

Area-Wide ETCS 도입을 위한 교통망 평가방안

Transportation Network Equilibrium According to the Area-Wide ETCS Toll Charging Schemes

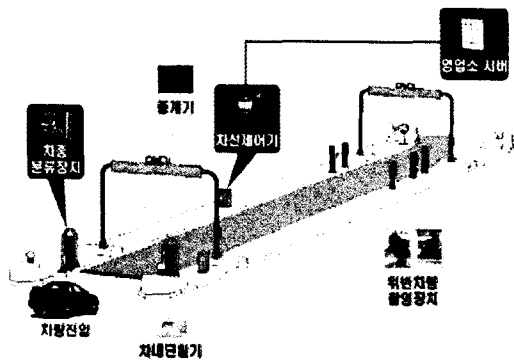
신 성 일 (서울시정개발연구원 (국토연구원 교통연구실 (서울시정개발연구원 (서울대학교 환경계획학과 도시교통부 연구위원)
이 미 영 (국토연구원 교통연구실 (서울시정개발연구원 (서울대학교 환경계획학과 도시교통부 연구위원)
김 은 영 (서울시정개발연구원 (서울대학교 환경계획학과 도시교통부 연구위원)
이 창 주 (서울대학교 환경계획학과 도시교통부 연구위원)
 석사과정)

목 차

- I. 서론
- II. 기존문헌고찰
 - 1. 균형사용자 최적통행배정모형
 - 2. 균형배정모형과 지점요금 부과
- III. ETCS 요금 부과방안
 - 1. 진입-진출기반 요금부과 모형
 - 2. 거리비례제 요금부과 모형과 균형
 - 3. 시간비례제 요금부과 모형과 균형
- IV. 결론

I. 서론

전자통행료징수체계(ETCS : Electronic Toll Collection System)는 차량이 요금소에서 멈추지 않고 정상주행 상태에서 첨단전자장비(무선통신)을 이용하여 통행료를 지불하는 전자요금징수 시스템을 말한다. ITS 기본계획 2001에서는 전자지불서비스분야에서 유료도로통행료 전자지불, 혼잡통행료 전자지불 추진계획을 세우고 자동요금지불이 가능한 서비스 제공을 목표로 하고 있는 만큼 향후 ETCS의 도입은 다양한 각도에서 활발하게 추진될 것으로 예측된다.



<그림 1> 자동통행료징수체계 개요

출처 : 민자고속도로와 효율적 연계 운영체계 구축을 위한 방안수립. 한국도로공사, 2002

우리나라에서 추진되고 있는 ETCS의 대표적 사례는 한국도로공사에서는 운영 중인 Hi-pass로써 차량이 Tollgate를 진입해서 고속도로를 주행한 후 또 다른 Tollgate를 진출할 때 미리 산정되어 있는 요금 Table에 해당하는 요금을 부과하는 방안이다. 유사한 ETCS 시스템은 서울시의 지역기반(Area-wide) 혼잡통행료 정책 추진시 검토하고 있는 내용에 포함될 것이며, 보다 다양한 요금부과정책의 검토가 이루어 질것으로 판단되고 있다.

Area-wide 기반의 ETCS 도입에 따른 교통망 평가를 위해서 균형통행배정모형(Equilibrium Traffic Assignment Model)을 활용하는 경우 남산 1·3호선 터널에서 적용하던 기존의 point 요금부과방식과는 다른 가정을 필요로 한다. point 부과방식에서는 경로의 통행비용의 합은 경로를 구성하는 링크(link) 통행비용의 합의 가정인 "link-additive"가 성립하나, Area-wide 방식은 이러한 link-additive 가정이 성립한다고 항상 볼 수 없다(Gabriel & Bernstein, 1997). yang et al(2004)와 Meng et al(2004) 등이 이와 유사한 문제를 해결하기 위한 진입-진출(Entry-Exit)기반 통행요금부과 방식에 적용 가능한 교통망 균형 모형을 제시하였으나, 매우 한정적인 요금구조와 단순한 네트워크를 변형

해야만 적용될 뿐 일반화된 모형과 해법은 아니었다.

