

혼잡통행료 산정에 관한 연구 - 중국 베이징의 사례 -

강 설* · 김호연**

A Study on Congestion Toll Pricing: The Case of Beijing, China

Xue Jiang* · Ho Yeon Kim**

요약 : 급속한 경제발전에 따라 중국 베이징에서 교통혼잡이 심각한 문제로 대두되고 있다. 혼잡통행료는 도로의 정체를 해결해주는 매우 효율적인 방법인데, 이의 시행에 있어 가장 중요한 과제는 혼잡통행료의 산출모형을 개발하는 것이다. 기존연구와 달리 본 논문은 이론적 논의에 그치지 않고 세 가지의 현실적 문제, 즉, 통행속도와 밀도의 관계, 통행의 시간비용, 최적통행량 산정방법의 도출에 집중하였다. 먼저 회귀분석을 통하여 통행속도와 밀도의 관계를 파악하고, 이어 설문조사 결과를 이용하여 통행의 시간비용을 추정하였다. 또한 수요곡선에 대한 정확한 정보가 없더라도 시행착오를 거쳐서 최적통행량을 산정할 수 있음을 보였다. 마지막으로 베이징 제2순환도로의 혼잡통행료 책정 시스템을 설계하고 요금의 적절한 징수방안을 제안하였다.

주요어 : 혼잡통행료, 속도-밀도 관계, 통행의 시간비용, 최적통행량, 시행착오법

Abstract : Due to the rapid economic development, traffic congestion has become a dire concern in Beijing, China. Levying a congestion toll is seen as the most effective solution to the problem. Building a congestion pricing model is a crucial step in implementing a workable toll scheme. Unlike previous attempts, this study not only covers the theoretical discussion but also considers three practical issues: the speed-density relationship, the value of travel time savings, and the determination of optimal traffic volume. We estimate the speed-density relationship by regression models and the value of travel time saved through survey results. We further suggest a way through which the government could identify the optimal traffic flow by a series of trial-and-errors, without the knowledge of exact road demand structure. Finally, a practical tolling scheme is proposed for Beijing's second ring road along with some policy recommendations.

Key Words : congestion toll, speed-density relationship, value of travel time savings, optimal traffic volume, trial-and-error method

* 중국 하남성 발전개혁위원회 연구원(Research Specialist, Development and Reform Commission, Henan Province, China, jiangxue0322@gmail.com)

** 성균관대학교 경제학과 교수(Professor, Department of Economics, Sungkyunkwan University, hykim@skku.edu)

1. 서론

지난 30여년간 이루어진 중국 경제의 급속한 성장에 따라 주민들의 생활수준이 크게 향상되었으나, 그에 상응하여 불편을 느끼게 하는 부분 또한 많아졌다. 혼잡한 교통이 대표적이다. 2015년말 현재 수도인 베이징의 자동차 보유 대수는 562만 대에 달해 시내 도로의 최대 용량으로 추정되는 약 670만 대에 빠르게 근접하고 있으며, 급증하는 통행량을 따라잡지 못하는 도로 인프라로 인해 출퇴근 시간에는 대부분의 도로가 극심한 정체를 겪고 있다.¹⁾

혼잡한 교통은 운전자들의 시간적, 금전적 낭비를 유발할뿐만 아니라 대기오염의 주요 원인으로 지목되기도 한다. 베이징시 환경보호국에 의하면 베이징 지역 미세먼지(PM2.5)의 31.1%는 자동차 배기가스로 인해 생성된 것이다.²⁾

베이징시 정부는 교통 체증을 완화하기 위해 번호판 발행 제한, 10부제 등의 통행 제한, 휘발유세, 주차세 등 다양한 조치를 병행하고 있으나 이렇다할 성과를 거두지 못했다. 이에 시 정부는 혼잡통행료의 도입을 적극 고려중인 것으로 알려져 있다.

현재 세계적으로 시내도로에 대한 통행료를 부과하고 있는 도시는 싱가포르, 런던, 토론토, 스톡홀름, 밀라노 정도이다. 혼잡통행료의 시행에 있어 가장 중요한 문제는 적정 요금의 산출이다. 과거 여러 형태의 통행료 관련 모형이 구축되기는 하였으나 이론적 논의에 그쳐 현실 적용에는 어려움이 있으며, 특별히 베이징을 위해 만들어진 모형은 아직 찾아볼 수 없다. 베이징시에서 시행 가능한 혼잡통행료의 산출 모형 구축이 본 연구의 목적이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2장에서 선행 연구를 요약하고 제3장에서는 이론적인 모형을 살펴본다. 제4장에서 현실적인 세 가지의 이슈, 즉 통행속도와 밀도의 관계, 통행의 시간비용, 최적통행량의 산정 등의 문제를 검토한 다음 제5장에서 베이

징 제2순환도로를 대상으로 한 혼잡통행료의 산출 결과 및 관련 정책에 대해 논의하도록 한다. 끝으로 제6장에서 결론 및 한계를 제시한다.

2. 선행연구

이론적인 모형에 대한 연구는 일찍이 1920년대에 시작되었다. Pigou(1920)는 혼잡통행료가 교통에서 발생하는 외부효과 때문에 지불해야 하는 비용이고, 혼잡의 외부효과란 곧 사회적 한계통행비용과 사적 한계통행비용의 차이라고 하였다. 이렇게 볼 때 혼잡통행료는 일종의 피구세이다.

