한국철도학회논문집 제17권 제6호 ▌pp. 433-442 (2014년 12월)
JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY VOL.17, NO.6 ▌pp. 433-442 (December 2014)
ISSN 1738-6225(Print)
ISSN 2288-2235(Online)

도시철도 교통량 배정 알고리즘의 적합성 평가

Evaluation of the Performance of Transit Assignment Algorithms for Urban Rail Networks

정동재 · 장수은*
Dongjae Jung · Justin S. Chang

Abstract This paper evaluates the performance of transit assignment algorithms for urban rail networks. The accuracy of the algorithms is essential not just for travel forecasting but also for the area of applications such as the assessment of road vulnerability and the fare adjustments between train operating companies. Nonetheless, the suitability and caveats for the series of computational steps have not yet been much discussed. This study thus considers the characteristics that are appropriate for investigating Seoul rail travelers using three representative transit assignment algorithms: the optimal strategy algorithm, route choice algorithms, and the Dial's algorithm. Both the theoretical foundation and the empirical performance are examined. The results demonstrate that the Dial's algorithm is superior in terms of the theoretical soundness and the computational efficiency.

Keywords : Urban Railways, Transit assignment, The optimal strategy algorithm, Route choice algorithms, The dial's algorithm

초 록 이 연구는 도시철도 교통량 배정 알고리즘의 적합성 평가를 목적으로 수행되었다. 이 알고리즘의 정확도는 교통수요 예측뿐만 아니라 네트워크의 취약성 분석이나 철도 운영기관간 운임수입 정산 등의 응용분야에서도 중요한 요소이다. 그럼에도 불구하고 알고리즘의 적합성이나 발전방향에 대한 논의는 부족하였다. 이에 본 연구는 대표적 교통량 배정 알고리즘인 최적전략 알고리즘, 경로선택 알고리즘, Dial 알고리즘을 대상으로 수도권 도시철도 이용자의 통행행태 연구에 적합한 알고리즘의 특성에 대하여 논의하였다. 이를 위해 각 알고리즘의 이론적 가정을 검토하고, 수도권 도시철도 네트워크에 적용해 그 성능을 살펴보았다. 그 결과 Dial 알고리즘이 이론적 가정의 합리성과 분석단위에 따른 계산적 효율성 측면에서 도시철도 이용자의 통행행태 분석에 우수한 것으로 나타났다.

주요어 : 도시철도, 교통량 배정, 최적전략 알고리즘, 경로선택 알고리즘, Dial 알고리즘

1. 서 론

교통량 배정 알고리즘은 통행자가 어느 경로를 이용하는지를 분석하는 기법으로 전통적 교통수요 예측과정의 네 번째 단계에 적용된다. 이 단계에서 예측된 통행저항은 다시 교통수요 예측과정의 다른 단계에 입력자료로 사용된다. 예컨대, 경로의 통행저항은 주거지 선택(통행발생), 통행분포, 교통수단 선택 모형에서 중요한 독립변수이다. 이는 교통량 배정 알고리즘의 정확도가 교통수요 예측의 모든 과정에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 또한 재난상황에 대한 네트워크의 취약성 분석이나 수도권 광역·도시철도 운영기관간 운임수입 정산 등의 응용분야에서도 교통량 배정 알고리즘의 정확도에 대한 요구가 높다.

이에 따라 교통량 배정 알고리즘의 적합성 평가가 주목 받고 있으며, 최근에는 대중교통 교통량 배정 알고리즘에 대한 평가도 일부 시도되었다. 예컨대, Liu *et al.* [1]은 대중교통 교통량 배정 알고리즘을 정태적 교통량 배정 기법(전량 배정기법, 확률적 경로선택 모형, 이용자 균형 기법), 동태적 교통량 배정 기법 등으로 분류하고 각 알고리즘의 특성을 이론적 측면에서 광범위하게 고찰하였다. 또한 Kato *et al.* [2]는 동경 대도시권의 도시철도망을 대상으로 다항 로짓 모형, 구조화된 다항 프로빗 모형, 이용자균형 기법, 로짓기반 확률적 이용자균형 기법, 프로빗기반 확률적 이용자균형 기법, 전량 배정기법 등 6개 알고리즘의 성능(performance)을 평가하였다.

그러나 국내 학계에서는 교통량 배정 알고리즘의 적합성과 발전방향에 대한 논의가 활발하지 않다. 특히 도시철도 부문 교통량 배정은 지난 십여 년 동안 최적전략 알고리즘(the Optimal strategy algorithm)이 표준적으로 적용되고 있으나, 이 알고리즘이 도시철도 이용자의 통행행태 분석에 적합한지에 대한 연구는 충분하지 않다. 이에 본 연구는 최적전략 알고리즘을 포함하여 경로선택 알고리즘, Dial 알고리

*Corresponding author.
Tel.: +82-2-880-1444, E-mail : jsc@snu.ac.kr
©The Korean Society for Railway 2014
http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.6.433

즘을 대상으로 도시철도 이용자의 통행행태 연구에 적합한 알고리즘의 특성에 대하여 논의한다. 특히 통행자의 인지오차에 대한 가정의 합리성과 링크, 경로, 전략 등 분석단위에 따른 연산 효율성을 중심으로 알고리즘을 평가하고자 한다.

이를 위해 먼저 2장은 최적전략 알고리즘, 경로선택 알고리즘, Dial 알고리즘의 이론적 특성을 살펴본다. 3장에서는 세 알고리즘을 수도권 도시철도의 일부 네트워크에 적용하여 성능을 평가하고 시사점을 도출한다. 이어서 4장에서는 3장에서 도출한 시사점을 바탕으로 알고리즘의 적합성을 비교·평가한다. 5장은 본 연구의 결과를 요약하고 향후 연구과제를 정리한다.

2. 이론적 배경

교통량 배정 알고리즘은 통행자의 인지오차를 어떻게 가정하는지(결정적, 확률적 등), 시간을 명시적으로 고려하는지(정태적, 동태적 등), 혼잡효과를 고려하는지(반복적, 비반복적 등), 분석단위가 무엇인지(링크기반, 전략기반, 경로기반 등) 등에 따라 다양하게 분류될 수 있다. 최적전략 알고리즘은 결정적, 정태적, 비반복적, 전략기반의 특성을 띤다. 경로선택 알고리즘의 특징은 확률적, 정태적, 비반복적, 경로기반으로 요약할 수 있다. 마지막으로 Dial 알고리즘은 확률적, 정태적, 비반복적, 링크기반 알고리즘의 유형에 포함될 수 있다.

