

## 지하철 우회계수 산정을 통한 수도권 지하철의 거리 효율 평가 모형

이재민 · 김남석\*

한양대학교 교통·물류공학과

### A Method to Evaluate Distance Efficiency of Seoul Metropolitan Subway by Estimating Subway Detour Factor

LEE, Jae Min · KIM, Nam Seok\*

Department of Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

#### Abstract

Detour of metro (subway) in metropolitan area has been regarded as one of inherent elements that make entire metro system less competitive than passenger cars. However, factors affecting detour of metro line is not specified clearly when a new subway system is planned or an existing system is improved. Previous detour-related studies was reviewed for developing 'distance efficeincy evaluation model' for metro as well as its counterpart (i.e. road). Metro line 3 (orange line) of Seoul metropolitan area was applied as a case study. As a results, the most detoured OD segment is Daechi - Apgujeong and its detour factor is 1.93 which means that the distance of the metro is 1.93 times longer distance compared to the distance of the road. The metro line 3 has averagely 20% longer distance compared to road for the identical O/D pairs.

대도시권에서 지하철의 우회는 승용차 통행에 비해 지하철의 경쟁력을 떨어뜨리는 요인으로 지적되어 왔다. 그러나 새로운 지하철 시스템을 계획하거나, 기존의 운행 노선을 개선할 때 다른 가치들 (영업이익, 수요, 노선의 균등 분배 등)과의 관계에서 우회에 대한 최소기준 정도만 존재할 뿐 다른 가치들과의 가중에 대한 기준이 모호한 실정이다. 이 연구는 우회의 개념을 사용하여 수도권 지하철의 거리 효율 평가 모형을 다루고 있다. 연구의 목적은 지금까지의 우회율과 관련된 선행연구들에 대해 요약하고 새로운 거리 효율 평가 모형을 만들어보며, 이 모형을 수도권 지하철 3호선에 적용하는데 있다. 주요 결과는 두 가지로 나뉘볼 수 있다. 첫째, 가장 크게 우회하는 OD는 '대치'역부터 '압구정'역까지였으며 우회계수는 1.93으로 나타났다. 이는 도로의 네트워크보다 약 1.93배 더 길게 우회하는 것을 의미한다. 한편, 수도권 지하철 3호선을 전체적으로 분석을 해본 결과, 도로의 네트워크보다 평균적으로 약 20% 더 우회하는 것으로 나타났다.

#### Keywords

detour factor, directness, graph theory, public transportation, subway

우회계수, 직결화, 그래프이론, 대중교통, 지하철

\* : Corresponding Author  
nskim@hanyang.ac.kr, Phone: +82-31-400-5159, Fax: +82-31-436-8147

Received 5 December 2014, Accepted 13 April 2015

## 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

2013년 지속가능교통물류 발전법이 제정되면서 교통 부문 지속가능성이 구체화되고 있다(Ministry of Government Legislation, 2014). 교통부문 지속가능성의 핵심 사항 중 하나가 탄소배출이 많은 수단(예컨대, 승용차)에서 상대적으로 적은 수단(예컨대, 대중교통이나 자전거)으로 교통수단을 전환을 유도하는 것이다. 이를 위해 새로운 조세제도의 도입, 인센티브, 캠페인 등 다양한 방안이 계획되고 이미 시도되고 있으나 큰 성과를 거두지 못하고 있는 실정이다. 자전거나 보행과 같은 비동력 교통수단으로의 수단전환은 승객부문에 가장 바람직한 정책수단임에 분명하나, 통근의 수단으로서(특히, 대도시권에서) 극복해야 할 거리가 너무 크다는 한계점이 지적되어 왔다.

일반적으로 통행시간은 대중교통 서비스 질의 가장 중요한 지표 중 하나이다. 더욱 엄밀하게 말하자면 교통수단의 선택에서 통행시간은 가장 중요한 선택요인 중 하나라 할 수 있고, 수단분담률 또한 한 수단이 타 수단 대비 선택률임을 감안하면, 절대적인 통행시간보다 '승용차 대비 통행시간'이 대중교통 서비스 질을 결정하는 중요한 지표라 할 수 있다. 자동차의 정체로 인해 평균 통행속도가 매우 낮은 수준이며, 지자체 차원의 장려 및 상대적으로 낮은 운임에도 불구하고 수도권 대중교통의 수단분담률이 오르지 않은 이유는 대중교통이 '승용차 대비 통행시간'에 있어 그리 매력적인 교통수단이 아니라는 반증일 수 있다. Seoul Development Institute(2008)에서는 낮은 수준의 시간 경쟁력의 원인으로 도시철도 노선과 시민 통행축의 불일치, 잦은 환승, 오랜 시간을 요하는 불편한 환승, 그리고 노선의 심한 굴곡 등이 거론되고 있다. 이 중, "노선의 굴곡"은 도시철도 이용에 가장 큰 영향을 주는 요인 중 하나로 밝혀졌고, 총 통행발생량이나 접근성보다도 대중교통 효율성에 더 높은 설명력을 보이고 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 노선의 굴곡은 기존 연구에서 독립적으로 심도 깊게 다루지 않은 지표였다. 저자들의 제한된 지식에 따르면, 이 지표는 국내에서 단일 지하철 노선에서 단 한번도 실제 산정된 바 없었다. 단지 Gyeonggi Research Institute(2010)에서 광역버스 중 간선노선의 굴곡도 기준을 광역간선(1.2이하), 간선(1.3이하), 지선(1.5이

하) 그리고 벽지지선(1.5이하)라고 정해놓은 것이 찾아지고 있다.