이후 교통공학자들은 통행속도와 밀도의 관계를 간명한 공식으로 표현해냈다. Greenshields(1935)는 선형함수를, Greenberg(1959)는 지수함수를 각각 사용하였다. 또한 Underwood(1961)는 로그함수로, Drake et al.(1967)은 중형의 곡선으로써 속도와 밀도의 관계를 묘사하였다. 비록 그들의 연구가 혼잡통행료의 산출을 위해 이루어진 것은 아니었지만 후속 연구에 큰 도움을 준 것이 사실이다. Walters(1961)는 통행속도와 밀도의 관계를 통행료 계산에 적용하였고, Dewees(1979)는 이를 발전시켜 보다 구체적인 모형을 개발하였다. Olszewski et al.(1995)은 Drake(1967)의 모형을 이용, 싱가포르 도로에서의 속도와 밀도간 관계를 분석한 바 있다.

최적의 혼잡통행료 계산에 있어 제기되는 중요한 이슈중의 하나는 통행의 시간비용이다. 기존 연구를 살펴보면 대부분 VTTS(value of travel time savings)로 이를 측정하고 있다. VTTS란 통행자가 소요시간을 한 단위 줄이기 위해 얼마나 더 많은 비용을 지불할 것인가를 뜻한다. Beesley(1973)는 운전자들이 통행시간에 부여한 가치가 같은 시간에 발생하는 임금의 절반 수준을 초과할 수 없다고 주장하였다. 또한 AASHTO(1977)에서는 평균적으로 보

아 줄어든 시간이 5분 이하일 때 그 가치는 \$0.21/h, 5분에서 15분까지이면 \$1.80/h, 15분 이상이면 \$3.90/h인 것으로 보고되었다.

싱가포르에서도 이에 대하여 많은 연구가 이루어졌다. Wilson(1988)은 싱가포르의 VTTS를 평균임금의 약 47%, Hensher(1989)는 약 68%라 각각 주장하였고 오랜 기간동안 정부는 이 수치를 바탕으로 혼잡통행료를 결정하였다. 한편 Lau(1999)는 가계 설문조사의 결과를 기초로 VTTS가 평균임금의 102%에 달한다고 주장하기도 했다.

적정 통행료와 관련하여 Keeler and Small(1977)의 산출결과를 보완한 Pozdena(1988)에 따르면, 첨두시간대에 미국 주요 도시의 간선도로에서의 혼잡통행료는 마일당 65센트, 교외의 간선도로에서는 21센트, 그리고 주변외곽의 간선도로에서는 17센트가 적절한 금액으로 산출되었다. 또한 모든 곳에서 비첨두시간대의 혼잡통행료는 3에서 5센트로 추정되었다. Small(1992)은 로스앤젤레스 지역의 교통체증이 총 차량운행거리의 약 28%에서 발생하는데, 마일당 15센트의 혼잡통행료를 부과하면 첨두시간대의 통행량이 약 26% 감소하여 통행속도가 상당히 빨라질 것이라 예측하였다.

최적통행료의 관별 역시 혼잡통행료의 계산에 있어 매우 중요한 부분이다. Walters(1961) 등의 선행 연구에서는 이를 위해 수요함수의 추정이 필수적인 절차라고 강조하였다. 반면 Li(1999)는 통행료를 부과할 때 수요함수에 관한 정보가 꼭 필요한 것은 아니라고 주장하였다. 속도와 밀도의 관계, 그리고 통행의 시간비용만 파악하면 최적의 통행료를 계산할 수 있고, 후생효과를 분석하지 않는다면 수요에 대한 자료가 없어도 무방하다는 것이다. Vickrey(1993)와 Downs(1993) 역시 수요곡선의 형태를 몰라도 최적통행료를 찾을 수 있음을 시사하였으나 구체적인 방법은 제시하지 못했다.

3. 분석 모형

본 연구에서는 베이징 제2순환도로를 대상으로 최적 혼잡통행료를 산출한다. 기존 연구와의 차이점이라면 수요곡선의 정확한 형태를 추정하는 대신 시행착오 방법을 이용하는 것이다. 분석을 위해서는 먼저 모든 차량들이 이동 속도와 비용면에서 동질적이며 모든 도로가 완전대체재라는 가정이 필요하다. 다소 비현실적인 가정이기도 하나, 이를 통해 모형을 크게 단순화할 수 있다.

그림 1은 도로통행에 대한 수요곡선을 보여준다. 횡축은 도로를 이용하는 자동차의 수를, 종축은 통행에 대한 금전적 비용과 시간비용을 합한 통행비용을 나타낸다. 수요곡선은 각각의 비용 수준에서 얼마나 많은 운전자들이 이 도로를 이용하는지를 보여주며, 이는 동시에 한계통행자의 지불용의를 나타내는 한계편익곡선이기도 하다.

