

대중교통 네트워크 중심의 접근성을 기준으로 한 제주도 대중교통 개편 효과 분석*

– 대중교통 통행시간의 시간적 변동을 고려하여 –

Analysis of Jeju Public Transit System Reorganization Effect Based on Accessibility of Public Transit Networks

– Considering the Temporal Variability of Public Transit Travel Time –

심재웅** · 조기혁***

Sim, Jae-Woong · Cho, Gi-Hyong

Abstract

The purpose of this study is to propose a transit accessibility analysis method based on temporal variability of travel time. In this study, transit accessibility was defined in three levels (in transit route, spot and region unit) to present findings from different spatial scopes. Recently, Jeju special self-governing province reorganized bus system of the island. To compare transit accessibility before and after transit policy implementation, the reorganized bus system of Jeju special self-governing province was selected as a case study. This study used General Transit Feed Specification (GTFS) data format as storage public transit information, and calculated travel time using ArcGIS GTFS networks analysis tools. In the analysis of individual transit route level, we found the 3 types of accessibility changes which is increments, no significant changes and reductions and these results come from transit route change (number of transfer, distance change) rather than changes of vehicle interval. We found increases of inflow and outflow speed in most target spots and overall transit accessibility has been substantially improved in Jeju island. This study implies that accounting for temporal variability of travel time in accessibility analysis can result in more useful and sophisticated accessibility information in decision-making processes.

키워드 대중교통, 접근성, 여행시간큐브, 일반 대중교통 피드 사양
Keywords Public Transit, Accessibility, Travel Time Cube, General Transit Feed Specification

1. 서론

도시 공간 속에서 접근성은 여러 의미로 해석될 수 있는데, 본

연구에서는 특정 지점 사이를 다양한 교통수단을 통하여 이동하는데 필요한 통행시간을 접근성으로 정의하고 있다. 접근성은 시민들이 사회기반시설 및 문화, 여가 시설 등으로의 접근과 선택

* 이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C151930-01)에 의해 수행되었음.

** Combined MS/Ph. D Course, School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (first author: ryghl1994@unist.ac.kr)

*** Associate Professor, School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (corresponding author: gicho@unist.ac.kr)

의 기회에 상당한 영향을 끼친다. 대중교통은 저렴한 이용료로 도시민 대부분이 이용할 수 있는 교통수단으로서 도시 공간 내의 시설 사이에 최소한의 접근성을 보장한다. 따라서 지역별 대중교통을 통한 통행 접근성 수준을 파악하고, 지역 간 통행 접근성을 통합적으로 고려하여 접근성을 높이는 대중교통 정책을 고안하는 것은 도시민의 다양성을 보장하고 삶의 질을 높일 수 있다.

최근 국내외로 정확한 대중교통 접근성 지표를 바탕으로 지역별 대중교통 통행 편의를 측정하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 대중교통 이용은 보행 및 승용차 등을 통한 개별적인 통행과는 달리 노선과 운행시간표에 따른 대기시간이 통행시간에 포함되기 때문에 출발시간에 따른 통행시간의 변동이 큰 편이다. 기존 국내의 접근성 연구들은 대부분 통계 및 공간적인 비용을 바탕으로 접근성을 분석하거나 고정된 시간에서 통시적 방법으로 접근성을 분석해왔다. 그러나 시간의 흐름에 따른 대중교통 접근성의 변동을 고려하지 않는다면 대중교통 대기시간 등이 고려되지 않아 접근성이 과대 또는 과소 추정되며, 결과적으로 실제 도시민들이 체감하는 접근성과는 다른 결과가 도출될 수 있다. 최근 해외에서는 이러한 접근성의 시간적 변동성을 반영하기 위하여 General Transit Feed Specification(GTFS) 데이터를 바탕으로 대중교통의 운행정보를 반영하여 접근성을 분석하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다(Anderson et al., 2013, Owen and David, 2015; Salonen and Toivonen, 2013; Farber et al., 2014, Farber and Fu, 2017; El-Geneidy et al., 2016; Widener, 2017; Fayyaz et al., 2017).

본 연구는 ArcGIS의 GTFS tools을 이용하여 시간에 따라 변화하는 통행시간을 산출하고, 이를 바탕으로 시간적 변동이 고려된 접근성 분석 방법론을 제시한다. 이를 바탕으로 시간대에 따른 대중교통 접근성의 변화와 그 주기, 평균 및 최대/최저 접근성 등 정교한 접근성 분석이 가능할 것으로 기대된다. 이를 효율적으로 진행하기 위해 본 연구는 3차원의 데이터 구조인 Travel Time Cube(Farber and Fu, 2017) 프레임워크를 활용하였다. 대중교통 접근성의 시간적 변동성을 고려하는 것은 대기시간의 영향이 큰 대중교통의 특성과 맞물려 기존의 통계적인 관점 혹은 고정된 시간대의 통시적 대중교통 접근성 분석보다 더욱 실용성 있는 결과를 도출할 것으로 기대된다.

또한 본 연구는 제주도 대중교통 개편 사례에 이를 적용하여 통행시간을 기반으로 한 제주도 지역의 접근성 변화를 분석하는 것을 목표로 하고 있다. 접근성의 변화가 관찰되는 분석 단위에 따라 차별화된 분석 방법을 적용하여 전반적인 대중교통 개편의 효과뿐만 아니라 세부적인 경로 및 지역에서의 접근성 변화를 파악할 수 있는 프레임워크를 제안한다. 이를 통해 고정된 시점에서 통행시간이 측정되어 발생하는 접근성 오차를 줄여 대중교통 개편의 효과를 정교하게 측정할 수 있다. 또한 대중교통 개편으로 인해 소외된 지역과 발전된 지역을 파악하여 버스개편의 효과를 보다 정확하게 평가할 수 있다.

II. 대중교통 접근성 분석에 관한 선행 연구

개인용 운송 수단은 대중교통보다 대체로 더 좋은 접근성을 도시민에게 제공한다(Salonen and Toivonen, 2013; Widener, 2017). 그러나 모든 도시민이 개인용 운송 수단을 소유하기에는 경제적인 한계가 있다. 대중교통은 저렴한 이용료로 대다수 도시민이 이용 가능한 교통수단이다. 대중교통은 저소득층을 포함한 모든 도시민의 최소한의 도시 공간 점유를 보장한다. 따라서 지역별로 대중교통 접근성을 파악하고 그에 맞는 대중교통 정책을 세움에 따라 도시민의 삶의 질을 향상할 수 있다. 그러나 모든 도시민이 개인용 운송 수단을 소유할 수 있는 것은 아니며 바람직한 방향이라 볼 수도 없다.

도시 공간에서 접근성이라는 용어는 다양한 의미로 해석될 수 있다. 가장 보편적인 의미의 접근성은 특정 장소 및 시설에 접근하기 용이한 정도를 뜻한다. 국내외에서 대중교통 접근성 지표는 버스정류장이나 지하철역 등 대중교통 네트워크로의 접근과 대중교통 네트워크를 통해 특정 시설로의 이동의 용이함 정도를 나타내는 용어로 구분되어 사용되고 있다.

대중교통 네트워크를 통한 특정 시설로의 접근성 지표는 여러 관점을 바탕으로 평가될 수 있는데, 대표적으로 경제적인 비용, 접근기회(잠재성), 시공간적 비용 등을 고려하여 접근성을 평가할 수 있다. 우선 경제적인 측면에서는 통행에 필요한 운임요금 및 시간 비용 등을 통해 접근성을 평가한다. El-Geneidy et al.(2016)은 통행시간을 최저시급 기준으로 환산한 시간 비용과 운임요금을 바탕으로 대중교통 접근성을 평가하였다. 접근기회(잠재성) 측면에서는 제한 시간 및 공간적인 범위 내에 대중교통을 이용하여 접근할 수 있는 시설의 수를 바탕으로 접근성을 판단한다. 그리고 마지막으로 시공간적 비용 측면에서는 통행거리, 통행시간 및 통행속도 등을 바탕으로 특정 시설로의 접근성을 평가한다. 본 연구는 대중교통 접근성을 '대중교통 네트워크를 통해 특정 두 지점 사이의 통행의 용이함'으로 정의하고, 이를 통행시간 및 통행속도 등의 시공간적 비용을 바탕으로 평가한다.

국내에서 발표된 대중교통 접근성 관련 연구로는 이원도 외(2012), 성현곤(2012), 김리영·양광식(2013) 등이 있다. 이들 연구는 대중교통을 통해 접근할 수 있는 공간적 범위를 파악하기 위하여 지역 내의 이용 가능한 교통시설의 수, 대중교통 분담률 등 통계적 지표를 활용하여 접근성 분석을 수행하였다. 또한 통계지표를 통한 접근성 분석 이외에도 공간적 비용을 바탕으로 접근성을 분석한 연구도 진행되었다. 김아연·전병운(2012)은 역세권 지역에서 이용 가능한 대중교통이 지나는 행정구역 수를 이용하여 대중교통 접근성을 분석하였고, 박지영(2008)은 GIS를 활용하여 지역의 접근 가능한 정류장을 찾고, 도로 네트워크상에서 이동 가능한 물리적인 거리를 바탕으로 대중교통 서비스 범위를 도출하는 방법으로 접근성을 분석하였다.

