

## 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성

### Public Transport Accessibility based on Relative Time-distance

이민혁\* · 전인우\*\* · 전철민\*\*\*

Lee, Min Hyuck · Jeon, In Woo · Jun, Chul Min

#### 요 旨

본 연구에서는 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성 지표를 제안한다. 특정 경로의 상대적 시간거리란, 동일한 거리 급간에 속한 모든 경로의 평균 이동시간 대비, 해당 경로의 이동시간이 갖는 편차를 의미한다. 임의의 한 지역의 대중교통 접근성은, 해당 지역을 기점으로 하는 모든 경로의 상대적 시간거리를 합산하여 산출된다. 본 연구에서는 서울시 대중교통체계에 대한 시간거리 접근성을 분석하며, 이를 위해 버스, 지하철, 환승 등을 포함한 약 1억 2천 건의 all-to-all 대중교통 최소 이동시간 경로를 분석하였다. 본 연구에서 제안하는 지표는 절대적인 이동시간 대신 노선의 이동성을 고려하기 때문에, 도시 중심부는 기존 연구사례와 유사한 경향을 보였지만, 일부 외곽지역에서도 높은 접근성이 나타나는 연구결과를 보였다.

핵심용어 : 대중교통, 시간거리, 접근성, all-to-all 경로 탐색

#### Abstract

In this study, we propose a public transport accessibility index based on relative time-distance. The relative time-distance of a specific path means the deviation of travel time of that path for the average travel time of all paths belonging to the same distance class. The accessibility of one area is calculated by summing the relative time-distances of all the paths departing from that area. We computed approximately 120 million all-to-all paths including bus, urban railway, and transfer to analyze the time-distance accessibility of public transport in Seoul city. Since the index based on relative time-distance considers the mobility instead of absolute travel time, the results of the city center were similar to previous studies, but also showed high accessibility in some outskirt areas.

Keywords : Public Transport, Time-distance, Accessibility, All-to-all Path

## 1. 서 론

시간거리는 두 지점 사이의 거리를 이동시간으로 측정한 것이며, 시간거리 접근성은 주어진 교통망을 통해 주변의 다른 지역으로 도달하기 쉬운 정도를 시간거리로 측정한 지표를 말한다(Park and Lee, 2017). 거리가 동일한 origin-destination( $o, d$ )라도, 교통체증 및 대중교통 운행시간표에 따라 시간거리는 다르게 나타날 수 있다. 시간거리는 시민의 이동행태에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 시간거리 접근성은 도시의 통행패턴 및 토지이용을 이해하는데 결정적인 지표로 인식되고 있다(Kim and Lee, 2006). 또한 시간거리는 대중교통 이용객의 수단 및 경로 선택에 핵심적으로 고려되는 변수이기에, 대중교통 시간거리 접근성의 공간적 분포를 통

해 서비스의 지역 불균형을 살펴볼 수 있다(Yang et al., 2018).

다만, 기존 접근성 지표는 대중교통 노선의 이동성을 반영하는데 한계가 있다. 기존 지표에서는 다른 지역의 이동시간이 짧을수록 높은 접근성이 산출된다. 다른 지역으로의 통행거리가 긴 지역은 이동시간도 그만큼 증가하기 때문에 낮은 접근성을 보이게 된다. 10km를 이동하는데 20분이 소요되는 A노선과 20km를 이동하는데 30분이 소요되는 B노선이 있다고 가정했을 때, B노선은 A노선보다 이동성이 더 높다고 할 수 있다. 하지만 기존 지표는 이동시간의 절대적인 값을 반영하기 때문에, A노선이 제공되는 지역이 B노선이 제공되는 지역보다 높은 접근성을 가지게 된다. 즉, 긴 통행거리로 인해 발생하는 이동시간의 증가가 접근성에

Received: 2019.08.06, revised: 2019.08.30, accepted: 2019.09.17

\* 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(Ph. D. Student, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, lmhl123@uos.ac.kr)

\*\* 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(Master's Student, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, yugo123@uos.ac.kr)

\*\*\* 교신저자 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(Corresponding Author, Professor, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, cmjun@uos.ac.kr)

그대로 반영되기 때문에, 이동성이 좋은 대중교통 노선을 보유한 지역이라도, 주변 지역으로의 통행거리가 길다면 접근성이 낮게 분석되는 것이다.

