

시간적 변동성을 고려한 이동시간 기반 대중교통 공급 지표†

Time-dependent public transport supply index considering temporal fluctuation

이민혁*, 남현우, 전철민
Minhyuck Lee, Hyunwoo Nam, Chulmin Jun
서울시립대학교 공간정보공학과
{lmhll123, hwnam, cmjun}@uos.ac.kr

요약

지역별 대중교통 서비스의 공급 수준을 평가하는 일은 균형적인 대중교통체계 구현을 위해 매우 중요하다. 이로 인해 대중교통 서비스의 공간적 범위 및 용량을 고려한 공급 지표가 개발되었고 최근에는 이동시간 기반의 공급 지표가 연구되고 있다. 하지만 이동시간 기반의 공급 지표를 제시한 대부분의 연구에서는 이동시간의 시간적 변동성은 고려하고 있지 않다. 대중교통 이동시간은 배차간격을 포함한 노선별 운행계획으로 인해 시간적 변동성이 나타난다. 이에 본 연구에서는 시간적 변동성을 고려한 이동시간 기반 대중교통 공급 지표를 제안하고자 한다. 제안하는 공급 지표는 시간의 흐름에 따른 이동시간 및 대기시간의 변화를 반영한다. 본 연구에서는 제안한 공급 지표를 서울시에 적용하여 정류장 O-D 단위로 시간대별 one-to-all 공급 수준을 분석하였다.

1. 서론

도시 내 균형적인 대중교통체계 구현을 위해 대중교통 서비스수준의 공간적 불균형을 살펴보는 일은 매우 중요하다. 고밀 주거지역과 고용 중심지 위주의 대중교통 투자정책은 지역 간 대중교통 서비스 격차를 심화시킨다. 대중교통은 시민의 이동성을 보장하는 공공재적 성격을 가지기 때문에 지역별 서비스 형평성이 고려되어야 한다.

대중교통 서비스수준을 평가하는 지표 중 하나로는 공급 지표가 있다. 기존 연구들에서 공급 지표는 지역 내 대중교통 시설 수 및 그에 따른 서비스권역의 범위로 설명되기도 하고, 대중교통 수단의 운행횟수 및 용량을 고려하여 산출되기도 한다 [1, 2]. 일반적으로 공급 지표는 대중교통 수요, 인구, 취약계층의 비율 등과 함께 분석되며, 센서스 통계, 행정구역, 교통존 등의 공간단위가 이용된다.

최근에는 이동시간 기반의 공급 지표가 연구되고 있다. 이동시간 기반 공급 지표는 목적지에 따라 다양하게 나타나는 이동시간을 반영한 것으로, 접근성의 개념을 이용하여 공급 수준을 평가한다[3]. 이로 인해, 공급 수준의 지역별 비교뿐만 아니라 이동시간 origin-destination(O-D) 매트릭스 구축을 통한 O-D별 비교·분석이 가능하다.

하지만 이동시간 기반의 공급 지표를 제시한 대부분의 연구에서는 대중교통 이동시간의 시간적 변동성을 고려하고 있지 않다[4]. 관련 연구에서는 최소 이동시간을 O-D의 이동시간 대푯값으로 활용하고 있다. 대부분의 대중교통 이용객들이 목적지까지 가장 빠르게 도달하는 경로를 선택하기 때문이다. 하지만 대중교통 이동시간은 배차간격을 포함한 노선별 운행계획으로 인해 시간적 변동성이 나타난다. 따라서 최소 이동시간도 고정된 것이 아니

† 본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C133228-02)에 의해 수행되었습니다.

라 시점별로 다르게 나타날 수 있다.

이에 본 연구에서는 시간적 변동성을 고려한 이동시간 기반의 대중교통 공급 지표를 제안하고자 한다. 본 연구에서는 하루 전체 대중교통 운행계획에 대하여 일정 시간간격으로 최소 이동시간을 탐색하고, 이를 바탕으로 오전·오후 첨두시 및 비첨두시와 같은 특정 시간대의 공급 지표를 산출한다. 분석의 공간단위는 정류장 단위 O-D이며, 정류장 단위 최소 이동시간을 산출하기 위해 운행시간표 기반 알고리즘인 RAPTOR를 이용하였다.

