

대한교통학회 제32회 학술발표회

통행자의 노선정보 부족을 반영한 통행량 배정방법

한국기술개발 (주)
조 준 행

I. 서 론

현재 이용되고 있는 통행배정 모형은 대부분 통행인이 전체 도로망의 연결구조나 소통상태와 같은 노선 정보를 완벽하게 알고 있다는 가정 아래 가장 경제적인 경로를 찾아 통행을 배정하고 있다. 그러나 실제 통행인은 일반적으로 노선의 연결 상태에 대해 완벽한 지식이 없으며, 노선의 실시간 소통상태에 대해서도 가정과 같이 완벽하게 알기는 불가능하다. 이러한 현실과 다른 가정상의 제약은 노선배정결과의 정확성을 낮아지게 하는 커다란 요인이 되고 있다. 특히 교통정보 안내 시스템과 같은 지능형 교통체계의 도입 효과 분석시에는 가정상의 제약이 합당한 결과의 도출을 어렵게 만드는 직접적인 제약이 되고 있다. 교통정보 안내 시스템을 이용하지 않는 일반 통행자의 행태를 정확히 반영할 수 없기 때문이다. 이는 기존의 통행배정 방법으로는 해결하기 어려운 문제점으로서 통행인의 노선정보 인식 수준에 관한 비현실적인 가정을 개선한 새로운 방법의 적용을 통해서만 원천적으로 해결될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 통행인의 노선정보 부족 현상을 현재 이용되고 있는 통행배정 모형에 합리적으로 반영하는 방법을 개발하였다. 즉, 통행인의 노선 정보부족을 반영하기 위하여 정보계수를 도입한 새로운 통행비용 함수와 이를 통행배정 모형에 적용하는 구체적인 방법을 제시하고 그 예측 결과가 사용자 평형 조건을 만족하는지를 고찰하였다. 통행인의 노선 선택과정에 필요한 정보를 도로의 연결상태에 관한 정보와 소통상태에 관한 정보, 둘로 구분하고 이들 정보에 대한 통행인의 인지 수준을 계수화하여 이를 통행배정 모형의 통행비용 함수에 반영함으로써 정보부족의 효과가 노선배정에 반영되도록 하였다. 또한 새로운 방법의 검증에 위하여 서울시를 대상으로 이를 적용하여 통행배정 결과를 실측 교통량 및 기존 모형의 예측 결과와 비교하였다. 정보계수에 영향을 미치는 요인에는 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 통행 양단으로부터 해당 링크까지의 거리와 그 링크의 도로 기능상 위계 수준 등 두 가지로 한정하였다.

이러한 시도는 그 동안 다른 모형에서 가정상의 제약으로 인하여 거의 조명될 수 없었던 통행인의 노선관련 정보부족 현상을 직접 다룰 수 있는 이론적 틀과 분석도구를 제시한다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다. 또한 향후 정보부족 현상에 대한 연구 성과가 축적될 경우 결과적으로 통행수요 예측모형의 정확성과 유용성을 향상시킬 것이며 특히 미시 동태적 교통수요예측의 정확성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

II. 관련연구 현황

현재 널리 사용되고 있는 통행배정 방법들은 대부분 간단한 가정에 근거하여 통행을 배정함으로써 문제를 단순화하고 쉽게 해를 얻도록 되어 있다. 그러나 지나치게 단순한 가정을 도입함으로써 이론적으로는 완벽하나 현실과는 잘 맞지 않는 결과를 초래하는 문제점을 안고 있다. 이에 따라 이러한 비현실적인 가정들을 완화하기 위한 노력들이 활발히 진행되어왔다. 이러한 시도들 가운데 통행자의 노선선택 행태와 관련이 있는 주요 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

데이퍼모(Dafermos, 1972)는 여러계층의 통행자를 한 노선망에 배정하는 다층 사용자평형배정(multi-class user equilibrium assignment) 방법을 제시하였다. 이 방법은 각기 다른 경로 선정 기준을 가진 여러 계층의 통행자를 동시에 배정하는 방법이다. 즉 모든 통행자가 동일한 통행비용 함수에 따라 경로를 선정한다는 비현실적인 가정을 개선한 것이다. 각 계층의 사람들은 각자의 비용함수에 따라 경로를 선정한다. 데이퍼모의 배정방법에서는 통행비용이 꼭 교통량만의 함수일 필요가 없다. 반블리트 등(Van Vliet et al, 1986)은 다층 사용자 평형배정 문제를 최소화 문제로 정의하고 그 해법을 제시하였다.

사용자 계층 m 에 속한 통행자의 링크 L 에서의 통행비용, C_L^m 은 다음과 같이 정의 된다.

$$C_L^m = b_0^m t_L + \sum_{k=1}^K b_k^m d_L^k \quad [2.1]$$

여기서

t_L = 링크 L 의 통행시간

d_L^k = 링크 L 의 k 번째 고정비용 요소(예 : 링크길이)

b_k^m = 링크의 비용 요소를 비용으로 전환하기 위한 계수

K = 링크의 고정비용 요소의 개수

식 [2.1]에서 교통량에 영향을 받는 변수는 통행시간뿐이며 나머지 변수는 링크의 교통량과 무관한 값이다. 또한 어떤 링크의 통행시간은 그 링크의 교통량에 의해서만 결정된다.

즉, C_L^m 의 정의에서 t_L 만이 교통량에 의해 결정된다.

$$t_L = t_L(v_L) \quad [2.2]$$

여기서

$$v_L = \sum_m v_L^m$$

만약 $b_0^m \neq 0$ 이면 식 [2.1]은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$C_L'^m = t_L + \sum_k \frac{b_k^m}{b_0^m} \quad [2.3]$$

이 비용 함수를 이용한 최소화 문제의 목적함수는 다음과 같다.

$$z = \sum_L \int_0^{v_L} t_L(v) dv + \sum_L \sum_m \sum_k b_k'^m d_L^k v_L^m \quad [2.4]$$

이밖의 연구로 피스크(Fisk, 1980)는 로짓 경로 선택모형에 근거한 평형배정의 최소화 방법을 제안하였다. 여기서는 운전자는 링크에 대하여 다른 인지비용을 가질 수 있다. 또한 스미스(Smith, 1979)는 '운전자는 오직, 오늘의 경로 비용에 근거하여, 총비용이 저감하는 방향으로 내일의 경로를 바꾼다.'는 보다 현실적인 경로 선정원칙을 제안하였다. 내일의 모든 가능한 경로 교통량은 오늘의 실제 경로비용에 근거하여 이 원칙의 적용을 통하여 결정된다. 이는 운전자가 좀더 싼 경로가 있더라도 오늘의 경로를 바꾸지 않아도 된다는 점에서 워드롭의 첫 번째 원칙보다 더 자연스럽다. 플로리안과 스피스(Florian, Spiess, 1982)는 비대칭 야코비안 행렬의 평형배정 문제에 대한 해결방법을 제시하고 특정 조건 아래에서의 이의 수렴을 보였다. 그러나 지금까지의 이론적 발전, 예를 들어 지체가 발생하는 신호 교차로를 포함한 도로망에 대한 통행배정과 많은 계층의 통행자를 포함하는 모형과 같은 발전에도 불구하고 이들 이론을 실제 적용한 문헌은 거의 없다(Thomas, 1991).

Ⅲ. 정보부족을 반영한 통행비용 함수

3.1 정보부족 상태에서의 통행경로 선정

통행인은 노선 선정시 선택대상 링크의 통행시간 기대치에 근거하여 판단을 하게 된다. 또한 정보를 확실히 알지 못하는 링크는 선택을 주저하게 되며 결국 그 링크는 다른 링크에 비해 선택될 가능성이 낮아진다. 따라서 통행인이 실제 도로의 연결상태나 도로의 소통상태에 대한 정보가 부족하여 어떤 링크의 선택을 주저하고 이에 따라 해당 링크의 선택 확률이 낮아졌다면 이는 통행자가 자신이 잘 모르는 링크의 예상 통행시간을 잘 아는 링크의 예상 통행시간 보다 긴 것으로 인식한 것으로 해석할 수 있다. 바꾸어 말하면 통행인이 부족한 정보를 가지고 있는 링크는 실제의 통행 시간과 직접 관련 없이 통행 시간이 긴 것으로 통행인에게 인식되며, 통행인은 자신이 인지한 통행비용에 근거하여 통행경로를 결정하므로 정보가 부족한 도로의 인지비용에는 실제 통행시간 외에 정보부족에 따른 벌점이 가산되어야 실제 상황에서 벌어지는 현상을 정확히 반영할 수 있다.

통행경로 선정에 필요한 도로 정보는 링크의 연결상태와, 통과 소요시간으로 나누어 볼 수 있다. 링크의 연결상태란 그 링크를 따라 가면 어느 도로와 연결되며, 통행방식은 어떤 것이고 신호등은 어느 곳에 설치되어 있으며, 좌회전이 금지된 곳은 어디며, U-회전이 가능한 곳은 어디인가 등을 의미한다. 통과 소요시간은 링크에 진입하여 그 링크와 연결된 교차로를 완전히 벗어나는 데 소요되는 시간을 의미한다. 따라서 링크의 소통정보를 완전히 아는 경우 링크의 연결정보는 당연히 완벽하게 알아야 한다.