이에 본 연구에서는 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성 지표를 제안한다. 상대적 시간거리 기반 접근성은 거리 대비 이동시간을 바탕으로 산출된다. 특정 지역에서 주변 지역으로 이동함에 있어, 거리 대비 이동시간이 빠른 노선들이 제공되고 있다면, 해당 지역은 높은 접근성을 갖게 된다. 본 연구에서는 거리 대비 이동시간, 즉 상대적 시간거리를 연산하기 위해 약 1억 2천 건의 대중교통 경로에 대한 최소 이동시간을 분석하였다. 기존 지표와의 비교를 위해 본 연구에서는 제시한 지표를 서울시 대중교통체계에 적용하여 정류장 단위 접근성을 분석하였다.

## 2. 관련 연구 분석

Lee et al.(2014)는 시간거리 접근성을 Eq. (1)과 같이 정의하였다.  $A_i$ 는 임의의 지역  $i$ 의 접근성,  $T_{ij}$ 는 지역  $i$ 에서 지역  $j$ 로의 시간거리,  $n$ 은 전체 지역 수,  $B$ 는 정규화를 위한 상수이다. 접근성은 시간거리의 역수를 모든 지역에 대하여 계산하고, 이를 합산한 것이다. 따라서 다른 지역으로의 이동시간이 짧을수록 높은 접근성을 갖게 된다. Park and Lee(2015)는 본 지표를 이용하여 서울시 버스 교통망의 접근성을 분석하였다.

$$A_i = B \sum_{j(i \neq j)}^n T_{ij}^{-1} \quad (1)$$

일반적으로 지역  $i$ 에서 지역  $j$ 로의 대중교통 시간거리  $T_{ij}$ 는 Eq. (2)와 같이, 총 차내시간  $T_{ij}^{In}$ , 총 도보이동시간  $T_{ij}^{Walk}$ , 총 대기시간  $T_{ij}^{Wait}$ , 총 환승저항  $T_{ij}^P$ 의 합으로 구성된다(Choi et al., 2016). 환승저항은 환승으로 인한 심리적 부담을 시간으로 환산한 값이다(Yang and Lee, 2018). 따라서 총 환승저항은 환승횟수에 심리적 부담에 대한 시간 환산 값을 곱하여 계산한다.

$$T_{ij} = T_{ij}^{In} + T_{ij}^{Walk} + T_{ij}^{Wait} + T_{ij}^P \quad (2)$$

도보이동시간, 대기시간, 차내시간 등에 가중치를 적용하여 시간거리를 연산하기도 한다(Jenelius, 2017). 일반적으로 설문조사를 통해 차내시간, 도보이동시간, 대기시간의 trade-off 관계를 분석하여 각각의 가중치

가 결정된다. 차내시간에 대한 가중치는 차내 혼잡도를 고려한 시간승수가 적용된 바 있다(Wardman and Whelan, 2011). 높은 차내 혼잡도는 체감이동시간을 증가시키는 요인이기 때문이다.

Fransen et al.(2015)과 Fayyaz et al.(2017)은 운행 시간표가 반영된 general transit feed specification (GTFS) 데이터를 이용하여 시간대에 따라 유동적으로 나타나는 대중교통 이동시간의 특징을 접근성에 반영하였고, 해당 지표를 이용하여 교통존별 대중교통 공급 수준을 설명하였다.

서론에서 언급하였듯이 Eq. (1)과 같은 기존 시간거리 접근성 지표는 이동시간의 역수를 합산하는 형태이기 때문에, 이동성이 높은 대중교통 노선을 보유한 지역이라도 통행거리가 길어 절대적인 이동시간이 많이 소요되면 낮은 대중교통 접근성을 보이는 지역으로 분석된다. 본 연구에서는 노선의 이동성을 고려한 접근성 분석을 위해, 거리 대비 이동시간을 이용한 상대적 시간거리 기반 접근성 지표를 제안한다.

