

□ 論 文 □

도로위계구조를 고려한 노선배정기법에 관한 연구

(Traffic Assignment Incorporating Route Choice Behavior
in Hierarchical Highway Structure)

김 익 기

(한양대 교통공학과 조교수)

김 태 중

(한양대 교통공학과 대학원)

목 차

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| I. 머리말 | IV. 도로의 위계와 노선선택행태 |
| II. 도로위계를 반영한 일반비용함수 | V. 모의실험분석 |
| III. 노선배정기법과 도로망 코딩방법 | VI. 맺는말 |
-

SUMMARY

Conventional traffic assignment techniques usually do not consider traveler's route choice behavior affected by hierarchical structure in urban highway system. This study realizes the route choice behavior such that travelers tend to choose more higher level of highway rather than lower level of highway for longer trips. Otherwise, for shorter trips, travelers tend to choose lower level of highway unless they can get sufficient travel time saving by using major arterial street or freeway (higher level of highway). Therefore, this study suggests a traffic assignment technique incorporating route choice behavior related to hierarchical highway structure by introducing some perception costs to generalized cost function such as perceptual preference measurement for higher level highway and perceptual penalty when changing to different level of highway. Through simulation analysis, it is shown that the simulation results with the new traffic assignment technique can be different a lot from the results with the conventional method.

I. 머리말

교통수요분석에 있어 가장 일반적으로 많이 사용하고 있는 정통적 수요추정 4 단계기법의 마지막 단계가 노선배정(traffic assignment) 단계이다. 이 노선배정단계는 앞의 3 단계인 통행발생(trip generation), 통행분포(trip distribution), 교통수단선택(mode choice)에서와 같이 주어진 교통여건(교통공급상태)에 따라 교통수요를 구하는 것과는 달리 교통량과 통행비용의 상호영향관계를 동시에 고려한 노선배정을 통해 교통공급과 교통수요의 균형적 상태의 링크 교통량을 찾는 단계이다.

이러한 균형적 단계를 추정하는데 있어 통행자들이 실제적으로 인식하고 있는 각 노선에 대한 선호도를 노선배정분석에서 반영할 필요가 있다. 즉 노선배정모형의 일반비용(generalized cost)에 노선선택에 영향을 주는 요소를 정확하게 반영하여야만 현실적 교통현상을 모형이 잘 설명하게 되는 것이다. 하지만 Sheffi(1985)가 설명하였듯이 노선배정모형에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 일반비용은 출발지(origin)에서 도착지(destination)까지의 통행시간만을 고려하고 있다. 이에 일부 학자들은 통행시간과 함께 두 지점간의 연료비 및 통행료 등 금전적 비용을 일반비용에 포함시켜 그 영향을 모형에 반영하고자 하는 경우도 있다.

하지만 Thomas(1991)가 지적하였듯이 통행시간과 통행비용은 물론 통행거리, 지도, 표지판, 노선에 대한인지도, 대기행렬정도, 교통신호의 빈도, 도로의 구배정도, 도로변의 경관상태, 통행자의 나이 및 성별 등 다양한 요소에 의해 통행자의 노선선택 행태는 영향을 받고 있는 것이다. Mahmassani and Chen(1993)은 도로위계구조에 따른 노선선택행태를 구체적으로 그들의 모형에는 반영하지 않았지만 노선선택행태에 대한 영

향은 서술적으로 강조하였다. 이와 같이 통행시간 및 통행비용 등의 요소와 더불어 도로의 위계구조와 통행자의 노선선택행태 사이에는 높은 관련성이 존재한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 도시의 도로체계설계에 있어서도 도로의 기능별로 분류된 도로위계구조를 고려하며 교통계획을 세우는 것이 일반적이다. 그러므로 각 통행자의 노선선택 행태에 있어서도 각 통행의 특성에 따라 상위위계도로와 하위위계도로 사이에서 적절하게 노선선택이 이루어질 것이다.

현재 적용하고 있는 노선배정의 기법에서는 각 도로계층별로 링크의 그룹을 나누고 링크그룹에 따라 해당 링크에서의 속도차이로만 도로위계를 모형 속에서 반영하고 있다. 하지만 링크내에서의 속도로서 함축적으로 여러 가지 속성을 반영하고자 하는 형태의 노선배정기법으로는 도로의 위계구조에 따른 통행자의 노선선택 행태를 충분히 반영하지 못할 것으로 보인다. 그래서 이 연구에서는 상위위계의 도로일수록 통행거리에 비례하여 그 선호도가 커지는 성향을 반영하는 방법을 제시하였다. 즉 통행자에 의해 인식되어지는 도로의 인지도, 노선의 단순성 등 노선선택에 있어 정성적인 노선에 대한 선호도를 시간의 단위로 계량화하여 모형 속에서 반영하면서도 기존의 노선배정모형을 그대로 적용할 수 있는 기법에 대해 연구하였다. 또한 이러한 노선배정기법을 적용하였을 때 기존의 모형과의 차이점을 분석하여 새로운 기법의 효용성을 판단하고자 하였다.

II. 도로위계를 반영한 일반비용함수

통행자가 출발지에서 도착지에 이르기까지의 노선을 선정하는 기준으로 대부분의 노선배정모형에서는 통행시간을 대표적으로 많이 사용하고 있으나 다음과 같은 여러 가지 요인에 의해 통행자는 노선을 선정하게 된다. 즉 도착지로 갈 수

있는 모든 대안에 대해 통행자가 인식하고 있는 통행시간 그리고 유류비 및 통행료를 포함한 통행비용, 통행자가 인식하고 있는 각 노선의 거리, 개별노선에 대한 통행자 자신의 인지도 정도, 통행자가 쉽게 기억할 수 있는 노선의 단순성 정도, 익숙하지 않은 지역에 대해 통행자에게 참고적 자료가 되는 지도의 표현 형식, 운행 중에 감지되는 교통표지판의 내용과 형식, 운행도중에 만나게 되는 교통신호등의 빈도수, 운행도중 노선진행에 대한 집중도가 필요한 교차로에서의 회전 빈도수, 노선 주변의 경관 정도, 통행자의 관례적인 노선선택행태 등 다양한 요인에 의해 통행자는 이용할 노선을 선택하게 된다.

이러한 여러 가지 요인 가운데 몇 개의 요인들이 복합적으로 도로의 위계구조와 관련되어 있음을 쉽게 짐작할 수 있다. 다시 말해서 노선의 단순성, 노선의 인지도, 교차로에서의 회전 빈도수, 교통신호등의 수 등과 직접 혹은 간접적으로 도로의 위계적 구조와 관련하여 노선선택행태에 영향을 주게 된다.