본 연구에서는 Area-Wide 기반의 ETCS에서 가장 많이 검토될 수 있는 통행료 부과정책인 기존의 진입-진출기반 요금부과, 거리비례제(Distance-Based)요금부과와 통행시간비례제 요금부과에 응용될 수 있는 일반화된 균형 모형과 그에 따른 해법을 제안한다.

본 연구에서는 다음과 같이 진행된다. 2장에서 사용자균형 통행배정모형의 기존 접근 방법을 검토하고 3장에서 본 연구에서 제시하는 요금부과정책에 따른 교통망 균형 문제와 관련된 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 결론과 향후 연구과제를 서술한다.

II. 기존문헌고찰

균형통행배정모형과 요금부과시 통행의 변화를 파악할 수 있는 기존 방법론을 고찰한다.

1. 균형사용자최적통행배정모형

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
- $\Gamma_r^+ (\Gamma_r^-)$: 링크 a 의 도착노드(출발노드)가 시작노드(도착노드)인 링크집합
- c_a, c_{ij} : 링크 $a (i, j)$ 의 통행시간
- π^{ri} : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최소 통행시간
- π^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최소통행시간

통행배정은 교통상황과 교통망의 변화를 예측하는 과정이다. 대부분의 확정적 최적통행배정모형은 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 경로 선택조건으로 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.

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

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)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.

$$\pi^{ri*} + t_a = \pi^{rj*}, \text{ if } x_a^{rs*} > 0 \quad \forall a(i, j), r, s$$

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

이 경우, π^{r^*} - 출발지r에서 노드i까지의 최소통행시간

t_a - 링크a의 통행시간

x_a^{rs} - 출발지r에서 도착지s간 링크a의 통행량

* 최적값을 나타냄.

식(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 사용자최적경로선택 조건을 NLP에 근거하여 다음과 같은 식(3)으로 정식화하였다.

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

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 대규

모 네트워크에서도 매우 효율적인 다음과 같은 알고리즘을 제안하였다.

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 : 통행시간계산

모든 a 에 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.

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

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. 현단계의 해 $\{x_a^{n+1}\}$ 가 사용자 최적통행량. 그렇지 않으면 $n := n+1$ 하고 step 1로 이동

2. 균형통행배정모형과 지점(point) 요금부과

남산 1·3호 터널과 같이 ETCS를 지점(point)에서 요금을 부과했을 경우에 균형통행배정모형(황기연, 교통수요관리론 2001)을 다음과 같이 식(4)로 구축될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min z(x) &= \sum_a \int_a^a [t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\beta} T_a] d\omega \\ \text{s.t. } &\text{식(3)과 제약조건과 동일} \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, T_a : 링크 a의 Toll 요금

β : 시간가치(원/분)를 나타내는 파

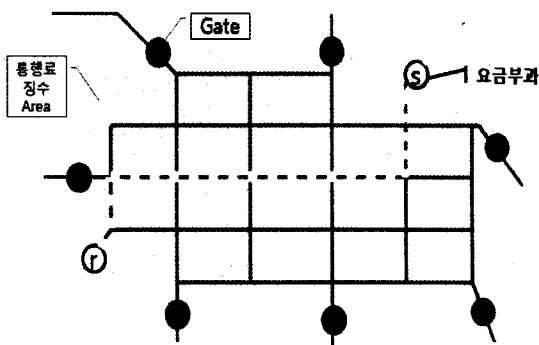
라메타

이 때 경로를 구축하는 비용은 Toll이 부과되지 않는 링크는 $t_a(x_a)$ 이고 Toll이 부과되는 경로는 $t_a(x_a) + \frac{1}{\beta} T_a$ 로서 모든 첨자가 링크 a로 표현이 가능하며, 이와 같이 링크의 비용의 합이 정확하게 경로의 비용으로 표현되는 경우를 가산링크비용(Additive link cost)라고 한다. 이와 반대로 가산링크비용으로 표현되지 않는 비용을 비가산비용(Non-Additive Cost)이라고 하며 대표적인 경우가 고속도로에서 운영중인 Non linear 구조의 요금 table과 과거 구역제 등의 철도요금 구조로서 관찰될 수 있으며, 이외에 비가산비용에 관련된 문제는 다수 존재한다(Gabriel & Bernstein, 1997).

