

■ 論 文 ■

구역혼잡통행료와 진입통행료의 비교

Comparison of Area Pricing and Cordon Pricing in General Equilibrium Models

유 상 균

(대전대학교 도시공학과 교수)

정 창 무

(서울대학교 건설환경공학부 교수)

이 혁 주

(서울산업대학교 행정학과 교수)

목 차

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. 모형 <ul style="list-style-type: none"> 1. 기본형태 2. 생산부문 3. 소비부문 4. 교통부문 5. 혼잡통행료 6. 일반균형 7. 사회적 효용 8. 모수의 선정 | <ul style="list-style-type: none"> III. 최적 부과경계 및 요금 선정 <ul style="list-style-type: none"> 1. 부과경계 및 요금별 사회적 효용 2. 도시별 사회적 효용 IV. 도시환경의 변화 <ul style="list-style-type: none"> 1. 인구 변화 2. 임대료 변화 3. 교통환경 변화 V. 연구요약 및 향후과제 참고문헌 |
|--|--|

Key Words : 혼잡통행료, 구역혼잡통행료, 진입통행료, 사회적 효용, 일반균형
 Congestion Toll, Area Pricing, Cordon Pricing, Social welfare, General Equilibrium

요 약

본 연구는 구역혼잡통행료(Area pricing)와 진입통행료(Cordon pricing)의 최적 부과경계와 요금수준을 탐색하고 이들 두 방식이 차선정책수단으로서 최선의 정책수단인 이론적 혼잡통행료에 비해 교통혼잡의 완화와 후생상 어떤 차별적 효과가 있는지를 보여준다. 본 연구는 장기적으로 혼잡통행료가 생산 및 소비시장과 토지시장의 균형을 변화시킴에 따라 이들을 고려하기 위해 일반균형조건 아래 단핵도시에서 징수방식들을 비교하고 있다. 연구결과 구역혼잡통행료와 진입통행료의 최적 부과경계는 도시반경이 22km인 경우 도시 중심으로부터 3km 떨어진 구역경계에 동일하게 위치하며 최적 부과경계 아래 최적 요금은 구역혼잡통행료가 진입통행료에 비하여 약간 높은 것으로 분석되었다. 이론적 혼잡통행료에 가장 근접한 사회적 효용 개선효과를 발생시키는 징수방식은 구역혼잡통행료이며 진입통행료가 구역혼잡통행료 보다 낮은 개선효과를 발생시키는 것으로 평가되었다. 교통환경 개선효과 역시 사회적 효용개선효과와 동일하게 통행속도와 일일 평균통행시간에서 구역혼잡통행료가 진입통행료에 비하여 높은 개선효과를 가져오는 것으로 나타났다.

This paper compares the relative performances of area and cordon tolls as opposed to the first-best congestion tolls with respect to alleviation of traffic congestion and social welfare. The comparison is done in the monocentric city where all the jobs are located at the city center. The study shows that the size of charging zones is similar in the two second-bests, but that the optimal toll level is higher in area pricing than in cordon pricing. Area pricing schemes turn out to perform better than cordon pricing schemes as measured by average speeds and daily average travel time. Accordingly, the former is shown to increase the social welfare more than the latter. In the case of the cordon tolls, the residents at the charging zones are exempted from the tolls. In this way, cordon tolls invite people into the most congested areas over the optimal level while partially negating the whole spirit of the congestion tolls.

1. 서론

혼잡통행료(Congestion pricing)는 통행과 직접 연계되어 통행세가 부과되기 때문에 도시의 교통혼잡을 억제하는 효과적인 수단으로 평가되어왔다(Maruyama and Sumalee, 2007; 655). Pigou와 Knight의 연구로부터 유래된 혼잡통행료의 경제학적 이론에 따르면 차량 진입으로 증가된 사회적 한계비용에서 개인의 사적비용을 차감한 비용을 혼잡통행료로 산정하고 있다. 이렇게 이론적으로 결정된 혼잡통행료를 경제학자들은 피구세(Pigouvian Toll 또는 Pigouvian Tax)라고 부르며 선행연구들은 이를 최선의 혼잡통행료(First-Best pricing)로 칭하고 있다. 이와 같은 이론적 혼잡통행료 징수방식은 개별 통행자의 통행정보와 혼잡구역의 혼잡도를 정확히 측정하여 통행자에게 상이한 혼잡통행료를 청구해야 하기 때문에 실제로 적용하기가 쉽지 않은 이상적인 징수방식이다. 실제 혼잡한 도시에서 채택되고 있는 적용가능한 혼잡통행료(Feasible congestion pricing)는 교통축을 기준으로 하는 방식(Corridor 방식), 일정한 혼잡구역 인근에 부과경계(Cordon)를 설치하고 부과경계 내부구역을 통행하는 차량에 혼잡세를 부과하는 구역혼잡통행료 방식(Area pricing), 그리고 부과경계를 통과하는 차량에 혼잡세를 부과하는 진입통행료 방식(Cordon pricing)으로 구분된다. Corridor 징수방식의 대표적 사례도시는 미국 샌디에이고 HOT Lane, 오렌지카운티 SR91, 남산 1,3호 터널 등이며, 구역혼잡통행료는 영국 런던, 진입통행료는 싱가포르와 노르웨이의 베르겐(Bergen), 오슬로(Oslo), 트론헤임(Trondheim) 등에서 각각 시행되고 있다. 특히 구역혼잡통행료의 대표 사례도시인 런던과 진입통행료의 대표 사례도시인 싱가포르와 노르웨이 3개 도시는 성공적인 혼잡완화 효과를 가져온 것으로 보고되고 있다(Santos, 2005; Transport for London, 2007, 2008). 혼잡구역을 대상으로 부과되는 구역혼잡통행료와 진입통행료 등 이른바 차선의 통행료들은 혼잡통행료 부과지점과 부과횟수 등에서 각기 다른 특징을 가지고 있다. 구역혼잡통행료는 부과경계 내부구역에서 통행하는 모든 통행자에게 혼잡통행료를 부과하고 부과지점은 부과경계뿐만 아니라 부과경계 내부구역 모두가 된다. 그러나 진입통행료는 부과경계 내부구역의 통행과는 상관없이 내부구역으로 진입하는 통행자에게 혼잡통행료를 징수하고 부과지점은 부과경계가 된다. 구역혼잡통행료 방식은 일정 기간 통행횟수와 관계없이 부과권역 내를 통행할 수 있는 정액 이용권이 판매