노선선택에 있어 통행시간에만 의존한다는 가정을 하고 있는 현재 대부분의 노선배정기법의 경우에는 노선선택행태에 분명히 영향을 주는 도로의 위계구조를 반영하지 못하기 때문에 현실에서 관측되는 현상과 차이가 발생하게 될 것으로 보인다. 이러한 현실과 모형사이의 차이를 줄이기 위해서 도로의 위계구조가 통행자 노선선택행태에 영향을 주는 것을 모형 속에 반영하고자 하는 것이다. 통행자가 통행거리가 장거리일수록 노선의 인지도가 높은 주요간선도로를 이용하고자 하는 성향이 높아지는 것이 일반적이다. 또한 가까운 거리를 운행할 경우는 일반적으로 통행자가 지역의 도로체계를 상세히 알고 있는 경우가 많기 때문에 도로에의 진입과 진출시 타차량들의 흐름으로의 원만한 합류가 상대적으로 불편한 간선도로보다는 집분산도로 혹은 국지도로를 이용하는 현상이 장거리통행의 경우 보다 비교적 많

은 현상을 모형에 반영하여 현실적 현상을 보다 정확하게 설명하고자 하는 것이 본 연구의 목적인 것이다.

이러한 도로위계상의 통행 속성을 각 링크의 일반비용함수에 통행시간단위로 계량화된 효용가치로 포함하여 노선배정모형에 반영할 수 있고, 이러한 기존의 링크 통행시간에 도로위계상의 통행 속성을 함께 반영한 일반비용함수는 다음과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$C_n^R = \sum_L [(CV_L) - H_{nL}] D_L \sigma_{ij}^{nR} + \sum_n Q_{nst}^{ij}$$

..... (식 1)

여기서

C_n^R = 기점 i 에서 종점 j 에 이르는 노선 R 의 일반비용 (분)

$C(V_L)$ = 링크 L 이 교통량 V_L 상태에서의 단위거리당 통과 통행시간 (분/Km)

H_{nL} = 링크 L 이 속하는 도로위계등급 h 의 단위거리당 선호정도 (분/Km)

D_L = 링크 L 의 길이 (Km)

σ_{ij}^{nR} = 1 만일 기점 i에서 종점 j에 이르는 최단노선 R 이 링크 L 을 포함되어 있으면 = 0 만일 아니면

Q_{nst}^{ij} = 기점 i 에서 종점 j 에 이르는 최단노선에서 n 번째로 도로의 위계등급 s 에서 t 로 바꿀 때의 불편 (penalty) 정도 (분)

위의 식에서 H_{nL} 은 통행자가 높은 도로위계등급의 도로를 선호하는 정도를 단위거리당 동일하다는 가정을 가지고 시간의 단위로 계량화한 것이다. 그러므로 상위등급의 도로에 대한 선호정도는 거리에 선행적으로 비례하여 장거리 통행일수록 선호정도의 값이 점점 커지게 된다. 따라서 통행거리가 멀어질수록 하위등급의 도로를 이용하는 노선보다는 상위등급의 도로를 이용하는 노선을 선택할 가능성이 점점 높아지게 되어 일반비용은 도로위계구조에 대한 통행행태를 간접적으

로 반영하게 되는 것이다. 이에 반해 Q_{max} 는 하위등급에서 상위등급의 도로로 혹은 상위등급에서 하위등급으로 도로의 위계를 바꾸는 노선에서는 도로위계를 바꿈에 따른 불편정도를 반영하고자 한 것이다. 예를 들면 짧은 거리의 통행에 있어서는 상위등급의 도로로 진입하기보다는 하위등급의 도로를 이용하여 운행의 연속성을 유지하며 상위등급의 도로흐름에 합류하는 불편을 최소화하는 성향을 반영하고자 한 것이다. 다른 예로써는 장거리통행에 있어 노선의 중간지점 상위등급의 도로상에서 체증이 생길 경우 주변지역의 상세한 도로망구조(예 : 이면도로)도 잘 모르는 상황에서 충분한 시간의 절약이 보장되지 않기 때문에 체증이 지속되더라도 상위등급에서 하위등급으로 그리고 다시 상위등급의 도로로 진입하는 번거러움을 피하는 경향이 있다. 이러한 예에서 설명하였듯이 가능한 도로 이용의 흐름이 연속적으로 유지하려는 현상을 모형 속에서 반영하고자 한 것이다.

위 (식 1) 일반비용함수의 $C(V_L)$ 으로서 일반적으로 링크용량함수 (link capacity function) 로 불리는 링크의 교통량과 통행시간과의 관계식을 적용하는 것이 일반적이다. 이러한 관계식이 현실에서 관측되어지는 현상을 정확하게 설명하고 있어야 노선배정모형이 현실을 좀 더 정확하게 표현하게 될 것이다. 즉 주어진 교통량 상태에서 기중점간 특정 노선의 통행시간이 정확하게 링크용량함수에 의해 표현되어야만 노선선택행태의 중요한 요소인 통행시간을 노선배정모형에서 정확히 반영할 수 있게 되는 것이다. Branston (1976)은 과거에 연구된 링크용량함수들을 요약하여 각 함수별 특성을 잘 설명되어 있다. 하지만 본 연구의 관심은 도로위계구조가 노선선택행태에 미치는 영향을 노선배정모형에 반영하는 것으로 링크용량함수 자체의 정확성에 대한 논의는 본 연구의 범위가 아니다. 그러므로 링크용량함수가 현재 링크를 이용하는 교통량과 해당 링크가

포함하고 있는 교차로에서의 지체를 고려하여 정확하게 링크 통행시간을 반영하고 있다는 가정 하에서 노선배정기법에만 초점을 맞추기로 한다. 그것은 현실적 현상을 잘 설명하는 링크용량함수가 개발될 경우에는 쉽게 도로위계구조를 고려한 노선배정모형에 쉽게 적용할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 링크용량함수로서 기존에 가장 많이 사용하고 있는 BPR(Bureau of Public Roads) 함수로 알려져 있는 다음과 같은 식을 적용하였다.

$$T_L = T_L^0 \left\{ 1 + 0.15 \left(\frac{V_L}{C_L} \right)^4 \right\} \dots \dots \dots \text{(식 2)}$$

여기서

T_L = 링크 L 에서 단위거리당 통과 통행시간 (분/Km)

T_L^0 = 자유류상태에서 링크 L 의 단위거리당 통과 통행시간 (분/Km)

V_L = 단위시간당 링크 L 을 통과하는 교통량 (대/시간)

C_L = 단위시간당 링크 L 의 교통용량 (대/시간)

