

비가산성 도로통행료 부과에 따른 균형통행배정모형

A Traffic Equilibrium Model with Non-Additive Road Toll

신성일

(서울시정개발연구원, 연구위원)

이창주

(서울대학교, 석사과정)

정점래

(경기대학교, 박사과정)

Key Words : 비가산경로비용, 지역기반 도로통행료, 교통망균형, 표식변수

목 차

I. 서론

II. 문제제기

III. 모형식과 알고리즘

IV. 사례연구

V. 결론

참고문헌

I. 서론

최근 수년 동안 수도권지역의 급속한 성장 및 신도시 개발 등으로 생활권이 확대됨으로 인해 서울을 기반으로 하는 출퇴근 교통량이 지속적으로 증가하고 있으나 기존 도심내의 신규 도로 건설을 위한 가용토지의 한계로 추가적인 도로용량확보가 어려운 것이 현실이다. 이로 인해 서울의 교통 혼잡은 시간과 장소에 상관없이 지속적으로 발생되고 있으며 이를 해결하기 위해 서울시에서는 교통수요관리의 일환으로 혼잡통행료 징수에 대한 정책을 면밀히 검토 중에 있다.

기존에 서울시에서는 남산 1·3호 터널을 중심으로 한 지점에서 요금을 부과하는 방식을 적용하여 도심으로 진입하는 교통량에 대한 통행료를 징수 중에 있다. 그러나 이러한 지점 요금부과방식에 의한 혼잡통행료 징수방식이 도심의 교통 혼잡을 완화하는 방법인지에 대한 효용성 논란은 끊임없이 발생되고 있다. 이에 따라 서울시에서는 혼잡지역 전체에 대한 혼잡 통행료를 지불하는 방식인 Area-wide 징수방식의 도입을 검토하고 있다.

최근 통신기술의 발달에 따라 특정 지역(Area)을 진출입하는 차량에 대한 추적이 가능해졌으며 이로 인해 혼잡지역 전체를 대상으로 하는 다양한 요금부과 정책을 적용할 수 있는 방안이 구비되었으며, 런던, 스톡홀름, 싱가포르 같은 도시에서는 이미 시행되고 있는 상황

이다.

Area-wide 통행료 부과에 따른 교통망 평가를 위해서 균형통행배정모형(Equilibrium Traffic Assignment Model)을 활용하는 경우, 남산 1·3호 터널에서 적용하던 기존의 지점 요금부과방식과는 차이가 발생한다. 지점 요금부과방식의 경우 기존의 교통망 균형 이론에서처럼 경로의 통행비용의 합은 경로를 구성하는 링크 통행비용의 합과 같다는 가정인 “가산 경로 비용(Additive Path Cost)”의 정의가 성립하나, 진입-진출기반 방식은 가산경로비용의 가정이 항상 성립하지 않는 “비가산 경로 비용(Non-additive Path Cost)”에 기반하고 있다(Gabriel & Bernstein, 1997).

이러한 Area-wide 통행료 부과에 따른 교통망 균형문제를 풀기위해서는 비가산 경로 비용을 가산 경로 비용으로 전환하는 방안에 대한 연구가 필요하다. Area-wide를 총괄하는 이론적인 접근은 아직 미미하나, 유사한 연구로서 Yang, et al.(2004)과 Meng, et al.(2004)은 진입gate와 진출gate로 요금을 부과하는 도로망 구조에 대한 교통망 균형문제를 제안했다. 이 두 연구는 비가산 경로함수를 가산 경로함수로 전환하기 위하여 고정된 요금table을 가정하여 네트워크의 변형을 통하여 추구하는 기법을 채택했으나 교통망에서 발생하는 거리비례요금, 통행시간비례요금과 같은 다양한 요금 부과정책을 평가하기에는 한계가 존재한다.

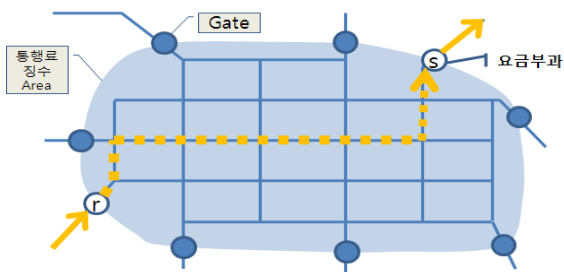
본 연구는 진입-진출기반의 통행료 부과방

법이 Area-wide로 적용되기 위한 일반화된 모형구조로 전환하기 위하여 교통망의 변형과 경로의 열거가 필요치 않는 일반화된 균형통행배정 방안을 제안하는 것을 목표로 하며, 기존에 시도되지 않았던 통행시간비례 요금의 부과에 대한 사례를 통하여 모형의 현실 반영에 대한 가능성을 타진한다.

