

외부비용을 반영한 도시내 도로의 혼잡통행료 추정: 서울시를 대상으로

박찬운 · 김성수*

서울대학교 환경대학원 환경계획학과

An Estimation of the Congestion Tolls Considering External Costs in Seoul

PARK, Chanwoon · KIM, Sungsoo*

Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University,
Seoul 151-742, Korea

Abstract

This paper formulates the methodologies to estimate optimal congestion tolls from long-run and short-run perspectives and applies them to the highways of Seoul. An optimal long-run congestion toll is estimated with an optimal volume-capacity-ratio to minimize the total costs which consist of two components: road construction and maintenance costs and traveler costs. By contrast, an optimal short-run congestion toll is estimated with a supply-demand equilibrium which is determined by using a speed-flow function and a disaggregate modal choice model. The results of a long-run analysis for the Seobu urban expressway suggest the optimal volume-capacity-ratio of 1.35 and the optimal congestion toll of 503 Won per automobile kilometer. By contrast, those of a short-run analysis for the Mia-ro urban arterial suggest 1.31 and 420 Won, respectively. Although our results are to some degree dependent on the interest rate and time value assumed, one basic conclusion holds up: the congestions toll tested could generate substantial gains in social welfare if applied to Seoul.

본 논문은 장기적 및 단기적 관점에서 도시내 도로의 최적 혼잡통행료를 추정하는 방법론을 구축하고, 이를 서울시의 주요 도로에 적용하였다. 장기적 관점의 최적 혼잡통행료는 도로 건설·유지비용과 통행자비용을 합한 총비용을 극소화하는 최적 교통량-용량 비율을 구한 다음 추정된다. 반면 단기적 관점의 최적 혼잡통행료는 통행시간-교통량 함수와 개별수단선택모형을 이용해 공급-수요 균형점을 구한 다음 추정된다. 도시고속도로인 서부간선도로에 대한 장기적 관점의 분석 결과 최적 교통량-용량비율과 승용차-km당 최적 혼잡통행료는 1.35와 503원인 반면, 도시간선도로인 미아로에 대한 단기적 관점의 분석 결과는 1.31과 420원인 것으로 나타났다. 이러한 분석 결과는 어느 정도 할인율과 시간 가치에 영향을 받으나, 혼잡통행료를 부과하면 사회후생이 증가하는 것은 변함이 없는 것으로 나타났다.

Keywords

congestion tolls, external costs, long/short-run analysis, social welfare maximization, Seoul
혼잡통행료, 외부비용, 장/단기적 관점의 분석, 사회후생 극대화, 서울

* : Corresponding Author
kimsung@snu.ac.kr, Phone: +82-2-880-5660, Fax: +82-2-886-7935

Received 9 April 2015, Accepted 26 October 2015

서론

혼잡통행료는 도로 혼잡에 따른 통행시간과 차량운행 비용의 증가분을 외부비용으로 파악하고, 이를 혼잡을 일으킨 통행자에게 직접 부과함으로써 도로를 효율적으로 이용하고자 제시된 개념이다. 혼잡통행료를 승용차에 한하여 부과하면 승용차의 통행은 줄어들고 통행속도는 증가하기 때문에, 도로 이용자는 혼잡통행료 부과 전보다 더 적은 시간으로 목적지까지 이동할 수 있다. 그러나 여기서 중요한 것은 혼잡통행료 수준을 결정하는 방법이다.

본 연구에서 추정할 내용은 크게 세 가지이다. 첫째, 승용차 수단의 사적비용과 외부비용이다. 둘째, 장기적 관점의 혼잡통행료 수준이다. 장기적 관점은 새로운 도로의 건설 또는 기존 도로의 확장을 반영하며, 분석을 용이하게 하기 위하여 몇 가지 가정을 설정한다. 주요한 가정은 승용차만 통행하는 도로이며, 이에 따라 분석대상 도로구간으로 도시고속도로를 선정하였다.

그리고 셋째로는 단기적 관점에서 혼잡통행료를 추정한다. 단기적 관점은 신규 도로의 건설 또는 확장은 가능하지 않다고 가정한다. 분석의 대상이 되는 도로구간은 서울 도심으로 진입하고, 중앙버스전용차로가 존재하며 지하철이 나란히 건설된, 4가지 수단으로 모두 이용 가능한 간선도로 구간이다. 이처럼 관점을 장·단기로 구분한 이유는 도로의 확장 가능성 여부에 따라 분석 방법이 달라지기 때문이다.

결론적으로 본 연구의 목적은 승용차 비용, 장기적 관점의 혼잡통행료, 단기적 관점의 혼잡통행료 분석결과를 통하여 정책적 시사점을 제시하는 데 있다. 즉, 도로 확장이 가능한 장기적 관점의 분석을 통하여 대상구간의 확장이 타당한 지 여부에 대해 답할 수 있다. 또한 도로 확장이 불가능한 단기적 관점의 분석을 통하여 혼잡통행료를 부과하는 방안이 합리적인 지 여부에 대해 답할 수 있다.

기존 문헌의 고찰

1. 외부비용과 혼잡통행료의 개념

외부비용은 사회 구성원 전체가 부담하는 비용이지만, 사적비용에는 포함되지 않는 비용을 의미한다. 또한 외부비용은 개인의 생산, 소비 행위가 다른 생산자나 소비

자에게 영향을 주지만, 그 영향이 시장가격에는 반영되지 않은 비용을 뜻하기도 한다. 즉 외부비용은 개인의 행동으로 인해 사회 구성원 전체가 지불하는 비용을 의미하며, 이는 주로 환경오염을 설명할 때 자주 등장하는 개념이다.

교통관련 비용 중 교통수단 이용자가 부담하는 비용은 사적비용으로, 그리고 사회 구성원 전체가 부담하는 외부비용도 포함하는 비용은 사회적비용으로 구분된다. 교통수단 이용자들은 사적비용을 지불하고 수단을 이용하는 대신, 그 대가로 시간비용 절감 및 편리성 등의 편익을 얻는다. 그러나 특정 수단의 이용자가 증가하면 혼잡 등 외부불경제 효과가 나타나나, 이러한 효과는 사적비용에 반영되지 않는다.