이러한 연구의 간극을 줄이기 위해 본 연구는 (1) 지하철 노선의 굴곡을 고전적인 네트워크의 측도인 우회도(Circuitry factor)를 이용하여 정량적으로 정의하고; (2) 이를 직선거리(Euclidean 거리)와 도로 네트워크의 거리를 통해 산정한 별도의 우회계수와 비교하여 '도로', 즉 승용차와의 거리 경쟁력을 비교하고; (3) 이 수리모형을 서울 지하철 3호선 전체 구간에 적용하여 지하철 3호선이 도로에 비해 얼마나 우회를 하는지를 정량적으로 밝혀내는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 단일 노선의 우회도를 산정하는데 중점을 두며 네트워크 전체의 우회도 및 그 영향을 분석하는 것은 연구의 범위에서 벗어남을 미리 밝혀 둔다. 또한 승객수와 운영비용적 관점, 통행속도적 관점, 통행비용적 관점, 지하철의 혼잡도 문제 등을 되도록 배제하여 지리적 관점에서의 효율성에 집중하였다. 단, 승객수나 운영비용 또한 노선의 설계나 우회에 큰 영향을 끼치므로 이는 제 4장 토의에서 심도 깊게 다루도록 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 우회도를 이용한 노선 우회의 정량화를 위해 기존 문헌 연구를 통해서 다양한 방식의 우회도를 살펴본다. 3장에서는 문헌연구를 통해 얻어진 다양한 사례를 바탕으로 지하철 우회모형을 개발한다. 또한 개발된 지하철 우회모형을 서울 지하철 3호선에 적용한다. 4장에서는 우회로 인해 발생하는 편익, 대표적으로 더 많은 승객을 실어서 얻는 장점 및 그 Trade-off에 관해서 살펴보도록 하며, 5장에서는 결론을 기술토록 한다.

## 문헌고찰

### 1. 거리측도

우회계수를 정의하기에 앞서 교통지리학 연구에서 사용되는 세 가지 종류의 거리측도를 언급할 필요가 있다. 첫째, 유클리디안(Euclidean)거리로서 2차원 평면상의 직선거리로서 '항공거리(airline distance)'이며 종종 '까마귀가 날은 거리(the distance as the crow flies)'라고도 표현한다(Levinson and El-Geneidy, 2009). 둘째, 실제거리로서 '지형지물에 영향을 받는 도로나 철도상의 최단거리'이며(Miller and Shaw, 2001) 종종 '늑대가 달린 거리(the distance as wolf runs)'로 표

현하기도 한다. 셋째, 소위 맨하튼(Manhattan) 거리로써 격자형 도로망에서 많이 이용된다. 그러나 본 고는 일반적인 네트워크를 대상으로 하기 때문에 세 번째 거리인 맨하튼 거리는 논외로 한다.

## 2. 일반적 우회계수 (노선<sup>1)</sup> 구분이 없는 측도)

위에 언급한 두 가지 종류의 거리 측도로 우회도를 정의할 수 있다. 우회도(Circuitry factor)는 ‘얼마나 우회

했느냐’의 척도로서 기존 문헌에서 여러 상황에 따라 다양한 방식으로 응용되었으나 그 정의는 Table 1에 정리한 바와 같이 거의 유사하다(Levinson and El-Geneidy, 2009).

Han(2010)은 “교통망에서 결절점의 지위에 관한 측도”로 정의했다. 즉 전체 교통망을 대상으로 하되 각 결절점에서의 우회도를 산정하는 것이다. 이를 통해 특정 지점(node)의 전체 네트워크에서 우회의 정도를 파악할 수 있다. 그러나, 전체 네트워크의 우회도를 판단하기는

Table 1. Synthesis of detour factors

	Definition	Range of network	Estimation object	Case study	Formular
Takashi (1977) in Han (2010)	Measurement to evaluate the rank of nodes in a network	Single mode Network	Each node	Simple Network-k; 6 nodes	$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [d(i, j) - e(i, j)]^2$ <p>Where,  <math>C_i</math> : circuitry factor at node i  <math>e(i, j)</math>: distance between node i and j in a ‘ideal’<sup>2)</sup> network.  <math>d(i, j)</math>: actual shortest distance between node i and j in a given network</p>
Kim (1989)	The ratio of shortest distance to Euclidean distance <sup>3)</sup>	Single Mode Network	A city	-	$ACCENT = \frac{MENETD}{MEDIST} = \frac{\sum_i \sum_j \frac{NST_{ij}}{n(n-1)}}{\sum_i \sum_j \frac{DST_{ij}}{n(n-1)}} (i \neq j)$ <p>Where,  ACCENT : Accessibility of a network  MENETD : Average shortest distance between two zones<sup>4)</sup>  <math display="block">= \frac{\sum_i \sum_j NST_{ij}}{n(n-1)} (i \neq j)</math>  MEDIST : Average Euclidean distance between two zones<sup>5)</sup>  <math display="block">= \frac{\sum_i \sum_j DST_{ij}}{n(n-1)} (i \neq j)</math>  <math>NST_{ij}</math> : Shortest distance between i and j  <math>DST_{ij}</math> : Euclidean Distance between i and j  n : the number of TAZ(Traffic Analysis Zone)</p> $ACCENTT = \frac{ITD}{MEDISTT}$ <p>Where,  ACCENTT : Weighted Accessibility of a network  ITD : Average distance between inner TAZs  <math display="block">= \frac{\sum_i \sum_j (\overline{NST}_{ij} \times T_{ij})}{\sum_i \sum_j T_{ij}} (i \neq j)</math>  <math>\overline{NST}_{ij}(i \neq j)</math> : Average distance between i and j  MEDISTT : Weighted Average between centroids of TAZs  <math display="block">= \frac{\sum_i \sum_j (DST_{ij} \times T_{ij})}{\sum_i \sum_j T_{ij}} (i \neq j)</math>  <math>DST_{ij}(i \neq j)</math> : Euclidean Distance between i and j</p>

1) 여기서 ‘노선 (line)’이라 함은 도시철도의 경우 ‘호선’을 의미한다. 도로에도 적용불가능 하지는 않지만, 노선을 구분하는 핵심적 이유가 ‘환승’이 어떤 경로(route)에 미치는 영향을 파악하기 위함임을 감안하면 이는 도시철도에 더욱 유용한 측도로 판단된다.