2. 방법론

본 연구에서 제안하는 대중교통 공급 지표는 절대적 지표와 상대적 지표로 구분된다. 절대적 지표는 O-D의 이동시간이 온전히 반영된 형태로, 단순하면서 직관적인 해석이 가능하다. 상대적 지표는 O-D의 이동시간을 최단거리 값이 유사한 다른 O-D들과 비교하여, 이를 통해 산출되는 상대적 이동시간을 의미한다. 예를 들어, 이동시간이 30분인 특정 O-D가 있고, 유사 최단거리 값을 가지는 다른 O-D들의 평균 이동시간이 40분이라면, 특정 O-D의 상대적 공급 수준은 +10분, 즉 10분 이득을 보고 있다고 해석할 수 있다. 상대적 지표에서 O-D들 간의 이동시간 비교를 위해 활용하는 최단거리 값은 일반 도로 네트워크를 기준으로 계산한다.

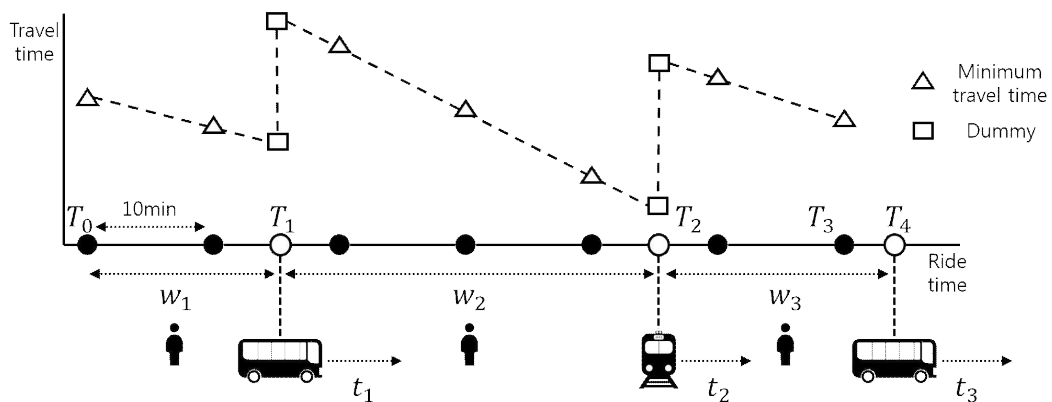
(그림 1)은 대중교통 이동시간의 시간적 변동성을 나타낸 것이다. T_0 부터 T_3 는 1시간의 간격을 의미하고 T_1 , T_2 , T_4 는 목

적지까지의 최소 이동시간 t_k 가 소요되는 대중교통 수단이 정류장에 도착한 시간을 나타낸다. w_k 는 T_0 를 기점으로 t_k 가 소요되는 대중교통을 이용하기 위한 대기시간이다. 본 연구에서는 O-D의 최소 이동시간을 10분 간격으로 반복 탐색한다. T_0 부터 T_1 까지 대기시간이 줄어드는 만큼 세로축의 이동시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 정류장에서 대중교통 수단이 떠난 시점에서는 이동시간이 수직으로 상승하고 다음에 오는 수단을 기다리기까지 이동시간이 꾸준히 감소한다. 10분 간격으로 탐색한 이동시간을 연결하면 앞선 상황을 설명할 수 없기 때문에 (그림 1)의 그래프에는 더미 포인트가 존재한다.

$$AS_{ijT} = \frac{1}{n} \sum_k^n \left(\frac{w_k}{2} + t_k \right) \quad (\text{식 1})$$

(그림 1)을 바탕으로 절대적 공급 지표를 수식으로 나타내면 (식 1)과 같다. AS_{ijT} 는 특정 시간대 T 에서의 정류장 i 에서 정류장 j 로의 절대적 공급 지표이다. n 은 T 시간대에 정류장 i 에 도착한 최소 이동시간 수단의 개수이다. 즉, T 시간대의 정류장 i 에서 정류장 j 로의 절대적 공급 지표는 대기시간과 최소 이동시간을 합한 총 이동시간의 평균을 의미한다. 따라서 절대적 공급 지표는 값이 클수록 이용객이 목적지까지 통행하는데 용이하지 않음을 나타낸다.