III. 노선배정기법과 도로망 코딩방법

가장 많이 사용되고 있는 노선배정모형의 기본적인 개념으로는 모든 통행자가 완벽한 정보를 갖고 있으며 모든 사람이 합리적 판단을 하여 의사결정의 법칙이 동일하다고 가정하고 있는 사용자균형(User Equilibrium) 상태를 추구하는 것이다. 이러한 Wardrop(1952)의 제 1 법칙을 Beckmann 등(1956)에 의해 이러한 상태를 수학적으로 표현할 수 있게 되었다. 이러한 Wardrop의 제 1 법칙을 만족시키는 상태를 구하는 방법으로는 Sheffi(1985)와 Papacostas and Prevedouros(1993)가 설명하였듯이 과거에는 Heuristic Equilibrium Techniques 으로

FHWA Assignment, CATS Assignment, Incremental Assignment 등의 방법이 적용되었다. 또한 이러한 Heuristic 방법과는 달리 Beckmann 등(1956) 이 제시한 mathematical programming 식을 수학적으로 정확하게 풀 수 있도록 Frank and Wolfe(1956) 가 제시한 Convex Combinations method를 적용하여 계산하는 방법이 있다. 이와 같은 Frank-Wolfe Algorithm을 적용한 방법은 흔히 Equilibrium Assignment라는 명칭으로 일반 상용 교통수요분석 프로그램에서 많이 사용되고 있는 기법이다. 앞에서 설명한 어떠한 heuristic 방법도 본 연구의 노선배정 기법으로 적용할 수 있지만 본 연구에서는 상대적으로 이론적 배경이 우수한 Convex Combinations method를 적용한 Equilibrium Assignment를 사용하여 도로위계에 따른 통행자 행태를 반영한 노선배정기법을 분석하였다.

Beckmann 등이 제시한 사용자균형 상태를 계산하는 수학적 식은 다음 (식 3) 와 같은 형태를 갖는다. (식 3) 이 사용자 균형상태를 설명하고 있다는 증명은 Kanafani(1983) 에 의해 설명이 잘되어 있으며 본 연구의 범위가 아니므로 설명을 생략하였다.

$$\text{Min. } \sum_L \int_0^{V_L} t(x) dx \dots\dots\dots (\text{식 3})$$

$$\text{S.T. } \sum_R F_{ij}^R = F_{ij} \quad \text{for all } i, j$$

$$\sum_i \sum_j \sum_R F_{ij}^R \delta_{ij}^R = V_L \quad \text{for all } L$$

$$F_{ij}^R \geq 0 \quad \text{for all } i, j, R$$

여기서

V_L = 링크 L 를 단위시간당 통과하는 교통량

$t(V_L)$ = 링크 L 의 교통량의 함수로 나타내는 통행시간

F_{ij} = 존 i 에서 존 j 로 가는 O-D 교통량

F_{ij}^R = 존 i 에서 존 j 로 가는 O-D 교통량 중 노선 R 을 이용하는 교통량

$\delta_{ij}^R = 1$ 만일 존 i 에서 존 j 로 가는 노선 R 이 링크 L 를 포함하고 있으면 = 0 만일 아니면

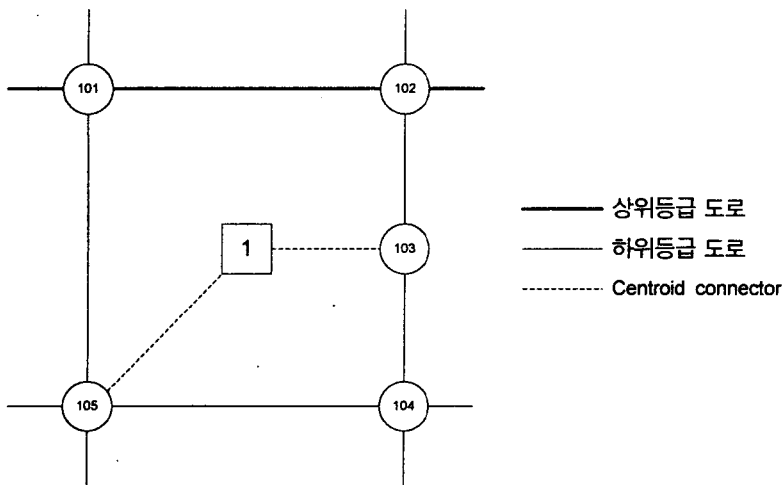
많은 노선배정단계에서 (식 3) 의 링크 교통량의 함수인 $t(V_L)$ 으로써 링크 L 을 통과하는데 걸리는 통행시간을 적용하는 경우가 많다. 앞에서 설명하였듯이 교통량과 통행시간(혹은 속도) 와의 관계식으로 미국의 BPR(Bureau of Public Roads) 에서 제시한 링크용량함수를 일반적으로 많이 적용하고 있다. 도로의 위계구조에 의한 통행자의 행태를 반영하는 속성은 통행량의 함수가 아니므로 선형함수형태로 기존의 $t(V_L)$ 와함께 목적함수에 포함시킨 것이 목적함수가 될 것이다. 이와같이 모형을 설정하면 convex 함수에 선형 함수를 합하면 다시 convex 함수가 되므로 convexity 를 유지하게되어 해의 존재하며 유일해를 갖게된다. 이와같은 새로운 모형은 기존 노선배정 모형의 기본 형태와 동일하여 기존에 이미 개발된 Algorithm 을 그대로 적용하여 사용자 균형 노선배정모형을 풀 수가 있게 된다. 그런데(식 3) 에서 볼 수 있듯이 $t(V_L)$ 가 (식 1) 의 일반비용함수와는 달리 노선단위의 일반비용의 함수가 아니고 링크단위의 일반비용의 함수로 되어 있다. 그러므로 도로의 위계구조에 의한 통행자의 노선선택행태를 반영하기 위한 (식 1) 의 노선별 일반비용을 적용하기 위해서는 링크별 통행비용 함수로써 표현되어야 기존의 노선배정기법을 적용할 수 있게 되는 것이다. 즉 노선의 일반비용함수 (식 1)을 링크를 기초로한 노선배정모형에 적용하기 위해서는 약간의 변형이 필요하다.