된다. 반면 진입통행료 방식은 통행자는 부과권역 내로 진입할 때마다 통행료를 내는 통행빈도 연계(usage-based) 부과방식이다. 어느 방식이든 이들 두 통행료의 사회적 효과는 부과경계의 위치와 부과 요금의 수준에 좌우된다.

본 연구의 목적은 구역혼잡통행료와 진입통행료의 최적 부과지점과 부과수준을 결정하고 두 방식이 통행량과 혼잡, 토지이용, 주거 및 고용의 분포, 그리고 궁극적으로 사회적 후생에 미치는 영향을 비교분석하는 것이다.

혼잡통행료 관련 선행연구는 혼잡통행료의 과급효과, 혼잡비용의 산정, 적용가능한 혼잡통행료의 평가, 그리고 혼잡통행료 실시를 위한 시민들의 수용태도 조사 및 사례 연구 등 다수가 존재한다. 본 연구와 유사한 적용가능한 혼잡통행료 징수방식을 평가하는 연구는 Verhoef et al.(1996), Verhoef(2002, 2005), Mun et al.(2003, 2005), Maruyama and Harata.(2006), Maruyama and Sumalee(2007), 조은경, 김성수(2007) 등이다. Verhoef et al.(1996)과 Verhoef(2002)는 교통망(Network)상의 최적 혼잡통행료 부과지점을, Mun et al.(2003, 2005)은 진입통행료의 최적 부과경계 위치와 요금을 탐색하였다. Verhoef(2005)은 진입통행료와 주행세(Flat kilometer charge)의 효과를 비교하였고 Maruyama and Harata(2006)와 Maruyama and Sumalee (2007)은 구역혼잡통행료와 진입통행료의 최적 부과경계 위치와 요금을 탐색하고 징수방식별 효율개선 효과를 비교하였다. 조은경과 김성수(2007)는 서울시 남산 1, 3호 터널 혼잡통행료 징수방식을 대상으로 도심 및 현재 징수방식을 부도심권역으로 확장할 시 혼잡통행료의 교통환경 개선효과와 형평성 및 효율성 제고 효과를 분석하였다.

Mun et al.(2003)은 진입통행료가 이론적 혼잡통행료에 가까운 사회적 효율개선 효과를 가져오는 차선의 혼잡통행료 징수방식으로 평가하였다. 그러나 Verhoef (2005)는 도시밀도, 교통혼잡, 그리고 노동공급 사이의 상호관계를 고려할 경우 진입통행료보다는 주행세의 효율 개선효과가 높다고 결론짓고 있다. 이러한 이유로서 Verhoef(2005)는 Mun et al.(2003)의 연구가 단핵도시모형(Mono-centric model)을 가정하였기 때문으로 판단하고 있으며 Mun et al.(2005) 역시 진입통행료는 단핵도시에서 더욱 효과적이라고 설명하고 있다. 그러나 Maruyama and Harata(2006)과 Maruyama and Sumalee (2007)은 교통망 모델(Network model)을 이용하여 구역혼잡통행료와 진입통행료를 비교한 결

과, 구역혼잡통행료가 진입통행료에 비하여 효용 개선효과가 높은 것으로 평가하였다.

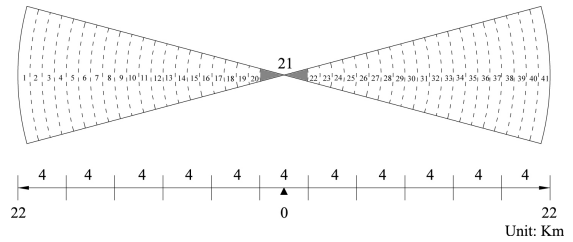
교통공학적 접근법 대신 활동기반 접근법(activity-based approach)(Fujii and Kitamura, 2000)을 채택한 연구는 Mun et al. (2003, 2005)과 Verhoef (2005) 등 소수에 불과하다. 이들 모형은 공학적 접근법과 달리 통행발생자의 유인체계를 모형의 핵심 분석단위로 삼기 때문에, 활동기반 접근법을 이용하면 실험결과를 일관되게 해석할 수 있을 뿐만 아니라 이론적 엄정성을 유지하면서 서로 다른 정책의 효과를 비교하고 평가할 수 있다. 그러나 이들 저자의 연구는 교통현상이 공간현상이면서 동시에 도시공간 내에서 이뤄지는 사회현상임에도 불구하고 그 분석배경이 되는 도시공간의 구성요소와 작동방식이 매우 단순하여, 지적 통찰력이 매우 제한적인 초기연구의 성격을 띄고 있다. 이에 비해 본 연구는 교차통행을 허용하고 출퇴근 통행뿐 아니라 구매통행도 내생적으로 분석하며 또한 토지이용의 내적 조정과정을 허용하기 때문에 통행료가 도시공간 내 활동에 미치는 장기적 영향을 평가할 수 있다. 이들 요소는 앞에 열거한 연구에서 전적으로 누락되었거나 있다 하더라도 초보적 형태로 다루어지고 있을 뿐이다.

