

■ 論 文 ■

경로인지비용을 반영한 사용자최적통행배정모형

A User Optimal Traffic Assignment Model Reflecting Route Perceived Cost

이 미 영

(한국건설기술연구원 선임연구원)

문 병 섭

(한국건설기술연구원 선임연구원)

백 남 철

(한국건설기술연구원 선임연구원)

강 원 의

(한국건설기술연구원 수석연구원)

목 차

- | | |
|---------------------|---------------|
| I. 서론 | 1. 모형 |
| II. 이론적 배경 | 2. 알고리즘 |
| 1. 사용자최적통행배정모형 | 3. 경로인지비용의 반영 |
| 2. 최적경로탐색알고리즘 | IV. 사례연구 |
| 3. 링크기반 사용자최적통행배정모형 | V. 결론 |
| III. 모형 및 알고리즘 | 참고문헌 |

Key Words : 사용자최적통행배정모형, 경로인지비용, 최적경로선택조건식, Frank-Wolfe 알고리즘, 경로열거, 링크표지기반 최적경로알고리즘

요 약

사용자최적통행배정모형과 확률적 사용자최적통행배정모형에서 통행배정의 기준이 되는 경로의 통행시간은 일반적으로 경로를 구성하는 링크 통행시간과 교차로에서 발생하는 회전지체의 합으로 계산된다. 이러한 통행배정방식에는 운전자의 통행행태가 결정되는 주요원인이 될 수 있는 운전자의 실제적 경로인지과정 및 선택과정이 반영되지 않아 편향된 배정결과가 도출되는 가능성이 존재한다. 확률적 사용자최적통행배정모형에서 링크의 통행시간에 대한 통행분포함수로 가정하여 경로인지비용을 반영하려는 노력은 있었으나, 프로빗(Probit) 모형의 단절된 통행시간분포 함수 또는 로짓(Logit)모형의 링크통행시간의 독립성과 같은 이론적으로 불합리한 가정에 의존하여 시도되었지 경로인지비용 반영에 대한 근본적인 결실은 아니었다.

사용자최적통행배정모형에서 경로인지비용을 반영하지 못했던 가장 중요한 이유는 출발지, 도착지, 경로, 링크에 따라 각기 상이한 통행인지비용의 계산 값이 도출되기 때문이다. 따라서 최적의 경로를 선택하기 위해서는 각 기중점을 연결하는 모든 경로의 통행시간을 비교해야 하는 경로열거문제가 대두되며, 교통망의 규모가 증가됨에 따라 지수적으로 증가하는 경로의 수는 계산을 실패하게 되는 원인이 된다.

본 연구에서는 출발지와 목적지 간에 경로를 열거하지 않고 사용자 최적 통행배정모형에 경로인지비용을 반영하는 방안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구에서 제안하는 방안은 경로의 최소단위를 링크로 정의하고 링크표지기반 최적경로 탐색알고리즘에서 두 링크의 탐색을 진행하면서, 이미 출발지에서 탐색이 진행된 부분경로와의 비교를 통해 경로의 인지비용이 통행비용에 내재되는 방법이다.

In both deterministic User Optimal Traffic Assignment Model (UOTAM) and stochastic UOTAM, travel time, which is a major criterion for traffic loading over transportation network, is defined by the sum of link travel time and turn delay at intersections. In this assignment method, drivers' actual route perception processes and choice behaviors, which can become main explanatory factors, are not sufficiently considered; therefore may result in biased traffic loading. Even though there have been some efforts in Stochastic UOTAM for reflecting drivers' route perception cost by assuming cumulative distribution function of link travel time, it has not been fundamental fruitions, but some trials based on the unreasonable assumptions of Probit model of truncated travel time distribution function and Logit model of independency of inter-link congestion.

The critical reason why deterministic UOTAM have not been able to reflect route perception cost is that the route perception cost has each different value according to each origin, destination, and path connection the origin and destination. Therefore in order to find the optimum route between OD pair, route enumeration problem that all routes connecting an OD pair must be compared is encountered, and it is the critical reason causing computational failure because uncountable number of path may be enumerated as the scale of transportation network become bigger.

The purpose of this study is to propose a method to enable UOTAM to reflect route perception cost without route enumeration between an O-D pair. For this purpose, this study defines a link as a least definition of path. Thus since each link can be treated as a path, in two links searching process of the link label based optimum path algorithm, the route enumeration problem between OD pair can be reduced the scale of finding optimum path to all links. The computational burden of this method is no more than link label based optimum path algorithm. Each different perception cost is embedded as a quantitative value generated by comparing the sub-path from the origin to the searching link and the searched link.

I. 서론

일반적으로 사용자최적통행배정모형(User-Optimal Traffic Assignment Model)과 확률적 사용자최적통행배정모형(User-Optimal Stochastic Assignment Model)은 경로의 통행시간이 경로를 구성하는 개별 링크통행시간과 교차로에서 발생하는 회전지체의 합으로 계산된다. 이러한 계산방식에는 운전자의 통행행태가 결정되는 주 요인을 도로의 통행시간에 국한하였지, 운전자가 실제적으로 경로를 인지하고 선택하는 행태는 설명하기 어렵다.

예를 들면 출발지가 서울시의 양재동에서 도착지가 일산의 대화동으로 통행하는 운전자의 경로선택행태는, 우선 일산을 연결하는 시인성이 높은 경로인 올림픽대로, 강변북로, 자유로를 주요 통행 축으로 선정한 후, 통행시간이 최소화되도록 출발지에서 선정된 경로 축으로 접근하며, 도착지까지 역시 이들 경로 축을 기준으로 다시 이탈하려는 행태가 일반적이다. 그러나 서술했듯이 기존의 통행배정은 경로를 구성하는 링크의 통행시간을 계산하고 이들 통행시간의 합을 기준으로 최적 경로를 선정하는 방식에 근거하고 있어, 근본적으로 통행배정에서 운전자의 경로선택행태를 설명하기에는 한계가 존재했다. 이러한 문제 때문에 모형에 의한 통행배정결과가 편향될 가능성이 매우 크며, 부적합한 세가로에 통행배정이 집중되는 등 현실적인 모형의 활용면에서도 한계가 크게 존재한다.

물론 이러한 문제점을 극복하기 위한 노력으로서 확률적 사용자최적 통행배정모형에서 경로의 인지비용을 링크의 인지통행분포함수로 정의하여 설명하려는 논리가 제시되어 지금까지 활용되고 있으나, 절단된 통행분포함수(Truncated Distribution Function: Sheffi & Powell, 1982) 또는 링크 간 통행시간의 독립성(Logit Function: Daganzo & Sheffi, 1977)과 같은 비 현실적인 가정과 논리에 근거하고 있어, 운전자의 경로선택에 대한 인지비용을 반영하기 보다는 사용자최적통행배정모형에 확률적인 개념을 도입한 것에 국한되며, 따라서 근본적으로 사용자최적 통행배정모형과 유사한 오류를 범하고 있다고 볼 수 있다.

사용자최적통행배정모형에서 경로인지비용을 반영하지 못했던 가장 중요한 이유는 출발지, 도착지, 경로, 링크에 따라 각기 상이한 통행인지비용의 계산 값이 도출되기 때문이다. 이러한 이유 때문에 최적의 경로를 선택하기 위해

서는 각 기중점을 연결하는 모든 경로의 통행비용을 비교해야 하는 경로열거문제(Route Enumeration Problem)가 대두된다. 알려진 바와 같이 교통망의 규모가 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 경로의 수를 계산하기에는 현재의 컴퓨터 계산방식으로는 불가능한 것으로 알려져 있다(Ran et al, 1996).