(식 1)의 일반비용함수에 있어 우측항 첫번째 수식에 포함되어 있는 H_{nl} 은 링크단위의 비용이므로 직접 사용할 수가 있다. 하지만 Q_{nst} 은 노선상에서 도로의 위계를 바꿀 경우에 한에서 포함되는 비용으로 링크단위로 표현된 비용이 아니므로 (식 1) 의 일반비용함수를 직접 (식 3)에 적용할 수가 없다. 본 연구에서는 Q_{nst} 에 대한

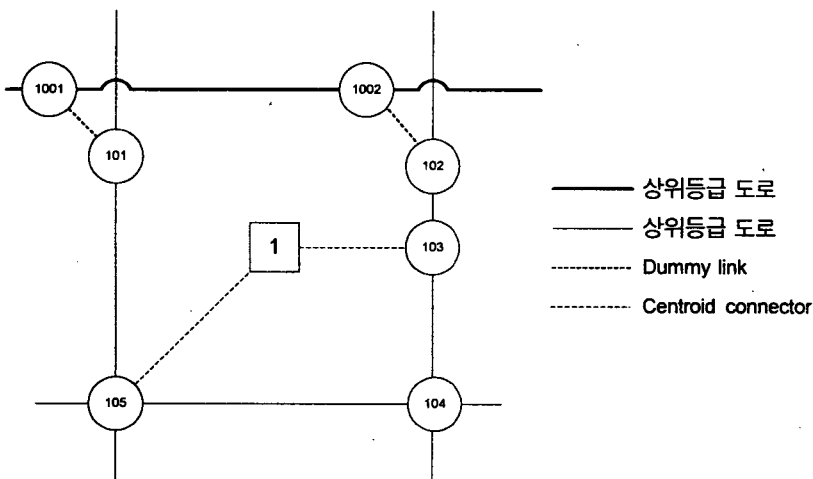
비용을 도로위계등급이 다른 도로간에 교차하는 교차지점에 가상링크(dummy link)를 도로망 코딩과정에 소개하여 분석상의 도로망에 포함하므로써 모든 일반비용이 링크단위의 비용으로 전환시키는 방법을 적용하였다.

<그림 1> 은 가장 일반적으로 많이 사용하고 있는 도로망 코딩방법이다. 이 방법은 도시전체 및 넓은 지역의 도로망체계를 분석할 경우 모든 교차로의 특성을 섬세하게 분석하기보다는 단순화된 교통망을 가지고 작업하는 것이 효율적이며

또한 전체적 체계를 보는데 국부적 현상이 미치는 영향이 크지 않다고 가정한 분석방법이다. 이 경우에는 교차로의 회전차량에 대한 추가적 통행비용을 부가하는 가상링크가 없으므로 각 링크는 교차로에서 생기는 지체를 링크용량함수가 내포하고 있다고 가정하고 있는 것이다. 이와 같은 정통적인 교통망 코딩 방법에 <그림 2>와 같이 도로위계등급이 다른 두 도로가 교차하는 교차점에 가상링크를 추가하여 (식 1)의 Q_{hsi}^{ii} 을 링크의 속성으로써 반영되도록 하였다.



<그림 1> 정통적인 도로망 코딩방법



<그림 2> 도로위계등급간 교차로의 가상링크 코딩방법

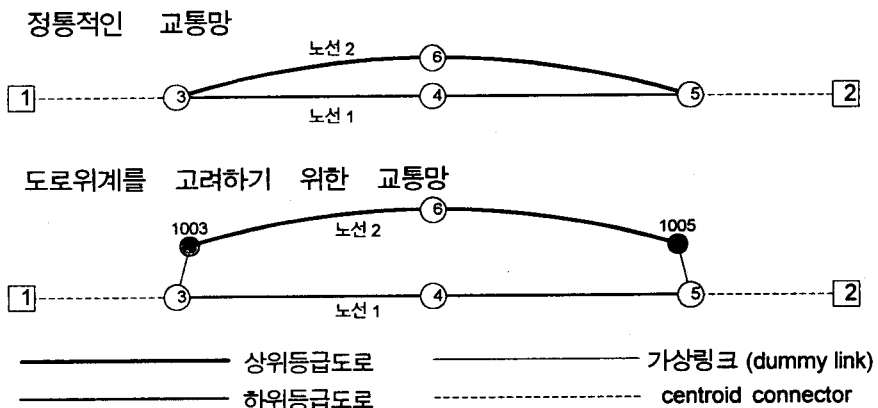
교통망 코딩상에서 존중심 (centroid) 이 직접 상위등급의 도로(링크)에 연결되어 있지 않고 코딩된 도로 중 제일 하위등급에 연결시켜 교통망 코딩상의 오차를 최소화하는 것이 일반적이라는 사실을 고려하면 Q_{min} 의 노선배정 결과에 미치는 영향을 짐작할 수 있다. 노선선정에서 도로위계의 등급을 변화시킬 때마다 가상링크(dummy link) 를 지나가게 되므로 Q_{min} 만큼의 노선 일반비용이 증가하게 된다. 즉, 가상링크에 의해 추가된 시간단위로써 표현된 일반비용만큼 상위등급의 도로에서 통행시간을 단축하지 않는 한에는 기존에 사용하는 도로의 연속성을 더 선호하게 된다는 의미인 것이다.

하지만 최단경로에 포함된 상위등급의 도로길이 가 길어질수록 다시 말해서 기점과 종점간의 거리가 멀어질수록 상위등급도로를 이용하겠다는 선호정도가 단위거리당 H_{min} 만큼의 일반비용이 감소하기 때문에 노선의 일반비용이 작아지는 효과를 가져와 상위등급의 도로로 진입하므로써 발생하는 불편성 Q_{min} 의 값을 상쇄하고도 상위등급도로를 포함한 노선이 다른 대안 노선들보다 더 작은 노선의 일반비용을 갖게 되므로 상위등급의 도로를 이용하도록 하는 효과를 나타내게 된다. 다시 말해서

(식 1)에서 표현된 일반비용함수를 가상링크의 사용으로 기존의 노선배정기법과 동일하게 적용하면서도 도로의 위계구조에 따라 노선선택행태가 영향을 받는 노선배정분석이 가능하게 된 것이다. 이러한 배정기법이 내포하고 있는 노선선택행태가 도로위계구조를 고려하지 않은 노선배정기법보다 논리적 타당성이 더욱 있기 때문에 현실적 노선선택행태를 더욱 잘 설명할 것이다.

IV. 도로의 위계와 노선선택행태

새로운 노선배정기법이 기존의 노선배정방법에 의한 결과와 어떻게 차이가 나며 노선배정 결과에 어떠한 영향을 주는가를 분석하기 위해서 하나의 출발점과 하나의 도착점을 갖고 두개의 노선대안을 갖는 극히 간단한 예제 교통망을 갖고 분석하였다. <그림 3> 에서 표현한 것과 같이 하나는 가상링크를 포함하고 있어 (식 1)의 일반비용함수에서 Q_{min} 을 표현할 수 있도록 한 교통망이고 다른 하나는 정통적인 교통망으로 교차로에 가상링크가 없이 결절점 하나로 직접연결한 교통망이다.