II. 문제제기

진입-진출기반의 통행료부과 방식은 고속도로나 도심지역을 대상으로 진입게이트를 통과한 후 진출게이트를 통과할 때까지 요금을 부과하는 방식으로 우리나라의 고속도로와 같이 요금테이블을 정해놓고 통행료를 부과하는 방식이다.

이러한 식의 통행료 부과방식은 <그림 1>과 같이 r의 진입 gate에서 s의 진출 gate까지 통행에 대한 경로과약이 되지 않기 때문에 통행료 부과 시 비가산 경로 비용(Non-additive Path Cost)에 대한 통행배정문제를 다루어야만 한다.



<그림 1> 진입-진출(Entry-Exit)기반 통행료부과

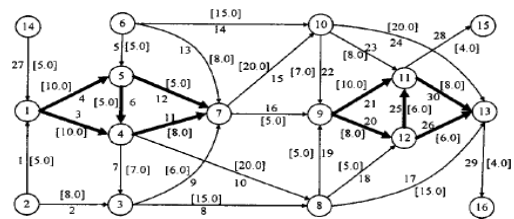
진입-진출기반 통행료 부과에 대한 통행배정모형은 Yang, et al.(2004)과 Meng, et al.(2004)에 의해서 연구되었으며, 이들은 각각 확정적 균형배정모형과 로짓 기반의 확률적 균형배정모형으로 진입-진출기반 통행료 부과 교통망 문제를 풀었다.

Yang, et al.(2004)은 진출 램프구간에서 통행요금을 반영하기 위하여 진입과 진출을 연결하는 가상의 요금 망을 연결한 교통망의 변형을 통하여 문제를 처리하였으며, Meng, et al.(2004)은 각 진출지점에서 차량의 이탈을 확인하기 위하여 가상의 연결링크를 확대하여 처

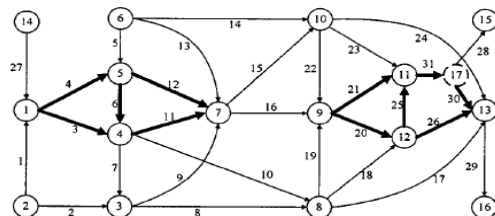
리하는 방법을 사용하였으나, 이러한 가상의 연결링크를 확대하는 방법은 Yang, et al.(2004)이 제안한 방법보다는 효율적일지 모르나, 교통망에 대한 변형이 수반되어야 하는 문제가 있다.

Yang, et al.(2004)과 Meng, et al.(2004)이 제안한 진입-진출기반의 통행료부과 모형은 일반화된 방법이라기보다는 네트워크 변형을 통해 단편적으로 비가산 경로 비용(Non-additive Path Cost)문제를 가산 경로 비용(Additive Path Cost) 문제로 전환하여 진입-진출 교통망에 적용한 한정된 방법이다. 즉 출발지와 도착지 쌍을 네트워크의 변형을 통해 연결시키는 방법으로서, 이러한 접근방법은 소규모의 네트워크에서는 쉽게 적용할 수 있을지 모르나, 실제 교통망과 같이 복잡하고 규모가 큰 네트워크에서는 네트워크의 변형 또한 복잡하게 발생하므로 실제로 적용하기가 어려울 뿐만 아니라, 차량의 경로 궤적을 무시하고, 요금이 고정되어 있어 교통변화에 따른 다양한 요금 반영이 어려우며, 교통망의 정산이 매우 까다로운 문제가 있다.

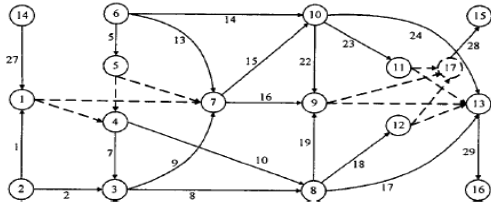
따라서 대규모 교통망에 적용할 수 있는 보다 효과적이고 일반화된 모형 구축 및 적용 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.



<그림 2> 진입-진출 네트워크



<그림 3> 가상의 연결진출구(17)와 링크(31)가 확장된 네트워크



<그림 4> <그림 3>의 네트워크 재설계

III. 모형식과 알고리즘

1. 모형식

남산 1·3호 터널과 같이 지점(point)에서 요금을 부과했을 경우에 균형통행배정모형을 다음과 같이 식(1)로 구축할 수 있다(황기연, 2001).

$$\begin{aligned} \text{Min } Z(x) &= \sum_a \int_0^{x_a} [t_a(w) + \frac{1}{\beta} T_a] dw \quad (1) \\ \text{s.t. } q_{rs} &= \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s \\ f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall k, r, s \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a \end{aligned}$$

여기서,

T_a : 링크 a의 Toll 요금

β : 시간가치(원/분)를 나타내는 파라메타

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 침자가 링크 a로 표현이 가능하며, 이와 같이 링크의 비용의 합이 정확하게 경로의 비용으로 표현되는 경우를 가산경로비용(Additive path cost)이라고 한다.