본 연구는 출발지와 목적지 간에 경로를 열거하지 않고 사용자최적통행배정모형에 사용자가 경로를 인지하는 방안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서 적용하는 방안은 경로의 최소단위를 링크로 정의하고 링크표지 기반 최적경로알고리즘에서 두 링크의 탐색을 진행하면서, 이미 출발지에서 탐색이 진행된 부분경로와의 비교를 통해 경로의 인지비용이 총 통행비용에 내재되게 하는 것이다. 이를 위해 출발지, 도착지, 경로, 링크로 정의된 경로인지비용을 포함하도록 운전자 경로선택조건을 도출하고, 사용자최적통행배정모형을 제안하며, 기존 Frank-Wolfe알고리즘을 변형하여 제안된 모형의 해를 도출하는 방안을 제시한다. 링크표지 기반 최적경로알고리즘이 수행되는 부분은 변형된 Frank-Wolfe알고리즘에 내재되어 있다.

본 연구는 다음과 같이 진행된다. 우선 2장에서 비선형계획법에 적용되는 사용자최적통행배정, 최적경로 탐색알고리즘, 링크기반으로 정의된 사용자최적통행배정에 대해 설명하며, 3장에서는 본 연구에서 제시하는 주요내용으로서 우선 출발지, 도착지, 경로, 링크의 특성이 반영된 경로인지비용의 정의를 통하여 경로인지비용이 내재된 Wordrop의 1차원리를 만족하는 운전자경로선택조건을 도출하고, 이를 기반으로 경로인지비용이 반영된 사용자최적통행배정모형을 제안하였으며, 제안된 모형의 해법으로서 변형된 Frank-Wolfe 알고리즘을 개발한다. 알고리즘에서 링크기반 최적경로탐색알고리즘을 활용하여 경로열거문제를 해결하는 방안을 제시한다. 4장은 도로위계가 존재하는 가상의 교통망에서 낮은 위계의 도로주행에 대한 부담감이 경로인지비용으로 반영된 사례연구를 통하여 제안된 모형과 알고리즘을 검증한다. 5장에서는 본 연구에서 도출된 결론을 종합하고 향후 연구방향에 대하여 서술한다.

II. 이론적 배경

사용자최적통행배정은 다양한 수학적 계획법(Mathematical Programming: MP)이 수식화하여

나 알고리즘의 개발을 위하여 적용되어 왔다. 이중 비선형계획법(Nonlinear Programming: NLP)과 변동부등식(Variational Inequalities: VI; Dafermos, 1980; Smith, 1979)이 가장 많이 적용되었으며, 최근에는 변동등식(Variational Equalities, VE; Lee, 2004)의 개념도 소개되고 있다. 본 장에서는 사용자최적통행배정모형을 본 연구의 관심주제인 NLP와, 경로인지비용의 반영을 위한 중요한 내용인 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘에 대하여 설명한다.

본 연구의 진행을 위해 사용되는 표식(Notations)은 다음과 같이 정의된다.

- r, s, i, j : 노드; 특히 r, s 는 각각 출발지와 도착지
- a, b, e : 링크, 특히 e 는 시작노드가 출발지(r)인 링크
- L : 링크집합
- Q : 탐색링크집합
- N : 노드집합
- $\Gamma_a^+ (\Gamma_a^-)$: 링크 a 의 도착노드(출발노드)가 시작노드(도착노드)인 링크집합
- $\Gamma_r^+ (\Gamma_r^-)$: 출발지 r 이 시작노드(도착노드)인 링크집합
- c_a, c_{ij} : 링크 a (i, j)의 통행시간
- d_{ab} : 링크 a 에서 b 로 통행 시 페널티
- π^{ri} : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최소통행시간
- π^{rn} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최소통행시간

1. 사용자최적통행배정모형

통행배정은 교통상황과 교통망의 변화를 예측하는 과정이다. 대부분의 정적통행배정모형은 Wardrop의 제1원칙(Wardrop, et al., 1952)에 의하여 수식화 된다. 이 원칙은 또한 사용자 균형(User Equilibrium: UE) 또는 최적(User Optimal: UO) 원리, 또는 운전자의 경로선택조건으로 해석된다.

“출발지와 도착지를 연결하는 경로 중 사용된 경로는 최소비용경로이며, 사용되지 않은 경로의 비용보다 크지 않다.”

사용자 최적 원리는 운전자가 정적 교통망에서 경로를 선택하는 주요한 가정이며, 이 가정은 운전자가 경로비용에 대하여 완전한 정보를 인지하고 있다는 기본 가정을 포함하고 있다.

경로를 기반으로 표현된 사용자 최적원리는 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_k^{rs} - u_{rs} &= 0, \text{ if } f_k^{rs*} > 0 & \forall k, r, s \\ \eta_k^{rs} - u_{rs} &\geq 0, \text{ if } f_k^{rs*} = 0 & \forall k, r, s \\ (\eta_k^{rs} - u_{rs}) \cdot f_k^{rs*} &= 0, & \forall k, r, s \\ f_k^{rs} &\geq 0, & \forall k, r, s \end{aligned} \tag{1}$$

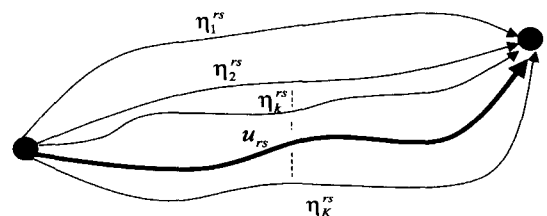
이 경우

- η_k^{rs} : 출발지 r 에서 도착지 s 사이의 경로 k 의 통행시간
- u_{rs} : 출발지 r 에서 도착지 s 사이의 최적통행시간
- f_k^{rs} : 출발지 r 에서 도착지 s 사이의 경로 k 의 통행량
- * 최적값을 나타냄

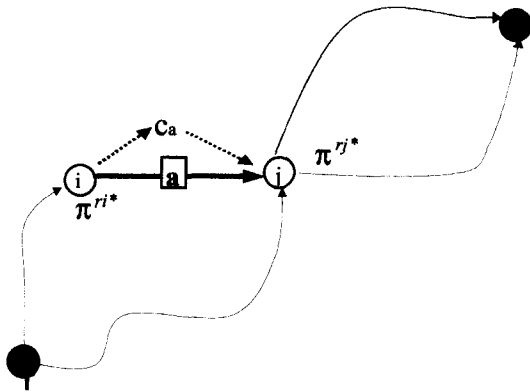
식(1)과 그림(1)은 출발지 r 과 도착지 s 간을 연결하는 경로 k 가 통행에 의하여 방문 되면, 즉 $f_k^{rs*} > 0$, 경로 k 는 최소의 통행시간(u_{rs})을 갖는 최적경로이다, $\eta_k^{rs} = u_{rs}$.

링크기반으로 표현된 사용자 최적 경로선택조건은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \pi^{ri*} + t_a &= \pi^{rj*}, \text{ if } x_a^{rs*} > 0 & \forall a(i, j), r, s \\ \pi^{ri*} + t_a &\geq \pi^{rj*}, \text{ if } x_a^{rs*} = 0 & \forall a(i, j), r, s \\ (\pi^{ri*} + t_a - \pi^{rj*}) \cdot x_a^{rs*} &= 0, & \forall a(i, j), r, s \\ x_a^{rs} &\geq 0, & \forall a(i, j), r, s \end{aligned} \tag{2}$$



〈그림 1〉 경로기반 조건식의 개념



〈그림 2〉 링크기반 조건식의 개념

이 경우

π^r : 출발지r에서 노드i까지의 최소통행시간

t_a : 링크a의 통행시간

x_a^r : 출발지r에서 도착지s간 링크a의 통행량

* 최적값을 나타냄

식(2)과 그림(2)는 출발지r과 도착지s에 표현된 링크a가 통행량이 존재하면, 즉 $x_a^{rs} > 0$, 링크a는 r-s간 최적경로에 포함된다, 즉 $\pi^{r*} + t_a = \pi^{s*}$.