<그림 3> 비교분석을 위한 단순 교통망

[그림 3] 의 단순교통망에서 상위등급도로에 대한 거리당 선호정도를 나타내는 H_{nl} 의 값으로 0.5 분/Km 로 하고, 노선상에서 도로위계의 변경에 의한 불편성을 나타내는 가상링크의 추가적 비용인 Q_{link} 의 값으로 가상링크 3-1003와 5-1005를 동일하게 1.5 분으로 분석을 위해 임의로 정하였다. 그리고 링크용량함수로는 (식 2)의 BPR 함수를 적용하였다. 이 BPR 함수에서 자유류에서의 속도는 상위등급도로가 50km/시간 (1.2 분/km) 그리고 30km/시간(2.0 분/km)로 가정하고 분석하였다. 이러한 조건을 가지고 노선 1 과 노선 2 의 거리를 변화시켜 보면서 정통적인 노선배정모형의 분석결과와 도로위계에 영향을 받는 노선선택행태를 고려한 노선배정기법에

의한 분석결과를 비교하였다. 이러한 분석의 결과는 <표 1>에 요약 정리되어 있다. 이 분석결과는 기점과 종점사이의 상위등급도로의 노선과 하위등급도로의 노선 두개만 존재하고 있을 때 다른 모든 조건이 동일하다고 가정하고 다만 두 노선의 거리만을 증가시키면서 그 영향을 분석한 결과인 것이다. 여기서 상위등급도로의 노선을 상대적으로 거리가 크도록 가정하고 분석하였다. 첫번째 경우(CASE 1)는 2km 와 3km, 두번째 경우(CASE 2)는 5km 와 6km, 세번째 경우(CASE 3)는 20km 와 24km, 마지막 경우(CASE 4)는 40km 와 45km 의 하위 및 상위등급도로의 거리로써 임의로 정하고 분석하였다.

<표 1> 단순 가상 교통망 분석 결과

CASE	링크 속성	정통적인 노선배정기법 (기존기법)		도로위계를 고려한 노선배정기법 (제한기법)	
		노선 1	노선 2	노선 1	노선 2
		(하위등급노선)	(상위등급노선)	(하위등급노선)	(상위등급노선)
CASE 1	균형 교통량 (대/시간)	3062	3938	4813	2187
	링크 통행속도(Km/h)	28.5	43.8	22.8	49.3
	링크 거리(Km)	2	3	2	3
CASE 2	균형 교통량 (대/시간)	1969	5031	1969	5031
	링크 통행속도(Km/h)	29.7	36.4	29.7	36.4
	링크 거리(Km)	5	6	5	6
CASE 3	균형 교통량 (대/시간)	1887	5113	1121	5879
	링크 통행속도(Km/h)	29.8	35.7	30.0	29.4
	링크 거리(Km)	20	24	20	24
CASE 4	균형 교통량 (대/시간)	1627	5373	848	6152
	링크 통행속도(Km/h)	29.9	33.6	30.0	27.2
	링크 거리(Km)	40	45	40	45

CASE 1의 결과를 보면 정통적 노선배정기법(편의상 이 이후부터는 "기존기법"으로 표현함)에 의한 분석결과는 통행시간을 기준으로 하였으므로 기종점간 통행시간이 두 노선에서 동일하게 되므로 노선의 길이가 긴 노선 2(상위등급도로)에서 속도가 약간 더 빠르다. 이러한 결과는 도로위계에 따른 통행행태를 반영한 새로이 제시된 노선배정기법(편의상 이 이후부터는 "제안기법"으로 표현함)에 의한 결과에서도 마찬가지로 단지 두 노선간의 속도 차이가 기존 기법보다는 더 많이 나도록 분석되었다. 기존기법으로는 사용자균형상태에서의 노선 2(상위등급도로)의 교통량이 노선 1(하위등급도로)을 이용하는 교통량보다 더 많은 것으로 분석되었으나 제안기법에 의한 결과는 오히려 노선 1이 노선 2의 교통량보다 많은 것으로 분석되었다. 이것은 짧은 거리에서는 상위등급을 이용하고자 하는 선호도보다 상대적으로 도로등급을 변경하므로써 오는 불편성이 더 클 것이라는 통행행태를 제안기법에서는 반영한 반면에 기존기법에서는 반영되지 않았기 때문에 온 분석결과의 차이인 것이다. 반면에 CASE 2는 이러한 선호도와 불편성의 정도가 동일한 경우로 기존기법이나 제안기법이 동일한 분석결과가 나온 경우를 설명한 것이다. 하지만 기점과 종점간의 거리가 커지면서 이러한 현상은 반대로 나타나는 것을 알 수 있다. CASE 3의 분석결과를 보면 기존기법에 의한 결과에서는 노선 2가 아직 주행속도면에서는 노선 1보다 우위를 유지하고 있으나 제안기법에서는 상위등급도로의 노선인 노선 2가 점차 주행속도면에서도 오히려 하위등급의 도로에 비해 열세에 있기 시작한다는 것을 알 수 있다. 또한 제안기법에서 보다는 기존기법에서 하위등급도로(노선 1)의 균형 교통량이 상대적으로 많은 것으로 추정된 것을 알 수 있다. 이것은 기종점간의 거리가 멀어짐에 따라 상위등급의 도로를 이용하고자 하는 통

행자의 선호도가 점차 높아져서 도로위계등급의 바꾸는데 따른 불편성을 압도하기 시작하는 통행행태를 제안기법에서는 반영한데 반해 기존기법에서는 상위등급도로와 하위등급도로의 노선을 동일하게 취급하고 있기 때문에 서로 다른 분석결과가 나온 것이다. CASE 4는 기종점간 거리가 더욱 멀어져 제안기법에서는 더욱 상위등급의 도로를 선호하는 행태가 확인해지는 현상을 반영하였으나 기존기법에서는 통행시간만을 반영하고 도로위계에 따른 통행행태를 반영하지 않으므로 기종점간 통행시간이 같기 위해서는 거리가 먼 노선 2에서는 주행속도가 빠르게 분석될 수 밖에 없는 것이다. 제안된 기법에서 분석된 결과는 현실적으로 통행자가 노선중간지점상에서 주변지역의 상세한 도로체계도 모르고 운전 중에 많은 집중력을 필요로 하는 부분적 국지도로의 이용을 회피하는 현상을 모형 속에서 반영한 것이라고 해석될 수 있다. 다시말해서 주요 간선도로에서 체증에의해 비록 주행속도가 주변 국지도로보다 떨어진다 할지라도 운전의 집중도 필요, 노선의 복잡성, 주변지역에대한 인지성 부족, 차량진출입의 불편성 등 여러 요인에의해 노선의 변경없이 계속 주요 간선도로를 따라서 운행하는 경우가 많은데 이러한 통행행태 현상을 제안기법은 반영하고자 한 것이다.