하지만 공간적 비용을 바탕으로 접근성을 분석하는 것은 대중교통 탑승을 위한 대기 과정과 이용자가 대중교통 시설까지 이동에 사용할 수 있는 시간적 비용을 고려하지 못한다는 점에서 실제 도시민이 체감하는 접근 편의와 차이가 발생할 수 있다. Tribby and Paul(2012)에서 시공간 및 대중교통 운행정보 등이 반영된 GIS 기반의 접근성 분석은 시민들이 체감하는 접근성과의 괴리를 줄여 대중교통 설계자의 우려를 해결할 수 있다고 주장하였다. 최근에 국내에서도 대중교통 통행시간 요소를 이용한 시공간적 접근성 분석이 시도되고 있는데, 문현규 외(2016)는 스마트카드 데이터를 이용하여 통행시간을 산출하고 이를 바탕으로 대중교통 이용 편의성을 분석하였다. 그러나 이런 시도에도 불구하고 접근성 분석에 관한 체계화된 연구 방법론이 부재하고, 이러한 방법론을 적용하는 데 필수적인 대중교통 정보들의 공개와 가공은 더욱 부족한 실정이다.

반면 국외에서는 표준화된 대중교통 정보 데이터를 생성하고 접근성 분석에 활용하는 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Salonen and Toivonen(2013)은 개인 승용차와 대중교통을 통한 접근성을 분석 단계의 분석에 사용되는 변수의 종류에 따라 각각 Simple, Intermediate, Advanced라는 3단계로 분류하여 단계별 비교를 권장하였다. 이 중 환승, 출발 및 도착시간, 대중교통 운행시간을 바탕으로 한 통행시간 기반 대중교통 접근성 분석은 Advanced로 분류되었다. Lei and Richard(2010)은 여행시간버퍼를 이용하여 제한된 시간 동안 대중교통으로 이동할 수 있는 공간적 범위를 산정하고 이를 토대로 대중교통 접근성을 분석하였다.

Google에서 개발한 GTFS는 대중교통의 운행정보를 저장하는 데이터 형식이다. 최근 상당수의 해외 대중교통 기관이 GTFS 데이터 형식을 사용하여 대중교통 정보를 저장하고 공유하고 있다. 이와 함께 GTFS 데이터를 이용하여 대중교통을 통한 일자리 접근, 건강식품 접근 등 도시 내 주요 시설 및 서비스에 대한 접근성을 분석하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Anderson et al., 2013; Owen and David, 2015; Salomen and Toivonen, 2013; Farber et al., 2014; Farber and Fu, 2017; El-Geneidy et al., 2016; Widener, 2017; Fayyaz et al., 2017). 대중교통 통행시간은 차량 대기시간을 포함하고 있어, 통행시간의 시간적 변동이 큰 특징을 갖는다. Farber et al.(2014)는 대중교통 접근성 분석을 수행하며 식품사막(food desert) 지역을 찾고 시간에 따른 접근성 변화에 대한 고려가 대중교통 계획 시 수반되어야 한다는 점을 강조하였다. Fayyaz et al.(2017)는 일자리 접근성 분석을 수행할 때 대중교통 통행시간의 동적 변화를 분석에 반영해야 한다는 것을 주장하였다. Farber and Fu(2017)는 Travel Time Cube를 통해 대중교통의 통행시간 변화를 반영하며 효율적으로 접근성을 분석하는 다양한 방법들을 제시하였다. 본 연구는 Farber and Fu(2017)이 제안한 Travel Time Cube 분석 프레임워크를 국내에 맞춰 수정하고, 제주도 대중교통 개편 사례에 적용하여 대중

교통 접근성의 시간적 변동성이 고려된 대중교통 개편 효과를 비교 분석하는 방법을 제안하고자 한다.

III. 분석 자료 및 분석 도구

1. 대중교통 피드 사양(General Transit Feed Specification)

1) GTFS 데이터의 종류와 구조

본 연구는 출발시간에 따라 변화하는 통행시간을 계산하기 위해서 GTFS 데이터 형식을 차용해 분석을 진행하였다. GTFS는 노선 및 정류장, 운행시간 등 대중교통의 전반적인 정보를 저장하는 형식 중 하나로, 대중교통 기관이 대중교통 정보를 저장하고 공공에 쉽게 개방할 수 있도록 2005년에 구글에서 개발하였다. 대중교통 기관은 GTFS 형식으로 저장된 데이터를 Google Transit Data Feed 프로젝트 사이트(<https://code.google.com/archive/p/googletransitdatafeed/>)에 업로드할 수 있고, 연구 및 개발자는 자유롭게 사이트에 접속해 GTFS 데이터를 다운받을 수 있다. 규격화된 데이터와 개방성으로 GTFS 데이터를 활용하여 분석할 수 있는 다양한 애플리케이션이 개발되었다. 이를 통해 운행시간 표의 생성, 버스 노선의 시각화, 대중교통 통행시간 계산 등으로 활용이 가능하여 현재 많은 국가와 대중교통 기관들이 GTFS를 대중교통 데이터의 표준규격으로 활용하고 있다. 본 연구에서 통행시간의 계산에 사용하는 ArcGIS의 Add GTFS to Network Dataset toolbox도 이 중 하나이다. GTFS 데이터의 종류와 필수 데이터의 구조는 <표 1>, <그림 1>과 같다. GTFS는 대중교통 운

표 1. GTFS 데이터 파일의 종류

Table 1. Sort of GTFS data file

File name	Necessity	Definition
Agency	Required	Agency information where offer feed data (Timetable)
Stops	Required	Name and location of stop
Routes	Required	Kind of transit line (Sequence of stops)
Trips	Required	The order of trip in specific route
Stop times	Required	Arrive and departure time at specific stop of each trips
Calendar	Required	Schedule for service
Calendar dates	Selective	Exceptions to calendar.txt
Fare attributes	Selective	Fee information for each route
Fare rules	Selective	Rule of fee for each route
Shapes	Selective	Shape of route
Frequencies	Selective	Frequency of each route
Transfers	Selective	Transfer rules between routes
Feed info	Selective	Further information of transit

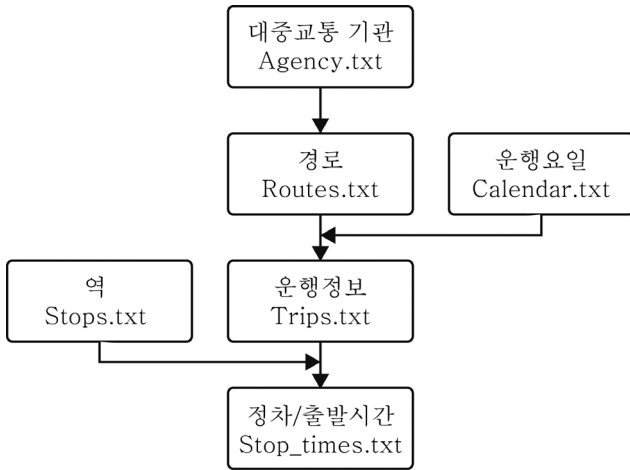


그림 1. GTFS 필수 데이터 파일의 종류와 구조
Fig. 1. Sort and structure of required GTFS data file

행 정보를 각각의 파일에 세분화하여 저장하고 있다. 이 중 대중교통기관, 정류장, 노선, 운행정보(노선별 개별 운행), 정류장 도착 및 출발시간, 운행 요일은 GTFS 데이터 구성에 있어서 필수적인 데이터이다. 필수 데이터 간의 연결성은 <그림 1>에 나타나 있다. Agency.txt파일에는 대중교통 기관의 정보가 저장되며, Routes.txt파일에는 각 노선의 대중교통 기관, 노선명, 대중교통 유형이 저장된다. Calendar.txt는 요일별로 운행서비스(일정)가 달라지는 것을 반영한다. Trips.txt파일에는 이러한 운행서비스, 노선 그리고 각 경로의 노선별 개별 운행정보가 담겨 있다. Stops.txt파일에는 정류장의 이름 및 정류장 id, 위치 정보가 저장되며, Stop_times.txt파일에는 개별 운행 id와 각 운행별로 정류장 도착 및 출발 시간이 저장된다. 이처럼 GTFS는 대중교통 정보를 세분화하여 저장하고 데이터 사이에 긴밀하게 연결되는 특징을 가지고 있다. 6개의 필수 GTFS 데이터 세트를 구성하면 ArcGIS의 GTFS 툴박스를 사용하여 출발시간에 따른 통행시간을 개별적으로 산출할 수 있다.

