

대중교통 수단간의 환승을 고려한 확률통행배정 기법의 개발

A Stochastic Transit Assignment Technique with Transfers between Multi Transit Modes

이 재 섭

(한양대 교통공학과 대학원)

김 익 기

(한양대 교통공학과 교수)

목 차

I. 서론	IV. 모형의 검증
II. 기존문헌고찰	1. 가상네트워크에 적용
1. 확률적 통행배정모형	2. 기존 모형과의 비교를 통한 검증
2. 대중교통 통행배정모형	V. 결론 및 향후 연구과제
3. 기존 상용프로그램의 대중교통 통행배정모형	1. 결론
III. 모형의 개발	2. 향후 연구과제
1. 알고리즘의 개발	VI. 참고문헌
2. 단순네트워크에 의한 모형특성 분석	

I. 서론

기존의 대중교통 통행배정모형은 통행량이 기준점간 최단경로에 전량이 배정된다는 제한된 가정을 기반으로 하고 있으며, 수단간 환승을 합리적으로 반영하지 못하고 있다. 다시 말해서, 노선상에 통행량을 배정할 때에 최단경로를 기준으로 All-or-Nothing 방법을 사용하기 때문에 전체 경로비용의 조그만 차이에도 교통량의 변화가 크게 나타나는 단점을 갖는다. 이는 노선배정 단계에서 사용하는 통행자의 노선선택원칙에 관한 가정때문에 비롯된 것으로 통행자들의 통행행태에 영향을 미치는 통행속성들을 모형에 적절하게 반영하지 못한 결과이다.

본 연구의 목적은 통행자들의 노선선택시에 확률적인 요소를 고려하여 보다 현실적인 통행배정 결과를 도출하기 위한 것으로 Dial 알고리즘을 대중교통 통행배정모형에 적용하여 다양한 노선간의 환승을 고려한 확률적인 대중교통 통행배정 모형을 구축하는데 있다.

본 연구에서 제시한 기법으로서 확률적 대중교통 수단선택 및 노선선택은 현실적인 현상을 기존의 분석기법보다 좀 더 잘 표현할 수 있을

것으로 기대된다.

II. 기존문헌 고찰

1. 확률적 통행배정모형

Dial(1971)이 제안한 확률적 통행배정모형은 개별 통행자들이 각각 인식하는 통행비용에 따라 자신의 경로를 선택하고 통행하기 때문에 통행자의 불완전한 정보와 다양한 취향 등을 반영할 수 있다. 또한 확률효용을 포함한 효용이 가장 높다고 인식하는 자신의 판단에 따라 경로를 선택하기 때문에 개별 통행자들은 각각 상이한 최단경로를 가지게 되며, 이 때문에 다경로배정방법(Multipath assignment)의 형태를 갖는다.

이러한 확률적 통행배정모형은 여러 경쟁 노선들 중에 하나의 노선을 선택하는 과정으로 이산선택모형(Discrete choice model)에 기초한다. 이산선택모형의 기본전제는 선택상황에 직면했을 때, 각 대안에 대한 개별적인 선호는 각 대안들의 유인력 또는 효용에 의해 설명될 수 있다는 것이다(Sheffi, 1985).

2. 대중교통 통행배정모형

1) 최적전략모형

Spiess, Florian(1989)에 의해 개발된 모형으로서 대중교통승객(passenger)은 자신이 가고자 하는 목적지에 도달하기 위한 노선선택 기준으로 최적전략(Optimal strategy)을 이용한다.

최적전략이란 개별 통행자들이 자신의 최소 통행비용으로 자신의 목적지까지 가기 위한 선택집합 중의 하나라고 해석할 수 있으며 통행 시간에는 정류장에서의 대기시간과 차량운행시간 및 환승 등을 포함하고 있다. 최적전략모형은 통행자가 경로를 선택하는데 기준이 되는 전략을 어떻게 설정하는가에 따라 선택하는 노선과 경로가 결정된다. 즉, 승·하차에 따른 추가 비용을 크게 설정하거나 정류장에서 대기시간의 비중을 크게 설정할 경우 등에 따라 통행시간과 배정되는 통행량에 차이가 발생하게 된다.

