

都市間 高速道路의 最適容量과 最適通行料 推定

金 成 洙*
韓 在 一**

- <目 次> -

I. 序論	4. 其他費用
II. 最適道路容量과 最適通行料 決定 模型	5. 總費用函數
1. 模型의 假定	IV. 最適道路容量, 最適通行料 및 實際利用料의 推定과 比較
2. 模型의 定立	1. 最適道路容量과 最適通行料의 推定
3. 道路 建設·維持費用과 通行料收入	2. 實際利用料, 實際混雜費用 및 最適通行料의 比較
III. 費用函數의 設定	V. 結論
1. 高速道路 建設·維持費用函數	
2. 時間費用函數	
3. 車輛運行費用函數	

I. 序論

차량이 장거리를 빠르게 이동하고자 할 때 사용되는 고속도로는 경제의 움직임을 원활하게 하는 국가기간시설이다. 우리나라에서는 이러한 고속도로의 중요성에 비추어 경제개발이 한창이던 1960년대에 첫 고속도로인 현재의 제1경인고속도로를 건설하였다. 그 후 고속도로의 건설과 유지관리를 전담하는 기구로 한국도로공사가 설립되었으며, 경제개발이 가속화되면서 고속도로는 급속한 양적 팽창을 이루었다. 한국도로공사 설립당시인 1969년의 고속도로 총연장은 68.7km, 연간통행료 수입은 4억 3,600만원에 불과했으나, 24년 후인 1993년에는 총연장이 1,610.6km로 23.4배가 증가했으며 연간통행료 수입은 6,975억 1,100만원으로 무려 1,600배나 증가하였다.¹⁾

현재 고속도로의 통행료는 도로를 효율적으로 이용하도록 유도할 수 있는 가격설정방법, 즉

* 서울대학교 環境大學院 助教授

** 서울대학교 環境大學院 1995年 卒業

1) 한양대학교(1991), p. 3 및 한국도로공사 내부자료.

한계비용에 준거해 설정하는 방법에 따라 결정되지는 않는다. 고속도로의 현행 통행료는 차량이 대체도로인 무료국도를 이용할 경우에 비해 고속도로를 이용함으로써 얻는 시간과 비용의 편익한도 내에서 결정하도록 되어 있다.²⁾ 따라서 현행 통행료 수준은 고속도로를 이용하는 교통량을 적정 수준으로 유지해 교통혼잡을 완화시키는 역할을 하지 못할 뿐만 아니라, 고속도로를 건설하고 유지하는 데 소요되는 비용을 적절히 반영하고 있지 못하다.

본 연구는 고속도로의 건설 및 유지비용과 도로이용자비용을 함께 고려하는 장기적인 관점에서 최적도로용량과 장기한계비용에 준거하는 최적통행료를 구하고자 한다. 지금까지의 국내 연구들은 거의 대부분 도로용량이 변하지 않는다고 가정하는 단기적인 관점에서 도로이용자비용만을 고려해 단기한계비용에 준거하는 최적통행료를 산정하였다.³⁾ 이러한 연구들은 교통수요가 증가하더라도 도로확장이 어려운 도시내 도로에 혼잡통행료를 부과하고자 할 때 적정 통행료수준 설정에 도움이 된다. 그러나 교통수요의 증가에 따라 도로확장이 가능하거나 현재 진행되고 있는 도시간 고속도로의 경우 장기 한계비용에 준거해 설정되는 통행료가 더 적절하다고 알려져 있다.⁴⁾

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II절에서는 고속도로를 이용하는 차종이 다양하다는 가정 하에서 최적도로용량과 최적통행료를 결정하는 이론적인 모형을 정립하고, III절에서는 장기적 관점에서 고속도로 이용에 따르는 여러 비용 즉, 도로건설·유지비용과 도로이용자의 시간비용 및 차량운행비용의 함수를 설정한다. IV절에서는 연구대상도로인 제1경인고속도로에 대해 최적도로용량, 최적통행료 및 실제이용료를 추정한 다음 그 결과를 비교분석하고, 마지막 절에서 분석결과를 요약하고 결론을 맺는다.

II. 最適道路容量과 最適通行料 決定 模型

Mohring & Harwitz(1962)는 한 모형 안에서 최적도로용량과 최적(혼잡)통행료를 추정할 수 있음을 보이고 있다. 본 연구에서 정립되는 모형은 그들의 모형을 토대로 하고 있으며, Keeler & Small(1977)에 의해 제시된 분석의 틀을 따른다. 이 절에서 정립되는 모형은 고속도로를 이용하는 차량의 종류가 다수라는 사실을 명시적으로 고려한다는 점에서 이전 연구들의 모형과 다르다.

1. 模型의 假定

분석을 단순화하기 위하여 다음 8가지 가정 하에서 모형을 정립한다. 첫째, 고속도로는 불

2) 국토개발연구원(1990), p. 76.

3) 이러한 연구의 예로는 원계무(1985) 등을 참조.

4) 이러한 환경 하에서 장기한계비용에 준거하여 통행료를 설정하는 것이 타당하다는 논리적 설명에 대해서는 Meyer and Straszheim(1971), pp. 11~29 & 80~98 등을 참조.

가분성(indivisibility)의 제약없이 건설이 가능하다.⁵⁾ 둘째, 도로건설은 규모에 대한 수확불변(constant returns to scale)이다.⁶⁾ 셋째, 각 시간대의 교통수요는 다른 시간대에 부과되는 통행료의 영향을 받지 않는다.⁷⁾ 넷째, 각 시간대 내의 교통량은 균일하게 분포하며, 평일의 시간대별 교통량 분포비율과 차종 분포비율은 1년 동안 매일 동일하다. 다섯째, 고속도로의 대체도로는 존재하지 않는다.⁸⁾ 여섯째, 차종별 탑승인원 또는 화물적재톤수는 변하지 않는다. 일곱째, 동일한 차종을 이용하는 승객의 소득 또는 적재된 화물의 가치는 같으며 변하지 않는다. 마지막으로, 각 차종에 대한 교통수요는 다른 차종에 부과되는 통행료의 영향을 받지 않는다.