## 3. 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성

상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성은 대중교통 네트워크를 통해 주변 지역으로 도달하기 용이한 정도를 시간거리를 이용하여 측정된 지표이며, 수식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.  $A_i^*$ 는 임의의 지역  $i$ 의 접근성,  $T_{ij}^*$ 는 지역  $i$ 에서 지역  $j$ 로의 상대적 시간거리,  $n$ 은 전체 지역 수이다.

$$A_i^* = - \sum_{j(i \neq j)}^n T_{ij}^* \quad (3)$$

상대적 시간거리  $T_{ij}^*$ 는  $(i,j)$ 와 동일 거리 급간에 속한 모든  $(o,d)$  쌍들의 평균 시간거리  $\bar{T}_{X^k}$ 에 대한  $T_{ij}$ 의 편차를 의미한다(Eq. (4)).  $T_{ij}$ 는 Eq. (2)에서 정의된 바와 동일하며,  $(i,j)$ 에 대한 대중교통 최소 이동시간을 나타낸다.  $(o,d)$  집합  $X^k$ 는 km 단위의 거리 함수( $\ell$ ) 값을 반올림하여 산출한 정수 거리 급간  $k$ 로 구분한다(Eq. (5)). 거리 함수  $\ell$ 은 도로 네트워크를 바탕으로 최단경로의 길이를 연산한다. 함수  $\lfloor x \rfloor$ 는  $x$ 와 같거나  $x$ 보다 크지 않은 최대 정수를 반환한다.

$$T_{ij}^* = T_{ij} - \bar{T}_{X^k}, (i,j) \in X^k \quad (4)$$

$$X^k = \{(o,d) \mid \lfloor \ell(o,d) + 0.5 \rfloor = k\}, k \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