Beckmann, et al.(1956)은 사용자최적경로선택조건을 NLP에 근거하여 다음과 같은 식(3)으로 정식화하였다.

$$\begin{aligned} \min z(x) &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ \text{s.t.} \quad &\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \\ &f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \\ &x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a \end{aligned} \quad (3)$$

이 경우

$t_a(\cdot)$: 교통량 종속적인 통행시간함수

x_a : 링크a의 교통량

δ_{ak}^{rs} : 출발지r과 도착지s를 연결하는 경로k상에 링크a가 존재하면 1, 그렇지 않으면, 0

q_{rs} : 출발지r과 도착지s간의 수요

이 수식에는 단일(Uniqueness)의 최적해가 존재

(Existence)한다는 최적조건이 증명되었다(Sheffi, 1985). LeBlanc et al.(1975)은 최적경로 탐색알고리즘의 반복적인 과정을 Frank-Wolfe 알고리즘(1956)에 접목하여 대규모 네트워크에서도 매우 효율적인 다음과 같은 알고리즘을 제안하였다.

[Step 0] 초기화

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(0)$ 를 계산하고, 전량배정수행(All-Or-Nothing Assignment); 이 과정에서 $\{x_a^1\}$ 을 얻고, n: =1

[Step 1] 통행시간계산

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(x_a^n)$

[Step 2] 방향탐색

$\{y_a^n\}$ 을 기반으로 전량배정수행.

이 과정에서 통행량 보조변수집합 $\{y_a^n\}$ 을 계산

[Step 3] 선형탐색

다음식을 해당되는 α_n 계산

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(\omega) d\omega$$

[Step 4] 이동

모든 a에 대하여 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n(y_a^n - x_a^n)$

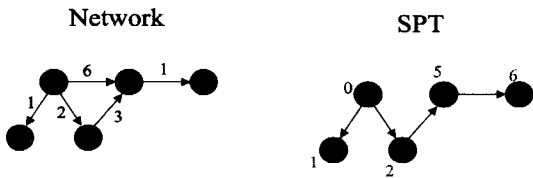
[Step 5] 수렴체크

수렴조건에 맞으면 정지. 현단계의 해 $\{x_a^{n+1}\}$ 가 사용 자 최적통행량

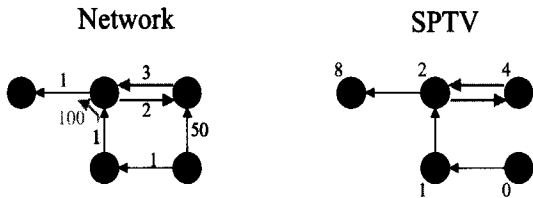
그렇지 않으면 n:=n+1하고 step 1로 이동

2. 최적경로탐색알고리즘

최적경로알고리즘(Shortest Path Algorithm: SPA)은 두 지점의 최적통행시간 또는 비용을 갖는 경로를 발견한다. 최적경로는 최적경로알고리즘에서 채택하고 있는 경로탐색방법에 의해 결정된다. 경로탐색방법은 최단경로가지(Shortest Path Tree: SPT)를 구축하는 방법과 최단경로가지와 덩굴망(Shortest Path



〈그림 3〉 네트워크와 최단경로까지 구축



〈그림 4〉 네트워크와 최단경로까지의 덩굴망 구축

Tree and Vine)을 함께 구축하는 방법으로 구분된다. 탐색된 경로를 일련의 노드순서로 표현할 때, SPT와 SPTV의 차이는 SPT는 경로상에 노드가 반복이 허용되지 않는 반면, SPTV는 반복이 허용된다.

〈그림 3〉은 네트워크와 SPT의 예를 보여준다. 〈그림 4〉는 네트워크를 SPT로 표현하면 출발지 노드1에서 노드4까지의 최단경로는 1→3→2→4로서 경로에 노드의 중복이 존재하지 않는다. SPT를 이용한 탐색방법은 가지기반 최적경로알고리즘(Tree-Based SPA)의 기초가 되었으며, 일반적인 최적경로알고리즘으로 알려진 노드기반 표지확정/갱신(Node-Based Label Setting/Correcting) 방법이 있다(Dijkstra, 1959; Moore, 1957). 식(1)은 가지기반 SPA의 최적경로비용을 계산하는 과정을 나타낸다. 두 인접노드 i 와 j 간의 탐색이 고려된다.

$$\pi^j = \min_{\forall i \in \Gamma^-(j)} \{ \pi^i + c_{ij} \}, \forall j \in N \setminus r$$

$$\pi^r = 0$$
(4)

이 경우

π^i : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최적통행비용

SPTV는 두 인접링크 a 와 b 의 고려가 가능하다. 따라서 인접링크의 중심에서 발생하는 회전비용에 대한 고려가 가능하며, 회전지체나 금지 등으로 인한 최적경로의 출발지와 도착지가 같은 덩굴망(Vine)의 발생에 대한 설명이 가능하다. 〈그림 4〉는 네트워크와 SPTV

의 예를 보여준다. 노드3을 중심으로 진행방향 2→3→5로 회전지체가 존재하며, 이 회전지체의 비용까지 고려해서 SPTV로 나타내면 출발지 1과 도착지5까지 최적경로는 1→2→3→4→3→5로 노드3이 U-턴 통행표현을 위해 경로에 두 번 나타난다. 이 방법은 덩굴망기반 최적경로알고리즘(Vine-Based SPA)의 기반이 되었다. 링크를 표지로 이용하는 방법은 Kirby & Potts(1969)에 회전지체와 금지가 존재하는 네트워크에 처음 시도되었고, Potts & Oliver(1972)는 P-턴을 포함하는 네트워크에 적용하였다.

$$\pi^{rb} = \min_{\forall a \in \Gamma_b^-} \{ \pi^{ra} + d_{ab} + c_b \}, \forall b \in L \setminus \Gamma_r^+$$

$$\pi^{re} = c_e, \forall e \in \Gamma_r^+$$
(5)

이 경우

π^{rb} : 출발지 r 에서 링크 b 의 도착노드까지 최적통행비용

식(2)의 Dijkstra(1959) 방식에 의한 링크표지확정 최단경로알고리즘은 다음과 같다. 초기 노드표지에 근거한 알고리즘과 차이는 1) 링크 수 만큼 알고리즘을 반복과, 2) 링크탐색과정에서 두 인접링크에서 발생하는 회전지체 또는 금지의 특성을 반영(Step 3)과, 3) 알고리즘 종료 후 각 링크표지에 최적경로비용을 노드표지로 계산과정의 포함이다(Step 2).