2.1 최적전략 알고리즘

Spiess and Florian [3]의 최적전략 알고리즘은 대중교통 이용자의 노선선택과 환승통행 행태를 모사하기 위해 고안되었다. 통행자는 선택가능한 대안(the set of attractive lines) 중 먼저 도착하는 서비스 노선에 탑승하여 통행하는 것으로 전제한다. 이 가정은 한 지점에서 여러 서비스 노선을 이용할 수 있고, 동일 구간에서 유사한 통행저항을 경험하는 버스 이용자의 통행행태와 부합한다. 그러나 정거장이 노선별로 떨어져 있거나, 동일 구간이라도 통행저항이 크게 다를 수 있는 철도부문의 특성과는 거리감이 있다.

최적전략 알고리즘은 이용자의 통행행태를 전략과 최적전략의 개념으로 표현한다. 전략은 출발지에서 목적지까지 통행하는 동안 이용자가 선택할 수 있는 승차, 하차, 차내통행, 환승, 대기 등 통행요소를 의미한다. 최적전략은 총 예상통행시간을 최소로 하는 전략의 집합이다. 여기서 총 예상통행시간은 승차시간, 승차시간 가중치, 대기시간 인자, 대기시간 가중치, 접근시간 가중치 등으로 가중 합산한 통행저항이다. 최적전략 알고리즘은 최적전략에만 교통량을 배정하는데, 최적전략은 경우에 따라 다중경로 집합으로 정의될 수 있다.

최적전략 알고리즘에서 경로의 이용확률은 이용자의 효용과 직접적으로 무관한 결정론적 방식으로 산출된다. 즉, 식 (1)과 같이 링크(전략)의 이용확률은 노선의 운행빈도 비율로 정의된다.

$$P_a = \frac{f_a}{\sum_{a' \in A_i} f_{a'}}, \forall a \in A_i \tag{1}$$

여기서, P_a는 노드 i와 j를 연결하는 링크 a의 이용확률, f_a는 링크 a의 서비스 운행빈도, A_i는 노드 i에서의 최적전략이다. 따라서 운행빈도 이외의 서비스 수준이 변하여도 최적전략이 변하지 않으면 링크(전략)의 이용확률은 운행빈도의 비율로 고정된다. 이용자의 경로선택 행태가 운행빈도에 의존적인지 또는 이러한 결정론적 가정이 합리적인지는 검토의 대상일 것이다.

2.2 경로선택 알고리즘

경로선택 알고리즘은 통행자가 효용이 가장 높은 경로를 선택한다고 가정한다. 일반적으로 효용은 관측할 수 있는 고정효용과 관측할 수 없는 확률효용으로 구분되는데, 확률효용이 Gumbel 분포를 따른다고 가정하면 로짓모형에, 정규분포를 따른다고 가정하면 프로빗모형에 바탕을 둔다. 가장 폭넓게 적용되는 로짓모형의 경로선택 확률은 식 (2)와 같다.

$$P_{od}^k = \frac{\exp(V_{od}^k)}{\sum_{k'} \exp(V_{od}^{k'})} \tag{2}$$

여기서, P_{od}^k, V_{od}^k는 각각 출발지 o와 도착지 d 사이를 잇는 k 번째 경로의 선택확률과 효용함수이다. 효용함수는 경로의 서비스 수준 변수, 통행자의 사회·경제적 변수 등 경로선택에 영향을 미치는 독립변수로 정의된다. 독립변수의 종류와 영향력은 시간적, 공간적 범위에 따라 다를 수 있는데(Table 4 참조), 이를테면 Raveau *et al.* [4]는 지하철 노선의 굴곡도도 경로선택에 영향을 미치는 유의한 변수라고 보고하였다. 따라서 효용함수를 범용적으로 적용하기 위해서는 충분한 조사와 연구가 수반되어야 한다.

한편, 경로의 효용과 선택확률을 구하기 위해서는 경로에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 출발지와 도착지 사이에 존재하는 경로를 탐색하는데, 이 과정을 경로나열(path enumeration)이라고 한다. 경로나열에 드는 시간과 비용은 네트워크가 복잡할수록 기하급수적으로 증가하여 실제 네트워크를 대상으로 모든 경로를 나열하기는 사실상 불가능하다. 이러한 경로나열 문제를 극복하기 위해 전체 경로집합에서 일부 경로만을 대안경로 집합에 포함시키는 방법론이 있지만 [5-10], 대안경로 집합을 설정하는 보편적 기준은 아직 보고되고 있지 않다. 대안경로 집합에 포함되는 경로의 수와 선정 기준 등을 임의로 설정할 경우 오차의 원인이 될 수 있으며, 이와 관련하여 Bekhor *et al.* [11]은 대안경로 집합의 크기에 따라 교통량 배정 결과가 달라지는 것을 예시한 바 있다.

2.3 Dial 알고리즘

Dial 알고리즘 [12]는 도로 교통량 배정을 목적으로 고안된 확률적 알고리즘으로서 로짓모형을 기반으로 한다. 로짓

모형의 가정으로 인해 대안 경로의 상관성(correlation)을 고려하지 못하는 단점이 있으나, 도시철도망처럼 대안 경로간 상관성이 적은 네트워크에서는 큰 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다[13]. 오차항의 분포를 동일하게 가정해서 생기는 한계는 파라미터 θ를 통해 완화할 수 있다.

θ는 통행자의 인지오차를 조절하는 파라미터이다. 예컨대, θ가 커지면 통행자의 인지오차가 줄어들어 비교우위에 있는 경로를 이용할 확률이 커지고, 반대로 θ가 작아지면 통행자의 인지오차가 커져서 비교우위가 낮은 경로를 선택할 확률이 높아진다. Dial 알고리즘은 θ의 정산만으로 다양한 경로 선택 행태를 모사할 수 있고, 많은 변수를 요구하지 않는다. θ의 정산은 Robillard [14]의 우도함수를 최대로 하는 θ^*를 추정해서 수행할 수 있다. 여기서, θ^*는 식(3)을 만족하는 θ의 해이다.

$$\sum_{a \in R^k} x_a^k c(a) - T^k \sum_{a \in R^k} c(a) P(a^k) = 0 \qquad (3)$$

여기서, $P(a^k)$, x_a^k는 각각 k 번째 출발지-도착지 구간 통행에 대한 링크 a의 이용확률과 관측교통량이다. T^k, R^k는 각각 k 번째 출발지-도착지 구간의 총 관측교통량과 이용된 링크집합이고, $c(a)$는 링크 a의 통행저항이다.

Dial 알고리즘은 링크와 노드의 속성만을 이용해서 연산하기 때문에 경로나열 문제에서 자유롭다. 또한 효율적 경로(efficient paths)를 정의하여 비합리적인 경로를 사전에 제거하기 때문에 계산적으로도 효율적이다. 따라서 대규모 네트워크 분석에 용이하다. 다만, Dial 알고리즘으로 전체 도착지에 한꺼번에 배정할 경우 노드에 연결된 링크들의 상대적인 이용확률만을 연산하므로, 특정 k 번째 출발지-도착지 간 링크 a의 이용 확률 $P(a^k)$는 Van Vliet [15]가 제안한 방법으로 산정해야 한다.

