 하면서 실험을 진행하였다. 대여소간 거리를 측정하기 위해서는 다음 지도(map.daum.net)의 좌표계(UTM-K)를 이용하였다. 대여소간 도로상 거리를 모두 측정하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 대여소의 UTM-K 좌표를 이용해 유클리드 거리를 산출하여 대여소간 거리로 사용하였다.

<그림 6>과 <그림 7>은 실험결과중의 한가지로, 현행과 같이 8개 관리구역을 유지하고, 최대 이동거리를 2km 증가시킨 경우이다. 이 경우, 목적값은 2017년 2월은 5.68, 4월은 5.87로 현행 19.55보다 매우 작은 편차를 갖게 설정이 되었다. <그림 6>과 <그림 7>의 관리구역 설정을 살펴보면, 마포구의 경우 최대 4개의 다른 구역이 설정되어 있음을 알 수 있다. 또한 각 설정구역은 서로 교차되어 업무량을 균등하게 배분하게 하였다. 즉, 관리구역의 최대 이동거리를 2km 증가 시키고, 클러스터 간 교차를 허용하여 할당해서

목적값을 유의미하게 개선시킬 수 있다.

이처럼, 관리구역의 수가 많을수록, 그리고 관리구역의 최대 지름이 클수록 순 수요의 절대 편차의 평균은 감소하였다. 그 이유는 관리구역의 수가 클수록, 그리고 최대 지름이 클수록, 최적화를 통해 더 균등하게 대여소를 할당할 수 있게 되기 때문이다.

<표 1>에 각 실험의 목적값을 정리하였다. 관리구역의 수를 고정시키고, 최대 이동거리를 증가시킬수록 목적값은 개선되었다. 관리구역의 지름이 고정된 경우, 관리구역의 수를 증가시킬수록 목적값은 감소하였다. 또한, <그림 8>과 <그림 9>은 목적값의 한계 감소치(Marginal decrement)도 관리구역의 수를 증가시킬수록, 그리고 최대 이동거리를 증가시킬수록 줄어듦을 보인다. 관리구역의 수를 증가시킨다는 것의 의미는 더 많은 인력과 차량이 필요하다는 것이고, 이것은 운영비용의 증가로 이어진다. 관리구역의 수를 증가시키는 대신, 현행 8개의 관리구역운영에서 수를 증가시키는 것과 비슷한 효과를 얻는 방안은 최대 이동거리를 증가시키되, 관리구역의 교차를 허용 하는 것이다. 예를 들어, <그림 6>의 구역 1과 구역 2의 교차는 목적값 개선에 큰 기여를 한다. 하지만 최대 이동거리를 9km에서 10km로 증가시키는 것과 10km에서 11km로 증가시

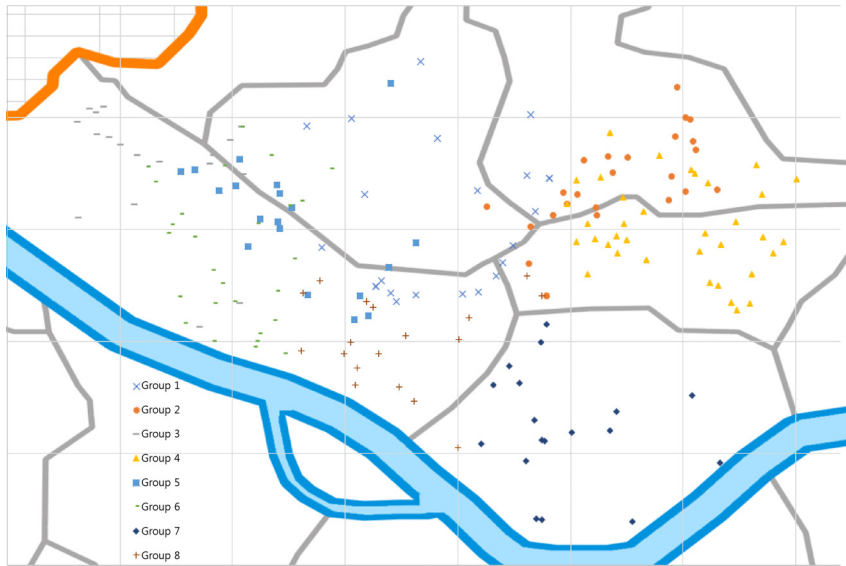


<그림 5> 현행 관리구역 운영 방안 ($d_{\max} = 10\text{km}$)

키는 경우, 2월과 4월 모두 9km에서 10km로 증가시키는 경우에 한계 감소치가 크다. 즉, 교통체증 및 장거리 이동에 의한 업무의 효율성을 희생하면서까지 최대 이동거리를 11km로 확대할 필요는 없다.