III. ETCS 요금 부과방안

1. 진입-진출(Entry-Exit)기반 요금부과 모형

고속도로나 도심지역은 대상으로 진입게이트를 통과한 후 진출게이트를 통행할 때까지 요금을 부과하는 방식으로 우리나라의 고속도로와 같이 요금표를 정해놓고 부과하는 방식이다. <그림1>과 같이 r의 진입 gate에서 s의 진출 gate까지 통행에 대한 경로파악이 되지 않고, 따라서 요금부과시 통행배정문제는 Non additive cost를 다루어야 하는 문제이다. 이에 대한 통행배정모형을 다음의 식(5)와 같이 구성할 수 있다.



<그림 2> 진입-진출(Entry-Exit)기반 통행료부과

$$\min Z(x,v) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \frac{1}{\beta} \sum_{r \in EN} \sum_{s \in EX} \sum_a \sum_{b \in \Gamma_a^+} T^{rs} \cdot v_{ab}^{rs} \cdot \delta_a \cdot \delta_b \quad (5)$$

s.t 식(3)의 제약조건과 동일

$$v_{ab}^{rs} = \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{a,k}^{rs} \cdot \delta_{b,k}^{rs}$$

EN : 진입 gate 집합

EX : 진출 gate 집합

	a	b	δ_a	δ_b
일반주행	○ → ○	○ → ○	0	1
진입	○ → r	○ → ○	0	0
주행	○ → ○	○ → ○	1	0
진출	○ → s	○ → ○	1	1

<그림 3> 인접링크에 따른 주행 및 요금부과구분

식(5)의 두번째 항을 링크 a에서 인접 링크 b로 전환시 Toll gate를 인식하기 위한 문제로서 δ_a, δ_b 의 두 변수를 활용하여 두 링크 사이에 Toll gate가 존재하는지를 파악하려는 것이다. <그림 3> δ_a 와 δ_b 는 두 링크 연계를 2가지 type 일반링크, 요금부과지역에 포함된 링크로 구분하면 다음과 같이 4가지 조합으로 나타난다. 따라서 4번째 진출시 δ_a 와 δ_b 가 각각 1의 값을 가질 때 두번째 항의 의미가 존재하여 경로선택에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

이에 대한 해법은 Frank-Wolfe 알고리즘을 변형하여 표현할 수 있다.

Step 0 : 초기화

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(0)$ 를 계산하고 모든 $r, s, a, b \in \Gamma_a^+$ 에 대하여 $\frac{1}{\beta} T^{rs} \cdot \delta_a \cdot \delta_b$ 를 계산하고 전량배정.

이 과정에서 $\{x_a^1, v_{ab}^{rs1}\}$ 를 얻고, $n=1$

Step 1 : 통행비용계산

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(x_a^n)$

모든 $r, s, a, b \in \Gamma_a^+$ 에 대하여

$$\frac{1}{\beta} T^{rs} \cdot v_{ab}^{rs} \cdot \delta_a \cdot \delta_b \text{를 계산}$$

Step 2 : 방향탐색

$\{t_a^n, \nu_{ab}^{rs^n}\}$ 을 기반으로 전량배정수행.
이 과정에서 통행량 보조변수집합을 $\{y_a^n, z_{ab}^{rs^n}\}$ 을 계산

Step 3 : 선형탐색

다음식을 해당되는 α_n 계산.