이와 반대로 가산링크비용으로 표현되지 않는 비용을 비가산비용(Non-Additive Cost)이라고 하며 대표적인 경우가 고속도로에서 운영 중인 비선형 구조의 요금 table과 과거 구역제 등의 철도요금 구조로서 관찰될 수 있으며, 이외에 비가산비용에 관련된 문제는 다수 존재한다(Gabriel & Bernstein, 1997).

본 연구에서 적용하고자 하는 진입-진출기

반의 통행료부과 모형도 일종의 비가산비용과 관련한 문제이다.

본 연구에서는 진입-진출기반의 교통망 문제를 풀기위해 기존에 사용되던 네트워크의 변형을 통해 비가산 경로 비용문제를 가산 경로 비용문제로 푸는 것이 아니라, 기존의 균형통행배정 모형식을 그대로 활용하여 문제를 풀고자 한다.

즉, 본 연구에서 제안하고자 하는 진입-진출기반의 교통망 문제는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z(x, v) &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \\ &\frac{1}{\beta} \sum_r \sum_s \sum_a \sum_b T^{rs} \cdot v_{ab}^{rs} \quad (2) \\ \text{s.t. } q_{rs} &= \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s \\ f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall k, r, s \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a \end{aligned}$$

여기서,

x_a : 링크 a의 교통량

δ_{ak}^{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 k번째 경로 상에 링크 a가 존재하면 1, 그렇지 않으면 0

f_{ak}^{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 k번째 경로 상에 통행량

q_{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 통행수요

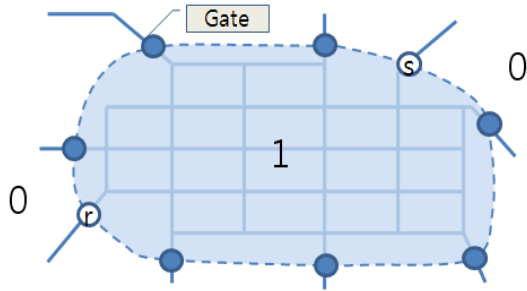
$v_{ab}^{rs} = \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{ka}^{rs} \cdot \delta_{kb}^{rs} \cdot \delta_a \cdot (1 - \delta_b)$:

진입 gate \bar{r} (출발지 r)에서 진출 gate \bar{s} (\bar{r} 를 지나서 진출)까지 도달한 교통량

δ_a, δ_b : Toll 지역 식별을 위한 표식변수

식(2)의 첫 번째 항은 각 링크의 통행시간의 합인 기존의 균형통행배정모형식과 동일하며, 두 번째 항은 진입 gate \bar{r} (출발지 r에서 접근)에서 진출 gate \bar{s} (\bar{r} 를 지나서 진출)까지 도달한 교통량 v_{ab}^{rs} 가 통과할 때 지불하는 통행료를 통행시간으로 전환한 것이다. 여기서 δ_a 와 δ_b 는 0과 1을 갖는 표식변수로서 Area가 통행요

금지역에 포함되는지 여부를 결정하는 것이다. 여기서 <그림 5>와 같이 δ_a 과 δ_b 가 통행요금 지역에 포함되면 각각 1이고 그렇지 않으면 0이 되므로 $\delta_a \cdot (1 - \delta_b)$ 는 진출 지점에서의 두 인접링크(δ_a 는 1고 δ_b 는 0이므로)에서만 1이 된다. 따라서 두 번째 항이 진출 지점에서만 존재하는 문제로 기존의 비가산 경로 비용 (Non-additive Path Cost)문제를 가산경로비용 (Additive Path Cost)의 문제로 전환되므로 일반적인 균형통행배정모형의 알고리즘을 통해 해를 구할 수 있게 된다. 이러한 형태로 모형을 구축할 경우 Yang, et al.(2004)과 Meng, et al.(2004)이 제안한 방법과 같은 교통망의 변형 없이도 교통망 문제를 풀 수 있게 되므로, 대규모 네트워크에서 손쉽게 적용이 가능해진다.



