

서울 대도시권 대중교통체계의 통합 시간거리 접근성 산출 알고리즘 개발*

박종수** · 이금숙***

Development of Integrated Accessibility Measurement Algorithm for the Seoul Metropolitan Public Transportation System*

Jong Soo Park**, Keumsook Lee***

국문요약 본 논문에서는 서울 대도시권의 대중교통체계를 구성하는 서울 시내버스 시스템과 수도권 지하철 시스템을 통합한 교통망의 각 노드인 버스정류장이나 지하철역의 시간거리 접근성을 계산하는 알고리즘을 제안하고 그 결과를 분석한다. 서울 대도시권 대중 교통망 그래프의 링크는 승객들이 노드들을 이동하는 데 소요되는 시간을 가중치로 설정하였다. 버스 노선과 지하철 노선의 노드들을 연결하는 링크들의 가중치는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 추출된 노선별 속도에 따라 인접한 노드들 사이의 이동시간으로 설정하고, 승객들이 도보로 이동할 수 있는 일정 거리 이내인 노드들 사이의 링크의 가중치는 승객의 도보 이동 시간으로 설정하였다. 최단 경로의 시간거리를 찾는 알고리즘의 입력으로 링크들의 가중치를 표현한 시간 거리 인접 행렬을 사용하고 그 출력으로 노드들의 최단 시간 거리 행렬을 구하여 각 노드의 접근도와 평균 이동시간을 계산하였다. 2013년도 데이터를 사용한 실험 결과에서 서울 대도시권 대중교통체계 통합 교통망의 노드들의 개수는 서울 시내 600개 버스 노선들에 연결되어 있는 버스정류장 15,702개와 수도권 지하철 16개 노선들에 연결된 지하철역 575개를 합하면 16,277개가 된다. 이 논문에서 서울 대도시권 통합 교통망과 이미 연구되었던 서울 시내버스 교통망 및 수도권 지하철 교통망을 평균 접근도와 평균 이동시간 관점에서 비교 분석하였다. 본 논문은 서울 대도시권 대중교통체계의 버스와 지하철 통합 교통망에서 각 노드의 접근도를 계산하는 첫 번째 연구 결과를 서술한다.

주제어 서울 대도시권 대중교통체계, 버스-지하철 통합 교통망, 시간거리 접근성, 빅 데이터, 교통카드 트랜잭션 데이터베이스, 최단경로 이동시간

Abstract : This study proposes an integrated accessibility measurement algorithm, which is applied to the Seoul Metropolitan public transportation system consisting of bus and subway networks, and analyzes the result. We construct a public transportation network graph linking bus-subway networks and take the time distance

* 이 논문은 2015년도 성신여자대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

** 성신여자대학교 IT학부 교수(주저자: jpark@sungshin.ac.kr)

*** 성신여자대학교 지리학과 교수(교신저자: kslee@sungshin.ac.kr)

as the link weight in the graph. We develop a time-distance algorithm to measure the time distance between each pair of transit stations based on the T-card transaction database. The average travel time between nodes has been computed via the shortest-path algorithm applied to the time-distance matrix, which is obtained from the average speed of each transit route in the T-card transaction database. Here the walking time between nodes is also taken into account if walking is involved. The integrated time-distance accessibility of each node in the Seoul Metropolitan public transportation system has been computed from the T-card data of 2013. We make a comparison between the results and those of the bus system and of the subway system, and analyze the spatial patterns. This study is the first attempt to measure the integrated time-distance accessibility for the Seoul Metropolitan public transportation system consisting of 16,277 nodes with 600 bus routes and 16 subway lines.

Key Words : Seoul Metropolitan public transportation system, bus-subway integrated network, time-distance accessibility, big data, T-card transaction database, shortest path travel time

1. 서론

많은 인구와 다양한 도시기능들이 밀집되어 있는 대도시는 도심 과밀화와 외연 확장으로 도시민의 통행빈도 및 통행거리가 크게 늘어나 통행수요가 막대하다. 이러한 대도시가 제대로 작동하기 위해서는 막대하게 발생하는 통행을 무리 없이 처리할 수 있는 효율성 높은 대중교통의 역할이 중요해지고 있다. 특히 급박하게 돌아가고 있는 세계경제에서 세계도시로서 경쟁력을 확보하기 위해서는 신속하며 효율적인 대중교통체계 구축이 필수적이라는 주장(Lakshmanan, *et al.*, 2015)과 함께, 이러한 대중교통체계의 접근성에 관심이 모아지고 있다.

한 도시의 통행흐름과 토지이용패턴 및 공간구조를 정확히 이해하고 효과적인 교통계획이나 도시계획을 수립하려면 도시의 교통망 구조와 이를 통해 연결되는 지점들의 접근성을 정확히 측정하는 작업이 선행되어야 한다(Hansen, 1959; Stanilov, 2003; Hanson and Giuiano, 2004; Kwan and Weber, 2008). 버스와 지하철이 통합 운영되고 있는 서울대도시권 대중교통체계는 인구 이천만 이상이 거주하며 주요 도시기능들이 집중되어 있는 서울대도시권에서 발생하는 통행수요의 2/3 이상을 담당하는 주요 통행수단이다. 그

리므로 서울대도시권의 특히 대중교통체계로 이동성을 바탕으로 하는 접근성이 중요하다. 특히 서울대도시권 대중교통체계의 시간거리 접근성은 도시민의 통근통행흐름과 통행태는 물론 주거지 선택과 통행목적지 선택 등에 지대한 영향을 미치고 있으므로 이를 정확히 측정하는 작업은 매우 중요하다.

정보통신기술의 발달과 함께 정보수집 및 처리 능력이 날로 증강되고 있어 과거에는 시도할 수 없었던 연구 주제와 영역에의 도전이 가능해지고 있다. 최근 공간연구의 핵심이 되는 접근성 연구에서도 빅데이터를 이용하여 좀 더 적절하고 일반화 할 수 있는 접근성의 개념과 측정방법 모색에 관심이 모아지고 있다(Regiani *et al.*, 2011). 본 연구에서는 스마트카드 도입으로 가능해진 대중교통이용자의 실제통행정보를 담은 빅데이터를 활용하여 인구 2천만 명 이상의 서울대도시권에서 전체 통행의 2/3 이상을 차지하는 대중교통체계로 제공되는 시간거리접근성을 산출하는 방법론을 제시하고자한다. 특히 컴퓨터 처리능력의 향상으로 가능해진 버스교통체계와 지하철 교통체계를 결합한 대형 교통망그래프의 결절점 접근도 산출 알고리즘을 제시한다.

서울 대도시권의 대중교통체계는 서울 시내버스와 수도권 지하철로 구성된다. 서울 시내버스 교통망과

수도권 지하철 교통망은 승객들이 한 지점에서 다른 지점으로 이동할 때 가장 빠른 방법이나 효과적인 방법으로 서울 시내버스나 지하철을 이용한다. 빠른 방법은 이동할 때의 목적함수가 이동 시간을 최소화하는 방법을 주로 사용하고, 효과적인 방법은 이동시의 목적함수가 환승 횟수를 최소화하거나 도보로 이동하는 시간을 최소화하는 방법 등을 적용하고 있다. 서울 수도권 지역은 2004년 7월부터 대중교통체계에 스마트카드 시스템이 도입되어 대중교통 이용자의 통행 기록을 담은 교통카드 트랜잭션 데이터베이스를 생성하고 있다. 한 승객의 교통카드 트랜잭션에는 대중교통을 이용할 때 승차와 하차에 관한 운송수단, 위치정보, 이동시간 등의 정보를 내포하고 있다.

본 논문에서는 서울 대도시권 대중교통체계의 접근성을 승객들이 한 노드(버스정류장이나 지하철역)에서 다른 노드들로 얼마나 빠르게 이동할 수 있는지를 나타내는 노드들의 시간거리를 개념으로 정의하고 합리적인 이것의 측정 방법을 소개한다. 서울대도시권의 대중교통체계를 구성하고 있는 시내버스체계(600개의 버스노선 상에 34,934대의 버스정류장이 있음)와 지하철체계(16개의 노선 상에 575개의 지하철역이 있음)를 통합한 대규모 통합교통망 그래프를 구성하고, 교통카드 트랜잭션데이터베이스를 활용하여 지점간 이동에 소요되는 실제 시간거리를 산출하여 각 버스정류장과 지하철역의 시간거리 접근도를 산출하는 방법론을 제시한다. 특히 이제까지 시도되지 못했던 서울대도시권 대중교통체계를 구성하고 있는 서울 버스체계와 지하철체계를 통합한 통합교통망 그래프 개념을 적용하여 노드와 노드 사이의 시간거리를 산출하여 서울 대도시권 대중교통체계의 시간거리 접근도를 계산하는 알고리즘을 제안하고 이를 구현하여 그 결과를 제시한다.

2013년도를 기준으로 하면 서울 대도시권 통합 교통망의 노드들의 개수는 서울 시내 600개 버스노선들에 연결되어 있는 버스정류장 15,702개와 수도권 지하철 16개 노선들에 연결된 지하철역 575개를 합하면 16,277개가 된다. 승객들이 이동하는 통행 경로에 따라 링크들이 만들어지는데 주로 버스노선이나 지하철 노선에

서 인접한 노드들 사이에 링크를 연결하고 이동시간을 링크의 가중치로 만든다. 승객들은 일정 거리 이내의 노드들로는 도보로 이동하는 통행 경로를 만들 수 있는 데 이 경우에는 통행 경로의 두 노드들 사이에 링크를 연결하고 그 링크의 가중치는 승객의 도보 이동 시간으로 설정한다. 서울 대도시권 통합 교통망의 노드들과 링크들을 그래프로 나타내고 링크들의 가중치는 시간거리 인접 행렬로 표현하면 모든 노드들 사이의 최단 시간거리 행렬은 최단 경로 알고리즘으로 얻어서 각 노드의 접근도를 구할 수 있게 된다. 본 연구는 승객들이 도보로 이동하여 버스정류장에서 지하철역으로 또는 그 반대로 다른 운송수단을 사용할 수 있는 복잡한 통행경로들을 분석할 수 있도록 서울 대도시권 대중교통 체계를 하나의 통합 교통망으로 표현하여 각 노드의 접근도를 계산해낸 첫 시도로서의 의미가 매우 크다.

2. 서울대도시권 대중교통체계 시간거리 접근도

본 논문에서는 서울 대도시권 대중교통 시스템을 이루는 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망을 통합하여 각 버스정류장 또는 지하철역의 접근도를 계산하고 그 영향을 분석하고자 한다. 그리고 통합된 교통망의 접근도와 개별적인 교통망인 시내버스 교통망과 지하철 교통망의 접근도를 비교 검토하도록 한다. 교통망에서 한 노드의 접근도를 계산하기 위해서는 먼저 그 노드에서 다른 모든 노드들로 이동할 때 소요되는 시간을 비용으로 환산한 최단 비용 거리를 계산한 후에 접근도의 공식에 따라 그 값을 계산해낸다. 본 논문에서는 기존의 접근도를 계산하는 공식을 적용하고, 보다 직관적으로 한 노드의 접근성을 나타내주는 평균 이동 시간을 정의하여 접근도의 해석을 보완하도록 한다.

접근도의 개념이나 측정 방법은 연구의 목적이나 대상에 따라 상당한 차이를 보인다. 접근성의 개념을 주어진 교통망으로 연결된 각 결절점들의 입지의 상

대적 우위성을 나타내는 지표로 한정한다고 하여도 접근도는 다시 교통망의 연결상태 만을 고려할 것인지, 아니면 연결되는 결절점들의 속성까지도 고려할 것인지에 따라 의미와 측정방법이 달라진다(Ingram, 1971; Pine, G. H., 1979). 본 논문에서 Lee and Lee(1998)와 같이 접근성의 개념을 연결되는 장소의 속성과는 무관하게 주어지는 교통망으로 이동 가능성으로 정의하고 순수하게 교통망 상의 결절점들이 주어진 교통망을 통하여 주변의 다른 지점들로부터(혹은 다른 지점으로) 도달하기 쉬운 정도를 한 장소에서 다른 장소로 이동하는 데 소비되는 시간거리로 측정한다. 바쁜 일상을 살고 있는 현대 도시인에게 시간은 매우 중요한 가치를 지니므로 이동성 측정의 대상이 되는 거리의 경우 시간거리를 바탕으로 측정되는 이동성과 접근가능성은 오늘날 도시의 공간 구조 및 통행행태를 이해하는데 핵심적인 요소라고 할 수 있다(김소연 · 이금숙, 2006). 특히 서울 대도시권은 도시의 외연적 확장과 더불어 상당한 거리를 두고 분산되어 입지하고 있는 집과 일터 및 다양한 활동들을 오가는데 소요되는 시간은 거리를 극복하는 비용 이상으로 현대의 도시인들의 이동행태에 영향을 미치고 있다. 수도권 인구의 공간이동에서 시간거리는 매우 중요하게 작용할 것이다(이금숙 외, 2014; 박종수 · 이금숙, 2015).

교통의 확충이나 노선 조정 등으로 교통망의 구성이 변화할 수 있으므로 이러한 비교정성 교통망에도 적용할 수 있도록 일반화시킨 접근성 산출모형에서 적용한 다음 (식 1)을 적용한다(이금숙 외, 2014; 박종수 · 이금숙, 2015).

$$A_i = B \sum_{j=1(i \neq j)}^n \frac{1}{C_{ij}} \quad (\text{식 1})$$

이 공식에서 A_i 는 노드(버스정류장 또는 지하철역) i 에서 접근도를 나타내고, B 는 크기를 조정하는 상수다. C_{ij} 는 노드 i 에서 노드 j 로 이동할 때 소요되는 시간을 비용으로 계산한 최단 비용 거리를 나타내며 본 논문에서는 최단 시간거리 알고리즘으로 산출된 시간 거리를 적용한다. 즉, 노드 i 의 접근도는 노드 i 에

서 다른 모든 노드들까지 최단 시간거리의 역수를 모두 더한 값으로 측정한다. 그러므로 접근성이 좋을수록 노드 i 의 접근도인 A_i 의 값은 크다. 노드 i 로 갈 수 없는 노드 j 가 있다면 두 노드들 사이의 최단 시간거리는 무한대(∞)가 되고 그 역수는 0이 되어서 접근도 계산에서 그 노드 j 까지 접근성은 없게 된다. 새로운 노선이 생기거나 기존 노선의 조정으로 한 노드에서 새로운 노드나 기존의 노드에 도달하는 최단 비용 거리가 줄어들게 되면 접근도 계산에서 그 역수의 값은 커지게 되어 접근도도 커지게 되면서 접근성이 좋아지게 된다(박종수 · 이금숙, 2015).

각 노드(버스 정류장이나 지하철역)의 접근도 A_i 는 노드들의 개수 n 이 증가하면 할수록 그 값이 커지는 경향성을 띠고 있다. 교통 시스템의 노드들의 개수인 n 이 커지면 결과적으로 A 의 값도 커지게 된다. 그러므로 교통 네트워크에 속한 노드들의 개수가 다르면 직관적으로 평균 접근도인 A 의 값을 비교하여 각 교통 시스템의 접근성(accessibility)이 얼마나 좋은지를 직접적으로 비교할 수 없는 점을 가지고 있다. 접근도를 해석하는 다른 한 방법으로 모든 노드들의 접근성을 평균값 A_{mean} 은 다음 (식 2)로 계산될 수 있다.

$$A_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (\text{식 2})$$

(식 2)의 전체 평균 접근도 A_{mean} 도 각 노드의 접근도 A_i 의 값이 교통망에 속한 노드들의 개수인 n 에 비례하는 성질을 갖고 있기 때문에 결과적으로 n 이 큰 교통망이 더 큰 평균 접근도를 가지게 될 수 있음을 추정할 수 있다.

(식 1)과 (식 2)의 접근성은 값이 커짐에 따라 접근성이 좋아짐을 알 수 있으나 어느 정도 좋아지는지는 직관적으로 쉽게 이해하기 어렵다. 이런 성질을 보완하는 것으로 한 노드에서 다른 노드들로 이동하는 시간들을 평균한 평균 이동 시간은 접근도보다 더 쉽게 직관적으로 이해할 수 있다. 다음 (식 3)과 같이 한 노드에서 다른 모든 노드들 사이의 평균 이동 시간 T_i 를 정의한다. 각 노드의 평균 이동 시간 T_i 와 전체 노드들의 평균 이동 시간 T_{mean} 은 (식 3)과 (식 4)에서 노드

와 다른 노드 사이의 최단 비용 거리인 C_{ij} 를 사용하여 정의한다.

$$T_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1(i \neq j)}^n T_{ij}, \begin{cases} t_{ij} = c_{ij} & \text{if } c_{ij} \neq \infty \\ t_{ij} = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{식 3})$$

$$T_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (\text{식 4})$$

(식 3)은 노드와 노드 사이에 연결 경로가 있어서의 c_{ij} 값이 무한대가 아닌 모든 노드들 사이의 최단 비용 거리를 더하고 그 결과에 전체 노드들의 개수 n 으로 나누어진 값이 노드 i 의 평균 이동 시간 T_i 가 된다. (식 3)에서 $c_{ij} = \infty$ 의 의미는 노드 i 와 노드 j 사이에 연결되는 경로가 없을 때 최단 비용 거리가 무한대가 되는 것을 나타내고, 이 경우에 $t_{ij} = 0$ 이 되어 평균 이동 거리의 계산에는 포함되지 않는다. 일반적으로 어떤 교통망의 각 노드는 다른 모든 노드들과 연결 경로가 있는 경우가 대부분이다. 어떤 교통망에서 전체 노드들의 평균 이동 시간 T_{mean} 은 교통 시스템의 전체 노드들의 개수인 n 으로 나누어주기 때문에 서로 다른 교통 시스템들의 평균 이동 시간을 비교할 수 있는 성질을 갖는다. 접근도의 값은 n 이 크면 A_{mean} 의 값도 커지는 경향성을 띄지만, T_{mean} 은 직관적인 이동 시간을 표시하기 때문에 보다 유용하게 교통망의 성질을 이해하게 해준다. 실험결과에서 그 특성을 보다 분명하게 보여준다. 본 논문에서는 수도권 대도시의 대중교통망인 서울 시내버스 시스템과 수도권 지하철 시스템의 접근도와 평균 이동 시간을 (식 1), (식 2), (식 3), 그리고 (식 4)에 정의된 대로 계산하여 그 특성들을 분석하고 비교 검토할 것이다.

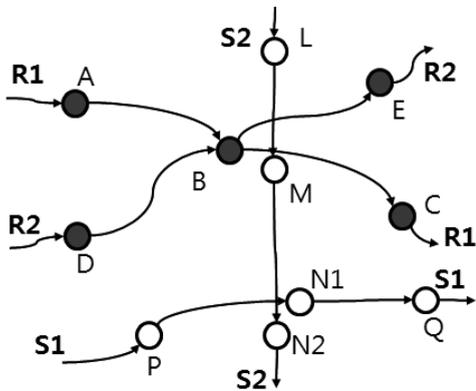
3. 통합 시간거리 접근도 계산 과정

서울 대도시권 교통망에서 버스정류장이나 지하철역의 접근도를 계산하려면 (식 1)에서 필요한 c_{ij} 를 구해야 한다. 각 노드에 해당되는 버스정류장이나 지하철역 사이의 이동 소요 시간을 노드 i 와 노드 j 사이의 최단 비용 거리인 c_{ij} 로 표현하였다. c_{ij} 를 얻기 위해

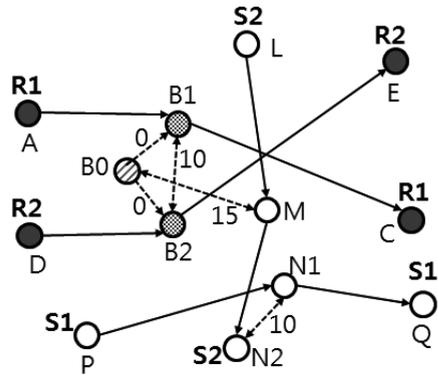
서는 먼저 주어진 교통망에서 노드와 노드를 연결한 링크의 가중치로 이동 소요 시간을 나타내는 시간 거리 인접 행렬(time distance adjacency matrix)을 구성한다. 그런 후에 최단 시간 거리를 찾는 알고리즘을 적용하여 최단 시간 거리 행렬(shortest time distance matrix)을 얻게 된다. 최단 시간 거리 행렬의 각 원소가 (식 1)에서 표시된 c_{ij} 가 된다. 시간 거리 인접 행렬에서 각 원소의 값인 두 노드들 사이의 이동 소요 시간은 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 추출하거나 또는 승객이 도보로 이동하는 시간으로 설정하게 된다.