정보가 부족하다는 것은 링크의 연결상태에 관한 정보 중 일부 또는 전부를 알지 못하거나 소통상태에 따른 통과 소요시간에 대한 추정량의 기대치가 실제 상황의 기대치와 일치하지 않는 것을 의미한다. 링크의 연결상태에 관한 정보의 부족은 앞서 언급한 바와 같이 통행자의 불안감을 증가시켜 링크의 선택가능성을 낮아지게 만들므로 통행자는 통행소요시간에 어느 정도의 벌점을 부여하게 된다. 이 벌점은 완벽한 정보를 가진 경우 0의 값을 가지게 되며 완전히 모르는 경우 무한대의 값을 가질 것으로 기대 할 수 있으나 최악의 경우 되돌아 나오는 것을 고려한다면 해당 링크의 평균 소요시간 추정량을 최대값으로 하는 것이 합리적이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_L = C_L + p_L \quad [3.1]$$

여기서

t_L = 링크 L의 통과 예상시간

C_L = 링크 L의 연결상태 정보부족에 따른 통과 예상시간 증가분

$$C_L = (1 - \sigma_L)H_L, \quad (0 \leq \sigma_L \leq 1)$$

σ_L = 링크의 연결상태에 관한 정보 수준, $(0 \leq \sigma_L \leq 1)$

H_L = 같은 유형의 링크 평균 통과속도로부터 산정한 링크 L의 예상
통과시간

p_L = 연결상태에 관한 완벽한 정보하의 링크 L의 통과 예상시간

소통 상태에 관한 완전한 정보를 가진 통행자는 교통량과 용량으로부터 추정된 링크의 예상 속도로 추정한 예상 통과시간을 판단 근거로 사용한다. 반대로 소통상태에 관한 정보를 완전히 모르는 경우를 가정하면 통행인은 비슷한 유형의 도로의 평균적 소통상태를 가정할 것이므로 통행자가 인식하는 통과시간에 대한 기대치는 비슷한 유형의 도로의 평균 통행속도와 링크 길이로부터 계산한 시간이 될 것이다. 소통상태에 관한 불완전한 정보를 가진 통행자가 인식하는 링크의 통과 소요시간은 앞의 두 가지 극단적 경우의 중간 값을 가지게 될 것이며 이를 두 추정치의 결합으로 다음과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$p_L = \eta_L h(v_L) + (1 - \eta_L)H_L, \quad (0 \leq \eta_L \leq 1) \quad [3.2]$$

여기서

$h(v_L)$ = 링크 L의 교통량, 용량으로부터 산정된 통과 예상 시간

η_L = 링크의 소통상태에 관한 정보 수준, $(0 \leq \eta_L \leq 1)$

이를 앞의 식 [3.1]에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t_L &= (1 - \sigma_L)H_L + \eta_L h(v_L) + (1 - \eta_L)H_L \\ &= (2 - \sigma_L - \eta_L)H_L + \eta_L h(v_L), \quad (0 \leq \eta_L \leq 1, 0 \leq \sigma_L \leq 1) \end{aligned} \quad [3.3]$$

여기서 σ_L 은 링크의 연결상태에 관하여 통행자가 알고 있는 정보의 양을 표현하는 수치 즉, 연결 정보계수로 해석할 수 있으며, η_L 는 도로의 소통상태에 관하여 알고 있는 정보의 양을 표현하는 수치 즉, 소통 정보계수로 해석할 수 있다. 기존의 모형에서 가정하는 완전한 정보가 있는 경우의 예상 통행시간은 위 식에서 σ_L 와 η_L 가 모두 1인 특수한 경우이며 정보를 완전히 하나도 모르는 경우는 σ_L 와 η_L 가 모두 0인 경우이다. 링크의 평균 통과 시간 H_L 은 링크 L의 길이가 l 이고 유사한 링크유형 g 의 평균 통과 속도가 s_g 라면 $H_L = \frac{l}{s_g}$ 로 산정된다.

3.2 새로운 통행비용 함수

각 링크에 대한 통행자의 정보수준은 개인별 통행빈도와 기타의 특성에 의하여 크게 차이가 날 수 있다. 이러한 특성을 반영하기 위하여 다음과 같이 정보계수를 각 개인 단위로 도입하는 방안을 고려 해 볼 수 있다. 즉, 어떤 통행자 a가 어떤 링크 L에 대하여 자신의 정보를 근거로 판단하는 통행시간은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{aL} = (2 - \sigma_{aL} - \eta_{aL})H_L + \eta_{aL}h(v_L), (0 \leq \eta_{aL} \leq 1, 0 \leq \sigma_{aL} \leq 1) \quad [3.4]$$

여기서

T_{aL} = 통행자 a가 링크 L에 대해 판단하는 통행시간

H_L = 같은 유형의 링크 평균 통과속도로부터 산정한 링크 L의 예상 통과시간

$h(v_L)$ = 링크 L의 교통량, 용량으로부터 산정된 통과 예상 시간

σ_{aL} = 통행자 a의 링크 L의 연결상태에 대한 정보 수준

η_{aL} = 통행자 a의 링크 L의 소통상태에 대한 정보 수준

식 [3.4]는 식 [3.3]에 개인 단위의 정보계수를 도입한 것이다. 이 함수에서는 모든 통행자는 어떤 링크에 대하여 각기 다른 수준의 정보를 가지며 따라서 노선 선택행위도 통행자의 정보계수의 분포에 따라 다르게 나타난다. 개인의 정보수준이 각 개인의 특성에 따라 달라진다면 정보계수는 0과 1사이의 변위를 가지는 연속 확률 변수로 가정하는 것이

가장 자연스럽다. 이 경우 링크에 대한 통과시간의 판단 결과가 각 개인마다 다르므로 기종점이 같은 통행자의 최단 경로는 유일하게 결정되지 않고 개인마다 각기 다르게 나타난다. 따라서 어떤 경로가 기종점간의 최단 경로가 될 확률은 링크에 대한 개인 정보계수의 확률분포에 의하여 결정된다.

그러나 개인단위 정보계수를 도입한 통행비용함수는 실제 문제에 적용이 사실상 불가능하다. 식 [3.4]에서 σ_{aL} 과 η_{aL} 가 편의상 0과 1의 값만을 가지는 이항 확률 변수라고 가정하면 0과 1 사이의 변역을 가지는 연속함수로 가정하는 경우보다 현실에 대한 유사성은 다소 낮아지지만 문제의 구조는 훨씬 간단해진다. 즉, 각 링크에 대한 개인의 정보 수준이 '있다'와 '없다'로 양분되므로 어떤 링크에 대해 한 개인이 인지하는 통행비용의 값은 오직 H_L 과 $h(v_L)$ 의 정수배 결합으로 이루어진 네 가지 경우, H_L , $2H_L$, $H_L + h(v_L)$, $h(v_L)$ 밖에 없게 된다. 따라서 링크에 대한 통행인의 정보계수의 분포 특성은 출현 확률, 즉 통행자가 그 링크에 관한 정보를 알 확률만으로 결정된다. 이는 계산과정을 크게 단축시킬 수 있다. 그러나 이 경우에도 실제 도로망에서 이 비용함수를 이용한 통행배정의 구현은 현재까지 알려진 방법으로는 불가능하다. 한 경로 p 에 속한 링크의 개수가 n_p 개인 경우, 이 경로에서 출현 가능한 판단 통행시간은 2^{n_p} 개이며 전체 선택대상 통행시간 조합의 수는 $N = \prod_p 2^{n_p}$ 가지가 된다. 문제는 이들 조합들 가운데 최소시간 경로를 찾고 그 조합의 출현 확률을 계산하는 것이다. 이의 계산은 현재까지 알려진 방법으로는 사실상 불가능하다. 따라서 개인 단위의 통행비용 함수는 실용성이 없으며 통행배정모형에 정보 부족 현상을 반영하기 위하여는 이러한 복잡한 형태가 아닌 적용 가능한 형태의 통행비용 함수를 사용하여야 한다.

본 연구에서는 현실적인 적용성이 유지되는 가운데 통행자의 정보수준 변화를 반영할 수 있는 통행비용 함수로 식 [3.3]과 함께 식 [3.5], [3.6] 등 세 가지 형태의 함수를 검토하였다.

$$t_L^{\ddot{y}} = (2 - \sigma_L^{\ddot{y}} - \eta_L^{\ddot{y}})H_L + \eta_L^{\ddot{y}} h(v_L), (0 \leq \eta_L^{\ddot{y}} \leq 1, 0 \leq \sigma_L^{\ddot{y}} \leq 1) \quad [3.5]$$

$$t_L^{\ddot{y}}(v_L) = \frac{t_L^{\ddot{y}}(v_L)}{\eta_L^{\ddot{y}}} = h_L(v_L) + \alpha_L^{\ddot{y}} \quad [3.6]$$

$$\left(\alpha_L^{\ddot{y}} = \frac{(2 - \sigma_L^{\ddot{y}} - \eta_L^{\ddot{y}}) \cdot H_L}{\eta_L^{\ddot{y}}} \right)$$

여기서

t_L^{ij} = 기점 i 와 종점 j 사이 통행자의 링크 L 에 대한 인지통행시간

H_L = 같은 유형의 링크 평균 통과속도로부터 산정한 링크 L 의 예상
통과시간

$h(v_L)$ = 링크 L 의 교통량, 용량으로부터 산정된 통과 예상 시간

σ_L^{ij} = 기점 i 와 종점 j 사이 통행자의 링크 L 의 연결상태에 대한 정보
수준

η_L^{ij} = 기점 i 와 종점 j 사이 통행자의 링크 L 의 소통상태에 대한 정보
수준

식 [3.5]와 [3.6]은 통행자의 링크에 대한 정보수준을 기종점쌍 단위로 반영하는 구조의 통행비용 함수이다. 이들 함수에서는 기종점이 같은 통행자는 모든 링크에 대해 같은 정도의 정보를 가지고 있다. 따라서 기종점간의 경로 선정시 개인의 차이에 의한 복잡한 확률적 문제가 발생하지 않는다.

