

ATIS 체계 구축을 위한 출발지와 도착지의 경로 인지 특성 반영 확정적 사용자 최적통행배정 모형

A Deterministic User Optimal Traffic Assignment Model with Route Perception Characteristics of Origins and Destinations for Advanced Traveler Information System

신성일* 손기민** 이창주***
(Seongil Shin) (Keemin Sohn) (Changju Lee)

요 약

Wardrop(1952)의 확정적 사용자최적원리(Deterministic User Optimal Principle)에 의한 사용자의 통행행태는 교통망의 상황에 대하여 완전한 정보가 존재한다는 가정을 기반으로 하고 있다. 따라서 확정적 사용자최적원리에 따르면 사용자는 출발지와 도착지를 연결하는 최적경로를 선택하며, 사용자가 경로를 임의로 변경하여 통행비용을 줄일 수 없는 균형 상태에 도달함을 의미한다. 운전자의 통행경로선택기준은 다양하게 생각될 수 있으나, 일반적으로 확정적 사용자최적원리에서 운전자는 최소의 통행시간이 소요되는 경로를 선택한다. 그러나 현실의 교통망에서 발생하는 운전자의 통행행태는 통행시간으로 경로를 선택하지 않는 경향이 빈번하게 목격되며, 확정적 사용자최적원리에서처럼 통행시간만을 경로선택의 기준으로 적용하는 모형은 비합리적인 통행행태를 유도할 가능성이 높다.

이에 본 연구는 운전자의 경로를 인지하는 행태를 보다 현실적으로 모사하는 확정적 최적통행배정모형을 제안한다. 이를 위해 모형을 사용자가 경로를 결정함에 있어 출발지와 도착지에서 경로를 인지하는 일반적인 특성으로 통행시간 정보뿐만 아니라 도로주행 조건, 출발지와 도착지에 대한 교통망 정보의 유무 등을 동시에 반영한다고 가정한다. 또한 본 연구는 출발지를 기준으로 하는 통행을 전개하는 전방탐색기법과 도착지를 기준으로 통행을 후퇴하는 후방탐색기법을 동시에 수식과 알고리즘에 반영하여 사용자의 경로인지특성을 반영하는 노력이 주 내용이다.

Abstract

User travel behavior is based on the existence of complete traffic information in deterministic user optimal principle by Wardrop(1952). According to deterministic user optimal principle, users choose the optimal route from origin to destination and they change their routes arbitrarily in order to minimize travel cost. In this principle, users only consider travel time as a factor to take their routes. However, user behavior is not determined by only travel time in actuality. Namely, the models that reflect only travel time as a route choice factor could give irrational travel behavior results. Therefore, the model is necessary that considers various factors including travel time, transportation networks structure and traffic information.

In this research, more realistic deterministic optimal traffic assignment model is proposed in the way of route recognizance behavior. This model assumes that when users decide their routes, they consider many factors such as travel time, road condition and traffic information. In addition, route recognizance attributes is reflected in this suggested model by forward searching method and backward searching method with numerical formulas and algorithms.

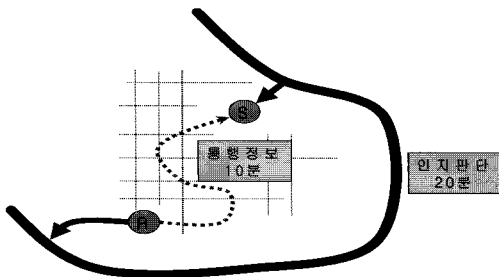
Key Words : Public transportation information, K path finding algorithm, entire path deletion method, path planning

* 주저자 : 서울시정개발연구원 도시교통부 연구위원
** 공저자 : 서울시정개발연구원 도시교통부 연구위원
*** 공저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사과정
† 논문접수일 : 2007년 11월 21일

I. 서 론

Wardrop(1952)의 확정적 사용자최적원리(DUOP: Deterministic User Optimal Principle)에 의한 사용자의 통행행태는 교통망의 상황에 대하여 완전한 정보가 존재한다는 가정을 기반으로 사용자는 출발지와 도착지를 연결하는 최적경로를 선택하며, 사용자가 경로를 임의로 변경하여 통행비용을 줄일 수 없는 균형 상태에 도달함을 의미한다. 운전자의 통행경로선택기준은 다양하게 생각될 수 있으나, 일반적으로 확정적 사용자최적원리에서 운전자는 최소의 통행시간이 소요되는 경로가 선택한다 [1].

그러나 현실의 교통망에서 발생하는 운전자의 통행행태는 통행시간으로만 경로를 선택하지 않는 경향이 빈번하게 목격되며, 따라서 확정적 사용자 최적원리 상황을 적용하면 실제적인 통행행태가 왜곡되는 상황이 발생한다. <그림 1>의 예로서 출발지R과 도착지S를 기준으로 볼 때, 사용자가 교통망을 정확하게 인지하고 있다면, 10분이 소요되는 통행경로를 선택하는 것이 합리적이나, 교통망에 대한 정보가 부족하면, 외곽의 시인성이 양호한 20분이 소요되는 통행경로를 이용하여 접근하려는 행태가 또한 합리적이라고 볼 수 있다. 따라서 후자의 관점에서 보면 통행시간 만을 경로선택의 기준으로 적용하는 모형은 비합리적인 통행행태를 유도할 가능성이 높다. 통행경로를 결정하는 행위는 통행시간에 의한 기준뿐만 아니라 통행경로의 시인성, 통행정보의 존재여부, 교통망의 구조 등 다양한 변수에 의한 영향이 고려될 필요가 있다.