최단 인접 거리 행렬을 구할 때 많이 사용되는 Floyd 알고리즘은 환승에 대한 고려가 안 되는 점을 감안하여 본 논문의 통합 교통망에서는 환승하는 과정을 나타내는 노드들과 도보 이동의 링크들을 추가한 그래프로 표현하여 최단 경로를 구하도록 한다. <그림 1>은 2개의 버스 노선과 2개의 지하철 노선을 표시하고 각 노선별로 몇 개의 버스정류장과 지하철역을 개념적으로 나타내고 있다. 버스정류장인 노드 B는 환승 버스정류장을 나타내고 지하철역 M과도 도보로 환승할 수 있음을 보여준다. 그리고 지하철역인 노드 N1과 N2는 환승 지하철역을 나타낸다.

<그림 2>는 <그림 1>을 교통망의 노드와 링크로 변환하여 그래프로 표현한 것이다. <그림 1>의 환승 버스정류장인 노드 B는 한 개의 터미널-환승 (terminal-transfer) 정류장 B0와 두 개의 노선-환승 (route-transfer) 정류장 B1과 B2로 표현한다. 버스정류장 B를 표현하는 세 개의 버스정류장들 중에서 터미널-환승 정류장 B0에서만 승객이 승차와 하차를 할 수 있고, 노선-환승 버스정류장인 B1과 B2 사이에서는 승객이 다른 버스로 환승만 할 수 있다(박중수·이금숙, 2015). <그림 2>에서 실선은 버스나 지하철이 이동하는 것을 나타낸 링크고 속도와 거리에 따라 이동 시간이 가중치로 계산된다. 점선은 승객이 도보로 이동하는 것을 표현한 링크다. B0와 B1 그리고 B0와 B2사이의 링크의 가중치는 0으로 두고 B1과 B2 사이의 링크의 가중치는 승객의 버스 환승 시간으로 설정된다. 수정된 Floyd 알고리즘에서는 터미널-환승 정



〈그림 1〉 버스 노선 R1과 R2 그리고 지하철 노선 S1과 S2 상의 버스정류장과 지하철역



〈그림 2〉 〈그림 1〉을 교통망의 노드와 링크로 표현한 그래프 (점선은 승객이 도보로 이동한 것을 표현)

류장과 노선-환승 정류장을 구별하여 최적 경로 탐색을 하도록 설계되었다. 따라서 수정된 Floyd 알고리즘에서는 터미널-환승 버스정류장에 해당되는 노드는 최적 경로 탐색에서 중간 징검다리 역할을 하지 못하도록 변경하였다(박종수 · 이금숙, 2015).

버스정류장인 B0와 지하철역 M 사이의 링크의 가중치는 승객이 두 노드 사이에 이동하는 거리에 따른 시간으로 주어진다. 지하철 노선 S1과 S2에서 환승하는 지하철역인 N1과 N2 사이의 가중치는 승객이 두 지하철역의 중심 위치 사이의 이동에 따른 시간으로 설정된다. 〈그림 2〉와 같은 환승 정류장의 표현과 최적 경로 탐색에서 환승역들의 특성에 맞추어 수정된 Floyd 알고리즘의 적용으로 버스정류장 사이의 환승, 버스정류장과 지하철역 사이의 환승, 지하철역 사이의 환승을 적확하게 나타내어 서울 버스 교통망과 수도권 지하철망을 통합한 교통망의 시간거리 접근성을 산출한다.

다음 Procedure는 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망에서 각 버스정류장이나 지하철역의 접근도를 계산하는 과정을 단계별로 보여주고 있다.

Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도

단계 1: 서울 시내버스 교통망에서 버스정류장들 사이에 시간거리 인접 행렬 $VW_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 41,752)$

을 생성하여 최단 시간 거리 행렬 $W_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 15,702)$ 를 계산한다. W_{ij} 를 사용하여 각 버스정류장의 접근도와 평균 이동시간을 계산한다.

단계 2: 수도권 지하철 교통망에서 지하철역들 사이의 시간 거리 인접 행렬을 만들고 최단 시간거리 행렬 $W_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 575)$ 를 구하여 각 지하철역의 접근도와 평균 이동 시간을 계산한다.

단계 3: 서울 대도시권 통합 대중 교통망에서 단계 1과 2의 결과를 사용하여 최단 시간 거리 행렬 $W_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 16,277)$ 를 계산한다. W_{ij} 로 각 노드인 버스정류장이나 지하철역의 접근도와 평균 이동시간을 계산한다.

Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 3의 W_{ij} 가 통합 교통망에서 식 (1)과 (3)의 c_{ij} 에 해당된다. 서울 시내버스 교통망의 노드들(버스정류장들)의 개수가 수도권 지하철 교통망의 노드들(지하철역들)의 개수에 비해 아주 크기 때문에 최단 거리 행렬을 처리하는 시간이 너무 오래 걸려서 단계 1과 2로 분리하여 접근도나 평균 이동 시간 계산 과정을 따로 두게 되었다. 다음 절에서 각 단계에 대하여 상세히 설명한다.

1) 서울 시내버스 교통망

이 절에서는 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1에 대해서 설명한다. 서울 시내버스 교통망은 노드들과 링크들로 구성되는데 노드는 서울 시내버스 노선에 있는 버스정류장을 나타내고 링크는 노드인 버스정류장을 연결하는 것을 나타낸다. <그림 1>에서 버스노선 R1과 R2 상의 버스정류장이 노드로 나타내고 그 연결은 링크로 표시된다. 서울 시내버스 노선 상의 버스정류장들은 인접한 버스정류장들 사이에 링크로 연결되고, 승객 도보로 이동하는 것을 링크로 나타낼 때는 일정한 거리 이내의 버스정류장들 사이에 링크로 연결하게 한다. 그러면 서울 시내버스 교통망을 두 가지 구성요소인 노드들과 링크들로 표현해낼 수 있고 그 다음에는 각 링크의 가중치는 승객이 그 링크의 한 버스정류장에서 연결된 다른 버스정류장으로 이동하는 시간을 시간 거리 개념으로 설정한다. 서울 시내버스 노선에 있는 버스정류장들 사이의 링크의 시간 거리 가중치는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 추출하고, 승객이 도보로 이동하는 것을 나타내는 링크의 시간 거리 가중치는 승객의 이동 속도와 두 버스정류장들 사이의 거리에 따라 계산한다(박종수·이금숙, 2015). 시간 거리 가중치를 가지는 링크들을 시간 거리 인접 행렬로 표현하여 임의의 한 노드에서 다른 모든 노드들 사이의 최단 이동 시간을 찾는 최단 경로 알고리즘(Floyd, 1962)을 수정 적용하여 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1의 최단 시간 거리 행렬 W_{ij} 를 구한다. 그러면 서울 시내버스 교통망에서 각 버스정류장의 접근도를 구하는 식 1)의 c_{ij} 는 최단 시간 거리 행렬의 W_{ij} 의 값이 되어 평균 접근도와 평균 이동 시간을 식 2)와 식 4)로 구할 수 있게 된다.

서울 시내버스 교통망의 노드들과 링크들의 정보는 기본적으로 서울 시내버스 노선 데이터로부터 구한다. 실제 버스정류장들의 개수는 15,702개이지만 승객들이 다른 버스로 환승할 수 있는 환승 버스정류장을 최단 거리를 찾아내는 알고리즘을 적용하기 위하여 <그림 2>에서와 같이 환승 버스정류장에 대해서 터미널-환승 버스정류장으로 두고 노선-환승 버스정

류장들이 통과하는 노선들의 개수만큼 추가적으로 설정하기 때문에 교통망의 노드들의 개수가 증가한다. 따라서 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1의 인접 행렬 VW_{ij} 의 $n = 41,752$ 가 된다. 서울 시내버스 노선상의 링크들, 환승 버스정류장에 대한 터미널-환승 버스정류장과 노선-환승 버스정류장들을 연결하는 링크들, 그리고 승객들의 도보 이동을 나타낸 링크들을 합한 서울 시내버스 교통망의 링크들의 전체 개수는 503,313개가 된다. 단계 1의 인접 행렬 VW_{ij} 의 초기값 설정은 다음과 같다: <그림 2>의 실선에 해당되는 링크의 가중치는 시내버스의 이동 속도와 버스정류장들 거리에 따라 이동 시간으로 설정되고, 점선에 해당되는 링크의 가중치는 거리에 따른 승객의 도보 이동 시간으로 설정된다. 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 각 시내버스 노선별로 버스의 평균 이동 속도를 추출해내고 인접한 두 버스정류장의 거리는 위치인 위도와 경도에 따라 계산된다. 인접 행렬 VW_{ij} 을 입력으로 수정된 Floyd 알고리즘을 적용하여 실제 버스정류장들인 노드들 사이의 최단 인접 행렬 $W_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 15,702)$ 을 구한다(박종수·이금숙, 2015).

2) 수도권 지하철 교통망

Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 2의 수도권 지하철 교통망은 서울 시내버스 교통망에 비해 노드들(지하철역들)의 개수가 아주 작아 조금 더 단순하지만, 환승 지하철역을 처리하는 방법이 중요하다. 이전 논문(이금숙 외, 2014)에서는 두 개 이상의 지하철 노선들이 통과하는 환승 지하철역들을 한 개의 지하철역으로 대표하여 접근도를 계산하였다. 본 논문에서는 환승 지하철역을 서울 시내버스 교통망의 환승 버스정류장을 처리한 방법과 같이 표현하여 처리하였다. <그림 1>의 지하철 노선 S1과 S2가 만나는 환승 지하철 N1과 N2를 분리하여 처리한다. <그림 2>에서 노드 N1과 N2 사이의 링크는 승객이 도보로 이동하는 것을 나타내는 점선으로 표시한다. 환승 지하철역은 통과하는 지하철 노선들의 개수만큼 노선별로 지하철역들을 여러 개의 노드들로 나타내고 그 노

드들 사이의 링크의 가중치는 승객이 이동하는 속도와 환승 지하철역들의 거리에 따라 승객의 도보 이동 시간으로 설정한다.

환승 지하철역에서 승객이 도보로 이동하는 시간을 이전 연구 방법(이금숙 외, 2014)에 비하여 좀 더 정밀하게 계산한다. 서울시에서 발표한 자료(디지털타임스, 2015)에 의하면 성인 환승 소요시간은 보폭 기준 초당 1.2m로 이동하고, 어린이와 노인·임산부·장애인 등 노약자는 초당 1m로 이동하는 것으로 산정하였다. 본 논문에서는 환승 지하철역에서 승객들의 환승 시간을 일반적인 승객의 이동 속도를 감안하여 거리에 따라 계산한다. 환승 지하철역에서 노선별 환승 지하철역의 중심지에서 중심지 사이의 거리를 계산하고 승객이 다른 환승 지하철역을 지도상의 거리인 직선으로 가는 대신에 둘러가는 과정을 고려하여 이동 도보 환승 시간 계산 공식을 만들어 승객 이동 시간을 계산하여 환승 지하철역들 사이의 링크의 가중치로 사용하였다. 이런 방식으로 수도권 지하철 망의 환승 지하철역들 사이의 링크의 가중치를 계산하면 이전 연구에 비해 보다 간단한 공식으로 환승 소요 시간을 계산할 수 있고 각 환승지하철역의 이동 시간을 제대로 설명할 수 있게 된다.

〈그림 2〉에서 지하철 노선 S1 상의 노드 P와 N1 사이의 링크의 가중치는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 각 노선별의 지하철의 평균 이동 속도를 계산한다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 2에서 지하철역인 노드와 연결을 나타내는 링크를 기반으로 지하철역들의 개수인 $n = 575$ 개에 대응하는 최단 시간거리 행렬 W_j 를 계산한다.

3) 서울 대도시권 통합 교통망

서울 대도시권 통합 교통망은 앞에서 언급한 것과 같이 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망으로 구성되고 있다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 3에서와 같이 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망을 통합한 단일 교통망에서의 한 버스정류장 또는 지하철역에서의 접근도와 평균 이동시간을 구하려면 단일 교통망의 노드들 사

이의 최단 이동 시간 거리에 나타내는 최단 시간 거리 행렬이 있으면 된다. 이전 두 절에서 서울 시내버스 교통망의 최단 시간 거리 행렬과 수도권 지하철 교통망의 최단 시간 거리 행렬은 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1과 2에서 계산되어져 있다. 이미 계산된 두 개의 최단 시간 거리 행렬을 이용하여 통합된 단일 교통망의 최단 시간 거리 행렬을 계산해낼 수 있다.

<p>서울 시내버스 교통망 행렬 $n_1 = 15,702$</p>	
	<p>수도권 지하철 교통망 행렬 $n_2 = 575$</p>

〈그림 3〉 통합 교통망의 시간거리 인접행렬($n=n_1+n_2$)

〈그림 3〉은 서울 대도시권 통합 교통망의 노드들 사이의 시간 거리 인접 행렬(time distance adjacency matrix)을 개념적으로 설명하고 있다. 〈그림 3〉에서 좌측 상단의 서울 시내버스 교통망의 최단 시간 거리 행렬의 각 노드는 버스정류장으로 구성되고 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1에 의해 계산되었고, 우측 하단의 수도권 지하철 교통망의 최단 시간 거리 행렬은 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 2에서 계산되었다. 〈그림 3〉의 시간 거리 인접 행렬의 노드들의 개수는 시내버스 교통망의 15,702개와 지하철 교통망의 575개를 합한 결과인 16,277개가 된다.

서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망을 통합하는 단일 교통망의 최단 시간 거리 행렬을 구하기 위해서는 최단 경로를 찾는 알고리즘(Floyd, 1962)을 적용하게 되는데, 그 알고리즘의 입력인 시간 거리 인접 행렬은 이미 계산된 시내버스 교통망의 최단 시

간 거리 행렬, 지하철 교통망의 최단 시간 거리 행렬, 그리고 마지막으로 두 교통망을 연결하는 노드들 사이에 연결된 링크의 가중치로 표시된 행렬로 구성된다. 시내버스 교통망의 버스정류장과 지하철 교통망의 지하철역을 연결하는 링크의 의미는 한 승객이 버스정류장에서 지하철역으로 도보로 이동하여 환승하는 의미를 나타내고, 반대 방향의 링크는 지하철역에서 버스 정류장으로 환승하는 것을 나타낸다. <그림 3>에서 우측 상단의 사각형에 속하는 행렬은 버스정류장에서 지하철역으로 승객이 도보로 이동하는 시간을 나타내고, 좌측 하단은 지하철역에서 버스정류장으로 승객의 이동 시간을 나타낸다.

두 교통망을 통합한 단일 교통망에서 각 노드들 사이의 최단 시간 거리를 계산하는 알고리즘은 Procedure 통합교통망_최단시간거리행렬에 설명되어 있다. Procedure 통합교통망_최단시간거리행렬의 계산 알고리즘은 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 3을 상세히 설명한 것이다. 단계 2에서 승객이 이동할 수 있는 일정 거리는 120미터로 두었다. 버스정류장과 지하철역 사이의 거리가 120미터 이내이면 승객이 이동하는 평균 속도를 1meter/second로 간주하여(디지털타임스 2015) 이동 시간을 계산하였다. 승객의 이동 시간에는 두 노드(버스정류장과 지하철역) 사이를 이동하는 시간과 환승을 위해 기다리는 시간이 포함된다.

Procedure 통합교통망_최단시간거리행렬

단계 1: 서울 시내버스 교통망의 최단 시간 거리 행렬 ($n_1 \times n_1$ matrix)과 지하철 교통망의 최단 시간 거리 행렬($n_2 \times n_2$ matrix)을 읽어서 <그림 3>의 좌측 상단과 우측 하단과 같이 통합 시간 거리 인접 행렬($n \times n$ matrix) $W_{ij}(1 \leq i, j \leq n, n = 16,277)$ 를 만든다.

단계 2: <그림 3>에서 시간 거리 인접 행렬의 우측 상단과 좌측 하단의 원소들은 서울 시내버스 교통망의 버스정류장과 수도권 지하철 교통망의 지하철역 사이의 링크의 가중치로 설정한다. 버스정류장과 지하철역 사이의 거리가 일정 거리 이내에 있으면 승객의 이동 시간을 간선의 가중치로 두고, 그렇지

않으면 무한대로 설정한다.

단계 3: 통합된 교통망의 노드들 사이의 최단 시간 거리를 얻기 위해 Floyd 알고리즘을 적용한다. 이 결과로 통합 시간 거리 인접 행렬 W_{ij} 를 구하게 된다.

버스정류장과 지하철역 사이의 이동은 지도상에 나타나는 2차원의 두 지점 간의 거리가 아니고 지하공간을 포함하는 3차원의 이동 거리를 나타내어야 하는 점도 고려하였다. 실제 데이터에서 단계 2에서 생성되는 링크들의 개수는 2,452개로 버스정류장들과 지하철역들로 연결된다. 일정 거리인 120미터를 넘어서는 버스정류장과 지하철역 사이의 링크의 가중치는 무한대로 두었다. 위 Procedure의 단계 3에서 구한 W_{ij} 는 식 (1)과 (3)의 c_{ij} 가 된다.

4. 실험 결과 및 분석

서울 대도시권 대중교통망의 노드인 버스정류장이나 지하철역의 평균 접근도와 평균 이동 시간을 계산하기 위해 제안된 알고리즘들을 마이크로소프트의 Visual Studio 2010 개발 환경의 C++ 언어로 구현하였다. 프로그램을 코딩한 컴퓨터 시스템의 주요 사양은 마이크로소프트 Windows 7 64비트 운영체제, 인텔의 i5-6600 3.3GHz CPU, DDR4 64GB 메인 메모리 등이다.

Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1과 2의 입력 데이터는 2013년도 버스 노선과 노선별 버스정류장들의 위치 정보 등을 포함한 파일, 2013년 3월 4일 스마트 교통 카드 트랜잭션 파일, 교통 카드 트랜잭션에 따른 trip chain 정보를 담은 파일, 그리고 2013년도 지하철 노선과 노선별 지하철역들의 위치 정보 등을 담은 파일이다.

입력 데이터 파일에 관해 살펴보면, 서울 시내버스 노선들의 개수는 600개, 모든 노선들 위에 있는 버스정류장들의 개수는 34,934개이다. 이 버스정류장들 중에서 서로 다른 버스노선과 겹치지 않는 단독 버스정류장들의 개수는 8,883개이고, 나머지 버스정류장

들은 다른 버스노선들의 버스 정류장으로 겹치는 환승 버스정류장들이고 그 개수는 6,819개다(박종수 · 이금숙, 2015). 승객들이 승차와 하차를 할 수 있는 버스정류장들의 개수는 단독 버스정류장 8,883개와 실제 환승 버스정류장 6,819개를 더한 결과인 15,702개가 된다. 교통카드 트랜잭션들의 개수는 16,332,988개로 각각은 승객이 버스나 지하철을 승차하고 하차한 기록을 담고 있다. 이 중에서 버스의 속도 계산에 사용된 버스 승객들의 트랜잭션들의 개수는 5,772,411개이고, 지하철 노선의 속도 계산에 사용된 지하철 승객들의 트랜잭션들의 개수는 7,833,617개다. 승객들이 다른 버스나 지하철을 이용하는 정보를 담은 trip chain 트랜잭션들의 개수는 11,471,198개로 이 중에서 버스에서 버스로 환승한 트랜잭션들의 개수는 2,332,476개이고, 버스 환승 승객들의 평균 환승 시간은 319초로 계산되었다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1에 사용된 교통망의 노드들의 개수는 41,752개이고, 이 노드들을 연결하는 링크들의 개수는 503,313개로 설정되었다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 2에서 지하철 노선들의 개수는 16개이고 지하철역들의 개수는 575개이고 지하철역들을 연결하는 링크들의 개수는 656개이다. 단계 3에서 통합 교통망의 노드들의 개수는 16,277개가 된다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1의 실행시간은 약 15시간 48분으로 노드들의 개수가 큰 경우의 최단 거리를 찾는 과정으로 많은 시간이 걸렸다. 단계 2는 26초가 걸렸고, 단계 3은 5,080초 후에 결과가 나왔다.

〈표 1〉은 서울 시내버스 교통망에서 (식 2)와 (식 4)로 계산한 결과인 전체 버스정류장들의 평균 접근도와 평균 이동 시간을 보여주고 있다. (식 2)의 A_i 를 계산하는 (식 1)에서 $B = 1$ 로 두고 계산하였다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 1에서 구한 최단 시간 거리 행렬 W_{ij} 가 (식 1)과 (식 3)의 c_{ij} 의 값이 된다. 〈표 1〉의 “서울권 버스정류장”은 서울 시내버스 교통망에 속한 모든 버스정류장들인 서울 시내나 또는 서울에 인접한 경기도나 인천 등에 속한 버스정류장들을 포함한 교통망으로 (식 1)과 (식 3)에서

모든 c_{ij} 가 사용되었다. 그러나 〈표 1〉의 “서울시내 버스정류장”의 평균 접근도와 평균 이동시간의 값은 행정적으로 서울시내에 속한 버스정류장들만 포함한 교통망의 값으로 (식 1)과 (식 3)에서 c_{ij} 의 노드 i 와 j 에 해당하는 버스정류장의 행정동ID가 두 개 모두 서울시내에 속한 것으로 한정된 것이다. 그러므로 “서울시내 버스정류장”의 평균 접근도와 평균 이동시간의 값의 해석은 상대적인 값으로 보아야 한다.

그리고 〈표 2〉는 Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 2에서 구한 W_{ij} 가 c_{ij} 값이 되어 (식 2)와 (4)로 계산된 수도권 지하철 교통망에서 지하철 역들의 평균 접근도와 평균 이동시간을 보여주고 있다. 서울시내 지하철역은 행정적으로 서울시내에 위치한 지하철역들만 포함한 것이고, 수도권 지하철역은 모든 지하철역들을 포함한 것이다. 두 표에서 나타난 것처럼 교통 시스템의 노드들의 개수인 n 이 증가할수록 평균접근도 A_{mean} 이 커짐을 여실히 보여주고 있다. 〈표 1〉에서도 평균접근도의 값을 비교해보면, n 이 큰 “서울권 버스정류장”의 평균접근도가 “서울시내 버스정류장”의 값에 비해서 그 값이 큰 값을 알 수 있다. 그러므로 평균 접근도의 값으로 두 개의 서로 다른 교통망을 비교하여 어느 교통망이 접근성이 더 좋은 지를 판단하기가 쉽지 않게 된다.

〈표 1〉과 〈표 2〉에서 기술된 두 교통망에서 평균 이

〈표 1〉 서울 시내버스 교통망에서 평균 접근도와 평균이동시간

	$n= V $	평균 접근도, A_{mean}	평균이동시간(sec), T_{mean}
서울권 버스정류장	15,702	4.1270	4654.22
서울시내 버스정류장	13,080	3.8147	4156.14

〈표 2〉 수도권 지하철 교통망에서 평균 접근도와 평균이동시간

	$n= V $	평균 접근도, A_{mean}	평균이동시간(sec), T_{mean}
수도권 지하철역	575	0.1965	4741.71
서울시내 지하철역	354	0.1880	2625.64

동 시간 관점에서 분석하면, 평균 접근도에 비해서 그 값을 비교 검토하기가 보다 용이해짐을 알 수 있다. <표 1>에서 서울권 버스정류장들의 평균 이동 시간은 4654.22초(1시간 17분 34.22초)로 한 버스정류장에서 다른 버스정류장으로 이동하는 시간을 평균적으로 나타내고 있다. 행정동ID가 서울 시내인 버스정류장으로 한정하면, 평균 이동 시간은 4156.14초(1시간 9분 16.14초)로 전체 서울권 버스정류장들의 평균 이동 시간에 비해 498.08초(8분 18.08초)가 더 빨리 이동하는 것을 보여준다. <표 2>에서 수도권 지하철역들의 평균 이동시간이 <표 1>의 “서울권 버스정류장”의 평균 이동시간에 비해 87.49초가 더 걸리는 것을 보여주는데, 이것은 수도권 지하철역들이 서울 시내버스정류장들에 비해 훨씬 더 광범위하게 펼쳐져 있기 때문이다.

예를 들면 지하철 1호선의 신창역은 충청남도 아산시에 있으며 서울 시청역으로부터 지도상에서 직선거리로 약 90km 떨어져 있다. 행정적으로 서울특별시에 속한 버스정류장들과 지하철역들의 평균 이동 시간을 비교하면 버스는 약 1시간 9분에 이동하고 지하철은 약 44분에 이동하여 지하철 시스템이 평균적으로 25분 더 빠르게 승객들을 한 지하철역에서 다른 지하철역으로 운송하는 것을 설명하고 있다.

<표 3>은 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철

교통망을 한 시스템으로 통합한 교통망에서 구한 값이다. Procedure 서울_대도시권_교통망_접근도의 단계 3에서 구한 W_{ij} 로 (식 1)과 (식 3)의 c_{ij} 를 연어서 먼저 각 노드(버스정류장 또는 지하철역)의 접근도와 평균 이동 시간을 구하고, 그런 후에 (식 2)의 평균 접근도와 (식 4)의 평균 이동시간을 계산하였다. 그 결과 값들을 <표 3>의 “전체(버스와 지하철)” 행에서 나타내고 있다.

<표 1>과 <표 2>의 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망의 접근도와 평균 이동 시간을 <표 3>의 통합 교통망의 값들과 비교하면 통합 교통망에서 접근도가 더 개선되고 평균 이동 시간도 745.09초(12분 25.09초)와 832.58초(13분 51.58초)로 각각 빨라졌음을 알 수 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 서울 시내버스 교통망과 수도권 지하철 교통망을 통합한 교통망에서 대중교통을 이용하는 승객들이 더 쉽고 빠르게 버스정류장이나 지하철역을 이용할 수 있음을 파악할 수 있다.

<표 3>의 나머지 행들은 <표 1>과 <표 2>의 값들과 비교하기 위한 상대적인 값들로 통합 교통망의 c_{ij} 를 계산한 후에 행정동ID가 서울 시내이거나 또는 교통망이 시내버스인지 지하철인지에 따라 계산한 것이다. <표 3>의 세 번째 행인 “서울권 버스정류장” 행에 표시된 값들과 <표 1>의 값들과 비교해보면, 통합 교통망에서 “서울권 버스정류장”의 평균 접근도는 약 0.84 정도 개선이 이루어졌고, 평균 이동 시간에서는 약 782초의 시간이 더 빨라졌다. 네 번째 행인 “수도권 지하철역” 행의 값들은 버스정류장을 제외한 지하철역들 사이의 평균 접근도와 평균 이동시간을 구한 것이다. <표 3>의 5-7행은 행정구역이 서울특별시에 속한 노드들 사이의 평균 접근도와 평균 이동시간을 나타내고, 여섯 번째와 일곱 번째 행은 각각 버스정류장들과 지하철역들 사이의 접근도와 이동시간의 평균 값을 보여주고 있다.