본 연구는 총 5개 부분으로 구성된다. 서론부분은 연구의 목적과 선행연구를 기술하며 모형부분은 본 연구에서 구축되는 단핵도시모형의 부문별 시장의 특징을 설명한다. 수치분석으로 도출된 결과를 설명하는 최적 부과경계 및 요금 선정 부분과 도시환경의 변화 부분은 본 연구의 목적과 질문에 대한 대답들을 기술하고 있으며 연구결론 및 향후과제 부분은 연구의 결과와 한계점 및 향후과제를 요약하고 있다.

II. 모형

1. 기본형태

본 모형에서 구축되는 도시는 산업시설과 쇼핑시설이 도시의 중심구역에만 위치하는 단핵도시이며 혼잡통행료의 징수유무와 징수방식에 따라 기본도시, 이론적 혼잡통행료 부과도시, 구역혼잡통행료 부과도시, 진입통행료 부과도시로 구분된다. 기본도시는 혼잡통행료가 부과되지 않는 도시로서 이론적 혼잡통행료와 함께 구역혼잡통행료와 진입통행료의 비교 대상도시가 된다.



〈그림 1〉 도시의 형태

도시는 〈그림 1〉과 같이 좌우가 대칭인 모양을 하며 모두 41개 구역으로 나뉜다. 구역 21은 도시중심부에 위치한 중심구역이고 구역1과 구역41은 도시 가장자리에 위치한다. 도시의 반경은 22km이고 구역21의 폭은 4km, 나머지 주거시설이 입지하게 될 구역의 폭은 1km이다. 아래 논의에서 편의상 도심인 구역 21은 구역 0이라고도 부르기로 한다.

2. 생산부문

구역21에 위치한 산업시설은 규모수익불변(Constant returns to scale) 아래 노동 M 과 토지 Q 를 이용하여 도시민이 소비하는 복합재 X 를 생산한다. 생산기술은 콤더글라스 함수 $X = EM^\mu Q^\delta$ 에 따르며 $\mu + \delta = 1, \mu, \delta > 0$ 이다. 구역21에서 노동과 토지의 경쟁적 요소가격을 각각 w, r 이라고 하면 이윤을 극대화하는 요소수요는 $M = \mu p X / w$ 및 $Q = \delta p X / r$ 로 주어진다. 한편 기업의 진출입을 통해 X_{21} 생산시장은 장기적으로 식(1)하에서 영이윤이 달성된다.

$$p = \frac{w^\mu r^\delta}{E \mu^\mu \delta^\delta} \quad (1)$$

3. 소비부문

1) 가구의 효용

이 도시 내에 있는 모든 통행자는 구역 21로 출퇴근해 일하고 그곳에서 형성된 균형 임금 w 를 지급받는다. 구역 i 에 사는 통행자 혹은 노동자의 효용을 U_i 라고 하자. 이 노동자는 복합재 z_i 를 소비하고, 주거용 토지를 q_i 평방 미터를 점유하며, 여가시간 l_i 를 즐기고 소비량이 많을수록 이 노동자의 효용수준은 향상된다. ϵ_i 는 노동자 개인의 특이성(Idiosyncratic taste)을 나타낸다. $\alpha,$

β, γ 는 (+)의 상수로서 복합재, 임대료, 여가시간의 기회비용이 근로자의 소득에서 차지하는 비중을 나타내고 그 합은 1이다.

$$\max_{z_i, q_i, l_i} U_i = \alpha \ln z_i + \beta \ln q_i + \gamma \ln l_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

Ω_i 는 구역 i 에 사는 노동자의 연간 경제학적 수입, T_i 는 1년 간 통행에 쓰는 교통시간이다. 연간 통행시간은 연간 d 일 출퇴근에 쓰는 시간 $2dg_{i0}$ 와 구매통행에 쓰는 시간 $2fg_{i0}z_i$ 의 합으로 주어진다. 여기서 f 는 복합재 1단위를 사기 위해 구매처를 방문해야 하는 횟수를 말하고 각 통행은 왕복통행을 요하기 때문에 2가 곱해졌다. 그리고 g_i 는 구역 i 에서 도심까지 통행에 소요되는 시간으로서 생산활동이 있는 도심에서만 쇼핑이 가능하다고 가정한다.

$$\Omega_i = p_i z_i + r_i q_i + w l_i \quad (3)$$

$$T_i = wd g_{i0} + 2f g_{i0} z_i \quad (4)$$

p_i 는 도심인 구역 21에 위치한 판매시설의 생산품 1단위의 가격에 교통비용이 포함된 가격으로서 통행료 부과방식에 따라 아래와 같이 달리 주어진다.

$$\textcircled{1} \text{ 기본도시: } p_i = p + 2fwg_{i0} \quad (5)$$

$$\textcircled{2} \text{ 이론적 혼잡통행료 부과도시: } p_i = p + 2f(t_{i0} + wg_{i0}) \quad (6)$$

$$\textcircled{3} \text{ 구역 및 진입통행료 부과도시: } p_i = p + f(t_{i0} + \delta t_{0i}) + 2fwg_{i0} \quad (7)$$

위 식에서 t_{i0} 는 구역 i 에서 도심인 구역 21까지 통행하면서 내는 통행료이고 t_{0i} 는 되돌아 갈 때 내는 통행료이다. 차선의 통행료(즉 구역 및 진입통행료) 부과방식 하에서 귀가통행의 도착지 i 가 부과구역에 속하는 경우 귀가통행은 통행료가 부과되지 않는다. 따라서 i 가 부과구역에 속할 때 δ 의 값을 0으로 놓고 그 밖의 경우에 1로 놓으면,

$$\delta = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ 1, & i \neq 0 \end{cases}$$

식(7)에서 부과구역 내부에서 움직이는 차량의 경우 $p_i = p + ft_{i0} + 2fwg_{i0}$ 가 된다.