MPC(Marginal Private Cost)는 사적 한계통행비용으로서, 개별 통근자에게 발생하는 통행비용이다. 모든 운전자들이 같은 속도로 운행하고 동일한 비용 구조를 가지므로, 총 통행비용을 운전자의 수로 나눈 것으로 정의되는 평균통행비용(AC)은 사적 한계통행비용과 같다. MSC(Marginal Social Cost)는 사

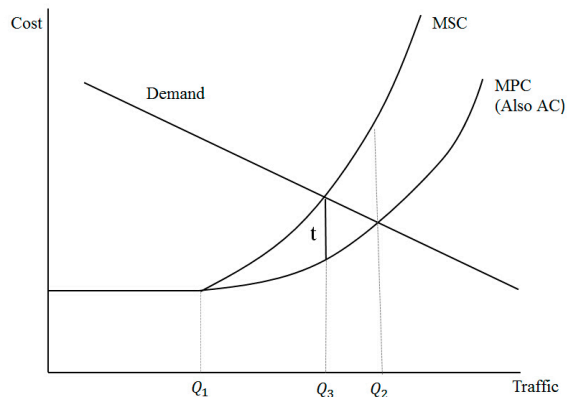


그림 1. 혼잡부효과와 혼잡통행료

회적 한계통행비용이다. 통행량이 적을 때에는 도로에 추가로 진입하는 운전자가 다른 운전자들의 속도와 통행시간에 영향을 미치지 않는다. 그러나 통행량이 Q_1 을 넘어서게 되면 자동차 사이의 간격은 좁아지고, 운전자들은 안전거리를 유지하기 위해 속도를 줄이게 된다. 도로로 진입하는 운전자가 많아질수록 모든 차량의 이동이 지체되고 통행시간은 증가하게 된다. 이를 혼잡외부효과라 하며, 사회적 한계통행비용이 사적 한계통행비용보다 큰 부분으로서 통행량에 따라 증가한다.

운전자는 통행의 한계편익이 통행의 사적 한계비용보다 큰 경우에 도로를 이용한다. 수요곡선이 Q_2 에서 사적 한계비용곡선과 만나므로 균형통행량은 Q_2 가 된다. 반면 사회적으로 최적인 차량대수는 수요곡선과 사회적 한계통행비용곡선이 만나는 Q_3 이다. 자신이 초래하는 외부 비용을 운전자들이 무시하므로 균형통행량은 최적통행량을 초과한다. 이 경우 정부는 최적통행량을 실현하기 위해 혼잡통행료를 징수할 수 있다. 외부적 통행비용과 동일한 금액으로 부과되는 세금은 혼잡의 외부효과를 내부화하여 운전자 수를 최적 수준으로 유도하게 된다. 그림 1에서 차량당 t 의 혼잡통행료는 사적 한계통행비용곡선을 그만큼 상향 이동시켜 균형통행량을 Q_2 로부터 Q_3 로 감축할 수 있다. 이처럼 혼잡통행료는 사적 비용과 사회적 비용의 괴리를 제거하고 운전자들로 하여금 통행의 사회적 비용을 감안하여 운행 여부를 결정하도록 유도, 도로를 효율적으로 사용할 수 있게 한다.

Deweese(1979)는 혼잡통행료를 다음과 같이 도출해낸 바 있다.

- q : 일정 시간대에 통행하는 자동차의 수,
- v : 통행속도,
- d : 통행거리 (1km로 가정),
- c : 통행비용 (금전적 비용과 시간비용의 합),
- t : 최적 혼잡통행료라 하자.

이제 t 를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 AC(q) &= c(dv) = cv \\
 TC(q) &= qcv \\
 MSC(q) &= \frac{dTC(q)}{dq} = \frac{vc - qc(dv/dq)}{v^2} \\
 &= AC(q) - \frac{qc}{v^2} \frac{dv}{dq} \\
 t = MSC(Q_3) - AC(Q_3) &= -\frac{qc}{v^2} \frac{dv}{dq}, \\
 \text{where } q &= Q_3 \tag{1}
 \end{aligned}$$

그러나 식 (1)만으로는 최적 혼잡통행료의 계산이 불가능하다. 세 가지의 문제가 존재하기 때문이다. 먼저 dv/dq , 즉 통행량과 통행속도 사이에는 어떤 관계가 존재하는가? 두 번째로 통행비용 c , 특히 통행의 시간적 비용은 어떻게 측정할 것인가? 세 번째, 최적 통행량 Q_3 은 어떻게 찾아낼 수 있는가? 최적 통행료의 산출에 앞서 이러한 현실적인 문제들에 대한 답을 구해야 한다.

4. 현실적 문제

1) 통행속도와 밀도의 관계

(1) 데이터

식 (1)에서 dv/dq 는 통행량과 통행속도의 관계를 의미하는데, 이 두 변수들간의 관계를 파악하기 위해서는 속도와 밀도의 관계를 알아내면 된다. 통행량은 곧 속도와 밀도의 곱이기 때문이다.

본고의 분석대상인 베이징 제2순환도로는 1992년에 준공되었으며, 중국 최초로 신호등이 없이 건설된 도시 순환도로이다. 도심과 가까운 탓에 베이징에서 가장 복잡한 도로이기도 하다. 해당 도로의 만성적인 정체현상 해소는 현재 시 정부가 역점을 두

표 1. 베이징 제2순환도로의 속도, 밀도와 통행량

속도(km/h)	밀도(veh/km)	통행량(veh/h)
∴	∴	∴
40	44,746	1789,853
41	42,327	1735,387
42	41,941	1761,518
43	40,588	1745,280
44	39,266	1727,704
∴	∴	∴
73	11,155	814,350
74	9,373	693,614
75	8,601	645,100
76	8,840	671,820

자료: 베이징교통연구센터(2014)

고 추진중인 사업이다. 표 1로부터 제2순환도로에서의 통행속도와 밀도가 반비례함을 확인할 수 있다.

아래에서는 속도와 밀도의 관계를 나타내는 대표적인 모형들을 소개한 후, 회귀분석 결과를 비교하여 베이징 제2순환도로에 가장 적합한 모형을 선정하고자 한다. 관측치는 표 1에 소개된 자료로서 속도 20km/h부터 76km/h까지의 57개이며, 모든 회귀 분석에 공통으로 사용된다.

(2) Greenshields 모형

Greenshields(1935)는 식 (2)와 같은 속도와 밀도의 관계식을 구축하였다.

$$k = k_j \left(1 - \frac{v}{v_f}\right) \tag{2}$$

여기서,

k : 교통밀도,

v : 통행속도,

k_j : 통행속도가 0일 때의 교통밀도,

v_f : 혼잡이 없을 때의 통행속도이다.

회귀분석을 위해서는 모형을 다음과 같이 변형시킬 필요가 있다.

$$k = k_j - \frac{k_j}{v_f} v \tag{2'}$$

표 1의 데이터를 이용하여 회귀분석을 진행한 결과는 표 2와 같다.

표 2. Greenshields(1935) 모형의 회귀분석 결과

Variable	Coeff.	Std. Error	t-statistic
Const.	100.459	1.657	60.646
v	-1.296	0.033	-39.590
R-sq.	0.966	F-statistic	1575.265

회귀분석 결과에 근거하여 모형을 아래와 같이 나타낼 수 있다:

$$k = k_j - \frac{k_j}{v_f} v = 100.46 - 1.30v$$

이로부터 $k_j = 100.46$ 이고, $v_f = 77.28$ 이 된다.

(3) Greenberg 모형

Greenberg(1959)가 설정한 속도와 밀도의 함수는 식 (3)과 같다.

$$k = k_j \exp\left(-\frac{v}{v_0}\right) \tag{3}$$

여기서 v_0 는 통행량이 가장 많을 때의 통행속도이다. 회귀분석을 위해서는 모형을 아래와 같이 변형시켜야 한다.

$$\ln k = \ln k_j + \left(-\frac{1}{v_0}\right)v \tag{3'}$$

표 3은 회귀분석의 결과를 보여준다.

표 3. Greenberg(1959) 모형의 회귀분석 결과

Variable	Coeff.	Std. Error	t-statistic
Const.	5.311	0.036	146.489
v	-0.039	0.001	-53.981
R-sq.	0.981	F-statistic	2913.980

분석 결과에 의거하여 모형을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\ln k = \ln k_0 + \left(-\frac{1}{v_0}\right)v = 5.31 - 0.04v$$

이로부터 $k_0 = 202.35$, 그리고 $v_0 = 25$ 를 얻는다.

(4) Underwood 모형

한편 Underwood(1961)는 식 (4)와 같은 함수로써 속도와 밀도의 관계를 나타냈다.

$$k = k_0 \ln \frac{v_f}{v} \tag{4}$$

여기서 k_0 는 통행량이 가장 많을 때의 교통밀도이다. 회귀분석에 앞서 모형을 아래와 같이 변형시켜야 한다.

$$k = k_0 \ln v_f - k_0 \ln v \tag{4'}$$

표 4에서 해당 회귀분석의 결과를 보여준다.

표 4. Underwood(1961) 모형의 회귀분석 결과

Variable	Coeff.	Std. Error	t-statistic
Const.	256.963	1.267	202.894
v	-57.477	0.331	-173.525
R-sq.	0.998	F-statistic	30110.800

분석 결과를 이용하여 모형을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$k = k_0 \ln v_f - k_0 \ln v = 256.96 - 57.48 \ln v$$

이로부터 $k_0 = 57.48$ 이며, $v_f = 87.36$ 이다.

(5) Drake 모형

마지막으로 Drake(1967)는 식 (5)와 같이 속도와 밀도의 함수를 설정하였다.

$$k = k_0 \left(2 \ln \frac{v_f}{v}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

역시 회귀분석을 위하여 모형을 아래와 같이 변형하게 된다:

$$k^2 = 2k_0^2 \ln v_f - 2k_0^2 \ln v \tag{5'}$$

회귀분석의 결과는 표 5에 제시되어 있다.

표 5. Drake(1967) 모형의 회귀분석 결과

Variable	Coeff.	Std. Error	t-statistic
Const.	20993.900	663.638	31.635
v	-5009.108	173.566	-28.860
R-sq.	0.938	F-statistic	832.902

분석 결과에 근거하여 모형을 아래와 같이 표시할 수 있다:

$$k^2 = 2k_0^2 \ln v_f - 2k_0^2 \ln v = 20993.90 - 5009.11 \ln v$$

이로부터 $k_0 = 50.05$ 및 $v_f = 66.10$ 가 도출된다.

(6) 모형의 선택

위에 제시된 모형들 중에서 설명력이 가장 우수한 Underwood(1961)의 모형을 베이징 제2순환도로에 적용하기로 하자. 표 1의 자료로부터 혼잡이 없을 때의 통행속도(v_f)를 87.36km/h, 통행량이 가장 많을 때의 통행속도(v_0)를 25km/h, 통행량이 가장 많을 때의 교통밀도(k_0)를 57.48veh/km, 통행속도가 0일 때의 교통밀도(k_1)를 202.35veh/km로 각각 판단하여 선정하였다.

이제 Underwood(1961) 모형을 이론적인 모형에 대입하면 아래와 같다.

$$k = 57.48 \ln \frac{87.36}{v} \tag{6}$$

$$q = v \times k$$

$$q = v \times 57.48 \ln \frac{87.36}{v}$$

$$\frac{dq}{dv} = 57.48 \ln \frac{87.36}{v} - 57.48 \tag{7}$$

식 (6)과 (7)을 식 (1)에 대입하면 식 (8)이 도출된다.

$$t = MSC(Q_3) - AC(Q_3) = -\frac{qc}{v^2} \frac{dv}{dq}$$

$$= \frac{c}{v} \times \frac{57.48 \ln \frac{87.36}{v}}{57.48 - 57.48 \ln \frac{87.36}{v}} \quad (8)$$

여기서 v 는 최적 통행속도로서 통행량이 사회적 최적수준인 Q_3 일 때의 속도이다. c 는 통행비용이며, 다음 절에서 살펴보도록 한다.

2) 통행의 시간비용

(1) 데이터의 수집

통행의 시간비용을 VTTS(value of travel time savings)라 하며, 통행자가 통행시간을 한 시간 단축하기 위해 얼마만큼의 비용을 지불할 용의가 있는지를 나타낸다.

2014년 3월 베이징교통연구센터는 베이징 시민들의 통행시간비용을 추정하기 위해 3,000명을 대상으로 설문조사를 실시하였다.³⁾ 이 조사는 자가용 통근에 한하여 진행되었으며, 설문지는 세 부분으로 구성되었다. 먼저 응답자의 성별, 나이, 직업, 소득 등 기본 특성에 대해 물어보았다. 2단계로 응답자의 교통수단(2가지), 통행거리, 금전적 통행비용, 통행시간 등에 관한 정보를 수집하였다. 여기서 교통수단이란 출발점으로부터 목적지까지 갈 때 선택하는 도로를 뜻한다. 예를 들어 올림픽공원에서 서우두국제공항으로 가려면 공항고속도로로 갈 수도 있고 일반도로를 이용할 수도 있는데, 일반도로를 택하면 공항고속도로로 가는 것보다 돈이 적게 들지만 시간은 더 많이 소요된다.

마지막으로 평소에 주로 어떤 도로를 선택하는지 조사하였다. 만약 그 응답자가 싸고 느린 길(i)을 선호한다면, 다음 질문에서 금전적 통행비용이 얼마까지 올라야 다른 길로 바꿀 것인가를 묻는다. 반대로 응답자가 빠르고 비싼 길(j)을 선호하는 경우, 통행시간이 얼마까지 증가하면 다른 길로 바꿀 것인지 재차 질의하게 된다.

(2) 데이터의 분석

$$\text{도로 } i \text{를 택한 경우에 } VTTS = \frac{c_j - c_{\max}^i}{t_i - t_j};$$

여기서,

c_j : 빠른 길로 갈 때 드는 금전적 비용,

c_{\max}^i : 느린 길로 갈 때 지불 가능한 최대의 금전적 비용,

t_i : 느린 길로 갈 때 걸린 시간,

t_j : 빠른 길로 갈 때 걸린 시간이다.

예를 들어 올림픽공원으로부터 서우두국제공항까지 갈 때 일반도로를 이용하면 45분이 소요되고 비용은 70CNY(위안)가 든다고 하자. 또 공항고속도로로 가는 경우 30분이 걸리고 90CNY가 든다고 하자. 어떤 운전자가 일반도로로 가는 것을 선호하는데, 그에 따르는 비용이 80CNY까지 오르자 시내도로 대신 공항고속도로를 선택했다면, 그의 통행시간 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$c_j = 90\text{CNY}, c_{\max}^i = 80\text{CNY}$$

$$t_i = 0.75\text{h}, t_j = 0.5\text{h}$$

$$VTTS = \frac{c_j - c_{\max}^i}{t_i - t_j} = \frac{90 - 80}{0.75 - 0.5} = 40\text{CNY/h}$$

$$\text{도로 } j \text{를 택한 경우는 } VTTS = \frac{c_j - c_i}{t_i - t_{\max}^j};$$

여기서,

c_i : 느린 길로 갈 때 드는 금전적 비용,

t_{\max}^j : 빠른 길로 갈 때 수용 가능한 가장 긴 소요시간이다.

예컨대, 올림픽공원에서 공항까지 가는 어떤 운전자가 공항고속도로로 가는 것을 선호한다고 하자. 공항고속도로로 가는 경우의 소요시간이 40분까지 늘어나자 일반도로를 선택했다면, 그의 통행시간비용은 다음과 같다.

$$c_j = 90\text{CNY}, c_i = 70\text{CNY}$$

$$t_i = 0.75\text{h}, t_{\max}^j = 0.67\text{h}$$

$$VTTS = \frac{c_j - c_i}{t_i - t_{i_{max}}^j} = \frac{90 - 70}{0.75 - 0.67} = 250 \text{ CNY/h}$$

이런 방식으로 응답자 3,000명의 VTTS를 모두 계산한 결과가 표 6에 정리되어 있다.

표 6. VTTS 자료의 기술통계량

평균값	80.3
중앙값	86.0
최소값	64.9
최대값	95.7
표준편차	34.8

출처: 베이징교통연구센터(2014)

이제 베이징 시민들의 평균 통행시간비용(c)을 80.3CNY/h으로 보고 이를 식 (8)에 대입하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$t = \frac{80.3}{v} \times \frac{57.48 \ln \frac{87.36}{v}}{57.48 - 57.48 \ln \frac{87.36}{v}} \quad (9)$$

여기서 v 는 최적 통행속도로서, 통행량이 최적 수준인 Q_3 일 때의 속도이다. 그러면 최적 통행량은 어떻게 찾아낼 수 있는가?

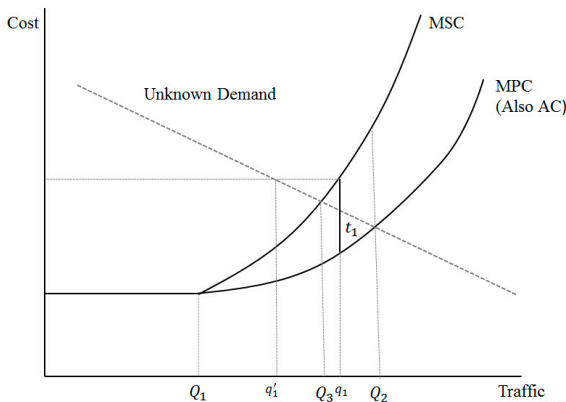


그림 2. 최적통행량의 산정방법

3) 최적통행량의 판별

기존 연구에서는 최적통행량을 정할 때 수요곡선의 식별이 요구된다고 하나, 수요곡선의 위치는 수시로 이동하는 탓에 특정하기가 매우 어렵다. 아래에서는 전체 수요곡선에 대한 정보가 없어도 최적통행량을 탐색할 수 있음을 설명하도록 한다.

그림 2에서 현재의 통행량이 Q_2 라 하자. 정부가 교통량을 감소시키고자 하나 정확한 준거가 결여된 상황에서 최초의 시도로서 Q_2 보다 작은 q_1 을 최적 통행량으로 정한다. 그러면 식 (6)으로 최적통행속도, 식 (9)로써 통행료 t_1 을 각각 계산할 수 있다. 그런데 t_1 을 실제로 부과해보면 통행량은 q_1 이 아닌 q'_1 이 된다. 이처럼 q_1 과 q'_1 이 같지 않으면 통행료를 잘못 선택한 것이다. 이어서 q_2 를 이용하여 t_2 와 q'_2 을 얻을 수 있는데, 이 때 q_2 는 임의로 선택한 것이 아니라 $(q_1 + q'_1)/2$ 로 얻은 것이다. 이번에도 q_2 와 q'_2 이 일치하지 않으면 다시 $(q_2 + q'_2)/2$ 로써 시도해본다. 이러한 시행착오를 계속 진행하여 최적의 통행료가 도출됨을 아래와 같이 보일 수 있다:

먼저 $q_1 > q'_1$ 라 가정하자.

$$q_2 - q'_2 = \frac{q_1 + q'_1}{2} - q'_2 \text{이고 } q'_2 < q'_1$$

$$q_2 - q'_2 = \frac{q_1 + q'_1}{2} - q'_2 < \frac{q_1 + q'_1}{2} - q'_1 = \frac{1}{2}(q_1 - q'_1)$$

n 번의 시행착오를 거쳐,

$$q_n = \frac{q_{n-1} + q'_{n-1}}{2}, n \geq 2$$

$$q_n - q'_n < \frac{1}{2^{n-1}}(q_1 - q'_1)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (q_n - q'_n) = 0$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = \lim_{n \rightarrow \infty} q'_n = Q_3$$

$$t = \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = MSC(Q_3) - AC(Q_3)$$

이 방법은 수렴속도가 매우 빠르다는 장점을 지니

며, 통행량 대신에 식 (6)을 이용하여 측정이 보다 용이한 통행속도를 사용할 수도 있다.

5. 혼잡통행료의 산정 및 정책적 함의

1) 혼잡통행료의 산정

이제 제반 문제가 해결되었으므로 식 (9)를 이용, 베이징 제2순환도로의 최적통행료를 산출할 수 있다. 표 7은 각 최적통행량에 해당하는 통행료를 보여 준다. 이러한 결과를 어떻게 활용할 수 있을까? 예컨대 정부가 시행착오를 거쳐 산정한 침두시간대의 최적통행속도가 50km/h이면 자동차 한 대에 1km당 2.03CNY의 통행료를 징수하면 된다. 비침두시간대의 최적통행속도가 60km/h라면, 2.03CNY보다 적은 0.81CNY의 통행료를 책정하면 될 것이다.

2) 정책 제언

(1) 혼잡통행료 제도의 시행

혼잡통행료의 부과에 앞서 효율적인 징수를 위한 인프라가 구축되어야 한다. 도로에 차량식별시스템을 설치하고, 각 차량이 도로를 몇 번 이용했는지 기록하여 운전자에게 청구서를 보내게 된다. 혹은 각 차량에 장치를 부착하여 체크포인트를 통과할 때 선불카드의 잔액이 통행료만큼 감소되게 하는 방안이 있다.

통행료 부과에 필요한 기술적인 문제가 해결되었으면 위에서 제시한 시행착오법을 활용, 최적통행량 혹은 최적통행속도를 산정한 다음 식 (9) 또는 표 7을 이용하여 최적통행료를 계산하면 된다. 여기서 주의해야 할 점은 시간이 흐름에 따라 통행속도와 밀도의 관계, 그리고 통행의 시간비용이 변화할 수 있으므로 주기적인 조사를 거쳐 통행료를 적절히 조정해야

표 7. 베이징 제2순환도로의 최적통행료(km당)

최적통행속도(km/h)	최적통행량(대)	최적통행료(CNY)
40	1796.04	7.17
41	1782.75	6.08
42	1768.05	5.23
43	1751.99	4.55
44	1734.59	3.98
45	1715.89	3.52
46	1695.90	3.12
47	1674.67	2.79
48	1652.21	2.50
49	1628.56	2.25
50	1603.73	2.03
51	1577.76	1.84
52	1550.65	1.66
53	1522.44	1.51
54	1493.15	1.38
55	1462.79	1.26
56	1431.39	1.15
57	1398.96	1.05
58	1365.52	0.96
59	1331.09	0.88
60	1295.69	0.81
61	1259.33	0.74
62	1222.02	0.68
63	1183.79	0.62
64	1144.65	0.57
65	1104.61	0.52
66	1063.68	0.47
67	1021.89	0.43
68	979.23	0.39
69	935.73	0.36
70	891.40	0.33

한다는 것이다.

(2) 혼잡통행료 수입의 사용

정부가 t 만큼의 통행료를 부과하면 $t \times Q_t$ 의 재정 수입을 얻을 수 있다. 이러한 수입을 어떻게 사용해야 모든 이들의 후생을 증대시킬 수 있는가? 사회 전

체적으로는 외부효과가 제거되어 효율성이 제고되었으나, 개별 운전자의 입장에서 볼 때 혼잡통행료의 부과에는 분명 장단점이 존재한다. 통행료 부과 후에도 계속 도로를 사용하는 사람들은 세금을 납부하는 대신 통행량 감소로 전보다 시간비용이 줄어들게 된다. 반면 도로를 더 이상 이용하지 않는 사람들은 세금을 내지 않지만 도로사용에 수반되는 편익을 누리지 못하게 된다. 두 유형의 운전자들 모두에게 비용과 편익이 발생하게 되는 것이다.

정부가 O'Sullivan(2009)의 제안대로 당초 도로를 이용했던 Q_2 명의 사람들에게 혼잡통행료 수입을 균등하게 환급해준다고 하자. 그림 3과 표 8은 두 통행자에 대한 비용과 편익을 비교하여 나타낸다. A는 도로사용에 대해 상대적으로 많은 비용을 지불할 용의가 있기에 통행료가 부과된 후에도 도로를 계속 사용

한다. 그가 t 의 통행료를 지불하고 $t \times Q_3 / Q_2$ 만큼 세금을 돌려받게 되므로 $t - t \times Q_3 / Q_2$ 만큼 세수의 증가가 발생한다. 반면 통행료는 사적 통행비용을 a 만큼 줄어든다. 결국 순편익은 $a + t \times Q_3 / Q_2 - t$ 이다.

B의 경우 상대적으로 낮은 지불용의를 지녀 통행료 도입 후 도로사용을 포기하기 때문에 더 이상 소비자잉여를 누릴 수 없게 된다. 그의 소비자잉여는 지불할 용의가 있는 금액과 사적 통행비용간의 차이인 b 이다. B 역시 A와 마찬가지로 $t \times Q_3 / Q_2$ 의 환급액을 수령하므로 그의 순편익은 $t \times Q_3 / Q_2 - b$ 이다.

이처럼 두 유형의 통행자 모두 편익을 누리게 하려면 애초에 도로를 이용하던 운전자들에게 통행료 수입을 균등하게 나누어주어야 한다. 그러나 이는 실제로 시행하기 어려우므로 수입을 도로의 확장에 투입하는 것이 일반적이며, 베이징의 경우도 예외가 되기는 아마 어려울 것이다.

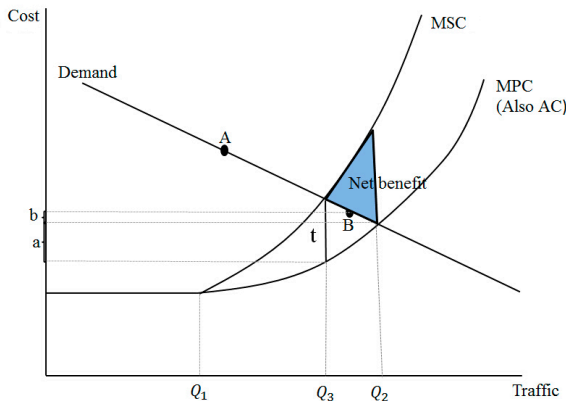


그림 3. 혼잡통행료의 후생효과
 자료: O'Sullivan(2009), p.255

6. 결론

세계의 여타 주요 대도시와 마찬가지로 중국 베이징에서도 교통혼잡은 큰 문제가 되고 있다. 시 정부에서는 도로의 극심한 혼잡현상을 해결하기 위해 다양한 행정조치와 아울러 유류세, 주차세, 대중교통 보조금 등의 경제적 수단을 병행하고 있으나, 혼잡통행료 징수에 비해 효율적이지 못하다는 평가가 지배적이다.