혼잡통행료는 어떤 한 도로 이용자로 인한 전체 도로 이용자의 통행시간 및 차량운행비용, 환경비용 등의 증가분을 화폐로 환산하여 혼잡을 가중시킨 원인 제공자인 도로 이용자에게 부담시키는 비용으로, 교통관련 외부비용의 내부화를 통하여 사회후생을 극대화할 수 있다는 관점에서 출발한 것이다. 혼잡통행료 이론의 핵심은 도로 운영자가 혼잡이 발생하는 도로시설에 일정한 통행료를 부과하여 해당 교통시설을 최적 상태로 유지하는 것으로, 한계비용가격이론에 근거하여 최적 혼잡통행료를 산정한다. 이는 시스템 최적 통행을 달성하기 위하여 도로 이용자에게 한계사회적비용과 한계사적비용의 차이만큼 혼잡통행료로 징수하는 것이다.

2. 외부비용에 관한 기존 문헌

Kumar et al.(2010)은 인도의 델리를 대상으로 휘발유 자동차, 경유 자동차, 버스 총 3개 수단에 대하여 외부비용을 추정하였다. 분석한 외부비용은 혼잡비용, 대기오염비용, 교통사고비용, 소음비용으로, 혼잡비용은 통행량-시간 함수를, 대기오염비용은 통계치를, 그리고 교통사고비용과 소음비용은 선행 연구의 결과를 이용하여 추정하였다.

한편 Shon and Hwang(2001)은 서울시를 대상으로 휘발유 자동차에 한하여 사적비용과 사회적비용을 비교 연구하였다. 자동차 소유와 운행을 분리하여 직접 사적비용과 간접 사적비용, 정부·민간의 교통시설 기회비용, 사회적비용으로 항목을 분류하여 승용차 소유·운행 비용을 추정하였다. 또한 Cho and Lee(2008)은 전국의 고속도로, 일반국도, 지방도 그리고 광역대도시권을

대상으로 도로교통혼잡비용을 차량운행비용과 시간비용으로 구분하여 추정하였다.

3. 혼잡통행료에 관한 기존 문헌

단기적 관점에서 혼잡통행료를 연구한 기존 문헌으로는 Proost and Van Dender(2008), Viton(1980), Cho(2006)을 들 수 있다. 반면 장기적 관점에서 혼잡통행료를 연구한 기존 문헌으로는 Kim and han(1995) 등을 들 수 있다.

먼저, Proost and Van Dender(2008)는 사회후생 함수 모형을 구축하고, 사회후생을 극대화하는 교통요금을 분석하였다. 이때 고려한 외부비용은 혼잡비용, 사고비용, 소음과 대기오염비용이다. 구축한 모형을 이용하여 영국 런던과 벨기에 브리셀에 적용하였으며, 대상 교통수단은 승용차, 버스(트램 포함), 지하철이다. 분석 결과 모든 수단의 최적 요금은 현재 수준보다 높았으며, 최적 요금 적용시 2% 정도의 사회후생이 증가하는 것으로 분석되었다.

Viton(1980)은 San Francisco-Oakland Bay Bridge에 대한 적정 통행료를 분석하기 위해, 통행량 변화로 인한 통행비용 변화 후 수단분담 재산정의 반복 과정을 통한 공급모형과 수요모형의 균형점을 찾는 방법을 이용하였다. 대상 교통수단은 승용차, 버스, 트럭이며, 공급모형에서 포함되는 비용은 혼잡통행료와 대기오염비용, 통행료 징수소(toll booth)에서 발생하는 혼잡을 비용으로 환산한 값이고, 수요모형으로 수단선택모형을 이용하였다.

Cho(2006)은 2002년 수도권 전역의 출근목적 통행자들을 분석대상으로 하여 도심 코든과 부도심 코든에 2000원의 혼잡통행료 부과에 따른 형평성 효과를 분석하였다. 혼잡통행료 부과로 인한 전반적인 형평성 효과는 개별 다항로지수단선택모형으로부터 도출되는 통행자들의 보상변화를 소득계층별로 비교하여 분석하였다.

한편 Kim and Han(1995)은 제1경인고속도로를 대상으로 고속도로의 건설 및 유지비용과 도로이용자비용을 함께 고려하는 장기적인 관점에서 최적 도로용량과 장기한계비용에 준거하는 최적 통행료를 추정하였다. 고속도로의 순편익을 극대화하는 최적 도로용량과 최적 혼잡통행료를 추정하기 위해서 고속도로의 연간 총비용합수와 건설·유지비용합수를 계산하고, 평균가변비용을 구성하는 두 요소인 시간비용과 차량비용의 차종별 함수를

계산한 다음, 이들을 바탕으로 도로용량을 최적화한 후 최적 통행료를 추정하였다.

4. 시사점 및 본 연구의 차별성

외부비용을 추정한 기존 문헌에서는 주로 교통혼잡비용과 사고비용, 환경비용 등을 외부비용의 주된 항목으로 가정하여 분석하였다. 이때 교통혼잡비용은 교통량을 이용하여 추정하였으며, 사고비용과 환경비용은 별도의 계산식을 이용하거나 통계치를 이용하여 추정하였다. 그리고 혼잡통행료에 관한 기존 문헌에서는 수단선택모형과 네트워크를 활용하여 수단 전환에 의한 혼잡통행료 효과를 살펴보았다.

본 연구가 기존 연구와 다른 점은 우선 첫 번째는 분석 기간을 장·단기로 구분하여 분석한다는 점이다. 그리고 두 번째는 교통혼잡으로 인한 한계비용과 평균비용의 차이가 혼잡통행료가 되는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 한계비용과 평균비용의 차이에 승용차 수단의 외부비용(대기오염비용, 소음비용, 온실가스비용)을 반영하여 혼잡통행료를 추정한다는 점이다. 마지막으로 세 번째는 단기적 관점의 경우 혼잡통행료 수준에 따른 사회후생 변화를 살펴보고, 사회후생이 극대화되는 지점에서 혼잡통행료 수준을 결정한다는 점이다.