<그림 5> 통행요금지역과 표시변수

	a	b	δ_a	δ_b	$\delta_a \cdot (1 - \delta_b)$
일반주행	● → ● → ●	● → ● → ●	0	0	0*1=0
진입	● → ● → ●	● → ● → ●	0	1	0*0=0
주행	● → ● → ●	● → ● → ●	1	1	1*0=0
진출	● → ● → ●	● → ● → ●	1	0	1*1=1

<그림 6> 인접링크에 따른 주행 및 요금부과구분

2. 동등성(Equivalency) 및 유일성(Uniqueness) 조건

식(1) 및 식(2)를 보면 진입-진출기반의 통행료부과 모형의 경우, 기중점(r, s)간 경로선택조건은 통행시간과 함께 통행료 T^{rs} 을 시간으로 전환한 수치로 반영할 수 있다. 위의 식(1)을 기반으로 진입-진출기반 수식을 표현하

면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$c_k^{rs} = \eta_k^{rs} + \frac{1}{\beta} T^{rs} \quad (3)$$

$$c_k^{rs} - u_{rs} = 0, \quad \text{if } f_k^{rs*} > 0 \quad \forall r, s, k \quad (4a)$$

$$c_k^{rs} - u_{rs} \geq 0, \quad \text{if } f_k^{rs*} = 0 \quad \forall r, s, k \quad (4b)$$

$$(c_k^{rs} - u_{rs}) \cdot f_k^{rs*} = 0 \quad (4c)$$

여기서,

u_{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 최소 일반화비용

η_k^{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 k번째 경로로 최소통행시간

c_k^{rs} : 출발지r에서 도착지s 간의 k번째 일반화비용

앞서 제안한 식(2)가 식(3)과 같은 동등성 조건이 만족하는지 여부를 살펴보기 위해 식(2)의 두 번째 항을 1차 편미분하면 다음과 같다.

$$Z_1(\mathbb{V}(f)) = \sum_{\bar{r}} \sum_{\bar{s}} \sum_a \sum_b \int_0^{v_{ab}^{\bar{r}\bar{s}}} T^{\bar{r}\bar{s}}(w) dw \quad (5)$$

$$= \sum_{\bar{r}} \sum_{\bar{s}} \sum_a \sum_b T^{\bar{r}\bar{s}} \cdot v_{ab}^{\bar{r}\bar{s}}$$

$$\frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} = \sum_{\bar{m}} \sum_{\bar{n}} \sum_c \sum_d \frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} \quad \forall \bar{m}, \bar{n}, \ell \quad (6a)$$

$$\frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} = \sum_{\bar{m}} \sum_{\bar{n}} \sum_c \sum_d \frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial v_{cd}^{\bar{m}\bar{n}}} \cdot \frac{\partial v_{cd}^{\bar{m}\bar{n}}}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} \quad \forall \bar{m}, \bar{n}, \ell \quad (6b)$$

$$\frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial v_{cd}^{\bar{m}\bar{n}}} = T^{\bar{m}\bar{n}} \quad \forall \bar{m}, \bar{n} \quad (6c)$$

$$\frac{\partial v_{cd}^{\bar{m}\bar{n}}}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} = \begin{cases} \delta_{\ell,c}^{\bar{m}\bar{n}} \cdot \delta_{\ell,d}^{\bar{m}\bar{n}} \cdot \delta_a(1 - \delta_b) = 1 & \text{if } \bar{r} = \bar{m}, \bar{s} = \bar{n}, k = \ell \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6d)$$

$$\frac{\partial Z_1(\mathbb{V}(f))}{\partial f_{\ell}^{\bar{m}\bar{n}}} = T^{\bar{m}\bar{n}} \cdot \delta_{\ell,c}^{\bar{m}\bar{n}} \cdot \delta_{\ell,d}^{\bar{m}\bar{n}} \cdot \delta_a(1 - \delta_b) = T^{\bar{m}\bar{n}} \quad (6e)$$

결과적으로 식(2)의 1차 필요조건은 식(7)과 같으며, 이는 다음과 같이 동등조건을 만족함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_k^{rs} + \frac{1}{\beta} T^{\overline{rs}} - u_{rs} &= 0, & \text{if } f_k^{rs} > 0 & \quad \forall r,s,k \\ \eta_k^{rs} + \frac{1}{\beta} T^{\overline{rs}} - u_{rs} &\geq 0, & \text{if } f_k^{rs} = 0 & \quad \forall r,s,k \\ \left(\eta_k^{rs} + \frac{1}{\beta} T^{\overline{rs}} - u_{rs} \right) \cdot f_k^{rs} &= 0 & \quad \forall r,s,k \\ f_k^{rs} &\geq 0, & \quad \forall r,s,k \end{aligned} \quad (7)$$