2) 용량제약 통행배정모형

용량제약 모형은 노선의 용량과 승객의 대기시간을 고려한 식을 이용해 균형값을 찾을 때까지 반복적으로 계산하는 모형으로 통행자가 증가함에 따라 통행시간이 증가하는 목적함수로 구성된다(이성모, 유경상, 전경수, 1996). 이 모형은 환승노드에서의 교통량은 이전 정류장에서 승차한 통행자들의 수와 다음 정류장에서 하차하는 승객의 수에 영향을 받는 것으로 가정하고 모든 가능한 노선과 이에 따른 야코비안(Jacobian) 행렬을 계산하여 각 노선별 통행비용함수를 설정하였다.

대각화에 의한 변동부등식을 이용하여 균형교통량을 도출하였으나 이 모형 또한 환승노드에서 교통량을 분할하는 단계에서는 각 수단의 배차간격의 조합에 의한 비로 할당함으로서 현실적인 묘사에 한계를 가지고 있다.

3. 기존 상용프로그램의 대중교통 통행배정

1) TRANPLAN

TRANPLAN에서는 존간 최단경로를 탐색할 때 링크의 통행시간과 노선간 환승벌점(penalty), 각 노선의 배차간격(headway)을 포함한 환승지점에서의 대기시간을 입력자료로 반영하며 통행량 배정시에는 이 최단경로에 교통량을 전량배정법(All-or-Nothing)을 이용하여

통행량을 배정한다.

최단경로에 모든 통행량이 배정되기 때문에 최단경로와 통행시간의 차이가 아주 작은 경쟁노선이 있는 경우에도 최단경로에만 모든 통행량이 배정되고 다른 경쟁노선에는 통행량이 배정되지 않는 단점을 가진다.

2) EMME/2

EMME/2는 Spiess, Florian(1989)의 최적전략을 적용하여 통행자가 노드에 도착한 차량에 승차할지를 결정하고 노선선택 확률이 계산된다. 즉, 환승노드에서 각 노선들의 배차시간을 통해 노선선택 확률을 계산하고 이에 따라 통행량을 분할하게 된다.

결국, EMME/2는 링크상에 통행량을 배정할 때 최적전략을 만족하는 노선들의 headway만을 기준으로 하여 노선선택 확률을 계산하기 때문에 기종점간 통행시간이 크더라도 headway가 작을 경우 통행시간이 짧은 노선보다 많은 통행량이 배정되는 경우가 발생할 수 있다. 또한 동일한 기종점간 각 경로들의 총 통행시간은 최적전략을 만족하는 노선들의 headway를 통합하여 하나의 식으로 계산되기 때문에 모두 동일한 값을 갖게 된다.

III. 모형의 개발

1. 알고리즘의 개발

1) 이론적 배경

확률적 속성을 반영할 수 있는 로짓모형을 이용하여 통행자들의 일반화 통행비용함수(generalized cost function)를 구성하고 이에 따라 각 노선선택 확률을 계산하는 기법을 제시하고자 한다. 즉, 각 노선의 길이와 운행 노선들의 통행속도, 통행시간, 배차간격, 환승노드에서의 대기시간과 환승에 따른 추가비용(penalty) 등을 고려하여 대중교통의 수단선택과 노선선택을 동시에 계산할 수 있는 모형을 구축하는 것이다.