<그림 1> 통행정보와 인지판단의 경로선택의 비교
 <Fig. 1> The comparison of route choice with traffic information and perception judgement

이처럼 경로를 인지하는 다양성은 확률적 사용자최적원리(SUOP: Stochastic User Optimal Principle)를 기반으로 통행행태를 설명하려는 시도 [2-4]로 이어졌으나, 구축된 모형의 대부분은 통행시간 이외의 인지판단에 의한 경로선택부분은 설명되지 않는 오차(Error Term)로 가정하기 때문에 근본적으로 통행행태를 설명하는 대안으로는 한계가 존재한다. Lee(2004)와 이미영 외(2005)는 이러한 문제점을 인식하고 경로를 인지하는 최적경로탐색알고리즘 [5]과 통행배정모형과 알고리즘 [6]을 제시하였으나, 경로를 인지하는 기준을 출발지 또는 도착지의 한 방향에서만 고려되는 방안이 한정되었다. 신성일 외(2005)는 출발지와 도착지의 경로인지특성을 반영하는 최적경로탐색기법을 제안하였다 [7].

이에 본 연구는 운전자의 경로를 인지하는 행태를 보다 현실적으로 모사하는 확정적 최적통행배정 모형을 제안한다. 이를 위해 모형을 가정하는 기본 원리는 사용자가 경로를 결정함에 있어 출발지와 도착지에서 경로를 인지하는 일반적인 특성인 통행시간정보뿐만 아니라 도로주행조건, 출발지와도착지에 대한 교통망정보의 유무 등을 동시에 반영한다. 본 연구는 출발지를 기준으로 하는 통행을 전개하는 전방탐색기법과 도착지를 기준으로 통행을 후퇴하는 후방탐색기법을 동시에 수식과 알고리즘에 반영하여 사용자의 경로인지특성을 반영하는 노력이 주 내용이다.

II. 확정적 사용자최적통행배정모형

본 연구에서 사용되는 표식(Notations)은 다음과 같이 정의된다.

r, s, i, j : 노드, 특히 r, s 는 각각 출발지와 도착지

a, b : 링크

$\Gamma_a^+ (\Gamma_a^-)$: 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

π^{ri} : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최소통행시간

π^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최소통행시간

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

통행배정은 교통상황과 교통망의 변화를 예측하는 과정이다. 대부분의 확정적 최적통행배정모형은 Wardrop의 제1원칙 [1]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 기본가정을 포함하고 있다.

경로를 기반으로 표현된 사용자 최적원리는 식 (1)과 같다.

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

이 경우

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

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

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

이 경우

π^{ri} : 출발지 r 에서 노드 i 까지의 최소통행시간

t_a : 링크 a 의 통행시간

x_a^{rs} : 출발지 r 에서 도착지 s 간 링크 a 의 통행량

* 최적값을 나타냄

식 (2)는 출발지 r 과 도착지 s 에 표현된 링크 a 가 통

행량이 존재하면, 즉 $x_a^{rs*} > 0$, 링크 a 는 r - s 간 최적 경로에 포함된다. 즉 $\pi^{r*} + t_a = \pi^{s*}$.

Beckmann, et al. (1956)은 사용자최적경로선택조건을 NLP에 근거하여 다음과 같은 식 (3)으로 정식화하였다 [8].

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

이 경우

$t_a(\cdot)$: 교통량 종속적인 통행시간함수

x_a : 링크 a 의 교통량

δ_{ak}^{rs} : 출발지 r 과 도착지 s 을 연결하는 경로 k 상에 링크 a 가 존재하면 1, 그렇지 않으면, 0

q_{rs} : 출발지 r 과 도착지 s 간의 수요

이 수식에는 단일(Uniqueness)의 최적해가 존재 (Existence)한다는 최적조건이 증명되었다 [9].

LeBlanc et al. (1975)은 최적경로 탐색알고리즘의 반복적인 과정을 Frank-Wolfe 알고리즘 (1956)에 접목하여 대규모 네트워크에서도 매우 효율적인 다음과 같은 알고리즘을 제안하였다 [10, 11].

Step 0 : 초기화

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

Step 1 : 통행시간 계산

모든 a 에 대하여 $t_a = t_a(x_a^n)$

Step 2 : 방향 탐색

$\{t_a^n\}$ 을 기반으로 전량배정수행

Step 3 : 선형 탐색

다음 식을 해당되는 α_n 계산

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

Step 4 : 이동

모든 a 에 대하여

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

Step 5 : 수렴체크

수렴조건에 맞으면 정지. 현 단계의 해

$\{x_a^{n+1}\}$ 가 사용자 최적통행량

그렇지 않으면 $n=n+1$ 하고 step 1로 이동

III. 수식 및 알고리즘

제안되는 수식과 알고리즘에 추가적으로 적용되는 표식은 다음과 같다.