2) 가구의 수입

가구의 총 수입 Ω_i 는 연간 총 가용시간 H 에 w 를 곱한 경제학적 임금수입에 지대수입 D 를 합한 값에서 교통비용을 제외한 것이다.

$$\textcircled{1} \text{ 기본도시: } \Omega_i = wH - 2dwg_{i0} + D \quad (8)$$

$$\textcircled{2} \text{ 이론적 혼잡통행료 부과도시: } \Omega_i = wH - 2d(t_{i0} + wg_{i0}) + D \quad (9)$$

$$\textcircled{3} \text{ 적용가능한 혼잡통행료 부과도시: } \Omega_i = wH - 2dwg_{i0} - d(t_{i0} + \delta t_{0i}) + D \quad (10)$$

가구가 얻게 되는 지대수입 D 는 각 가구가 도로의 유지·관리를 위하여 지불하는 세금 h 를 제외한 임대료 배당수입이다. 혼잡통행료를 부과할 시 가구가 지출한 혼잡통행료 전액은 도로 유지관리비로 사용됨에 따라 지대수입 D 는 혼잡통행료 징수유무와 징수방식에 따라 다르게 결정된다. $A_i, Road_i, F_{i21}$ 은 각각 구역별 면적, 구역별 도로면적, 가구의 통행량이다.

$$h = \frac{\sum_i r_i Road_i}{N} \quad (11)$$

$$\textcircled{1} \text{ 기본도시: } D = \frac{\sum_i r_i A_i}{N} - h \quad (12)$$

$$\textcircled{2} \text{ 이론적 혼잡통행료 부과도시: } D = \frac{\sum_i r_i A_i}{N} \quad (13)$$

$$\textcircled{3} \text{ 적용가능한 혼잡통행료 부과도시: } D = \frac{\sum_i r_i A_i}{N} + \frac{\sum_{(i,21)} dF_{21}t_{21}}{N} - h \quad (14)$$

합을 I_C , 부과권역이 아닌 구역의 구역번호 집합을 $I \setminus I_C$ 라고 하자. 본 연구에서 차선 통행료는 모두 통행횟수 비례 부과방식에 따른다. 부과권역 밖에서 부과권역 안쪽으로 진입하는 모든 차량은 일단 통행료 τ 가 부과되지만 귀가 통행에 대해서는 통행료가 면제된다. 다만 부과권역 안에 거주하는 사람의 경우 진입통행료 방식 하에서는 같은 구역 안에서 일하고 구매활동을 하기 때문에 이들은 진입통행료를 낼 일이 없다. 그러나 부과권역 내부에 사는 사람도 구역혼잡통행료 방식 하에서는 일정 금액 통행료를 내야한다. 혼잡통행료를 τ 라고 할 때 구역혼잡통행료 부과방식 하에서

$$t_{i0} = \begin{cases} \tau, & i \in I \setminus I_C \\ (1-dc)\tau, & i \in I_C \end{cases}, \quad t_{0i} = 0, i \in I \setminus I_C \quad (22)$$

진입통행료 부과방식하에서

$$t_{i0} = \begin{cases} \tau, & i \in I \setminus I_C \\ 0, & i \in I_C \end{cases}, \quad t_{0i} = 0, i \in I \quad (23)$$

구역혼잡통행료에서 dc 는 혼잡통행료 할인율로서 런던에서는 혼잡구역 내부구역 거주자의 통행비용 부담을 덜어주기 위해 내부구역 거주자를 대상으로 할인율 혜택을 주고 있다.

6. 일반균형

본 모형이 일반균형조건을 만족하기 위해서는 시장별 균형조건 식(24),(25),(26)이 41개 구역에서 모두 성립되어야 한다. 도로균형 조건 식(27)은 도로면적을 내생적으로 결정하는 이론적 혼잡통행료 부과도에만 해당된다.

① 생산시장: $X = N \sum_i \Psi_i z_i \quad (24)$

② 노동시장: $M_{21} = N \sum_i \Psi_{i21} (H - T_{i21} - l_{i21}) \quad (25)$

③ 토지시장: $\begin{cases} A_i = Q_{21} + Road_{21}, & i = 21 \\ A_i = N \Psi_{i21} q_{21} + Road_i, & i \neq 21 \end{cases} \quad (26)$

④ 도로균형 조건: $dF_i t_i \Delta_i = r_i Road_i \quad (27)$

7. 사회적 효용

사회적 효용 W 는 여러가지 선택상황에서 극대화된 가구의 효용을 평균한 것이다. 사회적 효용계산식, 식(31)의 오른쪽 첫 번째 항은 비특이성(Non-idiosyncratic) 효용들의 평균값이며 두 번째 항은 가구의 특이성으로 인해 발생하는 잔여효용의 평균이다(Anas and Rhee, 2006: 519).

$$W = \sum_i \Psi_i V_i - \frac{1}{\lambda} \sum_i \Psi_i (\ln \Psi_i) \quad (28)$$

8. 모수의 선정

수치분석을 위해 사용된 모수는 모든 도시에 동일하게 적용된다. 모수는 유사 선행연구에서 사용된 모수를 기준으로 국내의 통계자료를 이용하여 도시가 일반화된 모습을 갖도록 선정하였다. 도시면적은 12.7km²이고 인구는 60,000명임에 따라 총 인구밀도는 4,738명/km²이다. 모형의 총 인구밀도는 구역혼잡통행료를 부과하는 런던의 총 인구밀도 4,760명/km²와 유사하다. 가구의 월 평균 임금소득은 2007년 서울시 평균 근로소득 226만 원/월¹⁾을 적용하였다.