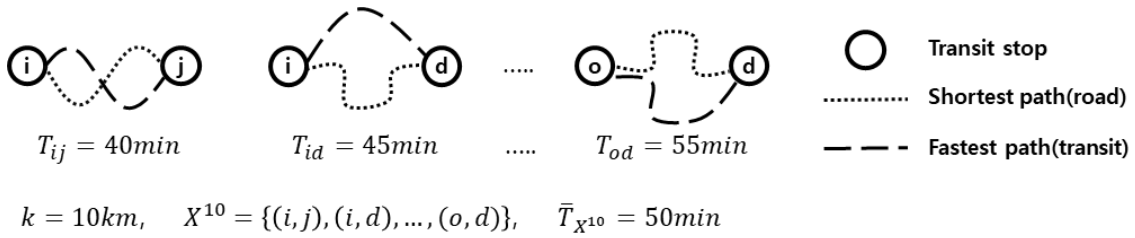


Figure 1. An example of computing relative time-distance

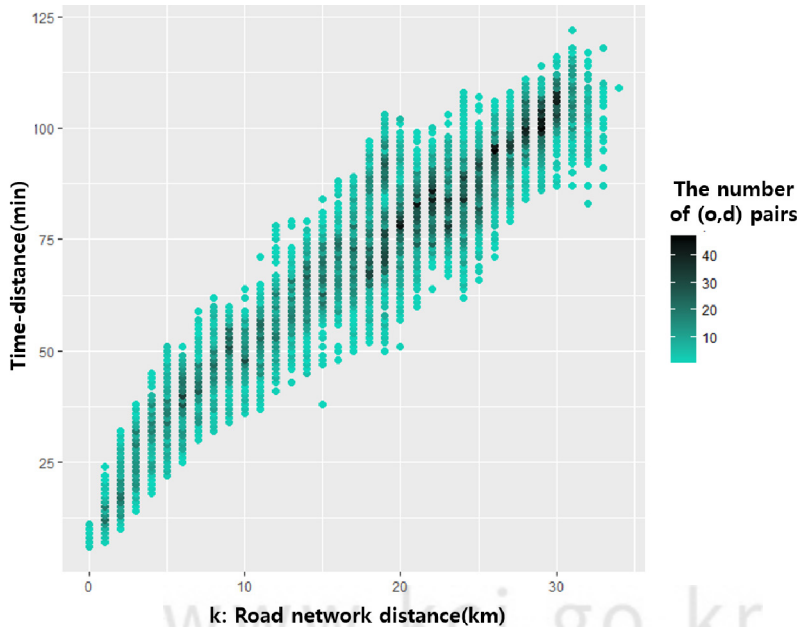
Fig. 1은 상대적 시간거리  $T_{ij}^*$ 를 연산하는 예시를 설명하기 위한 그림이다.  $(i,j)$ 의 최단거리가 10km 급간에 속한다고 할 때,  $(i,j)$ 를 포함하여 10km 급간에 해당하는 다른 모든  $(o,d)$  쌍들이 집합  $X^{10}$ 을 구성한다. 집합  $X^{10}$ 에 속한  $(o,d)$ 들의 평균 대중교통 시간거리 ( $\bar{T}_{X^{10}}$ )가 50분이라면,  $T_{ij}$ 는 40분이기 때문에 상대적 시간거리  $T_{ij}^*$ 는 -10분이 산출된다.

즉, 상대적 시간거리가 음수면 거리 대비 이동시간이 빠른 노선이 제공되고 있음을 의미하고, 양수로 커질수록 이동시간이 느린 노선이 제공되고 있음을 나타낸다. 지역  $i$ 의 상대적 시간거리 기반 접근성  $A_i^*$ 을 산출함에 있어 음의 부호가 붙은 이유는, 상대적 시간거리가 0보다 작을수록 높은 수준의 이동성을 의미하기 때문에 부호를 바꾸어 해석의 용이성을 높이기 위함이다.

#### 4. 접근성 분석 결과

본 연구에서는 도시철도 역과 버스 정류장을 포함한 약 11,000개의 서울시 대중교통 정류장에 대하여 상대적 시간거리 기반 접근성을 분석하였다. 정류장 개수로 인해, 약 1억 2천 건의 정류장-to-정류장 단위  $(o,d)$  경로에 대해 대중교통 시간거리와 도로 네트워크 기준 최단거리를 연산하였다. 대중교통 시간거리 연산은 오전 8시를 기준으로 하였고, 운행시간표 기반 최적경로 탐색 알고리즘인 RAPTOR를 사용하였다(Delling et al., 2014). 환승저항은 선행연구 결과를 토대로 8분을 적용하였다(Yang and Lee, 2018). 도로 네트워크 기준 최단거리는 다익스트라 알고리즘을 이용하여 연산하였다.

Fig. 2는 1km 간격 거리 급간에 따라, 약 1억 2천 건의  $(o,d)$  경로에 대한 시간거리 분포를 나타낸 것이다. y축은 시간거리, x축은 거리 급간, 포인트의 색상은  $(o,$

Figure 2. The time-distance distribution according to the distance class  $k$

d) 쌍의 개수를 나타낸다. 색상이 검은색으로 진할수록 많은 수의  $(o,d)$  쌍이 분포함을 의미한다. 따라서 해당 그래프를 통해 각 급간 별 평균 시간거리 추세를 추론할 수 있다. 20km 급간을 보면, 많은  $(o,d)$  쌍이 시간

거리 약 80분 부분에 집중되어 있다. 80분보다 시간거리가 짧은  $(o,d)$  쌍들은 상대적 시간거리가 음수, 즉, 거리 대비 이동시간이 빠른 노선이 제공되고 있음을 의미한다. 앞서 언급하였듯이, 임의의 정류장  $i$ 의 상대적