출발 i 에서 도착점 j 까지 노선 k 의 통행 중 다양한 대중교통 수단 및 노선의 선택은 각 수단의 대안노선 선택으로 표현되므로 각 링크의 통행속성에 대한 일반화 통행비용함수 V_{ij}^k 를 이용하여 각 수단에 대한 노선선택 확률 P_{ij}^k 로 나타낼 수 있다.

$$P_{ij}^k = \frac{\exp(\theta V_{ij}^k)}{\sum_{k \in K} \exp(\theta V_{ij}^k)} \quad \forall k \in K \quad (1)$$

$$V_{ij}^k = f(\alpha t^k + \beta w^k + \gamma p^k + \delta c^k) \quad (2)$$

여기서,

t^k = 대안 대중교통수단 k 의 통행시간

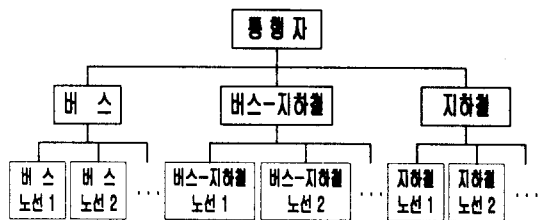
w^k = 대안 대중교통수단 k 의 대기시간의 합

p^k = 대안 대중교통수단 k 의 환승비용의 합

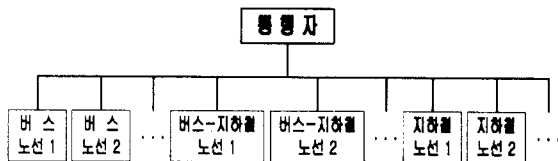
c^k = 대안 대중교통수단 k 의 요금의 합

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = 각 변수의 파라메타

위의 식은 통행자가 이용할 수단과 노선을 선택하는 과정을 표현한 것으로 이를 그림으로 나타내면 다음 <그림 1>과 같은 네스티드 로짓 모형 구조를 갖는다. 이를 다항로짓모형식 구조로 나타내면 다음 <그림 2>와 같은데 실제 승용차와 대중교통수단들이 혼합된 일반적인 통합네트워크상에서 다항로짓모형 구조를 적용할 경우 IIA Property 문제가 야기될 수 있지만 대중교통 수단만을 고려하는 대중교통 네트워크에서는 대중교통의 노선간에 독립성이 유지된다고 가정할 수 있기 때문에 크게 문제시되지 않을 것이다. 즉, 대중교통에 있어서 기존점간 합리적인 경로간의 중복문제(overlapping problem)가 일반 승용차와는 달리 정해진 노선을 따라 운행하는 대중교통 수단의 특성상 IIA 속성으로 인한 문제가 심각하지 않을 것으로 판단된다.



<그림 1> 수단선택, 노선선택의 순차적 구조



<그림 2> 수단선택, 노선선택의 동시적 구조

2) 알고리즘의 개발

본 모형의 구축을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

c_{ij}^m = 노드 i 에서 j 까지 노선 m 의 통행비용

t_{oi}^l = 존 o 에서 i 까지 노선 l 의 경로비용

T_{oi} = 존 o 에서 노드 i 까지의 최단경로비용

p^{lm} = 노선 l 과 노선 m 간의 환승비용

L_{ij}^m = 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 의 효용치(Link likelihood)

w_{ij}^m = 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 의 가중치(Link weight)

x_{ij}^m = 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 를 이용하는 통행량

단계 0 : 초기화

네트워크를 구성하는 입력자료들을 읽고, 초기화한다.

$$t_{oi}^l = 0, T_{oi} = 0, L_{ij}^m = 0, w_{ij}^m = 0, x_{ij}^m = 0$$

단계 1 : 통행시간 계산

입력자료를 기반으로 노드집합 N 안에 있는 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 의 통행시간 c_{ij}^m 을 각각 계산한다.

단계 2 : 최단경로탐색(Shortest path search)

(1) 기점존 o 와 인접한 노드 i 의 링크상에 있는 모든 노선 l 의 비용 c_{oi}^l 을 읽는다. 여기서, 노드 i 를 from노드로 설정하고 탐색한 노드집합 M 에 저장한다.