식(2)의 유일성 조건 여부를 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z(x,v) &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \\ &\frac{1}{\beta} \sum_r \sum_s \sum_a \sum_b \int_0^{v_{ab}^{\overline{rs}}} T^{\overline{rs}} dw \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 첫 번째 항은 유일해 조건을 만족하며, 두 번째 항에 대한 유일해 조건을 살펴보기 위해 두 번째 항을 1차 편미분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Z(x,v)}{\partial v_{cd}^{\overline{mn}}} = \frac{1}{\beta} T^{\overline{mn}}$$

이를 2차 편미분하면, 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 Z(x,v)}{\partial v_{ab} \partial v_{cd}} = 0$$

목적함수에서 통행료와 관련된 두 번째 항이 선형이기 때문에 진입-진출 교통류가 유일성 조건을 만족하지 못하고, 다수의 해가 존재하게 된다. 그럼에도 불구하고, 전체문제는 strictly convex하기 때문에 경로통행량은 유일해가 존재하게 된다. 이는 Yang, et al.(2004)과 Meng, et al.(2004)의 연구에서도 같은 결과를 볼 수 있다.

3. 알고리즘

본 연구에서 제안된 문제를 풀기위해, 기존의 Frank-Wolfe 알고리즘을 변형하여 이용하였다.

변형된 Frank-Wolfe 알고리즘은 방향 탐색과 선형탐색의 2단계로 크게 구성할 수 있으며, 이는 아래의 선형 프로그래밍 문제를 풀어 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z^{(n)}(y) &= \sum_r \sum_s \sum_k [c_k^{rs(n)} + T^{\overline{rs}}] \cdot y_k^{rs} \\ \text{s.t. } y_k^{rs} &\geq 0 & \quad \forall k,r,s \end{aligned} \quad (9)$$

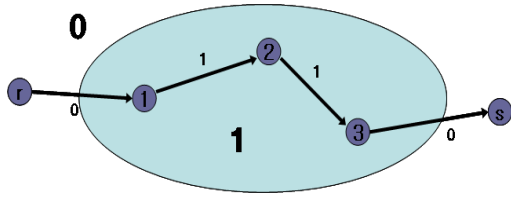
이때, 선형 프로그래밍 문제를 풀기위해 링크통행량 x_a 와 진입-진출 통행량 $v_{ab}^{\overline{rs}}$ 의 값을 계산하여야 하는데, 이러한 통행량은 Frank-Wolfe 알고리즘에서 선형탐색을 위해 순수하게 사용되는 보조변수집합 y_a^n 과 $z_{ab}^{\overline{rs}}$ 를 전량배정수행을 통해 계산하게 되면, 식(10)에 의해 계산할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_a \int_0^{x_a + \alpha(y_a - x_a)} t_a(w) dw + \\ & \frac{1}{\beta} \sum_r \sum_s \sum_a \sum_b T^{\overline{rs}} \delta_a (1 - \delta_b) \delta_{ak}^{rs} \delta_{bk}^{rs} (v_{ab}^{\overline{rs}} + \alpha(z_{ab}^{\overline{rs}} - v_{ab}^{\overline{rs}})) \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 $z_{ab}^{\overline{rs}}$ 는 Toll gate를 진출할 때 교통량으로 배정되는가를 경로탐색 알고리즘으로 판단하는 것이 필요하다.

$z_{ab}^{\overline{rs}}$ 는 $\sum_k g_k^{rs} \delta_a (1 - \delta_b) \delta_{ak}^{rs} \delta_{bk}^{rs}$ 이므로 $\delta_a (1 - \delta_b) \delta_{ak}^{rs} \delta_{bk}^{rs}$ 가 링크 a에서 진출하여 링크 b로 주행하는 경우에 1이 되도록 경로탐색 알고리즘에 반영되어야 한다. <표 1>의 탐색과정과 같이 링크 ②→③에서 링크③→s로 전환되는 지점에서 $\delta_a (1 - \delta_b) \delta_{ak}^{rs} \delta_{bk}^{rs}$ 가 1이 되고 나머지는 0이 됨을 알 수 있다.

이를 <그림 7>과 같은 통행료를 징수하는 지역에서의 간단한 진입-진출 네트워크에 적용하여 풀어보면 <표 1>과 같이 진입-진출 통행량 $v_{ab}^{\overline{rs}}$ 을 산출할 수 있게 된다. 이때 총통행량은 100대라고 가정한다.