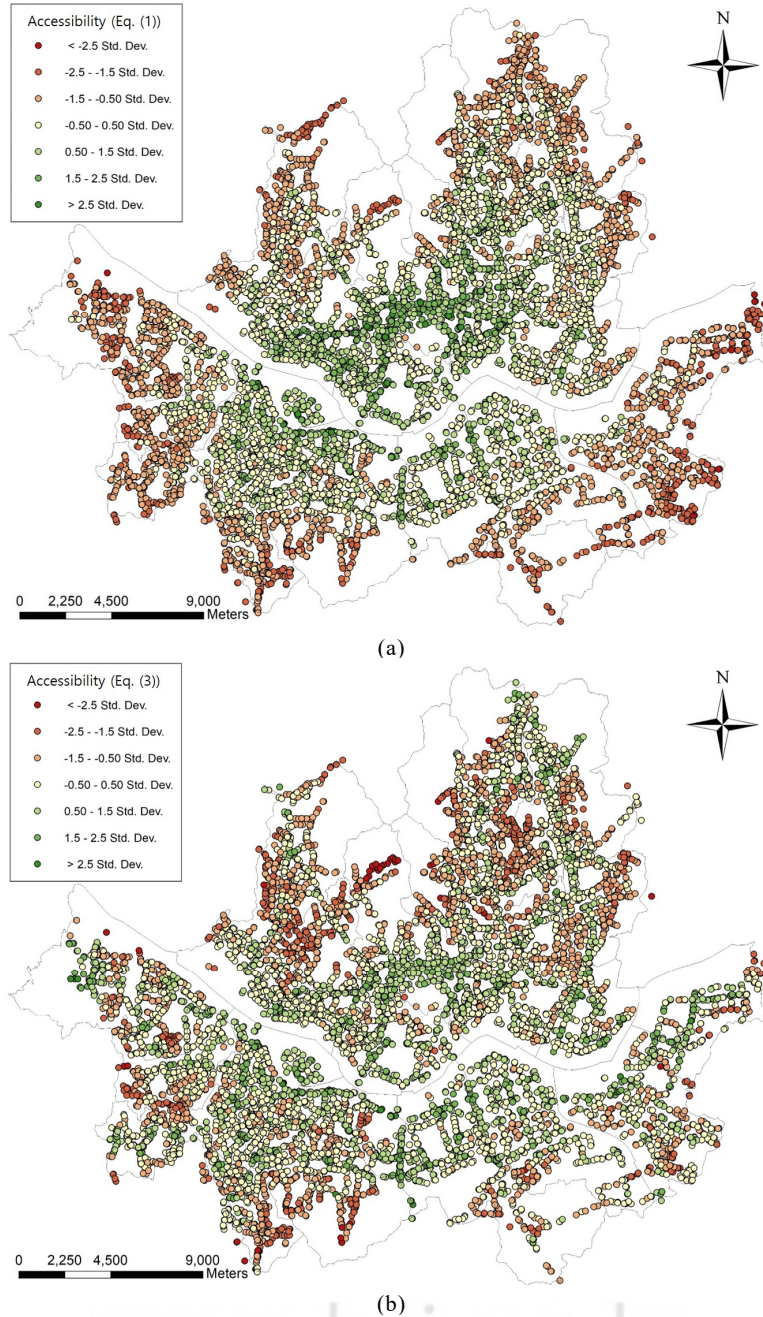


Figure 3. The time-distance accessibility of public transport: (a) Accessibility according to Eq. (1), (b) Accessibility according to Eq. (3)

시간거리 접근성은  $i$ 를 기점으로 한 모든 경로에 대한 상대적 시간거리를 합산하고, 음의 부호를 곱하여 산출된다.

Fig. 3은 기존 접근성 지표(Eq. (1))에 따른 분석 결과와 본 연구에서 제안하는 접근성 지표(Eq. (3))에 따른 분석 결과를 비교한 것이다. 기존 결과와 본 연구 결과 모두 0~1 사이의 값으로 정규화하였고, 두 지표 간의 절대적인 비교는 불가능하기 때문에 표준편차를 이용하여 정규장 단위로 시각화하였다. Fig. 3(a)는 기존 접근성, Fig. 3(b)는 상대적 시간거리 기반 접근성 분석 결과이다. Fig. 3(a)에서는 도시 중심부에서 높은 접근성이 나타나고, 외곽 지역은 낮은 접근성을 가지는 것으로 분석된다. 본 연구에서는 도심 지역은 이전 결과와 유사하지만, 일부 외곽 지역에서도 높은 접근성이 분석되었다.