2) 통행시간 산출모형

ArcGIS Networks Analyst의 GTFS toolbox를 사용하여 경로의 통행시간을 산출하는 수식은 아래와 같다(<그림 2> 참조).

$$T_{i,j,m} = t_{i,1}^{walk} + \sum_{k=1}^{n+1} T_k^{transit} + \sum_{k=1}^n t_{k,k+1}^{walk} + t_{n+1,j}^{walk} \quad (1)$$

$$T_k^{transit} = t_k^{wait} + t_k^{board} + t_k^{transit} \quad (2)$$

여기서 $T_{i,j,m}$ 은 여행시간큐브(Farber and Fu, 2017)를 구성하는 단위로서, 출발시간 m 의 출발지점 i 에서 도착지점 j 까지 통행시간을 의미한다. 여행시간큐브에 관한 자세한 사항은 다음 절에 후술하였다.

통행 경로에 n 번의 대중교통 환승이 있을 때, $n+1$ 개의 노선 구간이 생성된다. $T_k^{transit}$ 은 특정 노선 구간 k 의 대중교통을 통한 통행시간으로, k 노선 구간의 차량 대기시간 t_k^{wait} , 차량 탑승시간 t_k^{board} , 차량 통행시간 $t_k^{transit}$ 으로 구성된다.

$t_{i,1}^{walk}$ 와 $t_{n+1,j}^{walk}$ 는 각각 출발지점에서 첫 번째 노선 구간의 출발 버스정류장과 마지막 노선 구간의 도착 버스정류장과 도착지점 사이의 보행시간을 의미한다. $t_{k,k+1}^{walk}$ 는 노선 구간 k 의 도착 버스정류장과 노선 구간 $k+1$ 의 출발 버스정류장 사이의 보행시간을 의미한다. ArcGIS Networks Analyst의 GTFS toolbox는 출발지점 i 에서 도착지점 j 까지 가능한 경로 중에 최소 통행시간을 가진 경로를 찾는다.

본 연구에서 통행시간 산출에 필요한 과정은 크게 원시 교통정보데이터(운행시간표 등)를 GTFS 데이터 형식으로 가공하는 과정과 이를 바탕으로 ArcGIS Networks Analyst의 GTFS toolbox를 통해 통행시간을 산출하는 과정으로 나눌 수 있다. 원시 교통정보데이터를 GTFS 데이터 형식으로 가공하는 과정은 공식적인 소프트웨어의 모듈이 존재하지 않아, Excel과 MATLAB 프로그램을 통해 별도의 처리 과정을 거쳤다.

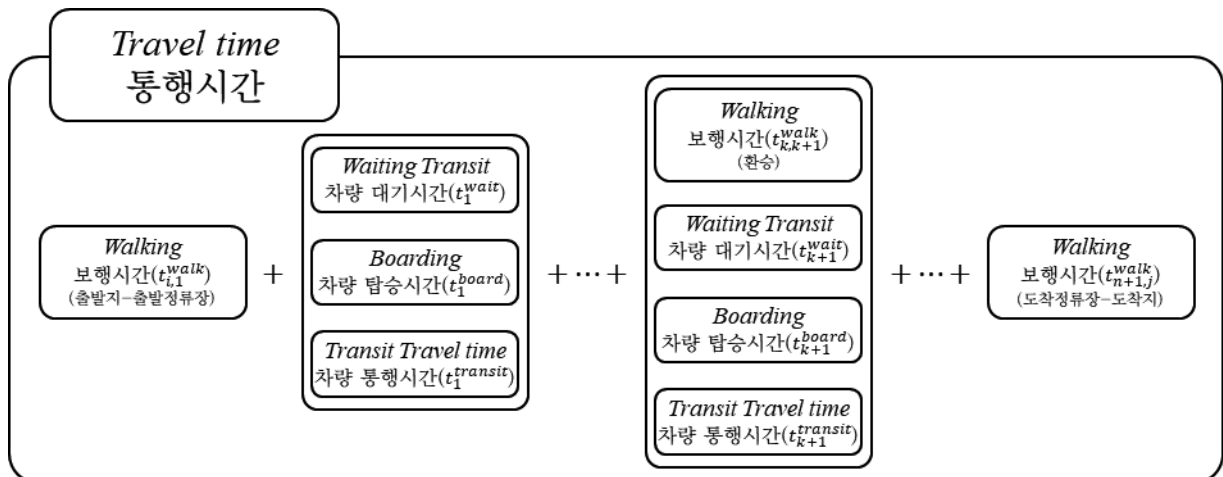


그림 2. 대중교통 통행시간 산출모형
Fig. 2. Structure of public transit travel time calculation

2. 여행시간큐브(Travel Time Cube) (Farber and Fu, 2017)

1) 여행시간큐브

Farber and Fu(2017)는 출발시간에 따른 통행시간의 변동성을 고려해 효율적으로 접근성을 분석하기 위해 여행시간큐브를 제안했다. 여행시간큐브는 3차원의 배열(array)로서 각각의 차원이 출발시간, 출발지, 목적지 인덱스에 대응하는 데이터 구조를 뜻한다. 대중교통 접근성 분석에서 여행시간큐브에 저장되는 자료는 통행시간이며 본 연구에서는 이를 식 (1)의 $T_{i,j,m}$ 으로 정의한다. 여행시간큐브에서 i, j, m 은 각각 출발지점, 도착지점, ‘출발지점에서 출발시간’의 인덱스를 뜻한다. 출발지점과 도착지점의 경우 N 개의 분석대상 지점을 나열하여 인덱스를 부여하며, 출발시간은 M 개의 분석 시점을 순서대로 나열하여 인덱스를 부여한다. 따라서 여행시간큐브에 저장되는 데이터의 수는 $N \times N \times M$ 개다. 본 연구에서는 55개의 공영관광지를 분석대상으로 설정하여 오전 7시부터 오후 9시까지 5분 간격으로 169개 시점의 통행시간을 산출하였다. 따라서 여행시간큐브의 크기는 511,225이다. 이처럼 많은 양의 통행시간 데이터는 분석 단위에 따라 수식을 달리하여 결과를 산출함으로써 다양한 관점에서의 접근성 분석을 가능케 한다. 아래의 수식은 본 연구의 접근성 분석 모형에 사용되는 도구들의 산출 로직이다.

특정 경로의 출발시간에 따른 통행시간
Travel Time of Specific Route (TTSR) (3)

$$= T_{i,j,m}, \forall m$$

특정 경로의 평균 통행시간
Average Travel time of Specific Route (ATSR) (4)

$$= (M)^{-1} \sum_{m=1}^M T_{i,j,m}$$

특정 지점의 평균 유출 통행속도
Average Speed From an Origin to all destination (ASFO) (5)

$$= ((N-1)M)^{-1} \sum_{m=1}^M \left(\sum_{j=1}^N (D_{i,j} / T_{i,j,m}) - D_{i,i} / T_{i,i,m} \right)$$

특정 지점의 평균 유입 통행속도
Average Speed from all origin To a Destination (ASTD) (6)

$$= ((N-1)M)^{-1} \sum_{m=1}^M \left(\sum_{i=1}^N (D_{i,j} / T_{i,j,m}) - D_{j,j} / T_{j,j,m} \right)$$

전체경로의 출발시간에 따른 평균 통행시간

Time dependent Average Travel time (TAT) (7)

$$= (N(N-1))^{-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{i,j,m} \forall m$$

전체경로의 평균 통행시간
Overall Average Travel time (OAT) (8)

$$= ((N(N-1)NM)^{-1} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{i,j,m}$$

이때 $D_{i,j}$ 는 출발지점 i 와 도착지점 j 사이의 도로교통망을 통한 이동 거리이다. 본 연구에서 $D_{i,j}$ 는 ArcGIS Network Analyst의 OD cost Matrix를 통해 두 지점 사이의 최저 이동 거리(문현구 외, 2016)로 산출하였다. 또한 출발지점과 도착지점이 같은 경우는 접근성 분석에서 제외하였다.

TTSR의 경우 그의 연속적인 특성을 바탕으로 두 지점 사이의 통행시간 변화 추세, 변동 주기 및 폭, 최대/최소 통행시간 등을 확인할 수 있으며, 대중교통 정책 변경 등의 외부적 요인으로 인한 시간대에 따른 접근성 변화 정도를 살펴볼 수 있다. 또한 ATSR을 통해 구체적인 접근성 변화 수치를 확인할 수 있다. 위와 같은 자료들을 활용해 대중교통 각 경로의 접근성 및 그 특징들을 파악하여 경로 단위의 세부적인 접근성 분석과 대응을 할 수 있다.