대기시간은 이용객이 정류장에 도착한



(그림 1) 대중교통 이동시간의 시간적 변동성

시점을 알 수 없기 때문에 중간 값을 이용하였다. 공급 지표에 대기시간을 고려하는 것은 대중교통 수단의 운행 빈도를 반영하는 효과를 준다. 대기시간이 길다는 것은 운행 빈도가 낮다는 뜻이고, 이는 절대적 공급 지표를 증가시키는 요인이 된다. 반대로 대기시간이 짧으면, 운행 빈도가 높음을 의미하고, 공급 지표가 낮게 산출되는 긍정적인 영향을 준다.

$$RS_{ijT} = f(AS_{ijT}) \quad (\text{식 2})$$

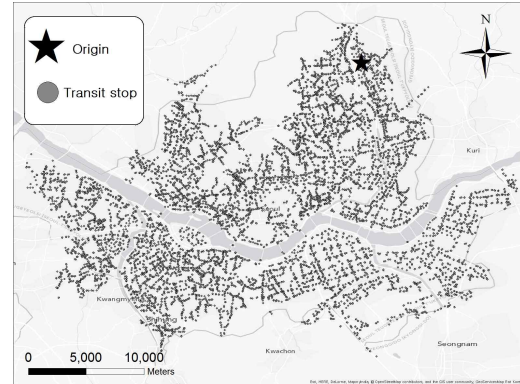
$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_K^N (X_K) - x \quad (\text{식 3})$$

(식 2)의 RS_{ijT} 는 상대적 공급 지표를 나타낸다. (식 3)의 $f(x)$ 는 절대적 지표를 상대적 지표로 변환하는 함수에 해당한다. 정류장 i 에서 j 까지의 도로 네트워크 최단거리와 유사한 최단거리 값을 가지는 O-D들의 AS_{ODT} 집합을 X 라 하고, 원소의 개수를 N 라 할 때, 변환 함수 $f(x)$ 는 X 의 평균에 대한 AS_{ijT} 의 편차를 의미한다. 즉, 특정 O-D의 상대적 공급 지표는 유사 최단거리 값을 가지는 O-D들의 평균 이동시간에 대한 상대적 이동시간을 의미한다. 따라서 상대적 공급 지표는 양의 방향으로 커질수록 공급 수준이 높음을 의미하고, 음의 방향으로 커질수록 공급 수준이 떨어짐을 나타낸다.

3. 적용 실험

본 연구에서는 제안한 대중교통 공급 지표를 서울시에 적용하여 정류장 단위 O-D 공급 수준을 살펴보았다. (그림 2)는 서울시에 분포한 대중교통 정류장을 나타낸 것으로 지하철과 버스를 포함하여 총 11,025개의 정류장이 존재한다. 적용 실험에서는 2017년 10월 19일의 대중교통 운행시간표를 이용하여 one-to-all 공급 지표 분석을 수행하였다. 출발 정류장은 고밀 주거지역에 해당하는 상계동 인근으로 설정하였다.