π_b^{r*} : r 에서 링크 b 의 도착노드까지 통행시간

$\bar{\psi}_b^{r*}$: r 에서 링크 b 까지 출발지 기반 링크인 지비용

$\bar{\psi}_a^{s*}$: s 에서 링크 a 까지 도착지 기반 최적링크인 지비용

출발지 r 에서 링크 b 의 인지특성을 고

$\bar{\Pi}_b^{r*}$: 러한 링크 b 의 도착노드까지의 출발지 기반 최적총통행비용

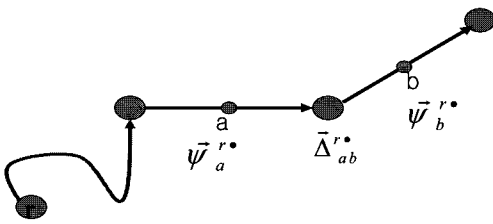
$\bar{\Delta}_{ab}^{r*}$: r 에 대하여 링크 a 에서 링크 b 로의 전환에서 발생하는 인지비용

$\bar{\Delta}_{ab}^{s*}$: s 에 대하여 링크 b 에서 링크 a 로의 전환에서 발생하는 인지비용

1. 출발지와 도착지의 경로인지비용반영

정의1: 출발지 r 에서 링크 b 를 인지하는 비용은 r 에서 부분경로의 마지막 링크 a 의 링크인지비용과 링크 b 의 인지비용의 변화를 포함하는 과정으로 음수가 아닌 비용이다.

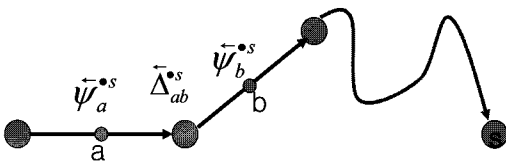
$$(\bar{\psi}_b^{r*} = \bar{\psi}_a^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} \geq 0)$$



<그림 2> 출발지기반 인지비용
<Fig. 2> Perception cost based on origin

정의2: 도착지 s 중심으로 역으로 링크 a 를 인지하는 비용은 s 에서 역으로 연결된 부분경로의 마지막 링크 b 의 링크인지비용과 링크 a 의 인지비용의 변화를 포함하는 과정으로 음수가 아닌 비용

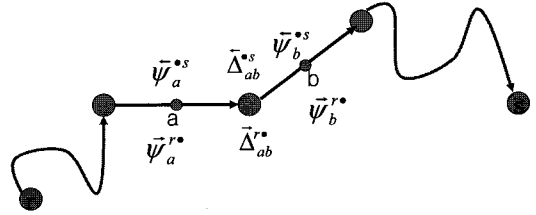
$$(\bar{\psi}_a^{s*} = \bar{\psi}_b^{s*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} \geq 0)$$



<그림 3> 도착지기반 인지비용
<Fig. 3> Perception cost based on destination

정의3: 출발지 r 과 도착지 s 에서 동시에 링크 b 를 인지하는 비용은 출발지기반 인지비용과 도착지 기반 인지비용을 합

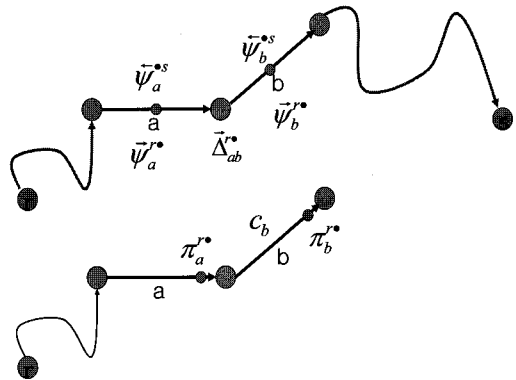
$$(\bar{\psi}_b^{r*} + \bar{\psi}_a^{s*} = \bar{\psi}_a^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} + \bar{\psi}_b^{s*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} \geq 0)$$



<그림 4> 출발지와 도착지 동시에 고려된 인지비용
<Fig. 4> Perception cost considering origin and destination

정의4: r 과 s 동시에 링크 b 를 인지하는 총 통행비용은 출발지기반 인지비용, 도착지 기반 인지비용, 출발지기반 통행시간 ($\pi_b^{r*} > 0$)의 합

$$(\pi_b^{r*} + \bar{\psi}_b^{r*} + \bar{\psi}_a^{s*} = \pi_a^{r*} + c_b + \bar{\psi}_a^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} + \bar{\psi}_b^{s*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} > 0)$$



<그림 5> 총 통행비용의 계산
<Fig. 5> Calculation of total travel cost

2. 모형 및 알고리즘

1) 수식

기존의 링크통행비용은 출발지와 도착지에 관계 없이 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, 경