앞의 단순 가상교통망을 이용한 분석에서는 기종점간의 거리에따라 상위등급도로의 노선과 하위등급도로의 노선간의 통행자 노선선택행태가 변화하는 것을 기존기법과 제안기법으로 분석한 것이다. 이러한 분석의 결과를 비교하므로써 도로위계에의해 영향을 받는 노선선택의 현실적 행태를 제안기법이 과연 논리적으로 설명을 잘하고 있는가를 분석하였다. 물론 현실적으로 관측되어지는 노선선택행태 및 링크교통량 등의 통행패턴을 갖고 검증하기는 매우 어려우나 그 분석결과와 방향은 합리적이며 논리성이 있는것으로 분석

되었다. 또한 기존기법은 제안기법의 특별한 경우라 할 수 있어 분석의 응용 범위를 확대시킨 노선배정기법이라고 볼 수 있을 것이다. 즉 상위등급도로에 대한 선호도 H_{nl} 값과 도로위계의 변화에 따른 불편정도 Q_{nl} 의 값을 0으로 하면 기존기법과 동일하기 때문에 제안기법은 기존기법의 일반적 형태인 것이다.

통행거리에 따른 도로위계상의 노선선택행태는 제안기법에 의해 논리성을 가지고 합리적으로 설명되고 있으나 실제적인 노선행태를 얼마나 정확하게 설명하는가는 상위등급도로에 대한 선호도 H_{nl} 값과 도로위계의 변화에 따른 불편정도 Q_{nl} 값의 크기에 달려있다.

상위등급의 도로 노선을 선택 할 것이냐 혹은 선택하지 않을 것인가는 최단노선상에 있는 상위등급의 노선길이에 비례하는 상위등급노선에 대한 선호도와 노선의 위계를 바꿈으로써 오는 불편성의 상호간 상쇄작용(trade-off)의 정도에 의해 영향을 받기 때문이다. 불편정도 Q_{nl} 값이 상대적으로 크면 아주 먼 거리가 아닌 이상에 충분한 통행시간 단축이 없으므로 하위등급의 도로를 이용하고자 하는 성향을 강하게 모형은 유도하게 될 것이며, 그 값이 작아지면 그 반대적 현상으로 상위등급을 이용하고자 하는 성향이 높아지도록 유도할 것이다.

상위등급도로에 대한 선호도 H_{nl} 값이 커질 경우는 상위등급의 노선을 선택하는 성향이 비교적 짧은 거리에서도 상위등급도로를 선호하는 현상이 일어나도록 유도할 것이며 거리가 멀어질수록 상위등급에 대한 선호가 매우 강력하도록 모형은 유도하게 될 것이다.

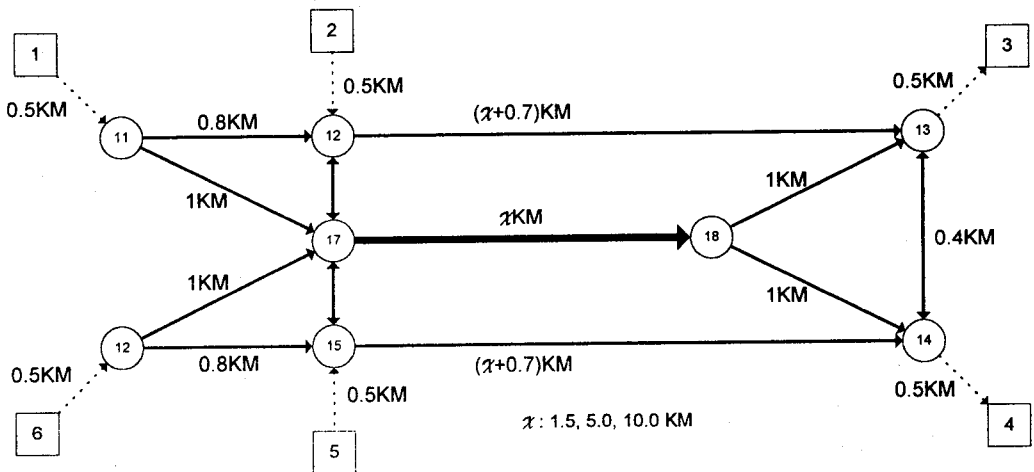
그러므로 분석자는 현실적 통행행태를 적절히 표현하기 위해서 상위등급도로에 대한 선호도 H_{nl} 값과 도로위계의 변화에 따른 불편정도 Q_{nl} 값의 크기가 조화있게 설정되도록 추정하여야 할 것이다.

V. 모의실험분석

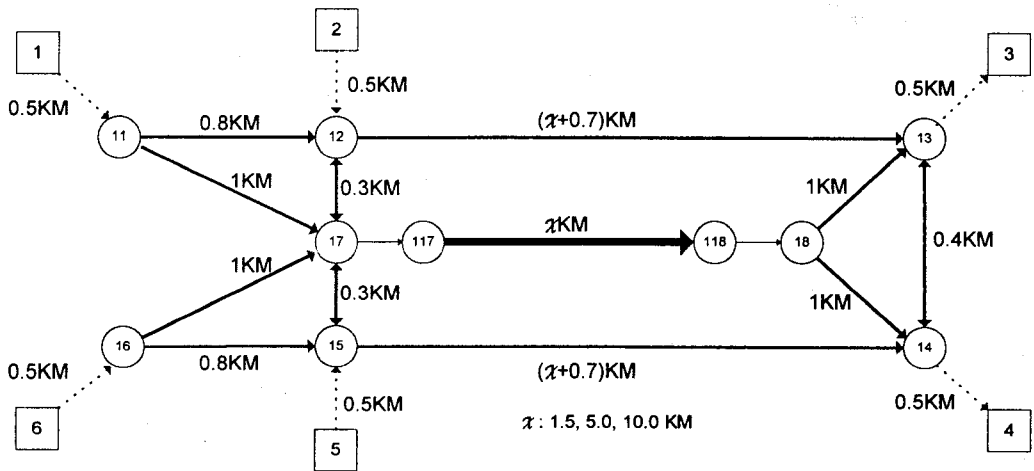
여러개의 노선대안을 갖고 4개의 출발 존과 2개의 도착 존을 갖는 가상의 교통망으로써 기존기법에 의한 노선배정 결과와 제안된 기법에 의한 노선배정 결과를 비교 분석하였다. 분석에 이용한 가상의 교통망은 <그림 4>의 (a)와 같으며 이것은 기존기법에 의한 분석을 위해 적용되었다. 제안된 기법을 적용하기 위해서는 교통망 코딩에 있어 약간의 수정이 필요한데 그 수정된 교통망은 [그림 4]의 (b)와 같다. 가상 교통망의 O-D 교통량은 <표 2>와 같으며 간선도로의 경우 자유속도는 50km/시간이고 용량은 3,000대/시간으로 가정하였으며, 집분산도로의 경우 자유속도는 35km/시간, 용량은 2,000대/시간으로 가정하고 분석하였다. 또한 간선도로의 거리당 선호정도(H)는 1.0분과 1.5분/km의 두가지로 분석하였으며, 위계변경에 의한 불편성(Q)도 0.5분과 1.0분의 두가지를 가지고 분석하여 그 값에 대한 민감도를 파악하고자 하였다. 그리고 통행거리에 의한 노선선택행태에 차이가 있는 점을 고려하여 간선도로 거리를 [그림 4]에서 보는 바와 같이 1.5km, 5km, 10km로 변경하면서 동시에 간선도로와 경쟁적 노선인 집분산도로 2개의 거리도 같은 비율로 증가시켜 분석해 보았다.