본 연구에서는 문현구 외(2016)의 지역별 평균 표정속도 산출 로직을 바탕으로 Farber and Fu(2017)의 Average Travel Time from an Origin과 Average Travel Time to a Destination을 수정 보완하여, 특정 지점에서의 평균 유출 통행속도와 평균 유입 통행속도를 이용한 분석 모형을 고안하였다. ASFO는 특정 지점에서 다른 지점들로의 평균 유출 통행속도를 나타내며, ASTD는 다른 지점들에서 특정 지점으로의 평균 유입 통행속도를 나타낸다. ASFO와 ASTD는 특정 한 지점의 접근성 수준을 표현하는 객관적인 수치 자료로 활용할 수 있다. 평균 유출/유입 통행속도는 <그림 2>의 모형을 통해 산출된 통행시간을 두 지점의 최단거리를 나눈 것으로 본 모형에서 통행시간이 아닌 유출/유입 통행속도를 사용하는 것은 외곽지역이 도시의 중심지역보다 다른 지역으로 이동하는 통행거리가 길어 통행시간이 길어지는 것을 보정하여 지역별 대중교통 네트워크에 따른 접근성 수준을 파악하기 위함이다. 이는 지리적 위치가 지역의 대중교통 접근성에 영향을 주는 것을 제한하고, 대중교통 네트워크가 접근성에 미치는 영향을 명확하게 하기 때문에 대중교통 개편으로 인한 지역별 접근성의 변화를 확인하고자 하는 본 연구에 더욱 적합한 방법이다. ASFO와 ASTD를 통한 지역별 접근성 분석은 국소 지역 단위의 대중교통 접근성 분석과 그의 대응이 가능하다. 특히 시설 및 서비스 등에 대한 대중교통 접근성이 취약한 국소 지역을 찾을 수 있다는 점에서 의의가 있다. 마지막으로 TAT와 OAT은 전반적인

지역의 대중교통 접근성 변화를 파악하는 데 효율적이다. 이는 대중교통 권역 내의 전반적인 대중교통 접근성을 파악하고 그 변화를 확인하는 데 사용될 수 있다. 또한 대중교통 기관의 전반적인 개편 효과를 확인할 수 있다. 본 연구에서 산출된 통행시간을 바탕으로 여행시간큐브를 구축하고 접근성의 변화를 분석하는 과정은 MATLAB 프로그램을 통하여 별도의 처리 과정을 거쳤다.

3. 연구 대상 및 분석 자료

제주특별자치도는 2017년 8월 26일 대중교통 개편을 시행하였다. 일부 읍면지역에만 운행되던 시내버스를 모든 읍면지역으로 확대하였고, 급행버스 노선 12개의 신설, 4개의 환승센터와 지역 주요 거점 중심의 환승 체계 구축, 대중교통 우선 차로 도입, 대중교통 차량의 약 50% 증차 등 대대적인 개편이 있었다. 제주도 버스 운행시간표를 바탕으로 만들어진 GTFS 데이터에서 대중교통 Routes(노선)는 개편 전후로 179%가 증가하였고, Trips(운행횟수)는 146% 증가하였다. 이는 노선당 운행횟수가 개편 이후 18% 감소함을 뜻하며, 대중교통 차량의 증차가 기존 노선들의 배차 간격을 줄이기 위함이 아닌 노선의 신설 및 개편을 위해 이루어졌음을 의미한다. 또한 제주도는 도서 지역으로 단일 광역지방자치단체의 관할 아래에 있기에 제주도의 대중교통 개편 전후의 대중교통 접근성 변화는 다른 지역의 대중교통 체계의 영향을 받지 않는다는 것이 큰 특징이다. 이러한 특징은 대중교통 개편 전후의 접근성 변화를 분석하기에 알맞은 요건이다. 따라서 본 연구는 제주특별자치도를 공간적 범위로 설정하고 2017년 8월 26일 대중교통 개편 시행 전후의 대중교통 접근성 변화를 비교 분석하며 접근성의 시간적 변동성이 갖는 계획적 함의를 찾고자 한다.

제주도는 관광산업이 발달하여 많은 여행객이 방문하는 지역적 특성을 갖는다. 따라서 본 연구는 제주특별자치도(www.jeu.go.kr)에서 제공한 공영관광지 60여 곳 중 대중교통이 미치지 않는 지역과 중복지점 등을 제외한 55곳을 분석 지점으로 설정하였다. 이를 바탕으로 55개의 공영관광지를 서로 연결하는 2970(단방향)개의 개별경로, 55개의 공영관광지점(개별 공영관광지를 통과하는 경로 집합), 공영관광지 전체 네트워크(2970개의 경로 전체)를 단계별로 구분하여 각각 분석 단위로 설정하였다.

본 연구에서는 대기시간, 환승 등 대중교통 접근성의 시간적 변동성 요인을 파악하기 위하여 개편 전후의 제주도 버스운행시간표를 가공하여 사용하였다. 개편 이전의 버스운행시간표는 제주특별자치도청 교통항공국에서 받았으며, 개편 이후의 운행시간표는 제주특별자치도청에서 운영하는 제주버스정보시스템(<http://bus.jeu.go.kr/>)의 제공 자료를 활용하였다.

또한 본 연구에서 사용되는 대중교통 및 보행 관련 공간 정보는 국가교통 DB(<https://www.ktdb.go.kr>) GIS 교통망 DB의 도로망 데이터를 사용하였다. 제주도 버스정류장의 좌표는 공공데이터 포털

(<https://www.data.go.kr>)을 통해 개방된 제주특별자치도 버스정류소 현황 자료를 바탕으로 일부 누락 사항을 보완하여 사용하였다.

4. 연구 방법

본 연구는 크게 출발시간에 따른 특정 경로의 통행시간을 측정하는 것과 해당 결과를 바탕으로 분석 단위에 따라 다양한 관점에서 접근성을 평가하여 제주도 지역의 대중교통 개편 효과를 분석하는 것으로 나뉜다.

우선 대중교통 통행시간을 계산하기 위해서 노선 및 대중교통 운행정보가 담긴 자료를 GTFS 형식에 맞춰 가공한다. 이를 위하여 제주특별자치도청에서 제공받은 제주도 대중교통 개편 전후 버스 운행시간표를 GTFS 형식으로 가공하였다. 가공 이후 ArcGIS Network Analyst의 Add GTFS to Network Dataset toolbox을 이용하여 2970개 경로의 개편 전후의 대중교통 통행시간을 계산하였다. 통행시간은 5분 간격으로 오전 7시부터 오후 9시까지 총 14시간에 걸쳐서 169회 측정하여 계산하였다. 이때 통행시간은 <그림 2>의 대중교통 통행시간 산출모형을 바탕으로 산출되었다. 본 연구에서 차량 통행시간은 운행시간표를 바탕으로 대중교통 노선의 예상 통행시간으로 산출되었다. 대중교통 통행시간은 보행시간을 포함하며, 보행만으로 이동한 경우(보행만으로 이동한 시간이 대중교통을 이용한 경우보다 짧을 때)도 대중교통 통행시간의 범위에 포함하였다. 본 연구는 보행속도를 성인 평균인 5km/h로 설정하였고, 보행시간은 보행 거리를 보행속도로 나누어 산출되었다. 본 연구에서 보행 거리는 출발지점에서 가장 가까운 도로로부터 대중교통 정류장까지의 거리로, GIS 도로망 데이터를 바탕으로 GIS Networks Analyst tools을 통해 계산되었다. 또한 차량 탑승시간을 15초로 고정하였고, 차량 대기시간과 차량 통행시간은 제주도 대중교통 개편 전후의 운행시간표를 이용하여 ArcGIS GTFS Network Dataset을 통해 대중교통 네트워크 내에서의 최저 통행시간을 기준으로 산출되었다.

측정된 통행시간은 출발시간, 출발 지점(공영관광지), 도착 지점(공영관광지)에 따라 3차원의 데이터 구조인 여행시간큐브에 저장하였다. 분석은 3단계로 이루어졌다. 첫 번째 단계의 경우 출발시간에 따른 통행시간의 변화(TTSR)와 하루평균 값(ATSR)을 이용하여 2970개 개별경로의 접근성 변화를 분석하였다. 두 번째 단계에서는 총 55개의 지점 중 특정 한 지점을 출발지와 도착지로 하는 경우를 나누고, 이들의 통행시간과 최단거리를 바탕으로 ASFO와 ASTD를 계산하였고 특정 지점의 접근성 변화를 분석하였다. 이때 통행시간은 <그림 2>의 모형을 통해 산출되어 여행시간큐브에 저장된 자료를 사용하였고, 최단거리는 GIS 도로망 데이터를 바탕으로 Networks Analyst를 통해 별도로 산출하였다. 마지막 단계에서는 전체 2970개의 경로 TAT와 OAT를 바탕으로 지역의 전반적인 접근성 변화를 분석하였다.