로에 따라 링크를 인지하는 비용도 통행비용에 포함되므로 이들 구성에 따라 통행비용이 달라진다. 식 (4)는 인지비용이 포함된 운전자의 최적경로선택조건을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\Pi}_a^{rs*} + c_a + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} &= \bar{\Pi}_b^{rs*}, \text{ if } v_{ab}^{rs*} > 0 \quad \forall a, ab, r, s \\
 \bar{\Pi}_a^{rs*} + c_a + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} &\geq \bar{\Pi}_b^{rs*}, \text{ if } v_{ab}^{rs*} = 0 \quad \forall a, ab, r, s \\
 (\bar{\Pi}_a^{rs*} + c_a + \bar{\Delta}_{ab}^{r*} + \bar{\Delta}_{ab}^{s*} - \bar{\Pi}_b^{rs*}) \cdot v_{ab}^{rs*} &= 0 \quad \forall a, ab, r, s \\
 v_{ab}^{rs*} &\geq 0 \quad \forall a, ab, r, s
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (5)는 이처럼 출발지, 도착지, 경로에 따라 각기 다른 통행함수로 구성된 확정적 사용자최적통행배정모형을 구성한 것으로 통행비용함수가 출발지, 도착지에 따라 상이하게 표현되고 있음을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \min Z(x_a, v_{ab}^{rs*}, v_{ab}^{rs*}) &= \sum_a \int_a^a t_a(\omega) d\omega + \sum_r \sum_a \sum_{b \in A_a} \int_0^{v_{ab}^{rs*}} \bar{\Delta}_{ab}^{r*}(\omega) d\omega + \\
 &\quad \sum_a \sum_{b \in A_a} \sum_s \int_0^{v_{ab}^{rs*}} \bar{\Delta}_{ab}^{s*}(\omega) d\omega \\
 \text{s.t. } q_{rs} &= \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s \\
 f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall k, r, s \\
 \text{where } x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a \\
 v_{ab}^{rs*} &= \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^{rs} \cdot \delta_{bk}^{rs} \quad \forall r, a, b \in A_a \\
 v_{ab}^{rs*} &= \sum_r \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^{rs} \cdot \delta_{bk}^{rs} \quad \forall r, a, b \in A_a \\
 A_a &= \text{set of outgoing links from link } a
 \end{aligned} \tag{5}$$

2) 동등조건

상기한 문제의 1차 필요조건이 본 논문에서 제시하는 인지비용을 고려한 사용자 평형 조건 식 (4)가 되기 위한 조건은 식 (5)의 목적함수의 두 번째, 세 번째 항인 식 (6)이 식 (7)의 조건을 만족하면 된다는 것은 쉽게 알 수 있고 이를 통해 동등조건을 성립을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Z_1(\mathbf{V}^{r*}(\mathbf{f})) &= \sum_r \sum_a \sum_{b \in A_a} \int_0^{v_{ab}^{r*}} \bar{\Delta}_{ab}^{r*}(\omega) d\omega \\
 Z_2(\mathbf{V}^{s*}(\mathbf{f})) &= \sum_a \sum_{b \in A_a} \sum_s \int_0^{v_{ab}^{s*}} \bar{\Delta}_{ab}^{s*}(\omega) d\omega
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{r*}(\mathbf{f}))}{\partial f_l^{mn}} &= \Delta_{n(l)}^{m*} \quad \forall m, n, l \\
 \frac{\partial Z_2(\mathbf{V}^{s*}(\mathbf{f}))}{\partial f_l^{mn}} &= \Delta_{m(l)}^{n*} \quad \forall m, n, l
 \end{aligned} \tag{7}$$

$\Delta_{n(l)}^{m*}$: 출발지 m기반의 m→의 경로 l의 인지비용 합

$\Delta_{m(l)}^{n*}$: 도착지 n기반의 m→의 경로 l의 인지비용 합

식 (7)의 첫 번째 식은 chain rule에 의해 식 (8)과 같이 풀어 쓸 수 있고 식 (8)의 각 요소를 풀어내면 식 (9)의 결론에 도달한다. 식 (7)의 두 번째 식은 출발지와 도착지가 바뀌는 것을 제외하면 첫 번째 식의 유도과정과 동일한 절차를 갖는다.

$$\frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{r*}(\mathbf{f}))}{\partial f_l^{mn}} = \sum_p \sum_c \sum_{d \in A_c} \frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{r*}(\mathbf{f}))}{\partial v_{cd}^{p*}} \cdot \frac{\partial v_{cd}^{p*}}{\partial f_l^{mn}} \quad \forall m, n, l \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{r*}(\mathbf{f}))}{\partial v_{cd}^{p*}} &= \Delta_{cd}^{p*}, \quad \forall p, c, d \in A_c \\
 \frac{\partial v_{cd}^{p*}}{\partial f_l^{mn}} &= \begin{cases} \delta_{lc}^{mn} \cdot \delta_{ld}^{mn} & \text{if } p = m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall m, n, l
 \end{aligned} \tag{9}$$

그러므로 목적함수의 두 번째 항을 경로 교통량에 따라 편미분한 결과는 식 (10)과 같다. 마찬가지로, 목적함수의 세 번째 항도 비슷한 계산과정을 거쳐 식 (11)과 같음을 알 수 있다.