3. 알고리즘의 적용

3.1 분석자료

알고리즘의 적합성 평가를 위한 관측교통량은 한국철도공사 출처의 2009～2011년 4월 기준 '월별 지하철 여객 수송실적 자료'를 일평균 교통량으로 환산한 값이다. 그런데 이 자료는 역간 O/D량이므로 통행자가 이용한 실제 경로를 정확히 알 수 없는 한계가 있다. 본 연구는 지하철 여객 수송실적 자료에서 환승역이 노선별로 구분(예를 들어, 2, 4호선의 환승역인 사당역을 사당(2)와 사당(4)로 집계)되는 점을 고려하여 대안경로와 그 통행량을 합리적인 수준에서 판단할 수 있는 출발지-도착지 구간을 선정하였다. 이러한 구간으로 서울대입구-고속터미널 구간을 예로 들 수 있다. 서울대입구와 고속터미널 사이에는 Fig. 1과 같이 사실상 두 경로(경로 A: 서울대입구-사당-이수-고속터미널, 경로 B: 서울대입구-교대-고속터미널)만 존재한다고 설정하여도 직관에 크게 어긋나지 않는다. 또한 두 경로의 관측교통량은 지하철 여객 수송실적 자료에서 각각 서울대입구-고속터미널(3), 서울대입구-고속터미널(7)의 수송량 정보로 파악할 수 있다. 물론 경로 A를 이용하더라도 고속터미널(7)에서 하차한 후 환승통로로 이동하여 고속터미널(3)에서 개찰할 수 있고, 혹은 경로 B를 이용한 후 고속터미널(7)에서 개찰할 수 있지만, 이러한 오차는 미미할 것으로 가정한다.

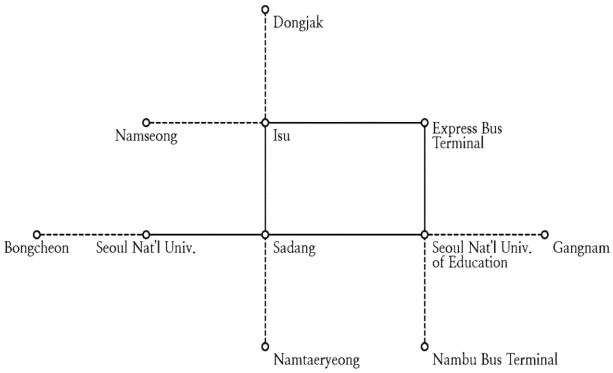

Fig. 1 Paths from Seoul Nat'l Univ. to Express Bus Terminal

이와 같이 선정된 분석구간은 Table 1과 같다. 차내거리는 서울메트로, 서울도시철도공사, 한국철도공사, 인천메트로 등의 영업거리 자료를 사용하였고, 차내시간은 차내거리

Table 1 Origin (O) and destination (D) pairs and their path characteristics

O-D	Paths	In-vehicle distances (In-vehicle time)	Number of transfers (Transfer time)	Observed traffic		
				'09.4.	'10.4.	'11.4.
Seoul Nat'l Univ. – Express bus terminal	A: Seoul Nat'l Univ. – Sadang – Isu – Express bus terminal	7.0km (12.5min)	2 times (9.4 min)	26	42	35
	B: Seoul Nat'l Univ. – Seoul Nat'l Univ. of Education – Express bus terminal	8.3km (14.8 min)	1 time (4.7 min)	805	812	811
Seoul Nat'l Univ. – Dogok	A: Seoul Nat'l Univ. – Seolleung – Dogok	11.6km (20.7 min)	1 time (4.7 min)	61	61	59
	B: Seoul Nat'l Univ. – Seoul Nat'l Univ. of Education – Dogok	11.4km (20.4 min)	1 time (4.7 min)	153	155	148
Seoul Nat'l Univ. – Onsu	A: Seoul Nat'l Univ. – Sindorim – Onsu	14.6km (26.1 min)	1 time (4.7 min)	25	20	23
	B: Seoul Nat'l Univ. – Daerim – Onsu	13.9km (24.8 min)	1 time (4.7 min)	38	55	52

Table 2 Transfer weights in the literature

Studies		Transfer weights
Shin [17]		1.18
Son et al. [18]		1.37
Yang and Son [19]	RP model	1.03
	SP model	1.70
Average		1.32

를 지하철의 평균표정속도[1]로 나눠서 구하였다. 환승시간은 지하철간 평균환승시간 4.7분 [16]을 환승횟수만큼 곱하여 산출하였고, 차내거리 대비 환승통행 저항은 평균환승시간에 선행연구의 평균 환승가중치 1.32(Table 2 참조)를 곱한 후 거리로 환산한 3.4km를 적용하였다.

3.2 최적전략 알고리즘의 적용

최적전략 알고리즘을 적용하기 위해 분석구간을 단순하게 표현하면 Fig. 2와 같다. 링크는 화살표로 표시하고, 링크 상단에는 (링크통행저항 c_a, 운행빈도 f_a)를 표기하였다. 운행빈도가 ∞인 링크는 환승이 이루어지지 않는 구간으로 대기시간이 없음을 의미한다. 운행빈도와 배차간격은 각 연도의 실제 첨두·비첨두 배차간격 [20-22]와 지속시간(첨두 4시간, 비첨두 16시간 [23])으로 구하였다.

한편, 총 예상통행시간을 산출하기 위해서는 승차시간, 승차시간 가중치, 대기시간 인자, 대기시간 가중치, 접근시간 가중치가 필요하다. 하지만 이를 분리하여 추정한 국내 연구 결과를 찾기 어려웠다. 본 연구는 Parveen *et al.* [24]의 파라미터 추정치(각각 2.6, 2.1, 0.5, 1.7, 1.0)을 차용한다. 이 파라미터는 토론토의 대중교통 네트워크를 대상으로 추정한