국내 가계소득 중 근로소득(근로자의 사업소득 포함)이 차지하는 비율이 85%이며 근로소득 이외의 소득은 15%를 차지한다²⁾. 또한 모형에서 근로자의 노동시간을 8~9시간/일 수준으로 가정함에 따라 생산함수의 δ 와 μ 는 각각 0.14과 0.86으로 결정하였고³⁾ 규모모수(Scale parameter) E 는 1로 가정하였다. 효용함수의 α 는 Anas and Rhee(2006)와 이혁주(2006)와 동일한 0.36을, β 는 국제 소득대비 임대료 비율(RIR: Rent to Ratio)과 선행연구를 고려하여 0.15를 적용하였다⁴⁾.

구역별 통행시간 계산을 위해 자유류 상태의 통행속도를 60.0 km/시로 가정한다. 이때 식(17)의 a 는 0.1667(=1/60)이 된다. 한편 식(17) 혼잡함수 g_i 에서 교통처리 용량은 평방미터로 측정된 도로면적의 함수로 주어진다 고 했으므로 임의의 값 ξ_i 를 각 구역에 적용하면 도시

1) 서울시 (2008), '서울 전가구의 가구당 월평균 가계수지', 『2008 통계연보』
 2) 통계청, "전국가구의 가계수지 구성비 추이(2003.1/4~2008.1/4)"
 3) 도시경계와 혼잡통행료의 효과를 비교하기 위하여 분산고용모형(Dispersed Employment model)을 사용한 Anas and Rhee(2006)에서 역시 δ 와 μ 는 0.14와 0.86을 사용하였다.
 4) Anas and Rhee(2006)에서 α 와 β 는 각각 0.36과 0.15를 사용하였으며 이혁주(2006)에서는 0.35와 0.07을 적용하였다.

〈표 1〉 모수의 선정

1. 도시형태
구역 수: 41개, 구역 폭: 1km (구역21 = 4km)
반지름: 22.00km, 면적: 12.67km ² (원호: 1.50도)
2. 생산부문: E=1.00, δ=0.14, μ=0.86 (1=δ+μ)
3. 소비부문:
N(근로자)=20,000.0인, Pop(인구)=60,000.0인
d(연간 근로일 수)=250.0일/년
H(=d × 24시간/일)=6,000.0시간/년
α=0.36, β=0.15, γ=0.49 (1=α+β+γ)
ρ=0.60, λ=4.00, 임금소득=2,257천원/월
4. 교통부문
a=1/60, b=0.07681 c=5.180, f=1/13, ξ _i =0.42

전체의 자동차 주행속도의 프로필은 대체로 현실도시에서 관측합직한 수치들이 관찰된다. 그리고 나머지 계수인 b와 c는 구역통행료 부과 전후 런던시의 교통량 변화5)로부터 직접 추정해 내었다.

오차범위(Tolerance)는 모형의 수렴속도를 고려하여 10⁻⁷% 으로 설정하였다. 오차검사는 변수별 오차검사와 시장균형조건별 오차검사로 구분된다. 변수별 오차검사는 변수의 수렴여부를 판단하기 위해 반복(Iteration)전 값과 반복 후 값을 비교하는 것이다. 혼잡통행료 오차 $\epsilon_{t_{oil}}$ 의 경우 반복 전 혼잡통행료 t_i^{old} 와 반복 후 t_i 를 이용하여 $|t_i - t_i^{old}|/t_i^{old} \times 100$ 로 계산되며 모든 변수의 오차는 동일한 방식으로 측정된다. 시장균형조건별 오차는 시장별 균형조건식에서 좌변과 우변의 차이를 좌변 또는 우변으로 나누어 계산한다.

III. 최적 부과경계 및 요금 선정

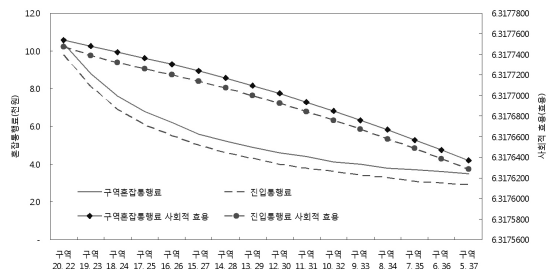
1. 부과경계 및 요금별 사회적 효용

최적 부과경계(Optimal cordon)와 최적 요금(Optimal toll)은 사회적 효용을 극대화하는 부과경계와 요금이다. 최적 부과경계와 요금을 탐색하기 위해 구역혼잡통행료와 진입통행료 부과도시에 설치되는 대안별 부과경계의 위치는 총 16개소이다. 부과경계는 도시 중심구역, 구역21을 중심으로 좌측과 우측으로 동일하게 1km씩 도시외곽으로 확장되어 구역경계에 설치된다. 따라서 도시 중심구역과 가장 가까운 지점에 설치된 부과경계는 구역20과 구역22에 설치된 부과경계이며 가장 큰 부과경계 내부구역을 가

지고 있는 부과경계는 구역5와 구역37에 설치된 부과경계이다. 구역혼잡통행료의 부과경계 내부구역 거주자에게 주어지는 혼잡통행료 할인율은 런던의 할인율 90%를 적용하였다. 최적 요금을 탐색하기 위한 요금범위는 두 가지 징수방식 모두 동일하게 0.1천원부터 14.0천원까지이며 0.1천원씩 증가시켜 부과경계별 사회적 효용의 변화를 관찰하였다.