$$\frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{**}(\mathbf{f}))}{\partial f_j^{mn}} = \sum_c \sum_{d \in A_c} \Delta_{cd}^{m*} \cdot \delta_{lc}^{mn} \cdot \delta_{ld}^{mn} = \Delta_{m(l)}^{n*} \quad \forall m, n, l \quad (10)$$

$$\frac{\partial Z_1(\mathbf{V}^{**}(\mathbf{f}))}{\partial f_j^{rs}} = \sum_c \sum_{d \in A_c} \Delta_{cd}^{r*} \cdot \delta_{lc}^{rs} \cdot \delta_{ld}^{rs} = \Delta_{m(l)}^{r*} \quad \forall m, n, l \quad (11)$$

결과적으로, 식 (5)의 1차 필요조건은 식 (12)와 같고(변수설정은 식 (1) 참조) 이를 링크 기반으로 전환하면 앞서 정의한 인지비용을 고려한 사용자평형조건인 식 (4)와 일치함을 알 수 있다

$$\begin{aligned} \eta_k^{rs} + \Delta_{s(k)}^{r*} + \Delta_{r(k)}^{s*} - u_{rs} &= 0, \text{ if } f_k^{rs*} > 0 & \forall k, r, s \\ \eta_k^{rs} + \Delta_{s(k)}^{r*} + \Delta_{r(k)}^{s*} - u_{rs} &\geq 0, \text{ if } f_k^{rs*} = 0 & \forall k, r, s \\ (\eta_k^{rs} + \Delta_{s(k)}^{r*} + \Delta_{r(k)}^{s*} - u_{rs}) \cdot f_k^{rs*} &= 0, & \forall k, r, s \\ f_k^{rs} &\geq 0, & \forall k, r, s \end{aligned} \quad (12)$$

3) 유일성 조건

식 (5)의 문제가 유일한 해를 갖기 위한 조건은 우선, 목적함수의 두 번째 항만을 고려했을 때 식 (13)과 같다. 물론, 세 번째 항에 대해서도 같은 조건을 만족해야 하며 더불어, 세 번째 항과 연관된 변수(도착지 기반)와 두 번째 항과 연관된 변수(출발지 기반)간의 상호작용도 없다는 가정이 필요하다.

$$\frac{\partial Z_1(\mathbf{V}(\mathbf{f}))}{\partial \alpha_a^e \partial \alpha_f^e} = \begin{cases} \frac{\partial \alpha_a^e}{\partial \alpha_f^e} & \text{for } p=q=c=e, d=f \\ \frac{\partial \alpha_a^e}{\partial \alpha_f^e} & \forall p, q, c, d \in A, e, f \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)의 조건은 특정 교차로에서 경로변경 시 운전자가 느끼는 인지비용이 같은 출발지에서 출발한 통행량에만 영향을 받는다는 가정이므로 현실적으로 받아 들여지기 쉽지 않다. 그러나 문제의 해석적 풀이를 위해서는 위 조건이 필수적이다. 만약, 인지비용이 다른 통행의 복합적으로 영향을 받는다고 했을 경우는 상기 문제가 정형화된 목적함수를 가질 수 없게 되고 Variational Inequality [12, 13] 등

의 문제로 변환된 선형적인 기법 [14]으로 풀이해야 한다. 위 문제는 대각화의 절차문제로서 의의가 있으며 예제에서와 같이 인지비용을 상수로 처리할 경우는 문제의 풀이가 충분히 가능하다.

4) 알고리즘

알고리즘은 기존에 제시된 Frank-Wolfe 알고리즘을 변형하여 적용하였으며, 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

Step 0 : 초기화

a 와 ab 에 대하여

$$c_a + \bar{\Delta}_{ab} + \bar{\Delta}_{ab}^{**} = c_a(0) + \bar{\Delta}_{ab}(0) + \bar{\Delta}_{ab}^{**}(0) \text{ 을}$$

계산

전량배정수행(All-Or-Nothing Assignment);

이 과정에서 $\{x_a^1\}, \{v_{ab}^{r*1}\}, \{v_{ab}^{s*1}\}$ 을 얻고,

$n = 1$

Step 1 : 통행시간 계산

a 와 ab 대하여

$$c_a + \bar{\Delta}_{ab} + \bar{\Delta}_{ab}^{**} = c_a(x_a) + \bar{\Delta}_{ab}(v_{ab}^{r*}) + \bar{\Delta}_{ab}^{**}(v_{ab}^{s*})$$

Step 2 : 방향 탐색

$\{c_a + \bar{\Delta}_{ab} + \bar{\Delta}_{ab}^{**}\}^n$ 을 기반으로 전량배정수행

이 과정에서 통행량 보조변수집합 $\{x_a^n\}$

$\{v_{ab}^{r*n}\}, \{v_{ab}^{s*n}\}$ 을 계산

Step 3 : 선형 탐색

다음 식을 해당되는 α_n 계산

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \left[\begin{array}{l} \sum_a \int_a^{\alpha_n + \alpha_n (y_a^n - x_a^n)} c_a(\omega) d\omega + \\ \sum_r \sum_a \sum_b \int_a^{v_{ab}^{r*} + \alpha_n (z_{ab}^{r*} - v_{ab}^{r*})} \Delta_{ab}^{r*}(\omega) d\omega + \\ \sum_a \sum_b \sum_s \int_a^{v_{ab}^{s*} + \alpha_n (z_{ab}^{s*} - v_{ab}^{s*})} \Delta_{ab}^{s*}(\omega) d\omega \end{array} \right]$$