식 [3.5]와 [3.6]은 모두 기종점 단위의 정보계수를 반영한 것이나 형태가 다르다. [3.5]가 링크의 통과 시간을 기종점별 정보계수에 따라 예상통과 시간과 실제 통과시간의 다중곡선으로 산정하는데 비해 [3.6]은 링크의 실제 통과시간에 기종점에 따라 일정 크기의 상수(α_L^{ij})를 더해주는 형태로 되어있다. 즉 기종점별 정보계수에 따라 결정되는 일종의 벌점(penalty)을 부가한 것과 같은 형태이다. 식 [3.3]은 링크의 정보계수가 통행의 기종점과는 무관하게 결정된다. 따라서 이 통행비용 함수로는 통행의 특성을 반영할 수가 없으며 단지 링크의 특성, 즉 위계수준이나 기타 도로상태, 주변 여건 등에 의한 통행자의 그 링크에 대한 정보수준만을 반영할 수 있다.

3.3 새 통행비용 함수의 특성

가. 링크 단위 통행비용 함수의 특성

링크단위 통행비용 함수는 기존의 통행비용 함수와 유사한 형태이다. 이는 링크 단위로 부여되는 정보계수와 링크 그룹별로 부여되는 기대 통행시간을 상수로 간주하면 아래에서 보는 바와 같이 기존 통행비용 함수의 선형결합으로서 역시 단조 증가함수이다.

$$t_L = (2 - \sigma_L - \eta_L)H_L + \eta_L h(v_L), \quad (0 \leq \sigma_L \leq 1, 0 \leq \eta_L \leq 1)$$

$$= \alpha + \beta h(v_L) \quad \alpha, \beta \geq 0 \text{인 상수} \quad [3.7]$$

이 함수를 휴리스틱 배정방법이나 사용자 평형 배정방법에 적용하는 데는 이론적으로나 방법론적으로 아무런 문제가 없다. 그 이유는 사용자 평형조건을 만족하는 유일 해 (solution)를 도출하는 것으로 이미 확고하게 증명이 되어 있는 베크만의 변형식과의 비교를 통하여 알 수 있다. 베크만 변형식은 다음과 같다.

$$\min z(v) = \sum_L \int_0^{v_L} t'_L(x) dx \quad [3.8]$$

s.t.

$$\sum_p f_p^{ij} = q_{ij}, \quad \forall i, j$$

$$f_p^{ij} \geq 0, \quad \forall p, i, j$$

$$v_L = \sum_i \sum_j \sum_p f_p^{ij} \delta_{L,p}^{ij}, \quad \forall L$$

여기서

$$f_p^{ij} = i \rightarrow j \text{간 교통량 중 경로 } p \text{를 이용하는 교통량}$$

$$q_{ij} = i \rightarrow j \text{간 교통량}$$

$$\delta_{L,p}^{ij} = \begin{cases} 1 : \text{링크 } L \text{이 } i \rightarrow j \text{간 경로 } p \text{에 속한 경우} \\ 0 : \text{그 밖의 경우} \end{cases}$$

새 통행비용 함수를 적용하기 위하여는 식 [3.8]에서 $t'(x)$ 를 $t(x)$ 로 교체하면 된다.

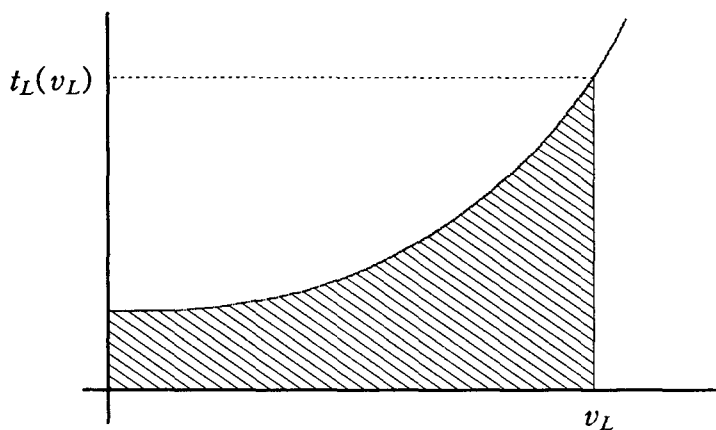
$$\min z(v) = \sum_L \int_0^{v_L} t_L(x) dx \quad [3.9]$$

식 [3.8]의 해가 평형통행 조건을 만족하기 위한 조건은 $t'_L(x)$ 가 교통량 x 에 대하여 단조 증가함수인 것이다. 식 [3.9]에 사용된 통행비용 함수 $t_L(x)$ 도 교통량 x 에 대하여 단조 증가함수이므로 식 [3.9]의 해는 평형통행조건을 만족한다. 이는 다음과 같이 목적함수

의 경로 교통량에 대한 미분치의 특성을 살펴보면 자명하다. 식 [3.9]의 통행비용 함수는 식 [3.8]의 통행비용 함수에 단순히 상수가 곱해지고 더해진 형태이므로 경로 및 링크 교통량에 대한 미분 결과의 특성도 식 [3.8]의 경우와 같다. 이는 헤시안 행렬에 대해서도 마찬가지이다. 따라서 해가 평형조건 및 유일성조건을 만족함은 자명하다. 또한 마찬가지 이유로 링크단위 통행비용 함수는 확률적 사용자 평형배정에 적용하는 데도 아무런 문제가 없다.

나. 기종점 단위 통행비용 함수의 특성

식 [3.5] 형태의 통행비용 함수를 기존의 사용자 평형모형의 틀에 그대로 이용하기 위하여는 베크만 변형식과 같은 계획(program) 모형에 새로운 통행비용 함수를 적용하고 여기서 얻어지는 해가 평형통행 조건 및 유일성 조건을 만족함을 증명하여야 한다. 그러나 새로운 비용함수의 적용을 위하여는 목적함수의 변형이 불가피하다. 왜냐하면 새로운 통행비용 함수는 같은 링크에서도 통행의 기종점에 따라 다른 비용함수가 적용되기 때문이다. 이를 좀더 자세히 살펴보기 위하여 베크만의 변형식에서 목적함수내 적분식의 값이 의미하는 바를 먼저 살펴볼 필요가 있다. 식 [3.9]에서 적분식의 내용을 그림으로 나타내면 <그림 3-1>과 같다.

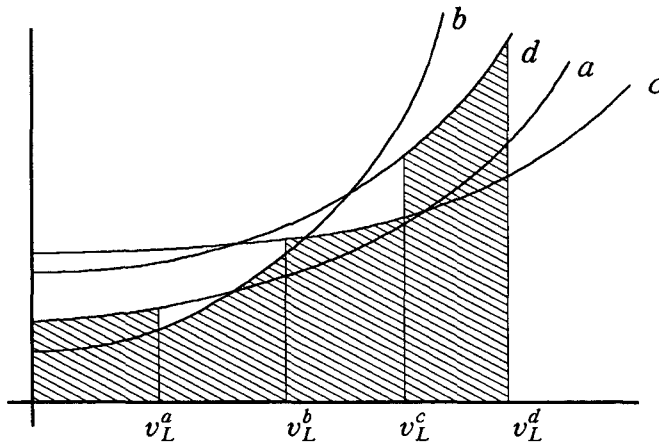


<그림 3-1> 베크만 변형식 중 적분의 의미

적분식의 결과는 위 그림에서 빗금친 부분의 면적과 같다. 이는 링크를 통행하는 각 통행자가 도로의 용량을 순차적으로 사용한다고 가정하는 경우, 즉 도로에 순차적으로 진입을 결정한다고 가정하는 경우 각자의 기대 통행비용을 누적한 것이다. 이 누적 비용을 전체 링크에 대하여 합산한 값이 목적함수이다.

새로운 통행비용 함수는 각 링크에서의 정보계수가 기종점으로부터 링크까지의 거리에

따라 달라진다. 이에 따라서 <그림 3-1>에서의 빗금친 부분이 <그림 3-2>와 같이 복잡한 형태로 바뀌게 된다. 여기서는 편의상 4 개의 기종점쌍(pair)간의 교통량이 지나는 링크를 예로 설명하였다. 링크 L을 지나는 교통량을 기종점쌍에 따라 각각 a, b, c, d 로 구분하고 각각의 교통량을 $v_L^a, v_L^b, v_L^c, v_L^d$, 정보계수에 따른 링크 L에서의 통행비용 함수를 $t_L^a, t_L^b, t_L^c, t_L^d$ 라고 표시한다. 설명의 편의를 위하여 우선 기종점쌍 a 의 통행자가 가장 먼저 도로를 통행하고, 즉 도로의 용량을 사용하고 이후 다른 기종점쌍의 통행자들이 알파벳순으로 도로의 용량을 사용하는 것으로 가정한다. 이런 경우 위 그림에서의 빗금친 부분과 같은 의미의 영역은 아래 그림의 빗금친 부분과 같이 나타난다.