Table 1은 정규장 단위 접근성을 행정동 단위로 집계하여 평균 접근성을 산출하고, 이를 토대로 상/하위 접근성 지역을 추린 것이다. 기존 지표에 따른 상위 지역은 중구에 집중되어 있고, 하위 지역은 강동, 송파구에 속한 서울시의 경계 부분에 집중되어 있다. 본 연구에서 제안하는 상대적 지표에 따른 상위 지역은 중구에

서는 2곳(광희동, 소공동)만 나타났고, 사당 일대, 잠실, 서울 경계에 해당하는 공향동 등이 포함되었다. 하위 지역으로는 기존 결과와 동일하게 시흥2동이 포함되었으며, 평창동, 응암동 일대, 노원구와 도봉구의 경계 지역 등이 나타났다.

Fig. 4는 inverse distance weighting (IDW) 보간법을 이용하여, 정류장 단위 상대적 시간거리 접근성을 서울시의 공간 범위에 대하여 래스터화하고, 도시철도 역 데이터를 중첩한 것이다. 도시철도 역 중심으로 높은 접근성이 형성된 것을 확인할 수 있다. 기존 지표는 도시철도 역이 존재하는 지역이라도, 해당 지역이 도시 외곽에 위치한다면, 절대적인 이동시간이 증가하기 때문에 대중교통 접근성이 낮게 분석된다. 하지만 본 연구에서 제시하는 지표는 각 거리 급간 별 이동시간의 편차를 합산하여 접근성을 도출한다. 이로 인해 외곽 지역이라도 이동성이 높은 도시철도 역 및 대중교통 노선이 존재한다면, 높은 접근성을 보이게 된다.

Fig. 5는 기존 지표와 본 연구에서 제안하는 상대적 시간거리 기반 접근성 지표의 정규장 단위 분석 결과를 산점도로 표현한 것이다. y축이 기존 지표, x축이 본 연구에서 제안하는 상대적 접근성 지표이다. 두 지표의

Table 1. Accessibility of top and bottom-rank areas

	Accessibility according to Eq. (1)		Accessibility according to Eq. (3)	
	Area	Value	Area	Value
Top rank	Gwanghui	0.748	Namhyeon	0.753
	Sogong	0.734	Jamsil 6	0.736
	Changsin 2	0.734	Neung	0.730
	Pil	0.727	Gwanghui	0.729
	Donghwa	0.721	Sadang 1	0.725
	Haengdang 1	0.721	Gonghang	0.712
	Hoehyeon	0.717	Bangbae 1	0.708
	Euljiro	0.712	Sogong	0.702
	Cheonggu	0.708	Jamsil 2	0.701
	Ahyeon	0.697	Sadang 4	0.701
	Average	0.722	Average	0.720
	Area	Value	Area	Value
Bottom rank	Gangil	0.177	Pyeongchang	0.339
	Macheon 1	0.188	Siheung 2	0.365
	Macheon 2	0.198	Chang 3	0.392
	Sangil	0.200	Gocheok 2	0.402
	Siheung 2	0.203	Namgajwa 2	0.403
	Jangji	0.208	Hwagok 4	0.404
	Banghwa 3	0.225	Wolgye 2	0.415
	Geoyeo 2	0.230	Hongeun 2	0.415
	Munjeong 1	0.235	Siheung 5	0.418
	Banghwa 1	0.248	Eungam 2	0.420
	Average	0.211	Average	0.397