[Step 1] 초기화

$$\pi^m = \infty, \forall a \in L$$

$$\pi^m = c_a, \forall a \in \Gamma_r^+$$

$$Q = Q \cup \{a\}$$

[Step 2] 다음탐색링크결정

If : $Q = \phi$: $\pi^i = \min_{\forall a \in \Gamma_i^-} \{ \pi^a \}, \forall i \in N$; 종료

Else : $\min_{\forall a \in Q} \{ \pi^a \}$ 을 만족하는 a 의 선정

$$Q = Q - \{a\}$$

[Step 3] 다음링크($a \rightarrow b, \forall b \in \Gamma_a^+$)로 확장

If : $\pi^m + d_{ab} + c_b < \pi^{rb}$: $\pi^{rb} = \pi^m + d_{ab} + c_b$

$\forall b \in \Gamma_a^+$
 $Q = Q \cup \{b\}$
 Go to Step 2
 Else : Go To Step 2

3. 링크표지기반 사용자최적통행배정모형

링크표지기반 최적경로탐색알고리즘을 활용하면 사용자최적통행배정모형에서 교차로의 방향별로 발생하는 지체의 고려가 가능하다. Lee(2004)는 출발지를 기반으로 표현된 두 인접링크를 대상으로 회전지체를 포함하는 최적 사용자 경로선택조건을 식(6)과 같이 제시하였다. 식(6)은 식(2)가 회전지체 d_{ab} 를 포함하도록 두 인접링크 a와 b까지 확대된 것이다.

$$\begin{aligned}
 &\pi^{ra^*} + c_a + d_{ab} = \pi^{rb^*}, \text{ if } v_{ab}^{rs^*} > 0 \\
 &\forall a = (i, j), b = (j, k), r, s \\
 &\pi^{ra^*} + c_a + d_{ab} \geq \pi^{rb^*}, \text{ if } v_{ab}^{rs^*} = 0 \\
 &\forall a = (i, j), b = (j, k), r, s \quad (6) \\
 &(\pi^{ra^*} + c_a + d_{ab} - \pi^{rb^*}) \cdot v_{ab}^{rs^*} = 0, \\
 &\forall a = (i, j), b = (j, k), r, s
 \end{aligned}$$

$$v_{ab}^{rs} \geq 0, \quad \forall a = (i, j), b = (j, k), r, s$$

이 경우

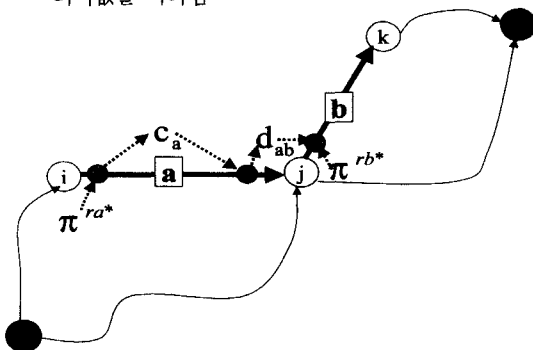
π^{ra^*} : 출발지r에서 링크a의 도착지점의 최소통행시간

v_{ab}^{rs} : 두 인접링크a에서 b방향으로의 회전통행량

c_a : 링크a의 통행시간

d_{ab} : 두 인접링크a에서 b방향으로 발생하는 회전지체

* 최적값을 나타냄



〈그림 5〉 두 인접링크 간의 회전통행개념

식(6)과 그림(5)는 출발지r과 도착지s에 표현된 두 인접링크a와 b사이의 회전통행량이 존재하면, 즉 $v_{ab}^{rs^*} > 0$, 두 인접링크 간의 회전방향은 r-s간 최적경로에 포함된다, 즉 $\pi^{ra^*} + c_a + d_{ab} = \pi^{rb^*}$.

링크표지기반 최적통행조건을 기반으로 NLP에 근거하여 식(7)과 같은 사용자 최적통행배정모형이 제안되었다. 식(7)의 목적함수와 제약조건에는 회전지체가 포함되어 있어 운전자의 경로선택 행태에서 회전비용을 고려하여 최적의 경로를 선택하도록 구성되었다.

$$\begin{aligned}
 \min Z(x_a, v_{ab}) &= \sum_a \int_0^{f_a} c_a(\omega) d\omega + \\
 &\sum_a \sum_b \int_0^{v_{ab}} d_{ab}(\omega) d\omega \\
 \text{s.t. } q_{rs} &= \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s \\
 v_{ab} &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{k,ab}^{rs} \quad \forall a, b \\
 x_a &= \sum_b v_{ab} \quad \forall a \\
 f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall r, s, k
 \end{aligned} \quad (7)$$

이 경우

$c_a(\cdot)$: 교통량 종속적인 통행시간함수

$d_{ab}(\cdot)$: 교통량 종속적인 회전비용함수

f_k^{rs} : 출발지r과 도착지s를 연결하는 경로k의 통행량

v_{ab}^{rs} : 출발지r과 도착지s에서 두 인접링크a와 b사이의 회전통행량

v_{ab} : 두 인접링크a와 b사이의 회전통행량

x_a : 링크a의 통행량

δ_{abk}^{rs} : 출발지r과 도착지s를 연결하는 경로k상에 회전 방향ab가 존재하면 1, 그렇지 않으면, 0

q_{rs} : 출발지r과 도착지s간의 수요

식(8)은 링크표지기반 최적경로알고리즘을 활용하여 회전통행량을 산정하도록 Frank-Wolfe알고리즘을 일부 변형시켜서 다음과 같이 적용 가능하다.

[Step 0] 초기화

모든 a 에 대하여 $c_a = c_a(0)$, 모든 ab 에 대하여 $d_{ab} = d_{ab}(0)$ 을 계산

전량배정수행(All-Or-Nothing Assignment): 이 과정에서 $\{x_a^1\}, \{v_{ab}^1\}$ 을 얻고, $n := 1$.

[Step 1] 통행시간계산

모든 a 에 대하여 $c_a = c_a(x_a^n)$, 모든 ab 에 대하여 $d_{ab} = d_{ab}(v_{ab}^n)$.

[Step 2] 방향탐색

$\{c_a^n\}$ 와 $\{d_{ab}^n\}$ 을 기반으로 전량배정수행

이 과정에서 통행량 보조변수집합 $\{y_a^n\}, \{z_{ab}^n\}$ 을 계산.

[Step 3] 선형탐색

다음식을 해당되는 α_n 계산

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \left\{ \begin{array}{l} \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} c_a(\omega) d\omega + \\ \sum_a \sum_b \int_0^{v_{ab}^n + \alpha(z_{ab}^n - v_{ab}^n)} d_{ab}(\omega) d\omega \end{array} \right\} \quad (8)$$

[Step 4] 이동

모든 a 에 대하여 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n(y_a^n - x_a^n)$

모든 ab 에 대하여 $v_{ab}^{n+1} = v_{ab}^n + \alpha_n(z_{ab}^n - v_{ab}^n)$

[Step 5] 수렴체크

수렴조건에 맞으면 정지. 현 단계의 해 $\{x_a^{n+1}\}, \{v_{ab}^{n+1}\}$ 가 사용자 최적회전통행량

그렇지 않으면 $n := n+1$ 하고 step 1로 이동

III. 모형 및 알고리즘

본 장은 출발지, 도착지, 경로, 링크에 따라 각기 다른 인지통행시간을 포함하도록 운전자경로선택조건을 만족하는 사용자최적통행배정모형 제안하며, 모형의 해를 도출하는 알고리즘으로 기존에 제시된 Frank-Wolfe을

활용하며, 경로인지비용이 반영되도록 기존의 링크표지 기반 최적경로알고리즘을 적용하는 방안에 대하여 설명한다.

1. 모형

기존의 링크통행비용은 출발지와 도착지에 관계없이 그 링크를 주행하면 동일한 통행시간을 경험한다는 사실을 기반으로 구성되었다. 그러나 인지비용이 반영되는 경우는 출발지나 도착지에서 링크를 두 지점을 연결하는 경로의 일부로서 고려하여 최적의 경로선택을 하기 때문에 출발지, 도착지, 경로에 따라 링크를 인지하는 비용도 통행비용에 포함되므로 이들 구성에 따라 통행비용이 달라진다. 식(9)는 인지비용이 포함된 운전자의 최적경로선택조건을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \pi^{ri*} + c_a + \Psi_{pa}^{rs} &= \pi^{rj*}, \quad \text{if } x_a^{rs*} > 0 \\ \forall a(i, j), r, s, p \\ \pi^{ri*} + c_a + \Psi_{pa}^{rs} &\geq \pi^{rj*}, \quad \text{if } x_a^{rs*} = 0 \\ \forall a(i, j), r, s, p \\ (\pi^{ri*} + c_a + \Psi_{pa}^{rs} - \pi^{rj*}) \cdot x_a^{rs*} &= 0, \\ \forall a(i, j), r, s, p \\ x_a^{rs} &\geq 0, \quad \forall a(i, j), r, s, p \end{aligned} \quad (9)$$

이 경우

π^{ri} : 출발지r에서 노드i까지의 최소통행시간

c_a : 링크a의 통행시간

Ψ_{pa}^{rs} : 출발지r과 도착지s을 연결하는 경로p에서의 링크a의 인지비용

x_a^{rs} : 출발지r에서 도착지s간 링크a의 통행량

* 최적값을 나타냄

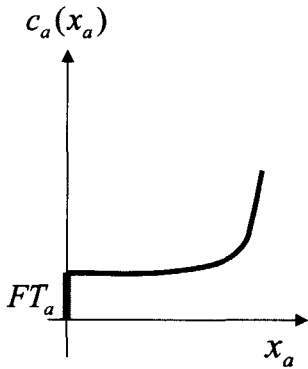
식(10)은 이처럼 출발지, 도착지, 경로에 따라 각기 다른 통행함수로 구성된 일반화된 사용자 최적통행배정 모형을 구성한 것으로 링크a의 통행비용함수 $\Psi_{pa}^{rs}(v_{pa}^{rs})$ 가 출발지, 도착지, 경로에 따라 각기 다르게 표현되고 있음을 나타내고 있다

$$\begin{aligned} \min Z(x_a, v_{ka}^{rs}) &= \sum_a \int_0^{x_a} c_a(\omega) d\omega + \\ &\quad \sum_r \sum_s \sum_p \sum_a \int_0^{v_{pa}^{rs}} \Psi_{pa}^{rs}(\omega) d\omega \\ \text{s.t. } q_{rs} &= \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s \\ f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall k, r, s \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \\ v_{pa}^{rs} &= f_k^{rs} \cdot \delta_{p,a}^{rs} \quad \forall r, s, p, a \end{aligned} \quad (10)$$

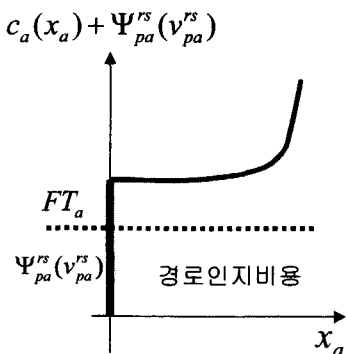
식(10)의 목적함수에서 인지비용이 반영되는 과정에 대해서 식(10)에 표현된 기존의 BPR함수를 대상으로 좀 더 이해가 쉽게 설명하기 위하여 두 함수의 차이를 간단한 그림으로 표현한 것은 <그림 6>과 <그림 7>과 같다.

$$c_a(f_a) = FT_a \cdot \left(\alpha + \beta \cdot \left(\frac{f_a}{Cap_a} \right)^\delta \right) \quad (11)$$

이 경우



<그림 6> 기존의 BPR함수



<그림 7> 경로인지비용이 반영된 BPR함수 예

- FT_a : 링크a의 자유통행시간
- $c_a(f_a)$: 링크a의 교통량 f_a 에 종속적인 통행시간함수
- Cap_a : 링크a의 용량
- α, β, δ : 파라메타

<그림 7>은 경로의 인지비용과 교통량의 함수로서 BPR식이 재 표현되어 반영된 것이다. 인지비용 PC_{pa}^{rs} 을 볼록집합(Convex Set)을 유지하는 단순한 형태인 상수처럼 처리하였으나 가능해의 영역(Feasible Solution Area)이 볼록집합을 유지하는 한 다양한 함수의 형태까지도 확대될 수 있다.

$$\begin{aligned} c_a(x_a) + \Psi_{pa}^{rs}(v_{pa}^{rs}) &= \\ FT_a \cdot \left(\alpha + \beta \cdot \left(\frac{x_a}{Cap_a} \right)^\delta \right) &+ Z \cdot PC_{pa}^{rs} \end{aligned} \quad (12)$$

이 경우

$c_a(x_a) + \Psi_{pa}^{rs}(v_{pa}^{rs})$: 경로인지비용을 포함한 통행시간 함수

PC_{pa}^{rs} : 경로인지비용

Z : 인지비용관련 파라메타

2. 알고리즘

통행함수식이 식(11)과 동일하게 인지비용은 통행량의 함수가 아니라는 조건으로 알고리즘을 구축하였다. 알고리즘은 기존에 제시된 Frank-Wolfe 알고리즘을 변형하여 적용하였으며, 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

[Step 0] 초기화

모든 a 에 대하여

$$c_a + Z \cdot PC_{pa}^{rs} = c_a(0) + Z \cdot PC_{pa}^{rs} \text{을 계산}$$

전량배정수행(All-Or-Nothing Assignment): 이

과정에서 $\{x_a^1\}, \{v_{pa}^{rs,1}\}$ 을 얻고, $n: = 1$

[Step 1] 통행시간계산

모든 a 에 대하여

$$c_a + Z \cdot PC_{pa}^{rs} = c_a(x_a^n) + Z \cdot PC_{pa}^{rs}$$

[Step 2] 방향탐색

$\{c_a + Z \cdot PC_{pa}^{rs}\}^n$ 을 기반으로 전량배정수행

이 과정에서 통행량 보조변수집합 $\{v_a^n\} \{c_{pa}^{rs n}\}$ 을 계산

[Step 3] 선형탐색

다음식을 해당되는 α_n 계산

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \int_0^{x_a + \alpha_n(y_a - x_a^n)} [c_a(\omega)] d\omega + \sum_r \sum_s \sum_p \sum_a \int_0^{v_{pa}^{rs n} + \alpha_n(z_{pa}^{rs n} - v_{pa}^{rs n})} [Z \cdot PC_{pa}^{rs}] d\omega$$

[Step 4] 이동

모든 a 에 대하여 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n(y_a^n - x_a^n)$

모든 $rsap$ 에 대하여

$$v_{pa}^{rs n+1} = v_{pa}^{rs n} + \alpha_n(z_{pa}^{rs n} - v_{pa}^{rs n})$$

[Step 5] 수렴체크

수렴조건에 맞으면 정지. 현단계의 해 $\{x_a^{n+1}\} \{v_{pa}^{rs n+1}\}$

가 경로인지비용을 반영한 최적해

그렇지 않으면 $n := n+1$ 하고 step 1로 이동

3. 경로인지비용의 반영

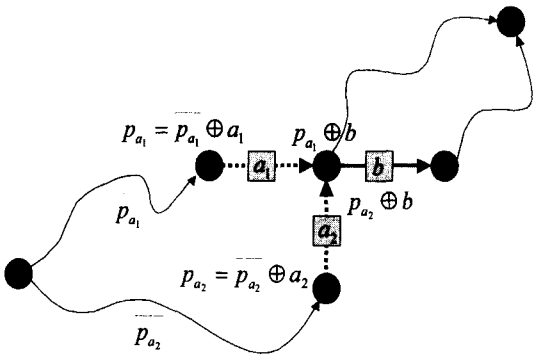
3장 2절에서 제안된 알고리즘은 동일한 링크도 출발지와 도착지를 연결하는 경로의 특성에 따라 링크를 인지하는 비용도 다르게 나타날 수 있으므로, 경로 상에 각기 다른 링크인지비용을 고려하여 최적경로를 탐색하는 방안이 필요하다. 우선적으로 생각할 수 있는 방법은 출발지와 도착지를 연결하는 모든 경로를 열거하여 경로에 포함된 링크의 특성을 함께 고려하는 것이나, 경로의 수는 네트워크의 규모가 커지면서 지수적으로 증가되기 때문에 이 방법을 적용하기에는 한계가 있다 (Ran et al, 1996). 본 절에서는 경로의 최소단위를 링크로서 정의하고, 최적경로 탐색과정에서 두 링크의 탐색과정의 비교만으로 최소의 인지비용을 갖는 경로를 발견하는 방안에 대하여 설명한다.

<그림 8>은 출발지 r 과 도착지 s 를 연결하는 경로 상의 두 링크를 나타낸 것이다. <그림 8>은 또한 출발지 r 에서 경로탐색과정이 진행되어 두 링크조합 (a_1, b) 과 (a_2, b) 에 대하여 링크 b 의 도착지점까지 최적비용이 갱신되는 과정으로 표현된다. 두 링크조합만을 고려하여 링크 b 의 도착지점까지 최적비용을 계산하는 것은 출발지로부터 연결된 경로의 특성을 고려해야 한다. 링크 b 까지의 탐색은 링크 a_1 과 a_2 에서 진행되므로, 이미 a_1 과 a_2 의 최적경로비용이 결정되었다면, 링크 b 로 탐색과정이 진행되는 a_1 과 a_2 의 출발지에서 연결된 경로의 특성과 연결하여 링크 b 의 도착지점까지 최적비용이 계산된다. $\overline{P_{a_1}}$ 은 출발지에서 이미 탐색이 진행된 a_1 의 전에 탐색된 링크의 도착지점까지의 부분경로(Sub-Path)라고 한다면, a_1 과 $\overline{P_{a_1}}$ 연결(Concatenation)을 $P_{a_1} = \overline{P_{a_1}} \oplus a_1$ 로 최적비용을 π^{a_1} 정의하고, 동일한 표식(Notations)을 a_2 에도 적용하여, b 까지의 최적비용을 구하는 과정을 나타내면 출발지 r 에서 표현된 인지비용 $\Psi_{p_{a_1} \oplus b}^r$ 을 반영한 최적식(13)의 적용이 가능하다. 링크 b 의 도착노드가 도착지 s 인 경우를 고려하면 출발지 r 과 도착지 s 까지의 개별링크의 인지비용 $\Psi_{p_{a_1} \oplus b}^{rs}$ 이 모두 합산된 최적경로의 탐색이 가능한 최적식(14)이 완성된다. 모든 과정을 통합하면 두 인접링크 $(a, b | \forall a \in \Gamma_b^-)$ 의 탐색절차가 출발지 r 에서 표현된 링크 a 의 부분경로와 인접링크 b 와의 비교로서 확대될 수 있음을 나타내며, 식(5)의 SPTV 구축방안과 동일한 회전비용(d_{ab})이 $\Psi_{p_{a_1} \oplus b}^{rs}$ 을 계산하기 위해서 동일한 절차로 적용될 수 있음을 의미한다.

$$\pi^{rb} = \min_{a_1, a_2 \in \Gamma_b^-} \left\{ \begin{array}{l} \pi^{ra_1} + \Psi_{p_{a_1} \oplus b}^r + c_b, \\ \pi^{ra_2} + \Psi_{p_{a_2} \oplus b}^r + c_b \end{array} \right\} \quad (13)$$

$$\pi^{rb} = \min_{\forall a \in \Gamma_b^-} \left\{ \pi^{ra} + \Psi_{p_a \oplus b}^{rs} + c_b \right\} \forall b \in \Gamma_s^- \quad (14)$$

만약 <그림 8>을 SPT로 구축하게 되면 식(13)은 노드 기반으로 전환되어 노드 i 에서 노드 j , 노드 i_2 에서 노드 j 의 표지확정과정에 의해서 단일의 최적 j 가



〈그림 8〉 경로 상의 상이한 링크인지비용의 반영

계산되며, 노드 k 까지의 최적비용을 갱신하기 위해서 j 에서 k 로의 표지확정은 링크 b 가 단순하게 합산되는 과정 만이 존재하게 된다. 따라서 경로상에서 표현된 링크의 인지비용은 반영하지 못하게 되며 출발지에서 노드 k 까지의 모든 경로를 비교해야 하는 문제로 전환 되어야 하는 과정을 나타낸다.

전술한 바와 같이, 인지비용을 반영하기 위하여 기본적으로 두 인접링크를 동시에 고려하는 탐색기법의 적용이 필요하며, 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘은 최적경로 탐색 시 두 인접링크를 동시에 고려하므로 이 알고리즘의 활용으로 경로상에 존재하는 링크인지비용을 반영할 수 있다. 이에 더하여 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘은 교차로의 회전방향별 지체와 U-Turn 및 P-Turn 등 동일교차로를 복수로 방문하는 도시가로망의 합리적인 통행행태에 대한 설명에 적합한 것으로 알려져 있다(임용택, 2004). 따라서 최적식 식(14)를 교차로의 회전특성 d_{ab} 까지 통합하여 고려하고, $p_a \oplus b$ 의 경로 P 상의 링크 a 의 반영이라는 개념으로 단순화(즉, $pb = p_a \oplus b$)하고 식(14)를 일반화된 최적식으로 확대하면 식(15)와 같다. 여기서 주목할 점은 식(15)의 경로인지비용은 PC_{pb}^{rs} 은 출발지 r 에서 모든 도착지 노드 s ($\forall s \in N$)까지의 의미를 포괄하고 있어서, 기존의 단일출발지에서 다수목적지까지의 SPTV를 구축하기 위한 링크기반 최적경로탐색알고리즘(Lee, 2004; 임용택, 2004)의 특성이 그대로 적용될 수 있다.

$$\pi^{rb} = \min_{\forall a \in \Gamma_a^-, \forall b \in \Gamma_b^+, \forall s \in N} \{ \pi^{ra} + d_{ab} + \Psi_{pb}^{rs} + c_b \}$$

$$\pi^{rc} = c_c, \forall c \in \Gamma_r^+ \quad (15)$$

식(15)의 링크표지확정기반 최단경로탐색알고리즘으로 구축된 식은 아래에 제시되어 있다. 2장에서 설명한 링크표지기반 최적경로조건식 식(2)의 최적경로탐색알고리즘과는 Step 3에서 링크확장이 진행되는 경우 경로인지비용 Ψ_{pb}^{rs} 이 총 비용에 포함되어 비교되는 것에만 차이가 존재한다.

{Step 1} 초기화

{Step 2} 다음탐색링크결정

{Step 3} 다음링크($a \rightarrow b \mid \forall a \in \Gamma_b^-$)로 확장

If : $\pi^{ra} + d_{ab} + \Psi_{pb}^{rs} + c_b < \pi^{rb}$

$$\pi^{rb} = \pi^{ra} + d_{ab} + \Psi_{pb}^{rs} + c_b$$

$Q = Q \cup \{b\}$; Go to Step 2

Else : Go To Step 2

N. 사례연구

사례연구는 사용자 최적통행배정모형 식(10)에 최적 경로 탐색 시 경로의 인지비용과 교차로의 합리적 행태가 동시에 반영되도록 식(15)에 근거하여 구성하였다.