**Table 1.** Synthesis of detour factors (continued)

	Definition	Range of network	Estimation object	Case study	Formular
Levinson and El-Geneidy (2009)	The ratio of network to Euclidean distance	Single Mode Network	Entire Network	22 cities	$C_i = \frac{\sum_{A \in (i,j)} d_A}{\sum_{A \in (i,j)} e_A}$ <p>Where,  <math>\sum_{A \in (i,j)} e_A</math> : sum of Euclidean distances for all links in a given network  <math>\sum_{A \in (i,j)} d_A</math> : sum of actual shortest distances for all links in a given network</p>
Giacomin and Levinson (2014)	The ratio of network to Euclidean distance considering trip length under <sup>6)</sup>	Single mode Network	Entire Network	55 Metropolitan Statistical Areas (MSAs)	$C_w = \frac{\sum_{i=1}^I T_i C_i}{\sum_{i=1}^I T_i}$ <p>Where,  <math>C_w</math> : weighted circuity of trips less than or equal to threshold S  <math>T_i</math> : number of trips in each interval  <math>C_i</math> : unweighted circuity of trips in the interval i (based on network distance), interval size s = 5km, threshold S = 60km, total number of intervals i = S/s = 12</p>
Ballou et al. (2002)	The ratio of actual driving distance to euclidean distance	Single Mode Network	Entire Network	28 Countries <sup>7)</sup>	$C = \frac{\text{Actual driving distances}}{\text{Euclidean distance}}$ <p>Where,  Actual driving distances : Depend on the judgment of the commercial provider, or of the researcher tracing routes  Euclidean distance : <math>3959 \left\{ \arccos(\sin LAT_A \times \sin LAT_B) + \cos LAT_A \times \cos LAT_B \right\} \times \cos  LONG_A - LONG_B </math>  (unit: miles)</p>
Derrible and Kennedy 2009, 2010)	The ratio total number of line to maximum number of transfer.	Single Mode Network - subway with multiple lines	Entire Network	19 cities	$\tau = \frac{L}{L \cdot \delta} = \frac{\kappa \cdot n_L}{\delta}$ <p>Where,  <math>\tau</math> : Directness  L : total route length  <math>\delta</math> : The maximum number of transfer  <math>\kappa</math> : segment of the average line length  <math>n_L</math> : total number of lines of a network</p>

어려운 단점을 가진다. Levinson and El-Geneidy (2009)은 우회도를 직선거리에 대한 네트워크 거리의 비율(The ratio of network to Euclidean distance)로 정의했다. 그러므로 우회도의 산정대상은 전체 네트워크가 된다. 이 방식은 나라별로, 도시별로, 혹은 특정 하위네트워크(sub-network)별로 우회의 정도를 비교 가능하게 하는 장점을 가진다. Giacomin and Levinson

(2014)는 기존에 Levinson and El-Geneidy(2009)가 정의했던 우회도를 비가중 우회도(unweighted circuity)라고 칭했고, 새롭게 가중 우회도(weighted circuity)를 정의했다. 불특정 통행(즉, 두 random node에 대한 통행)을 여러 번 발생시켜 구한 우회도를 비가중(unweighted)이라 한다면, weighted는 통행거리가 길어질수록 우회도는 자연스럽게 줄어들기 때문에 이를 반

2) Han(2010)은 이를 '바람직한(desirable)' 교통망이라 표현했고, '완전연결' 교통망이라 부연했다. 그러나 그 속성을 이상적인 (ideal)과 더 유사하다고 판단하여 본 고에서는 이를 'ideal'로 지칭하고자 한다.  
3) Kim(1989)은 이를 '가로망의 접근도'라 칭하였으며, 가로망의 접근도를 한 지역과 통행하고자 하는 타 지역과의 물리적, 지리적 마찰을 극복할 수 있는 능력의 정도로 보았다.  
4) 최단경로에 의한 평균거리  
5) 직선거리에 의한 평균거리  
6) Under the empirical result in that circuity decreases as trip length increases.  
7) 국가간 비교를 시행했으나 도시 내 통행 data를 활용하였다. 즉, 국가별 절대비교를 하기에는 무리가 있다.

영하지 않으면 전체 우회도는 저평가된다는 생각이 반영된 측도라 할 수 있다. 구체적으로, Giacomini and Levinson(2014)에서 산정한 비가중우회도는 60km 이하 통행을 대상으로 이를 5km단위인 12개의 거리구간으로 나눴다. 이 12 구간에 대한 비가중우회도를 각각 구하고 여기에 그 구간에 해당되는 구간거리를 각각 곱한 뒤 이를 총 통행거리로 나눠서 비가중우회도를 산정해냈다.

한편, 비용에 민감한 화물 교통분야에서도 우회의 개념은 수리적으로 정의된바 있다. 대표적으로 Campbell(1990)은 최소운송비용(minimal cost)이 한 쌍의 기종점(또는 기종점 쌍의 평균치)을 별도의 우회 없이 운행하는데 소요되는 비용으로 가정할 때 이를 초과하는 비용을 일컬어 우회 비용(Circuitry cost)이라 하였다. 일반적인 쓰임은 아니나 Campbell(1990)의 연구에서는 이러한 우회비용을 본선(line haul)의 비용 이외에 지역통행(local transportation) 및 복귀통행(back-tracking)에 대한 비용으로 보았다.

### 3. 대중교통의 직결성(노선 구분이 있는 측도)

대중교통의 직결성(directness)은 앞서 언급한 일반적인 우회계수와 다소 다른 의미로 사용되며 그 정의 또한 일반적인 우회도보다는 복잡하다(Derrible and Kennedy, 2009), 그 이유는 네트워크에서의 환승을 고려했기 때문이다. 즉, directness는 대중교통의 직결성을 판단할 때 환승을 고려한 측도라 할 수 있다.

Derrible and Kennedy(2009)이 밝힌 바와 같이 그래프이론(Graph theory)을 대중교통에 응용한 연구는 매우 드물다. 우선 대중교통, 특히 지하철의 직결성(directness)은 '환승(transfer)'에 반비례한다. 엄밀히 말하자면 Table 1에 나타난 수식에서와 같이 최대 환승 횟수( $\delta$ )에 반비례한다(Derrible and Kennedy, 2009; Derrible and Kennedy, 2010). 또한, 직결성은 '호선의 개수(the number of lines)'인  $n_L$ 에 비례한다. Derrible and Kennedy(2009)는 직결성이 일인당 승차 수(boardings per capita)와 일정수준 선형관계에 있음을 보였다( $Y=23.20x+41.70; R^2=0.426; N=19$ ).