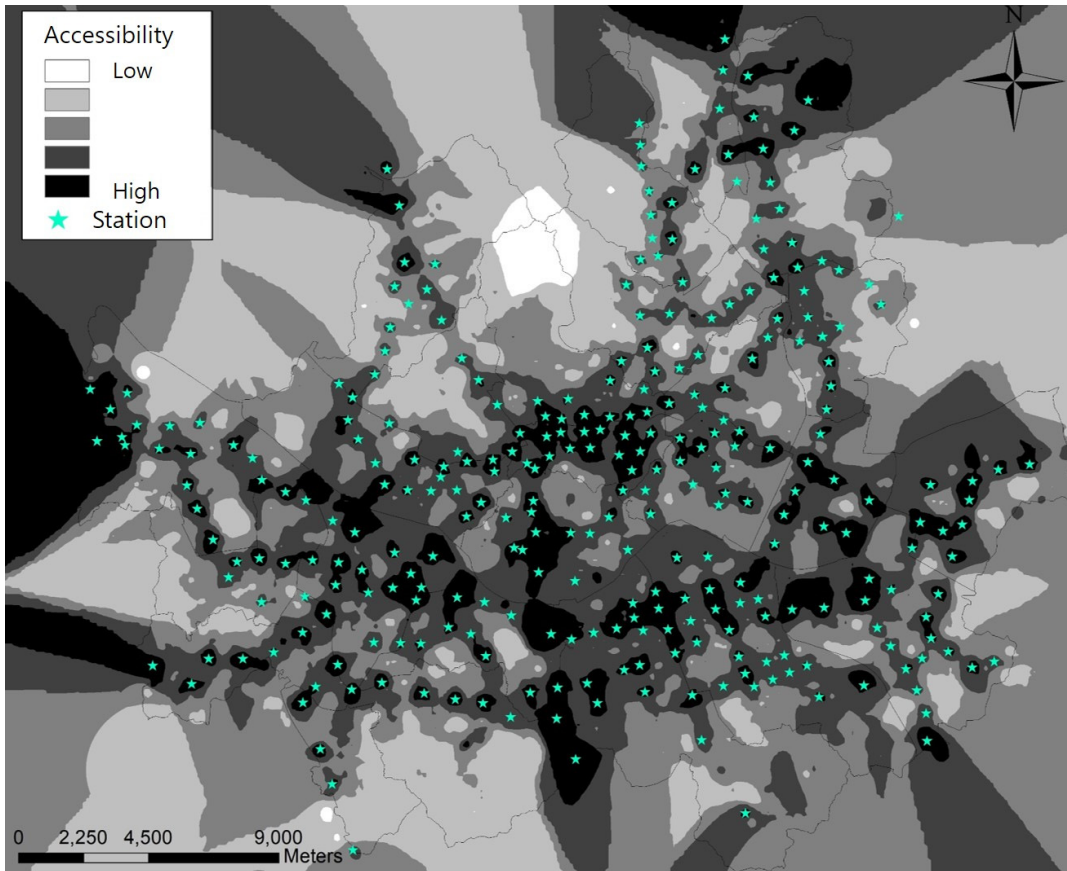


Figure 4. The IDW based on relative accessibility by transit stop unit

피어슨 상관계수는 0.7로 매우 높은 양의 상관관계를 보였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성은 기존 지표의 트렌드를 충분히 반영하면서, 도시 외곽 지역에서 절대적 이동시간 증가로 인해 나타나는 접근성 감소를 보완하는 지표라 할 수 있다.

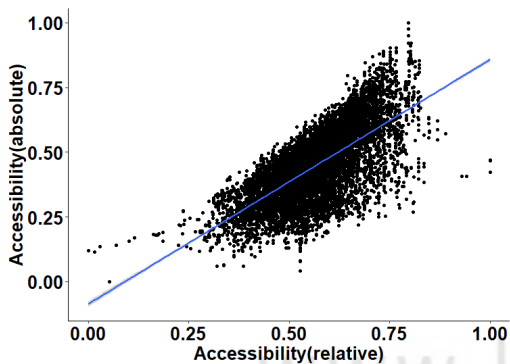


Figure 5. Scatter plot of two indicators

## 5. 결론

본 연구에서는 상대적 시간거리 기반 대중교통 접근성 지표를 제안하였다. 특정 경로의 상대적 시간거리란, 동일한 거리 급간에 속한 모든 경로의 평균 이동시간 대비, 해당 경로의 이동시간이 갖는 편차를 의미한다. 임의의 한 지역의 접근성은, 해당 지역을 기점으로 하는 모든 경로의 상대적 시간거리를 합산하여 산출된다. 본 연구에서는 이를 위해 서울시의 정류장 단위 O-D 경로 약 1억 2천 건을 분석하였다.