<표 2> 기종점 통행량

O\D	3	4	합계
1	1300	1100	2400
2	900	800	1700
5	700	900	1600
6	1000	1400	2400
합계	3900	4200	8100



(a) 기존기법분석을 위한 도로망 코딩



(b) 제안기법분석을 위한 도로망 코딩

<그림 4> 모의실험을 위한 가상 도로망

위와 같은 조건에서의 분석결과는 <표 3>에 요약되어 있으며, 또한 그 결과를 도표화하여 간

선도로의 경우는 <그림 5>에 도식되어 있으며, 집분산도로의 경우는 민감도분석의 결과가 유사

하므로 상단 노선의 경우만 <그림 6>에 도식하였다. 우선 기존의 노선배정기법에 의한 결과와 H=1, Q=1인 경우 제안된 기법의 결과를 비교하여 보면, 경쟁노선간의 통행거리가 5, 10 Km 인 경우에는 간선도로의 선호도가 높아서 기존기법에서보다 간선도로 교통량이 많게 분석되었으며 반대로 집분산도로에서는 교통량이 적게 분석되었다. 하지만 1.5 Km 의 경우에는 제안된 기법의 결과가 기존기법에서보다 간선도로의 교통량이 적게 분석되었으며 집분산도로에서는 많게 분석되었다. 이것은 노선의 길이가 충분히 길면 도로의 위계를 바꾸는데의 불편성보다는 상위등급 도로이용의 선호정도가 크게 비하여 그 통행거리가 짧은 경우 위계변경에 의한 불편성이 상위등급 선호도를 압도하는 노선선택행태를 제안

된 기법이 반영하고 있기 때문이다.

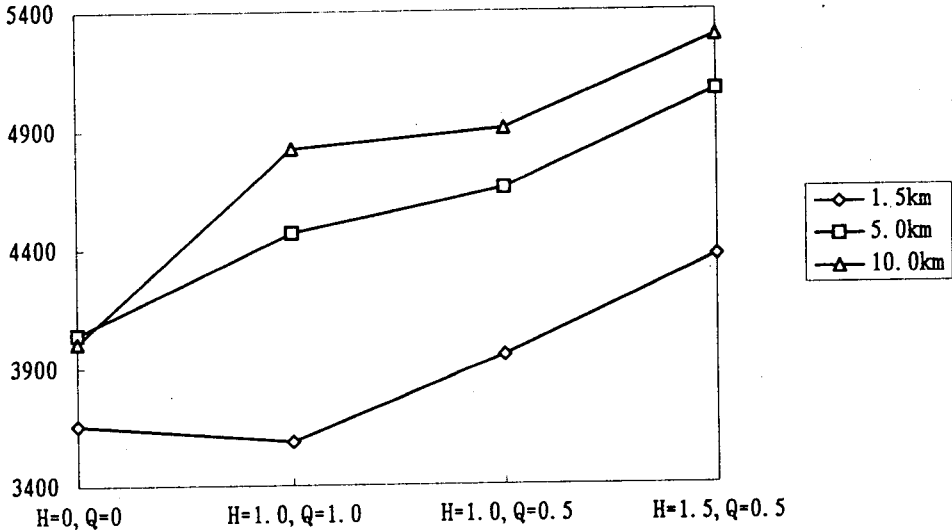
도로위계를 고려한 제안된 노선배정기법에서 위계변경에 의한 불편성의 정도 Q 값과 상위등급 도로에 대한 선호정도 H 값에 따른 노선배정 결과의 민감도를 보기 위해 우선 H=1 로 고정시키고 Q=1.0 에서 0.5 로 불편한 정도를 낮추고 분석하였다. 그 결과는 예상할 수 있는 바와 같이 Q값을 변화시키기 전보다 간선도로의 교통량이 더 많아지고 집분산도로는 작아진 것으로 분석되었다. 이것은 통행자가 위계변경을 덜 꺼리는 행태가 반영되어 상위등급 도로에 더 많은 교통량이 배정되었기 때문이다. 그리고 도로위계 변경에 의한 불편 정도의 변화에 따른 노선배정 결과의 변화량은 노선거리가 길수록 민감하지 않게 변화한다는 것을 알 수 있다.

<표 3> 모의 실험에 의한 LINK통행량

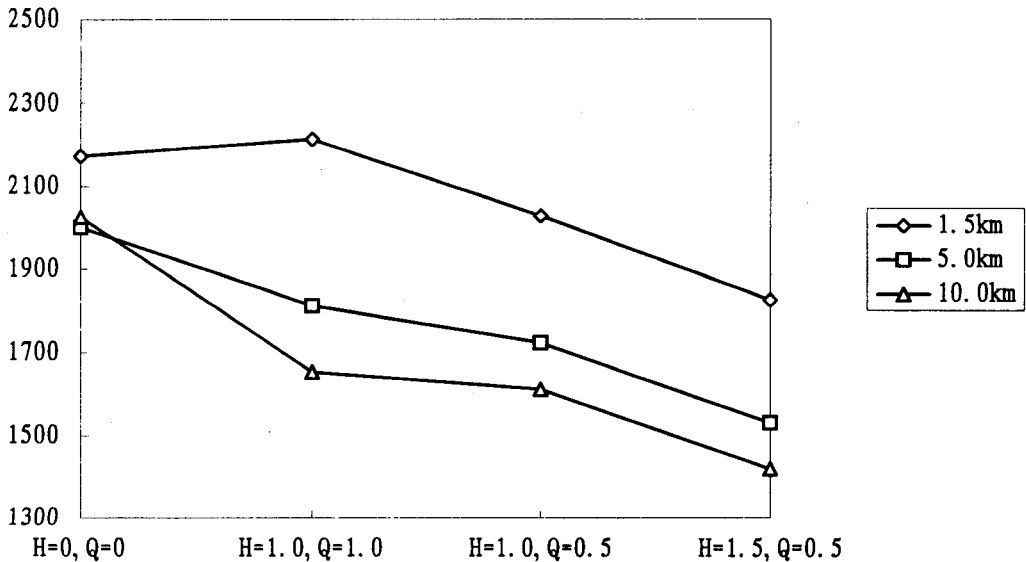
간선도로 거리	링 크	기존기법	H=1.0, Q=1.0	H=1.0, Q=0.5	H=1.5, Q=0.5
1.5km	간선도로 17 → 18	3657	3587	3952	4368
	집분산도로(위) 12 → 13	2173	2213	2028	1826
	집분산도로(아래) 15 → 14	2271	2300	2120	1906
5.0km	간선도로 17 → 18	4044	4469	4567	5064
	집분산도로(위) 12 → 13	2000	1812	1724	1531
	집분산도로(아래) 15 → 14	2056	1819	1720	1505
10.0km	간선도로 17 → 18	4009	4823	4907	5292
	집분산도로(위) 12 → 13	2025	1654	1612	1419
	집분산도로(아래) 15 → 14	2066	1624	1581	1389