<그림 3-2> 새로운 통행비용 함수 도입시 변형식 중 적분식의 의미

이는 각기 다른 통행비용 함수의 영향을 보여주고 있다. 빗금친 부분의 면적, S'_L 을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S'_L = \int_0^{v_L^a} t_L^a(x) dx + \int_{v_L^a}^{v_L^b} t_L^b(x) dx + \int_{v_L^b}^{v_L^c} t_L^c(x) dx + \int_{v_L^c}^{v_L^d} t_L^d(x) dx \quad [3.10]$$

이 경우 다음과 같은 목적함수의 설정이 가능하다.

$$\min z(v) = \sum_L \sum_k \int_{v_L^{k-1}}^{v_L^k} t_L^k(x) dx \quad [3.11]$$

여기서

$k=(i-1)*n+j$, 기종점 번호의 증가순으로 기종점쌍에 부여된 일련번호(n 은 존의 개수)

$v_L^k = \sum_{b=0}^k v_L^b$, 링크 L을 지나는 k 번째까지의 기종점별 교통량의 누적치(단, $v_L^0=0$)

t_L^k =링크 L에서 기종점쌍 k 간 통행자의 판단 통행비용

이 목적함수의 링크 L에서의 기종점쌍 k 간 경로 교통량, f_i^b 에 대한 도함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial z}{\partial f_i^b} = \sum_r \frac{\partial z}{\partial v_r^b} \cdot \frac{\partial v_r^b}{\partial f_i^b} \quad [3.12]$$

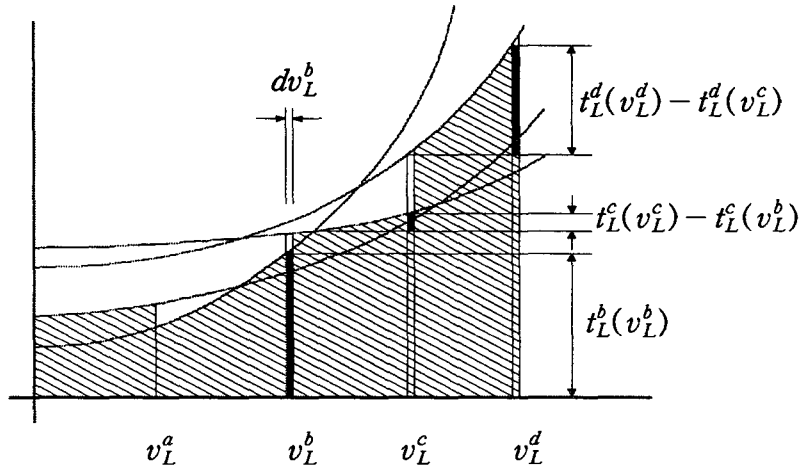
$$\frac{\partial z}{\partial v_r^b} = \frac{\partial}{\partial v_r^b} \sum_L \sum_k \int_{v_L^{k-1}}^{v_L^k} t_L^k(x) dx \quad [3.13]$$

$$= t_r^b + \sum_{a=b+1}^n \{t_r^a(v_r^a) - t_r^a(v_r^{a-1})\} \quad [3.14]$$

식 [3.14]와 같이 계산되는 이유는 <그림 3-3>을 보면 자명하다. 그림에서 b 순번 기종점쌍의 교통량이 소량 증가 할 경우 이 증가된 교통량의 영향은 이후 순번의 기종점 교통량에 영향을 미치게 되어 굵은 선 만큼씩 통행시간이 증가하게 된다. 따라서 목적함수, z 의 경로교통량, f_p^b 에 대한 도함수는 식 [3.15]에서 보는 바와 같이 해당 경로의 통행시간, c_p^b 와 일치하지 않게 된다.

$$\frac{\partial z}{\partial f_p^b} \neq \sum_r t_r^k \cdot \delta_{r,p}^k = c_p^k \quad [3.15]$$

식[3.15]는 이러한 형태의 목적함수의 해(solution)가 평형 통행조건을 만족시킬 수 없음을 의미한다.



<그림 3-3> 링크교통량 증가에 따른 목적함수의 증가(다중곡선형)

근본적으로 같은 링크를 이용하는 통행자의 통행비용 함수의 같은 링크 교통량에서의 기울기가 서로 다른 경우에는 기존의 수리계획 모형을 이용한 평형 교통량의 도출은 불가능하다. 베크만 변형식에서는 목적함수를 경로 교통량으로 미분한 값이 0이 되는 지점에서 평형 교통량이 도출된다. 이러한 구조는 평형 조건을 만족시키기 위해서는 피할 수 없는 구조이다. 새로운 통행비용 함수를 적용하여 수립한 어떤 목적함수, $z'(v)$ 가 최소값에서 평형 통행조건을 만족한다면 이 함수의 경로 교통량, f_p^{ij} 대한 1차 도함수는 반드시 c_p^{ij} 가 되어야 하며 이를 위해서는 링크 교통량, v_L^{ij} 에 대한 도함수가 반드시 $t_L^{ij}(v_L)$ 가 되어야 한다. 그러나 <그림 3-3>에서 보는 바와 같이 v_L^b 의 극미량(dv_L^b)의 증가에 따른 목적함수의 증가분은 $t_L^b(v_L^b)$ 와는 전혀 무관한 값이 된다. 기존의 통행비용 함수를 이용하는 경우는 같은 링크에서는 통행의 기종점에 관계없이 모두 동일한 통행비용 함수를 적용하므로 이러한 현상이 발생하지 않는다. 따라서 식 [3.5]의 새로운 통행비용 함수를 기존의 사용자 평형 배정방법에 적용할 경우 평형 교통량을 얻을 수 없으며 나아가 기존의 수리계획 모형을 이용하여서는 어떠한 경우에도 평형 교통량을 얻을 수 없다. 같은 이유로 기종점 단위의 통행비용 함수는 확률적 사용자 평형 방법의 적용도 무의미하며 사실상의태분석만이 대안이 될 수 있다.

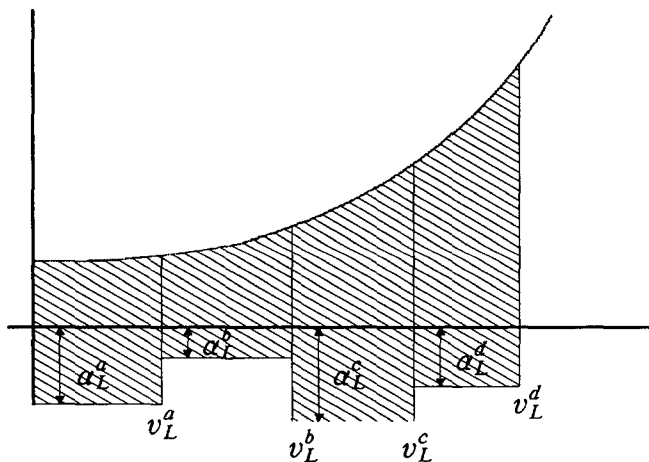
그러나 식 [3.6] 형태의 기종점 단위 통행비용 함수는 사용자 평형모형의 적용이 가능하다. 이 함수는 식 [3.5]에서 링크에서의 각 기종점별 통행비용을 소통 정보계수로 나누어

준 것이다. 이렇게 할 경우 각 링크에서의 통행비용 함수는 통행의 기종점과 무관하게 모두 같은 모양을 하게 되며 단지 상수항이 부가되어 링크 교통량에 대한 목적함수의 미분치가 기종점쌍별로 달라지는 문제점을 해소할 수 있게 된다. 변형된 통행비용 함수를 적용하는 경우의 목적함수와 해의 1차 조건과 해의 유일성에 대한 검토 결과는 다음과 같다.

변형된 통행비용 함수를 이용한 사용자 평형배정을 위한 동치의 수리계획(equivalent program)은 다음과 같다.

$$\min z'(v(f)) = \sum_L \left\{ \int_0^{v_L} h_L(x) dx + \sum_i \sum_j a_L^{ij} \cdot v_L^{ij} \right\} \quad [3.16]$$

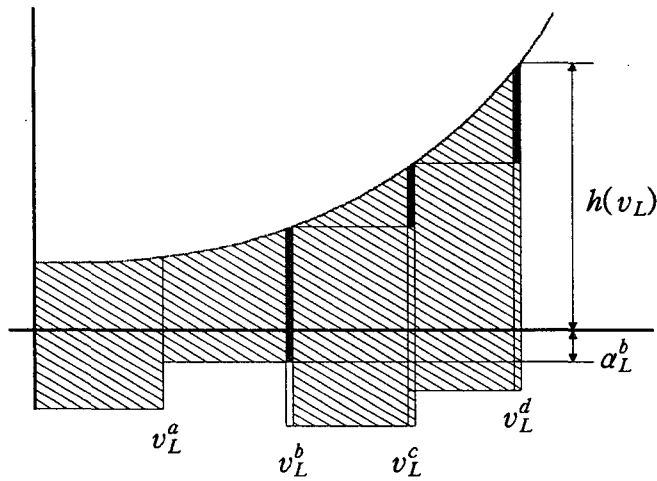
이 계획(program)은 정리하면 식 [3.3]과 동일한 형태임을 알 수 있다. 따라서 이 계획의 해는 사용자평형 조건을 만족하며 유일해를 갖는다. 빠른 이해를 위하여 이 계획의 목적함수가 나타내는 의미를 그림으로 표현하면 <그림 3-4>와 같다. 그림에서 빗금친 면적은 한 링크에서의 목적함수의 값을 나타내며 목적함수는 이 면적을 전체 링크에 대해 합산한 값이다.