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(w)dw + \frac{1}{\beta} \sum_{r \in EV} \sum_{s \in ES} \sum_a \sum_{b \in \Gamma_a^r} T^{rs} \cdot [\nu_{ab}^{rs} + \alpha(z_{ab}^{rs^n} - \nu_{ab}^{rs^n})]$$

Step 4 : 이동

모든 a 에 대하여

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

모든 r, s, a, b 에 대하여

$$\nu_{ab}^{rs^{n+1}} = \nu_{ab}^{rs^{n+1}} + \alpha_n(z_{ab}^{rs^n} - \nu_{ab}^{rs^n})$$

Step 5 : 수렴체크

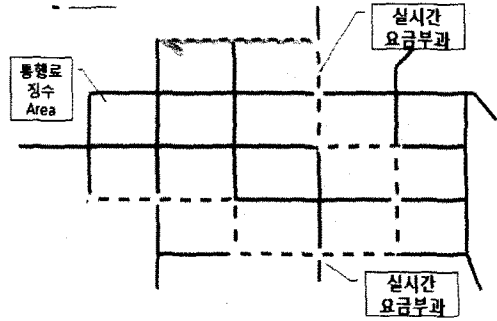
수렴조건에 맞으면 정지. 현 단계의 해 $\{x_a^{n+1}, \nu_{ab}^{rs^{n+1}}\}$ 가 요금부과시 균형 통행량. 그렇지 않으면 $n:=n+1$ 하고 step 1로 이동수렴조건에 맞으면 정지. 현단계의 해 $\{x_a^{n+1}\}$ 가 사용자 최적통행량. 그렇지 않으면 $n:=n+1$ 하고 step 1로 이동

변형된 F-W 알고리즘에서는 인접 링크를 동시에 고려하는 알고리즘을 활용해야 풀이가 가능하며 이 문제에 대해서는 Lee(2004)에 자세히 설명되어 있다.

2. 거리비례요금제와 교통망 균형

Area 내에서의 차량에 주행 동선을 확인할 수 있다면 주행한 거리만큼의 요금을 부과할 수 있다. 현재 위치추적장치(GPS)를 활용하면 차량의 실시간대별 위치추적이 가능하기 때문에 거리비례요금제를 Area-Wide ETCS에 도입하는 방안을 고려하는 것이 가능하다. 이러한 개념은 <그림 4>와 같이 표현하면 진입 gate r에서 진출 gate s까지 경로 k를 정해서 통해서 이동했다고 하고, 현재 서울시의 대중교통거리비례요금제와 같이 진입과 동시에 기본요금이 부과되고 기본구간이상의 이동거리에 대해서는

단위이동거리당 일정액수의 요금이 부과된다고 하면 식(6)과 같다.



<그림 4> 거리 비례제 통행료 부과

$$\min Z(x, \nu) = \sum_a \int_0^{x_a} T_{a(w)}dw + \frac{1}{\beta} \sum_{r \in EV} \sum_a \sum_{b \in \Gamma_a^r} T^{rb} \cdot \nu_{ab} \cdot \delta_a \cdot \delta_b \quad (6)$$

$$T^{rb} = \min\{T^{max}, T^{rb}, T^{ra} \oplus d_b\}$$

$$T^{ra} \oplus d_b = B \cdot (1 - \delta_b) + Y$$

$$Y = [M_{more}] \cdot [int](X)$$

$$X = \left(\frac{\max[D^{ra} \cdot \delta_a + d_b \cdot (1 - \delta_b) - D_{Basic}, 0]}{D_{more}} - \varepsilon \right) + 1$$

$T^{ra} \oplus d_b$: gate r에서 링크a를 거쳐 링크b의 도착지점까지 주행할 때 주행거리 요금계산

T^{max} : 최대 부과요금

T^{rb} : gate r에서 링크 b의 도착지점까지의 주행거리 요금

B : 기본요금

M_{more} : 단위 할증요금

$[int]$: 실수의 정수부분 (예, $[1.23] = 1$)

D^{ra} : gate r에서 링크 b의 도착지점까지 주행거리

d_b : 링크b의 거리

D_{Basic} : 기본요금 주행거리

D_{more} : 단위할증거리

ε : 아주 작은 실수 (예, 0.00001)

진입-진출기반 요금부과 균형배정모형식(5)이 T^{rs} 와 V_{ab}^{rs} 를 변수화 한 반면 거리비례요금부과 균형배정모형식은 T^{rb} 와 V_{ab}^{rb} 의 변수를 도입하여 진입게이트기반 변수로 대체된다는 것이다. 이는 차량이 진입게이트 r을 통과하는 순간부터 진출게이트를 나오는 주행거리만큼 요금을 부과해야 하기 때문에 모든 통행도로의 변경을 요금부과로 인식해야 한다는 의미를 포함하고 있다. 따라서 게이트 r에서 주행을 시작하여 게이트 r에 주행을 끝내는 경우는 링크b의 도착노드가 s가 되는 것을 의미하며 이때 $T^{rb}=T^{rs}$ 가 성립된다.