(2) $t_{oj}^m = c_{oi}^l + c_{ij}^m + p^{lm}$ 을 각각 계산한다. 이 중 가장 작은 값을 T_{oj} 로 설정하고 j 를 i 로 갱신하고 $t_{oj}^m = t_{oi}^l$ 로 갱신한 후 집합 M 에 추가한다.

(3) $t_{oj}^m = t_{oi}^l + c_{ij}^m + p^{lm}$ 를 계산한다. 이 중 가장 작은 값을 T_{oj} 로 설정하고 $t_{oj}^m = t_{oi}^l$ 로 갱신한다. 이 때 모든 to노드 j 를 from노드 i 로 갱신하고 집합 M 에 추가한 후 (3)으로 간다.

(4) 집합 M 에 선택할 노드가 없으면 단계 3으로 간다.

단계 3 : 노선별 링크의 효용치(Link likelihood)를 계산

노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 의 링크효용치 L_{ij}^m 을

다음과 같이 계산한다.

$$L_{ij}^m = \begin{cases} \sum_{k \in R_i} \exp \theta [T_{of} - t_{oi}^l - c_{ij}^m - p^{lm}] & \text{만약, } t_{oi}^l < T_{of} \\ 0 & \text{아니면} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, R_i 는 노드 i 를 to노드로 하는 링크를 이용하는 노선집합

단계 4 : 각 노선별 링크에 대해 링크가중치 (Link weight)를 계산(전진단계)

단계 3의 링크효용치를 기반으로 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 의 링크가중치 w_{ij}^m 을 계산한다.

$$w_{ij}^m = \begin{cases} L_{ij}^m & i = o \\ L_{ij}^m \sum_{k \in F_i} w_{ki}^l & \text{아니면} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, F_i 는 노드 i 를 to 노드로 하는 링크의 집합

단계 5 : 통행량 배정(후진단계)

단계 4의 링크가중치를 기반으로 종점존 d 부터 역으로 기중점간 승객 통행량 X 를 노선 m 상의 링크 $i \rightarrow j$ 에 배정한다. 이 때, 기점존에 도착하면 계산을 멈춘다.

$$x_{ij}^m = \begin{cases} X \frac{w_{ij}^m}{\sum_{k \in F_j} w_{kj}^m} & j = d \\ [\sum_{k \in I_j} x_{jk}^m] \frac{w_{ij}^m}{\sum_{k \in F_j} w_{kj}^m} & \text{아니면} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, I_j 는 노드 j 를 from 노드로 하는 링크의 집합

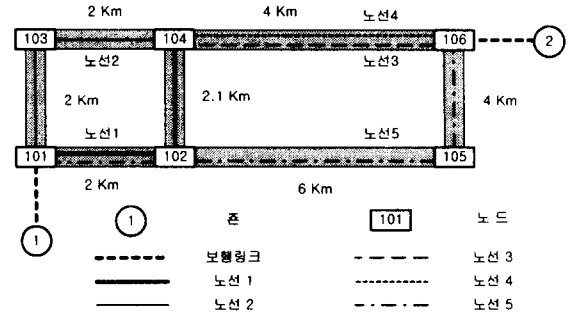
F_j 는 노드 j 를 to 노드로 하는 링크의 집합

2. 단순네트워크에 의한 모형특성 분석

기존의 대표적인 상용 프로그램인 TRANPLAN과 EMME/2의 대중교통 통행배정 과정을 간략하게 살펴보고 본 논문에서 개발한 모형을 통해 도출한 결과와 비교하기 위해 간략화 된 가상 네트워크를 구축하였다. 이 간략화 된 네트워크는 경쟁관계에 있는 여러 경로간의 작은 통행시간 차이에도 통행량이 All-or-Nothing으로 배정되는 TRANPLAN의 한계를 확인하고 환승노드에서 노선들의 통행시간보다는 노선의 headway에 의해 노선선택

확률이 계산되는 EMME/2의 단점을 보이기 위한 것이다. 또한 본 논문에서 개발한 모형을 동일 네트워크에 적용하여 그 결과를 비교하였다.