2. 模型의 定立

고속도로를 이용하는 차량들은 차종에 따라 N 종류로 구분되며 평일의 24시간은 교통수요의 증감에 따라 T 시간대로 구분되는 경우, 각 시간대의 차종별 교통수요는 다음과 같은 NT 개의 역수요함수로 표시된다.

$$P_i^n = P_i^n(Q_i^n), n=1, \dots, N; i=1, \dots, T. \quad (1)$$

여기서 P_i^n 은 시간대 i 동안 차종 n 의 차량이 고속도로를 이용하기 위해 부담하는 사용자

- 5) 도로건설시 차선수는 정수가 아니어도 가능하다는 뜻이다. 즉, 교통수요에 따라 2차선 또는 3차선은 물론이고, 2.5차선이나 3.5차선으로도 건설할 수 있다는 뜻이다. 이 가정은 도로건설시 항상 정수의 차선수로 하는 현실과는 다르다. 그러나 현실적인 불가분성의 가정 하에서 최적도로용량을 추정한다고 하더라도, 개별도로에 대해서는 도로용량의 과다 또는 과소 문제가 발생하지만 도로망 전체에 대해서는 이러한 문제가 별로 클 것 같지 않다. 따라서 도로건설은 가분적으로 가능하다는 이 가정이 비현실적이라고 하더라도, 개별도로에 대한 최적도로용량 추정치를 도로망 전체에 적용되는 최적도로용량으로 간주할 수 있으므로 이 가정은 합리적이라고 할 수 있다.
- 6) 미국자료의 실증분석에 의하면, 도로건설은 대체로 규모에 대해 수확불변인 것으로 알려져 있다. 여기에 대해서는 Small(1992, pp. 94-99) 참조.
- 7) 어떤 시간대에 부과되는 통행료가 다른 시간대에 부과되는 통행료보다 더 높다고 하더라도 도로이용자는 도로를 이용하는 시간대를 변경하지 않는다는 뜻이다. 이 가정은 비첨두시간대에 비해 첨두시간대에 높은 통행료가 부과되는 경우 첨두시간대의 교통량 중 일부가 비첨두시간대로 분산되는 현상을 무시한다는 점에서 비현실적이다. 그러나 본 연구의 대상인 제1경인고속도로의 경우 평일의 주간(09-17시) 전체가 첨두시간대에 해당하므로, 최적통행료가 아주 높지 않다면 교통량분산효과는 클 것 같지 않다. 따라서 이 가정은 비현실적이지 않다고 할 수 있다.
- 8) 고속도로 이용시 부과되는 통행료가 크게 인상된다고 하더라도 통행료 부담을 피하기 위해 대체도로를 이용할 수 없기 때문에 고속도로 이용자들 중 일부는 통행 자체를 포기해야 한다는 뜻이다. 이 가정은 우리나라의 도시간 도로여건, 즉 두 도시를 연결하는 도로로 유료인 고속도로와 무료인 국도가 병존하는 여건을 무시한다는 점에서 비현실적이다. 그러나 두 도시간 통행시 이용가능한 두 도로를 모두 고려해서 고속도로의 최적도로용량과 최적통행료를 추정한다고 하더라도, 그 결과는 현재의 가정 하에서 얻어지는 결과와 크게 다를 것 같지 않다. 이는 본 연구에서 자료로 이용하는 제1경인고속도로의 교통량은 연구년도인 1991년의 고속도로 통행료를 이미 반영한 균형교통량이므로 기존 통행료와 큰 차이가 없는 최적통행료가 부과되는 경우 국도로 전환하는 교통량은 적을 것이기 때문이다.

비용(시간비용+차량운행비용+통행료)이며, Q_i^n 은 시간대 i 동안 고속도로를 이용하는 차종 n 의 교통량이다.

반면 도로운영기관이 부담하며, 교통량이 아니라 도로용량의 함수인 비용이 있다. 도로용지의 매입과 도로건설시 소요되는 투자액에 대한 이자 및 원금의 분할상환금액과 유지보수비를 포함하는 연간 건설·유지비용, $\rho(w)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho(w) = \left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) [K(w) + M(w) + rA(w)]. \quad (2)$$

여기서 r 은 할인율, n 은 도로의 내구연한, w 는 도로의 차선수, $K(w)$ 는 도로건설비용, $M(w)$ 는 연간 도로유지·보수비용이며, $A(w)$ 는 도로용지매입비용이다.

다음으로 도로이용자 또는 도로관련 행정기관이 부담하며, 교통량 뿐만 아니라 도로용량의 함수인 평균가변비용이 있다. 이 비용에는 차량운행비용, 차량의 탑승객 또는 적재된 화물의 시간비용 및 공공서비스비용⁹⁾(예를 들면, 경찰비용) 등이 포함된다.

$$D_i^n = D_i^n(Q_i^1, \dots, Q_i^N, w), \quad n=1, \dots, N; \quad i=1, \dots, T. \quad (3)$$

여기서 D_i^n 은 시간대 i 동안 차종 n 의 차량 이용자가 교통지체로 인해 평균적으로 부담하는 차량운행비용과 시간비용, 그리고 도로관련 행정기관이 부담하는 도로서비스비용의 합이다. 식 (3)의 평균가변비용은 Q_i^n 으로 표시되는 교통량과 w 로 표시되는 고속도로의 용량에 대해 0차 동차함수로 가정한다. 즉, 차량속도는 교통량과 도로용량의 절대 크기에 관계없이 교통량 대 용량 비율(v/c)에 의해 결정된다고 가정한다.

최적 사용자비용과 최적 투자수준(또는 도로용량)은 모든 차량들과 시간대에 걸쳐 발생하는 다음과 같은 순편익(net benefits, NB)을 극대화함으로써 결정될 수 있다.

$$NB = \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N \left[\int_0^{Q_i^n} P_i^n(Q_i^n) dQ_i^n - Q_i^n D_i^n(Q_i^1, \dots, Q_i^N, w) \right] - \rho(w). \quad (4)$$

순편익을 극대화하기 위한 필요조건은 식 (4)를 Q_i^n 과 w 에 관하여 각각 편미분한 결과를 0으로 놓으면 다음과 같이 도출된다.

$$\frac{\partial NB}{\partial Q_i^n} = P_i^n(Q_i^n) - D_i^n - \sum_{j=1}^N Q_i^j \frac{\partial D_i^j}{\partial Q_i^n} = 0, \quad n=1, \dots, N; \quad i=1, \dots, T. \quad (5)$$