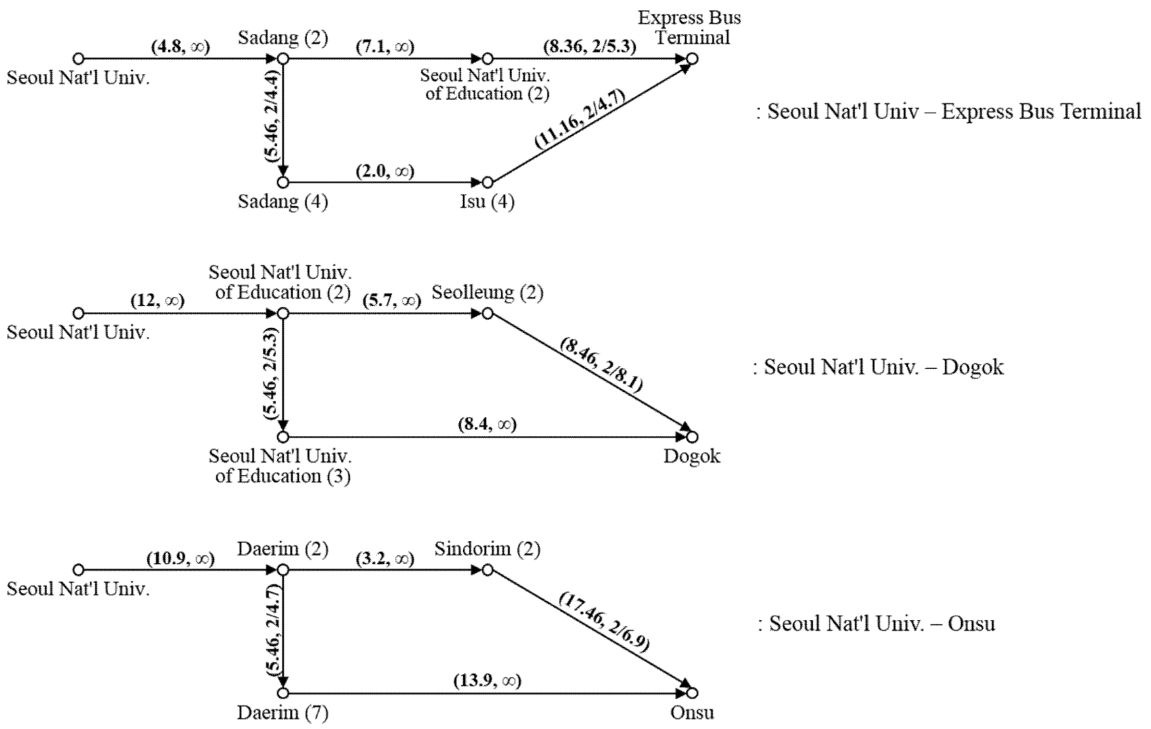

Fig. 2 Strategies calculated by OD pair (2009)

Table 3 Results of the optimal strategy algorithm

O-D	Path	Path choice probabilities	Assigned traffic (Percent deviation)		
			'09.4.	'10.4.	'11.4.
Seoul Nat'l Univ. – Express bus terminal	A	0.000	0 (-1.00)	0 (-1.00)	0 (-1.00)
	B	1.000	831 (0.03)	854 (0.05)	846 (0.04)
Seoul Nat'l Univ. – Dogok	A	0.000	0 (-1.00)	0 (-1.00)	0 (-1.00)
	B	1.000	214 (0.40)	216 (0.39)	207 (0.40)
Seoul Nat'l Univ. – Onsu	A	0.000	0 (-1.00)	0 (-1.00)	0 (-1.00)
	B	1.000	63 (0.66)	75 (0.36)	75 (0.44)

[1]서울도시철도공사와 서울메트로의 총 영업거리를 총 소요시분으로 나누어 산정함(33.57km/시).

값으로서 시·공간적 이전성 여부는 불확실하다.

2009년 기준의 Fig. 2 네트워크에 최적전략 알고리즘을 적용한 결과는 Table 3과 같다. 각 분석구간에서 각각 사당(2)-사당(4), 교대(2)-선릉(2), 대림(2)-신도림(2) 전략은 최적전략에 포함되지 않는다. 따라서 세 구간 모두 단일 최단경로에 전량 배정되는 결과가 도출된다. 배차간격이 다른 2010년, 2011년에도 단일 최단경로에 전량 배정된다. 별도로 결과를 제시하지 않았지만, 대기시간 가중치를 1로 바꿔 적용하여도 동일한 결과가 도출된다.

그런데 대안경로 A, B가 모두 최적전략에 포함되면 서울대입구-고속터미널 구간과 서울대입구-도곡 구간의 오차는 오히려 커질 수 있다. 왜냐하면 최적전략 알고리즘의 경로선택확률은 운행빈도의 함수인데, 수도권 도시철도 노선들의 배차간격은 고른 편[2] 이어서 경로의 선택확률이 거의 동등하게 분배되기 때문이다.

3.3 경로선택 알고리즘의 적용

경로선택 알고리즘은 출발지와 도착지를 잇는 모든 경로를 나열한 후, 경로에 대한 이용자의 효용함수로 경로의 선택확률을 구한다. 그런데 가까운 거리에 있는 구간이라도 비합리적인 경로를 포함하여 무수히 많은 경로가 존재한다. 예를 들어 Fig. 1의 서울대입구-고속터미널 구간에서 점선 링크를 지나는 모든 경로는 직관적으로 비합리적인 경로이다. 이러한 경로를 모두 나열하는 것은 계산적으로 비효율적이다. 경로나열 문제는 네트워크가 복잡해질수록 더욱 많은 시간과 비용이 소요되는 중대한 취약점임이 재확인된다. 본 연구에서도 모든 경로를 분석하는 것이 사실상 불가능하여 경로나열 과정을 생략하고, Table 1에서 제시한 경로 A, B 만을 선택대안집합으로 고려한다.

효용함수는 선행연구의 결과를 차용한다. 이를 위해 선행연구에서 추정한 대중교통 이용자의 경로선택 효용함수를 정리하면 Table 4와 같다. Lee [25]와 Raveau *et al*. [4]는 상향 계단수, 하향 계단수, 노선의 굴곡도 등 독특한 변수를 포함하고 있다. Yang and Son [19]는 환승을 위해 이동하는 시간과 대기시간을 합한 시간을 환승시간으로 정의하였으나, Son *et al*. [18]은 환승대기시간을 대기시간으로, 환승시 도보시간을 도보시간으로 분리하는 등 연구마다 통행요소에 대한 정의에 차이가 있다. 또한 Cheon [10]은 환승유무로 구분된 효용함수를 추정하여서 환승여부에 따라 효용함수를 달리 적용해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구는 변수의 종류와 시장분할이 도시철도 네트워크에 적용하기 용이한 Yang and Son [19]의 효용함수를 차용한다. 이 연구는 SP자료와 RP자료로 두 개의 효용함수를 추정하였는데, 본 연구는 두 효용함수를 모두 적용해 그 결과를 비교한다.