결론적으로, 본 연구는 전산 실험 결과 관리구역을

8개로 유지하고, 최대 이동거리를 10km로 증가시키되, 관리구역의 교차를 허용하는 방안을 제시한다. 이 경우, 변동계수는 2월은 0.20 4월은 0.13으로 감소한다. 2월은 수요가 적기 때문에, 변동계수가 향상 되었으나, 4월은 0.43에서 0.13으로 30% 감소하였다.



〈그림 6〉 2017년 2월 기준 8개 관리구역, $d_{\max} = 10km$ 인 경우 최적관리구역 설정

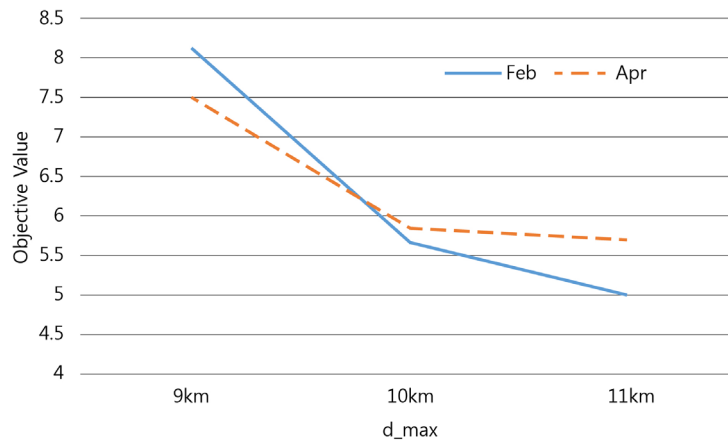
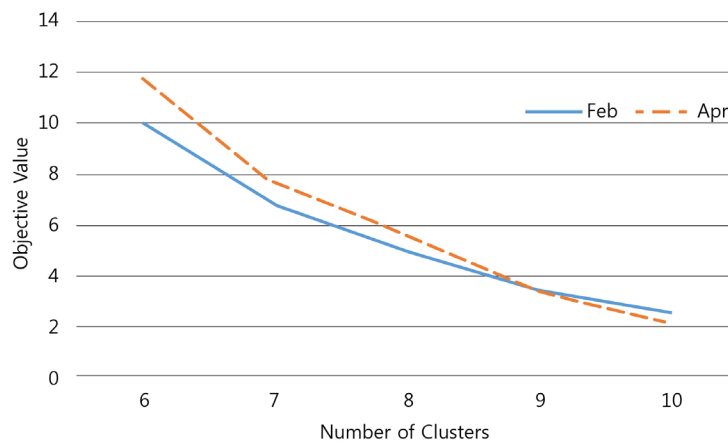


〈그림 7〉 2017년 4월 기준 8개 관리구역, $d_{\max} = 10km$ 인 경우 최적관리구역 설정

〈표 1〉 Objective Values

Feb 2017 (현행 : 7.31)		Number of Clusters(K)				
		6	7	8	9	10
d_{max}	9km	Infeasible	Infeasible	8.13	5.56	3.82
	10km	Infeasible	7.80	5.68	4.23	3.22
	11km	10.01	6.78	4.99	3.41	2.48

Apr 2017 (현행 : 19.55)		Number of Clusters(K)				
		6	7	8	9	10
d_{max}	9km	Infeasible	Infeasible	7.48	5.40	4.05
	10km	Infeasible	8.58	5.87	4.08	N/A
	11km	11.76	7.58	5.68	3.30	2.15

〈그림 8〉 8개 관리 구역인 경우, d_{max} 에 따른 목적값 변화〈그림 9〉 $d_{max} = 11km$ 인 경우, 관리 구역의 증감에 따른 목적값 변화

5. 결 론

본 연구는 공공자전거 시스템의 서비스 운영 구조 가운데 자전거 재배치를 위한 최적 관리구역의 설정에 초점을 맞추고 있다. 편도 대어를 많이 이용하는 공공자전거의 특성상 일정 수준 이상의 서비스 수준(Service Level)의 보장을 위해서는 자전거 재고 상황에 따른 자전거 재배치가 필요하다. 한정된 예산 하에 관리 구역을 어떻게 설정하느냐에 따라, 공공자전거의 서비스 수준을 높일 수 있다.