9) 공공서비스비용은 도로용량의 함수가 아니라 차량주행거리의 함수라고 할 수 있다. 따라서 보다 정확한 분석을 위해서는 이 비용을 별도의 함수로 설정해야 하나, 분석을 단순화하기 위해 평균가변비용에 포함시켰다. 뒤에서 언급되는 것처럼 공공서비스비용은 매우 작으므로 실제 분석에서는 제외된다.

$$\frac{\partial NB}{\partial w} = - \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N Q_i^n \frac{\partial D_i^n}{\partial w} - \rho'(w) = 0. \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$P_i^n = D_i^n + \sum_{j=1}^N Q_i^j \frac{\partial D_i^j}{\partial Q_i^n}, \quad n=1, \dots, N; \quad i=1, \dots, T. \quad (7)$$

$$\rho'(w) = - \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N Q_i^n \frac{\partial D_i^n}{\partial w}. \quad (8)$$

식 (7)은 시간대별 차종별 사용자비용이 단기한계비용과 같아야 함을 의미한다. 우변의 첫째 항은 도로이용자가 실제로 부담하는 평균가변비용이므로, 우변의 둘째 항이 단기한계비용과 평균가변비용의 차이인 최적혼잡통행료(optimal congestion toll)가 된다. 식 (8)은 도로용량을 한 단위 만큼 추가로 확장할 때 소요되는 비용의 증가분이 확장된 도로용량으로부터 (모든 시간대의) 도로이용자들이 얻는 비용의 절약분과 같아질 때까지 도로용량이 증가되어야 함을 의미한다.

뒤에서 제1경인고속도로의 최적도로용량과 최적혼잡통행료를 추정할 때 식 (7)과 (8)이 이용된다. 먼저 식 (8)은 도로건설유지비용과 도로이용자비용을 합한 총비용을 극소화하는 조건이기도 하므로, 이 식을 이용하여 최적도로용량 또는 최적서비스수준(optimal service level)을 나타내는 v/c를 구한다. 여기서 구해진 최적 v/c를 식 (7)에 대입하여 최적혼잡통행료를 구한다. 이러한 과정을 거쳐서 추정되는 최적도로용량을 건설하고 유지·보수함과 동시에 도로를 이용하는 차량들에 대해 최적혼잡통행료를 부과한다면, 순편익을 극대화하는 장기균형상태에 도달할 수 있다.

3. 道路建設維持費用과 通行料收入

앞에서 도출된 결과로부터 최적도로용량을 건설하고 유지보수하는 데 드는 비용과 최적통행료를 부과함으로써 얻는 수입 사이의 관계를 결정할 수 있다. 식 (7)의 우변 둘째 항(즉, 최적통행료)을 이용하면, 모든 차량들과 시간대에 대해 최적통행료를 부과함으로써 얻는 통행료수입(toll revenue, TR)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TR = \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N Q_i^n Q_i^j \frac{\partial D_i^j}{\partial Q_i^n}. \quad (9)$$

평균가변비용함수 D_i^n 은 0차 동차함수로 가정되었으므로, 식 (3)에 오일러의 정리(Euler's theorem)를 적용하면 다음의 식이 도출된다.¹⁰⁾

10) 오일러의 정리에 대해서는 Henderson and Quandt (1980), pp. 107~110 등을 참조.

$$\sum_{j=1}^N Q_i^j \frac{\partial D_i^n}{\partial Q_i^j} + w \frac{\partial D_i^n}{\partial w} = 0, \quad n=1, \dots, N; \quad i=1, \dots, T. \quad (10)$$

n 번째 식에 Q_i^n 을 곱하고 모든 차종과 시간대에 대해 더한 다음 정리하면 다음의 식이 도출된다.

$$\sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N Q_i^n Q_i^j \frac{\partial D_i^n}{\partial Q_i^j} = -w \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N Q_i^n \frac{\partial D_i^n}{\partial w}. \quad (11)$$

식 (8)로부터, 식 (11)의 우변은 $w\rho'(w)$ 와 같다. 이를 식 (9)에 대입하면 다음의 식이 도출된다.

$$TR = w\rho'(w). \quad (12)$$

앞에서 도로건설은 규모에 대해 수확불변인 것으로 가정되었으므로, $\rho(w) = aw$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $\rho'(w) = a$ 이므로, $w\rho'(w) = aw = (w)$ 가 된다. 따라서 도로건설이 규모에 대해 수확불변이고 최적도로용량의 건설 및 유지와 함께 최적혼잡통행료가 부과된다면, 통행료수입은 정확히 건설유지비용과 일치하게 된다. 도로건설이 규모에 대해 수확체증인 경우에는 통행료수입이 건설유지비용보다 작게 되며, 규모에 대해 수확체감인 경우에는 통행료수입이 건설유지비용보다 크게 된다.

Ⅲ. 費用函數의 設定

앞 절에서 보인 것처럼, 고속도로의 순편익을 극대화하는 최적도로용량과 최적혼잡통행료를 추정하기 위해서는 먼저 고속도로의 연간 총비용함수를 구해야 한다. 이 절에서는 먼저 고속도로의 건설·유지비용함수를 구하고, 평균가변비용을 구성하는 두 요소인 시간비용과 차량운행비용의 차종별 함수를 구하며, 실제로는 발생하는 비용이지만 본 연구의 총비용 산정에는 포함되지 않는 비용들에 대해 간략하게 언급한 다음, 연간 총비용함수를 도출한다.

1. 高速道路 建設·維持費用函數

연구대상도로인 제1경인고속도로의 연간건설비용은 제1경인고속도로의 과거 건설비용을 건설시점인 1960년대 말로부터 연구년도인 1991년까지의 지가 및 물가상승률을 적용해 현재가치액으로 환산하여 산정하는 대신에 현재 건설 중인 제2경인고속도로의 건설비용을 이용해 산정하였다. 서울과 인천간과 같이 두 도시간 고속도로 통행에 대한 수요가 계속 증가하는 경우 기존 고속도로는 확장되거나(물리적 수명이 다 되었을 때) 새로운 고속도로로 대체되어야 하므로, 기존 고속도로의 장기비용은 확장 또는 대체시 소요되는 비용이기 때문이다.¹¹⁾

제2경인고속도로의 차선-km당 연간건설비용은 식 (1)과 한국도로공사의 내부자료를 이용하

여 산정하였다.¹²⁾ 할인율은 한국개발연구원(1987)이 우리나라의 경우 적정 사회적 할인율로 제시한 7~13.5% 중 상·하한에 해당하는 7%와 13%를 적용하였으며, 고속도로의 내구연한은 이에 관한 우리나라의 연구결과가 없어서 부득이 Keeler & Small (1977, p. 6)과 같이 25년을 적용하였다. 차선-km당 연간 유지·보수비용은 한국도로공사(1994, pp. 114~115)에 실려 있는 제1경인고속도로의 유지·보수비용에 관한 자료를 이용하여 산정하였다. 이러한 과정을 거쳐서 산정한 제1경인고속도로의 연간 건설·유지비용은 <표-1>과 같다.