경로선택 알고리즘에 의한 분석구간별 교통량 배정 결과는 Table 5와 같다. 최적전략 알고리즘이 단일경로에 전량 배정한 반면 경로선택 알고리즘은 다중경로에 배정한 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 5의 결과에서 서울대입구-도곡, 서울대입구-온수 두 구간은 대안경로의 경로선택확률 분배비율이 유사하게 나타난다. 이는 두 분석구간의 대안경로는 차내시간 변수만 각각 0.3분, 1.3분씩 차이가 나고(Table 1 참조), 이 차이만이 경로선택에 영향을 주기 때문이다. 그러나 두 구간의 오차율은 그렇지 않다. 2009년 서울대입구-도곡의 오차율(0.70, -0.28)이 서울대입구-온수 구간의 오차율(0.12, -0.08)보다 크게 나타난다. 이는 서울대입구-도곡 구

Table 4 Utility functions in the literature

		Walking time (min)	Waiting time (min)	In-vehicle time (min)	Fare (100 wons)	Number of transfers	Transfer time (min)	Number of escalators	Horizontal distance (100 m)	Number of ascending stairs (100 stairs)	Number of descending stairs (100 stairs)	Moving time by escalator (min)	Constant
Son *et al.* [18]	Inner-city	-0.278	-0.298	-0.163	-0.005	-	-0.223	-	-	-	-	-	-
	Inter-city	-0.270	-0.294	-0.154	-0.003	-	-0.195	-	-	-	-	-	-
Cheon [10]	Transfer between subways	-	-	-0.057	-0.020	-0.684	-	-	-	-	-	-	1.233
	No transfer	-	-	-0.057	-0.020	-0.684	-	-	-	-	-	-	1.745
Yang and Son [19]	SP model	-	-	-0.184	-	-1.881	-0.313	-0.368	-	-	-	-	-
	RP model	-	-	-0.273	-	-4.23	-0.281	-1.186	-	-	-	-	-
Lee [25]		-	-	-0.316	-	-3.115	-	-	-0.004	-0.027	-0.019	-0.012	-
Raveau et al. [4]		-0.229	-0.121	-0.117	-	-0.420	-	-0.457	-	-	-	-	-

Note: Raveau *et al*. includes variables related to network knowledge, network topology, occupancy rate, etc. in utility function. These variables are not taken into account in Table 4.

[2]서울도시철도 1~8호선의 2009년~2011년 첨두시 배차간격은 2.5~4.5분, 비첨두시 배차간격은 5.5~8.0분임. 6, 8호선을 제외하면 첨두시 배차간격은 2.5~3.0분, 비첨두시 배차간격은 5.5~6.0분임[20-22].

Table 5 Results of route choice algorithm

O-D	Path	Path choice probabilities		Assigned traffic (Percent deviation)					
		SP model	RP model	SP model			RP model		
				'09.4.	'10.4.	'11.4.	'09.4.	'10.4.	'11.4.
Seoul Nat'l Univ. – Express bus terminal	A	0.051	0.007	42 (0.63)	44 (0.04)	43 (0.23)	6 (-0.77)	6 (-0.85)	6 (-0.82)
	B	0.949	0.993	789 (-0.02)	810 (0.00)	803 (-0.01)	825 (-0.02)	848 (0.04)	840 (0.04)
Seoul Nat'l Univ. – Dogok	A	0.484	0.476	103 (0.70)	104 (0.71)	100 (0.70)	102 (0.67)	103 (0.68)	98 (0.67)
	B	0.516	0.524	111 (-0.28)	112 (-0.28)	107 (-0.28)	112 (-0.27)	113 (-0.27)	109 (-0.27)
Seoul Nat'l Univ. – Onsu	A	0.443	0.415	28 (0.12)	33 (0.66)	33 (0.44)	26 (0.05)	31 (0.56)	31 (0.35)
	B	0.557	0.585	35 (-0.08)	42 (-0.24)	42 (-0.20)	37 (-0.03)	44 (-0.20)	44 (-0.16)

간의 통행패턴은 효용함수에 포함된 독립변수만으로 설명하는 것이 불충분하거나, 혹은 변수의 실제 영향력과 추정된 파라미터가 다르기 때문임을 추론할 수 있다. 또한 서울대입구-고속터미널 구간은 두 효용함수로 산출한 경로선택확률이 비교적 큰 차이를 나타내는데, 이는 효용함수에 따라 결과가 민감하게 변할 수 있음을 시사한다.

3.4 Dial 알고리즘의 적용

도로 교통량 배정을 위해 고안된 Dial 알고리즘을 철도부문에 적용하기 위해서는 철도 이용자의 특징적 행태인 환승통행을 모사할 수 있어야 한다. 본 연구는 Fig. 3의 네트워크 표현방식[26]을 적용한다. 실선은 양방향 통행이 가능한 링크이고, 화살표식이 있는 점선은 화살표 방향으로만 통행할 수 있는 아크(arc)를 의미한다. 이 표현방식은 환승통행을 반영할 수 있으면서 환승역이 도착지인 구간을 분석하기가 용이하다. 다만, 출발지가 환승역이면 출발역과 인근 역을 연결하는 링크를 추가해야 한다.

Fig. 3의 네트워크 표현방식으로 서울대입구-온수 구간의 전체 네트워크와 효율적 경로를 나타내면 Fig. 4와 같다. 서울대입구-온수 구간의 효율적 경로는 총 3개 경로 중에서 가산(7)-구로(1)를 통과하는 경로가 제외된다. 이 경로가 다른 경로보다 환승횟수가 많고 차내 통행거리도 긴 점을 감안한다면 합리적인 결과로 판단된다. 서울대입구-고속터미널, 서울대입구-도곡 구간의 효율적 경로도 Table 1에서 제시한 실제 이용된 경로와 동일하게 나타난다.

분석구간별 링크이용확률, 배정교통량 등은 Dial 알고리즘의 전방진행단계와 Van Vliet [15]의 알고리즘을 결합한 수정된(modified) 형태의 Dial 알고리즘으로 도출한다. θ의 정

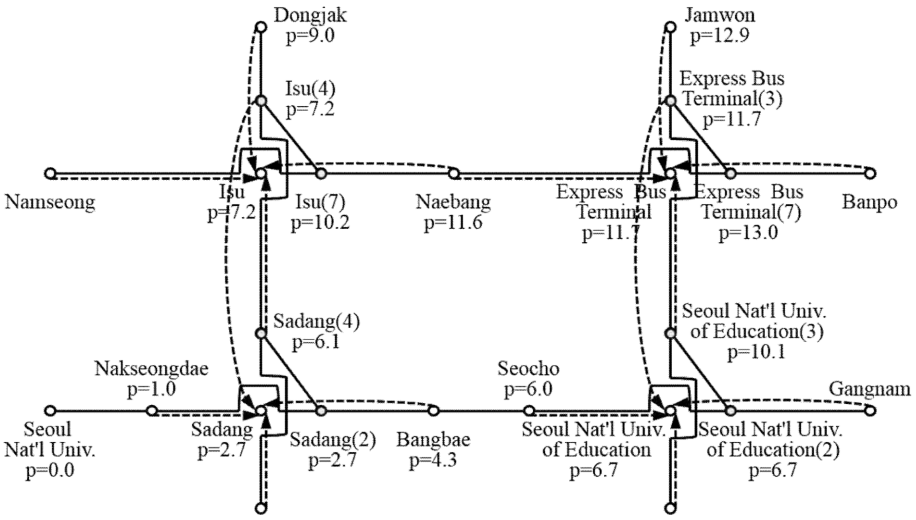

Fig. 3 Network representation

Note: p indicates the smallest travel impedance from the origin node, Seoul Nat'l Univ., to each station.