징수방식별 대안별 부과경계와 요금에 따른 사회적 효용을 비교한 결과, 구역혼잡통행료의 최적 부과경계 위치는 구역20과 구역22(도시중심으로부터 3.0km)이며 최적 요금은 10.4천원/일이고, 진입통행료의 최적 부과경계 위치는 구역혼잡통행료와 동일한 구역20과 구역22이며 최적 요금은 9.8천원/회 으로 결정되었다. 두 징수방식 모두 최적 부과경계의 최적 요금을 기준으로 부과경계가 도시 중심부로 이동할수록 부과경계별 최적 요금은 증가하고 부과경계가 외곽으로 이동할수록 감소한다. 교통망 모델을 이용한 Maruyama and Sumalee (2007)은 두 징수방식 모두 부과경계 내부구역의 면적이 커질수록 최적 요금은 증가한다고 분석하고 있다.

본 연구는 Maruyama and Sumalee(2007)와 다르게 일반균형조건을 전제로 함에 따라 가구는 교통비용만이 아닌 토지임대료의 변화를 고려하여 이동한다. 부과경계 내부구역의 축소는 교통비용 절약을 위해 내부구역으로 이주하려는 단위면적당 이주 가구 수를 증가시켜 토지임대료는 상승시키고 이렇게 증가된 토지임대료는 오히려 가구의 유입을 가로막는 역할을 한다. 따라서 축소된 부과경계 내부구역으로 가구들이 이동토록 유도하기 위해서는 정책적으로 혼잡통행료를 증가시켜 가구가 내부구역으로 이동함으로 인해 얻게 되는 교통비용의 감소분이 증가된 임대료 부담액보다 커지려야함을 보여주고 있다.

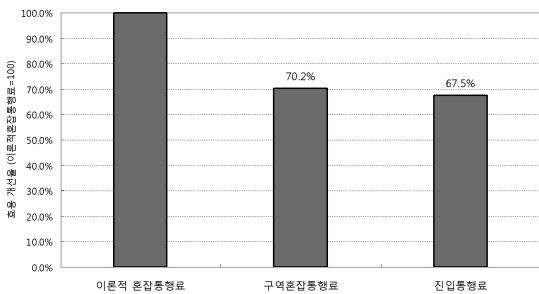


〈그림 2〉 부과경계별 최적 요금에서의 사회적 효용

5) Transport for London (2007), p.22, p.40.

2. 도시별 사회적 효용

구역혼잡통행료와 진입통행료 모두 기본도시의 사회적 효용을 개선시켰다. 이론적 혼잡통행료로 인한 기본도시의 사회적 효용 개선효과를 100%라고 할 때 구역혼잡통행료의 효용 개선효과는 70.2%이며 진입통행료의 효용 개선효과는 67.5%로 산정되었다. 따라서 최적 부과경계와 요금을 기준으로 구역혼잡통행료가 진입통행료 보다 사회적 효용 개선효과가 더욱 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Maruyama and Sumalee(2007)의 정수방식별 사회적 효용 개선순위와 동일하다.

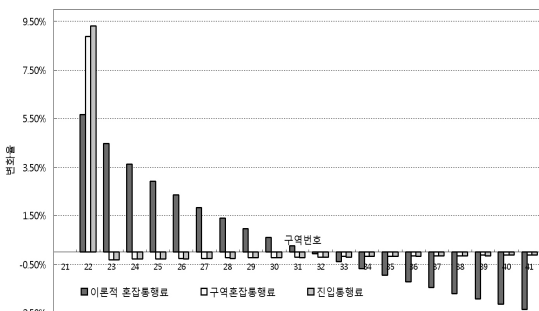


〈그림 3〉 정수방식별 사회적 효용 개선 효과

IV. 도시환경의 변화

1. 인구 변화

혼잡통행료로 인한 인구의 이동을 살펴보면 이론적 혼잡통행료는 전체 도시인구 중 0.8%를 구역32(또는 구역10)를 경계로 도시 중심부로 이동시켰으며 구역혼

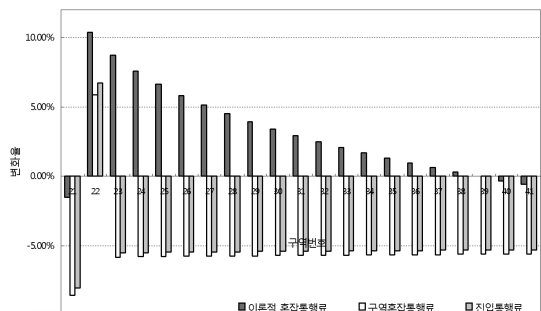


〈그림 4〉 구역별 인구 변화율

잡통행료와 진입통행료는 0.17%를 부과경계 구역22(또는 구역20)를 경계로 부과경계 내부구역으로 이동시켰다. 이론적 혼잡통행료는 통행자가 통행거리 만큼 증가된 혼잡통행료를 납부토록 함에 따라 도시 가장자리에 위치한 구역의 인구이동이 가장 크며 구역혼잡통행료와 진입통행료는 부과경계 내부구역 진입여부 및 내부통행 유무에 따라 동일한 혼잡통행료가 부과되어 부과경계 외부구역의 인구이동 규모는 구역별로 유사하다.

2. 임대료 변화

이론적 혼잡통행료는 기본도시의 평균 임대료를 1.82% 상승시켰으며 구역혼잡통행료와 진입통행료는 각각 -6.12%와 -5.74% 감소시켰다. 구역21의 임대료가 감소한 이유는 혼잡통행료 징수가 가구의 소비량을 감소시켜 산업시설이 생산비용 지출이 축소되었기 때문이다. 이론적 혼잡통행료의 징수는 가구가 교통비용이 감소된 만큼을 토지소비에 사용함에 따라 구역별 인구 상승률에 비하여 임대료는 약간 더 증가한다. 특히 이러한 결과는 구역32부터 구역38까지 구역별 임대료 변동에서 살펴볼 수 있는데 가구는 인구이동으로 저렴한 토지를 더욱 많이 소비하기 때문에 구역의 인구가 유출되었음에도 불구하고 이들 구역의 임대료는 약간 상승한다.6) 구역혼잡통행료와 진입통행료의 임대료는 부과경계를 중심으로 내부구역은 상승하고 외부구역은 감소하였다. 구역혼잡통행료 내부구역 임대료 상승률이 진입통행료의 임대료 상승률에 비하여 낮고 구역혼잡통행료 외부구역 임대료 하락률이 진입통행료에 비하여 높은 이유는 최적 요금이 구역혼잡통행료가 높기 때문이며 부과경