<표-1> 제1경인고속도로의 연간 건설·유지비용

(단위 : 원/차선-km, 1991년 가격)

비용	할인율 7%	13%
건설비용	131,576,865	209,173,477
유지비용	75,170,004	139,601,437
유지·보수비용	168,674,000	168,674,000
계	248,915,369	390,943,414

따라서 고속도로 차선수 w 의 함수로 표시되는 연간 건설유지비용은 다음과 같다.

$$\rho(w) = \begin{cases} 248,915,369 w(\text{원/차선-km})(\text{할인율이 7\%일 때}) \\ 390,943,414 w(\text{원/차선-km})(\text{할인율이 13\%일 때}) \end{cases} \quad (13)$$

2. 時間費用函數

시간비용(time costs)은 교통량-시간 관계식에 의해 결정되는 통행소요시간에 시간대별 차종별 시간가치를 곱해서 구한다. 여기서는 먼저 분석에서 사용될 교통량-시간 관계식과 시간대별 차종별 시간가치에 대해 논의한 다음에 시간비용함수를 도출하기로 한다.

(1) 교통량-시간 관계식

시간비용을 구하기 위해 서선덕(1991, p. 27)이 제시한 교통량-시간 관계식을 이용하였다. 각 시간대의 교통량은 균일하게 분포한다는 가정하에서 차종에 관계없이 차량이 고속도로 1km를 주행하는 데 소요되는 평균시간, TT 는 다음과 같다.

$$TT = TT_0[1 + 0.9(X/C)^3] \quad (14)$$

여기서 TT_0 는 자유통행상태 하에서의 여행시간을 뜻하며, 건설부(1993, p. 120)의 고속도로 설계속도인 100km/h로 1km 구간을 주행하는 데 소요되는 시간(0.01시간)을 그 값으로

11) 이에 관한 논리적 설명에 대해서는 Gomez-Ibanez & Meyer (1992), p. 14-2 등을 참조.

12) 제2경인고속도로(총연장 15.5km, 노폭 6차선)의 총사업비 2,700억원(1993년 가격 기준) 가운데 용지매입 비용이 1,112억원이며 그 나머지가 건설비용이다.

사용하였다.¹³⁾ C는 고속도로의 1시간용량을 나타내며, 건설부(1993, p. 119)가 고속도로의 이상용량으로 제시한 2,200승용차/시/차선에 차선수(w)를 곱해 그 값을 산정하였다.

식 (14)의 X는 승용차환산계수(passenger car equivalents, PCE)로 표시되는 고속도로의 1시간교통량으로, 다음 식을 이용하여 산정하였다.

$$X = \sum_{n=1}^N E^n X^n \tag{15}$$

여기서 Xⁿ은 고속도로를 이용하는 차종 n의 1시간당 차량대수이다. 차종은 승용차(n=1), 소형버스(n=2), 보통버스(n=3), 소형화물차(n=4), 중형화물차(n=5), 대형화물차(n=6)로 구분하였다.¹⁴⁾ 그리고 Eⁿ은 차종 n의 승용차환산계수로 <표-2>에 나와 있는 값을 사용하였다.

<표-2> 차종별 승용차환산계수

차종	승용차	소형버스*	보통버스	소형화물차*	중형화물차	대형화물차
승용차환산계수	1	1	1.3	1	1.5	1.5

자료: 건설부(1993), p. 123.

주: *소형버스와 소형화물차는 차체의 크기나 특성이 승용차와 비슷하다고 보아 승용차환산계수를 1로 정하였음.

(2) 시간가치

① 승용차이용자와 버스승객의 시간가치

업무목적으로 승용차와 버스를 이용하는 통행인에 대한 시간가치는 교통개발연구원(1992a)이 제시한 값을 그대로 이용하였다. <표-3>에 보이는 것처럼, 업무통행에 소요되는 시간의 가치는 통행인의 임금률과 같다고 가정하였다. 반면 비업무목적(출퇴근, 장보기, 여가 등의 목적)으로 승용차와 버스를 이용하는 통행인의 시간가치는 교통개발연구원(1992a)이 임금률의 25%에 해당한다는 가정 하에서 구한 값을 이용하였다. <표-3>에 보이는 것처럼, 시간가치를 구할 때 승용차와 버스를 이용하는 통행인의 소득은 통행목적에 관계없이 동일하다고 가정하

13) 연구대상도로인 제1경인고속도로의 지형조건은 전 구간에 걸쳐 거의 평지라고 할 수 있다는 점에서 이상적인 도로조건을 갖추었다고 볼 수 있으므로, 설계속도와 자유통행상태 하에서의 평균통행속도를 같다고 가정하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

14) 여기서 소형버스와 보통버스를 구분한 기준은 승차정원으로, 16인승 이하는 소형버스, 17인승 이상은 보통버스로 하였다. 화물차의 경우는 한국도로공사의 통행요금표상의 차종구분(소형: 2.5톤 이하; 중형: 2.5~10톤; 대형: 10톤 이상), 한국도로공사(1992)의 고속도로교통량조사에서의 차종구분(소형: 1톤 이하; 중형: 1~8톤; 대형: 8톤 이상), 그리고 교통개발연구원(1986)의 차종구분(소형: 2.5톤 이하; 중형: 2.5~8톤; 대형: 8톤 이상)이 다 다르다. 본 연구에서는 차종별 통행료를 산정하는 데 필요한 승용차환산계수를 고려해서 교통개발연구원의 차종구분을 따랐다. 그러나 여러 기관의 차종구분은 큰 차이를 보이지 않으므로 분석결과에 미치는 영향은 미미하다.