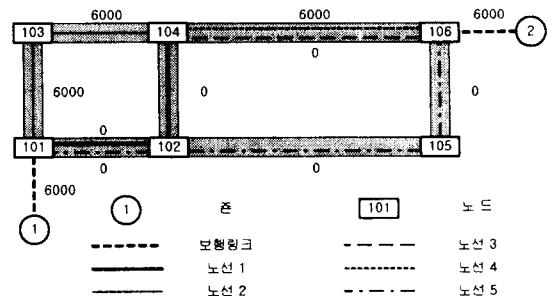
각 노선간 환승하는데 추가적으로 소요되는 시간을 모두 1분으로 동일하게 설정하였고 교통수요는 존 1에서 존 2로 6,000통행의 수요가 있다고 가정하였다.



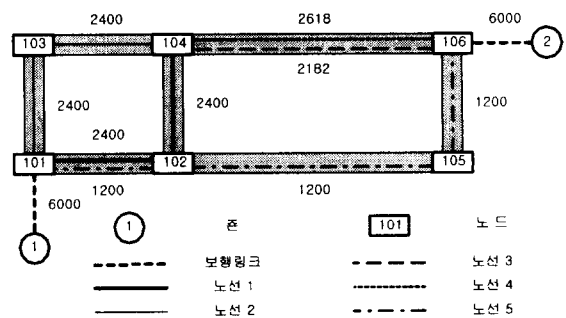
<그림 3> 모의실험을 위한 간략화 된 네트워크

<표 1> 간략화 된 네트워크의 입력자료

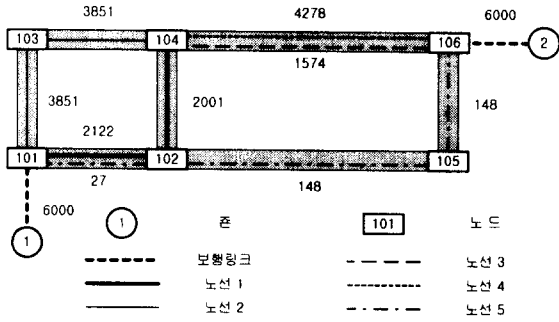
노선	통행속도 (Km/h)	headway (분)	경 유 노 드
1	50	10	101 - 102 - 104
2	40	10	101 - 103 - 104
3	40	12	104 - 106
4	40	10	104 - 106
5	50	20	101 - 102 - 105 - 106



<그림 4> TRANPLAN의 모의실험 결과



<그림 5> EMME/2의 모의실험 결과



<그림 6> 본 모형의 모의실험 결과)

모의실험결과를 모형별로 보면, TRANPLAN의 경우 최단경로에만 모든 통행량이 전량으로 배정된 것을 볼 수 있으며 EMME/2는 통행시간에 차이가 나는 노선에 headway를 기준으로 통행량이 동일하게 배정된 것을 볼 수 있다.

반면에 본 모형은 각 노선의 통행시간과 headway를 고려하여 통행량이 배정된 것을 볼 수 있다.

<표 2> (θ 값에 따른 각 경로별 결과(단위:통행)

노선 계수	노선1+3	노선1+4	노선2+3	노선2+4	노선 5
0.1	1238	1367	804	889	1702
0.5	919	1515	1155	1903	508
0.8	672	1497	1113	2477	241
1.0	538	1463	1036	2815	148
1.5	292	1312	794	3560	43

분산계수값에 따른 결과를 보면, 그 값이 커질수록 경로통행시간이 가장 짧은 노선 2, 4로 구성된 경로로 배정되는 통행량이 많아지는 것을 알 수 있다. 이는 노선선택에 있어서 통행자들간 확률적 속성의 비중이 적어지고 경로간 통행시간의 차이가 노선선택기준에 더 많은 영향을 주기 때문이다.