IV. 대중교통 접근성 분석 결과 및 해석

1. 특정 경로의 접근성 변화분석

접근성 분석의 첫 단계로 제주도 개편 전후 2970개 경로의 통행 시간을 출발시간에 따라 순서대로 나열하여 개별경로들의 개편 전후의 TTSR 그래프 및 ATSR 값을 산출하였다. 이를 이용해 <그림 3>에서 개편 전후의 TTSR 그래프의 진동주기의 변화량과 ATSR 값의 변화율을 바탕으로 개별경로의 접근성 변화 유형을 9가지로 구별하였다. 이때 ATSR의 변화율과 진동주기의 변화량을 각각 3단계로 구분하였는데, 제1사분위수인 하위 25%에 해당하는 경로들은 '큰 변화 없음'으로, 나머지 75% 경로들은 증가/감소 여부에 따라 '통행시간(진동주기) 감소'/'통행시간(진동주기) 증가'로 각 단계를 정의하였다. 전후 변화를 비교할 때에는 보행만으로 이동하여 접근성 변화가 없는 65개 경로는 제외하였다. 결과적으로 <표 2>와 같이 2905개의 경로 중에서 '통행시간 감소'는 2050개(70.5%), '통행시간 증가'는 128개(4.4%)로 파악되었고, '주기 증가'는 1100개(37.9%), '주기 감소'는 1079개(37.1%)로 파악되었다. 통행시간의 변동 주기는 각 개별경로에서 이용하는 노선들의 운행횟수와 밀접한 관련이 있다. 이용자가 탑승할 대중교통 차량이 정류장에서 출발하면, 다음 차량을 탑승하기 위한 대기시간이 발생해 이후에 출발하는 이용자의 통행시간이 급증하여 통행시간의 변동이 생긴다. 따라서 각 개별경로에서 이용하는 대중교통 차량이 정류장에서 출발할 때마다 통행시간이 주기적으로 변한다. 통행시간의 진동주기는 개별경로에서 사용할 수 있는 노선의 운행횟수가 증가하거나 사용 가능한 노선이 증가할수록 감소한다. 이는 노선의 운행차량의 배차 간격이 감소하거나 정류장의 노선 증가 및 환승 노선이 추가되는 상황에 해당한다. <그림 3>과 <표 2>에 따르면 대부분의 경로에서 통행시간은 감소하였지만, 진동주기는 개별 노선에서 증가한 경로와 감소한 경로가 전반적으로 고르게 분포되어 있다. 또한 통행시간 변화와 진동주기 변화 사이의 상관관계가 뚜렷하지 않아, 진동주기의 감소가 통행시간의 감소에 영향을 미치지 않았음을 파악할 수 있다. 이는 제주도 대중교통 개편으로 인한 운행차량의 증차가 배차 간격을 감소시키지 않았음을 시사하며, 각 개별경로의 진동주기 증감이 노선 개편으로 인한 경로의 환승 횟수의 변화와 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 제주도 버스운행시간표를 바탕으로 구축된 GTFS 데이터에서 노선별 운행횟수가 28.7회에서 23.4회로 감소하여 운행차량의 증차가 배차 간격의 감소에 영향을 미치지 않았다는 것과 증차된 차량 200여 대 중 114대가 12개의 급행 노선에 배치된 것이 이를 뒷받침한다. 또한 제주도는 기존의 중복노선을 제거하고 경로 굴곡도가 높은 노선을 환승센터 중심의 대중교통 개편을 통해 세분화하여 노선의 수를 높였고, 이러한 노선의 개편이 진동주기에 영향을 미친 것으로 추정할 수 있다.

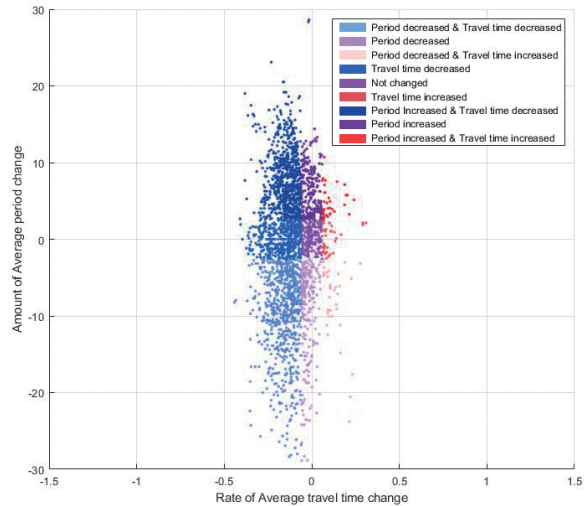


그림 3. 대중교통 개편으로 인한 개별경로의 평균 통행시간 변화율 및 평균 진동주기 변화량

Fig. 3. Rate of average travel time change and amount of average period change according to Jeju public transit reorganization

표 2. <그림 3>의 각 개별경로 유형에 속한 경로의 수

Table 2. Number of routes belong to each route type of <Fig. 3>

	Travel time decreased	Minute change in travel time	Travel time increased
Period increased	813	248	39
Minute change in travel time	482	204	40
Period decreased	755	275	49

<그림 4>의 a), b), c)는 평균 통행시간의 증감 유형 중 임의의 경로를 하나씩 선택하여 제주도 대중교통 개편 전후의 TTSR를 그래프로 산출한 것이다. 이를 통해 각 개별경로의 하루 동안의 통행시간 변화를 확인할 수 있어 통행시간의 변동과 진동주기가 시간대에 따라 어떻게 변화하는지 확인할 수 있다. 또한 개편 전후의 최대/최소 통행시간과 시간대별 대기시간을 경로별로 상세히 확인할 수 있다. <그림 4>의 a)의 경우에는 개편 후 통행시간이 증가하여 접근성이 감소한 경로이다. 해당 경우에는 진동주기가 감소하였음에도 통행시간이 증가했다는 점에서 개편 후에 해당 경로에서 환승을 많이 하도록 노선이 변경된 것이 통행시간에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다. 또한 <그림 4>의 b)의 경우에는 출발시간에 따라 대중교통 개편 전후의 접근성 증가와 감소가 교차하여 그 측정 시점에 따라 통행시간의 증감 결과가 달라진다. 이는 출발시간에 따라 여러 측정 시점의 통행시간을 종합적으로 검토하여 접근성을 분석하는 것이 한 시점에서 측정된 통행시간을 바탕으로 접근성을 분석하는 것보다 정확한 결과를 산출해낼 수 있다는 것을 시사한다.

본 분석 방법을 통해 제주도 버스의 개별적인 경로의 접근성 변화를 분석할 수 있었고 평균 통행시간의 변화율과 평균 진동주기

의 변화량을 바탕으로 개편 전후 경로의 통행시간 변화 유형을 세분화할 수 있었다. 이를 바탕으로 대중교통 차량의 증가가 전반적인 경로의 배차시간에 영향을 미치지 않음을 밝혀, 배차시간의 감소가 아닌 급행버스 신설 및 노선 개편이 접근성에 영향을 미쳤

음을 추정할 수 있었다.

대부분의 경로에서 대중교통 개편 이후 전반적으로 접근성이 증가했지만 <표 2>의 'Travel time decreased' 유형에 해당하는 128개의 경로에서 확인할 수 있듯이, 대중교통 개편으로 인해 오히려 접근성이 감소한 경로가 발생한 것을 확인하였다. 이는 정책 결정에 따라서 특정한 경로들의 편의가 감소한 것으로서 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

2. 특정 지점의 접근성 변화분석

두 번째 분석 단계는 특정 지점에서의 접근성 변화분석이다. 본 분석 단계에서는 여행시간큐브에 저장된 통행시간 데이터와 별도로 산출된 최단거리 데이터를 이용하여 모든 지점에 대해서 ASFO와 ASTD를 산출하였고, 이를 각 지점별로 지도상에 속도의 크기에 따라 표시하였다(<그림 5~8> 참조). <그림 5>와 <그림 6>은 각각 대중교통 개편 전후의 특정 지점의 ASFO를 나타내고, <그림 7>과 <그림 8>은 ASTD를 나타낸다.

이와 같은 결과를 살펴보면 전반적으로 개편 이후 대부분 지점에서 ASFO와 ASTD가 향상되었음을 확인할 수 있다. 제주도의 중심지로서 제주시청이 있는 제주도 북부와 제주 해녀 박물관과 성산 일출봉이 있는 제주도 동부 지역은 본래 대중교통 접근성이 높은 지역으로 개편으로 인한 가시적인 효과가 눈에 띄지 않았