〈표-3〉 승용차이용자와 버스승객의 시간가치

(단위: 원, 1991년 가격)

항목	차종별	승용차이용자	버스승객
월평균소득(원)		1,287,380	845,300
월평균근로시간(시간)		208.5	208.5
시간당소득(A)		6,174	4,504
업무통행 시간가치(B)		6,174	4,504
비업무통행 시간가치(C)		1,544	1,014
B/A(%)		100	100
C/A(%)		25	25

자료: 교통개발연구원(1992a), pp. 140~143.

였다.

시간대별 승용차이용자와 버스승객의 통행시간가치는 다음과 같은 시간대별 통행목적 비율에 대한 가정 하에서 추정되었다. 첫째, 하루 중 근무시간대(9시-17시)가 아닌 시간대에서는 업무목적의 통행이 발생하지 않는다. 이 가정은 근무시간 이전과 이후 시간대에서 발생하는 통행은 거의 대부분 출퇴근, 장보기, 여가 등의 비업무목적이기 때문에 타당하다고 할 수 있다. 둘째, 근무시간대에 발생하는 통행 가운데 36.7%만이 업무목적의 통행이며, 나머지는 모두 비업무목적의 통행이다. 이 업무목적통행비율은 교통개발연구원(1992b, pp. 72, 179-180)의 서울, 부천, 광명과 인천간의 목적별 통행량조사에 나오는 업무목적의 통행수를 총통행수로 나누어 구한 값이다.

② 화물의 시간가치

화물의 시간가치는 교통개발연구원(1986)이 산정한 값에 도매물가지수를 적용해 1991년 가격으로 환산한 값을 사용하였다.¹⁵⁾ 〈표-4〉에 나와 있는 것처럼, 화물의 시간가치는 화물차의 크기에 따라 다른 값이 적용된다. 이는 일반적으로 화물차는 적재중량이 작을 수록 고부가가치

〈표-4〉 차종별 화물의 시간가치

시간가치	차종	소형 화물차 (2.5t 이하)	중형 화물차 (2.5~8t)	대형 화물차 (8t 이상)
1986(원/톤-분)		30	14	11
1991(원/톤-시간)		2,055	959.4	753.6

자료 : 교통개발연구원(1986), p. 395.

15) 화물차는 최종소비재보다 중간재를 보다 많이 운송하기 때문에 도매물가지수를 적용하였다.

화물의 운송에 사용되기 때문이다.

③ 시간대 구분

최적통행료는 교통량과 도로이용자의 시간가치에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 교통량과 도로이용자의 시간가치가 비슷한 지를 고려하여 하루 24시간을 상·하행 각각 5시간대로 구분하였다. <표-5>에 제시되어 있는 것처럼, 시간대 1, 2, 3과 시간대 6, 7, 8은 시간당 평균편도교통량은 비슷하지만 도로이용자의 시간가치가 서로 다르므로 다른 시간대로 구분하였다. 시간대 1, 3, 6, 8 동안 대부분의 도로이용자들은 비업무목적의 통행을 하고, 시간대 2와 7은 근무시간대이므로 상당히 많은 도로이용자들이 업무목적의 통행을 하기 때문에 시간가치가 서로 다르다.

<표-5> 제1경인고속도로*의 시간대별 교통량, 서비스수준 및 연간시간수

시간대 항목	상행(인천→서울)					하행(서울→인천)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
시간범위	6-9	9-17	17-20	20-0	0-6	7-9	9-17	17-22	22-0	0-7
1시간평균 편도교통량**	2,566	2,823	2,597	1,614	794	2,603	2,792	2,586	1,626	833
V/C***	0.583	0.642	0.590	0.327	0.181	0.592	0.635	0.588	0.271	0.196
연간시간수	1,095	2,920	1,095	1,460	2,190	730	2,920	1,825	730	2,555

자료: 한국도로공사(1992)의 자료를 계산해서 나온 결과임.

주: * 노선은 양방향 4차선임.

** 제1경인고속도로의 구간별 교통량을 단순평균해서 얻은 값(단위: PCU/h)임.

*** 제1경인고속도로의 평균편도교통량을 도로용량(4,400PCU/h)으로 나누어 구한 값임.

<표-5>에서 볼 수 있듯이, 제1경인고속도로는 오후 8시 이후의 야간 이외에는 교통량의 변화가 심하지 않으며 상행(인천→서울)과 하행(서울→인천)의 교통량이 비슷하다. 그리고 첨두 시간대는 시간대 2(상행 09~17)로 출퇴근시간이 첨두시간대인 도시내 도로 또는 일부 고속도로들과는 다른 양상을 보인다. 시간대별 연간시간수는 교통량 특성이 일년 동안 매일 같다는 가정하에서 각 시간대의 1일 시간수에 365를 곱해서 구하였다.¹⁶⁾

본 연구에서는 상행의 5시간대에 대해서만 최적도로용량과 최적통행료를 추정하였다. <표-5>에서 볼 수 있는 것처럼 상행과 하행의 시간대별 시간범위와 교통량이 비슷하기 때문에 다음 절에서 상행에 대해 추정된 시간대별 최적도로용량과 최적통행료는 하행의 대응하는 시간대에 그대로 적용해도 무리가 없으리라 판단된다.

④ 평균승차인원과 평균적재톤수

자가용승용차와 버스의 평균승차인원은 시간대별로 달라지므로 시간대별로 다른 값을 적용

16) 평일과 주말의 교통량분포가 다르다는 점을 고려하려면 시간대를 더 세분해야 한다.

하는 것이 타당하다. 그러나 시간대별 자료가 없기 때문에 <표-6>에서 보이는 차종별 상·하행 평균승차인원을 일률적으로 적용하였다.

화물차의 평균적재톤수는 <표-7>에서 보이는 값을 시간대에 관계없이 일률적으로 적용하였다.

⑤ 시간대별 차종별 시간가치

앞에서 제시한 자료들을 토대로 시간대별 차종별 시간가치를 구하면 <표-8>과 같다.

(3) 시간비용함수의 도출

앞에서 언급한 교통량-시간 관계식과 시간대별 차종별 시간가치를 토대로 시간대 i 동안 차종 n 의 차량이 고속도로 1km 구간을 통행하기 위하여 부담해야 할 시간비용, TC_i^n 은 다음과 같이 도출된다.

<표-6> 제1경인고속도로의 차종별 평균승차인원*

(단위: 인/차량)

방향	차종	승용차	소형버스	보통버스
상행		1.5	1.8	21.2
하행		1.5	2.0	20.5
평균		1.5	1.9	20.9

자료 : 교통개발연구원(1992c), p. 15.

주: * 1991년 3월 자료임.

<표-7> 고속도로 화물차의 평균적재톤수

(단위: 톤/차량)

차종	소형 화물차(2.5톤 이하)	중형 화물차(2.5~8톤)	대형 화물차(8톤 이상)
평균 적재톤수	1.84	4.03	8.21

자료 : 교통개발연구원(1986), p. 64.

<표-8> 제1경인고속도로의 시간대별 차종별 시간가치

(단위: 원/대-시간, 1991년 가격)

시간대	차종	승용차	소형버스	보통버스	소형화물차	중형화물차	대형화물차
상	1, 3~5	2316	1926.6	21192.6	3781.2	3866.4	6187.1
행	2*	4864.5	4047	44517	3781.2	3866.4	6187.1

주: *시간대 2의 승용차 또는 버스 1대당 시간가치

= 1인당 업무통행 시간가치 × 업무통행 비율(0.367) × 평균승차인원

+ 1인당 비업무통행 시간가치 × 비업무통행 비율(0.633) × 평균승차인원

$$TC_i^n = (0.01 + 0.0091(X_i / 2200 w)^3) \times VT_i^n. \quad (16)$$

여기서 X_i 는 시간대 i 동안 1시간교통량(PCU)이며, VT_i^n 은 시간대 i 동안 고속도로를 통행하는 차종 n 의 차량에 대한 시간가치(원/대-시간)로 그 값은 <표-8>에 제시되어 있다.

3. 車輛運行費用函數

차량운행비용¹⁷⁾은 주행속도에 따라 가변적이다. 식 (14)에서 볼 수 있는 것처럼 차량의 주행속도는 v/c 에 의해 결정되므로, v/c 에 따른 차량운행비용의 변화를 나타낼 수 있는 관계식이 필요하다. 그러나 우리나라의 고속도로 조건 및 교통류의 특성을 반영해 추정된 차종별 운행비용과 v/c 사이의 관계식이 없어, 이에 대한 기존 연구의 결과를 이용할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 한양대학교(1991, p. 187)가 제시한 차량운행비용과 v/c 사이의 관계식¹⁸⁾을 교통개발연구원(1986, p. 393)의 차종별 속도별 차량운행비용 추정치로 적합시켜 구한 차종별 운행비용과 v/c 사이의 회귀모형을 이용하였다.¹⁹⁾ 분석에 이용된 차종별 차량운행비용함수는 다음과 같다.²⁰⁾

$$\begin{aligned} VOC_i^1 &= 10321 + 1128 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.999 ; N=12 \\ VOC_i^2 &= 10321 + 1128 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.999 ; N=12 \\ VOC_i^3 &= 53566 + 60.83 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.983 ; N=12 \\ VOC_i^4 &= 27933 + 4870 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.993 ; N=12 \\ VOC_i^5 &= 39907 + 5279 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.994 ; N=12 \\ VOC_i^6 &= 64875 + 5501 (X_i / 2200 w)^3, R^2=0.993 ; N=12 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 VOC_i^n 은 시간대 i 동안 차종 n 의 차량이 고속도로 1km 구간을 통행하는 데 유발되는 차량운행비용(원/대-km)이다.

17) 차량운행비용에는 고정비 성격의 차량 감가상각비, 보험료 및 운전기사 인건비 등과 변동비 성격의 연료비, 엔진오일비, 타이어비 및 유지정비비 등이 있다. 여기서 보험료는 차량소유주로부터 보험회사로 이전될 뿐이므로 사회전체로 봐서는 손실이 아니다. 그러므로 원칙적으로는 보험료 대신에 교통사고비용을 조사해서 사용해야 한다. 그러나 보험회사가 교통사고비용을 정확히 추정해서 보험료를 정한다고 가정하면 교통사고비용 대신 보험료를 사용할 수 있다. 반면 차량이용자들이 부담하는 세금은 차량운행비용에 포함되지 않는다. 세금은 차량이용자들로부터 정부로 이전될 뿐이므로 사회전체적으로는 손실이 아니기 때문이다.

18) 한양대학교(1991, p. 187)가 제시한 관계식은 차종별로 구분이 되어 있지 않다.

19) 회귀모형의 계수추정치들을 전국소비자물가지수를 이용하여 연구년도인 1991년 가격으로 조정하였다.

20) 차종별 차량운행비용이 추정된 회귀직선에 의해 설명되는 정도를 나타내는 결정계수가 거의 1에 가까우므로, 계수추정량의 검정에 사용되는 t통계량을 추정된 회귀직선 표기시 생략하였다. 소형버스는 소형화물차처럼 경우를 연료로 사용하며 크기도 비슷하므로 소형화물차와 운행비용이 같다고 가정하였다. 그리고 고속도로에서는 시내버스가 운행되지 않으므로(교통개발연구원, 1992d, p. 149) 보통버스의 운행비용으로 고속버스의 자료를 이용하였다.

4. 其他費用

교통혼잡이 심해지면 공공서비스비용(경찰비용, 도로관리비용²¹⁾ 등)이 더 소요되며 차량이 배출하는 대기오염물질에 의해 유발되는 외부비용도 증가한다. 정확한 분석을 위해서는 이들 비용도 고려해야 하나, 이에 관한 연구결과가 거의 없기 때문에 본 연구에서는 이들 비용을 고려하지 않았다. 차량이 유발하는 외부비용을 추정했던 드문 연구 중 하나인 Small(1977)에 따르면, 이러한 외부비용은 절대액수 자체가 작을 뿐만 아니라 차량의 대기오염물질 배출량도 차량성능의 향상으로 계속 감소하는 추세에 있기 때문에 다른 비용의 중요성에 비추어 볼 때 무시해도 큰 문제가 되지 않는다고 한다.