〈그림 5〉 구역별 임대료 변화율

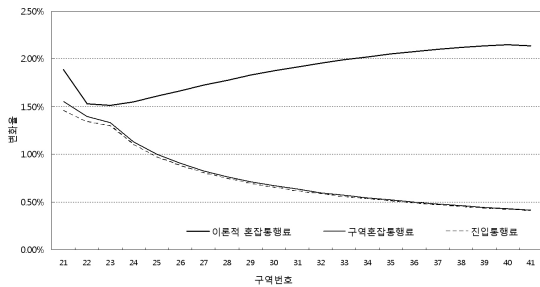
6) Anas and Rhee(2006) 역시 산업시설이 도시중심구역에만 밀집된 경우 혼잡통행료는 도시중심부의 인구유입률에 비하여 임대료를 더욱 상승시키는 것으로 분석하고 있다(Anas and Rhee, 2006: 526-8).

계 내부구역 거주자 또한 할인된 혼잡통행료를 지불하기 때문이다.

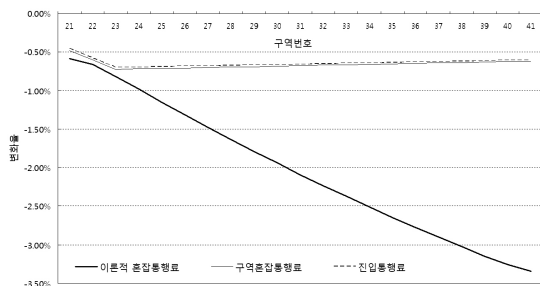
3. 교통환경 변화

1) 통행속도와 통행량

이론적 혼잡통행료 부과도시의 평균 통행속도는 기본 도시의 통행속도를 1.7% 개선시킨 45.25km/시이며, 구역혼잡통행료는 0.83% 개선시킨 44.86km/h, 진입통행료는 0.80% 개선시킨 44.85km/시이다. 징수방식별 통행속도가 가장 많이 개선된 구역은 이론적 혼잡통행료는 도시중심부와 도시 가장자리에 위치한 구역이고 구역혼잡통행료와 진입통행료는 부과계 내부구역과 부과계에 인접한 외부구역들이다. 이들 구역들의 통행속도 개선효과가 가장 큰 이유는 이론적 혼잡통행료의 경우 가장자리에 위치한 구역의 인구가동이 가장 크고 가구의 소비량이 혼잡통행료로 감소하였기 때문이다. 구역혼잡통행료와 진입통행료는 부과계 인접구역의 통행속도가 증가한 이유는 인구가동으로 인한 결과이며 부과계 내부구역의 경우 소비인구가 내부구역으로 유입되었음에도 불구하고 통행속도가 증가한 이유는 내부구역 거주인의 경우 업무와 상업지역으로 근거리 통행이 가능하며 혼잡통행료를 거의 부과하지 않아 소비량의 변화가 적기 때문이다.



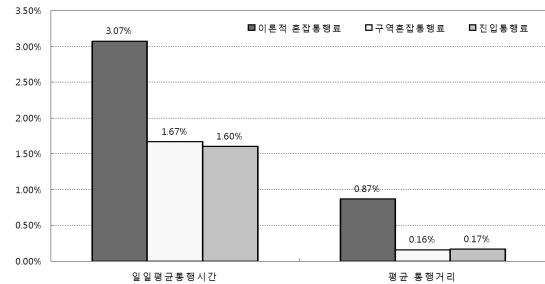
〈그림 6〉 구역별 통행속도 변화율



〈그림 7〉 구역별 통행량 변화율

2) 일일 평균통행시간(DATT) 및 평균 통행거리

일일 평균통행시간은 가구가 통근통행과 쇼핑통행을 위해 소비하는 일일 총 교통시간이고 평균 통행거리는 가구가 하루동안 목적통행을 위해 통행하는 평균 거리이다. 일일 평균통행시간을 징수방식별로 살펴보면 이론적 혼잡통행료는 기본도시의 일일 평균통행시간을 3.07% 단축시켰으며 구역혼잡통행료는 1.67%, 진입통행료는 1.60% 단축시켰다. 평균 통행거리 역시 이론적 혼잡통행료가 0.87%로 가장 높은 개선효과를 가져왔으며 다음으로 구역혼잡통행료와 진입통행료는 각각 0.16%와 0.17%로 유사한 개선효과를 발생시켰다.



주: 개선효과 = |변화 후 - 변화 전| ÷ 변화 전

〈그림 8〉 일일 평균통행시간 및 평균 통행거리 개선효과

V. 연구요약 및 향후과제

본 연구는 일반균형조건 아래 구역혼잡통행료 징수방식과 진입통행료 징수방식의 최적 부과계와 요금을 탐색하고 두 가지 방식의 사회적 효용 개선효과와 교통환경 개선효과를 비교하는 것이다. 연구결과 구역혼잡통행료와 진입통행료의 최적 부과계는 도시반경이 22km 인 경우 도시 중심으로부터 3km 떨어진 곳에 동일하게 위치하며 최적 부과계 아래 최적 요금은 가구의 월 임금소득이 2,257천원/월인 경우 구역혼잡통행료는 10.4천원/일이고 진입통행료는 9.8천원/회인 것으로 분석되었다. 이론적 혼잡통행료에 가장 근접한 사회적 효용 개선효과를 발생시키는 징수방식은 구역혼잡통행료이며 진입통행료가 구역혼잡통행료 보다 낮은 개선효과를 발생시키는 것으로 평가되었다. 교통환경 개선효과 역시 사회적 효용 개선효과와 동일하게 통행속도와 일일 평균통행시간에서 구역혼잡통행료가 진입통행료에 비하여 높은 개선효과를 가져오는 것으로 나타났다.