공급 지표는 오전 피크시간대(06시~09



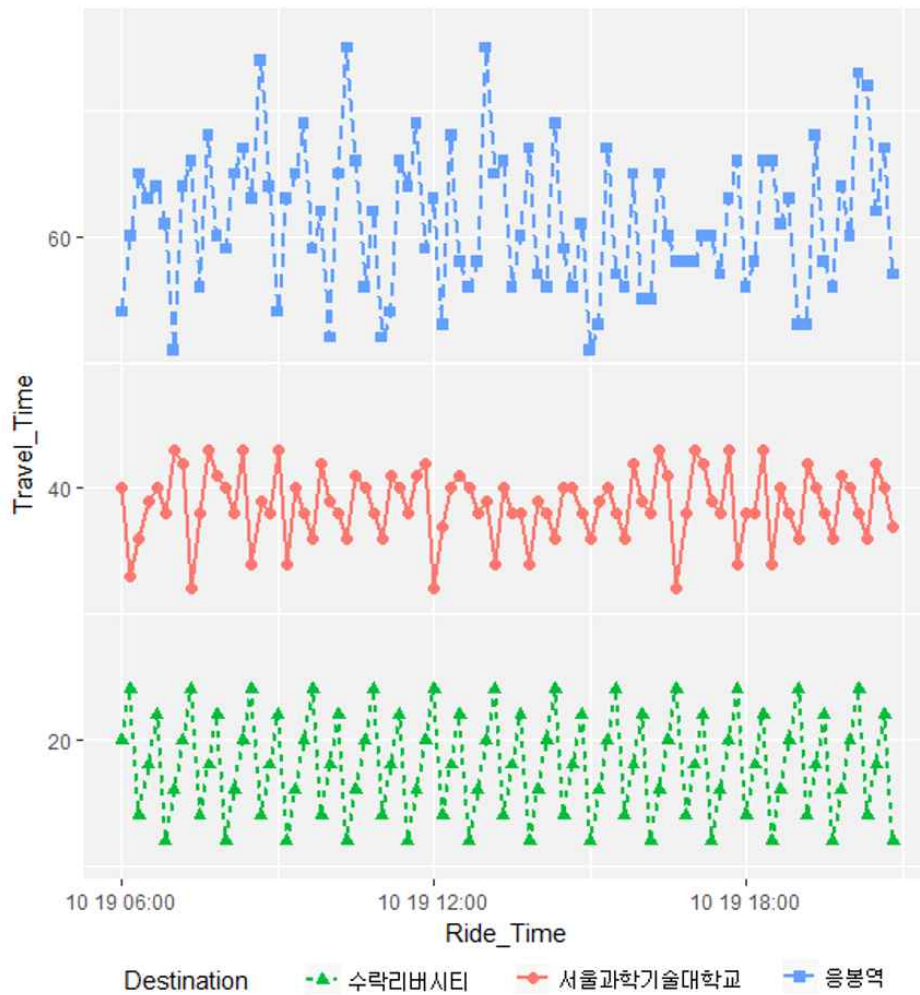
(그림 2) 연구 지역

시), 오후 시간대(12시~15시), 저녁 피크 시간대(18시~21시)로 구분하여 살펴보았다. 도로 네트워크 기반 최단거리 그룹은 100m 단위에서 반올림하여 1km 단위 그룹으로 구분하였다. 0km(500m 미만) 그룹부터 34km 그룹까지 35개의 그룹으로 구분되었고 가장 많은 O-D가 분포한 그룹은 19km 그룹으로 나타났다.

우선, 상계동 출발 정류장에서 도보로 이동 가능한 정류장들을 제외하고 11,000여개의 O-D에 대한 최소 이동시간의 시간적 변동성을 살펴보았다. 06시부터 21시까지 10분 간격으로 최소 이동시간을 탐색한 결과, O-D별 최소 이동시간의 표준편차는 평균적으로 약 4분이었다. 최소 이동시간의 최솟값과 최댓값의 차이는 평균 약 12분, 최솟값 약 1분, 최댓값 약 32분으로 나타났다. 상계동을 출발 지점으로 한 모든 O-D의 최소 이동시간 변동성은 일부 O-D를 제외하고는, 그 변화의 폭이 크지 않았다.

(그림 3)은 상계동에서 수락리버시티, 서울과학기술대학교, 응봉역으로의 최소 이동시간 변동성을 표현한 것이다. 수락리버시티로의 이동시간 변동성은 단순한 패턴이 지속적으로 반복되는 형태이며, 서울과학기술대학교로의 이동시간 변동성은 약 5시간 간격으로 동일한 패턴이 반복되고 있다. 응봉역으로의 이동시간 변동성은 직관적인 패턴을 찾아보기 힘들 정도로 매우 복잡한 결과를 보이고 있다.