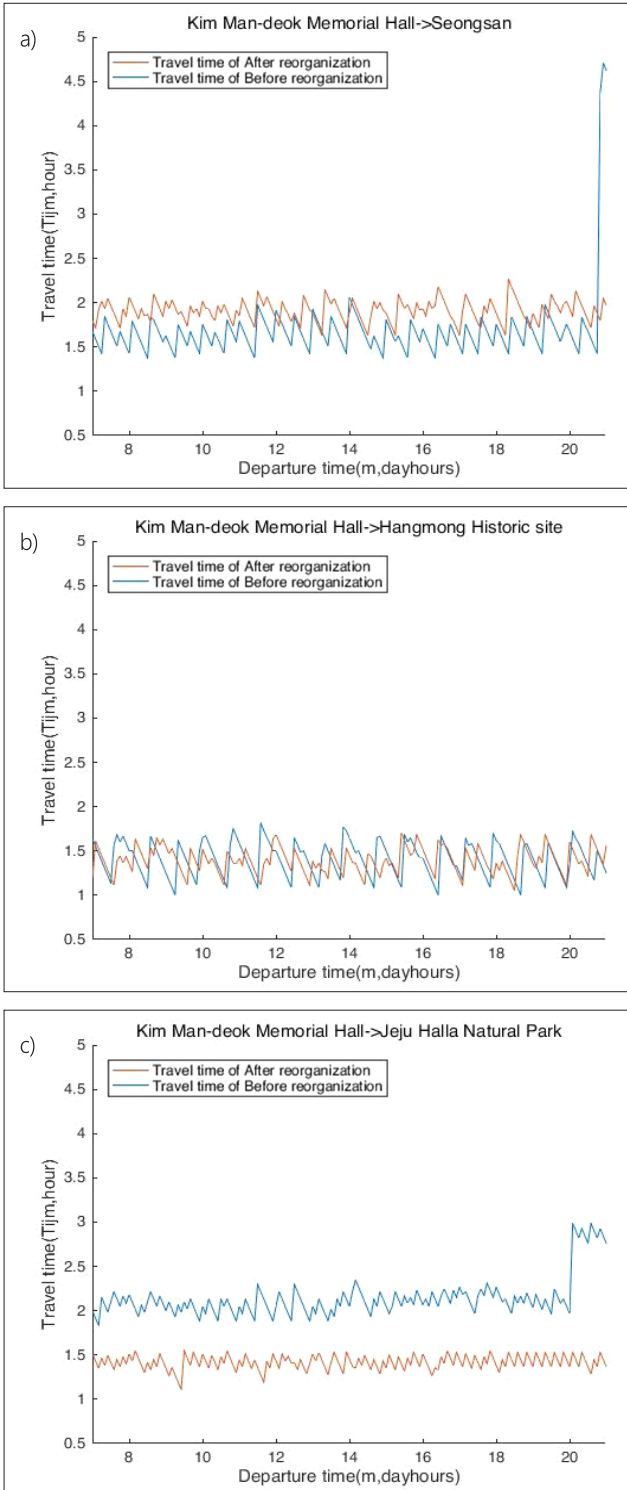


그림 4. a) 접근성이 감소한 경로의 예, b) 접근성의 변화가 없는 경로의 예, c) 접근성이 증가한 경로의 예
 Fig. 4. a) One of accessibility decrease routes, b) one of routes with no change in accessibility, c) One of accessibility increase routes

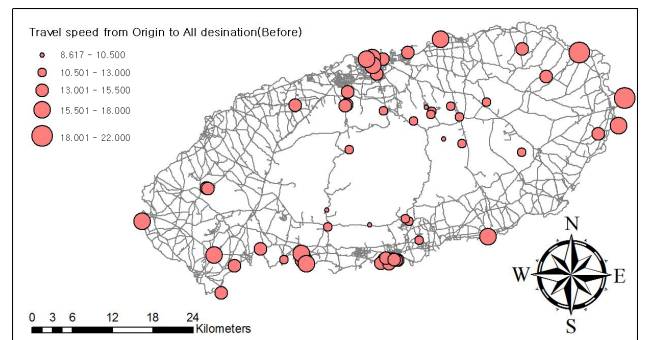


그림 5. 대중교통 개편 전 제주도 공영관광지별 평균 유출 통행속도
 Fig. 5. ASFO of tourist attraction in Jeju (Before Jeju public transit reorganization)

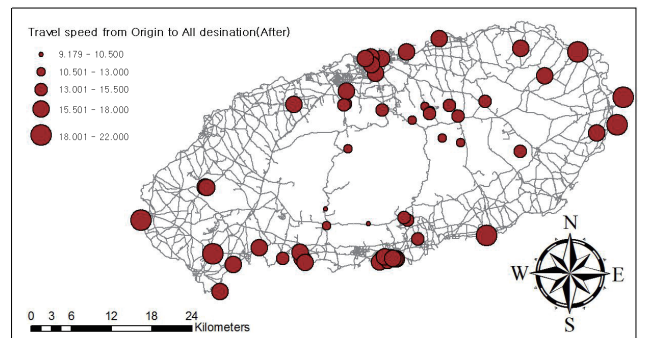


그림 6. 대중교통 개편 후 제주도 공영관광지별 평균 유출 통행속도
 Fig. 6. ASFO of tourist attraction in Jeju (After Jeju public transit reorganization)

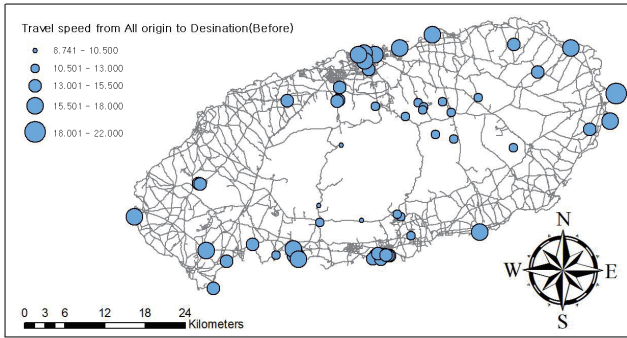


그림 7. 대중교통 개편 전 제주도 공영관광지 간 평균 유입 통행속도
Fig. 7. ASTD of tourist attraction in Jeju (Before Jeju public transit reorganization)

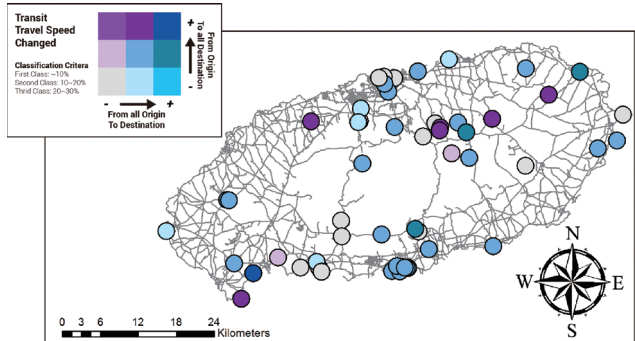


그림 9. 제주도 대중교통 개편 전후의 평균 유출/유입 통행속도의 변화량
Fig. 9. Change of ASTD and ASFO after Jeju public transit reorganization

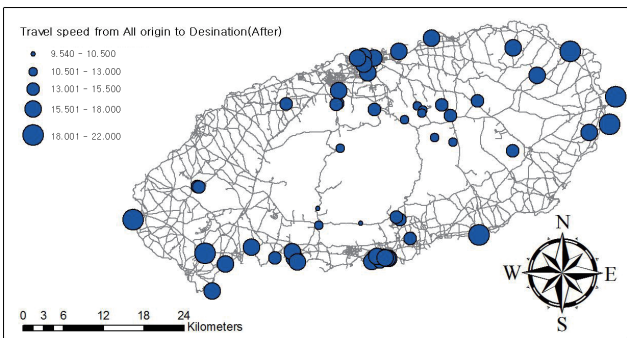


그림 8. 대중교통 개편 후 제주도 공영관광지 간 평균 유입 통행속도
Fig. 8. ASTD of tourist attraction in Jeju (After Jeju public transit reorganization)

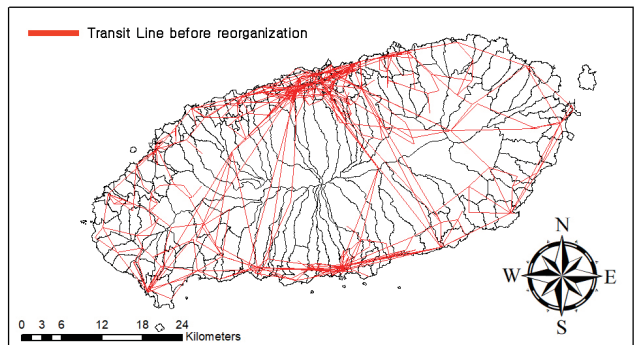


그림 10. 제주도 대중교통 개편 전 지역별 대중교통 네트워크의 수
Fig. 10. Number of Transit line within region before reorganization

다. 제주도 남부의 경우 서귀포시청 제1청사가 있는 구시가지와 제2청사가 있는 신시가지 지역 부근은 개편 전보다 상대적으로 ASFO와 ASTD가 향상되었다. 제주국제대학교와 제주 자연휴양림이 있는 제주시 남부 지역 또한 개편 전 다른 지역과 비교하였을 때 상대적으로 열악했던 접근성에 비해 일정 수준 향상이 있는 것으로 판단된다. 이처럼 평균 유출 통행속도와 평균 유입속도를 통해 특정 지점 부근의 절대적인 접근성 변화 수치를 확인할 수 있으며, 기존 대중교통 여건을 고려한 상대적인 접근성 변화 또한 분석할 수 있다. 본 연구에서는 Farber and Fu(2017)의 Percentage change in average travel time to and from that location을 이용하여 제주도 특정 지점에서의 개편 전후의 ASFO와 ASTD의 상대적인 변화를 산출하였다. 이는 <그림 9>에 나타나 있다. <그림 9>는 대중교통 개편 이후로 ASFO와 ASTD를 각각 10%를 간격으로 '10% 미만', '10~20%', '20% 이상' 등급으로 나누었다. 대부분의 지역에서 ASFO와 ASTD의 증가가 있었다. 결과적으로 각 지점은 ASFO와 ASTD의 향상 정도에 따라 9개의 등급으로 분류되었다. 가령 남색(오른쪽 맨 위)은 ASFO와 ASTD 둘 다 20% 이상의 상승이 있는 지점이며, 진한 자주색(왼쪽 맨 위)은 ASTD는 10% 미만으로 향상되고, ASFO는 20% 이상의 향상이 있는 지점이다.