대중교통의 직결성은 지하철 노선의 복잡도를 설명하기에 좋은 측도인 것은 분명하나, 본 연구에서 논할 '특정 노선의 효율성'의 지표로는 사용하는데 불필요한 복잡성을 내포하고 있다. 단, 이 지표 개발의 근본적 이유는 '환

승' 저항이며, 본 고에서 다루고자 하는 '한 노선의 우회도'는 환승 저항이 없을 때 거리 효율을 나타내기 때문에 간접적으로는 상호 영향이 있다 할 수 있다. 또한 이와는 별도로 보행관련 연구에서 우회도는 종종 "보행자경로의 직결성(pedestrian route directness)"이라고 표현되기도 한다(Parthasarathi et al., 2009).

### 4. 우회도 종합

Table 1에 기존 연구에서 수식화한 우회도가 정리되어 있다. 언어적 정의, 수단 및 지리적 범위, 우회도 산정 대상, 적용 대상, 수리적 정의가 정리되어 있다.

## 연구방법론

### 1. 지하철 우회 모형개발

#### 1) 도로의 우회도와 지하철의 우회도

문헌 연구에서 살펴봤듯 육상의 거리(능대가 달린 거리)는 도로와 철도의 구분이 없을 경우 실제 두 점간 최단경로(Han, 2010; Levinson and El-Geneidy, 2009), 또는 두 존간 최단경로거리(Kim, 1989)로 표현되었다. 본 연구는 이를 도로와 지하철로 구분하여 '도로 최단거리', '지하철 최단거리'로 나뉘었으며 각각 Figure 1 (b)와 Figure 1 (c)에 시각적으로 표현했다. Figure 1에서 보이는 바와 같이 점 A에서 점 B로 이동할 때, 세 종류의 거리는 모두 다를 수밖에 없다.

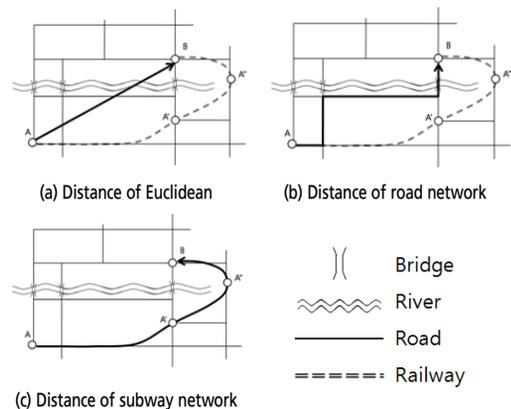


Figure 1. Distance of euclidean, distance of road network, distance of subway network

$$Dist_{ij}^{air} = (i, j) \text{ 사이의 유클리디안 거리} \quad (1)$$

$$Dist_{ij}^{car} = (i, j) \text{ 사이의 도로의 최단거리} \quad (2)$$

$$Dist_{ij} = (i, j) \text{ 사이의 지하철 거리} \quad (3)$$

where, i, j는 지하철 역

식(1)-식(3)을 이용하여 다음의 두 지표를 도출 할 수 있다.

$$D_{ij}^{car} = \frac{Dist_{ij}^{car}}{Dist_{ij}^{air}} \quad (4)$$

$$D_{ij}^{sub} = \frac{Dist_{ij}^{sub}}{Dist_{ij}^{air}} \quad (5)$$

식(4)가 도로의 우회도이며, 직선거리에 비해 도로가 얼마나 우회하는가에 대한 정량 지표로서 활용된다. 식(5)는 지하철의 우회도이며, 직선거리에 비해 지하철이 얼마나 우회하는가에 대한 정량 지표이다. 이 두 지표는 각 수단의 '네트워크'의 상황에서는 그 자체로 의미가 있으나, 특정 네트워크의 '단일 노선'의 상황에서는 식(5)가 우회를 온전히 표현하지 못할 가능성이 크다. 다시 말해,  $D_{ij}^{sub}$ 는 지하철이 i역과 j역 사이를 얼마나 우회하는가를 나타낸 지표이므로 그 수치 자체가 절대적인 의미를 가질 수 있으나 과소평가될 가능성이 있다. 한편,  $D_{ij}^{car}$ 의 산정이 지하철 노선이라는 한정적인 출발지, 도착지를 대상으로 한다면, 예컨대 i역과 j역 사이의 '도로'를 대상으로 이뤄진다면, 다소 과대평가될 가능성이 있다. 즉, 도로 전체의 우회를 산정하는 것과 지하철의 역간 도로의 우회를 산정하는 것은 다르다. 만약 한 도시의 도로의 우회도를 평가하기 위해서는 본 연구에서와 같이 지하철을 대상으로 한 한정된 (i, j)쌍을 대상으로 하면 안 되고 조금 더 전체를 대표할 수 있는 (i, j)쌍을 구성해야 한다(Levinson and El-Geneidy, 2009).

한편, 가능한 모든 (i, j) 쌍의 도로거리와 지하철거리의 평균값을 각각 식(6)과 식(7)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\sum_{(i,j) \in A} D_{ij}^{car}}{|A|} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^{car}}{\sum_{k=1}^{n-1} k} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^{car}}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{(i,j) \in A} D_{ij}^{sub}}{|A|} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^{sub}}{\sum_{k=1}^{n-1} k} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^{sub}}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (7)$$

where,

|A| : 한 노선에서 표현 가능한 모든 두 역들의 조합

## 2) 도로에 대한 철도의 우회도

$$C_{ij} = \frac{D_{ij}^{sub}}{D_{ij}^{car}} = \frac{Dist_{ij}^{sub}}{Dist_{ij}^{car}} \quad (8)$$

식(8)은 도시철도의 우회계수를 도로의 우회계수로 나눈 값이다. 즉, 도시철도가 도로에 비해 얼마나 우회를 하였는지에 대한 것을 나타내주는 지표로 해석할 수 있다. 다시 말해, 식(8)은 도로를 기준으로 지하철 우회의 정도를 나타낸 것이다. 임의의 두 역간 지하철의 우회와 도로의 우회의 정도가 정확하게 같다면  $C_{ij}$ 는 1이 될 것이며, 지하철의 우회가 클수록  $C_{ij}$ 값은 증가하게 된다. 이를 본 연구에서는 '도로에 대한 철도의 우회도'라 명하기로 한다.