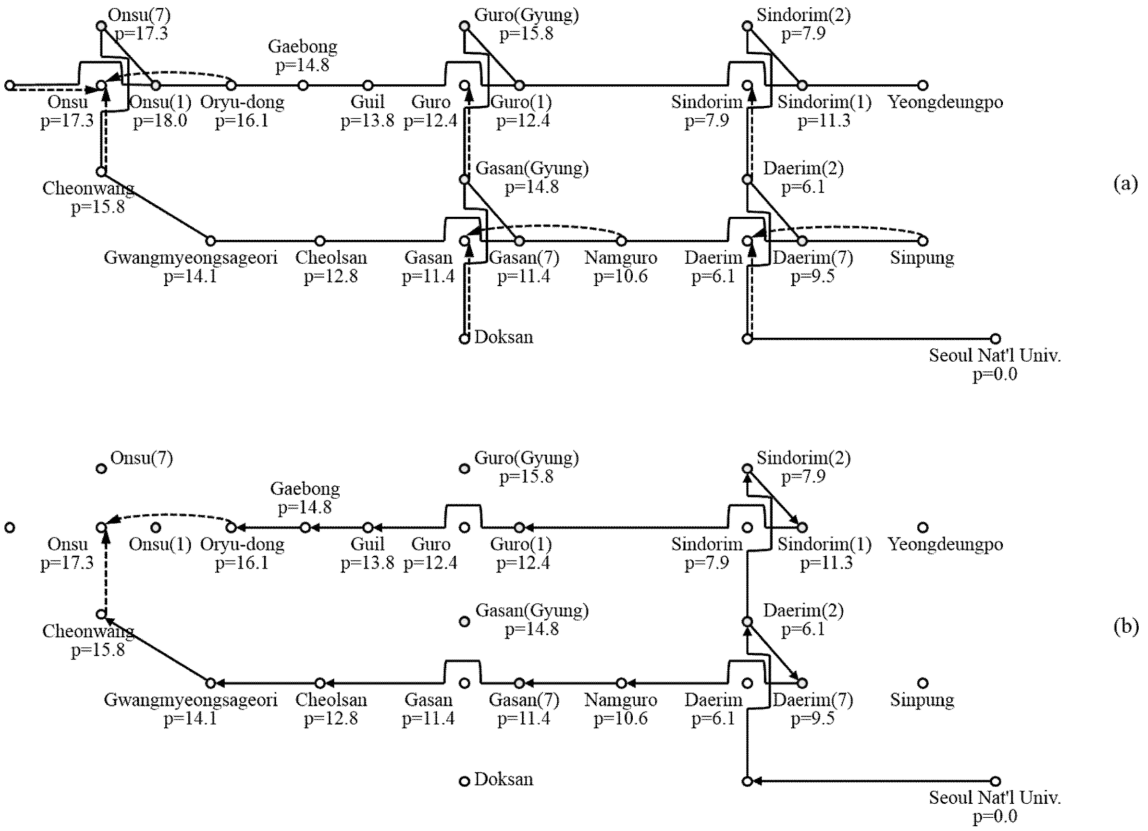

Fig. 4 All paths (a) and the efficient paths (b) from Seoul Nat'l Univ. to Onsu

산은 수정된 Dial 알고리즘과 Robillard [14]의 방식을 결합한 알고리즘으로 수행한다[26].

2009년 4월 지하철 여객 수송실적 자료로 각 분석구간과 전체 분석구간을 대상으로 정산을 수행하여 θ^*_{all}, $\theta^*_{E.B.T}$, θ^*_{Dogok}, θ^*_{Onsu}를 찾는다. 그 결과, θ^*_{all}=1.625337, $\theta^*_{E.B.T}$=1.634641, θ^*_{Dogok}=4.597839, θ^*_{Onsu}=0.720627로 도출된다. 전체 분석구간을 대상으로 정산한 θ^*_{all}의 결과는 서울대입구-고속터미널 구간의 $\theta^*_{E.B.T}$와 가장 근접한다. 분석구간 중 서울대입구-고속터미널 구간의 통행량이 가장 많아 정산에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 서울대입구-도곡 구간의 θ^*_{Dogok}은 약 4.60으로 서울대입구-온수 구간의 θ^*_{Onsu}가 약 0.72로 정산된 것에 비해 큰 값으로 나타난다. 이러한 결과는 서울대입구-도곡 구간에서 대안경로의 총 통행거리 차이(0.2km)가 서울대입구-온수 구간에서 대안경로의 총 통행거리 차이(0.7km)에 비해 작지만, 대안경로의 관측통행량 분포 차이는 서울대입구-도곡 구간(61통행:153통행=0.29:0.71)이 서울대입구-온수(25통행:38통행=0.40:0.60)보다 더 크기 때문이다. 요컨대 서울대입구-도곡 구간에서는 대안경로에 비해 0.2km만큼 짧은 최단경로의 선택확률을 높이기 위해서 θ^*가 상대적으로 큰 값으로 도출되고, 서울대입구-온수 구간에서는 최단경로와 차이가 비교적 큰 0.7km이지만, 두 경로가 유사하게 이용되는 통행행태를 모사하기 위해 θ^*가 작은 값으로 정산된다.

서울대입구-도곡 구간이 서울대입구-온수 구간보다 상대적으로 경로B(최단경로)에 통행자가 집중되는 현상은 단지 통행거리만 작용한 것이 아니다. 서울대입구-도곡 구간에서 대안경로의 통행거리 차이는 서울대입구-온수 구간의 차이보다 크지 않기 때문이다. 이 구간에서는 통행거리 차이뿐만 아니라 특징적인 경로특성, 이를테면 경로A는 혼잡한 2호선 구간(교대-선릉)을 통과하기 때문에 차내의 혼잡도가 높다는 점, 또는 총 통행거리가 짧으면 최단경로에 의존도가 높다는 점 등이 경로선택에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

Dial 알고리즘은 이러한 특징적인 행태를 변수로 고려하지 않아도 θ를 통해 모사할 수 있다. 이에 대한 추가적인 예시로서, 서울대입구-고속터미널 구간에 환승가중치를 달리 적용하면 Table 6과 같이 θ^*도 변하는 점을 들 수 있다. 이는 통행특성(통행구간, 통행시각 등)별로 다를 수 있는 환승가중치도 θ를 통해서 그 영향력을 조절할 수 있음을 의미한다.