<그림 10>과 <그림 11>은 각각 대중교통 개편 전후의 대중교통 네트워크를 나타낸다. 대중교통 네트워크는 제주특별자치도에서

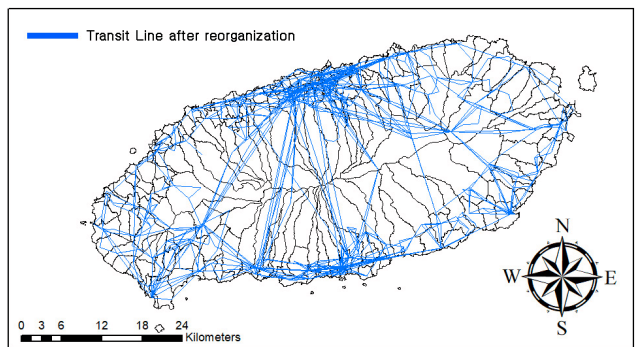


그림 11. 제주도 대중교통 개편 후 지역별 대중교통 네트워크의 수
Fig. 11. Number of Transit line within region after reorganization

제공한 버스운행시간표를 바탕으로 노선으로 연결된 정류장 사이의 연결망을 뜻한다. <그림 12>는 각 지역을 지나는 대중교통 네트워크 수의 변화를 뜻한다. 개편 전후의 대중교통 네트워크의 변화를 본 분석방법과 함께 고려하면 각 지역의 다른 지역과의 대중교통을 통한 연결 수준을 통행시간의 변화와 함께 고려할 수 있다. 상대적인 접근성 변화는 서귀포환승센터가 있는 서귀포 제1시청 부근과 대천환승센터가 있는 제주시 남부 지역에서 두드러지며, 또한 동광환승센터를 중심으로 하여 제주도 서부지역 전역에 걸쳐 광범위하게 접근성이 향상된 것으로 보인다. 또한 <그림 12>와 같이 해당 지역의 대중교통 네트워크의 수가 상당히 증가

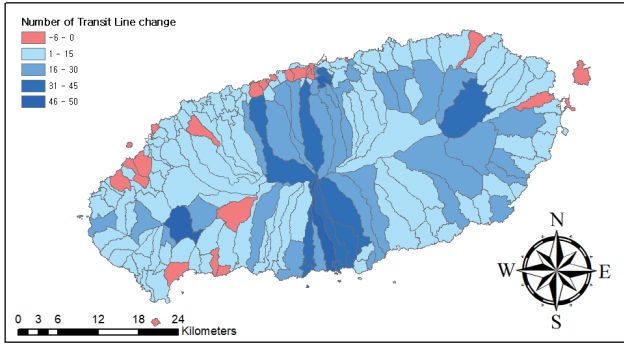


그림 12. 개편 전후의 지역별 대중교통 네트워크 수의 변화량
 Fig. 12. Number of transit line change within region according Jeju public transit reorganization

한 것을 확인할 수 있다. 반대로 서귀포시의 서남부지방(중문)과 제주시청 부근의 접근성 상승 폭이 작았는데, 제주시청의 경우 제주공항환승센터가 존재하지만 개편 전 지점의 접근성이 타 지점들에 비해 높아 개편 후의 접근성 향상 폭이 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 서귀포시의 서남부지방(중문)의 경우 기존의 대중교통 접근성이 낮은 것에 비해 개편 후에도 큰 변화가 없어 대중교통 개편의 효과를 상대적으로 받지 못하였다. 또한 <그림 12>를 통해 해당 지역에서 대중교통 네트워크 수가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 점들을 바탕으로 대중교통 접근성의 증감이 대중교통 네트워크의 변화와 연관성이 있는 것으로 추정할 수 있다.

3. 전체 지역의 전반적인 접근성 변화분석

마지막 단계의 분석은 분석 범위 내 전체 지역의 전반적인 접근성 분석이다. 해당 분석방법은 분석 범위를 세분화하여 시/군/구 단위로 지역의 전반적인 접근성을 분석할 수 있다. 전체 지역의 전반적인 접근성 변화분석은 전체경로의 출발시간에 따른 TAT와 OAT를 산출하여 진행하였다. 먼저 전체경로의 출발시간에 따른 통행시간의 변화를 산출하여 그래프로 시각화하였다. 특정 경로의 출발시간에 따른 통행시간 변화 그래프와 유사하게 시간대에 따른 전체경로의 전반적인 접근성 변화 추이를 살펴볼 수 있다. 제주도 대중교통 개편 전후의 전체경로의 출발시간에 따른 통행시간의 변화는 <그림 13>과 같이 나타나며, 전체경로의 평균 통행시간은 <표 3>과 같이 나타난다. <그림 13>을 살펴보면 모든 시간대에서 대중교통 통행시간이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 제주도 대중교통 개편 정책의 종합적인 효과가 모든 시점에서 긍정적으로 나타났다는 것을 의미한다. 제주도 전체 지역의 접근성 향상의 구체적인 수치는 OAT를 통해 산출되는데, 제주도 지역의 OAT가 16분 정도 감소했으며, 이로 인해 약 11%의 접근성이 향상되었다는 것을 확인할 수 있다.

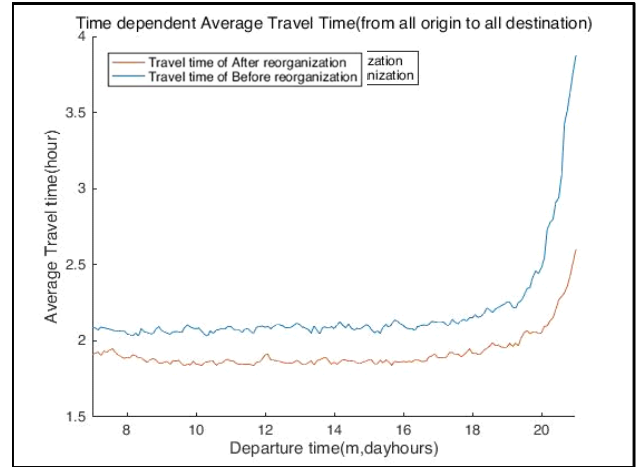


그림 13. 제주도 대중교통 개편 전후 전체경로의 출발시간에 따른 평균 통행시간
 Fig. 13. TAT of Jeju before and after public transit reorganization

표 3. 제주도 대중교통 개편 전후 전체경로의 평균 통행시간
 Table 3. OAT of Jeju before and after public transit reorganization

Overall average travel time (min)	
Before reorganization	133.07
After reorganization	117.48

V. 결론

본 연구는 국내외의 연구들을 바탕으로 출발시간에 따라 변화하는 특정 경로의 통행시간을 산출하는 방법과 그를 활용하여 분석 단위의 크기에 따라 각기 다른 분석 도구를 사용해 다양한 관점에서 접근성 분석을 하는 방법을 소개하기 위하여 수행되었다. 본 연구는 GTFS 데이터 형식을 기반으로 버스운행정보를 저장하고 이를 ArcGIS의 GTFS toolbox를 이용하여 특정 경로의 통행시간을 산출하였다. 이를 3차원의 여행시간큐브에 저장한 뒤 이를 이용해 효율적으로 다양한 분석 도구를 활용하여 접근성 분석 단위의 크기에 따라 단계적 접근성 분석을 진행하였다.

제주도 대중교통 개편 전후의 접근성 변화를 분석한 결과 개별 경로 단위의 접근성의 경우 평균 통행시간의 변동률이 낮아 큰 변화가 없다고 판단되는 것을 전체의 25%로 설정할 때, 70.5%의 경로에서 개편 이후 접근성이 향상되고, 4.4%의 경로에서 접근성이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 통행시간의 변동률과 함께 진동 주기의 변화량을 함께 고려했을 때, 대중교통 개편사항 중 하나인 대중교통 차량의 증차가 배차 간격을 줄이는 것이 아닌, 노선의 신설과 개편을 중심으로 이루어졌다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 대중교통 접근성의 변화가 대중교통 차량의 증차로 인한 배차 간격의 감소가 아닌, 노선 개편의 영향을 많이 받은 것으로 추정할 수 있다. 또한 개별경로 단위의 접근성 분석은 경로별

로 시간대별 최대/최소 통행시간과 통행시간 변화의 진동주기 등을 파악할 수 있어, 해당 분석방법을 통해 접근성 변화의 원인을 세부적으로 확인할 수 있다.