5. 總費用函數

앞에서 설정된 식 (13), (16) 및 (17)로부터 연간 총비용함수를 도출할 수 있다. 1년 동안 고속도로 1km 구간을 건설 및 유지·보수하는 데 소요되는 비용과 모든 고속도로 이용차량이 1km 구간을 통행하기 위해 부담하는 시간비용과 차량운행비용의 합인 연간 총비용, TH는 다음과 같다.

$$TH = \rho(w) + \sum_{i=1}^5 \sum_{n=1}^6 Q_i^n (TC_i^n + VOC_i^n) \tag{18}$$

여기서 $\rho(w)$ 는 연간 도로건설·유지비용이고, Q_i^n 은 시간대 i 의 1년교통량이다. 그리고 TC_i^n 과 VOC_i^n 은 도로이용자가 부담하는 시간비용과 차량운행비용이며, 시간대 i 의 1시간교통량 X_i (따라서 시간대 i 동안 차종 n 의 1시간교통량, X_i^n)와 차선수 w 의 함수이다.

시간대별 최적도로용량과 최적통행료를 구하기 위해서는 도로의 건설 및 이용에 의해 발생하는 순편익의 식을 w 와 X_i^n 으로 각각 편미분해야 하는 복잡한 과정을 거쳐야 하나, Q_i^n 을 시간대 i 의 1시간교통량인 X_i 의 함수로 나타낼 수 있다면 그 과정을 단순화할 수 있다. 평일의 시간대별 교통량 분포비율과 차종 분포비율은 1년 동안 매일 동일하다는 가정하에서 식 (18)의 Q_i^n 을 다음 식으로 대체할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_i^n &= f_i k_i X_i \\ &= f_i \left(\sum_{n=1}^6 E^n k_i^n \right) X_i \end{aligned} \tag{19}$$

여기서 f_i 는 <표-5>에 나타낸 시간대 i 의 연간시간수이며, k_i 와 k_i^n 은 기준시간대 l 의 1시간교통량에 대한 시간대 i 의 1시간교통량 비율 및 차종 n 차량대수의 비율이다. <표-9>는 앞에

21) 이 비용은 차선수가 아니라 차량주행거리의 함수라고 할 수 있다. 따라서 식 (13)에서 차선수의 함수로 표시된 유지보수비용과는 다르다.

〈표-9〉 제1경인고속도로의 시간대별 차종별 교통량 비율

시간대	차종 승용차 (k_i^1)	소형버스 (k_i^2)	보통버스 (k_i^3)	소형화물차 (k_i^4)	중형화물차 (k_i^5)	대형화물차 (k_i^6)	k_i
1	0.4150	0.0940	0.0150	0.0006	0.1175	0.1356	0.9089
2	0.3566	0.0765	0.0089	0.0006	0.1904	0.1794	1
3	0.4832	0.0768	0.0141	0.0009	0.1198	0.1073	0.9199
4	0.2966	0.0573	0.0095	0.0001	0.0688	0.0681	0.5716
5	0.0983	0.0177	0.0011	0	0.0392	0.0679	0.2779

자료 : 한국도로공사(1992)에 실린 자료로부터 계산해서 나온 결과임.

서 설정된 5시간대 중 제1경인고속도로의 침두시간대에 해당하는 시간대 2를 기준시간대로 설정해 구한 k_i 와 k_i^n 의 값으로, 뒤에서 시간대별 최적도로용량과 최적통행료를 추정할 때 사용된다.

Ⅳ. 最適道路容量, 最適通行料 및 實際利用料의 推定과 比較

이 절에서는 1991년의 제1경인고속도로를 대상으로 장기적 관점에서 고속도로 이용에 따른 사회적 순편익을 극대화하는 시간대별 최적도로용량과 시간대별 차종별 km당 최적통행료를 추정한다. 그 다음 단기적 관점에서 각 차량이 기존의 제1경인고속도로를 통행하기 위해 지불하는 실제이용료 수준이 효율적인 지를 살펴보기 위해 다른 차량에 미치는 실제혼잡비용을 추정하며, 장기적 관점에서 제1경인고속도로의 기존용량이 적정한 지를 분석하기 위해 구간별 최적통행료를 추정한다. 제1경인고속도로의 교통량특성은 〈표-5〉와 〈표-8〉에서 볼 수 있는 것처럼 상행과 하행이 비슷하기 때문에, 이 절에서는 상행(인천에서 서울 방향)에 대해서만 분석한다.

1. 最適道路容量과 最適通行料의 推定

앞에서 설명한 모형과 비용함수들을 토대로 해서 도로용량을 최적화한 후 최적통행료를 산정한다. 앞의 식 (6)이 보여주는 것처럼, 도로관련공공기관이 부담하는 도로건설·유지비용과 도로이용자가 부담하는 시간 및 차량운행비용 사이에는 상충적인 관계가 존재한다. 즉 시간 및 차량운행비용을 줄이기 위해서는 도로시설을 확장해야 하므로 도로건설·유지비용을 증가시켜야 한다. 따라서 일정 수준의 교통량을 수용하기 위해 필요한 도로건설·유지비용과 차량이용자가 부담하는 시간 및 차량운행비용을 극소화할 때 도로용량의 최적 수준이 달성된다.

시간대 2를 기준시간대로 설정하는 경우 차선수에 대해 극소화할 총비용함수는 식 (13), (16), (17), (18) 및 (19)로부터 다음과 같이 도출된다.

$$TH = \rho(w) + \sum_{i=1}^5 \sum_{n=1}^6 f_i E^n k_i^n X_2 \left[A_i^n + B_i^n \left(\frac{k_i X_2}{2200w} \right)^3 \right] \quad (20)$$

$$A_i^n = 0.01 V T_i^n + \alpha^n.$$

$$B_i^n = 0.091 V T_i^n + \beta^n.$$

여기서 α^n 과 β^n 은 식 (17)의 차종별 차량운행비용함수에서 보이는 상수 및 독립변수의 계수이며, 다른 변수들의 정의는 앞에서와 같다.