상계동에서 수락리버시티로의 최소 이동시간은 1154번 버스를 이용하는 경우가



(그림 3) 일부 O-D에 대한 최소 이동시간 변동성

고 모든 시점에서 다른 대안 경로가 분석되지 않았다. 즉, 모든 시점에서 단일 경로만 이용하기 때문에 해당 노선의 배차 간격에 따라 단순한 패턴이 나타나게 된 것이다. 반면, 서울과학기술대학교 및 응

봉역으로 향하는 경로는 시점별로 다양한 최소 이동시간 경로들이 존재하였고 이로 인해 복잡한 패턴들이 나타나게 되었다.

(표 1)과 (표 2)는 O-D의 시간대별 절대적/상대적 공급 수준의 분포를 집계한

(표 1) 시간대별 절대적 공급 수준 분포

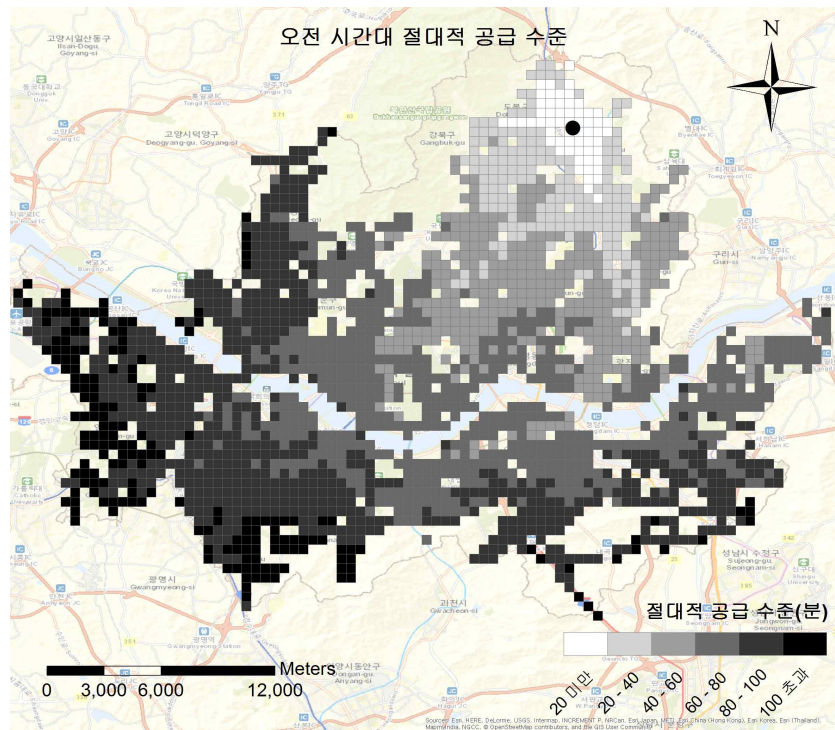
이동시간 (분)	오전 피크	오후	저녁 피크
20 미만	294	283	282
20~40	1,049	1,005	1,031
40~60	1,938	1,880	1,890
60~80	3,079	2,986	3,071
80~100	3,453	3,460	3,459
100 이상	1,206	1,405	1,286

(표 2) 시간대별 상대적 공급 수준 분포

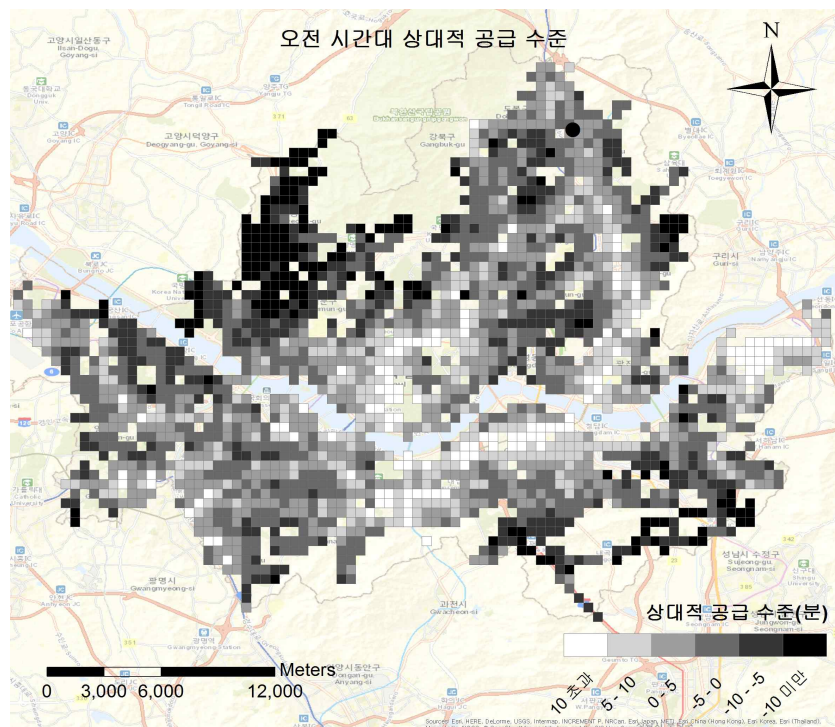
이동시간 (분)	오전 피크	오후	저녁 피크
-10 미만	826	921	879
-10~-5	1,648	1,644	1,662
-5~0	3,154	3,048	3,062
0~5	2,814	2,731	2,789
5~10	1,750	1,770	1,753
10 이상	827	905	874