θ^*로 링크의 이용확률과 배정교통량을 구하고, 이를 다시 경로를 기준으로 정리하면 Table 7과 같다. θ^*_{all}을 적용하여 구한 배정교통량은 관측교통량과 오차가 다소 크게 나타나지만, 각 분석구간별 θ^*_i를 적용하여 산출한 배정교통량은 매우 높은 정확도를 보인다.

4. 알고리즘의 평가

최적전략 알고리즘은 한 지점에서 먼저 도착하는 서비스 노선에 탑승하여 통행하는 것을 전제한다. 이 가정은 승강

Table 6 $\theta^*$by the value of transfer weights

Transfer weights	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.23	1.27	1.32
θ^*	2.4520	2.2885	2.1455	2.0193	1.9071	1.8067	1.7164	1.6346

Table 7 Results of Dial's algorithm

O-D	Path	Path choice probabilities		Assigned traffic (Percent deviation)					
		θ^*_{all}	θ^*_i	θ^*_{all}			θ^*_i		
				'09.4.	'10.4.	'11.4.	'09.4.	'10.4.	'11.4.
Seoul Nat'l Univ. – Express bus terminal	A	0.032	0.031	26 (0.02)	27 (-0.35)	27 (-0.23)	26 (0.00)	27 (-0.36)	26 (-0.24)
	B	0.968	0.969	805 (0.00)	827 (0.02)	819 (0.01)	805 (0.00)	827 (0.02)	820 (0.01)
Seoul Nat'l Univ. – Dogok	A	0.419	0.285	90 (0.47)	91 (0.49)	87 (0.48)	61 (0.00)	62 (0.01)	59 (0.00)
	B	0.581	0.715	124 (-0.19)	125 (-0.19)	121 (-0.18)	153 (0.00)	154 (0.00)	149 (0.00)
Seoul Nat'l Univ. – Onsu	A	0.243	0.376	15 (-0.39)	18 (-0.09)	18 (-0.21)	24 (-0.05)	28 (0.41)	28 (0.23)
	B	0.757	0.624	48 (0.26)	57 (0.03)	57 (0.09)	39 (0.03)	47 (-0.15)	47 (-0.10)

장이 공간적으로 떨어져 있어 한 지점에서 환승할 수 없는 도시철도 이용자의 통행행태에 부합하지 않는다. 다수의 변수와 파라미터를 사용하여 철도 이용자의 통행행태를 모사하려고 하지만, 국내 여건을 반영한 파라미터 추정 연구는 부족하고, 이를 추가로 추정 또는 정산하려면 많은 시간과 비용이 소요될 것으로 예상된다. 아울러 분석의 시·공간적 범위가 다를 경우 이전가능성에 대해 충분한 사전연구가 수반되어야 하는 어려움이 있다. 또한 결정론적인 가정으로 인해 통행자의 통행행태를 설명하는데 한계가 있다. 최적전략이 경우에 따라서 다중경로 집합이 되고 각 경로는 이용확률을 갖지만 이는 효용극대화 이론을 바탕으로 하는 확률이 아닌 운행빈도의 비율이다. 통행자의 인지오차는 고려되지 않고, 다른 서비스 특성보다 운행빈도에 의존적인 결과가 도출된다. 따라서 최적전략 알고리즘은 이용자의 경로선택에 영향을 미치는 요소가 많고, 배차간격이 비슷한 수도권 도시철도 분석에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

경로선택 알고리즘의 확률론적 가정은 최적전략 알고리즘의 결정론적인 가정보다 이론적으로 합리적이다. 그런데 효용함수에 영향을 미치는 변수의 종류와 그 영향력은 경로특성, 지역특성, 이용자특성, 분석 데이터, 혹은 기상상태나 통행시각 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있으며, 새로운 변수들도 계속 보고되고 있다. 이는 효용함수 추정의 어려움을 시사한다. 효용함수의 변수만으로 설명되지 않는 특징적인 통행패턴이 나타나는 구간이나, 변수의 영향력이 다른 구간을 포함하는 광범위하고 복잡한 지역을 분석할 경우 효용함수는 유연하지 않다. 통행특성이 유사한 구간을 분류하여 효용함수를 추정하면 이러한 한계점을 완화할 수 있지만, 유의한 추정결과를 도출하기 위해 충분한 수의 표본을 확보해야 하는 등 시간, 비용측면에서 비효율적이다. 게다가 경로선택 알고리즘은 분석단위가 경로라는 점에서 경로나열 문제가 있다. 도시철도 네트워크와 같이 대규모 네트워크에서는 아무리 짧은 구간일지라도 비합리적인 경로를 포함하여 무수히 많은 경로가 존재하며, 이를 모두 나열하는 것은 계산적으로 비효율적이다. 경로나열 문제를 해결하기 위한 노력으로 전체 경로집합에서 일부 경로만을 추출하는 방법론이 제시되었지만 대안경로 집합을 설정하는 기준이 임의적이라는 한계가 있다. 출발지-도착지 사이의 무수히 많은 경로 중에서 실제 이용될 가능성이 높은 경로만으로 선택대안 집합을 구축하는 합리적인 방법론에 대한 논의가 필요하다.

Dial 알고리즘은 통행자의 인지오차를 고려하여 최적전략 알고리즘이 갖는 이론적 비합리성을 완화한다. 또한 효율적 경로 정의를 통해 비합리적인 경로를 사전에 효과적으로 제거하고 링크와 노드 정보만을 이용하여 링크의 이용확률을 계산하기 때문에 경로나열 문제와 같은 계산적 비효율성이 발생하지 않는다. Dial 알고리즘은 다양한 변수와 파라미터를 반드시 고려할 필요가 없고, 관측교통량 자료를 이용하여 정산할 수 있다. 도시철도 이용자의 경로선택에 많은 변수가 영향을 미치고, 시·공간적 범위에 따라 변수의 영향력이 다르게 나타날 수 있는 점을 감안하면 다른 알고리즘에 비해 범용적 적용이 용이한 알고리즘임을 알 수 있다. 이러한 강점은 통행행태가 다른 실제 도시철도 구간을 대상으로 분석한 결과, 오차율이 다른 알고리즘에 비하여 작게 나타난 점으로도 확인할 수 있다. θ의 정산은 각 출발지-도착지 구간에 대하여 수행하는 것이 바람직하지만, 대규모 네트워크에서는 상당히 많은 출발지-도착지 구간이 존재하므로 통행특성(총 통행거리, 혼잡도, 환승지점의 위치, 네트워크 형태(topology), 통행시각 등)에 따라 분류하여 정산하는 것이 현실적인 대안이다. 만일 총 통행거리를 기준으로 θ를 정산한다면 오차항의 등분산 가정에서 발생하는 로짓모형의 한계도 완화할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 도시철도 네트워크를 대상으로 최적전략 알고

리즘, 경로선택 알고리즘, Dial 알고리즘의 적합성을 검토하였다. 그 결과 Dial 알고리즘이 이론적 가정의 합리성과 분석단위에 따른 계산적 효율성 측면에서 도시철도 이용자의 통행행태 분석에 적합한 것으로 평가되었다.