특정 지점을 단위로 한 접근성 분석에서는 모든 지점에서 전반적인 접근성 향상이 일어났다는 것을 확인할 수 있었다. 특정 지점의 접근성 향상은 절대적인 접근성 변화분석과 상대적인 접근성 변화분석으로 나누어 수행하였는데, 절대적인 접근성 변화분석을 통해 기존의 접근성과 개편 이후의 접근성의 절대적인 수치를 확인할 수 있었다. 이는 상대적인 접근성 변화분석의 결과 해석에 도움을 줄 수 있었는데, 상대적으로 접근성 향상이 이루어지지 않은 제주시청 지역의 경우에는 기존의 접근성이 다른 지역보다 우수하여 대중교통 개편 정책의 영향을 상대적으로 덜 받은 것으로 추정할 수 있다. 이외는 반대로 서귀포시의 서남부지방(중문)도 대중교통 개편으로 상대적으로 접근성 향상이 이루어지지 못한 것으로 산출되었는데, 기존의 접근성이 다른 지역에 비해 열악한 편인 것에 비해 접근성 향상의 정도가 미미하므로 실질적으로 대중교통 개편의 효과를 받지 못한 것으로 판단된다. 또한 대중교통 네트워크의 지역별 연결성을 본 분석방법과 함께 고려하였을 때 상대적으로 접근성 향상이 크게 이루어진 동광·대천·서귀포환승센터 부근의 대중교통 네트워크 수의 증가가 크게 나타났고, 상대적으로 접근성의 변화가 적게 이루어진 제주공항 환승센터와 서귀포시의 서남부지방(중문)의 경우에는 대중교통 네트워크 수가 감소한 것으로 나타났다. 이는 지역별 접근성의 변화가 대중교통 네트워크 수의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다.

마지막으로 연구의 대중교통 권역 내 지역의 전반적인 접근성 분석의 결과는 모든 시점에 대하여 대중교통 개편 정책으로 인한 접근성의 향상이 일어났다는 점과 제주도 전체경로의 통행시간 평균이 16분 감소하여 전반적으로 대중교통 접근성이 11% 향상되었다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 본 연구를 통해, 전체 지역의 전반적인 접근성이 향상된 것과는 반대로 일부 경로들의 접근성이 오히려 감소한 사례나, 기존에 대중교통 접근성이 취약한 지역임에도 다른 지역에 비해 상대적으로 접근성의 향상이 부족한 지역 등 제주도 대중교통 개편 정책의 사각지대가 확인되었다. 이는 전반적인 접근성의 변화부터, 국소 지역, 개별경로 등의 세부적인 단위에서 단계적으로 접근성 분석이 이루어져야 함을 시사한다. 또한 이러한 대중교통 개편의 사각지대에 놓인 지역들의 접근성 향상을 위한 추가적인 지원 방향을 검토해야 할 필요가 있음을 시사한다. 이와 함께 각 경로의 개별적인 통행시간 분석 결과, 출발시간에 따라 개편 전후 개별경로의 접근성 증감 양상이 경로마다 다르게 나타나거나, 출발시간에 따라 개별경로의 접근성 수준이 달라지기 때문에 더욱 정확한 접근성 분석을 위해서 출발시간에 따라 변화하는 접근성을 고려한 분석이 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구의 한계로는 통행시간 산출에 사용되는 GTFS 데이터의 구성이 실제적인 운행 기록을 바탕으로 한 것이 아니라, 일률적으로 계획된 버스운행시간표를 바탕으로 한다는 점이다. 대부분의 제주도 버스운행시간표는 특정 시간대와 관련 없이 한 정류장에서 다음 정류장으로 이동하는 시간이 동일하다. 이는 통근 시간대 및 특정 시간대의 교통체증 등의 교통 환경이 접근성 분석에 반영되지 않아 실제 대중교통 접근성과 차이가 발생할 수 있다. 또한 대중교통은 시민 다수가 공용으로 이용하는 운송 수단으로서 특정 시간대 대중교통 이용자의 집중 현상으로 인해 실질적인 대중교통 이용 편의나 접근성이 감소할 수 있다. 하지만 본 연구는 승객 수 정보를 포함하지 않아 이러한 사항을 접근성 분석에 고려할 수 없다.

또한 본 연구에서 통행속도를 산출할 때, 실제 이동 경로(보행 및 노선 경로)의 거리가 아닌 출발지와 목적지 사이의 최단거리를 사용하였다. 이는 본 연구에서 최단 통행시간을 산출하는 과정에서 사용된 ArcGIS GTFS 소프트웨어 내에서 대중교통 노선구간의 이동거리가 반영되지 않는 한계에서 비롯되었다. 따라서 본 연구에서 통행속도는 거리에 따른 통행시간의 변화를 보정하여 대중교통 네트워크를 통한 접근성 수준을 나타내는 역할로 사용되고 있다.

본 연구에서 제안하는 통행시간의 변동성을 고려한 접근성 분석방법은 대중교통 정책의 효과를 평가하고 그 결과를 시각화하여 전달하는 방법으로 활용성이 높을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 버스뿐 아니라 지하철 등 다양한 대중교통 수단을 포함하고, 실제 버스운행 시간 정보를 활용하며, 공간적 구분을 세분화하여 공간 단위별 효과를 비교할 수 있는 방향으로 연구를 발전시킬 필요가 있다.

인용문헌 References

- 김리영·양광식, 2013. “인구 유입과 유출을 결정하는 지역 특성 요인에 관한 연구”, 『한국지역개발학회지』, 25(3): 1-20.
Kim, L.Y. and Yang, K.S., 2013. “Empirical Analysis of Regional Characteristic Factors Determining Net Inflow and Outflow of Population”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 25(3): 1-20.
- 김아연·전병운, 2012. “대구시 대중교통서비스의 접근성에 대한 환경적 형평성 분석”, 『한국지리정보학회지』, 15(1): 76-86.
Kim, A.Y. and Jun, B.U., 2012. “Environmental Equity Analysis of the Accessibility to Public Transportation Services in Daegu City”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(1): 76-86. [<https://doi.org/10.11108/kagis.2012.15.1.076>]
- 문현구·오규협·김상국·정재운, 2016. “스마트카드 빅데이터를 이용한 서울시 지역별 대중교통 이동 편의성 분석”, 『대한산업공학』, 42(4): 296-303.

- Moon, H.K., Oh, K.H., Kim, S.K., and Jung, J.Y., 2016. "Analysis of Regional Transit Convenience in Seoul Public Transportation Networks Using Smart Card Big Data", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 42(4): 296-303.
4. 박지영, 2008. "버스이용의 접근성 차이에 따른 교통취약지 분석: 서울시 강동구 버스이용자를 대상으로", 경희대학교 대학원 석사학위논문.
- Park, J.Y., 2008. "The Analysis of Transportation Vulnerable Area According to Difference Accessibility for Bus Utilization", M.S. Thesis, Kyung Hee University.
5. 성현곤, 2012. "주거입지선택에서의 대중교통 접근성과 직주균형의 구조적 관계가 가구수준의 통행행태에 미치는 영향", 「국토계획」, 47(4): 265-282.
- Sung, H.G., 2012. "Impacts of the Structural Relationship for Transit Accessibility and Jobs-housing Balance in Residential Location Choice on Travel Behavior at the Household Level", *Journal of Korea Planning Association*, 47(4): 265-282.
6. 이원도·나유경·박시현·이백진·조창현, 2012. "수도권 가구통행 조사를 바탕으로 한 교통 형평성분석", 「한국도시지리학회지」, 15(1): 75-86.
- Lee, W.D., Na, Y.G., Park, S.H., Lee, B.J., and Joh, C.H., 2012. "Transportation Equity Analysis Based on the Metropolitan Household Survey", *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, 15(1): 75-86.
7. Anderson, P., Owen, A., and Levinson, D., 2013. "The Time Between: Continuously Defined Accessibility Functions for Schedule-Based Transportation Systems", Paper presented at the Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington D.C.
8. El-Geneidy, A., Levinson, D., Diab, E., Boisjoly, G., Verbich, D., and Loong, C., 2016. "The Cost of Equity: Assessing Transit Accessibility and Social Disparity Using Total Travel Cost", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91: 302-316.
9. Farber, S. and Fu, L., 2017. "Dynamic Public Transit Accessibility Using Travel Time Cubes: Comparing the Effects of Infrastructure (Dis)investments over Time", *Computers, Environment and Urban Systems*, 62: 30-40.
10. Farber, S., Melinda, Z.M., and Michael, J.W., 2014. "Temporal Variability in Transit-based Accessibility to Supermarkets", *Applied Geography*, 53: 149-159.
11. Fayyaz, S.K., Xiaoyue, C.L., and Richard J.P., 2017. "Dynamic Transit Accessibility and Transit Gap Causality Analysis", *Journal of Transport Geography*, 59: 27-39.
12. Lei, T.L. and Richard, L.C., 2010. "Mapping Transit-based Access: Integrating GIS, Routes and Schedules", *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2): 283-304.
13. Owen, A. and David M.L., 2015. "Modeling the Commute Mode Share of Transit Using Continuous Accessibility to Jobs", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 74: 110-122.
14. Salonen, M. and Toivonen, T., 2013. "Modelling Travel Time in Urban Networks: Comparable Measures for Private Car and Public Transport", *Journal of Transport Geography*, 31: 143-153.
15. Tribby, C.P. and Paul A.Z., 2012. "High-resolution Spatio-temporal Modeling of Public Transit Accessibility", *Applied Geography*, 34: 345-355.
16. Widener, M.J., 2017. "Comparing Measures of Accessibility to Urban Supermarkets for Transit and Auto Users", *The Professional Geographer*, 69(3): 362-371.

Date Received 2019-04-05
 Reviewed(1st) 2019-05-30
 Date Revised 2019-08-13
 Reviewed(2nd) 2019-08-14
 Date Accepted 2019-08-14
 Final Received 2019-10-10