<그림 7> 진입-진출 네트워크

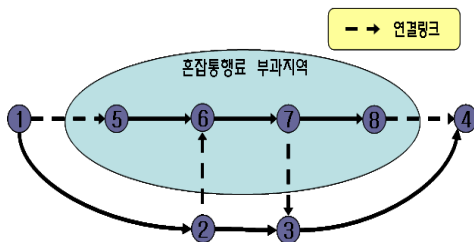
<표 1> 진입-진출 네트워크의 진입-진출 통행량 산출 결과

출발 링크	도착 링크	Cost	지원 링크	$\delta_a(1-\delta_b)$	δ_a	δ_b	δ_{ak}^{rs}	δ_{bk}^{rs}	g_k^{rs}	v_{ab}^{rs}
-	$r \rightarrow ①$	0	-	0	0	0	1	1	100	0
$r \rightarrow ①$	$① \rightarrow ②$	1	$r \rightarrow ①$	0	0	1	1	1	100	0
$① \rightarrow ②$	$② \rightarrow ③$	2	$① \rightarrow ②$	0	1	1	1	1	100	0
$② \rightarrow ③$	$③ \rightarrow s$	2	$② \rightarrow ③$	1	1	0	1	1	100	100

IV. 사례연구

사례연구에서 적용된 <그림 8>의 교통망은 Yang, et al.(2004)이 적용했던 교통망과 유사하며, 8개 노드와 10개 링크로 구성되어 있고 각각의 링크는 일반링크, 램프, 혼잡요금 부과되는 도로로 구분되었다. 각 링크의 속성은 <표 2>에서와 같다. 교통망에서 적용된 수요는 <표 3>과 같다.

링크에 적용된 통행함수는 BPR식을 적용하였으며, 통행시간은 분단위로 계산되었다.



<그림 8> 사례연구 적용 교통망

<표 2> 링크/노드 속성

링크	거리 (km)	도로타입	용량 (veh/hr)	자유속도 (km/h)
①→②	30	일반도로	2000	40
①→⑤	0.5	램프	500	30
②→③	90	일반도로	2000	40
③→⑥	0.5	램프	500	30
③→④	30	일반도로	2000	40
⑤→⑥	20	Toll 부과	4000	80
⑥→⑦	20	Toll 부과	4000	80
⑦→③	0.5	램프	500	40
⑦→⑧	20	Toll 부과	4000	80
⑧→④	0.5	램프	500	40

<표 3> 적용 수요

출발	도착	통행량(veh/hr)
①	④	10000
②	④	1000
②	③	1000

사례연구는 크게 2가지로 T^{rs} 의 요금 테이블이 고정되어 있을 때와 T^{rs} 가 최소시간 통행경로의 혼잡시간에 따른 비례요금이 적용되었을 경우이다.

<표 4> 고정요금(T^{rs}) 테이블

출발	도착	요금(원)	비교(β)
⑤	⑦	200	1
⑤	⑧	300	1
⑥	⑦	100	1
⑥	⑧	100	1

사례연구 1의 결과로서 먼저 <표 4>와 같이 요금이 고정되었을 경우의 결과는 <표 5>와 같이 일반화시간비용이 동일하며, 진입-진출 통행료가 부과됨에 따라 기중점간 통행의 균형이 만족하는 것으로 확인되었다.

<표 5> 고정 요금테이블 (T^{rs}) 결과

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	1905.87	0	4392.29
		1->5->6->7->8->4	1905.87	300	3482.28
		1->2->6->7->3->4	1905.87	100	1198.07
		1->5->6->7->3->4	1905.87	200	701.35
		1->2->6->7->8->4	1905.87	100	226.02
②	④	2->6->7->8->4	1277.89	100	872.99
		2->6->7->3->4	1277.89	100	119.81
		2->3->4	1277.89	0	7.21
②	③	2->6->7->3	612.16	100	982.03
		2->3	612.16	0	17.97

T^{rs} 가 <표 6>과 같이 통행시간 비례에 따른 기본요금, 추가요금으로 부과되는 혼잡통행료가 부과되었을 경우의 결과에 대해서는 <표 7>과 같고 <표 7>은 기종점간의 혼잡통행료를 고려하여 경로 간 일반화시간비용이 동일하도록 경로에 배정되었음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 가정하고 있는 모형과 알고리즘이 적절한 결과를 도출한 것으로 검증된다.