것이다. 절대적 공급 수준에서는 피크타임이 아닌 오후 시간대에 이동시간이 100분 이상 소요되는 O-D가 증가하는 것으로 나타났다. 상대적 공급 수준에서도 10분 이상 손해 보는(-10 미만) O-D의 수가

피크타임 전후로 증가하는 것이 확인되었다. 다만, 앞서 언급하였듯이 대부분의 O-D의 시간적 변동이 크지 않기 때문에, 시간대별 공급 수준 또한 그 변화의 폭이 두드러지게 나타나진 않았다.



(그림 4) 오전 시간대 절대적 공급 수준



(그림 5) 오전 시간대 상대적 공급 수준

(그림 4)와 (그림 5)는 상계동을 출발 지점으로 하는 모든 O-D의 오전 시간대 공급 수준을 시각화 한 것이다. 정류장 단위의 시각화는 직관적인 해석이 매우 어렵기 때문에, 일반적으로 활용하는 대중교통 이용권역인 500m를 이용하여 격자 단위로 공급 수준을 나타내었다. 절대적 공급 수준으로는 대중교통을 이용하여 상계동에서 서울의 다른 모든 지역으로 이동하는데 소요되는 시간을 설명할 수 있다. 상대적 공급 수준에서는 상계동에서 서울 서북권으로의 O-D에 낮은 공급 수준이 유독 집중되어 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 시간적 변동성을 고려한 이동시간 기반의 대중교통 공급 지표를 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 공급 지표는 시간의 흐름에 따른 최소 이동시간 및 대기시간의 변화를 반영하고 있다. 이로 인해 대중교통 이용객이 체감하는 실제 이동시간과 매우 유사하게 공급 수준을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 제안한 공급 지표를 서울시에 적용하여 시간대별 one-to-all 공급 수준 분석을 수행하였다. 출발 지역은 주거시설이 밀집되어 있는 상계동으로 설정하였고, 절대적 이동시간 측면과 상대적 이동시간 측면으로 구분하여 O-D 간의 공급 수준을 분석하였다.

하루 전체에 대하여 이동시간의 변동성을 살펴본 결과, 일부 O-D를 제외하고는 대체로 이동시간의 편차가 크게 나타나지 않았다. 이로 인해 시간대별 공급 수준도 큰 변화를 보이지 않았지만, 피크타임 전후로 공급 수준이 증감하는 모습은 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 all-to-all로 O-D 매트릭스를 구축하고 공급뿐만 아니라 수요도 함께 고려한 서비스수준 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Currie, G. (2010). Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social ne

eds. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 31-41.

- [2] Jaramillo, C., Lizárraga, C., & Grindlay, A. L. (2012). Spatial disparity in transport social needs and public transport provision in Santiago de Cali (Colombia). *Journal of Transport Geography*, 24, 340-357.
- [3] Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G., & Witlox, F. (2015). Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography*, 48, 176-187.
- [4] Fayyaz, S. K., Liu, X. C., & Porter, R. J. (2017). Dynamic transit accessibility and transit gap causality analysis. *Journal of Transport Geography*, 59, 27-39.