또한  $C_{ij}$ 도 모든 (i, j) 쌍에 대한 평균값을 산출할 수 있는데 식(9)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\sum_{(i,j) \in A} C_{ij}}{|A|} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij}}{\sum_{k=1}^{n-1} k} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij}}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (9)$$

다음 장에서 지하철 3호선을 대상으로 식(1)부터 식(9)를 산정하고 이에 대한 의미를 고찰해 볼 것이다.

## 2. 지하철 3호선 구간의 $C_{ij}$ 우회도 산정

Figure 2는 한국교통연구원 국가교통 DB센터에서 제공하는(실제 좌표 기반) 2011년 서울시 및 경인지역 도시 철도 노선 및 서울시 및 경기지역의 도로 네트워크 shp파일을 이용하였다. 이 shp파일을 ArcGIS(Ver. 10.2)상에 구성하여, ' $Dist_{ij}^{air}$ '는 식(10)을 기본으로 하여 산정하였고, Measure 기능을 통해 검증하였다. 두 점이  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ 의 위경도 좌표를 가진 경우, 이 사이의 유클리디안 거리는 식(10)을 사용했다(Cassi and

Plunket, 2012).

$$Dist_{ij}^{air} = 2 \times a \times \arcsin(s) \quad (10)$$

$$s = \frac{\sin(x_1) * \sin(x_2) + \cos(x_1) * \cos(x_2) * \cos(|\Delta y|)}{2}$$

'Dist<sup>car</sup>'는 Arc Toolbox 기능 중 Network Analyst의 최단거리 찾기 기능을 통해 산정하였다. 'Dist<sup>sub</sup>'는 shp파일의 속성 자료로 제시된 도시철도 노선의 역간 거리를 이용하여 산정하였다.

Table 2에 도로의 우회계수 ( $D_{ij}^{car} = \frac{Dist_{ij}^{car}}{Dist_{ij}^{air}}$ )의 계수 값이 가장 큰 5개 (i, j) 쌍과 계수 값이 가장 작은 5개 (i, j) 쌍을 각각 비교했고 사이역의 개수도 나타났다. 우선, 하위 계수 값을 가진 5개의 (i, j) 쌍을 살펴보면 그 값이 거의 1에 근접해있고, 사이역의 개수 또한 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 아래에서 구체화시킬 지하철 3호선의 모든 (i, j) 쌍 우회도의 평균값이 1.15임을 감안하면 1에 근접한 값은 두 역간의 연결 모양이 거의 직선에 가까운 것을 의미한다. 또한, 지하철 3호선의 평균적인 (i, j) 쌍의 사이역의 개수는 13.7개역임을 감안하면 하위 5개의 (i, j) 쌍의 사이역의 개수가 거의 0에 가까운 것 (즉, 인접역인 것)은 두 인접역간 직선으로 연결 될 확률이 크다는 것을 의미한다.

그러나, 항상 두 인접역간의 도로나 철도의 우회계수가 1에 가까운, 즉 직선이 되는 것이 아님이 우회계수가 높은 상위 2개 (i, j) 쌍을 통해 알 수 있다. 대청-학여울 구간을 Figure 2를 통해 확인해 보면 비록 두 역이 인접역이지만 그 굴곡이 매우 급작스럽고 심하여 높은 우회계수 값인 1.708이 잘 설명되고 있다. 구과발-지축 구간 또한 거의 직각에 가까운 굴곡이 이뤄진 구간으로서 높은 우회계수 값(1.611)을 적절히 설명하고 있다. 우회도 1.488을 보



Figure 2. Expressed 3rd line subway in ArcGIS

인 연신내-화정 구간의 경우는 사이역이 5개역으로서 'ㄷ'자의 심각한 우회를 적절히 설명하고 있다.

지하철의 우회계수 ( $D_{ij}^{sub} = \frac{Dist_{ij}^{sub}}{Dist_{ij}^{air}}$ ) 또한 도로의 경우와 마찬가지로 상위 계수 값 5개의 (i, j) 쌍과 그 사이역의 개수를 정리하였다. 우선, 지하철의 하위 5개의 (i, j) 쌍의 우회 계수 값은 도로에 비해 더 낮고, 상위 5개의 (i, j) 쌍의 계수 값은 더 높게 나타나 있다. 우선 하위 5개 (i, j) 쌍의 본 연구의 대상지가 '지하철 역'을 중심으로 하기 때문으로서 갑작스러운 우회가 없을 경우 지하철 노선의 형태가 도로에 비해 훨씬 더 직선의 형태로 보장되는 경향이 있기 때문이다. 지하철 3호선의 평균적인 (i, j) 쌍의 사이역의 개수는 13.7개역임을 감안하면 하위 5개의 (i, j) 쌍의 사이역의 개수가 거의 0에 가까운 것(즉, 인접역의 경우)은 두 인접역간 직선으로 연결 될 확률이 크다는 것을 의미한다. 상위 5개 (i, j) 쌍의 값을 살펴보면, 도로에 비해 훨씬 높은 값을 확인할 수 있는데, 이는 도로가 지하철에 비해 밀도가 높아서 '어느 정도의 우회가 있다 하더라도' 이를 높은 도로밀도로 어느 정도는 극복하고 있다는 의미이다. 반대로 지하철의 경우 단일노선에서 일단 우회가 이뤄지면 대안노선이 존재치 않기 때문에 높은 우회계수를 개선할 방법이 없게 되어있다.