최적전략 알고리즘은 결정론적인 가정으로 인해 통행자의 행태를 설명하는데 한계가 있었다. 특히 경로선택 확률이 노선의 운행빈도 외 다른 서비스 수준을 고려하지 못하는 점은 비합리적이고, 복잡한 도시철도 네트워크 분석에 부적합한 가정인 것으로 나타났다. 이러한 한계점을 극복하지 못한 채, 다수의 변수와 파라미터를 사용하는 점은 오히려 분석의 시·공간적 범위가 변할 경우 추가로 파라미터의 이전가능성을 검토해야 하고, 필요시 파라미터를 새로이 정산해야 하는 비효율성을 수반한다. 경로선택 알고리즘은 효용함수의 변수만으로 설명할 수 없는 특징적인 통행패턴에 유연하게 대처하기 어려웠다. 특히, 다양한 요인이 경로효용에 영향을 미치는 도시철도 네트워크에서는 효용함수에 대한 충분한 사전 연구를 필요로 한다. 또한, 경로선택 알고리즘은 분석단위가 경로라는 점에서 경로나열 문제가 부각되었다. 반면 Dial 알고리즘은 이론적 가정과 계산적 효율성 측면에서 합리적이었다. θ는 실측자료만으로 손쉽게 정산할 수 있었고, 정산된 θ를 적용한 결과는 높은 수준의 정확도를 보였다. Dial 알고리즘은 많은 변수를 요구하지 않고, 파라미터 θ로 이례적인 통행행태도 모사할 수 있었다.

본 연구는 수도권 도시철도의 일부 출발지-도착지 구간을 분석대상으로 한정하였다. 현재 수도권 도시철도의 운임지불 시스템으로는 통행자가 출발역과 도착역 사이에 어느 경로를 이용하였는지 정확히 알 수 없기 때문이다. 이러한 점 때문에 전체 출발지-도착지를 대상으로 알고리즘의 적합성을 살펴보지 못하였다. Dial 알고리즘의 파라미터인 θ의 정산 역시 소수의 구간에 대해서만 이루어졌다. 전체 관측교통량 자료가 구축된다면 전체 네트워크를 대상으로 알고리즘의 적합성을 평가하고, 보다 폭넓은 시사점을 도출할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 “정동재, 장수은 (2014), 철도 교통량 배정 알고리즘 비교 연구, 한국철도학회 춘계학술대회”를 수정·보완하여, 서울메트로 40주년 기념 우수논문 현상공모에 출품하여 최우수상을 수상한 논문임.

References

[1] Y. Liu, J. Bunker, L. Ferreira (2010) Transit users’ route-choice modelling in transit assignment: a review, *Transport Reviews,* 30(6), pp. 753-769.

[2] H. Kato, Y. Kaneko, M. Inoue (2010) Comparative analysis of transit assignment: evidence from urban railway system in the Tokyo Metropolitan Area, *Transportation,* 37, pp. 775-799.

[3] H. Spiess, M. Florian (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks, *Transportation Research,* 23B, pp. 83-102.

[4] S. Raveau, J.C. Munoz, L. de Grange (2011) A topological route choice model for metro, *Transportation Research,* 45A, pp. 138-147.

[5] J.Y. Yen (1971) Finding the k shortest loopless paths in a network, *Management Science,* 17(11), pp. 712-716.

[6] J.A. Azevedo, M.E.O.S. Costa, J.J.E.R.S. Madeira, E.Q.V. Martins (1993) An algorithm for the ranking of shortest paths, *European Journal of Operational Research,* 69, pp. 97-106.

[7] D. Eppstein (1999) Finding the k shortest paths, *SIAM Journal on. Computing,* 28(2), pp. 652-673.

[8] S.I. Shin, H.S. Noh, C.S. Cho (2005) A revenue allocation model for the integrated urban rail system in the Seoul metropolitan, *Journal of Korean Society of Transportation,* 23(5), pp. 157-167.

[9] S.I. Sin, C.J. Lee, C.S. Kim (2010) Allocating revenues to metropolitan railroad operators using public transportation card data, *Journal of Korean Society of Transportation,* 28(2), pp. 7-19.

[10] S.H. Cheon (2010) Development of a smart card data-based stochastic transit assignment model on integrated public transportation networks, *Ph D. Thesis*, Seoul National University.

[11] S. Bekhor, T. Toledo, J.N. Prashker (2008) Effects of choice set size and route choice models on path-based traffic assignment, *Transportmetrica*, 4(2), pp. 117-133.

[12] R.B. Dial (1971) A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation Research,* 5, pp. 83-111.

[13] Y. Sheffi (1985) *Urban transportation networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, New York, pp. 286-308.

[14] P. Robillard (1974) Calibration of Dial°Øs assignment method, *Transportation Science,* 8, pp. 117-125.

[15] D. Van Vliet (1981) Selected node-pair analysis in Dial°Øs assignment algorithm, *Transportation Research,* 15B, pp. 66-68.

[16] http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=155704805 (accessed Dec. 23, 2014).

[17] S.I. Shin (2007) Integrated transit service evaluation methodologies using transportation card data, Seoul Development Institute, Seoul.

[18] S.H. Son, G.J. Choe, J.H. Yu (2007) An estimation of generalized cost for transit assignment, *Journal of Korean Society of Transportation,* 25(2), pp. 121-132.

[19] C.H. Yang, E.Y. Son (2000) Estimation of transfer related values of Seoul subway users using stated preference and revealed preference analyses, *Journal of Korean Society of Transportation,* 18(4), pp. 19-30.

[20] Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp. (2009) 「2009 Transportation Plan」.

[21] Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp. (2010) 「2010 Transportation Plan 」.

[22] Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp. (2011) 「2011 Transportation Plan 」.

[23] Korea Development Institute (2008) *A Study on Standard Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway Projects*, 5th ed., Seoul.
[24] M. Parveen, A. Shalaby, M. Wahba (2007) G-EMME/2: Automatic Calibration Tool of EMME/2 Transit Assignment Using Genetic Algorithms, *Journal of Transportation Engineering,* 133(10), pp. 549-555.
[25] K.J. Lee (2004) Estimating transfer penalties considering transfer movement, *Master thesis*, Seoul National University.
[26] D. Jeong (2012) A link-based stochastic algorithm for transit assignment: results from the urban railway system in Seoul, *Master thesis*, Seoul National University.

접수일(2014년 9월 12일), 수정일(2014년 11월 3일),
게재확정일(2014년 11월 6일)

Dongjae Jung: jdj0418@ snu.ac.kr
Department of Environmental Planning, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

Justin S. Chang: jsc@ snu.ac.kr
Department of Environmental Planning, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea