

혼잡통행료 징수와 대중교통 차내 혼잡수준의 관계

유상균 · 배기목*

대진대학교 도시부동산공학과

The Relationship Between Congestion Pricing and In-vehicle Crowding Level in Public Transport

YU, Sang-Gyun · BAE, Gi-Mok*

Department of Urban and Real Estate Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea

*Corresponding author: oneway@daejin.ac.kr

Abstract

In studies involving public transport, social welfare improvement is simply explained by the increase in public transport demand. However, the increase in the demand for public transport is mostly observed by the change in the frequency of public transport service, and in-vehicle crowding in public transport has not been an object of concern. This study examines and tries to reveal the cause of the changes of the social welfare and in-vehicle crowding of the changing public transport from imposing congestion pricing. We observe that congestion pricing increases in-vehicle crowding in public transport. This predictable phenomenon is more exacerbated in case of not operating bus-only lane. It should be noted that in-vehicle crowding is more increased in suburban, but in First-best toll system it tends to get worse less than it in other congestion pricing systems. We identify that the change of in-vehicle crowding is affected by the change of proximity of the housing to workplace, the number of commuting trips, and unpredictable distortion effect of the congestion charge.

Keywords: congestion pricing, general equilibrium model, in-vehicle crowding, mode choice, public transport

초록

대중교통을 포함한 연구들에서 사회적 효용 증진은 대중교통서비스 개선 또는 승용차 이용 억제책을 통한 대중교통 수요증가에 의한 것으로 풀이된다. 하지만 지금까지 대중교통 수요증가는 통행수단의 통행량 변화를 통해 사회적 효용에 영향을 미치고 관찰될 뿐, 대중교통 차내 혼잡도는 고민의 대상이 아니었다. 본 연구는 혼잡통행료 시행으로 증진되는 사회적 효용과 변화되는 대중교통수단 차내 혼잡도를 관찰하고 원인을 규명한다. 본 연구에서 혼잡통행료 시행은 대중교통수단 차내 혼잡도를 증가시키고, 대중교통 전용차로가 없는 경우 대중교통수단 혼잡도는 더욱 심화된다. 주목할 점은 대중교통수단 차내 혼잡도가 도심보다 도심 외곽구역에서 더욱 악화되고, 최선의 혼잡통행료는 차내 혼잡도를 상대적으로 덜 악화시키면서 효용증진 임무를 완수한다. 이러한 결과는 통행자의 직주근접성 변화, 통행횟수 조절, 그리고 혼잡통행료 징수가 가져올 우발적인 왜곡효과 때문으로 해석된다.

주요어: 혼잡통행료, 일반균형모형, 차내 혼잡도, 수단선택, 대중교통

J. Korean Soc. Transp.
Vol.34, No.6, pp.510-522, December 2016
<https://doi.org/10.7470/jkst.2016.34.6.510>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 22 June 2016

Revised: 17 August 2016

Accepted: 5 October 2016

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

혼잡통행료 징수는 승용차의 과소책정된 통행비용을 증가시킴과 동시에, 과대평가된 대중교통 통행비용을 상대적으로 낮춰 사회적 효용을 증진시키는 대표적 정책수단이다. 연구대상이 대중교통수단을 고려하지 않고 승용차 교통수단으로만 한정된 경우, 이론연구에서는 정책의 사회적 효용 증진 원인과 파급경로가 주요 관찰대상이었고, 실증연구에서는 혼잡통행료 수준과 정책비용의 측정이 관심대상이었다. 하지만, 연구대상에 대중교통수단이 승용차와 함께 포함될 경우, 논의의 범위와 깊이는 승용차만으로 한정된 경우와 비교하여 제한적이었고, 특히 이론연구에서는 더욱 그러하였다. 이러한 원인은 대중교통을 연구대상으로 포함시킬 경우, 분석적 풀이가 어렵고 더욱이 승용차만을 고려한 연구결과와 커다란 질적 차이가 없다는 연구자들의 판단에서 기인된 것으로 이해된다.

통행수단 선택조건을 포함한 선행연구들에서 혼잡통행료 징수가 가져온 사회적 효용 증진은 승용차 이용억제를 통한 기존 승용차 사용자들의 대중교통으로의 수단전환이 핵심 원인이었다. 분석적 측면에서 대중교통 수요증가가 사회적 효용 증진을 촉발하는 구체적 요인은 대중교통 탑승객 한명의 유발교통량이 승용차 이용자 한명의 유발교통량보다 적기 때문이다. 여기서 대중교통 탑승객 한명의 유발교통량($\phi_a^{m=2}$)은 대중교통수단의 승용차 환산계수(PCE>1)를 대중교통수단 탑승객 수(인원/대)로 나누어서 산정되고, 연구의 편리성을 위해 해당 값은 일반적으로 고정된다.

통행자가 ‘승용차 또는 대중교통수단’ 선택이 가능하고 ‘구역 간 통행’만 존재하는 두 개 구역으로 구성된 단핵도시¹⁾에서 $\phi_a^{m=2}$ 가 고정된 경우, 혼잡통행료 징수로 인한 대중교통 수요증가는 대중교통수단 차내 혼잡도(m^2 /인)는 유지한 상태에서 대중교통수단 통행량만을 증가시킨다. 하지만 $\phi_a^{m=2}$ 가 변화되는 경우, 대중교통 수요증가는 $\phi_a^{m=2}$ 가 고정된 경우와 다르게 대중교통수단 차내 혼잡도를 증가시킨다. 그러나 단핵도시보다 현실도시에 더욱 흡사한 다수의 구역으로 구성된 다핵도시에서 가구가 통행수단 선택과 함께 주거지-직장 입지선택이 자유로운 경우, 혼잡통행료 징수로 인한 구역별 또는 노선별 대중교통수단 차내 혼잡도 증가는 다르게 나타난다. 따라서 혼잡통행료 징수가 대중교통 수요를 증가시켜 대중교통수단 차내 혼잡도를 증가시킨다는 단선적 풀이는 가구 입지의 형평성 문제를 간과한 것이다.

최선의 혼잡통행료 징수는 혼잡비용 감소를 위해 승용차 이용자를 대중교통수단으로 전환시켜 극대화된 사회적 효용 증진을 가져온다. 하지만 $\phi_a^{m=2}$ 가 고정된 연구들과 다르게 $\phi_a^{m=2}$ 가 변화되는 환경에서 최선의 혼잡통행료가 다른 혼잡통행료 징수방식과 비교하여 대중교통수단 차내 혼잡도를 더욱 악화시킬 경우 본연의 임무를 완수하였는지는 재평가되어야 한다. 이에 본 연구는 다핵도시를 기반으로 혼잡통행료 징수로 인한 대중교통수단 차내 혼잡도 변화를 구역별로 측정하고 가구 입지의 형평성 문제를 대중교통수단 혼잡도 측면에서 관찰한다. 또한 혼잡통행료 징수방식별 효용증진 효과와 대중교통수단 차내 혼잡도 변화를 상대적으로 평가코자 이론적 혼잡통행료인 피구세(Pigouvian toll), 수치해석을 통해 얻어진 차선의 혼잡통행료, 그리고 최선의 혼잡통행료를 함께 비교한다.

선행연구

혼잡통행료 관련연구의 목적은 크게 혼잡통행료의 파급효과 측정과 징수방식의 평가로 분류되고, 분석방법은 교통부문의 전통적 네트워크 모형, 부분균형조건을 전제로 한 비공간모형, 그리고 일반균형조건을 충족하는 공간모형으로 구분된다(Rhee and Yu, 2013; Basso et al., 2011). 경제학자들은 혼잡통행료의 혼잡완화 효과에는 동의하지만, 1) 혼잡통행료 징수방식의 선택, 2) 혼잡통행료 시행을 위한 초기비용의 조달방법, 3) 혼잡통행료 수입의 사용방법, 4) 혼잡통행료 징수로 인한 형평성 문제 등에 있어 세부적 차이를 가지고 있다(Lindsey, 2006). 혼잡통행료 연구자들은 이러한 차이들을 축소코자 혼잡통행료 연구의 세부 목적을 확장시켰고, 동시에 연구의 현실성 확보를 위해 연구방법을 진화시켰다.

1) '구역 간 통행'만이 가능한 두 개 구역으로 구성된 단핵도시에서 가구의 주거지와 직장의 입지는 고정된다.

대부분의 혼잡통행료 관련연구는 단일교통 수단인 승용차만을 다루고 있어, 교통수단간 상호작용은 간과하였다는 한계를 내포한다(Basso et al., 2011; Tirachini, 2012). 연구의 필수조건으로 대중교통수단을 포함시킨 선행연구들은 혼잡통행료에 대한 유일효과보다는 혼잡통행료를 포함한 대중교통 보조금이 촉발한 효용증진 효과에 더욱 관심을 갖았다. 대중교통수단의 경우, 승용차와는 다르게 통행시간이 다양한 요소로 구성되는 바, 이들 간 간섭효과는 연구자들이 정책수단들의 효용 증진효과의 규모를 다르게 평가하는 원인이 되었다(Parry and Small, 2009). 이후 수단선택 조건이 포함된 연구들은 논의의 범위를 확장하였는데, Borck and Wrede(2008)은 대중교통 보조금의 소득계층간 귀착문제를 다루었고, Basso et al.(2011)과 Tscharaktschiew and Hirte(2012)은 대중교통 지원정책간 효율성을 비교하였으며, Basso et al.(2012)와 Rhee and Yu(2013)는 최적 혼잡통행료와 대중교통 보조금을 탐색하고 이들의 효용증진 원인을 규명코자 하였다. Tirachini et al.(2014)는 대중교통이 발생시키는 외부효과를 사용자 비용과 운영자 비용으로 구분하고 이를 최소화할 수 있는 대중교통 운영시스템의 최적방식을 제안하였다.

대중교통수단을 포함한 연구들에서 사회적 효용 증진은 대중교통서비스 개선 또는 승용차 이용억제책을 통한 대중교통 수요증가에 의한 것이다. 하지만 지금까지 대중교통 수요증가는 대중교통수단의 통행량을 통해 사회적 효용에 영향을 미치고 관찰될 뿐, 대중교통수단 차내 혼잡도는 고민의 대상이 아니었다. Parry and Small(2009)와 Tirachini et al.(2014)가 대중교통수단 차내 혼잡도를 사용자의 통행비용을 구성하는 요소로 포함시켜 관찰하고 있으나, 정책수단과 차내 혼잡도의 상관성에 대해 명시적 논의는 하지 않았다. 대중교통수단 차내 혼잡도 관련연구들은 주로 차내 혼잡도의 중요도와 평가방법을 다루었고(Wardman and Whelan, 2011), 대중교통수단 서비스 환경을 평가하기 위한 척도로 차내 혼잡도에 관심을 갖는 연구들이다(Kim et al., 2012; Lee and Park, 2015).

본 연구는 혼잡통행료라는 정책수단 시행으로 변화되는 대중교통수단 차내 혼잡도를 관찰하고, 대중교통수단 차내 혼잡도를 통제할 경우, 발생하는 사회적 효용 변화를 측정하고 원인을 규명한다. 이에 본 연구는 Tscharaktschiew and Hirte(2012), Rhee and Yu(2013), 그리고 Rhee et al.(2014) 등에서 사용된 확률균형모형을 사용한다. 확률균형모형은 가구가 주거지-직장 간 선행행위를 확률론적 구성요소(Stochastic part)를 통해 표현할 수 있는 모형으로 Anas and Kim(1996)을 시원으로 한다. 하지만, Rhee and Yu(2013)와 Rhee et al.(2014)는 Tscharaktschiew and Hirte(2012)의 노동공급의 변화를 포함시키지 않았고, Rhee et al.(2014)는 수단선택 조건을 포함하고 있지 않다. 본 연구는 가구가 주거지-직장 입지와 수단선택이 가능한 도시에서 혼잡통행료 시행으로 인한 구역별 대중교통수단의 차내 혼잡도 변화를 관찰하기 위해 다핵도시 기반 수단선택 조건이 포함된 확률균형모형을 구축하여 실험한다. 또한 혼잡통행료로 인한 사회적 효용 변화와 구역별 통행하는 대중교통수단 차내 혼잡도 변화의 원인을 규명하기 위해 Rhee and Yu(2013), Rhee(2014), 그리고 Rhee et al.(2014)에서 제안한 효용분해 방법론을 분석목적에 맞게 응용한다.

모형의 구축

1. 모형의 개요

모형에서 개별 시장(토지, 노동, 소비와 생산)들은 상호 연계되며, 가구는 주거지-직장 쌍과 통행수단을 자유롭게 선택할 수 있다. 특히 모형 속 가구는 현실도시 속 가구와 유사하게 입지에 대한 특이성을 가지고 있어, 혼합된 토지이용(주거용지와 생산용지)과 통행패턴을 발현시킨다(Tscharaktschiew and Hirte, 2012). p_i , w_i , r_i 는 내생적으로 결정되는 구역별 상품가격, 임금, 지대(地代)를 각각 나타낸다. 모형 속 외부비용은 차외 교통혼잡으로 발생된 통행시간이 유일하고, 통행시간 g_i^m 은 통근목적 통행수요 F_i^m 에 의해 결정된다. 따라서 혼잡통행료 t_i^m 가 징수될 경우, 가구는 입지변화, 통행수단 전환, 근로일 수 d_i^m (=노동공급량=교통수요, Rhee, 2014)9) 조정을 통해 각자는 효용을 증진시킨다. 첨자 i, j, k, n 는 구역명칭, $\iota = \{i, j\}$ 는 주거지-직장 쌍²⁾, a 는 구역 중심을 연결하는 링크, m 은 통행수단으로 승용차($m=1$)와 대중교통수단($m=2$)으로 구분된다.

2. 기업의 생산

생산기업은 이윤극대화 $\pi = p_j X_j - w_j M_j - r_i Q_i$ 를 목적으로 노동시간 M_j 과 생산용지 Q_i 의 투입량을 결정하고 생산기업의 입지 j 구역을 결정한다. 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 생산함수를 활용한 본 모형에서 j 구역에 입지한 생산기업의 생산량 $X_j = EM_j^\mu Q_j^{1-\mu}$ 으로 결정되고 E 는 규모모수(Scale parameter)이다. j 구역 생산품가격 p_j 는 0이윤조건을 충족하기 위해 내생적으로 결정된 w_j 와 r_i 을 이용하여 결정된다.

3. 가구의 소비

주거지-직장 쌍 ι 을 갖고 통행수단 m 을 이용하는 가구(ι, m)는 소비재 z_i^m 는 직장이 위치한 j 구역에서 p_j 가격을 주고 구매하고, 주거용지 q_i^m 는 r_i 가격을 지불하고 소비한다(Equation(1)). 또한 가구(ι, m)는 월간 총 가용시간 H 중 월간 통행시간 $d_i^m \times g_i^m$ 을 제외한 여가시간 l_i^m 를 소비한다. 여기서 d_i^m 은 월간 총 근로일 수이고, g_i^m 은 통근 시간으로 2가 곱해질 경우 왕복 통행시간이 된다(Equation(3)).

가구(ι, m)는 하루 8시간씩 시간당 임금 w_j 을 받고 d_i^m 일 동안 근무하고 얻게 된 근로수입과 근로 외 수입 R 이 합쳐진 월간 총 수입 Ω_i^m 을 이용하여 z_i^m 와 q_i^m 를 소비한다(Equation(1)). 혼잡통행료가 징수될 경우, t_i^m 가 수입에서 지출되고 R (dividend)은 총 지대수입과 혼잡통행료 징수액 G 를 전체 가구 수 N 으로 나누어 공평하게 가구들에게 배분된다(Equation(2)). 지대수입은 도로면적 $Road_a$ 을 제외한 나머지 용지에서 발생하고, δ_{ia} 는 i 구역과 $Road_a$ 을 연결시키는 결합행렬로 i 구역에 링크 a 가 연결된 경우 1이고, 그렇지 않은 경우는 0이다.

$$p_j z_i^m + r_i q_i^m = (8w_j - 2t_i^m) d_i^m + R \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{N} (r_i (A_i - \delta_{ia} Road_a) + G), \quad G = 2 \sum F_i^m t_i^m \quad (2)$$

$$H = (8 + 2g_i^m) d_i^m + l_i^m \quad (3)$$

4. 가구의 선택

가구(ι, m)는 주거지-직장 쌍 ι 과 통행수단 m 을 선택하고, 효용극대화를 달성하기 위해 3가지 단계를 거친다. 첫 번째 단계에서, 가구는 모든 실현가능한 주거지-직장 쌍 ι 과 통행수단 m 에 대한 소비묶음 $\{z, q, l\}$ 을 결정한다. 다음 단계에서 가구는 입지가 가능한 주거지-직장 쌍 ι 에 대한 수단별 통행수요 m 을 결정하고, 마지막 단계에서 효용극대화를 위한 주거지-직장 쌍 ι 을 최종 선택하여 최종적으로 각자의 효용극대화에 도달한다(Figure 1). 가구의 효용함수 $U_i^m = u[\cdot] + \epsilon_i + \epsilon_i^m$ 는 소비재 z_i^m , 주거용지 q_i^m (m^2), 여가시간 l_i^m (시간/월)으로 구성되고, 여기에 확률론적 구성요소(Stochastic part)인 가구의 특이성(Idiosyncratic taste)이 더해져 완성된다. ϵ_i 과 ϵ_i^m 은 주거지-직장 쌍 과 통행수단 선택 시 가구의 특이성을 각각 나타내는 굼벨분포(Gumbel distribution)를 따르는 연속확률변수이다.

$$U_i^m = u_i^m + \epsilon_i + \epsilon_i^m = \alpha \ln z_i^m + \beta \ln q_i^m + \gamma \ln l_i^m + \epsilon_i + \epsilon_i^m \quad (4)$$

where $0 < \alpha, \beta, \gamma < 1$ 그리고 $\alpha + \beta + \gamma = 1$

2) i 구역에서 거주하고 j 구역으로 통행하는 가구

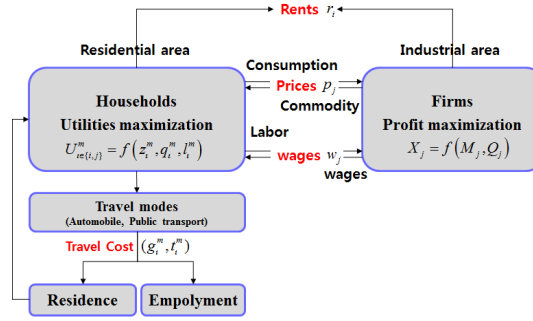


Figure 1. The structure of spatial model and household's decision

P_i 은 가구의 i 를 선택할 확률이며, $P_{m|i}$ 은 i 가 주어진 상태에서 m 을 선택할 조건부 확률이다. 주거지-직장 쌍의 효용 S_i 는 $\max_m (u_i^m + \epsilon_i^m)$ 가 굼벨분포를 가정함에 따라 위치모수(Location parameter)를 0으로 가정하면 기대효용은 $\frac{1}{\lambda_M} \ln \sum_m \exp \lambda_M u_i^m$ 으로 정식화 된다(Ben-Akiva and Lerman, 1985). λ_M 과 λ_L 은 굼벨분포의 분산모수(Dispersion parameter)로서 $\pi/(\sigma/\sqrt{6})$ 이다(Ben-Akiva and Lerman, 1985). 이들은 다항로지스틱 형태로 $P_i^m = P_i \times P_{m|i}$ 이고 $\sum_{i,m} P_i^m = 1$ 된다.

$$P_i = \frac{\exp \lambda_L S_i}{\sum_{i'} \exp \lambda_L S_{i'}}, P_{m|i} = \frac{\exp \lambda_M u_i^m}{\sum_m \exp \lambda_M u_i^m} \tag{5}$$

대표가구(代表家口)의 효용수준 W 는 기대가능한 최대의 효용수준 $E[\max_i (S_i + \epsilon_i)]$ 으로 측정된다(이혁주, 2012). 이때 굼벨분포의 특성에 따라 ϵ_i 이 굼벨분포이면 $\max_i (S_i + \epsilon_i)$ 도 굼벨분포이며, 확률변수 $\max_i (S_i + \epsilon_i)$ 의 기대치는 Equation(6)으로 주어진다(Ben-Akiva and Lerman, 1985).

$$W = E[\max_i (S_i + \epsilon_i)] = \frac{1}{\lambda_L} \ln \sum_i \exp \lambda_L S_i \tag{6}$$

Equation(6)은 간소한 대수적 과정을 통해 이해하기 쉬운 Equation(7)로 다시 표현할 수 있다(Anas, 1999). Equation(7)의 우변 첫 번째 항은 비특이성 효용(Non-idiosyncratic utilities)들의 평균이며, 두 번째 항은 가구의 특이성으로 인해 발생하는 잔여효용의 평균이다(Anas and Rhee, 2006).

$$W = \sum_i P_i S_i + \frac{1}{\lambda_L} \sum_i P_i (-\ln P_i) \tag{7}$$

5. 혼잡의 발생

통행수단 m 을 이용하여 i 구역에서 j 구역까지 한 달 동안 통행하는 총 근로자 수는 $F_i^m = NP_i P_{m|i} d_i^m$ 이다. 통행수단 m 을 이용하여 링크 a 를 통행하는 통행수요는 출발통행, 도착통행, 그리고 통과통행으로 구성되고 $F_a^m = \sum_i \delta_a^i F_i^m$ 으로 계산된다. δ_a^i 은 i 에 속하는 링크 a 를 표시하는 결합행렬이다. BPR함수로 정의되는 링크 a 내

m 의 통행시간 g_a^m 은 대중교통 전용차로가 없는 경우, 승용차와 대중교통수단이 도로를 함께 사용함에 따라 $g_a^{m=1}$ 과 $g_a^{m=2}$ 은 같고 통행수단의 구별은 사라진다($g_a = g_a^m$)(Equation(8)). a_1 는 자유류 상태의 통행속도(km/h)이고 a_2 와 a_3 는 마찰계수이다. 대중교통 전용차로가 있는 경우, 링크의 교통처리용량 K_a 과 FC_a 는 m 으로 구분되어 $g_a^{m=1}$ 과 $g_a^{m=2}$ 는 서로 다르다. 대중교통수단 탑승객 한명의 유발교통량 $\phi_a^{m=2}$ 은 대중교통수단의 승용차 환산계수($\phi > 1$)를 대중교통수단 탑승객 수(인원/대)로 나눔에 따라 $0 < \phi_a^{m=2} < 1$ 이다. 승용차는 탑승인원을 1명으로 가정함에 따라 $\phi_a^{m=1} = 1$ 이다.

$$g_a^m = a_1 \left[1 + a_2 \left(\frac{FC_a}{K_a} \right)^{a_3} \right], FC_a = \sum_m \phi_a^m F_a^m \tag{8}$$

통행수단 m 이 i 구역에서 j 구역까지 도달하는 통행시간 g_i^m 은 g_a^m 에 도로연장 Δ_a 을 곱하여 산정되며 $m = 2$ 의 경우, 통행자의 정류소 대기시간 $wait$ 이 추가된다(Equation(9)). 링크별 혼잡통행료 t_a^m 이 부과되는 경우, 통행수단 m 의 구역 간 혼잡통행료 t_i^m 는 Equation(9)의 우변 두 번째 항이 제거된 상태에서 첫 번째 항의 g_a^m 을 t_a^m 으로 교체하여 산정된다. 이러한 방식은 사회적 비용 Ex_a^m 이 포함된 구역 간 사회적 비용 Ex_i^m 을 계산할 때도 동일하다.

$$g_i^m = \sum_a \delta_a^t g_a^m \frac{\Delta_a}{2} + wait(m - 1) \tag{9}$$

본 연구의 관심대상인 대중교통수단의 차내 혼잡도는 차내 서비스수준 LOS_a (m²/인)으로 측정되고 $\phi_a^{m=2}$ 는 $\phi LOS_a / S$ 로 산정된다. ϕ 와 S 는 대중교통수단의 승용차 환산계수와 차량면적을 각각 의미하고, 본 연구에 $\phi=2.5$ 와 $S=26.67$ m²/대(입석형 도시형버스)를 기준으로 한다(MOLIT, 2013).

혼잡의 외부효과는 통행자가 도로를 사용함으로 인해 다른 통행자가 부과하게 되는 사회적 한계비용에서 사적 통행비용을 차감한 것으로, 이는 피구세와 동일하다. 링크 a 의 사회적 비용 TC_a 은 통행자의 기회비용 w_a^m 을 적용할 경우, $\sum_m w_a^m F_a^m g_a^m$ 으로 산정된다. 따라서, 혼잡의 금전적인 외부효과는 $Ex_a^m = \partial TC_a / \partial F_a^m - w_a^m g_a^m$ 을 통해 Equation(10)로 정식화된다. 대중교통 전용차로가 시행되지 않는 경우, g_a^m 에서 m 에 대한 구분은 사라진다.

$$Ex_a^m = \sum_m w_a^{m'} F_a^{m'} \frac{\partial g_a^m}{\partial F_a^m} \tag{10}$$

Equation(10)의 $\frac{\partial g_a^m}{\partial F_a^m}$ 는 Equation(11)로 전개되고, $m=2$ 인 경우, $\frac{\partial FC_a^m}{\partial F_a^m} = \phi_a^m + F_a \frac{\partial \phi_a^m}{\partial F_a^m} = A_a^m$ 이다 ($A_a^{m=1} = \phi_a^{m=1}$). 대중교통수단 차내 혼잡도가 고정된 경우, $A_a^m = \phi_a^m$ 으로 단순화되지만, 대중교통수단 차내 혼잡도가 변화되는 경우, $\partial \phi_a^m / \partial F_a^m$ 는 고려되어야 하며 $-\phi_a^m / F_a^m$ 로 산정된다. 결국 $A_a^{m=1} = \phi_a^{m=1}$ 와 $A_a^{m=2} = 0$ 로 결정되는데, 이는 대중교통수단 차내 혼잡도가 대중교통 수요변화에 영향을 받는 경우, 대중교통수단은 차내 혼잡도를 변화시켜 승용차와 간섭되는 외부효과를 통제하는 것으로 풀이된다. 이에 본 연구에서는 대중

교통수단 차내 혼잡도가 통제된 상황과 통제되지 않는 상황에서 혼잡통행료 징수의 효과를 측정하고 비교한다.

$$\frac{\partial g_a}{\partial F_a^m} = \frac{\partial g_a}{\partial FC_a} \frac{\partial FC_a}{\partial F_a^m} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{FC_a}{K_a} \right)^{a_3 - 1} \frac{1}{K_a} \underbrace{\frac{\partial FC_a}{\partial F_a^m}}_{= A_a^m} \quad (11)$$

6. 모형의 연산과정

모형의 연산과정은 모형이 일반균형 상태에 도달할 때까지 총 4가지 단계를 거치게 된다. 첫 번째 과정은 생산기업의 이윤극대화와 가구의 효용극대화를 찾는 과정으로 가구와 생산기업은 각각의 최종목적을 달성함으로써 균형 상태를 이루게 된다. 이러한 균형 상태에서 가구의 $\{z_i^m, q_i^m, l_i^m\}$ 과 생산기업의 $\{M_j, Q_j\}$ 가 결정된다. 두 번째 과정은 토지시장, 생산(=소비)시장, 노동시장 균형조건을 이용하여 균형가격 $\{r_j, p_j, w_j\}$ 을 찾는 과정이다. 토지시장의 균형가격 r_j 는 생산시설의 토지수요 함수와 가구의 토지수요를 대입한 후 그 결과를 r_j 로 정리한 것이고, 생산시장의 균형가격 p_j 는 생산기업의 수입이 비용과 동일하다는 0이윤조건 아래 생산요소 함수를 이용하여 도출된다. 마지막으로 노동시장 균형가격 w_j 는 생산시설의 노동수요 함수와 가구의 여가시간 수요를 대입한 후 그 결과를 w_j 로 정리하여 계산된다. 본 모형에서 r_j 와 w_j 는 수렴속도를 고려하여 뉴턴-랩슨 방식(Newton-Raphson method)을 이용하였다.

세 번째 과정은 교통부문을 토지이용모형 내부에 포함시키는 과정으로 교통비용 최소화를 위한 가구의 개별행위들이 가구의 효용과 생산기업의 이윤에 반영되도록 하였다. 마지막 과정은 지금까지 도출된 연립방정식들이 일반적인 사고과정에 위배되지 않고 상호 연산될 수 있도록 수식을 배치하는 과정이다. 본 연구는 안정된 일반균형 상태에 도달할 수 있도록 가구의 소비를 시작으로 가구의 선택, 교통부문, 기업의 생산, 균형가격, 그리고 마지막으로 균형조건이 충족될 수 있도록 나열한다. 본 모형에서 일반균형의 성립은 변수별 검사와 시장균형 조건별 검사로 구분되고 반복(iteration) 후 모든 값들이 반복 전 값들과 $|10^{-8}\%|$ 이하인 경우 일반균형이 성립한 것으로 규정한다. 따라서 사회적 효용 W 는 일반균형 조건이 완료된 상태에서 도출될 개별 가구의 효용을 이용하여 최종 계산된다.

효용함수의 분해

본 연구는 혼잡통행료 시행으로 인한 사회적 효용 W 변화를 관찰코자, Rhee and Yu(2013), Rhee(2014), 그리고 Rhee et al.(2014)의 효용분해 방법론을 응용한다. 이들 연구에서 구현된 효용분해 방법론은 기존 일반균형 하에서 어떤 변수의 변화율을 Roy의 항등식(Roy's identity)을 이용하여 풀어낸 번거로운 작업을 포락선 정리를 통해 매우 간결하게 유도할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Rhee, 2014). 본 분석은 t_a^m 시행 전과 후 사회적 효용 W 변화로 W 는 간접효용함수로 구성되고, 간접효용함수는 가격벡터 (r, p, w) 와 정책변수 t_a^m 의 함수이기 때문에 Equation(10)으로 전개된다.

$$\frac{dW}{dt_a^m} = \sum_{in} \sum_m P_t^{m'} \frac{\partial V_t^{m'}}{\partial r_n} \frac{dr_n}{dt_a^m} + \sum_{in} \sum_m P_t^{m'} \frac{\partial V_t^{m'}}{\partial p_n} \frac{dp_n}{dt_a^m} + \sum_{in} \sum_m P_t^{m'} \frac{\partial V_t^{m'}}{\partial w_n} \frac{dw_n}{dt_a^m} + \sum_{in} \sum_m P_t^{m'} \frac{\partial V_t^{m'}}{\partial t_a^m} \quad (12)$$

Equation(12)의 우변 마지막 항은 t_a^m 가 W 에 직접적으로 영향을 미치는 ‘직접효과’이고, 나머지 3개항은 t_a^m 가 $\{r, p, w\}$ 를 변화시켜 W 에 영향을 미치는 ‘간접효과’이다. 가구의 효용극대화 문제를 풀기 위해 라그랑지안 Equation(13)이 구성된다. $\theta_i^m = 1/(w_i^m H + R)$ 은 가구 총소득의 한계효용이고($\bar{\theta} = \sum_{im} P_t^m \theta_i^m$), w_i^m 은 시간의 기회비용이다.

$$L = u(z_i^m, q_i^m, l_i^m) + \theta_i^m (w_i^m H + R - p_j z_i^m - r_i q_i^m - w_i^m l_i^m) \tag{13}$$

포락선 정리를 이용하여, Equation(12)의 첫 번째 항, r_n 의 변화로 발생하는 간접효과는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i^m}{\partial r_n} &= \frac{\partial L}{\partial r_n} = \frac{\partial}{\partial r_n} [u(z_i^m, q_i^m, l_i^m) + \theta_i^m (w_i^m H + R - p_j z_i^m - r_i q_i^m - w_i^m l_i^m)] \\ &= \theta_i^m \left(\frac{\partial R}{\partial r_n} - \delta_{in} q_i^m \right) = \theta_i^m \left(\frac{\partial}{\partial r_n} \left(\frac{1}{N} (r_i (A_i - \delta_{ia} Road_a) + 2 \sum_{i'm} F_{i'm}^m t_{i'm}^m) \right) - \delta_{in} q_i^m \right) \\ &= \theta_i^m \left(\frac{1}{N} (A_n - \delta_{in} Road_a) - \delta_{in} q_i^m \right) \end{aligned}$$

p_n 과 w_n 역시 동일한 방법을 이용하여 도함수를 구하고, 이를 Equation(12)에 각각 대입하면, $\{r, p, w\}$ 에 대한 간접효과는 체계적 부분과 공분산 부분으로 구분된다.(Equation(14)). 하지만 간접효과의 체계적 부분은 0으로 결정되어 공분산 부분만 남게 된다(Rhee and Yu, 2013).

$$\text{Equation(12) 처음 3개항} = 0 + \sum_{i'm} P_{i'm}^m (\bar{\theta} - \theta_i^m) \left(q_i^m \frac{dr_i}{dt_a^m} + z_i^m \frac{dp_j}{dt_a^m} - 8d_{i'm}^m \frac{dw_j}{dt_a^m} \right) \tag{14}$$

Rhee and Yu(2011, 2013)이 설명한 것과 같이 $\{r, p, w\}$ 에 대한 효과는 무시할 정도로 작은 값을 가짐에 따라, t_a^m 시행으로 인한 효용변화는 Equation(12)의 마지막 항인 직접효과에서 대부분 포착된다. 직접효과 역시 유사한 과정을 밟아 정리하면, Equation(15)의 체계적 부분과 공분산 부분(마지막 항)으로 유도된다.

$$\text{Equation(12) 마지막 항} = \frac{\bar{\theta}}{N} \sum_{a'm'} \Delta_{a'm'} t_{a'm'}^m - \frac{\bar{\theta}}{N} \sum_{i'm} 2w_{i'm}^m F_{i'm}^m \frac{\partial g_{i'm}^m}{\partial t_a^m} + \sum_{i'm} P_{i'm}^m (\bar{\theta} - \theta_i^m) \left(2w_{i'm}^m d_{i'm}^m \frac{\partial g_{i'm}^m}{\partial t_a^m} + 2d_{i'm}^m \frac{\partial t_{i'm}^m}{\partial t_a^m} \right) \tag{15}$$

t_a^m 시행으로 인한 W 의 변화를 분해하여 살펴보기 위해, Equation(14),(15)을 합치고, 수학적 오류없이 대수적 조작을 통해 전개할 경우, Equation(16)이 최종 도출된다. Equation(14) 우변 마지막 항 cov_a^m 은 Equation(14)과 Equation(15)의 우변 마지막 항, 공분산항들을 모아놓은 것이다. Equation(16) 우변 첫 번째 항은 ‘입지 효과’로 정책실행에 따른 가구의 주거지-직장 쌍 ι 변경에 대한 효용변화, 두 번째 항은 ‘수단전환 효과’로 가구의 통행수단 전환에 따른 효용변화, 세 번째 항은 ‘노동공급 효과’로 가구의 근로일 수의 변화로 인한 효용변화를 나타낸다. 가구의 근로일 수가 고정되는 경우($d = d_i^m$), 세 번째 항은 사라진다.

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt_a^m} &= \frac{\bar{c}}{N} \sum_{i'm'} 2(t_i^m - Ex_i^m) NP_{m'i} d_{i'm}^m \frac{\partial P_i}{\partial t_a^m} \\ &+ \frac{\bar{c}}{N} \sum_{i'm'} 2(t_i^m - Ex_i^m) NP_i d_{i'm}^m \frac{\partial P_{m'i}}{\partial t_a^m} \\ &+ \frac{\bar{c}}{N} \sum_{i'm'} 2(t_i^m - Ex_i^m) NP_i P_{m'i} \frac{\partial d_{i'm}^m}{\partial t_a^m} \\ &+ cov_a^m \end{aligned} \tag{16}$$

모의실험

1. 실험 개요

본 연구에서 ‘기준도시(Reference city)’는 혼잡통행료가 시행되지 않는 다섯 개 구역으로 이루어진 혼잡한 도시이고 구역3이 가장 혼잡한 도심구역인 대칭도시이다(Figure 2). 기준도시는 대중교통 전용차로의 운영여부에 따라 두 가지로 분류되고(Not operating(A) vs Operating(B)), 혼잡통행료 징수 시 대중교통수단 차내 혼잡도를 고정시켰거나 그렇지 않은 경우(fixed(a) vs variable(b))에 따라 혼잡통행료 시행의 효과와 대중교통수단 차내 혼잡도는 관찰된다(Table 2, 첫 번째와 두 번째 열 참고). 기준도시(A)의 평균 통행속도는 25km/hr이고, 기준도시(B)의 경우, 승용차 이용도로의 통행속도는 기준도시(A)와 유사하지만, 평균 통행속도는 대중교통 전용차로의 설치로 인해 기준도시(A)에 비하여 혼잡이 완화된 36km/hr이다. 기준도시 (A)와 (B)의 대중교통 분담률은 50% 보다 높고, 대중교통 이용자는 승용차 이용자에 비하여 정류소 대기시간이 추가되어 왕복통행 시 10분을 추가로 소비한다.

본 연구의 관찰대상인 대중교통수단 혼잡도는 구역3은 LOS F($\leq 0.43\text{m}^2/\text{인}$), 구역 2(=구역 4)는 LOS B($0.84 < \text{LOS B} \leq 1.7\text{m}^2/\text{인}$), 구역 1(=구역 5)는 LOS A($> 1.7\text{m}^2/\text{인}$)이다(버스 기준; MOLIT, 2013). 기준도시(A)와 (B)의 대중교통수단 차내 혼잡도는 (a)의 경우 혼잡수준을 고정시키고 있는바, 혼잡통행료 시행 전과 후의 대중교통수단 차내 혼잡도는 일정하다(Table 2). 본 연구에서 이용된 모수들은 선행연구들에서 사용한 모수를 기준으로, 현실도시에서 대체로 관찰되는 도시환경이 구현되도록 모수 조정을 통해 선정하였고, 이들은 모든 모형에서 동일하게 적용된다(Table 1).

본 연구에서 시행된 혼잡통행료 징수방식은 대중교통 전용차로 유무(A vs B)와 차내 혼잡도 고정 유무(a vs b)에 따라 pigou toll(피구세), SB toll(차선의 혼잡통행료), FB toll(최선의 혼잡통행료)로 구분된다. pigou toll은 Equation(8)로 계산되고, 승용차 이용자가 징수대상인 SB toll과 모든 이용자가 징수대상인 FB toll은 각각 수치해석을 통해 효용수준이 최대화되는 지점에서 결정된다. 따라서, FB toll이 징수되는 도시의 $W_{FB} \geq \max\{W_{SB}, W_{pigou}\}$ 고 각각의 상대적 효율성은 $(W_t - W_{기준도시}) / (W_{FB} - W_{기준도시}) \times 100$, $t \in \{\text{pigou toll, SB toll}\}$ 로 계산된다(Table 2의 네 번째 열).

2. 실험 결과

Table 2는 대중교통 전용차로 유무(A vs B)와 대중교통수단 차내 혼잡수준 고정 유무(a vs b)에 따른 징수방식별 FB toll에 대한 상대적 효율성과 대중교통수단 차내 혼잡수준 변화를 보여주고 있다. 대중교통 전용차로가 없고 차내 혼잡도가 고정되어 있는 (A-a)에서 pigou toll의 상대적 효율성은 SB toll에 비하여 낮다. (A-b)도 (A-a)와 유사한 패턴을 보여주지만 SB toll의 효용증진 효과가 FB toll에 더욱 근사해짐을 확인할 수 있다. (B)의 pigou toll은 (A)의 pigou toll과 비교해 낮은 상대적 효율성을 보여주며, 더욱이 (B-a)의 SB toll은 pigou toll 보다도 낮은 효용증진

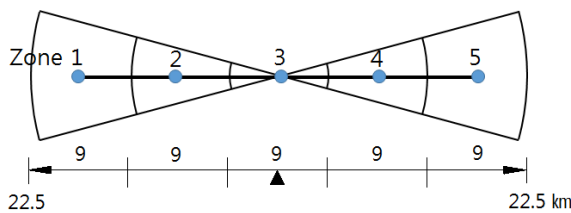


Figure 2. Physical shapes of the city

Table 1. Reference parameters

Geography (see Figure 2)	
Unit section radians: 1.5° in each direction	
Radius of the city: 22.5km (Zone length=9km)	
Resident-Workers	
N = 21,000 household	
Gross pop. density=4,700 people/km ²	
Total time endowment: H = 500	
Household's budget shares: $\alpha=0.36, \beta=0.15, \gamma=0.49$	
$\lambda_m=3, \lambda_L=6$ (dispersion parameter)	
Annual household income: KRW 38 million	
Transport	
$a_1=1/80, a_2=0.27, a_3=5.32$	

효과를 보여준다. (A-b)와 (B-b)는 혼잡통행료 시행에 따른 대중교통 수요 변화가 발생시킬 외부비용을 대중교통 수단 차내 혼잡도가 흡수하여 대중교통수단 차외 혼잡비용은 일정하고 차내 혼잡도는 악화된다. 특히, 도심 외곽구역들에서 대중교통수단 차내 혼잡도는 더욱 악화된다. (A-b)의 대중교통수단 차내 혼잡도 악화는 대중교통 전용차로를 가지고 있는 (B-b)에 비하여 매우 크다. 하지만 (A-b)와 (B-b) 모두에서 FB toll의 차내 혼잡 악화는 나머지 정책들에 비하여 낮은 데, 이는 흥미로운 점이다.

Table 2. Relative efficiency and level of service in public transport

Bus only lane	LOS in Bus	Type	Relative eff. (%)	Level of Service (m ² /pax)		
				Zone 3	Zone 4	Zone 5
Not operating (A)	fixed (a)	Pigou toll	90.8%	0.379	0.912	2.570
		SB toll	96.3%			
		FB toll	100.0%			
	variable (b)	Pigou toll	90.3%	0.305	0.755	2.219
		SB toll	98.1%	0.318	0.781	2.280
		FB toll	100.0%	0.321	0.795	2.358
Operating (B)	fixed (a)	Pigou toll	78.4%	0.347	0.851	2.489
		SB toll	58.6%			
		FB toll	100.0%			
	variable (b)	Pigou toll	63.9%	0.348	0.846	2.443
		SB toll	97.9%	0.346	0.845	2.454
		FB toll	100.0%	0.345	0.846	2.479

Table 3은 Table 2의 결과를 분석적으로 관찰코자 Equation(16)를 이용하여 계산된 요인별 효용증진 효과이다. Table 3의 4번째 열은 Equation(12)의 좌변 값이고, 다섯 번째 열은 Equation(12)의 우변을 요인별로 분해한 후, 각각의 효용증진 규모를 합한 값으로 마지막 열은 풀이하지 못한 오차율이다.

Table 3에서 pigou toll의 효용증진 수준이 최선의 정책수단이 되지 못하는 이유는 공분산(Cov.) 항이 나머지 항들의 효용증진 규모를 다른 징수방식에 비하여 크게 상쇄시키기 때문이다. 공분산 항은 혼잡통행료 징수가 가구 소득의 한계효용을 변화시켜 발생된 것으로 일반균형조건 아래, pigou toll은 공분산 항이 가져올 효용손실을 간과하고 있기 때문이다(Equation(14),(15)의 우변 마지막 항 첫 번째 괄호). (B)의 경우, pigou toll의 상대적 효용이 (A)의 경우와 비교하여 낮은 이유 역시 공분산 항 때문이다. FB toll이 최선의 혼잡통행료로 인정받고, 대중교통수단 차내 혼잡도 악화가 상대적으로 크지 않은 주요요인은 공분산 항의 효용손실을 최소화하였기 때문이며, 부가적 요인은 가구가 근로일수 조절을 통해 효용증진을 가져온 노동공급 효과(Labor)가 상대적으로 우수하였기 때문이다. FB toll의 공분산 항에 대한 효과는 근로일 수를 고정시킨 경우($d = d_i^m$)에도 동일한 방향성을 갖는다.

도시 가구들은 주거지-직장 입지와 통행수단 전환을 통해 효용증진을 가져온다. 따라서 (A-b)와 (B-b)에서 도심 외곽구역으로 갈수록 차내 혼잡도가 더욱 악화되는 이유는 입지효과(Location) 때문이다. (B-a)는 (B-b)를 비롯한 다른 경우와 다르게 입지효과가 수단전환 효과(Mode)에 비하여 월등하게 큰 것으로 나타난다. 이러한 이유는 (B-a)의 경우, 승용차 이용자의 수단전환 보다 대중교통 이용자의 직주근접성 강화가 (B-b)보다 상대적으로 많았기 때문으로, 이는 대중교통 전용차로 유무와 차내 혼잡도 고정유무에서 발견되는 혼잡도 차이에서 기인된 것으로 해석된다.

Figure 3은 pigou toll를 시행하는 경우, 도로의 혼잡도 변화를 통한 입지효과와 수단전환 효과를 비교한 것이다. Figure 3에서 ϕ 는 Equation(8)의 K_a 와 $K_a^m = 2$ 에 곱해서 도로의 혼잡도를 완화시키는 역할을 한다. Figure 3의 (a) 그래프는 (A-a)의 경우, 도로의 혼잡도가 낮아짐에 따라 입지효과가 증가하여 두 개의 효과가 유사해짐을 보여주고, (b)그래프는 (B-a)의 경우, 대중교통 전용차로의 혼잡수준이 낮아져 수단전환 효과가 증가하여 두 개의 효과가

유사해집을 보여주고 있다. (a)그래프에서는 대중교통 전용차로가 없고 도로의 혼잡도가 낮아질 경우, 승용차 이용자는 수단전환보다는 직주접근성을 선호함을 확인할 수 있고, (b)그래프에서는 대중교통 전용차로의 혼잡수준이 상대적으로 크게 낮은 경우, 승용차 이용자는 수단전환을 선호한다는 것을 보여준다. 후자의 경우, 대중교통 전용차로의 극단적인 혼잡완화는 대중교통수단 차내 혼잡도가 대중교통수단의 차외 혼잡도 악화를 흡수하는 (B-b)(\approx (B-a))의 상황과 근사해질 수 있음을 확인시켜 준다.

Table 3. Welfare gain by factor

(unit: 1e3*KRW/HH/year)

Bus only lane	LOS in Bus	Type	Welfare gain		Welfare gain by factor				
					Sum	Location	Mode	Labor	Cov.
Not operating (A)	fixed (a)	Pigou toll	325	318	68	177	235	-161	2.1%
		SB toll	346	342	52	184	218	-112	1.3%
		FB toll	360	355	49	168	242	-104	1.3%
	variable (b)	Pigou toll	342	335	54	213	240	-172	2.2%
		SB toll	373	368	45	208	231	-117	1.3%
		FB toll	380	375	38	200	247	-109	1.3%
Operating (B)	fixed (a)	Pigou toll	64	62	58	7	72	-74	2.6%
		SB toll	48	47	34	7	42	-37	1.1%
		FB toll	82	81	48	5	71	-43	1.1%
	variable (b)	Pigou toll	34	33	23	39	40	-69	4.0%
		SB toll	53	52	17	35	36	-37	1.1%
		FB toll	54	53	15	35	38	-35	1.1%

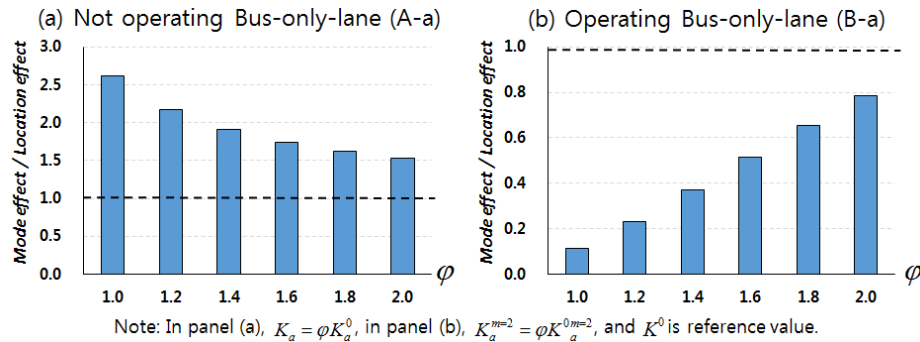


Figure 3. Mode effect vs. location effect

결론

혼잡통행료 징수는 혼잡이 심각한 도시에서 도로의 혼잡완화를 통해 사회적 효용을 증진시키는 대표적인 통행수요 억제정책이다. 보편적으로 혼잡통행료 징수는 대중교통수단 이용자가 아닌 통행비용이 과소책정된 승용차 이용자를 대상으로 한다. 혼잡통행료가 징수될 경우, 승용차 이용자는 혼잡통행료를 회피 또는 부담을 최소화하기 위해 1) 직주근접성을 강화시키거나, 2) 대중교통으로 통행수단을 전환하거나, 또는 3) 통행횟수 최소화를 선택한다. 이들 중 선행연구들에서 가장 크게 주목받은 방법은 대중교통으로의 수단전환 방법으로, 해당 방법은 대중교통수단 탑승객 한명의 유발교통량이 승용차 이용자 한명의 유발교통량보다 적기 때문에 효과적이다. 따라서 혼잡통행료 징수는 승용차가 발생시키는 차외 혼잡을 대중교통수단이 차내 혼잡으로 흡수하는 정책수단이라고 풀이할 수 있다. 결국 혼잡통행료의 시행은 대중교통수단 차내 혼잡도를 악화시키는 요인이고, 보다 효과 좋은 혼잡통행료 징수방식은 대중교통수단의 그것을 더욱 악화시키는 것으로 추정될 수 있다. 물론 상기의 논리적 기반은 외부비용은 차외 혼잡비용만으로 구성된다는 대부분의 선행연구들이 갖고 있는 제한된 환경을 전제로 한다.

본 연구에서 모든 혼잡통행료 징수방식은 대중교통수단 차내 혼잡도를 증가시키고, 대중교통 전용차로가 없는 경우 대중교통수단 차내 혼잡도는 더욱 악화된다. 그러나 최선의 혼잡통행료 징수는 다른 징수방식들에 비하여 대중교통수단 차내 혼잡도 악화를 최소화시키면서 본연의 임무를 완수한 것으로 확인된다. 이러한 원인은 최선의 혼잡통행료 징수가 통행자로 하여금 대중교통으로의 수단전환 뿐만 아니라 주거지-직장 입지와 통행횟수를 보다 합리적으로 선택하도록 유도시켰고 우발적인 왜곡효과를 최소화시켰기 때문이다. 본 연구에서 주목할 부분은 혼잡통행료 징수가 구역별 대중교통수단 차내 혼잡도를 다르게 악화시키고, 더욱이 도심 외곽구역의 대중교통수단 차내 혼잡도를 상대적으로 더욱 악화시킨다는 것이다. 이러한 결과는 지대가 낮은 도심 외곽구역에 거주하고 대중교통수단을 이용하는 가구가 저소득층이라고 가정할 경우, 혼잡통행료 징수로 인한 대중교통수단 차내 혼잡도 악화가 가져올 불편비용 대부분을 저소득층이 부담해야 한다는 형평성 문제가 발생할 수 있음을 지적하고 있다. 따라서 형평성 문제를 완화시키기 위해서는 도심 외곽구역에 대한 대중교통 노선 또는 배차간격과 같은 대중교통 운영프로그램 조정과 저소득층 대상으로 불편의 한계비용을 실질소득으로 지원해 주는 이용자 측면의 대중교통 요금 또는 조세 지원책이 고민되어야 한다.

본 연구는 선행연구들에서 다루지 않았고, 다루었더라도 혼잡비용을 구성하는 부분요소로 등장하였던 대중교통수단 차내 혼잡도를 혼잡통행료와 연계시켰고 변화를 관찰하였다. 본 연구는 대중교통 이용자의 증가가 정류소 대기시간과 승하차시간을 변화시키면서도 불구하고, 통행시간 변화의 손쉬운 해석을 위해 가구의 대중교통수단선택 시 외부비용으로 차외 통행시간과 고정된 정류소 대기시간만을 포함시켰다는 한계를 가지고 있다. 또한 본 연구에서 제안된 혼잡통행료 징수방식은 실제 운영되는 구역혼잡통행료 또는 진입통행료와는 다른 이론적 징수방식을 채택하고 있다. 향후, 본 연구의 심화된 논의와 현실성 확장을 위해서는 우선 대중교통수단 차내 혼잡도를 금전비용으로 환산하여 사회적 비용에 추가해야 할 것이며, 다음으로 대중교통 이용자의 통행시간 구성을 현실화하고, 마지막으로 실제 운영가능한 혼잡통행료 징수방식을 모형에 포함시켜 관찰해야 할 것이다.

REFERENCES

- Anas A. (1990), Congestion, Land Use and Job Dispersion, *Journal of Urban Economics*, 45, 451-473.
- Anas A., Kim I. K. (1996), General Equilibrium Models of Polycentric Urban Land Use With Endogenous Congestion and Job Agglomeration, *Journal of Urban Economics*, 40, 232-256.
- Anas A., Rhee H.-j. (2006), Curbing Excess Sprawl With Congestion Tolls and Urban Boundaries, *Regional Science and Urban Economics*, 36, 510-541.
- Basso L. J., Guevara A. C., Gschwender A., Fuster M. (2011), Congestion Pricing, Transit Subsidies and Dedicated Bus Lanes: Efficient and Practical Solutions to Congestion, *Transport Policy* 18, 676-684
- Basso L. J., Jara-Diaz S. R. (2012), Integrating Congestion Pricing, Transit Subsidies and Mode Choice, *Transportation Research Part A*, 46(6), 890-900.
- Ben-Akiva M., Lerman S. R. (1985), *Discrete Choice Analysis*, MIT Press.
- Borck R., Wrede M. (2008), Commuting Subsidies With two Transport Modes, *Journal of Urban Economics*, 63, 841-848.
- Kim W.g., Roh C.-g., Son B.s. (2012), Service Evaluation Models From Transit Users' Perspectives, *J. Korean Soc. Transp.*, 30(1), Korean Society of Transportation, 149-159.
- Lee J.y., Park J. H. (2015), The Impact of the Bus Use Environments on Users Stress: The Case of Daejeon City, *J. Korean Soc. Transp.*, 33(6), Korean Society of Transportation, 543-553.

- Lindsey R. (2006), Do Economists Reach a Conclusion on Road Pricing? The Intellectual History of an Idea, *Econ Journal Watch*, 3(2), 292-379.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Korea Highway Capacity Manual, Republic of Korea
- Parry I. W. H., Small K. A. (2009), Should urban transit be reduced?, *American Economic Review*, 99, 700-724.
- Rhee H.-j. (2012), Welfare Function of Theory-Based Spatial Equilibrium Models and Congestion Tolls, *The Journal of Korea Planners Association*, 47(4), 183-192.
- Rhee H.-j. (2014), Analysis of Congestion Tolls Using the Land Use-Transportation Model When Toll Revenues Are Recycled, *J. Korean Soc. Transp.*, 32(4), Korean Society of Transportation, 357-368.
- Rhee H.-J., Yu S.-g. (2011), A Study of the Welfare Function of a Spatial Equilibrium Model and the Implications, *The Journal of Korea Planners Association*, 46(4), 199-208.
- Rhee H.-J., Yu S.-g. (2013), An Analysis of the Causes of the Welfare Gain Achieved by Congestion Pricing and Transit Subsidies, *J. Korean Soc. Transp.*, 31(3), Korean Society of Transportation, 74-85.
- Rhee H.-j., Yu S.-g., Hirte G. (2014), Zoning in Cities With Traffic Congestion and Agglomeration Economics, *Regional Science and Urban Economics*, 44, 82-93.
- Tirachini A. (2012), Multimodal Pricing and the Optimal Design of Bus Services: New Elements and Extensions, Ph.D. thesis, The University of Sydney.
- Tirachini A., Hensher D.A., Rose J.M. (2014), Multimodal Pricing and Optimal Design of Urban Public Transport: The Interplay Between Traffic Congestion and Bus Crowding, *Transportation Research Part B*, 61, 33-54.
- Tscharaktschiew S., Hirte G. (2012), Should Subsidies to Urban Passenger Transport be Increased? A Spatial CGE Analysis for a German Metropolitan Area, *Transportation Research Part A*, 46, 285-309.