<그림 3-6> 별점형 통행비용 함수를 이용한 계획의 목적함수의 의미

목적함수의 특정 링크에서의 경로 교통량에 대한 도함수는 식 [3.17]과 같이 구해지며 이는 <그림 3-5>를 통하여 쉽게 이해할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial z'[v(f)]}{\partial v_r^{mn}} &= \sum_L \frac{\partial}{\partial v_r^{mn}} \int_0^{v_L} h_L(x) dx + \sum_L \sum_i \sum_j \frac{\partial \{a_L^{ij} \cdot v_L^{ij}\}}{\partial v_r^{mn}} \\ &= h_r(v_r) + a_r^{mn} = t_r'^{mn}(v_r) \end{aligned} \quad [3.17]$$



<그림 3-5> 링크교통량 증가에 따른 목적함수의 증가(별점형)

이상에서 살펴본 통행비용 함수의 형태별 모형 적용상의 특성을 요약하여 정리하면 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 새 통행비용 함수의 형태별 특성

비용함수 구분단위	함 수 형 태	특 성
링 크	$t_L = (2 - \sigma_L - \eta_L)H_L + \eta_L h(v_L)$	- 도로의 위계 구조와 같은 링크 본래의 특성에 따른 정보 변화만 반영 가능 - 사용자 평형 배정 방법을 비롯한 모든 기존 배정방법 적용 가능
기종점	$t_L^{ij} = h_L(v_L) + a_L^{ij}$ $\left(a_L^{ij} = \frac{(2 - \sigma_L^{ij} - \eta_L^{ij}) \cdot H_L}{\eta_L^{ij}} \right)$	- 통행의 기종점 단위 정보 변화 반영 가능 - 사용자 평형 배정 방법 적용 가능
	$t_L^{ij} = (2 - \sigma_L^{ij} - \eta_L^{ij})H_L + \eta_L^{ij} h(v_L)$	- 통행의 기종점 단위 정보 변화 반영 가능 - 사용자 평형 배정 방법 적용 불가능
개 인	$t_{aL} = (2 - \sigma_{aL} - \eta_{aL})H_L + \eta_{aL} h(v_L)$	- 개인 단위 정보 변화 반영 가능 - 현실의 도로망에서 사실상 적용 불가능

링크 단위의 통행비용 함수는 적용성은 우수하나 정보 변화의 단위가 링크로 한정되어 정보계수의 도입 효과를 제대로 살리기 어렵다. 기종점 단위 통행비용 함수의 경우 별점 부과형은 적용성도 우수하고 정보계수도 세밀히 반영할 수 있다. 반면 두 번째는 기존의 평형배정 모형에는 적용이 불가능하며, 따라서 사실상 휴리스틱 배정 방법만 적용 가능하다. 개인단위 통행비용 함수는 사실상 적용이 불가능하다.

IV. 정보부족을 반영한 통행배정 방법

4.1 새로운 통행비용 함수의 적용방법

별점형 통행비용 함수는 분할배정 모형에 적용시 기존의 모형을 그대로 사용할 수 있다. 이에 반하여 다중곡선형 통행비용 함수는 사용자 평형모형에는 적용이 불가능하다. 따라서 본 절에서는 별점형 함수에 대하여는 사용자 평형배정 방법, 다중곡선형 함수에 대하여는 분할배정 방법을 각각 제시하였다. 이들 모형의 단계별 적용방법을 살펴보면 다음과 같다.

가. 분할배정($t_L^j = (2 - \sigma_L^j - \eta_L^j)H_L + \eta_L^j h(v_L)$ 적용시)

0 단계 : 초기화

- set $v_L = 0$
- set $n = 0, i = 0, j = 0$
- set $t_L = h(v_L)$

1 단계

- set $n = n + 1$
- set $w_L = 0$

2 단계

- set $i = i + 1$
- 기점으로부터 각 링크까지의 거리, $\{D_L^i\}$ 산정

3 단계

- set $j = j + 1$
- 만약 $n = 1$ 이면 4 단계로 감
- 종점으로부터 각 링크까지의 거리, $\{D_L^j\}$ 산정
- $\{D_L^j\}$ 산정, $D_L^j = \min(D_L^i, D_L^j)$
- $\{t_L^j\}$ 산정, $t_L^j = (2 - \sigma_L^j - \eta_L^j)H_L + \eta_L^j h(v_L)$

4 단계

- $i \rightarrow j$ 간 최단경로에 속한 모든 링크 p 에 통행량 q_{ij}^n 배정, 배정 교통량 $\{w_p\}$ 산정, $w_p = w_p + q_{ij}^n$
- $j = n$ 이면 5 단계로 감, 아니면 3 단계로 감

5 단계

- $i = n$ 이면 6 단계로 감, 아니면 2 단계로 감

6 단계

- $\{v_L\}$ 산정, $v_L = v_L + w_L$
- 링크그룹별 평균속도에 의한 링크 L 의 예상통행비용, H_L 산정
- $n = N$ 이면 멈춤, 아니면 1 단계로 감

나. 사용자 평형 배정 ($t_L^{ij} = h_L(v_L) + \alpha_L^{ij}$ 적용시)

0 단계 : 초기화

- set $v_L = 0$
- set $n = 0, i = 0, j = 0$
- set $t_L = h(v_L)$

1 단계

- set $n = n + 1$
- set $w_L = 0$

2 단계

- set $i = i + 1$
- 기점으로부터 각 링크까지의 거리, $\{D_L^i\}$ 산정

3 단계

- set $j = j + 1$

- 만약 $n=1$ 이면 4 단계로 감
- 종점으로부터 각 링크까지의 거리, $\{D_L^i\}$ 산정
- $\{D_L^j\}$ 산정, $D_L^j = \min(D_L^i, D_L^i)$
- $\{t_L^j\}$ 산정, $t_L^j = (2 - \sigma_L^j - \eta_L^j)H_L + \eta_L^j h_L(v_L)$

4 단계

- $i \rightarrow j$ 간 최단경로에 속한 모든 링크 p 에 통행량 q_{ij}^n 배정, 배정 교통량 $\{w_p\}$ 산정, $w_p = w_p + q_{ij}^n$
- $j=n$ 이면 5 단계로 감, 아니면 3 단계로 감

5 단계

- $i=n$ 이면 6 단계로 감, 아니면 2 단계로 감

6 단계

- $n=0$ 이면 7 단계로 감
- 이동거리탐색, $\min_{0 \leq \alpha_n \leq 1} \sum_L \int_0^{v_L + \alpha_n(w_L - v_L)} C_L(x) dx$ 를 만족하는 α_n 을 찾음
- 링크 교통량 $\{v_L\}$ 산정, $v_L = v_L + \alpha_n(w_L - v_L)$
- 8 단계로 감

7 단계

- 링크 교통량 $\{v_L\}$ 산정, $v_L = w_L$

8 단계

- 링크그룹별 평균속도에 의한 링크 L 의 예상통행비용, H_L 산정
- $n=N$ 이면 멈춤, 아니면 1단계로 감

4.2 통행자의 정보량 변화 요인

경로 선정에 필요한 정보의 양은 여러 가지 요인에 의하여 변화할 수 있다. 일반적인 경우 정보의 양에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 통행빈도를 들 수 있다. 자주 가는 목적지의 주된, 또는 경쟁 경로 상의 링크에 관하여는 통행자가 많은 정보를 알고 있다고 가정할 수 있다. 따라서 정보계수 δ 와 η 는 통행빈도의 함수로 표현될 수 있다. 그러나

이 함수식을 그대로 통행 배정모형에 적용하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 모든 통행인의 통행 목적지별 통행 빈도수를 알아야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 통행의 출발지와 목적지로부터의 거리를 사용하였다.

통행의 출발지와 목적지에서 가까운 링크의 경우 먼 링크에 비하여 통행빈도가 많을 가능성이 높으며, 따라서 세세한 도로의 연결상태와 소통상태에 대하여도 많은 정보를 가지고 있을 가능성이 통행경로의 중간 지점보다는 높다. 이는 대부분의 규칙적 통행은 목적지가 한정되어 있고 한정된 목적지를 자주 왕래하는 경우 통행 양단에 인접한 링크의 경우 통행을 할 확률이 높기 때문이다. 따라서 정보 계수를 통행단으로부터의 거리의 함수로 표현할 수 있다.

또한 통행자의 링크에 관한 정보의 양은 도로의 위계에 따라서도 크게 변화할 가능성이 높다. 즉, 간선도로에 대하여는 통행인이 집산도로보다 정보를 많이 가지고 있을 가능성이 높다. 물론 간선도로는 통행빈도도 높을 가능성이 많으나 각종 지도나 안내 표지판 등이 비교적 잘 정비되어 있기 때문에 통행빈도와는 독립적으로 통행인의 정보량이 많을 가능성이 높다. 위계가 높은 도로는 지리를 모르는 통행자가 잘못된 길로 들어가 시간을 낭비하게 될 가능성이 적어진다. 따라서 위계가 높은 도로는 노선에 대한 정보가 부족한 통행자에게 국지도로보다 상대적으로 높은 정보수준을 유지하게 된다. 이밖에도 도로변에 있는 대단위 통행유발 시설이나 인상적인 건물, 관광유적과 같은 주변 여건도 정보의 양에 영향을 미칠 수 있으나 본 연구에서는 이들을 무시하였다. 이상의 내용을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_L^{\dot{j}} = h(D_L^{\dot{j}}, g_L) \quad [4.1]$$

$$\eta_L^{\dot{j}} = h'(D_L^{\dot{j}}, g_L) \quad [4.2]$$

여기서

$\sigma_L^{\dot{j}} = i-j$ 간 통행인의 링크 L에 대한 연결 정보수준

$\eta_L^{\dot{j}} = i-j$ 간 통행인의 링크 L에 대한 소통 정보수준

$D_L^{\dot{j}} =$ 링크 L의 i 또는 j 로부터의 거리 중 작은 값

$g_L =$ 링크 L의 유형(위계등급)

4.3 기존방법과의 비교

워드롭이 처음 제시한 사용자 최적 통행원칙은 ‘사용자가 선택한 모든 경로의 통행시간은 같으며, 이는 선택하지 않은 어떤 다른 경로의 통행시간보다 크지 않다’는 것이다. 본 연구에서 제시하고 있는 기중점단위 정보계수가 도입된 통행비용 함수를 사용하는 경우 배정결과는 이 원칙에 입각한 배정 결과와는 달라지게 된다. 통행자는 자신의 실제 통행비용을 최소화하는 노선을 선정하는 것이 아니라 자신이 현재 가지고 있는 노선정보로부터 판단한 통행비용을 최소화하는 방향으로 통행노선을 선정하기 때문이다. 따라서 이러한 통행자의 통행원칙을 사용자 최적 통행원칙과 유사한 틀로 재구성한다면 다음과 같이 될 것이다.