표 8. 혼잡통행료의 비용과 편익

	비용		편익		순편익
	지불된 세금	감소된 소비자 잉여	통행시간비용의 감소	환급액	
A	t		a	$t \times Q_3 / Q_2$	$a + t \times Q_3 / Q_2 - t$
B		b		$t \times Q_3 / Q_2$	$t \times Q_3 / Q_2 - b$

주: O'Sullivan(2009), p. 259에서 재구성

본 논문에서는 기존 연구와 달리 이론적 분석에 그치지 않고 베이징시에서 실제로 적용할 수 있는 통행료 산출방법을 제시하였다. 먼저 기존 모형들의 비교, 검토를 거쳐 제2순환도로를 대상으로 통행속도와 밀도의 관계식을 추정하였다. 다음으로 통근행태에 관한 설문조사 결과에 근거하여 베이징 시민들의 평균적인 통행시간비용을 계산하였다. 마지막으로 최적통행료의 결정에 있어서는 자주 변하는 수요곡선 전체의 형태와 위치를 추정하지 않고도 시행착오법을 통해 최적통행속도가 시현되는 적정 금액의 도출이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 수요곡선의 추정이 이루어지지 않아 혼잡통행료의 경제적 후생효과를 구체적으로 계산하지는 못하였다. 또한 모든 시민의 효용 증대를 도모하기 위해 정부가 어떤 형태로 통행료 수입을 재분배해야 하는지도 향후의 중요한 연구과제이다.

주

- 1) Global Times 2016년 10월 25일자, "Beijing to cut number of new cars," <http://www.globaltimes.cn/content/1013607.shtml> (최종열람일: 2018년 5월 21일)
- 2) 중국일보 2015년 1월 15일자, "PM2.5 analysis to help curb pollution," http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-01/15/content_19330983.htm (최종열람일: 2018년 5월 21일)
- 3) 베이징교통연구센터, <http://www.docin.com/p-1128274881.html> (최종열람일: 2018년 5월 21일)

참고문헌

- American Association of State Highway and Transportation Officials, 1977, *A Manual on User Benefit Analysis of Highway and Bus-Transit Improvements*, Washington D. C.
- Beesley, M. E., 1973, *Urban Transport: Studies in Economic Policy*, Butterworths.
- Deweese, D. N., 1979, "Estimating the Time Costs of Highway Congestion," *Econometrica* 47(6), pp.1499-1512.
- Downs, A., 1993, "Point of View: Implementing Peak-hour Road Pricing at Full Scale: Finding Solution to Practical Problems," *TR News* 167, pp.7-9.
- Drake, L. S., Schofer, J. L. and May, A. D., 1967, "A Statistical Analysis of Speed-Density Hypotheses," *Highway Research Record* 154, pp.53-87.
- Greenberg, H., 1959, "An Analysis of Traffic Flow," *Operations Research* 7, pp.79-85.
- Greenshields, B. D., 1935, "A Study of Traffic Capacity," *Highway Research Board* 14, pp.448-477.
- Hensher, D. A., 1989, "Behavioral and Resource Values of Travel Time Savings: A Bicentennial Update," *Australian Road Research* 19, pp.223-229.
- Keeler, T. E. and Small, K. A., 1977, "Optimal Peak-Load Pricing, Investment, and Service Levels on Urban Expressways," *Journal of Political Economy* 85(1), pp.1-25.
- Lau, D., 1999, *Modeling Urban Transport Demand in Singapore*, Master's Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- Li, M., 1999, "Estimating Congestion Toll by Using Traffic Count Data: Singapore's Area License Scheme," *Transportation Research E* 35, pp.1-10.
- Olszewski, P., Fan, H. and Tan, Y., 1995, "Area-Wide Traffic Speed-Flow Model for the Singapore CBD," *Transportation Research A* 29, pp.273-281.
- O'Sullivan, A., 2009, *Urban Economics*, (7th ed.), McGraw-Hill.
- Pigou, A. C., 1920, *The Economics of Welfare*, Macmillan.
- Pozdena, R. J., 1988, "Unlocking Gridlock," *Federal Reserve Bank of San Francisco Weekly Letter* December 1988, pp.1-5.
- Small, K. A., 1992, *Urban Transportation Economics*, Harvard Academic Publishers.
- Underwood, R. T., 1961, "Speed, Volume, and Density Re-

- relationships,” *Quality and Theory of Traffic Flow*, Yale Bureau of Highway Traffic, pp.141-188.
- Vickrey, W. S., 1993, “Point of View: Principles and Applications of Congestion Pricing,” *TR News* 167, pp.4-5.
- Walters, A. A., 1961, “The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion,” *Econometrica* 29(4), pp.676-699.
- Wilson, P. W., 1988, “Welfare Effects of Congestion Pricing in Singapore,” *Transportation* 15(3), pp.191-210.

교신: 김호연, 03063, 서울시 종로구 성균관로 25-2 성균관대학교 경제학과, 전화: 02-760-0436, 이메일: hykim@skku.edu

Correspondence: Ho Yeon Kim, Department of Economics, Sungkyunkwan University, 25-2 Sungkyunkwan-ro, Jongno-gu, Seoul 03063 Korea, Tel: 82-2-760-0436, E-mail: hykim@skku.edu

최초투고일 2018년 5월 22일

수 정 일 2018년 6월 14일

최종접수일 2018년 6월 22일