알고리즘에 대한 해법을 Frank-Wolfe 알고리즘을 변형하면 다음과 같다.

Step 0 : 초기화

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(0)$ 를 계산하고 모든 $r, a, b \in I_a^+$ 에 대하여 $\frac{1}{\beta} T^{rb} \cdot V_{ab}^r \cdot \delta_a \cdot \delta_b$ 를 계산하고 전량배정한다. 이 과정에서 $\{x_a^1, V_{ab}^{r1}\}$ 를 얻고, $n=1$

Step 1 : 통행비용계산

모든 a에 대하여 $t_a = t_a(x_a^n)$
 모든 $r, a, b \in I_a^+$ 에 대하여 $\frac{1}{\beta} T^{rb} \cdot V_{ab}^r \cdot \delta_a \cdot \delta_b$ 를 계산

Step 2 : 방향탐색

$\{t_a^n, V_{ab}^{rn}\}$ 을 기반으로 전량배정 수행.
 이 과정에서 통행량 보조변수집합을 $\{y_a^n, z_{ab}^{rn}\}$ 을 계산

Step 3 : 선형탐색

다음식을 해당되는 α 계산.

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(w) dw + \frac{1}{\beta} \sum_{r \in EV} \sum_a \sum_{b \in I_a^+} T^{rb} \cdot [V_{ab}^r + \alpha(z_{ab}^{rn} - \alpha(z_{ab}^{rn} - V_{ab}^r))]$$

Step 4 : 이동

모든 a에 대하여

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

 모든 r, a, b에 대하여

$$V_{ab}^{n+1} = V_{ab}^n + \alpha (Z_{ab}^{rn} - V_{ab}^n)$$

Step 5 : 수렴체크

수렴조건에 맞으면 정지.
 현 단계의 해 $\{x_a^{n+1}, V_{ab}^{n+1}\}$ 가 거리비례제 요금부과시 균형통행량. 그렇지 않으면 $n:=n+1$ 하고 step 1로 이동

3. 시간비례요금제와 교통망 균형

Area내에 차량이 주행하는 통행시간에 비례하여 요금을 부과하는 방안은 가변요금제(variable toll charge)와 같이 혼잡한 시간대에 통행시간을 유발하는 정도가 높은 시간대에 유용하게 활용가능하다. 시간요금비례제는 거리비례제의 주행거리를 시간개념으로 전환한 것으로 다음의 모형식(식7)으로 표현될 수 있다. 이 식은 최대 통행요금과 기본요금, 일정시간 이상의 할증요금, 단위 할증시간으로 구성되어 요금이 부과된다고 가정한 것이다. 여기서는 통행시간이 요금부과에 영향을 미치기 때문에 $\overline{T^{rb}}$ 는 통행량의 함수로서 계산된다는 것이 근본적으로 다른점이다.

$$\min Z(x, \nu) = \sum_a \int_0^{x_a} T_a(w) dw + \frac{1}{\beta} \sum_{r \in EV} \sum_a \sum_{b \in I_a^+} \overline{T^{rb}} \cdot V_{ab}^r \cdot \delta_a \cdot \delta_b \quad (7)$$

$$\overline{T^{rb}} = \min \{ \overline{T^{max}}, \overline{T^{rb}}, \overline{T^{ra}} \oplus t_b \}$$

$$\overline{T^{ra}} \oplus t_b = \overline{B} \cdot (1 - \delta_b) + Y$$

$$Y = [\overline{M_{more}}] \cdot [int](X)$$

$$X = \left(\frac{\max[\overline{D^{ra}} \cdot \delta_a + t_b \cdot (1 - \delta_b) - \overline{D^{Basic}}, 0]}{\overline{D_{more}}} - \epsilon \right) + 1$$