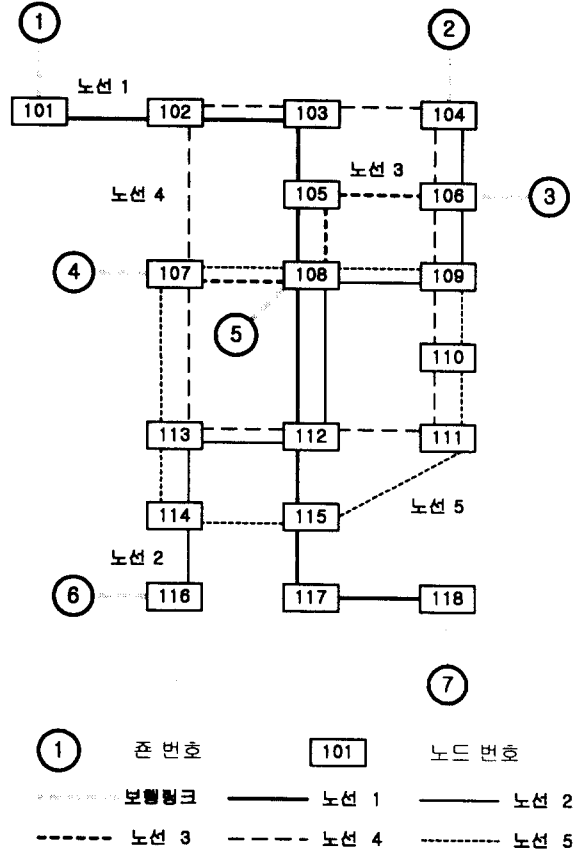
본 모형은 분산계수 θ 값에 따라서 혼잡하지 않은 가로망과 혼잡한 가로망에서의 각 통행자들의 노선선택 행태를 적절하게 표현할 수 있을 것이며 이 분산계수는 실제 현장조사를 통해 보다 정확하게 도출할 수 있을 것이다.

IV. 모형의 검증

1. 가상네트워크에 적용

1) 분산계수가 $\theta = 1.0$ 일 경우의 결과임.

개발된 모형을 적용하고 그 결과를 분석하기 위한 네트워크로 일반적으로 모형분석에 자주 인용되는 Sioux Falls Network를 대중교통 통행배정을 위해 변형하여 적용하였다.



<그림 7> 대중교통 분석을 위한 네트워크

<표 3> 버스노선의 경유노드

노선번호	경유 노드 번호
노선 1	101 - 102 - 103 - 105 - 108 - 112 - 115 - 117 - 118
노선 2	104 - 106 - 109 - 108 - 112 - 113 - 114 - 116
노선 3	106 - 105 - 108 - 107
노선 4	102 - 103 - 104 - 106 - 109 - 110 - 111 - 112 - 113 - 107 - 102
노선 5	107 - 108 - 109 - 110 - 111 - 115 - 114 - 113 - 107

2. 기존 모형과의 비교를 통한 검증

각 모형별 결과를 보면, TRANPLAN의 경우는 최단경로가 환승을 포함하고 있기 때문에, EMME/2의 경우는 통행시간보다 배차간격에 의해 영향을 많이 받게되어 환승부분이 비교적 많기 때문에 총 승객수가 많이 계산되었다. 본 모형의 경우는 환승 penalty를 고려한 최단경로

에 많은 비율의 통행량이 배정되었기 때문에 상대적으로 적은 총 승객수가 산출되었다.

<표 4> 각 모형의 통행배정 결과

	TRANPLAN	EMME/2	본 모형
총 운행시간(분)	182.4	183.1	182.4
총 운행거리	144	144	144
총 승객수(인)	312,000	320,840	286,561
총 승객-거리	1,416,000	1,273,002	1,388,000
총 승객-시간	28,320	29,157	28,714
환승 통행량	104,000	112,840	78,561

주) 본 모형은 분산계수 $\theta = 1.0$ 일 때의 결과치 임.