<표 4>는 서울 시내버스와 수도권 지하철을 통합한 교통망에서 16,277개의 버스정류장과 지하철 역 중에서 평균 이동 속도가 빠른 상위 10개와 평균 이동 속도가 최대인 노드를 표시한 것이다. 평균 이동 속도

<표 3> 버스과 지하철 통합 교통망에서 평균 접근도와 평균이동시간

	$n= V $	평균 접근도 A_{mean}	평균이동시간(sec). T_{mean}
전체 (버스와 지하철)	16,277	5.1265	3909.13
서울권 버스정류장	15,702	4.9668	3871.95
수도권 지하철역	575	0.1994	4628.72
서울시내 (버스와 지하철)	13,434	4.7810	3373.26
서울시내 버스정류장	13,080	4.6341	3389.22
서울시내 지하철역	354	0.1903	2575.77

〈표 4〉 통합 교통망에서 평균이동시간 상위 10개 노드와 최대 평균이동시간 노드

접근도	평균이동시간(sec)	경도	위도	Stop이름	StopID	통과노선개수
7.8002	2544.736	126.9723	37.5555	서울역버스환승센터	8001938	27
7.6737	2576.063	126.9738	37.5587	서울역. YTN	71309	21
7.5816	2586.293	126.988	37.5644	서울백병원평화방송	8856	4
7.639	2588.862	126.9817	37.5701	종로1가	8000613	8
7.6286	2595.03	126.9764	37.572	세종문화회관	70159	9
7.5819	2598.899	126.982	37.5629	롯데영프라자	72411	21
7.55	2601.888	126.9866	37.57	종로2가	8000731	5
7.5631	2605.169	126.9734	37.57	광화문	8699	16
7.5562	2611.741	126.9703	37.5693	서울역사박물관	8647	5
7.441	2613.248	126.9756	37.5612	삼성프라자	9000248	6
1.1150	14799.403	126.9511	36.7695	신창역(지하철1호선)	1408	1

가 빠른 노드들은 모두 서울역, 광화문, 종로 2가에 걸쳐 있는 서울 시내 중심지역의 버스정류장임을 알 수 있고, 이 버스 정류장들의 경도와 위도가 서로 비슷하여 근접 지역에 위치하고 있다. 가장 접근도가 좋은 “서울역버스환승센터” 버스정류장의 평균 이동시간은 2544.736초(42분 24.77초)로 통합 교통망에 속한 모든 노드들(버스정류장 또는 지하철역)로 이동하는 시간의 평균값이다. 이 표의 마지막 행에서 평균 이동속도 14799.403초(4시간 6분 37.403초)로 최댓값을 가지는 신창역은 또한 통합 교통망에서 최소 접근도(1.1150)를 가지고 있다. 신창역은 충청남도 아산시에 위치한 1호선의 남쪽 종착역에 해당된다.

5. 결론

본 논문에서는 서울 대도시권의 시내버스 교통망과 지하철 교통망을 통합하여 각 노드(버스정류장 또는 지하철역)의 접근도와 평균이동시간을 구하는 알고리즘을 제안하고 이를 구현하여 그 결과를 제시하였다. 2013년도 교통카드 트랜잭션 데이터베이스를 사용했을 때 통합 교통망의 노드들은 600개의 서울 시내 버스노선들에 연결되어 있는 15,702개의 버스정류장과 16개 수도권 지하철 노선들에 연결된 575개의 지하철역들로 구성된다. 통합 교통망의 링크들은 크게

두 종류로 나눌 수 있는데, 버스 노선이나 지하철 노선의 인접한 노드들의 연결선으로 이루어진 첫 번째 링크들과 승객들이 일정 거리 이내의 도보로 이동할 수 있는 노드들 사이에 연결되는 두 번째 링크들로 구성된다. 링크의 가중치는 승객이 통행 경로를 따라 이동할 때 각 노드와 노드 사이의 이동시간으로 설정하였다. 링크들의 가중치로 최단 경로 알고리즘을 적용하여 각 노드와 노드 사이의 최단 이동 시간을 얻어서 각 노드의 접근도와 평균이동시간을 구하였다. 통합 교통망의 평균 접근도와 평균 이동시간이 서울 시내 버스 교통망과 수도권 지하철 교통망의 각각의 값들보다 훨씬 더 좋은 접근성과 더 빠른 이동시간을 보여주었다. 본 연구는 대중교통 승객들이 이용하는 서로 다른 시스템인 서울 시내버스 시스템과 수도권 지하철 시스템을 통합하여 각 노드의 접근도를 계산해 낸 첫 시도이다. 추후 연구과제로는 대용량의 교통카드 트랜잭션 데이터베이스를 처리하는 기법을 적용하여 연도별로 변화하는 통합 교통망의 평균 접근도와 평균 이동시간을 구하여 서울 대도시권의 교통 체계의 용이성과 변화 과정을 분석할 수 있다.

참고문헌

- 김소연 · 이금숙, 2006, 시간거리 접근성 카토그래픽 제작 및 접근성 공간구조 분석, 『한국경제지리학회지』, 9(2), pp.149-166.

- 디지털타임스, 2015, '5분 vs 14초' 지하철 환승 시간 이렇게 많은 차이가...', 『경제신문 디지털타임스』, 2015년 12월 21일.
- 박종수 · 이금숙, 2015, 교통카드 빅데이터 기반의 서울 버스 교통망 시간 거리 접근성 산출, 『한국경제지리학회지』, 18(4), pp.539-555.
- 이금숙, 1998, 지하철 접근성 증가의 공간적 파급효과 산출 모형 개발, 『한국경제지리학회지』, 1(1), pp.137-149.
- Floyd, R. W., 1962, Algorithm 97: Shortest path, 『Communications of the ACM』, 5, p.345.
- Giuliano, G., 2004, Land use impacts of transportation Investments: highway and transit, in Hansen, S. and Giuliano, G., 『The Geography of Urban Transportation』 (3rd Edition), pp.237-273, New York: The Guilford Press.
- Hansen, W. G., 1959, How Accessibility Shapes Land Use, 『Journal of the American Institute of Planners』, 25(2), pp.73-76.
- Hanson, S. and Giuliano, G., 2004, 『The Geography of Urban Transportation』 (3rd Ed.), New York: The Guilford Press.
- Ingram D. R., 1971, The concept of accessibility: A search for an operational form, 『Regional Studies』, 5, pp.101-107.
- Kwan, M.-P. and Weber, J., 2008, Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use-travel interaction, 『Applied Geography』, 28(2), pp.110-123.
- Lakshmanan, T. R., and W. G. Hansen, 1965, A Retail Market Potential Model, 『Journal of the American Institute of Planners』, 31, pp.13-43.
- Lakshmanan, T. R., Anderson, W. P., and Song, Y., 2015, Rise of megalopolis as a Mega Knowledge Region: interactions of transport improvements, globalization, and innovative technologies and organizations, in Nijkamp P., Rose P. and Kourtit K. (eds.) 『Regional Science Matters: Studies Dedicated to Walter Isard』, pp.373-398, Berlin: Springer-Verlag.
- Lee, K. and Lee, H. Y., 1998, A new algorithm for graph-theoretic nodal accessibility measurement, 『Geographical Analysis』, 30(1), pp.1-14.
- Pine, G. H., 1979, Measuring Accessibility: A Review and Proposal, 『Environment and Planning A』, 11, pp.299-312.
- Reggiani, A., 1998, Accessibility, Trade and Location Behaviour: An Introduction, in A. Reggiani(ed.), 『Accessibility, Trade and Location Behaviour』, pp.1- 14, Aldershot: Ashgate,
- Reggiani, A., Bucci, P., and Russo, G., 2011, Accessibility and network structure, 『Networks and Spatial Economics』, 11(4), pp.621-641.
- Stanilov, K., 2003, Accessibility and Land Use: The Case of Suburban Seattle, 1960-1990, 『Regional Studies』, 37(8), pp.783-794.

계재신청 2017.01.23

심사일자 2017.01.26

계재확정 2017.03.08

주저자: 박종수, 교신저자: 이금숙