사용자가 선택한 모든 경로에 대한 사용자의 판단 통행시간은 같으며, 이는 선택하지 않은 어떤 다른 경로에 대한 판단 시간보다 크지 않다.

이는 워드롭의 사용자 최적원칙에서 ‘통행시간’을 ‘사용자의 판단 통행시간’이란 말로 대체한 것에 불과하다. 이는 통행비용을 단순히 교통량의 함수로 정하지 않고 여기에 통행자의 정보 수준을 감안한 판단 시간으로 정하였기 때문이다. 판단 시간은 사용자 최적원칙의 통행시간보다는 확률적 사용자 최적 원칙의 인지시간과 더 유사한 성격을 가졌다. 다간조와 쉐피(Daganzo, Sheffi, 1977)가 정의한 확률적 사용자 최적 원칙은 다음과 같다.

확률적 사용자 최적 도로망에서는 모든 통행자가 자신 혼자 일방적으로 노선을 변경해서는 통행시간을 단축시킬 수 없다고 믿는다. 바꿔 말하면 어떤 통행자도 자신이 일방적으로 노선을 변경하여 인지비용을 감소시킬 수 없다.

이 원칙에 의하면 모든 통행자는 자신의 인지비용을 최소화하는 노선을 선택한다. 여기서 인지비용이란 통행량의 함수인 통행시간에 개인의 인지 오차가 부가된 것이다. 판단시간과 인지시간은 각각 개인의 특성을 반영하는 확률변수 ε 과 σ , η 등을 포함하고 있다는 점이 유사하다. 그러나 인지시간에서 확률변수 ε 은 변역이 $(-\infty, +\infty)$ 이고 기대값은 0인 반면, 판단시간의 확률변수 σ 와 η 는 변역이 $(0, 1)$ 이며 기대값도 0이 아니다. 여기에 판단시간에는 확률변수 외에도 유사링크의 평균 통과속도로부터 계산한 평균통과기대 시간(H_L)도 삽입되어 있다. 다중곡선형은 판단 통행시간의 기대값이 실제 통행시간 이하가

될 수도 있으나 벌점형의 경우는 언제나 실제 통행시간 이상의 값을 가진다. 다중곡선형은 소통정보 계수의 값이 0인 경우도 적용이 가능하나 벌점형은 소통정보 계수의 값이 0인 경우에는 통행비용의 산정이 불가능하므로 적용이 불가능하다.

인지비용은 기대치가 실제 통행시간과 같고 일정한 확률분포를 가지는 변수로 가정하고 있다. 그러나 이러한 가정은 지나치게 많은 변화 요인을 확률항에 포함시킴으로써 모형의 정확성을 낮아지게 한다. 즉 본 연구에서 다루고 있는 정보의 부족에 의한 개인간 편차 등도 모두 오차항에 포함되어 있다고 볼 수 있다. 오차의 내용 중 체계적인 설명이 가능한 부분은 그 비중이 클 경우 이를 오차항 밖으로 추출하여 다루는 것이 모형의 정확성을 향상시키는 방안이 된다. 본 연구에서는 개인별 정보의 양이 그러한 경우라고 가정하고 이를 분리해 낸 것이다.

새로운 배정방법을 사용하여 통행을 배정하는 경우 예상되는 배정 결과의 특징을 기존 배정방법과 비교하여 살펴보면 다음과 같다. 우선 사용자 최적원칙에 입각한 배정모형의 결과에서는 상위 위계의 도로와 인접해 있는 하위 도로의 통행속도가 상위 도로의 속도와 매우 유사한 값을 가질 가능성이 높다. 비슷한 위치에 놓인 링크라면 기존의 배정 모형에서는 이들의 위계에 따른 통행자의 정보의 차이를 반영할 수가 없기 때문에 비슷한 통과 시간이 소요되도록 교통량이 배정 될 것이기 때문이다. 반면 새로운 배정 모형은 통행시간에 실제 배정된 교통량만 반영되지 않고 정보의 수준이 함께 반영되므로 배정 결과 실제 나타나는 통행시간은 상위위계도로와 하위 위계 도로가 얼마든지 다를 수 있다.

기존 배정모형의 경우 급작스런 공사나 사고와 같이 도로의 용량을 일시적으로 제한하는 현상이 발생하는 경우 해당 링크에서 발생하는 과도한 지체현상을 설명하기 어렵다. 일부 도로의 용량 잠식을 모형에 반영하는 경우 그 결과는 주변 도로에 모두 분산되어 교통량과 도로의 용량이 새로운 평형상태에 도달해 버리기 때문이다. 그러나 새로운 배정방법의 경우 교통량과 일대일 함수 관계에 있는 통행시간이 아닌 통행자의 정보에 따라 판단한 통행시간을 사용하므로 실제 교통량이 용량과의 평형상태를 넘어서는 현상이 얼마든지 발생할 수 있다. 이는 현실을 보다 유사하게 묘사할 가능성이 높다고 할 수 있다.

새로운 배정모형은 또한 장거리 통행자의 간선도로 선호 현상을 모형의 틀 내에 무리 없이 수용할 수 있다. 간선도로의 경우 정보계수, 특히 연결 정보계수의 값을 국지도로보다 상대적으로 높게 하여 줌으로써 인접한 국지도로보다 상대적으로 많은 통행이 배정되도록 할 수 있다. 이는 김익기 등(1995)이 제시한 간선도로에 대한 통행시간 감소와 진출입부에 대한 더미 링크의 부여를 통한 잦은 간선도로 진출입 억제 등의 방법보다는 훨씬 간편하게 목적을 달성할 수 있는 방법이다.

새로운 배정방법은 도심 통행료 징수, 버스 전용차선제 등과 같이 특정 도로구간에 갑작스런 용량 변화를 초래하는 정책의 도입시 새로운 평형상태에 도달하기까지의 일자별 주변도로의 교통량 변화 과정에 대한 분석 연구에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 이 경우 통행자의 링크에 대한 정보계수를 날짜에 따라 순차적으로 조정해 줌으로써 예측이 가능하나 이를 위해서는 먼저 유사한 정책의 도입시 이의 효과에 대한 조사와 분석을 통하여 정보계수의 변화 행태를 파악해 두는 것이 필요하다. 이밖에도 새로운 배정방법은 첨단 교통정보 안내체계(Advanced Transport Information System : ATIS)의 도입효과 분석에 사용될 수 있다. 즉 기존의 통행자는 기존의 정보계수를 그대로 이용하여 배정하고 여기에 새로운 정보체계를 이용하는 통행자는 정보계수를 그에 맞도록 변화시켜 사용하면 새로운 체계의 도입시 변화되는 통행패턴을 기존 방법보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 배정방법의 적용

5.1 적용 및 평가방법

본 연구에서는 새로운 배정방법을 1991년도 서울시 도로망과 통행량표에 적용하여 기존의 배정방법을 사용했을 때의 배정결과와 비교하였다. 기존 방법으로는 분할배정 방법과 사용자 최적 배정방법을 적용하였으며, 새로운 배정방법으로는 분할 배정방법의 경우 기종점 단위 통행비용 함수 중 다중 곡선형 비용 함수를 적용하고, 사용자 최적 배정방법에는 별점형 통행비용 함수를 적용하였다. 분할배정 방법은 기존과 새 방법 모두 15회 균등 분할 배정을 적용하였으며, 사용자 최적 배정방법도 반복 횟수를 15회로 고정하여 분석하였다.

새로운 통행 배정방법의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 모형의 예측 결과가 실제 측정된 도로상의 교통량을 얼마나 근사하게 추정하는가를 비교하였다. 예측치간의 비교는 교통량이 조사된 130개 지점의 실측 교통량과 모형의 예측치간의 평균 오차(root mean square)를 산정하여 수행하였다.

$$\text{평균 오차} = \sqrt{\frac{\sum_L (v_L^s - v_L^f)^2}{N}} \quad [5.1]$$

여기서

v_L^s = 링크 L의 실측 교통량 ($L=1, 2, \dots, N$)

v_L^f = 링크 L의 예측 교통량 ($L=1, 2, \dots, N$)

$N=65 \times 2(\text{방향}) = 130$

정보계수는 연구자가 임의로 높은 수준, 중간 수준, 낮은 수준 등 세 세트(set)의 정보계수를 결정하여 이를 적용하였다. 각기 다른 정보계수를 적용하는 경우 배정 교통량의 특성을 비교하여 정보계수의 영향을 살펴보았다. 또한 배정 방법간 예측력 비교에는 세 세트의 정보계수 중 실측 교통량과의 평균 오차가 가장 작은 교통량을 도출하는 정보계수 세트를 사용하였다.