혼잡통행료의 추정방법론

1. 개요

본 연구는 크게 승용차 비용을 추정하는 방법과 장기적 관점에서 혼잡통행료를 추정하는 방법, 단기적 관점에서 혼잡통행료를 추정하는 방법으로 나뉜다. 승용차 비용을 추정하는 방법을 통하여 승용차 운행시 발생하는 비용을 파악하고, 이를 장기적 및 단기적 관점의 혼잡통행료 추정시 적용한다.

본 연구에서 장기적 관점과 단기적 관점 두 가지로 분석하는 이유는 분석 관점에 따라 도로의 확장 가능성이 다르고, 그에 따른 분석 방법이 다르기 때문이다. 일반적으로 혼잡이 발생하는 도로는 도시내 도로이며, 이러한 도로는 확장이 불가능하거나 가능하더라도 비용이 크게 소요된다. 이러한 조건에서는 도로확장 불가능성을 전제로 하는 단기적 관점에서 혼잡통행료를 분석하는 것이 타당하다. 반면 혼잡한 도로가 반드시 확장이 불가능한

상황이 아닐 수 있으므로 이러한 조건에서는 도로확장 가능성을 전제로 하는 장기적 관점에서 혼잡통행료를 분석하는 것이 타당하다.

본 연구에서 방법론을 수립하기 전에 몇 가지 가정을 설정하면 다음과 같다. 첫째, 분석 대상인 도로의 특성에 따라 이용되는 교통수단을 한정한다. 둘째, 비용이 변화더라도 총 통행수는 불변으로 가정한다. 셋째, 통행시간은 차외시간(접근+대기 시간)과 차내시간의 합으로 구성되며, 수단별 시간가치는 동일하다. 넷째, 대중교통수단 간 환승은 고려하지 않는다. 즉 버스-지하철 이용자들은 본 연구에서 고려하지 않는다. 이는 통행시간 추정에서 버스와 지하철의 통행시간 합산에 문제가 있기 때문이다. 다섯째, 시간대를 침두와 비침두로 구분하여 분석하며, 혼잡통행료는 평일 침두시간(4시간/일)에만 부과된다. 여섯째, 혼잡통행료가 승용차 이용자에게 부과되더라도 재차인원은 변하지 않는다. 그리고 마지막으로 사회후생은 분석대상구간을 이용하는 통행자들을 대상으로 집계된다.

2. 승용차 비용의 추정방법

승용차 통행비용은 BPR 함수를 통하여 계산된 통행 시간에 차량 한 대의 시간가치를 곱하여 통행시간비용을 추정하였다. 또한 차량운행비용은 일반적으로 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비용, 감가상각비를 합산하여 계산하나, 본 연구에서는 유류비만 고려하였다. 한편 환경비용은 대기오염비용과 소음비용, 온실가스비용을 합산하여 계산하였으며, 추정방법은 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009)의 지침을 적용하였다. 그리고 혼잡통행료를 추정할 때 반영되는 외부비용 중 교통사고비용과 주차비용은 자료 취득의 한계 등 때문에 제외하였다.

3. 장기적 관점의 혼잡통행료 추정방법

1) 기본 전제

장기적 관점의 분석은 도로의 확장 또는 신규 투자를 전제로 한다. 또한 도로는 불가분성의 제약 없이 건설이 가능하다. 이는 도로 건설시 차선수는 정수가 아니어도 가능하다는 뜻이다. 즉, 교통수요에 따라 2차선 또는 3차선은 물론이고, 2.5차선이나 3.5차선으로도 건설할

수 있다는 뜻이다. 그리고 도로 건설은 규모에 대한 수익 불변이다. 또한 승용차로만 구성된 교통류를 가정하므로 분석대상구간을 도시고속도로로 선정하였고, 수단선택은 이루어지지 않는다.

2) 혼잡통행료 추정방법

도로 이용자가 부담하는 비용은 시간비용과 차량운행 비용, 통행료가 있다. 반면 도로 운영기관이 부담하며, 교통량이 아니라 도로용량의 함수인 도로건설 및 유지비용이 있다. 도로용지 매입과 도로 건설시 소요되는 투자액에 대한 이자 및 원금의 분할상환금액과 유지보수비를 포함하는 연간 건설·유지비용인 $\rho(w)$ 는 차선수의 함수로, 식(1)과 같이 정의된다.

$$\rho(w) = \left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) K(w) + M(w) + rA(w) \quad (1)$$

여기서, r: 할인율, n: 내구연한, w: 차선수

K(w): 도로건설비용

M(w): 연간 도로유지·보수비용

A(w): 도로용지매입비용

다음으로 도로 이용자 또는 도로관련 행정기관이 부담하며, 교통량뿐만 아니라 도로용량의 함수인 평균가변 비용이 있다. 평균가변비용 $D(Q, w)$ 는 차량 이용자가 교통혼잡으로 인해 평균적으로 부담하는 차량운행비용, 시간비용, 도로관련 행정기관이 부담하는 도로서비스비용의 합이다. $D(Q, w)$ 는 Q로 표시되는 교통량, w로 표시되는 용량에 대해서 0차 동차함수로 가정하기 때문에 차량속도는 교통량과 도로용량의 절대 크기에 관계없이 교통량 대 용량비율(v/c)에 의해 결정된다.

최적 이용자비용과 최적 도로용량은 승용차 교통량과 침두시간대에 걸쳐 발생하는 식(2)와 같은 순편익을 극대화함으로써 결정된다.

$$NB = \left[\int_0^q P(Q) dQ - Q \times D(Q, w) \right] - \rho(w) \quad (2)$$

여기서, P(Q) : 도로 이용자들이 부담하는 비용

D(Q, w): 평균가변비용

순편익을 극대화하기 위한 필요조건은 Q와 w에 관한

여 각각 편미분한 결과를 0으로 놓으면 식(3)과 식(4)와 같이 도출된다.

$$\frac{\partial NB}{\partial Q} = P(Q) - D \frac{\partial D}{\partial Q} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial NB}{\partial w} = -Q \frac{\partial D}{\partial w} - \rho'(w) = 0 \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 정리하면,

$$P = D + Q \frac{\partial D}{\partial Q} \quad (5)$$

$$\rho'(w) = -Q \frac{\partial D}{\partial w} \quad (6)$$

여기서 식(5)는 이용자비용이 단기한계비용과 같아야 함을 의미한다. 우변의 첫째 항은 도로 이용자가 실제로 부담하는 평균가변비용이므로, 우변의 둘째 항이 단기한계비용과 평균가변비용의 차이인 최적 혼잡통행료가 된다. 식(6)은 도로용량을 한 단위만큼 추가로 확장할 때 소요되는 비용의 증가분이 확장된 도로용량으로부터 도로 이용자들이 얻는 비용의 절약분과 같아질 때까지 도로용량이 증가되어야 함을 의미한다. 장기적 관점에서의 최적 혼잡통행료를 추정할 때는 최적 서비스수준을 나타내는 v/c 를 구하고, 최적 v/c 를 식(5)에 대입하여 최적 혼잡통행료를 구한다. 이런 과정을 거쳐서 추정되는 최적 도로용량을 건설하고 유지·보수함과 동시에 도로를 이용하는 차량들에 대해 최적 혼잡통행료를 부과하면, 사회적 순편익을 극대화하는 장기균형상태에 도달할 수 있다.¹⁾

4. 단기적 관점의 혼잡통행료 추정방법

1) 기본 전제

단기적 관점의 분석은 새로운 도로의 건설이나 확장은 없다고 전제하고, 현재의 도로용량 수준에서 혼잡통행료 부과에 따른 수단선택의 변화를 살펴본다. 이때 혼잡통행료는 오전 침두시간의 도심진입 방향의 차량에 대해서 부과되고, 혼잡통행료의 부과로 인하여 승용차 이

용자는 통행의 출발시간을 변경하거나 경로를 변경하지 않으며, 통행량의 분포는 일정하다고 가정한다. 그리고 본 연구에서는 통행자를 소득계층별로 분류하지 않고 동일한 통행자를 가정하여 분석한다.

2) 혼잡통행료 추정방법

단기적 관점의 분석은 크게 두 부분으로 나누어진다. 혼잡통행료 수준에 따라 균형 교통량을 찾는 것이 첫 번째이며, 혼잡통행료 수준에 따른 사회후생 변화를 분석하는 것이 두 번째이다.

우선 첫 번째 과정에서 혼잡통행료 부과로 인하여 승용차 비용이 변화함에 따른 수단분담률은 다항로지수단 선택모형을 이용해 산정한다. 이때 교통수단 m 을 이용하는 대표 통근자의 관측가능한 결정적 효용요소 V_m 는 식(7)에서 보는 것처럼 통행비용과 통행시간으로 대표되는 일반변수로 구성된다. 여기서 수단선택모형의 Parameter값은 Cho(2006)에서 전체 통행자를 대상으로 추정한 결과를 적용하였다.

$$V_m = \alpha_m + \beta_1 TTIME_m + \beta_2 \frac{COST_m}{INC} \quad (7)$$

$(\beta_1 = -2.247, \beta_2 = -1.815)$

- 여기서, V_m : 수단 m 을 이용하는 대표 통행자의 간접효용
- α_m : 수단 m 의 수단고유상수
- $TTIME_m$: 수단 m 을 이용하는 대표 통행자의 총 통행비용(시간/통행)
- $COST_m$: 수단 m 을 이용하는 대표 통행자의 총 통행비용(원/통행)
- INC : 대표 통행자의 개별 가구소득(원/시간)

수단선택모형을 통하여 승용차의 통행량과 택시의 통행량이 정해지고 이는 재차인원을 이용하여 다시 교통량으로 환산되며, 승용차 교통량과 택시 교통량을 합하면 새로운 교통량(q_t)이 된다. 이 교통량(q_t)이 주어지면 통행시간과 통행비용이 다르게 되며, 이로 인하여 새로운 교통량(q_t)이 추정된다. $q_{t-1} \neq q_t$ 가 되면 수렴 조건을 만족하게 되므로 반복과정은 종료되며, 균형 교통량은 q_t 가 된다.

1) Kim and Han(1995), 도시간 고속도로의 최적용량과 최적통행료 추정, 환경논총.

그리고 두 번째 과정은 혼잡통행료(Congestion Toll)가 부과 되지 않을 때와 비교하여 사회후생이 극대화되는 혼잡통행료를 추정한다. 이때 사회후생 변화(ΔTSW)는 식(8)과 같이 추정된다. 이 식에서 Δe 는 대표통행자의 보상변화, ΔTAX 는 유류세 수입변화, ΔCTR 은 혼잡통행료 수입을 나타낸다.

$$\Delta TSW = N\Delta e + \Delta TAX + \Delta CTR \tag{8}$$

$$\Delta e = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \sum_{m=1}^4 \exp(V_m) \right]_{V^a}^{V^b} \tag{9}$$

- 여기서, λ : 대표 통행자의 소득의 한계효용($\frac{\beta_1}{INC}$)
- V_m : 대표 통행자가 수단 m 이용시 얻는 간접효용
- m : 통행수단(승용차, 버스, 지하철, 택시)
- b, a : 요금변화 전(before)과 후(after)

자료

1. 개요

1) 승용차 비용 분석을 위한 자료

통행시간비용은 Metropolitan Transportation Authority(2009)의 통행시간함수에 시간가치를 적용하여 통행시간비용을 계산한다. 장기적 관점의 분석대상 도로는 승용차가 대부분인 교통류가 특징인 도시고속도로를 선정하였고, 도시고속도로의 BPR 함수를 적용하였다. 반면 단기적 관점의 분석대상 도로는 승용차, 버스, 지하철, 택시의 4가지 수단이 모두 통행가능한 간선도로를 선정하였고, 간선도로의 BPR 함수를 적용하였다.

유류비용은 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2009)의 승용차 유류 소비량과 속도 관계식을 이용하여 산정한다. 이 식은 49.17km/h의 속도에서 최고 연비(17.67km/L)가 나타난다. Seoul Traffic Headquarters(2014)의 서울시 차량통행속도 자료에서 서울시 전체 도로의 평균속도는 21.9km/h이

며, 이때 연비는 13.87km/L로 계산된다. 이는 2014년 자동차 신규 등록현황과 자동차 이전 등록현황에서 가장 높은 순위를 기록한 소나타²⁾의 평균연비인 12.0/L-16.8km/L³⁾과 비슷하므로, 승용차 유류소비량과 속도 관계식을 본 연구에 적용하더라도 큰 무리가 없다고 판단된다. 그리고 유류비용 중에서 유류세 비율은 2014년 12월 마지막 주의 55.9%를 기준으로 하였다.⁴⁾

환경비용 항목인 대기오염비용과 소음비용, 온실가스 비용의 원단위는 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009)의 자료를 이용하였으며, 2014년의 원단위로 환산하기 위해 한국은행의 소비자물가지수를 적용하였다.

2) 분석대상 도로의 자료와 선정 사유

장기적 관점의 분석대상 도로는 도시고속도로들 중 Seoul Traffic Headquarters(2014)의 자료에서 가장 평균속도가 낮은 것으로 나타난 서부간선도로이다. 서부간선도로는 서울특별시의 영등포구 제물포길에서 시흥대교에 이르는 왕복 4-6차로 도로로, 전일 평균속도는 35.7km/h이며, 오후 첨두시는 29.2km/h이다. 분석대상 도로구간은 속도 자료가 있는 성산대교 남단-금천IC 구간이다.

한편 단기적 관점의 분석 대상도로는 승용차, 버스, 지하철, 택시가 모두 통행 가능하고, 승용차가 버스 속도에 영향을 덜 미치는 중앙버스전용차로가 설치된 미아로이다. 미아로는 동소문로라고도 불리며, 종로구 혜화동 로터리에서 돈암동 미아리고개에 이르는 왕복 4차로 도로로, 전일 평균속도는 19.0km/h이며, 첨두시는 14.5km/h⁵⁾이다. 분석대상 구간은 속도 자료가 있는 미아사거리-한성대 입구의 3.3km 구간이나, 이 구간을 대중교통 평균 탑승거리인 8km로 상정하고 분석하였다.

3) 서부간선도로 지하화 계획⁶⁾

2015년 현재 서울시는 서부간선도로의 상습적인 교통체체를 해결하고자 양방향 4차로의 지하도로를 연내 착공하여 2020년 개통을 목표로 건설할 계획이다. 지하도로가 건설되면 원래 서부간선도로는 일반도로로 운영

2) www.autoview.co.kr

3) http://sonata.hyundai.com/kr/

4) http://www.opinet.co.kr

5) 오전첨두시 도심 진입속도 기준.

6) 2014년 1월 17일, 5월 12일 조선일보.

될 전망이며, 해당구간은 현재 왕복4-6차로에서 2020년 지하도로 완공 시 8-10차로가 될 것으로 예상된다.

지하도로는 민간사업자가 총공사비인 5,280억원의 74%에 해당하는 금액을 투자하여 건설 완공시점부터 30년 동안 직접 운영하여 투자비를 회수하며, 통행료는 2019년에 약 3,000원이 될 것으로 예상된다.

해당 구간은 성산대교 남단-금천IC (L=10.3km)로 본 연구의 분석구간과 동일하므로 본 연구에서 추정되는 통행료 수준과 비교가 가능하다. 다만 본 연구의 분석 결과는 다음의 네 가지 이유 때문에 서부간선도로의 최종 민자사업계획과 다를 수 있다. 먼저 본 연구의 최적 혼잡 통행료 수준은 2014년 기준인 반면, 민자사업의 예상 통행료는 2019년 기준이기 때문이다. 또한 본 연구는 분석대상 도로가 확장되는 경우 전체 차로가 도시고속도로로 운영된다고 가정하는 반면, 민자사업은 서부간선도로의 일부인 양방향 4차로만이 도시고속도로로 운영될 것이기 때문이다. 다음으로 본 연구의 최적 혼잡통행료 수준은 사회후생을 극대화하는 수준에서 결정되는 반면, 민자사업의 예상 통행료는 총공사비와 유지관리비용을 회수하는 수준에서 결정되기 때문이다. 마지막으로 본 연구에서는 혼잡통행료가 첨두시간대에 한해 부과되는 반면, 민자사업에서는 하루 종일 부과되기 때문이다.

2. 장기적 관점의 분석대상: 서부간선도로

서부간선도로 이용자의 비용은 시간비용과 유류비용으로 구성된다. 먼저 평균시간비용은 식(10)과 같이 Metropolitan Transportation Authority(2009)의 도시고속도로 BPR 함수에 시간가치를 곱해 계산된다.

$$TC = \left(\frac{1}{80} \times (1 + 0.47 \times \left(\frac{v}{c}\right)^{2.51})\right) \times VOT \quad (10)$$

여기서, TC : 시간비용(원/km)

VOT : 시간가치(원/시간)

그리고 한계시간비용은 식(10)에서 교통량을 곱해 총시간비용을 계산한 다음, 교통량으로 미분해서 구한다. 여기서 평균시간비용은 도로구간의 교통량-용량비가 일정할 때 각 차량이 해당 도로구간을 통행하는 데 소요되는 동일한 시간비용을 뜻한다. 그리고 한계시간

Table 1. Annual construction and maintenance cost: Seobu urban expressway

Item	Value
Total Construction Cost (Million Won)	520,000
Length(km)	10.31
Lane(Two Way)	4
Discount Rate(%)	7.17, 5.5, 4.0
Endurance Period(Year)	30
Capital Recovery Ratio	0.082, 0.069, 0.057
Annual Construction Cost (Million Won/Lane-km)	976, 820, 689
Annual Maintenance Cost (Million Won/Lane-km)	347

비용은 차량 한 대가 추가로 통행함으로 인해 해당 도로구간을 통행하는 모든 차량의 속도가 낮아져서 발생하는 총시간비용의 증가분을 뜻한다.

다음으로 평균유류비용은 식(11)과 같이 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2009)의 승용차 유류 소비량과 속도 관계식에 유류가격을 곱해 구한다.

$$PC = \left(0.02882 + \frac{0.91}{s} + 0.000003828 \times s^2\right) \times PP \quad (11)$$

여기서, PC : 유류비용(원/km)

PP : 유류가격(원/L)

이 식에서 속도 변수의 값은 통행시간을 산정하는 도시고속도로 BPR 함수의 역수를 취해 구한 속도가 된다. 그리고 한계유류비용은 식(11)에 교통량을 곱해 총유류비용을 구한 다음, 교통량으로 미분해서 계산한다.

건설비용은 서부간선도로 지하화 계획의 초기 건설 비용 자료를, 유지관리비용은 Korea Development Institute(2009)의 자료를 이용한다. 지하서부간선도로는 민간제안사업으로 건설될 계획이며, 타당성조사 자료 중에서 건설비용자료를 이용하여 산정하였다. 할인율은 민간도로사업들 중에서 최근에 타당성조사를 실시한 민자고속도로(들⁷⁾의 수익률을 평균한 값인 7.17%와 예비타당성 조사에서 사용하는 사회적 할인율인 5.5%, 그리고 서울시 9호선 펀드 수익률인 4%를 적용하여 분석하였다.

7) 평택-시흥, 인천-김포, 제2경인 연결, 영천-상주, 수원-광명, 제2영동 고속도로이다.

Table 2. Travel time and cost by mode: Mia-ro

Mode	Travel Time		Fuel price or Fare(Won)
	In-vehicle Time(hour)	Out-of-vehicle Time(hour)	
Auto	0.59	0.08(Approach time to Mia-ro)	1,510
Bus	0.36	0.2	1,050
Metro	0.22	0.18	1,050
Taxi	0.59	0.08	7,225

3. 단기적 관점의 분석대상: 미아로

미아로의 시간비용과 유류비용은 서부간선도로와 같은 방법으로 평균비용과 한계비용을 계산하였다. 다른 점은 미아로는 시간비용을 산정할 때 식(12)와 같이 Seoul Traffic Headquarters(2009)의 간선도로 BPR 함수를 이용하였다.

$$ATC = \left(\frac{1}{60} \times (1 + 1.25 \times \left(\frac{v}{c}\right)^{2.13})\right) \times VOT \quad (12)$$

그리고 간선도로를 이용하는 대표 통근자에게 적용되는 Cho(2006)의 다항로짓수단선택모형을 정산할 때 적용한 교통수단별 통행시간과 통행비용은 Table 2와 같다. Table 2에 제시된 값에서 혼잡통행료 부과로 인해 달라지는 값은 승용차의 운행비용과 승용차와 택시의 차내 시간이다.

혼잡통행료의 추정결과

1. 서부간선도로의 장기 혼잡통행료

장기적 관점의 승용차 비용을 추정한 결과 V/C가 높아짐에 따라 개인이 직면하는 한계비용은 상승하는 것으로 분석되었다. 이는 속도가 느려짐에 따라 통행시간이 증가하고, 모든 도로 이용자들의 통행비용 증가분은 더욱더 커지게 된다. 즉 차량 한 대의 진입으로 인한 V/C의 상승은 모든 도로 이용자들의 비용 증가를 의미한다. 도로 건설·유지보수비용과 승용차 이용자의 한계비용과 평균비용 차이가 같은 지점에서 최적 V/C를 찾고, 최적 V/C 수준일 때의 혼잡통행료를 계산하면 장기적 관점에서 최적 혼잡통행료 수준을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 최근에 타당성조사를 실시한 민자고속

Table 3. Estimates of long-run congestion tolls: Seobu urban expressway (unit: Won/Veh-km)

	Present Level	Optimal Level		
		(7.17%)	(5.5%)	(4%)
V/C	1.68	1.35	1.30	1.26
Lane(Two Way)	4-6	7.51	7.77	8.02
Speed(km/h)	29.2	40.04	41.93	43.49
Marginal Auto Cost	1,376.71	888.42	835.04	789.19
Average Auto Cost	571.51	438.09	423.94	411.90
Gap Between Marginal Cost and Average Cost	805.20	450.34	411.11	377.29
Environment Cost	59.17	52.21	51.63	50.89
Congestion Toll	0	502.55	462.74	428.18

도로들의 수익률을 평균한 값인 7.17%를 적용하여 분석한 결과 V/C가 1.35에서 도로 건설·유지보수비용과 승용차 이용자의 한계비용과 평균비용 차이가 일치했으며, 이때의 최적 혼잡통행료는 502.55원/대-km이었다.

반면 일반적인 사회적 할인율인 5.5%를 적용한 결과 V/C는 1.30에서 도로 건설·유지보수비용과 승용차 이용자의 한계비용과 평균비용 차이가 일치하였으며, 이때의 최적 혼잡통행료는 462.74원/대-km이었다. 그리고 서울시 지하철 9호선 펀드 수익률인 4%를 적용한 결과 V/C는 1.26에서 도로 건설·유지보수비용과 승용차 이용자의 한계비용과 평균비용 차이가 일치하였으며, 최적 통행료는 428.18원/대-km이었다. 이처럼 할인율에 따라서 최적 혼잡통행료 수준이 차이가 나는 이유는 할인율이 높으면 자본회수계수가 높아지고, 그에 따라 투입한 자본을 회수하기 위한 혼잡통행료가 높아지기 때문이다.

한편 최근 발표된 서부간선도로 지하화 계획의 내용을 살펴보면, 개통시점인 2020년에 통행료를 3,000원으로 책정하였다(L=10.3km). 본 연구에서 추정한 혼잡통행료에 분석구간(10.31km)을 곱하여 산정하면 할인율이 7.17%일 때 5,181원이 되며, 할인율이 5.5%일 때 4,771원, 할인율이 4%일 때, 4,415원이 된다. 언론에 발표된 통행료와 본 연구의 분석결과가 다른 이유는 앞에서 설명하였듯이 분석기준년의 차이, 통행료의 부과 목적 및 도시고속도로의 용량, 분석시간대가 다르기 때문이다.

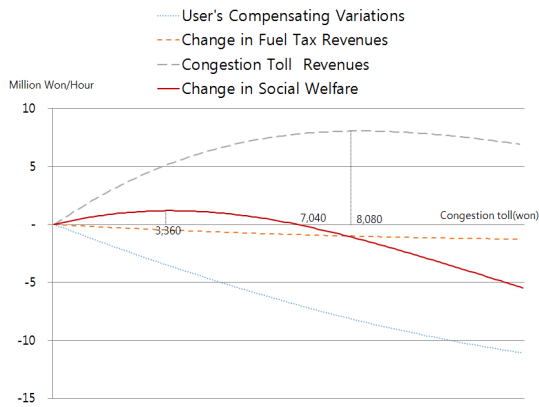


Figure 1. Change in social welfare from congestion tolls: Mia-ro

2. 미아로의 단기 혼잡통행료

단기적 관점의 분석 결과는 Figure 1에서 확인할 수 있다. 이 그림에서 X축은 혼잡통행료(원)이며, Y축은 혼잡통행료 변화에 따른 이용자 보상변화와 유류세 수입변화 및 혼잡통행료 수입의 합인 사회후생 변화이다. 여기서 혼잡통행료 수준이 높아질수록 혼잡통행료 수입과 사회후생은 증가하지만, 특정 수준을 초과하면 감소한다. 반면 혼잡통행료 수준이 높아질수록 이용자 보상변화와 유류세 수입은 지속적으로 감소한다. 미아로 구간에 대하여 분석한 결과 사회후생이 극대화되는 혼잡통행료는 3,360원/대로 나타났다. 그리고 혼잡통행료가 약 7,040원/대 이상이 되면 사회후생은 혼잡통행료 부과 전보다 오히려 더 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지나치게 높은 혼잡통행료는 수단선택에 과하게 반영되어 승용차 통행의 감소로 이어지며, 이는 사회 전체적으로 바람직하지 않은 결과로 이어진다. 한편 혼잡통행료 수입이 극대화되는 지점의 혼잡통행료는 8,080원/대로 나타났다.

그리고 혼잡통행료 부과시와 현재 수준을 비교하여 보면, 현재 미아로의 평균통행속도는 14.5km/h(첨두시간, 도심진입 차량 기준)이지만 3,360원의 혼잡통행료 부과시 18.72km/h인 것으로 나타났다. 또한 도심진입 수단분담률의 경우 승용차는 18%에서 13.7%로 하락하는 것으로 나타났다. 반면 버스와 지하철의 수단분담률은 상승하며, 특히 택시의 수단분담률이 두드러지게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 혼잡통행료를 택시에는

Table 4. Estimates of short-run congestion tolls: Mia-ro

	Present (2014)	Congestion Toll Charging
V/C	1.54	1.31
Speed(km/h)	14.5	18.72
Mode	Auto	13.7
Share(%) ⁸⁾	Bus	26.9
	Metro	49.4
	Taxi	5.7
Congestion Toll(Won/Veh-km)	0	420

부과하지 않고, 승용차에 한하여 부과하는 것으로 가정하였기 때문이다.

종합적으로 살펴보면, 장기적 관점의 분석을 통하여 서부간선도로를 대상으로 최적 혼잡통행료를 추정된 결과 대-km당 503원이며, 단기적 관점의 분석을 통하여 미아로 구간을 대상으로 최적 혼잡통행료를 추정된 결과 대-km당 420원이었다. 이처럼 추정결과가 다른 이유는 분석기간의 관점이 다르고, 분석 대상구간의 현황도 다르기 때문이다.

3. 시간가치가 추정결과에 미치는 영향

본 연구에서 사용한 시간가치는 국토해양부(2009)의 자료를 분석기준년도인 2014년으로 보정한 값이다. 분석에 사용된 시간가치는 업무통행과 비업무 통행이 혼재되어 있는 상황에서 차량 1대의 시간가치를 적용하여 분석하였다. 추가로 시간가치를 조정하여 적용하면 최적 혼잡통행료의 추정결과는 어떻게 변하는 지를 분석하였다.

Table 5. Impacts of VOT on estimation results

(unit: Won/veh-km)

Study Road	Item	Present (2014)	VOT(Won/hr)	
			13,099	7,358
Seobu Urban Expressway (Discount Rate:7.17%)	LRCT	0	502.6	445.4
	V/C	1.68	1.35	1.54
	Speed (km/h)	29.2	40.04	33.48
Mia-ro	SRCT	0	420.0	50.0
	V/C	1.54	1.31	1.49
	Speed (km/h)	14.5	18.72	15.1

LRCT: Long-Run Congestion Toll.
SRCT: Short-Run Congestion Toll.

8) 현재(2014)의 수단분담률에 대한 최근 자료가 없어서 불가피하게 조은경(2006)에 제시되어 있는 오전 첨두시간에(7-9시)에 도심에 진입하는 통행자의 수단분담률을 적용하였다.

업무 통행과 비업무 통행이 혼재하다면, 차량 한대의 시간가치는 Table 5에 제시되어 있는 13,099원이 되고, 비업무 통행만 가정한다면 7,358원이 된다. 따라서 각 시간가치에 따라 최적 혼잡통행료를 추정할 결과 장기적 관점, 단기적 관점에서 모두 시간가치가 높을수록 혼잡통행료 수준은 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 장기적 관점에서는 시간가치가 높을수록 도로는 더 확장되어야 하고 그에 따라서 회수해야 하는 건설비는 커지므로 최적 혼잡통행료는 높아진다. 또한 단기적 관점에서는 도로 확장이 불가능하므로, 시간가치가 높을수록 혼잡으로 인한 시간손실분의 가치가 높아지기 때문에 최적 혼잡통행료는 높아지게 된다.