또한, TRANPLAN은 통행시간이 작은 최단 경로에 통행량이 집중되었기 때문에 총 승객-시간의 값이 가장 작게 계산되었고 본 모형의 경우, 통행자들이 선택할 수 있는 대안 노선들에 통행량이 확률적으로 배정되었기 때문에 총 승객-시간이 보다 크게 계산되었다. EMME/2는 최적전략을 만족하는 경로상에 있는 노선들의 headway를 기준으로 통행량이 배정되었기 때문에 총 승객-시간이 가장 크게 계산되었다.

따라서, 기종점간 최단경로에 모든 기종점 통행수요가 All-or-Nothing으로 배정되는 비현실성과 각 노선의 배차시간을 노선분할의 주요 척도로 사용하는 단점을 보완할 수 있는 대중교통 통행배정 기법으로 고려될 수 있다고 판단된다.

<표 5> 분산계수 (θ) 변화에 따른 결과

	$\theta=0.2$	$\theta=1.0$	$\theta=5.0$	$\theta=10.0$	$\theta=15.0$
총 승객수	300,295	286,561	284,181	284,764	284,936
승객-시간	28,730	28,714	28,706	28,697	28,694
환승통행량	92,295	78,561	76,181	76,764	79,936

한편, 분산계수에 따른 결과를 보면, θ 값이 커질수록 승객-시간의 값이 감소하고 있다. 이는 노선선택기준으로 통행자가 실제 알고있는 노선 통행속도나 배차시간, 환승비용 등 결정적인 속성에 대한 의존도가 높아지고 통행자가 인지하는 확률적 속성에 대한 의존도가 낮아지면서 노선선택이 이루어지고 있음을 보여주는 결과이다. 또한 기종점간에 환승을 포함하고 있는 최단경로에 통행량이 집중되면서 환승통행량이 감소하다가 다시 증가함을 볼 수 있다.

V. 결론 및 향후연구과제

1. 결론

분석결과 대중교통의 통행배정 분석에 본 모형이 현실적 현상을 설명하기 위한 이론적 배경과 분석의 융통성 측면에서 더 우수한 것으로 고려되며, 기존 상용프로그램과 유사한 결과를 도출할 수도 있어 기존 상용프로그램보다 그 활용도에 있어서 더 유연한 것으로 나타났다. 즉, 모형식안에 포함되어 있는 확률적 효용함수의 분산계수 θ 값을 통해 네트워크의 혼잡도나 개별 통행자들의 속성, 교통수단의 속성 등 네트워크 속성에 대한 정보의 정확도를 모형식에 반영할 수 있는 것이다.

따라서, 다양한 대중교통 수단과 노선들이 혼재되어 운행되고 있는 대도시의 대중교통망을 분석하고 평가하기 위한 타당한 결과를 제시할 수 있을 것으로 기대되며 수단, 노선간의 환승 활동에 대한 분석을 통해 대중교통 서비스의 평가와 개선에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 향후 연구과제

승객 대기시간과 도착분포 등을 보다 정확하게 파악하기 위한 현장조사와 분포함수의 정산 그리고 접근시간, 보행시간, 대기시간 등 버스 정류장에서 대기 또는 환승시 소요되는 시간에 대한 현실적 일반화 비용의 산출이 요구된다.

또한 각 노선상의 노선선택 확률을 계산할 때 적용되는 분산계수의 정확한 추정을 위한 조사와 연구가 필요하다고 본다.

VI. 참고문헌

1. 이성모, 유경상, 전경수, 차량용량을 고려한 대중교통 통행배정모형구축에 관한 연구, 대한교통학회, 제 14권 3호, 1996
2. Dial R, A Probabilistic Multipath Transit Assignment Model Which Obviates Path Enumeration, Transportation Research, Vol 5, 1971
3. Heinz Spiess, Michael Florian, Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, Transportation Research Vol. 23B, 1989
4. Yosef Sheffi, Urban Transportation Networks, Prentice-Hall Inc, 1985