Step 4 : 이동

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

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

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

Step 5 : 수렴 체크

수렴조건에 맞으면 정지. 현단계의 해

$\{x_a^{n+1}\}, \{v_{ab}^{r,n+1}\}, \{v_{ab}^{s,n+1}\}$ 가 경로인지비용을

반영한 최적해

그렇지 않으면 $n=n+1$ 하고 step 1로 이동

IV. 사례연구

사례연구를 통하여 도로위계 및 교통정보의 존재여부에 따라 통행의 시인성과 안정감을 확보하기 위해 활용되는 예에 대하여 설명한다. <그림 6>은 26개의 노드와 78개의 링크로 구성되어 있으며 링크는 4등급의 2차로 도로위계로- 고속도로(1), 주간선도로(2), 보조간선도로(3), 접근도로(4)- 구분된다. 출발지1 도착지10을 통행하는데 도로위계와 교통망에 대한 접근정보를 대상으로 3개의 시나리오로 구성하였다. 2번째 시나리오부터 도로위계가 양호한 도로에서 낮은 도로로의 주행이 급격하게 발생할수록 인지비용이 높게 증가하도록 시나리오를 구성하였다.

(1) 교통망에 대한 완전정보에 대한 가정으로서 통행시간을 최소화하기 위한 통행

$$\min Z(x_a) = \sum_a \int_a^{\alpha_n} c_a(\omega) d\omega$$

(2) 교통망에 대한 불완전정보로서 도착지까지 출발지를 기준으로 시인성과 안정감을 확보하고자 하는 통행

$$\min Z(x_a, v_{ab}^{r*}) = \sum_a \int_a^{\alpha_n} t_a(\omega) d\omega + \sum_r \sum_a \sum_b \int_a^{v_{ab}^{r*} + \alpha_n (z_{ab}^{r*} - v_{ab}^{r*})} \Delta_{ab}^{r*}(\omega) d\omega$$

여기서

$$\Delta_{ab}^{r*} = (\Phi_b - \Phi_a)^2 \cdot P_{ab}^r$$

Φ_b : 링크b의 도로위계

P_{ab}^r : 출발지r에서 느끼는 링크a에서 링크b로의 경로전환 파라메타(50)

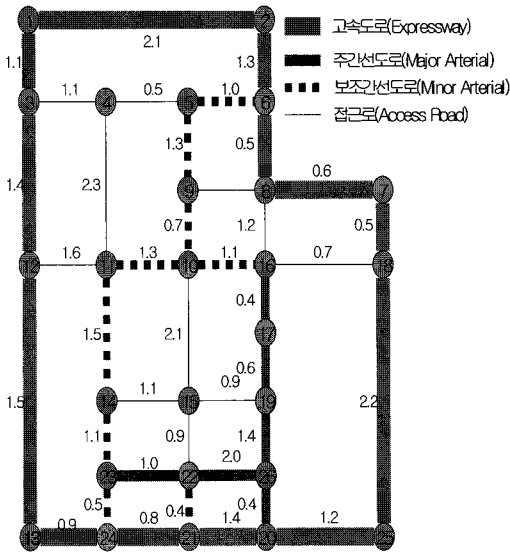
(3) 도착지주변에 대해 교통정보가 존재하여 도착지 주변까지는 도상으로 시인성을 확보하면서 주변에서 통행시간을 최소화하려는 통행. 도착지 주변의 반경 2.5km 내에서 상세한 경로정보의 인지가정.

$$\min Z(x_a, v_{ab}^{r*}, v_{ab}^{s*}) = \sum_a \int_a^{\alpha_n} t_a(\omega) d\omega + \sum_r \sum_a \sum_b \int_a^{v_{ab}^{r*} + \alpha_n (z_{ab}^{r*} - v_{ab}^{r*})} \Delta_{ab}^{r*}(\omega) d\omega + \sum_s \sum_a \sum_b \int_a^{v_{ab}^{s*} + \alpha_n (z_{ab}^{s*} - v_{ab}^{s*})} \Delta_{ab}^{s*}(\omega) d\omega$$

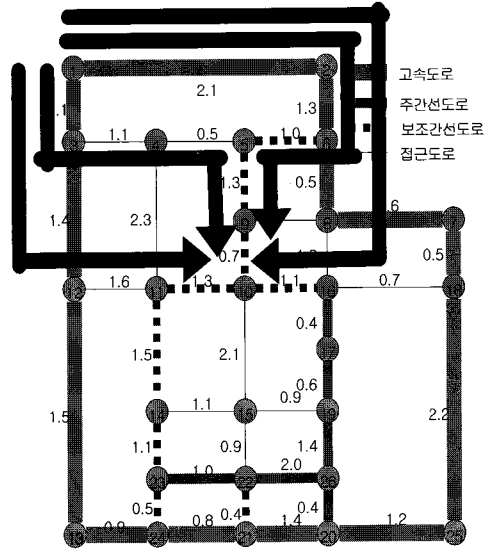
여기서

$$\Delta_{ab}^{r*} + \Delta_{ab}^{s*} = \begin{cases} 0 & \text{if } (d_b^s \leq 2.5km) \\ (\Phi_b - \Phi_a)^2 \cdot P_{ab}^r & \text{else } (d_b^s > 2.5km) \end{cases}$$