본 연구에서 개발한 모형은 관리구역들 간 Workload의 차이를 최소화하는 대여소들의 최적 Clustering을 찾기 위한 Mixed-Integer Programming 모델이다. 이 모형을 이용하여, 지난 2015년 7월부터 2017년 4월까지의 데이터를 수집하고, 각 대여소별 수요를 분석해서, 과거 이용실적 데이터를 바탕으로 최적 관리구역을 설정하였다. 전산실험 결과는 관리구역의 수가 많을수록, 그리고 관리구역의 최대 지름이 클수록 클러스터들간 Workload의 편차는 감소하였다. 그 이유는 관리구역의 수가 클수록, 그리고 최대 지름이 클수록, 최적화를 통해 더 균등하게 대여소들을 클러스터에 할당할 수 있기 때문이다.

본 연구의 한계점은, 비록 관리 구역간의 업무의 부담의 편차를 최소화 시켰지만, 현행 관리 되고 있는 다른 요건들은 반영하지 못하였다. 추후 관련 부서와 인터뷰를 통해 현행 관리 요건들을 수집하여, 최적화 모형에 반영하고자 한다. 또한, 현재 순 수요계산에는 일별 순 수요를 계산하여 월간 평균을 산출하였다. 하지만 시간별 순 수요를 계산하여, Peak Time별 평균을 산출하여 모형에 반영하는 방안을 통해 본 연구를 확장하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 문현수, 이영석, “대전시 공공 자전거(타슈) 공개 데이터 시각화 및 분석”, 『정보과학회 컴퓨팅의 실제 논문지』, 제22권, 6호(2016), pp. 253-267.
- [2] 변영우, 정하린, “공간정보를 기반으로 한 공공 자전거 대여소 적합성 분석”, 한국지형공간정보학회 학술대회논문집, (2016), pp. 121-123.
- [3] 장재민, 김태형, 이무영, “서울시 공공자전거 이용특성에 관한 연구: 여의도 및 상암 지구를 사례로”, 『서울도시연구』, 제17권, 4호(2016), pp. 77-91.
- [4] Borgnat, P., C. Robardet, J.-B. Rouquier, P. Abry, P. Flandrin, and E. Fleury, “Shared Bicycles in a City : A Signal Processing and Data Analysis Perspective,” *Advances in Complex Systems*, Vol.14, No.3(2011), pp. 415-438.
- [5] Come, E. and O. Latifa, “Model-Based count series clustering for Bike Sharing System usage mining, a case study with the Velib System of Paris,” *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technologies*, Vol.5, No.3(2014), pp. 1-27.
- [6] Kaltenbrunner, A., R. Meza, J. Grivolla, J. Codina, and R. Banchs, “Urban cycles and mobility patterns : Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system,” *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.6, No.4(2010), pp. 455-466.
- [7] Lathia, N., S. Ahmed, and L. Capra, “Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users,” *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, Vol.22(2012), pp. 88-102.
- [8] Lin J.-R., T.-H. Yang, and Y.C. Chang, “A hub location inventory model for bicycle sharing system design : Formulation and solution,” *Computers and Industrial Engineering*, Vol.65, No.1(2013), pp. 77-86.
- [9] Lin, J.-R. and T.-H. Yang, “Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints,” *Transportation Research Part E*, Vol.47, No.2(2011), pp. 284-294.
- [10] O'Brien O., J. Cheshire, and M. Batty, “Mining

- bicycle sharing data for generating insights into sustainable transport systems," *Journal of Transport Geography*, Vol.34(2014), pp. 262-273.
- [11] Raviv, T., M. Tzur, and I.A. Forma, "Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Vol.2, No.3(2013), pp. 187-229.
- [12] Schuijbroek, J., R.C. Hampshire, and W.-J. van Hoes, "Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems," *European Journal of Operational Research*, Vol.257, No 3(2017), pp. 992-1004.
- [13] Vogel, P., T. Greiser, and D.C. Mattfeld, "Understanding bike-sharing systems using Data Mining : Exploring activity patterns," *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol.20(2011), pp. 514-523.