예를 들어, 가장 높은 우회계수를 보인 학여울-압구정 구간을 살펴보면 'ㄷ'자의 굴곡을 확인할 수 있다. 그 밖에 나머지 상위 4개 (i, j) 쌍의 경우도 모두 이 강남 구간에서 발생하는 굴곡으로 확인된다. 한편, 철도의 직선거리에 대한 우회계수 값의 절대적 의미를 살펴보면, 이 값이 2라는 의미는 철도의 길이가 직선길이에 비해 두 배만큼 더 길다는 것이다. 상위 5개 (i, j) 쌍의 경우는 모두 불필요하게 두 배의 길이를 탑승해야 하는 불편함을 감수해야 한다는 것을 의미한다. 평균값을 살펴 보자면, 1.38을 보였는데, 이 값을 도로의 직선거리에 대한 우회계수의 평균값 ( $\frac{\sum_{(i,j) \in A} D_{ij}^{car}}{|A|}$ )인 1.15에 비해 매우 높다. 이 또한 앞서 언급했듯 도로의 밀도가 단일 지하철 노선의 밀도보다 높기 때문에 나타난 현상으로 해석할 수 있다.

물론, 교대에서 3호선-2호선 환승이나 남부터미널, 고속터미널의 정차는 또 다른 형태의 편익이 있을 수 있으나 이는 본 연구가 강조하고자 하는 지리적 차원에서의 우회에 대한 논지를 흐릴 염려가 있으므로 다음 장에서 이 부분에 대해 별도로 논의토록 한다.

마지막 측도인  $C_{ij}$ 는 철도의 우회도를 도로의 우회도

Table 2. Quantified detour factors(3rd line subway)

Formular	Definition	Detour factors (Top 5)	Number of Between O/D <sup>8)</sup>	Detour factors (Bottom 5)	Number of Between O/D	Average of Detour factor	Standard of Detour factor
$D_{ij}^{car} = \frac{Dist_{ij}^{car}}{Dist_{ij}^{air}}$	Detour factor (Distance of road network by Euclidean)	1.708 (Daecheong -Hangyeoul)	0	1.0010 (Madu -Jeongbalsan)	0	1.15	0.58
		1.611 (Gupabal -Jichuk)	0	1.0013 (Hangyeoul -Daechi)	0		
		1.488 (Yeonsinnae -Hwajeong)	5	1.0015 (Juyeop -Daehwa)	0		
		1.416 (Irwon -Dogok)	3	1.0017 (Daechi -Maebong)	1		
		1.404 (Daechi -Jamwon)	6	1.0020 (Euljiro 3-ga -Jongno 3-ga)	0		
$D_{ij}^{sub} = \frac{Dist_{ij}^{sub}}{Dist_{ij}^{air}}$	Detour factor (Distance of subway network by Euclidean)	2.301 (Hangyeoul -Apgujeong)	9	1.00002 (Madu -Jeongbalsan)	0	1.38	0.70
		2.288 (Daechi -Apgujeong)	8	1.00014 (Geumho -Yaksu)	0		
		2.160 (Dogok -Apgujeong)	7	1.00015 (Euljiro 3-ga -Jongno 3-ga)	0		
		2.157 (Daecheong -Apgujeong)	10	1.00130 (Daechi -Dogok)	0		
		2.033 (Daechi -Sinsa)	7	1.00133 (Daechi -Maebong)	1		
$C_{ij} = \frac{D_{ij}^{sub}}{D_{ij}^{car}} = \frac{Dist_{ij}^{sub}}{Dist_{ij}^{car}}$	Detour factor (Distance of subway by Distance of road network)	1.930 (Daechi -Apgujeong)	8	0.70202 (Daecheong -Hangyeoul)	0	1.20	0.62
		1.892 (Hangyeoul -Apgujeong)	9	0.72335 (Gupabal -Jichuk)	0		
		1.861 (Dogok -Apgujeong)	7	0.74574 (Dongguk Univ -Chungmuro)	0		
		1.734 (Maebong -Apgujeong)	6	0.76096 (Seoul Nat'l Univ. of Education -Express Bus Terminal)	0		
		1.728 (Ogeum -Apgujeong)	15	0.81956 (Yaksu -Chungmuro)	1		

로 나눈 값으로, 그 의미는 “철도는 도로에 비해서 얼마나 우회를 하는가?”를 정량적으로 나타내는 지표가 된다. 하위 5개의 (i, j) 쌍의 우회계수 값이 1보다 작은 이유는 그 역들 간의 지하철의 거리가 도로의 거리보다 더 작기 때문이다. 일반적으로 지하철의 우회가 크다는 것은 도로의 우회도 크다는 것을 의미하지만, 그 굴곡이 반영된 지하철의 거리가 그나마 동 구간에서의 도로의 거리보다 작다는 것을 의미한다. 상위 5개의 (i, j) 쌍은 도로 네트워크에 비해 지하철역들을 대상으로 했음에도 불구하고 지하철의 역간 거리가 거리적으로 불리한 상황을(즉, 도로에 비해 매우 우회가 심한 상황)을 극단적으로 보여준다. 결론적으로, 지하철 3호선의 경우 모든 (i,

j) 쌍에 대한 평균 값인  $\frac{\sum_{(i,j) \in A} C_{ij}}{|A|}$  이 1.2로 산정되었는

데, 이 의미는 지하철 3호선은 노선 내에서의 통행의 경우 도로에 비해 1.2배 거리손실을 가지며, 이는 다른 말로, ‘거리적으로 1.2배 우회를 한다.’라고 표현할 수 있다.

### 토의

Figure 3은 사업의 목적과 정책결정자의 가치에 따라 철도역의 위치가 결정되고 그 노선의 형태가 결정되는 사례를 보여주고 있다 (Abler et al.(1971) in Han (2010)). 이처럼 노선의 우회 길이(즉, 비용)의 문제와 운영 수익간의 상관관계를 통한 노선의 선정을 결정하는 것은 고전적인 철도노선 선정의 방식이라 할 수 있다. Figure 3의 (a)와 (c)를 비교해보면, 비용은 단지 2.3만 큼 증가시켰는데 수익은 12만 큼 증가된 것을 볼 수 있다.