기존 지표는 절대적 이동시간이 접근성에 큰 영향을 미치기 때문에, 도시 외곽 지역은 이동성이 높은 대중교통 노선이 갖추어졌다 하더라도 접근성이 낮게 산출되는 경향이 있다. 본 연구 결과와 기존 지표에 따른 결과를 비교하였을 때, 큰 차이를 보이는 상위 10개 지역들은 방화동, 고덕동, 거여동, 공향동, 강일동, 명일동 등으로 모두 서울 외곽지역에 해당하며, 평균적으로 약 0.4 만크의 접근성 차이를 보였다. 두 지표를 0과 1 사

이로 정규화하여 비교한 것이기 때문에 0.4는 매우 큰 차이로 할 수 있고, 특히 공항동은 본 연구에서는 상위 접근성 지역으로 분석된 곳이다.

본 연구에서는 상대적 시간거리를 활용하여 분석 대상 지역의 지리적 위치가 접근성에 미치는 영향력을 감소시켜, 도시 외곽이라도 높은 이동성의 대중교통 서비스가 공급되고 있다면 높은 접근성이 산출될 수 있도록 하였다. 향후 연구에 스마트카드 데이터를 활용한 차내 혼잡도와 인구, 토지이용과 같은 GIS 데이터를 추가한다면, 보다 정책적으로 활용도 높은 결과가 도출될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2018년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

### References

1. Delling, D., Pajor, T. and Werneck, R. F., 2014, Round-based public transit routing, *Transportation Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 591-604.
2. Fayyaz, S. K., Liu, X. C. and Porter, R. J., 2017, Dynamic transit accessibility and transit gap causality analysis, *Journal of Transport Geography*, Vol. 59, pp. 27-39.
3. Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G. and Witlox, F., 2015, Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels, *Journal of Transport Geography*, Vol. 48, pp. 176-187.
4. Jenelius, E., 2018, Public transport experienced service reliability: Integrating travel time and travel conditions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 117, pp. 275-291.
5. Kim, S. Y. and Lee, K., 2006, Mapping time-distance cartogram and the accessibility analysis in Korea, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, Vol. 9, No. 2, pp. 149-166.
6. Lee, K., Park, J. S. and Jeong, M. S., 2014, Accessibility changes in the metropolitan Seoul subway system: Time-distance algorithms based on the T-card big data and an accessibility measurement model for un-fixed transportation networks, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, Vol. 17, No. 1, pp. 98-113.
7. Lee, M. H., Jeon, I. W. and Jun, C. M., 2017, Clustering public transit stops using an improved DBSCAN algorithm, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 97-106.
8. Park, J. S. and Lee, K., 2015, Time-distance accessibility computation of Seoul bus system based on the T-card transaction big databases, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, Vol. 18, No. 4, pp. 539-555.
9. Park, J. S. and Lee, K., 2017, Development of integrated accessibility measurement algorithm for the Seoul metropolitan public transportation system, *Journal of the Korean Regional Science Association*, Vol. 33, No. 1, pp. 29-41.
10. Wardman, M. and Whelan, G., 2011, Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from British experience, *Transport reviews*, Vol. 31, No. 3, pp. 379-398.
11. Yang, H. J., Nam, H. W. and Jun, C. M., 2018, Analysing potential improvement of public transit services in OD level using time-distance accessibility and smartcard traffic volume, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 21, No. 2, pp. 80-93.
12. Yang, S. J. and Lee, J.H., 2018, A study on route choice modeling in metropolitan urban rail network considering transfer penalty and angular cost, *Journal of Korean Society for Urban Railway*, Vol. 6, No. 1, pp. 59-70.
13. Yun, J. and Woo, M., 2015, Empirical study on spatial justice through the analysis of transportation accessibility of Seoul, *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 50, No. 4, pp. 69-85.