정보계수는 링크의 위계와 기종점으로부터 링크까지의 거리의 함수로 결정되며 거리에 따라 감소하고, 도로의 위계가 낮을수록 낮은 값을 갖도록 설정하였다. 연결 및 소통 정보계수 세트의 산정 수식은 식 [5.2] 및 [5.3]과 같다. 식 [5.2] 및 [5.3]에서 ϕ 와 ζ 는 모두 링크 L의 위계 수준에 따라 변하는 값으로 그 내용은 <표 5-1>과 같다. <그림 5-1>은 정보계수 세트 가운데 중간 수준 세트의 기종점으로부터의 거리에 따른 값의 변화를 나타낸 것이다.

$$\sigma_L^{ij} = \frac{1}{\exp(D_L^{ij} \cdot \phi - 2.5) + 1} + .0758 \quad [5.2]$$

$$\eta_L^{ij} = \frac{1}{\exp(D_L^{ij} \cdot \zeta - 2.5) + 1} \quad [5.3]$$

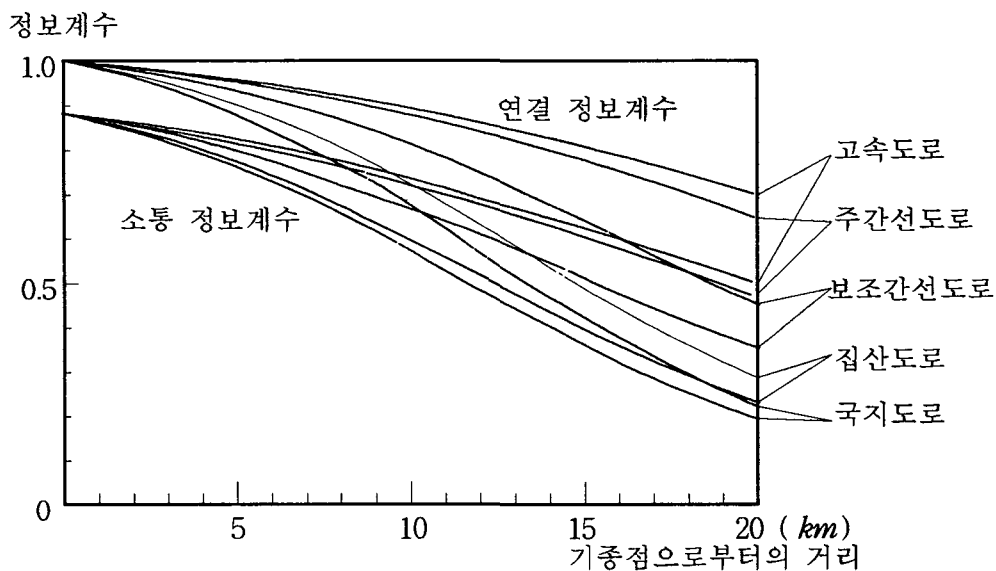
여기서

D_L^{ij} = 링크 L의 통행 기종점으로부터의 거리

ϕ, ζ = 위계수준에 따라 변하는 값(<표 5-1>참조)

<표 5-1> 링크 위계수준별 정보계수 산정식 내 ϕ , ζ 의 값

정보계수 위계수준	낮은 수준		중간 수준		높은 수준	
	ϕ	ζ	ϕ	ζ	ϕ	ζ
고속도로	0.15	0.15	0.1	0.1	0.07	0.07
주간선도로	0.16	0.155	0.11	0.105	0.08	0.075
보조간선도로	0.20	0.18	0.15	0.13	0.12	0.10
집산도로	0.24	0.21	0.19	0.16	0.16	0.13
국지도로	0.26	0.22	0.21	0.17	0.18	0.14



<그림 5-1> 중간 수준 정보계수의 거리별 변화

5.2 입력자료의 내용

본 연구에서는 새로운 배정방법을 서울시를 대상으로 적용하였다. 기종점 통행량 자료는 서울시에서 1989년에 조사한 자료를 기초로 하여 인구, 학생수, 고용자수, 승용차보유대수 등의 사회경제적 지표와 일부도로에서 조사한 교통량자료를 이용하여 보완 작성된 1991년의 통행량 자료이다. 이 자료는 전체 182개의 존간의 오후 6시부터 7시까지의 승용차 통행량으로 구성되어 있다. 전체 존 가운데 138개 존은 서울시 내부 존이며 나머지 44개 존은 외부 존이다. 내부존은 행정동의 결합으로 되어 있으며 외부존은 서울시계 유출

입 도로 30개소, 시외·고속터미널 7개소, 전철역 4개소 및 수도권 전철역 3개소로 되어 있다. 연구에 사용된 서울시 도로망자료는 국토개발연구원에서 작성된 1991년도 현황 자료이다. 이 자료는 182개의 존 중심점(centroid)과 거기에 연결된 연결 링크(centroid connector)와 1,825개의 교차로(node) 및 2,718개의 링크로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용한 서울시 주요 가로별 교통량 자료는 서울시 교통관리 사업소에서 1991년도에 조사한 130개 주요 도로 지점별 오후 6시-7시 사이의 교통량 실측 자료이다. 교통량이 측정된 지점은 한강교량 30개소, 도심부의 주요도로 36개소 및 서울시 경계지점 64개소이다. 교통량은 승용차와 버스를 대상으로 측정되었다. 본 연구에서는 버스의 교통량에 승용차 환산계수 2.0을 적용하여 전체 교통량을 승용차 환산대수로 환산하여 이용하였다.

5.3 적용결과

기존 방법 적용시 130개 관측지점의 관측치와 예측치간 평균오차를 도로 종류별로 정리한 결과는 <표 5-2>와 같다. 전체 관측지점에서의 예측 교통량과 실측 교통량의 합계의 비율은 두 방법 모두 1.2를 상회하고 있어서 예측 교통량이 다소 과다 추정되고 있음을 알 수 있다. 적용 방법별 예측의 정확성 면에서는 분할배정 방법이 사용자 평형배정 방법보다 평균오차가 다소 낮게 나타났다.

<표 5-2> 기존 방법 적용시 예측 교통량 평균 오차

배정방법 도로종류	사용자 평형 배정		분할배정	
	교통량 비율	평균 오차	교통량 비율	평균 오차
도시고속도로	1.034	522.4	1.079	449.5
주간선도로	1.328	1301.1	1.289	1263.9
보조간선도로	1.377	925.6	1.349	873.2
집산도로	1.147	924.4	1.094	862.1
국지도로	0.689	447.8	0.667	459.4
전 체	1.254	935.2	1.224	890.0

새로운 방법을 적용하는 경우 관측지점 교통량의 평균 오차는 입력되는 정보계수의 특성에 따라 달라진다. 본 연구에서 설정한 3개 종류의 정보계수를 각각 적용했을 때와 정보가 전혀 없는 경우, 완전한 정보를 가진 경우 등 5가지 경우의 관측지점 배정 교통량의 평균오차는 다음과 같다.

<표 5-3> 새 분할배정 방법 적용시 관측지점 교통량 평균 오차

정보계수 도로종류	정보 전무	낮은 수준	중간 수준	높은 수준	완전 정보
고속도로	1699.9	532.7	536.4	540.2	458.3
주간선	1695.8	1304.2	1139.8	1250.2	1270.3
보조간선	2931.7	874.8	893.6	841.7	871.5
집산도로	1109.4	863.9	820.0	858.1	875.4
국지도로	1130.4	469.5	433.7	495.6	467.9
전 체	2039.9	905.8	856.8	881.7	895.5

<표 5-4> 새 사용자 평형배정 방법 적용시 관측지점 교통량 평균 오차

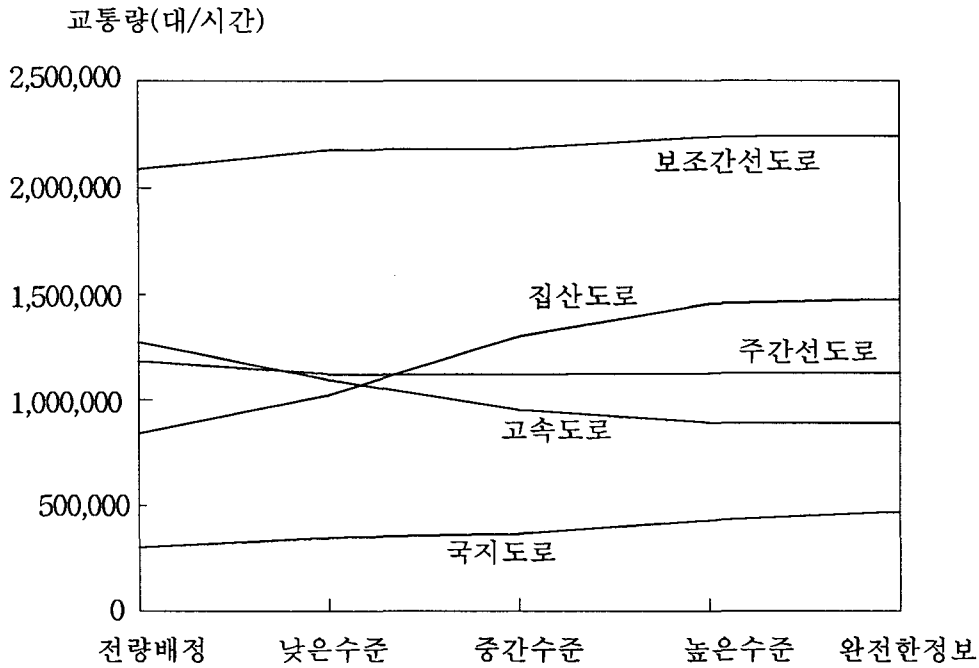
정보계수 도로종류	정보 전무	낮은 수준	중간 수준	높은 수준	완전 정보
고속도로	1650.0	445.9	531.7	462.1	524.6
주간선	1730.7	1395.5	1290.4	1320.2	1303.4
보조간선	2945.0	933.9	879.5	917.3	920.5
집산도로	1094.4	834.4	863.9	858.1	931.7
국지도로	1147.2	430.5	465.0	431.2	458.9
전 체	2047.8	936.9	903.4	917.2	936.9