<표 6> T^{rs} 의 통행시간비례 요금적용

출발	도착	통행시간비례요금경로	요금액수결정
⑤	⑦	5->6->7	기본요금시간: 10분 기본요금: 100원
⑤	⑧	5->6->7->8	
⑥	⑦	6->7	추가요금시간: 10분
⑥	⑧	6->7->8	추가요금: 100원

<표 7> 통행시간 비례요금 징수 시 결과

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	2239.30	0	4097.53
		1->5->6->7->8->4	2239.30	800	4038.94
		1->2->6->7->3->4	2239.30	400	1813.97
		1->5->6->7->3->4	2239.30	600	49.56
②	④	2->3->4	1544.21	0	409.75
		2->6->7->8->4	1544.21	600	403.89
		2->6->7->3->4	1544.21	400	186.35
②	③	2->3	719.29	0	409.75
		2->6->7->3	719.29	400	590.25

일반적으로 최대요금은 비가산성 경로요금으로 분류된다. 최대요금을 부과하는 경우에 대한 모형의 정확성을 파악하기 위하여 T^{rs} 가 <표 8>과 같이 통행시간비례요금 부과에 따른 기본요금, 추가요금과 함께 최대부과요금을 550원으로 한정하는 경우에 대하여 수행하였으며, 결과는 <표 9>와 같다. ①-④의 결과에 대하여 <표 7>과 <표 9>에 대하여 비교하게 되면 최대요금을 초과하여 800원이 부과되는 경로 (1->5->6->7->8->4)는 최대요금이 550원으로 부과되면서 일반화비용이 낮아지면서 통행이 몰리는 현상이 발생하였다. 이러한 효과로 인해 기존에 이용되던 경로 (1->5->6->7->3->4)는 이용되지 않게 되었다.

<표 8> T^{rs} 의 최대요금적용

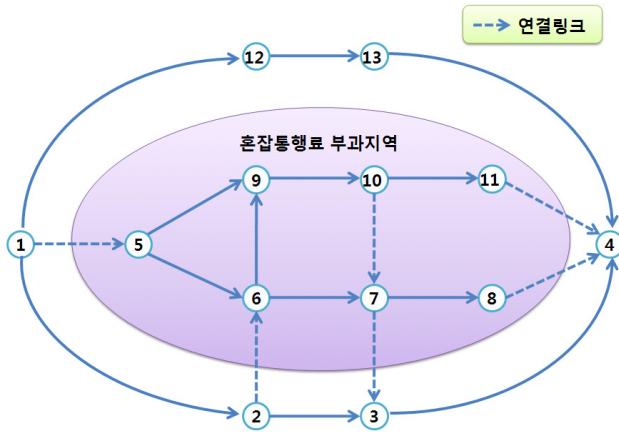
출발	도착	통행시간비례요금경로	요금액수결정
⑤	⑦	5->6->7	기본요금시간: 10분 기본요금: 100원 추가요금시간: 10분 추가요금: 100원
⑤	⑧	5->6->7->8	
⑥	⑦	6->7	최대요금: 550원
⑥	⑧	6->7->8	

<표 9> 최대요금적용

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	2152.36	0	4055.10
		1->5->6->7->8->4	2152.36	550	4149.71
		1->2->6->7->3->4	2152.36	300	2152.36
②	④	2->3->4	1476.81	0	405.51
		2->6->7->8->4	1476.81	550	414.97
		2->6->7->3->4	1476.81	400	179.52
②	③	2->3	708.27	0	405.51
		2->6->7->3	708.27	400	594.49

2. 확장 교통망

앞의 사례연구에서 적용했던 기본 교통망을 <그림 9>과 같이 노드 13개, 링크 19개의 교통망으로 확장하여 두 번째 사례 연구를 실시하도록 한다.



<그림 9> 사례연구 적용 확장 교통망

확장된 교통망의 링크/노드 속성은 <표 10>과 같으며 적용된 수요와 통행함수식은 기본 교통망의 사례연구에서와 같다.

<표 10> 링크/노드 속성

링크	거리 (km)	도로타입	용량 (veh/hr)	자유속도 (km/h)
①→②	일반도로	30	2000	40
①→⑤	램프	0.5	500	30
①→⑫	일반도로	30	2000	40
②→③	일반도로	90	2000	40
②→⑥	램프	0.5	500	30
③→④	일반도로	30	2000	40
⑤→⑥	Toll 부과	20	4000	80
⑤→⑨	Toll 부과	20	4000	80
⑥→⑦	Toll 부과	20	4000	80
⑥→⑨	Toll 부과	20	4000	80
⑦→③	램프	0.5	500	40
⑦→⑧	Toll 부과	20	4000	80
⑧→④	램프	0.5	500	40
⑨→⑩	Toll 부과	20	4000	80
⑩→⑦	Toll 부과	20	4000	80
⑩→⑪	Toll 부과	20	4000	80
⑪→④	램프	0.5	500	40
⑫→⑬	일반도로	90	2000	40
⑬→④	일반도로	30	2000	40

확장된 교통망에서의 사례연구는 $T^{r,s}$ 가 다음과 같은 세 가지 경우로 구분하여 실시하도록 한다.