결론

본 연구에서는 승용차 수단의 비용으로 사적비용과 외부비용을 추정하였다. 이때 사적비용으로 통행시간비용과 유류비용을 고려하였으며, 외부비용은 환경비용을 반영하였다. 통행시간비용은 BPR 함수를 이용하여 이용자의 평균비용과 한계비용을 추정하였다. 그리고 유류비용은 유류소비량 함수를 이용하여 산정하였다. 또한 환경비용은 대기오염비용과 소음비용, 온실가스비용으로 구성되며, 각각 산정한 후 합하여 총환경비용을 추정하였다.

그리고 분석기간은 두 가지의 방법론을 적용해 분석하였다. 우선 장기적 분석의 대상구간은 추가적인 도로의 건설이 계획 중인 서부간선도로를 선정하였다. 장기적 분석의 경우 추가적인 도로건설·유지보수비용을 차선수의 함수로 정의한 다음, 이를 대-km로 환산하였다. 이때 연간 비용을 침두 지속시간을 이용하여 시간단위 비용으로 환산한 다음, 대-km당 비용으로 환산하였다. 추정된 도로 건설·유지보수비용과 승용차의 한계비용과 평균비용의 차이가 같게 되는 지점이 최적 V/C 가 되며, 이 값을 이용하여 환경비용을 포함하는 최적 혼잡통행료를 추정하였다. 추정결과 대-km당 최적 혼잡통행료는 약 502.55원이며, 분석대상구간 길이 10.31km를 적용하면 5,181원/대로 나타났다.

단기적 분석은 승용차 수단뿐만 아니라 대중교통수단과 택시 수단을 모두 고려하기 위하여 수단선택모형을 이용하여 균형점을 찾는 방법론을 이용하였다. 혼잡통행료 수준에 따라서 균형점을 계속 찾아가면서 사회후생변화를 살펴보고, 사회후생이 극대화되는 지점에서 최적

혼잡통행료를 결정하는 방법을 이용하였다. 분석결과 혼잡통행료가 부과되면 이용자 보상변화와 유류세 수입은 감소하지만 혼잡통행료 수입은 증가하고, 이는 이용자 보상변화와 유류세 수입의 감소분을 상쇄하고도 남아 사회적으로 더 바람직한 것으로 나타났다. 사회후생이 극대화되는 혼잡통행료는 대-km당 420원이었으며, 미아로 구간 8km에 적용하면 3,360원/대로 나타났다. 또한 혼잡통행료 수준이 높아질수록 사회후생은 증가하다가 일정 시점부터 감소하며, 다른 시간가치를 적용하면 최적 혼잡통행료 수준이 달라지는 것으로 나타났다.

장기적 관점의 분석결과 도로의 확장을 통하여 사회후생을 증가시킬 여지가 존재하므로 현재 확장을 통하여 서부간선도로 이용자의 시간비용과 유류비용을 낮추는 정책은 타당하다고 볼 수 있다. 또한 단기적 관점의 분석결과 역시 혼잡통행료를 부과하면 사회후생을 증가시킬 수 있으므로 현재의 도로혼잡을 완화하기 위한 정책적 수단으로 대중교통 이용 활성화, 자동차 수요관리와 함께 혼잡통행료 부과 방안을 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 한계점으로는 도로 확장이 가능한 장기적 관점에서도 수단 선택을 고려하지 못한 점이다. 그리고 단기적 관점의 분석에서 혼잡통행료를 부과할 경우 소득계층별로 수단선택에 미치는 영향이 다를 것인데, 소득수준이 동일하다고 가정한 점이다. 또한 외부비용을 반영하였지만, 사고비용과 주차비용은 제외하고 환경비용만 반영한 점이다.

한편으로 혼잡통행료가 부과되면 금전적으로 부담을 느끼는 통행자가 발생할 것이다. 이러한 통행자들은 대중교통으로 수단을 전환하려 할 것이므로 대중교통 통행자들이 증가하고, 대중교통 서비스의 질이 하락할 것으로 예상된다. 따라서 사회후생을 극대화하기 위해서는 대중교통 서비스를 개선하는 데 혼잡통행료 수입을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Cho E. K. (2006), The Efficiency and Equity Analysis of Cordon Pricing in the Capital Region, Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- Kim S. S., Han J. I. (1995), Optimal Peak-Load Pricing and Investment Levels on Interurban Expressways,

- Journal of Environmental Studies, 33, 101-122.
- Korea Development Institute (2009), Analysis in Road Maintenance Cost For P.F.S.
- Kumar S. A., Tiwari G., Upadhyay V. (2010), Estimating Marginal External Costs of Transport in Delhi, Transport Policy, 17, 27-37.
- Metropolitan Transportation Authority (2009), Transportation Demand Estimation and Reactions in Metropolitan Area.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), Guidelines for Investment of Transport Infrastructure.
- Proost S., Van Dender K. (2008), Optimal Urban Transportation Pricing in the Presence of Congestion, Economic of Density and Costly Public Funds, Transportation Research Part A, 42, 1220-1230.
- Seoul Traffic Headquarters (2014), Seoul Vehicle Travel Speed in 2014.
- The Korea Transport Institute (2008), 2007 Traffic Congestion Costs: Estimation and Trend Analysis.
- The Seoul Institute (2001), Estimating Private and Social Costs of Vehicle Ownership and Operation.
- Viton P. A. (1980), Equilibrium Short-Run-Marginal - Cost Pricing of a Transport Facility: The Case of the San Francisco Bay Bridge, Journal of Transport Economics and Policy, 14(2), 185-203.

알림 : 본 논문은 대한교통학회에서 주최한 제66회 학술 발표회에서 발표된 "외부비용을 반영한 도시내 도로의 혼잡통행료 추정에 관한 연구"의 내용을 수정·보완하여 작성한 것입니다.

- ☞ 주 작성자 : 박찬운
- ☞ 교신저자 : 김성수
- ☞ 논문투고일 : 2015. 4. 9
- ☞ 논문심사일 : 2015. 5. 12 (1차)
2015. 10. 26 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2015. 10. 26
- ☞ 반론접수기한 : 2016. 4. 30
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필