이번에는 $Q=0.5$ 로 고정하고 상위등급 도로에 대한 선호정도 $H=1.0$ 을 1.5 로 증가시켜 분석하여 보았다. 이 분석에서도 예상되었던 바와 같이 간선도로에 변경전보다 더 많은 교통량이 배정되었으며, 따라서 집분산도로에는 더 적은 교통량이 배정되었다. 제안된 노선배정모형이 상위등

급 도로에 대한 선호도가 거리에 선형적으로 비례하면서 증가한다는 가정을 하고 있으므로 이 경우 경쟁노선인 집분산도로에 대한 간선도로의 상대적 선호도가 거리의 길이에 관계없이 같기 때문에 1.5Km, 5Km 그리고 10Km의 경우에서 그 변화된 통행량이 유사함을 알 수 있다.



<그림 5> 모의실험에 의한 간선도로 통행량



<그림 6> 모의실험에 의한 집분산도로(위) 통행량

이상과 같은 모의실험 결과에서 기존기법에 의한 분석결과와 제안기법에 의한 노선배정의 결과에 큰 차이가 있을 수 있음을 보여 주었다. 그리고 제안된 기법이 이론적으로 통행자의 노선선택 행태를 잘 반영할 수 있으며, 또한 $H=0, Q=0$ 로 설정할 경우 기존기법에 의한 분석결과와 동일하게 되어 제안된 기법이 기존기법의 일반화된 기법이므로 기존기법보다 발전된 기법이라고 고려된다.

VI. 맺는말

통행자가 노선을 선택하는데는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받게 된다. 노선배정모형에서 일반적으로 통행시간을 가장 많이 적용하고 있으며 필요시에는 통행비용을 추가하는 경우도 있다. 이 연구에서는 이러한 요소 외에도 노선선택에 많이 영향을 주고 있는 것으로 알려진 도로위계구조에 의한 노선선택행태를 노선배정모형에서 반영할 수 있는 기법을 소개하였다. 즉 기중점간의 거리가 멀어질수록 상위등급의 도로 노선을 선택하는 경향이 높으며 위계변경에 의한 불편성을 충분히 보상할 수 있을 정도의 통행시간 단축이 없는 한 노선의 연속성을 유지하는 성향이 있어 도로의 위계를 바꾸지 않는 행태를 모형에 포함하였다. 상위등급도로에 대한 선호도를 나타내는 측정값과 도로위계의 변화에 따른 불편정도를 나타내는 측정값을 노선의 일반비용함수에 포함하므로써 도로위계에 따른 노선선택행태를 설명하였다. 분석상의 편의를 위해서 가상링크(dummy link)를 도로망에 포함하여 기존의 노선배정기법을 그대로 적용하면서 도로위계에 따른 노선선택행태를 함께 분석할 수 있도록 하였다.

이 연구에서는 이러한 노선배분기법을 제시하고 두 지점에 두개의 노선이 존재하는 간단한 도로망을 가지고 기존의 기법과 새로 제안된 기법

간의 차이점을 비교하였다. 또한 제안된기법이 도로위계에 따른 노선선택행태가 어떻게 반영되었는가를 분석하여 제안된 기법의 분석결과가 논리적으로 합리성을 갖고 있음을 보여주었다. 또한 가상 도로망을 가지고 기존기법과 제안된 기법에 의한 분석결과와의 차이를 분석하여 두 기법에 의한 노선배정 분석결과에 많은 차이가 생길 수 있음을 모의실험분석을 통하여 설명하였다.

이 연구에서 제시된 노선배정기법을 더욱 발전시키기 위해서는 상위등급의 도로에 대한 선호도가 과연 최단노선상의 상위등급도로의 거리에 선형적으로 비례하고 있다는 가정이 옳은가에 대한 장래 연구가 필요할 것으로 보이며, 만일 비선형적으로 비례하다고 할 경우 기존의 링크를 기초로한 노선배정기법으로는 분석할 수가 없게 되므로 분석기법에 대한 개발이 필요하게 된다. 또한 현실적 노선선택행태를 정확히 표현할 수 있도록 상위등급도로에 대한 선호도를 나타내는 측정값과 도로위계의 변화에 따른 불편정도를 나타내는 측정값을 어떻게 조사자료를 통하여 추정할 것인가에 대한 장래 연구도 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Bekmann, McGuire and Winsten, Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, 1956
2. Branston, David, Link Capacity Functions : A Review, Transportation Research, Vol. 10, pp. 223-236, 1976
3. Frank, M. and Wolfe, P., An Algorithm for Quadratic Programming, Naval Research Logistics Quarterly 3 (1-2), 1956
4. Kanafani, Adib, Transportation Demand Analysis, McGraw-Hill Company, 1983

5. Mahmassani, Hani and Chen, Peter, An Investigation of the Reliability of Real-time Information for Route Choice Decisions in a Congested Traffic System, *Transportation*, Vol. 20, No. 2, pp. 157-178, 1993
6. Papacostas and Prevedouros, *Transportation Engineering and Planning*, 2nd Edition, Prentice Hall Inc., 1993
7. Sheffi, Yosef, *Urban Transportation Networks : Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-hall, Inc., 1985
8. Thomas, Roy, *Traffic Assignment Techniques*, Avebury Technical (The Academic Publishing Group), 1991
9. Wardrop, J. G., Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings, Institution of Civil Engineers II* (1), 1952