본 연구와 유사한 Maruyama and Sumalee(2007)

은 본 연구와 동일하게 구역혼잡통행료가 진입통행료보다 높은 사회적 효용 개선효과를 발생시키고 최적 부과경계에서 구역혼잡통행료의 최적 요금은 진입통행료의 최적 요금에 비하여 높은 것으로 분석하고 있다. 그러나 Maruyama and Sumalee(2007)은 부과경계 내부구역이 확대될수록 최적 요금은 증가하고 구역혼잡통행료의 최적 요금이 진입통행료 최적 요금에 비하여 약 2배 정도 크다고 설명하고 있다. 이와 같이 Maruyama and Sumalee(2007)의 연구결과가 본 연구의 결과와 다른 주요 원인은 분석 모형의 전제조건이 서로 다르기 때문이다. Maruyama and Sumalee(2007)은 부분균형조건 아래 혼잡통행료로 인한 교통부문의 효용개선 효과를 평가한 것이고 본 연구는 단핵도시에서 일반균형조건 아래 혼잡통행료로 인한 사회적 효용개선 효과를 분석한 것이다. 따라서 Maruyama and Sumalee(2007)의 혼잡통행료의 효용 개선효과는 생산 및 소비 그리고 노동시장이 가구 이동과 통행량 변화에 간섭하는 본 연구의 사회적 효용 개선효과에 비하여 높게 나타났다.

본 연구에서 구현된 도시는 단핵도시로서 가구는 산업시설과 쇼핑시설이 위치한 도시 중심구역으로만 통행한다. 따라서 혼잡통행료를 부과할 경우 도시 중심구역으로의 통근목적 통행량은 변화하지 않으며 교통비용의 증가로 인한 쇼핑목적 통행량만이 변화한다. 더욱이 구역혼잡통행료에 할인율이 적용되지 않을 경우 부과경계 내부구역과 외부구역 상관없이 도시 전가구의 교통비용 부담액은 구역혼잡통행료 만큼 동일하게 증가한다. 이로 인해 단핵도시에서 구역혼잡통행료의 할인율은 가구가 도시 중심구역으로 이동하게끔 유인하는 중요한 요인으로 작용한다. 진입통행료는 진입횟수에 따라 혼잡통행료를 통행자에게 징수하여 가구가 도시 중심구역을 통과하는 장거리 교통을 감소시키는 효과를 발생시킨다. 따라서 단핵도시의 제한적 가정을 완화시켜 통행자의 도시 중심구역 통과교통을 허용할 경우 진입통행료의 사회적 개선효과는 더욱 증가될 수 있다. 또한 본 연구에서 진입통행료의 요금이 구역혼잡통행료의 요금과 유사한 이유도 도시의 특성상 도시중심구역의 통과교통이 배제되었기 때문으로 이해된다.

이와 같이 본 연구가 가지고 있는 한계점과 결과를 기초로 향후 수행되어야 할 연구는 다핵도시모형을 이용한 적용가능한 혼잡통행료들간 비교연구가 필요하다. 또한 본 모형에서 구역혼잡통행료는 통행자가 1일 1회 통행권을 구입하는 것을 가정하고 있다. 하지만 1일 1회가

아닌 주간 또는 월간 단위로 통행권을 구입하여 처분가능한 가구 소득에서 구역혼잡통행료를 세금의 형태로 직접 지출할 경우 사회적 효용이 어떻게 변화되는 지 살펴볼 필요가 있다. 본 모형은 도시 간 인구이동이 없는 폐쇄된 도시(Closed city)를 가정하고 있다. 향후 연구에서 이러한 제한적 가정을 완화하여 혼잡통행료의 효과를 개방된 도시(Open city)에서 평가하는 것 역시 혼잡통행료의 효과를 올바르게 이해하는 연구가 될 것이다.

참고문헌

1. 이혁주(2006), “재택근무 공간모형과 연산 알고리즘”, 국토계획, 제41호 제4호, pp.19~29.
2. 조은경·김성수(2007), “혼잡통행료 부과방안의 효율성과 형평성 분석 (수도권을 대상으로)”, 대한교통학회지, 제25권 제1호, 대한교통학회, pp.7~21.
3. Anas and Rhee(2006), “Curbing Excess Sprawl with Congestion Tolls and Urban Boundaries”, Regional Science and Urban Economics 36, pp.510~541.
4. Anas and Rhee(2007), “When are urban growth boundaries not second-best policies to congestion tolls?”, Journal of Urban Economics 61: pp.263~286.
5. Georgina Santos(2005), “Urban Congestion Charging: A Comparison between London and Singapore”, Transport Reviews, 25(5), pp.511~534.
6. Keeler, T. and Small, K.(1977), “Optimal Peak-Load Pricing, Investment, and Service Levels on Urban Expressways”, Journal of Political Economy, Vol. 85, no. 1, pp.1~25.
7. Maruyama, T. and Harata, N.(2006), “Difference between area-based and cordon-based congestion pricing: investigation by trip-chain-based network equilibrium model with non-additive path costs” Transportation Research Record 1964, pp.1~8.
8. Maruyama, T. and Sumalee, A.(2007), “Efficiency and equity comparison of cordon-and area-based road pricing schemes using a trip-chain equilibrium model”, Transportation Research