d_b^s : 목적지s에서 링크b의 시작노드까지의 역방향 최적거리



<그림 6> 대상네트워크
<Fig. 6> Case study network



<그림 7> 시나리오1: 완전정보
<Fig. 7> Scenario1: complete information

시나리오에 대한 결과는 <그림 7>, <그림 8>, <그림 9>와 같다. 우선 인지비용이 고려되지 않은 완전정보를 가정한 시나리오1의 수행 결과인 <그림 7>에서의 통행은 통행시간을 최소화하기 위한 통행으로 총 4개의 이용된 경로가 나타나고 있다. 이들 통행은 출발지와 목적지를 연결하는 근처의 통행이 발생하는 특징을 보여주고 있다. 사용된 경로의 통행시간은 <표 1>에서 보듯이 17.3으로 동일하며, 이용된 경로는 사용자최적경로선택원리를 만족한다.

시나리오2의 결과인 <그림 8>과 <표 2>에서 통행의 시인성을 확보하기 위해 장거리 통행인 고속도로를 주행해서 도로위계가 급격하게 변하지 않는 17->16->10과 22->23->14->11->10의 2방향에서 접근하였다. 또한 목적지 주변의 주간선도로에서 혼잡을 피하기 위하여 교통량이 2개의 간선도로 축으로 적절하게 배분되는 것이 파악되고 있다.

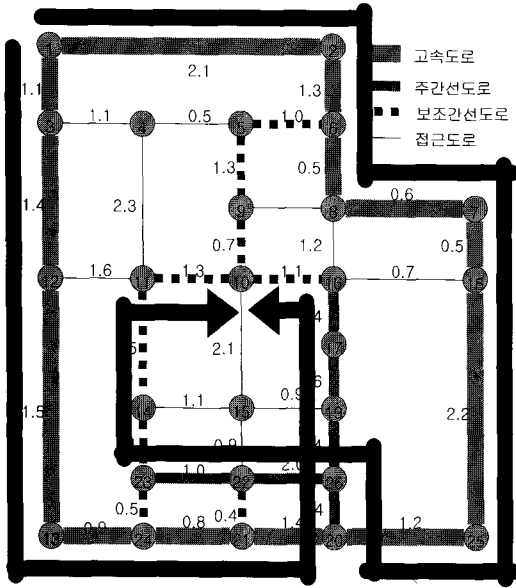
시나리오3의 결과인 <그림 9>와 <표 3>에서 통행의 시인성을 확보하기 위해 장거리 통행인 고속도로를 주행하는 것은 시나리오2와 유사하다. 그러나 목적지 주변에 대한 교통정보를 파악하고 있으므로 주변에 근접되도록 통행을 확보한 후, 통행시간을 감소시키는 방향으로 통행량의 배분이 이루어진다.

<표 1> 완전정보 상황의 통행배정결과
<Table 1> Results of traffic assignment with complete information

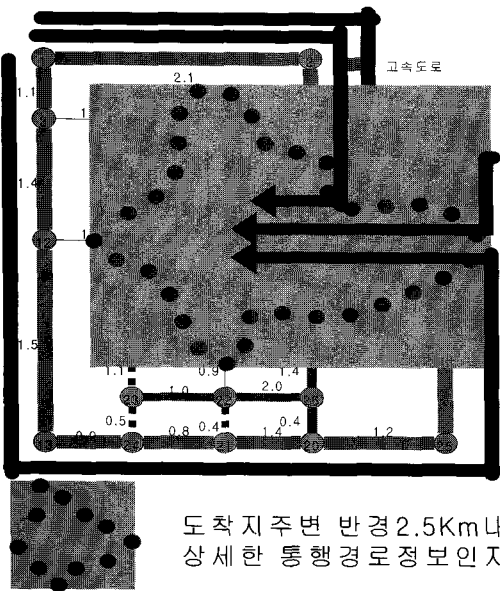
경로	통행 시간 비용	인지 비용	통행량	이용경로 (출발지->도착지)
1	17.3	0	5102.77	1->3->4->5->9->10
2	17.3	0	5435.28	1->2->6->8->16->10
3	17.3	0	4007.49	1->3->12->11->10
4	17.3	0	454.46	1->2->6->5->9->10

<표 2> 통행의 시인성 및 안정감을 위한 통행배정결과
<Table 2> Results of traffic assignment for travel perception and stability

경로	통행 시간 비용	인지 비용	통행량	이용경로 (출발지->도착지)
1	71.7	100	8139.24	1->3->12->13->24->21->20->26->19->17->16->10
2	71.7	100	6860.76	1->2->6->8->7->18->25->20->26->22->23->14->11->10



<그림 8> 시나리오2: 도착지 주변 정보부족 (시인성 및 안정감 확보)
 <Fig. 8> Scenario2: insufficient information around destination (perception and stability confirmation)