8) 지하철 3호선의 사이역의 개수의 평균 값은 13.7개 역; 3호선의 총 역의 개수는 43개임.

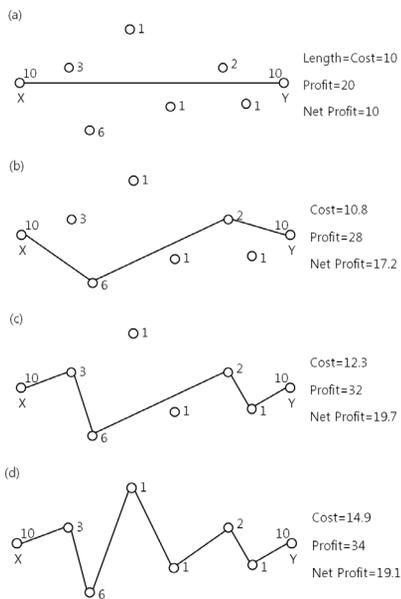


Figure 3. Rail position for maximizing profit (Han, 2010)

순이익적 관점(profit-cost)에서는 Figure 3의 (c)가 선택되었다. 즉, 이 경우 직결노선 Figure 3 (a)가 선택되지 않고, 더 높은 우회를 보인 (c)가 선택된 것은 수요가 집중되는 지점의 우회는 운영사의 순이익을 높이는 수단이 된다는 점을 보여주는 현상이라 할 수 있다.

지하철 우회는 '경제성'을 확보하기 위한 한 가지 확실한 방식으로 이해되어 왔다. 이와 관련하여 본 장에서는 세 가지 사안에 관해 토의해보고자 한다. 첫째, 이러한 비용과 수익의 구조 속에 승객들의 집단적 시간손실에 대한 요소와 지하철의 전반적인 시간경쟁력 하락의 가치는 고려되지 않고 있다는 점이다. 둘째, Figure 3은 지역간 통행에 더 적당한 모형이라 할 수 있다. 즉, 도시들이 불규칙적으로 산재되어 있는 경우 최단 거리선에 포함이 되지 않는 경우 경제성의 확보를 위해 우회는 정당화 될 수밖에 없다. 하지만, 일반적으로 도시내부의 수요는 지역간 수요보다 더 균등하게 분포되어(evenly distributed)있다고 할 수 있다. 즉, 최근 도시 내부의 수요의 집중이 강한 우회를 끌어낼 만큼 현저하지 않은 경향을 보인다. 단, 과거의 서울의 강남 지역이 개발될 당시에는 강남 내부의 수요 분포가 균등하지 않았다는 사실 또한 상기할 필요가 있다. 셋째, 비용-편익 분석적 관점에서 본 연구가 제안한 내용이 그 틀 안에서 이뤄지

지 않고 있기 때문에 비용-편익 분석의 틀에 본 연구의 방법론과 결론을 투영할 경우 논란이 생길 소지가 있다. 특히, 본 연구가 우회의 경제적 손실의 예로 승객의 집단적 시간손실이라는 의견을 제시했고, 운영자의 영업이익과의 trade-off 관계에 관해서 언급은 했으나 이를 경제성 분석에 포함시킬지의 여부는 본 연구의 scope에 벗어난다고 판단하고 있다. 비용-편익 분석은 사업성을 판단하는 주요한 방식 중 하나이며, 현대 우리 사회가 채택하고 있는 방법임은 분명하나 그 범용성과 적용 편리성 때문에 그 방법론의 불완전성이 온전히 정당화되는 것은 아니라고 판단한다. 향후 경제성분석안에서 이러한 우회의 영향 (그로인한 승객의 집단적 시간손실과 영업자의 손실 등)을 경제성분석에 포함시키는 것이 적절할지에 관해서는 별도의 연구가 필요해보인다.

한편, 최근 들어 통행속도와 coverage<sup>9)</sup>는 trade-off 관계에 있음을 설명이 구체화 되고 있다 (Derrible and Kennedy, 2009). 높은 coverage가 통행속도를 저하시키고 그 결과 총 통행시간이 늘어나는 trade-off 관계에 대해서는 Lam and Schuler(1981)과 Lam and Schuler(1982)의 연구를 참고할 수 있다.

직결로 인한 승객의 통행시간 절감은 운영자의 수익을 단기적으로 하락시키는 요인이 될 것이 분명하다. 반대로 우회로 인한 대표적 편익이라고 할 수 있는 더 많은 승객을 실어서 얻는 수익 창출은 운영자가 놓치고 싶어 하지 않는 경영 전략일 것이다. 본 고에서 강조하고 싶은 것은 이 두 가지 가치 즉, (a) 승객들의 집단적 통행시간 절감 및 지하철의 시간경쟁력 하락과 (b) 운영자의 수익 창출은 Trade-off관계에 있다는 것이다. 또한 우리 사회가 대중교통을 장려한다는 합의에 이른다면 이 trade-off 관계 속에서 마땅히 (a)의 가치를 높이기 위해 (b)를 희생시켜야 하는 결과 또한 도출될 수도 있을 것이다. 더 나아가 기존에 우회가 심한 노선에 대한 직결을 시도함으로써 (a)의 가치를 높이는 구체적 방안이 논의되어야 할 것이다.

## 결론

Graph Theory는 본질적으로 교통연구와 관련이 깊다. 18세기 Euler가 러시아의 Königsberg의 일곱 개의 교량을 보고 Graph Theory를 창안한 이래, 1960년 1970년대 많은 연구가 교통과 물류 연구에 응용되었으나

9) 역을 중심으로 일정거리 (보통 500m)의 반경을 치고 이를 모든 역에 적용한 뒤 이에 대한 면적을 계산하여 전체 도시의 면적으로 나눈 값; 이 값이 크면 대중교통의 수혜인원이 많아진다는 것을 의미

1970년대 중반 이후 교통수요모형이 학계에 주요 관심사로 떠오르기 시작하며 이 Graph Theory의 교통연구에 응용은 사그라졌음을 언급할 필요가 있다(Derrible and Kennedy, 2009). 다시 말해, 이러한 교통 네트워크를 개량적으로 판정하는 기준을 개발하고 이를 응용하는 연구는 여전히 유효함에도 불구하고 1970년대 이후로는 많은 연구가 축적되지는 않았음을 상기할 필요가 있다.