〈그림 9〉은 교차로의 통행금지($d_{ab} = \infty$) 및 U-Turn ($d_{ab} = 0$)이 포함된 네트워크와 도로망에 대해 각기 다른 인지특성을 표현하기 위해 4개의 도로계층으로 구분된 도로-고속도로, 중간선도로, 보조간선도로, 접근로로 구성되었다. 인지비용함수는 출발지를 떠난 운전자가 도착지까지 도달하기 위하여 주행성이 높은 도로에서 낮은 도로로의 진입에 따른 부담감으로 표현하여 다음과 같은 선형함수식 식(16)과 같이 구성하였다. 식(16)은 도로위계가 낮은 도로로의 부담감이 1, 2, 3의 상수 파라메타로 적용되었는데, 1단계 도로주행위계차이는 1, 2단계는 2, 3단계는 3으로 주행성이 양호한 도로에서 급격하게 떨어지는 도로로의 부담감이 더욱 높게 나타나도록 구축한 것이다. 따라서 도로주행에 따른 위계차이에 의한 인지비용 식(12)에서 인지파라메타 Z 은 한 단계의 도로위계차이에 대해서 느끼는 운전자의 인지비용으로 해석되므로, 도로주행위계차이가 커질수록(1,2,3) 인지비용의 차이는 배수(1*Z, 2*Z, 3*Z)로 증가하게 된다.

$$PC_{pa}^{rs} = PC_{p_a, \text{ob}}^{rs} = 1 \cdot E_1^{rs} + 2 \cdot F_1^{rs} + 3 \cdot G_1^{rs} + 1 \cdot F_2^{rs} + 2 \cdot G_2^{rs} + 1 \cdot G_3^{rs} \quad (16)$$

이 경우

E_1^{rs} : r-s의 경로에서 고속도로에서 주간선도로로의 경로전환회수

F_1^{rs} : r-s의 경로에서 고속도로에서 보조간선도로로의 경로전환회수

G_1^{rs} : r-s의 경로에서 고속도로에서 접근도로로의 경로전환회수

F_2^{rs} : r-s의 경로에서 주간선도로에서 보조간선도로로의 경로전환회수

G_2^{rs} : r-s의 경로에서 주간선도로에서 접근도로로의 경로전환회수

G_3^{rs} : r-s의 경로에서 보조간선도로에서 접근도로로의 경로전환회수

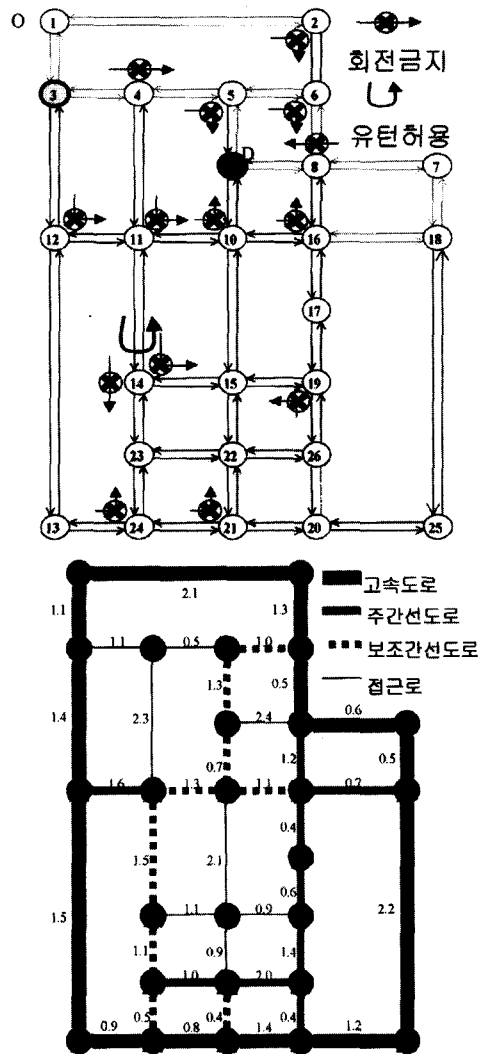
사용자 최적모형에 적용되는 통행비용함수 식은 통행시간은 BPR식을 일반적인 파라메타 값과 함께 적용했으며, 식(16)의 인지비용이 반영되어 식(17)과 같다. 본 사례연구에서는 식(17)을 기반으로 출발지에서 도착지 9로 15000 차량이 출발하는 단일 OD쌍으로 가정하였으며, 시나리오를 인지비용 파라메타 Z값이 0, 50, 100의 3가지 경우에 대하여 비교하였다.

$$c_a(x_a) + \Psi_{pa}^{rs}(v_{pa}^{rs}) = FT_a \cdot \left(1 + 0.15 \cdot \left(\frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right) + Z \cdot PC_{pa}^{rs} \quad (17)$$

3시나리오의 결과는 <표 2>, <표 3>, <표 4>에 각각 요약되어 있다. 인지비용과 통행시간이 함께 반영된 총 통행비용이 아주 작은 오차로 유의수준 내로 진입하여 식(9)에서 제시한 인지비용을 반영한 사용자 최적

<표 1> 위계가 낮은 도로로의 진입에 따른 부담 인지비용

고속도로(1)	주간선도로(2)		보조간선도로(3)	
주간선도로	-	-	-	-
보조간선도로	F_1^{rs}	보조간선도로	F_2^{rs}	-
접근로	G_1^{rs}	접근로	G_2^{rs}	접근로
			G_3^{rs}	



<그림 9> 사례연구 교통망

통행조건을 만족하는 것으로 파악되었다. <표 3>의 결과에서 통행시간은 매우 단축시킬 수 있으나(75.1분), 통행의 부담이 매우 큰(250) 경로로의 통행이 설명된다. 인지비용의 부담 Z의 값이 증가할수록, 실제 통행시간은 지속적으로 증가하는데, 이 결과는 교통망의 교통상황에 익숙하거나, 통행정보를 제공하여 Z값을 낮추는 것이 교통망의 혼잡을 감소시키는데 역할을 할 수 있다는 당위성을 설명한다고 볼 수 있다. <그림 10>은 인지비용 파라메타 값이 최적사용자 통행배정 목적함수의 통행시간부분에 영향을 미쳐 교통망의 혼잡을 증가시키는 상황에 대한 다른 측면에서의 설명을 포함하고 있다.