두 방법 모두에서 정보계수가 중간 수준인 경우가 나머지 보다 예측력이 우수한 것으로 나타났다. 방법간의 예측력 차이는 기존 방법의 경우와 마찬가지로 분할 배정방법이 더 우수한 것으로 나타났다. 정보계수가 높은 수준인 경우 두 방법 모두 기존 방법에 비해 배정결과가 우수한 것으로 나타났으나 낮은 수준인 경우는 분할배정은 기존 방법에 비해 오차가 더욱 큰 것으로 나타났다. 예측력이 가장 높은 것으로 나타난 중간수준의 정보계수를 사용하는 경우 기존 방법에 비해 분할배정의 경우 평균 오차가 3.7% 감소하며, 평형 배정의 경우 3.4% 감소하는 것으로 나타났다.

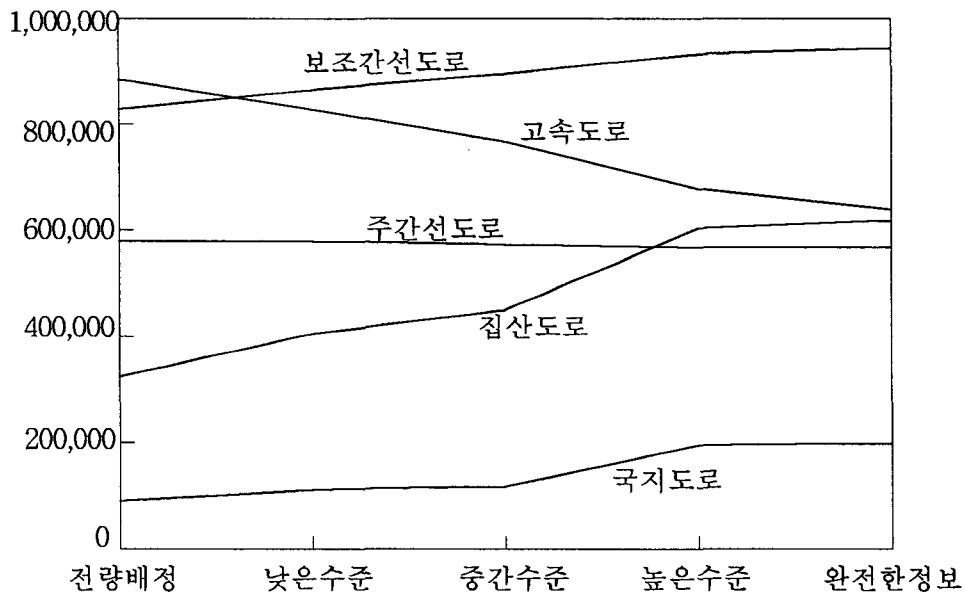
새로운 통행비용 함수를 이용한 통행배정 방법은 정보계수의 변화에 따라 도로의 위계 수준별로 배정 교통량에 차이가 발생한다. 이러한 특성은 위계가 다른 인접 도로간의 이용도 차이를 설명하는데 사용될 수 있다. 본 연구에서는 앞서 분석된 결과에 전량배정 경우를 추가하여 각각의 경우 도로의 위계수준별 링크교통량 합계와 실제 총 주행거리를 비교하였다. 비교 결과를 그림으로 나타내면 <그림 5-2> 및 <그림 5-3>과 같다.

배정 교통량을 나타낸 <그림 5-2>를 살펴보면 고속도로와 주간선도로는 정보의 수준이

높아질수록 값이 적어지는 반면 보조간선과 국지도로, 집산도로 등은 정보수준이 높아질수록 배정교통량이 증가한다. 이러한 현상은 도로 종류별 총 주행거리 변화를 나타낸 <그림 5-3>에서도 공통적으로 나타난다.



<그림 5-2> 배정방법별 도로 위계수준별 교통량 합계 변화
주행거리(대·km)



<그림 5-3> 배정방법별 도로 위계수준별 주행거리 합계 변화

VI. 결 론

본 연구에서는 통행인의 노선 정보 부족 현상을 통행비용 함수에 반영하고 이를 이용한 새로운 통행배정 방법을 제시하였다. 통행자의 노선에 관한 정보수준은 연결 정보계수와 소통 정보계수로 구분하여 통행비용 함수에 반영하였다. 정보계수를 포함한 통행비용 함수는 링크 단위, 통행의 기종점 단위, 개인 단위의 세 종류를 검토하였다. 이들 세 종류 가운데 링크단위 통행비용 함수는 기존의 배정 방법을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있으나 통행인의 노선에 관한 정보 수준을 통행배정에 적용하는 데는 한계가 있다. 반면 개인 단위 통행비용 함수는 개인별 정보 수준의 차이를 상세히 반영할 수 있으나 기존의 방법으로 현실적인 도로망에서 적용하는 것은 불가능하다. 기종점 단위 통행비용 함수는 벌점 부가형과 복합 함수형 등 두 가지 형태를 검토하였다. 벌점형의 경우 기존의 방법을 적용하는 데 무리가 없으나 복합형의 경우 기존의 사용자 최적 배정방법을 이용할 경우 사용자 평형 통행 원칙을 만족하는 통행량을 도출할 수 없는 것으로 밝혀졌다.

새로운 배정방법을 서울시를 대상으로 적용한 결과 기존 방법에 비해 예측력이 우수한 것으로 나타났다. 130개 관측 지점에서의 예측 교통량의 관측 교통량에 대한 평균 오차는 분할 배정 방법의 경우 새로운 방법이 기존 방법에 비해 3.7% 개선된 것으로 나타났다. 사용자 최적 배정방법의 경우 새로운 방법이 기존 방법에 비해 3.4% 개선되었다. 두 방법 모두에서 도로의 위계에 따른 예측 결과의 편차가 새로운 방법이 기존 방법에 비해 개선된 것으로 나타났다. 사용자 평형배정 방법과 분할배정 방법 중에는 분할배정 방법의 예측력이 보다 우수한 것으로 나타났다.

위계수준이 높은 도로인 고속도로와 주간선도로의 경우 정보수준이 높아지면 배정 교통량이 감소하는 반면 보조간선과 집산도로, 국지도로는 정보수준이 높아질수록 반대로 배정 교통량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 도로 종류별 차량 총주행거리에서도 마찬가지로 나타났다.

본 연구에서는 통행인의 정보부족 현상을 정보계수의 형태로 통행비용 함수에 반영하고 정보계수는 연구자가 임의로 정한 것을 사용하였다. 그러나 배정 결과의 정확성 위하여는 실제 통행자의 정보 수준을 정확히 반영하는 것이 필요하다. 이를 위하여는 정보계수의 변화 요인과 이의 실측 또는 추정 방법에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 또한 링크 그룹별 평균 통행 속도에 따른 링크의 예상 통과 속도의 경우 링크 그룹을 어떻게 정의하느냐에 따라 통행량의 배정 결과에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이의 정확한 반

영을 위한 연구도 필요하다. 궁극적으로는 개인 단위 통행비용함수의 적용을 위한 연구도 필요하다. 또한 본 연구에서 제시된 배정방법은 첨단 교통정보 안내체계 등의 도입 효과 분석시에 이들 체계를 이용할 수 있는 기기를 장착하지 않은 차량의 노선배정시 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 많은 수의 차량이 직접적인 교통정보 안내체계 외에 방송, 안내판 등 다양한 수단을 통하여 부분적인 교통정보를 입수하므로 이러한 효과를 적절히 고려하기 위한 연구도 필요하다.

참고문헌

- 김익기, 김태중 (1995), 도로위계구조를 고려한 노선배정기법에 관한 연구, 대한교통학회지, 제13권 제3호, 19-33.
- 모무기 (1992), 노선배정모형의 예측력 비교, 석사학위 논문, 연세대학교 대학원, 1992.
- Dafermos, S. C. (1972) The Traffic Assignment Problem for Multiclass User Transportation Network, *Transportation Science*, vol. 6, 73-87.
- Daganzo, C. F., Sheffi, Y. (1977), On stochastic Models of traffic Assignment, *Transportation Science*, vol. 11, No. 3, 253-274.
- Fisk, C. (1980) Some developments in equilibrium traffic assignment. *Transportation Research*. 14B, 243-255.
- Florian, M. Spiess, H. (1982) The Convergence of Diagonalization Algorithms for Asymmetric Network Equilibrium Problems, *Transportation Research*. 16B, 477-483.
- Sheffi, Yoseff (1985) *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Smith, M. J. (1979) The Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria, *Transportation research*, 13 B, 295-304.
- Thomas, Roy (1991) *Traffic Assignment Techniques*, Avebury Technical, England.
- Van Vliet, D., Bergman, T. and Scheltes, W. H. (1986) Equilibrium Traffic Assignment with Multiple User Classes, *PTRC Summer Meeting, Transportation Planning Models*, 111-122.