학계는 지금까지 지하철의 도로에 대한 경쟁력의 저하를 다양한 관점에서 논의해왔는데, 그 경쟁력을 지리적 관점에서 정량화시킨 사례는 많지 않았으며, 그 경쟁력이 '어느 정도' 떨어지는지를 체계적으로 산정하는데 한계를 보였다. 본 연구에서는 비록 환승을 고려하지 않은 단일 노선의 경우를 살펴봤지만 지하철 3호선이 평균적으로 도로에 비해 1.2배 더 긴 거리를 운행해야 한다는, 즉 거리 경쟁력이 20% 떨어진다는 결과를 도출하였다. 본 연구는 여전히 많은 한계점을 내포하고 있다. 우선, 승객수와 운영비용적 관점, 통행속도적 관점, 통행비용적 관점, 지하철의 혼잡도 문제 등을 철저히 배제하고 지리적 관점에만 집중하였다. 특히, 기존의 노선의 형태의 주요 의사결정 과정인 교통계획에서 고려하는 요인과의 검토 또한 본 연구가 살피지 못한 부분이다.

둘째, 단일 노선으로 연구의 범위를 줄였기 때문에 환승을 통한 지하철 노선의 잠재적 우회도 개선을 일정 부분 무시되었다. 첫 번째 한계점은 명백히 향후 연구에서 적절하게 반영이 되어야 할 것이다. 두 번째 한계점의 경우 왜 '환승'을 '통행저항'이라고 부르는지, 수도권 지하철의 '환승시간 개선'이 대중교통정책의 우선순위에서 왜 1위를 차지했는지(The Seoul Institute, 2014)를 살펴보면, 환승을 고려하는 것이 어찌든 대중교통 우회도는 약간 향상시킬지 몰라도, 총 통행시간 및 편익도, 더 나아가 대중교통의 경쟁력을 종합적으로 더 떨어뜨릴지도 모른다는 가설을 하도록 만든다. 이러한 두 상충하는 관점의 trade-off를 살펴보는 것도 향후 연구로서 의미가 있을 것이다. 더 나아가, 두 번째 한계점은 향후 단일 노선들의 굴곡과 환승승객을 제외한 그 노선의 승하차 인원의 정보의 관계를 분석해 볼 수도 있을 것이다. 또한, 이러한 단일 노선에서의 관계성이 전체 네트워크에서 어떤 영향을 가지는지도 향후 남은 과제라 할 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from

Transportation and Logistics Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

## REFERENCES

- Abler R., Adams J. S., Gould P., (1971), *Spatial Organization: the Geographer's View of the World*, New Jersey: Prentice-Hall.
- Ballou R. H., Rahardja H., Sakai N. (2002), Selected Country Circuitry Factors for Road Travel Distance Estimation, *Transportation Research Part A*, 36(9), *Transportation Research*, 843-848.
- Campbell J. F. (1990), Freight Consolidation and Routing with Transportation Economies of Scale, *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(5), *Transportation Research*, 345-361.
- Cassi L., Plunket A. (2012), Research Collaboration in Co-inventor Networks: Combining Closure, Bridging and Proximities, MPRA paper No. 39481, posted 17, Munich Personal RePEc Archive, 42.
- Derrible S., Kennedy C. (2009), A Network Analysis of Subway Systems in the World Using Updated Graph Theory, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2112, *Transportation Research Board*, 17-25.
- Derrible S., Kennedy C. (2010), Evaluating, Comparing, and Improving Metro Networks, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2146, *Transportation Research Board*, 43-51.
- Giacomin D. J., Levinson D. M. (2014), Road Network Circuitry in Metropolitan Areas, *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers, Report/Paper Numbers: 14-0955*, *Transportation Research Board*, 1-19.
- Gyeonggi Research Institute (2010), A Study on the Improvement of the Congested Bus Ridership During Rush Hour (광역버스 차내 혼잡도 개선방안)
- Han J. S. (2010), *Geography of Transportation (교통지리학의 이해)*, Hanul Publishing Company, 279.
- Kim H. C. (1989), *Analysis of Spatial Population*

Distribution and Network Accessibility in Urban Areas, J. Korean Soc. Transp., 7(1), Korean Society of Transportation, 43-55.

Lam T N., Schuler H J. (1981), Public Transit Connectivity, California Department of Transportation.

Lam T. N., Schuler H. J. (1982), Connectivity Index for Systemwide Transit Route and Schedule Performance, Transportation Research Record, 854, Transportation Research Board, 17-23.

Levinson D., El-Geneidy A. (2009), The Minimum Circuitry Frontier and the Journey to Work, Regional Science and Urban Economics, 39(6), Regional Science and Urban Economics, 732-738.

Miller H. J., Shaw S. L. (2001), Geographic Information Systems for Transportation: Principles and Applications, Oxford University Press.

Ministry of Government Legislation (2014), Sustainable Transportation Logistics Development Act (지속가능 교통물류발전기본법)

Parthasarathi P., Hochmair H., Levinson D. (2009), The Influence of Network Structure on Travel Distance.

Seoul Development Institute (2008), Network Reshuffle for Seoul Metro (도시철도 노선개편 실행방안).

Takashi O. (1977), Basis of quantitative geography (計量地理學の基礎), Daimei-do (大明堂), Kyoto, Japan.

The Seoul Institute (2014), Evaluation of the Quality of Public Transport Commuting in Seoul (대중교통 서비스 개선을 위한 서울시 출근통행의 질 평가).

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제72회 학술발표회 (2015.2.14)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

☞ 주 작성자 : 이재민

☞ 교신저자 : 김남석

☞ 논문투고일 : 2014. 12. 5

☞ 논문심사일 : 2015. 1. 23 (1차)

2015. 3. 24 (2차)

2015. 4. 13 (3차)

☞ 심사판정일 : 2015. 4. 13

☞ 반론접수기한 : 2015. 10. 31

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필