<그림 9> 시나리오3: 도착지 주변정보제공 (시인성+통행시간 단축)
 <Fig. 9> Scenario3: Traffic information around destination (reduction of perception and travel time)

<표 3> 시인성 확보와 도착지 주변 통행정보에 대한 결과
 <Table 3> Results for traffic information around destination with perception confirmation

경로	통행 시간 비용	인지 비용	통행량	이용경로 (출발지->도착지)
1	77.0	0	7513.19	1->2->6->8->16->10
2	77.0	0	5863.82	1->3->12->13->24->21->20->25->18->16->10
3	77.0	0	1622.99	1->2->6->8->7->18->16->10

V. 결 론

기존의 사용자최적통행배정모형에서 출발지와 도착지를 연결하는 경로선택의 기준은 통행시간으로 동일하게 처리되었다. 실제 교통망에서 여행자가 경로를 선택함에 있어서 출발지 또는 도착지가 어디인가, 그리고 이 두 지점을 연결하는 경로의 특성이 어떠한가에 따라 링크를 인지하는 정도가 다르게 표현되며, 결국 이러한 운전자의 경로인지에 대한 특성이 경로를 선택하는 행태에 영향을 미치게 된다.

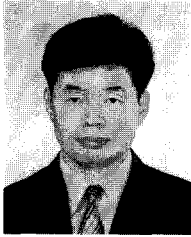
본 연구는 출발지와 도착지에 따라 운전자들이 경로에 대한 인지특성이 경로선택에 고려되도록 새로운 사용자최적통행배정모형을 제안하였다. 제안된 모형과 알고리즘에서 경로에 대한 시인성, 주행안정감, 교통정보의 취득 유무에 따른 운전자 선택의 행태를 보다 적극적으로 고려되도록 확장하였다. 연구결과는 통행배정모형의 현실 적용성을 높이는데 기여할 것으로 파악된다.

참고문헌

[1] J. G. Wardrop, "Some theoretical aspects of road traffic research," *Proc. Inst. Civ. Eng. Part II*, vol. 1, pp. 325~378, May 1952.
 [2] C. F. Daganzo and Y. Sheffi, "On stochastic models of traffic assignment," *Transportation Science*, vol. 11, no 3, pp. 253~274, Aug. 1977.
 [3] Y. Sheffi and W. B. Powell, "An algorithm for the equilibrium assignment problem with random

- link times," *Networks*, vol. 12, no 2, pp. 191~207, 1982.
- [4] Y. Sheffi, R. Hall, and C. F. Daganzo, "On the Estimation of the Multinomial Probit Model," *Transportation Research Part A*, vol. 16, no. 5~6, pp. 447~456, Sept. 1982.
- [5] M. Lee, *Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement*, Ph. D. Dissertation, Univ. of Wisconsin-Madison, Aug. 2004.
- [6] 이미영, 백남철, 문병섭, 강원의, "경로인지비용을 반영한 사용자최적통행배정모형," *대한교통학회 논문지*, 제23권 제2호, pp. 117~130, 2005. 4.
- [7] 신성일, 손기민, 조종석, 도철웅, 김원근, "출발지와 도착지의 경로인지특성을 반영한 One-to-One 최적경로탐색 (출발지기반 수식 및 알고리즘을 중심으로)," *대한교통학회 논문지*, 제23권 제7호, pp. 99~110, 2005. 12.
- [8] M. J. Beckmann, C. B. McGuire, and C. B. Winsten, *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, Conn, March 1957.
- [9] Y. Sheffi, *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [10] L. J. LeBlanc, E. K. Morlok, and W. Pierskalla, "An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem," *Transportation Research*, vol. 9, no. 5, pp. 309~318, Oct. 1975.
- [11] M. Frank and P. Wolfe, "An algorithm for quadratic programming," *Naval Research Logistics*, vol. 3, pp. 95~110, 1956.
- [12] S. C. Dafermos, "Traffic equilibrium and variational inequalities," *Transportation Science*, vol. 14, pp. 42~54, Feb. 1980.
- [13] A. Nagurney, *Network Economics: A Variational Inequality Approach*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1993.
- [14] S. C. Dafermos, "Relaxation algorithms for the general asymmetric traffic equilibrium problem," *Transportation Science*, vol. 16, pp 231~240, May 1982.

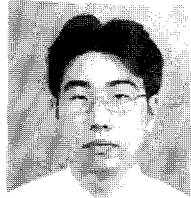
저자소개



신 성 일 (Shin, Seongil)

2001년 : 위스콘신주립대학교 교통공학 박사

2002년~현재 : 서울시정개발연구원 도시교통연구부 연구위원

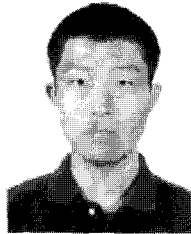


손 기 민 (Sohn, Keemin)

1993년 : 서울대학교 도시공학과 교통공학 석사

2003년 : 서울대학교 도시공학과 교통공학 박사

2002년~현재 : 서울시정개발연구원 도시교통연구부 연구위원



이 창 주 (Lee, Changju)

2007년 2월 : 아주대학교 환경도시공학부 교통공학과 학사

2007년 3월~현재 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사과정