- $\overline{T^{ra}} \oplus t_b$: gate r에서 링크a를 거쳐 링크b의 도착지점까지 주행할 때 통행시간 비례 요금계산
- $\overline{T^{max}}$: 최대 통행시간요금
- $\overline{T^{rb}}$: gate r에서 링크 b의 도착지점까지의 통행시간요금
- \overline{B} : 통행시간 기본요금

- \overline{M}_{more} : 단위 할증시간요금
- $[int]$: 실수의 정수부분 (예, $[1.23] = 1$)
- \overline{D}^a : gate r에서 링크 b의 도착지점까지
주행시간
- t_b : 링크b의 주행시간
- \overline{D}_{Basic} : 기본요금 주행시간
- \overline{D}_{more} : 단위할증시간
- ε : 아주 작은 실수 (예, 0.00001)

알고리즘은 거리비례요금제의 알고리즘과 매우 유사하며, 차이점을 T^{rb} 가 \overline{T}^{rb} 로 전환된다는 것이다. 여기서 유의할 점은 \overline{T}^{rb} 는 궁극적으로 gate r에서 링크 b까지 경로의 통행시간의 함수로 처리되므로 경로를 구성하는 링크의 통행함수의 합임을 알 수 있다. 그러나 \overline{T}^{rb} 의 통행시간이 통행비용의 비선형적 증가를 포함하기 때문에 이는 비가산성 함수 요금구조의 한 예로 볼 수 있다(Gabriel & Bernstein, 1997).

VI. 결론 및 향후 연구과제

ETCS의 도입과 함께 나타나는 요금부과정책에 따른 교통망 균형문제는 비가산성 함수를 포함하는 것으로 지금까지 일반화된 해석은 존재하지 않았다. 본 연구에서는 ETCS를 추진할 시 진입-진출기반의 요금제도, 거리비례요금제도, 통행시간비례요금제도에서 교통망 평가기법으로 활용될 균형모형과 알고리즘을 제안하였다. 제안된 모형과 알고리즘은 ETCS의 확장에 따른 다양한 형태로 확장이 가능할 것으로 판단된다. 예를 들면, 혼잡통행료 산정문제와 동적 통행료 산정 및 교통망 균형문제 등에 해법으로 활용될 수 있다.

본 연구에서 제시한 식을 토대로 서울시를 포함하는 대규모 교통망에 대한 적용방안을 모색하고 있으며, EMM/2 등 기존의 통행배정 패키지를 대체할 수 있는 모형으로 발전되도록 연구가 진행되어야 할 필요가 있다.

또한 제시된 모형의 단일해 조건과 동등 조건의 만족여부에 대한 검증절차가 남아있다.

참고문헌

1. 민자고속도로와 효율적 연계 운영체계 구축을 위한 방안수립. 한국도로공사, 2002
2. 교통수요관리론, 황기연, 청문각, 2001
3. Beckmann M.J., McGuire C.B., and Winsten C. B. (1956) Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Conn.
4. Frank M. and Wolfe P. (1956) An Algorithm for Quadratic Programming, Naval Research Logistics Quarterly 3(1-2), pp. 95-110.
5. Gabriel S. and Bernstein D. (1997) The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Path Costs, Transportation Science. Vol. 20, No. 5, pp.337-348.
6. 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.
7. Lee M. (2004) Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
8. Meng Q., Lee, D.H., Cheu R.L., and Yang H. (2004) Logit-Based Stochastic User Equilibrium Problem for Entry-Exit Toll Schemes, Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 6
9. Sheffi Y. (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
10. Wardrop J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proc. Inst. Civ. Eng., PartII, 1, pp.325-378.
11. Yang Y., Zhang X., and Meng Q. (2004) Modeling Private Highways in Networks with Entry-Exit Based Toll Charges, Transportation Research B 38, pp 191-213