<표 11> 확장된 교통망에서의 사례연구

구분	요금액수결정
시나리오 1	기본요금시간: 10분 기본요금: 100원 추가요금시간: 10분 추가요금: 50원 최대요금: 300원
시나리오 2	기본요금시간: 10분 기본요금: 100원 추가요금시간: 10분 추가요금: 150원 최대요금: 550원
시나리오 3	기본요금시간: 10분 기본요금: 100원 추가요금시간: 10분 추가요금: 150원 최대요금: 1000원

확장된 교통망에서의 각 시나리오는 기본요금과 기본요금시간 그리고 추가요금시간은 동일하지만 추가요금과 최대요금이 각각 다르다.

<표 12>는 시나리오 1의 결과를 나타내며, 최대요금이 적고 추가요금이 적음으로써 다양한 경로가 이용됨을 알 수 있다.

시나리오 2는 최대요금과 추가요금이 각각 150원과 550원으로 동시에 증가했을 때의 경우를 나타내며 이는 <표 13>과 같다.

또한 <표 14>는 시나리오 2 중 최대요금이 1000원으로 증가했을 때의 경로 선택을 나타낸다. 결과에서 보듯이 지불요금이 700원을 넘지 않는 것으로 나타나며 이는 확장된 교통망에서 어떤 경로를 이용해도 최대요금이 1000원을 넘지 않음을 의미한다.

<표 12> 시나리오 1 결과

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	514.40	0	2734.44
		1->12->13->4	514.40	0	3422.45
		1->5->9->10->11->4	514.40	300	2355.12
		1->2->6->7->3->4	514.40	300	382.13
		1->2->6->7->8->4	514.40	250	642.47
		1->5->6->7->8->4	514.40	300	463.39
②	④	2->3->4	376.38	0	257.34
		2->6->7->8->4	376.38	250	605.36
		2->6->7->3->4	376.38	300	137.30
②	③	2->3	267.25	0	257.34
		2->6->7->3	267.25	300	742.66

<표 13> 시나리오 2 결과

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	754.52	0	3474.65
		1->12->13->4	754.52	0	4027.95
		1->5->9->10->11->4	754.52	550	2497.40
②	④	2->3->4	409.39	0	341.25
		2->6->7->8->4	409.39	550	652.54
		2->6->7->3->4	409.39	550	6.22
②	③	2->3	274.36	0	341.25
		2->6->7->3	274.36	550	658.75

<표 14> 시나리오 3 결과

출발	도착	경로	일반화 통행시간 (분)	지불 요금 (원)	경로 통행량 (대)
①	④	1->2->3->4	786.48	0	3567.62
		1->12->13->4	786.48	0	4202.54
		1->5->9->10->11->4	786.48	700	2229.84
②	④	2->3->4	418.72	0	356.76
		2->6->7->8->4	418.72	550	643.24
②	③	2->3	273.66	0	356.76
		2->6->7->3	273.66	700	643.24

V. 결론

본 연구는 Area-wide 혼잡통행료 부과 시 나타나는 경로의 비가산성 경로함수를 포함하는 균형통행배정 모형에 대한 진입-진출기반 통행료 부과 문제의 수식과 알고리즘을 제안하

였다. 제안된 기법은 네트워크 변형이 필요치 않은 일반화된 방법이며 차량이 통행한 시간에 비례하여 혼잡통행료를 부과하는 방안으로 적용이 확대될 수 있다.

사례연구를 통하여 모형의 가정과 알고리즘이 진입-진출의 통행요금이 결정된 지역뿐 만 아니라 통행시간비례 혼잡통행료와 같이 주행하면서 요금이 계산되는 경우에 균형배정모형 원리를 만족함을 검증하였다. 향후 이를 기반으로 대규모 네트워크상에서의 사례연구가 필요하며, 이와 함께 최대요금 적용과 같은 비가산성 요금부과에 따른 다양한 요금정책에도 적용이 가능한 것으로 파악된다.

본 연구는 최근 세계적으로 이슈화되고 있는 혼잡통행료 부과에 대한 다양한 시나리오 구축 및 평가에 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 한국도로공사(2002) 민자고속도로와 효율적 연계 운영체계 구축을 위한 방안수립.
- 황기연(2001) 교통수요관리론, 청문각.
- Beckmann M.J., McGuire C.B., and Winsten C. B. (1956) Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Conn.
- Frank M. and Wolfe P. (1956) An Algorithm for Quadratic Programming, Naval Research Logistics Quarterly 3(1-2), pp. 95-110.
- Gabriel S. and Bernstein D. (1997) The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Path Costs, Transportation Science, Vol. 20, No. 5, pp.337-348.
- 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.
- Lee M. (2004) Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- 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
- Sheffi Y. (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical

Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Wardrop J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proc. Inst. Civ. Eng., PartII, 1, pp.325-378.

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