〈표 2〉 Z=0 경우의 통행에 따른 탐색경로열거

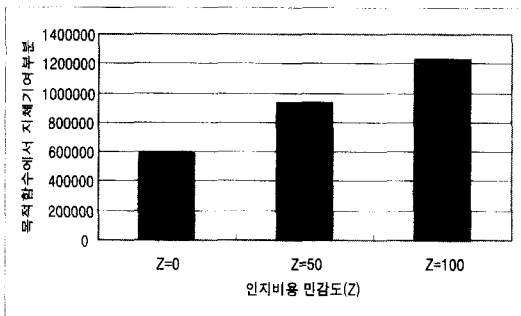
경로	통행량	총 비용	인지비용	통행시간(분)	노드순서(출발지→도착지)
0	5937.9	89.1	0	89.1	1→3→12→13→24→21→20→26→19→17→16→10→9
1	5221.2	89.1	0	89.1	1→3→4→11→14→11→10→16→18→7→8→6→5→9
2	1639.8	89.1	0	89.1	1→3→12→13→24→21→20→25→18→16→8→9
3	1812.9	89.0	0	89.0	1→3→4→11→14→11→10→16→17→19→15→10→9
4	360.4	89.1	0	89.1	1→3→12→13→24→21→20→25→18→16→10→9
5	27.7	89.1	0	89.1	1→3→12→13→24→21→20→26→19→17→16→8→9

〈표 3〉 Z=50 경우의 통행에 따른 탐색경로열거

경로	통행량	총 비용	인지비용	통행시간(분)	노드순서(출발지→도착지)
0	6982.5	323.2	100	223.2	1→3→12→13→24→21→20→26→19→17→16→10→9
2	4509.5	323.6	100	223.6	1→3→12→13→24→21→20→25→18→7→8→6→5→9
3	1625.3	323.5	100	223.5	1→3→12→13→24→21→20→25→18→16→10→9
4	307.0	323.8	100	223.8	1→3→12→13→24→21→20→26→19→17→16→8→6→5→9

〈표 4〉 Z=100 경우의 통행에 따른 탐색경로열거

경로	통행량	총 비용	인지비용	통행시간(분)	노드순서(출발지→도착지)
0	8030.6	507.2	200	307.2	1→3→12→13→24→21→20→26→19→17→16→10→9
1	770.0	507.2	200	307.2	1→3→12→13→24→21→20→25→18→7→8→6→5→9
2	634.8	507.1	200	307.1	1→3→12→13→24→21→20→25→18→16→10→9



〈그림10〉 인지비용 민감도에 따른 목적함수 값의 변화

경로인지비용이 개별경로에서 반영되는 과정을 설명하기 위하여 〈표 3〉의 경로0를 예를 들어 보자. 〈표 3〉의 경로0는 노드1에서 노드20까지 고속도로를 주행하던 중(1→3→12→13→24→21→20), 주간선도로(20→26)로 전환하여 노드16까지 주행했으며, 보조간선도로(16→10)으로 다시 전환하여 목적지9까지 접근하였다. 따라서 E_1^{10} 과 F_2^{10} 에 해당하는 주행전환이 1 번씩 발생했으며 두 경로변경의 파라메타는 각각 1 단 계 위치차이가 존재하므로 총 100의 인지비용이 발생

하게 된다.

$$50 * (1 * 1 + 2 * 0 + 3 * 0 + 1 * 1 + 2 * 0 + 1 * 0) = 50 * (1 + 1) = 100$$

V. 결론

확률적 최적 사용자 통행배정모형은 운전자의 인지 비용 특성을 확률적인 개념으로 설명하기 위하여 운전자의 통행특성을 도로의 통행시간에만 한정된 것으로, 운전자가 실제적으로 경로를 인지하고 선택하는 과정을 반영되지 않아 편향된 통행배정결과가 도출될 가능성이 크게 존재했다.

본 연구에서는 최적사용자 통행배정모형에 운전자가 경로를 인지하고 선택하는 실제적인 인지비용 반영방안을 이론적이고 실제적인 방안으로 제안하였다. 우선 운전자가 경로를 인지하는 특성을 포함하는 최적 사용자 경로선택조건을 Wardrop의 1차원리에 근거하여 수식화했으며, 최적 사용자 경로선택조건을 기반으로 최적 사용자 통행배정모형을 비선형계획법에 근거하여 정식화하였다. 제안된 모형의 해법으로서 Frank-Wolfe의

알고리즘을 변형하여 해를 도출하는 방안을 개발하였다. 제안된 해법에서 경로인지비용을 반영하는 방안으로서 두 링크를 동시에 탐색하는 링크표지기반 최적경로 탐색알고리즘의 활용방안을 제시하였다. 링크표지기반 최적경로 탐색알고리즘에서 두 경로를 탐색하는 과정에서 탐색링크의 부분경로와 탐색이 진행되는 링크와의 연결과정에서 나타나는 차이를 출발지, 도착지, 경로에 따라 각각 다른 인지비용으로 반영되도록 하는 방안을 개발하였다.

인지비용의 민감도에 따른 3가지 시나리오를 대상으로 인지비용과 통행시간으로 구성된 총 통행비용에 따라 통행행태가 Wordrop의 1차원리에 따라 배정되었음을 확인하였다. 사례연구는 또한 인지비용에 대한 부담감이 큰 도로망에서는 시인성이 높은 도로로의 통행행태를 유도하기 때문에 주요구간의 교통혼잡으로 확대될 수 있음을 입증하였다.

본 연구는 기존의 통행배정모형에서 반영하지 못했던 경로를 인지하고 선택하는 행태를 사용자 최적 통행배정모형에 적용한 최초의 시도로서, 경로의 인지비용이 통행시간에 자연스럽게 포함되어 실제 응용분야의 적용 및 이론적인 측면의 발전에 기여가 클 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 제안한 모형은 인지비용에 대한 민감성이 다른 다양한 계층의 교통수요가 존재하는 경우에도 용이하게 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 첨단여행자 정보체계(ATIS)나 첨단교통관리체계(ATMS)에서 교통정보의 효과를 증진시키는데 중요한 판단근거로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 임용택(2004), 일반가로망에서 교통정보제공을 위한 n-path 알고리즘의 개발, 대한교통학회지, 제22권 제4호, 대한교통학회, pp.135~145.
2. Beckmann M.J., McGuire C.B., and Winsten C. B.(1956), Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Conn.
3. Dafermos S. C.(1982), Traffic Equilibrium and Variational Inequalities, Transportation Science 14(1), pp.42~54.
4. Daganzo C.F. and Sheffi Y.(1977), On Stochastic Models of Traffic Assignment.

- Transportation Science 11(3), pp.253~274.
5. Dijkstra E. W.(1959), A Note of Two Problems in Connected with Graphs. Numerical Mathematics. I, pp.269~271.
6. Frank M. and Wolfe P.(1956), An Algorithm for Quadratic Programming, Naval Research Logistics Quarterly 3(1-2), pp.95~110.
7. Kirby R. F. and Potts R. B.(1969), The Minimum Route Problem for Networks with Turn Penalties and Prohibitions. Transportation Research 3, pp.397~408.
8. LeBlanc, L. J., Morlok, E. K, and Pierskalla, W.(1975), An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem. Transportation Research 9(5), pp.309~318.
9. Lee M.(2004), Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
10. Moore E. F.(1957), The Shortest Path through A Maze. Proc. Int. Conf. on the Theory of Switching. Harvard Univ., Cambridge, MA.
11. Potts R.B. and Oliver R.M.(1972), Flows in Transportation Networks. Academic Press.
12. Ran B., Hall, R., and Boyce D.(1996), A Link-Based Variational Inequality Model for Dynamic Departure Time/Route Choice, Transportation Research B, Vol. 30, No. 1, pp.31~46.
13. Sheffi Y.(1985), Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
14. Sheffi Y., Hall R, and Daganzo C.F.(1982), On the Estimation of the Multinomial Probit Model.
15. Sheffi Y. and Powell W.B.(1982), An Algorithm for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link Times. Networks 12(2), pp.191~207.
16. Smith M.J.(1979), The Existence, Uniqueness

and Stability of Traffic Equilibria, Transportation
Research 13B(4), pp.295~304.

Aspects of Road Traffic Research. Proc.
Inst. Civ. Eng., Part II, 1, pp.325~378.

17. Wardrop J. G.(1952) Some Theoretical

♣ 주 작 성 자 : 이미영

♣ 논문투고일 : 2004. 12. 28

논문심사일 : 2005. 2. 4 (1차)

2005. 3. 8 (2차)

심사판정일 : 2005. 3. 8

♣ 반론접수기한 : 2005. 8. 31