기준시간대 2에 대해 식 (20)이 극소값을 갖는 도로의 차선수 또는 도로용량은 다음과 같이 추정된다.²²⁾

$$\left(\frac{X_2}{2200w} \right)^* = \begin{cases} 0.513 & (\text{할인율이 7\%인 경우}) \\ 0.574 & (\text{할인율이 13\%인 경우}) \end{cases} \quad (21)$$

다른 시간대의 최적도로용량은 위의 식과 기준시간대 2의 1시간교통량에 대한 시간대 i 의 1시간교통량 비율인 k_i 값을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{X_i}{2200w} \right)^* = k_i \left(\frac{X_2}{2200w} \right)^* \quad (22)$$

〈표-10〉은 위의 과정을 거쳐 추정된 시간대별 최적도로용량과 차선당 교통량 및 통행속도를 보여준다. 동일한 시간대에서 즉 차종별 차량이용자의 시간가치가 같은 경우 적용할인율이 높을수록 최적도로용량은 작아진다.²³⁾ 이는 동일한 차선수를 가진 도로라고 하더라도 적용할인율이 높을수록 연간 도로건설비용이 커지므로, 고속도로의 차선수를 줄여 연간 도로건설비용을 줄이는 반면 도로혼잡정도를 높게 유지해 도로이용자가 평균가변비용(시간비용과 차량운행비용의 합)을 더 많이 부담하더라도 총비용은 감소시킬 수 있기 때문이다.

앞의 분석결과를 토대로 시간대별 차종별 최적통행료 추정이 가능하다. 앞의 식 (7)이 보여주는 것처럼, 최적통행료는 도로이용에 따른 한계비용과 도로이용자가 부담하는 평균가변비용 사이의 차이이다. 시간대별 차종별 최적통행료, OT_i^n 을 산정하기 위해 사용되는 식은 식 (7), (16), (17) 및 (19)로부터 다음과 같이 도출된다.

$$OT_i^n = \sum_{j=1}^6 X_i^j \frac{\partial}{\partial X_i^n} \left[A_i^j + B_i^j \left(\frac{E^j k_i^j X_2}{2200w} \right)^3 \right] \quad (23)$$

22) 앞에서 설정된 모형은 수요측면을 고려하지 않기 때문에 여기서 최적도로용량은 교통량-도로용량의 비로 표현된다. 식 (21)에 어떤 교통량의 값을 대입하면 최적 차선수를 구할 수 있다.

23) 또는 적용할인율이 높을수록 고속도로의 최적통행속도는 낮아진다. 〈표-10〉에서 볼 수 있는 것처럼, 첨두시간대인 시간대 2의 최적속도는 적용할인율이 7%에서 13%로 높아짐에 따라 89.1km/h에서 85.3km/h로 낮아진다.

〈표-10〉 제1경인고속도로의 시간대별 최적 교통량-용량비, 교통량 및 속도

항목 시간대	할인율 = 0.07			할인율 = 0.13		
	교통량/용량	차선당교통량 (PCU/h)	속도 (km/h)	교통량/용량	차선당교통량 (PCU/h)	속도 (km/h)
1	0.466	1,025	91.6	0.521	1,147	88.6
2	0.513	1,128	89.1	0.574	1,262	85.3
3	0.471	1,037	91.3	0.528	1,161	88.2
4	0.293	645	97.8	0.328	721	96.9
5	0.142	313	99.7	0.159	351	99.6

〈표-11〉 제1경인고속도로의 시간대별 차종별 최적통행료

(원/대-km)

차종 시간대	할인율 = 7%			할인율 = 13%		
	승용차 소형버스 소형화물차	보통버스	중·대형 화물차	승용차 소형버스 소형화물차	보통버스	중·대형 화물차
1	15.16	19.71	22.74	21.26	27.64	31.89
2	26.01	33.81	39.02	36.49	47.44	54.74
3	15.04	19.55	22.56	21.10	27.43	31.65
4	3.60	4.68	5.40	5.05	6.57	7.58
5	0.47	0.61	0.71	0.65	0.85	0.98

〈표 11〉은 식 (21)과 (22)로부터 산정되는 시간대별 최적도로용량을 식 (23)에 대입해서 구한 시간대별 차종별 1km당 최적통행료를 보여준다. 여기서 보통버스와 중·대형 화물차에 대한 최적통행료는 승용차의 시간대별 최적통행료에 해당 차종의 승용차환산계수를 곱해서 구하게 된다. 이 표로부터 최적통행료에 대해 다음 두 가지 특징을 발견할 수 있다. 첫째, 최적용량 규모로 건설된 제1경인고속도로를 이용하는 차량에 대한 최적통행료는 시간대별로 크게 다르다. 예를 들면, 적용할인율이 7%인 경우 승용차에 대한 최적통행료는 비첨두시간대(시간대 5)의 1원 이하로부터 첨두시간대의 26원으로 높아진다. 이는 첨두시간대의 최적 교통량-용량비가 높으므로 혼잡비용이 더 많이 발생하기 때문이다. 둘째, 적용할인율이 높을수록 최적통행료도 높아진다. 예를 들면, 시간대 2 동안 승용차에 대한 최적통행료는 적용할인율이 7%일 때 26.0원에서 13%일 때 36.5원으로 40.4% 높아진다. 이는 적용할인율이 높을수록 연간 도로건설비용이 증가하므로 최적 교통량-용량비가 커지기 때문이다.

2. 實際利用料, 實際混雜費用 및 最適通行料의 比較

연구년도인 1991년 현재 각 차량이 제1경인고속도로를 이용할 때 지불하는 실제이용료(즉

기존통행료와 차량이용에 따른 유류세 등의 세금)와 다른 차량에 미치는 실제혼잡비용, 그리고 앞에서 추정된 최적통행료를 비교함으로써 고속도로 이용자가 실제혼잡비용 또는 최적통행료만큼의 이용료를 지불하고 있는 지 알아본다.

지금까지는 제1경인고속도로의 24km 전 구간에 걸쳐 교통량이 동일하다는 가정하에서 1km 구간에 대한 최적도로용량과 최적통행료를 추정하였으나, 실제교통량은 세부구간별로 같지 않으므로 전 구간에 대한 실제이용료, 실제혼잡비용 및 최적통행료를 보다 정확히 비교하려면 이들에 대해 세부구간별로 추정이 필요하다. 한국도로공사(1992)는 제1경인고속도로의 상행 교통량을 네 곳의 진입지점 즉 인천, 가좌IC, 부평IC 및 부천IC에서만 측정하고 있으므로, 이러한 지점에서 진입한 차량들은 모두 서울 종점까지 간다는 가정하에서 차량의 통행구간을 인천에서 서울, 가좌IC에서 서울, 부평IC에서 서울 및 부천IC에서 서울까지의 네 가지로 구분하였다.

통행구간별 실제혼잡비용은 제1경인고속도로의 네 통행구간(인천기점→가좌IC, 가좌IC→부평IC, 부평IC→부천IC, 그리고 부천IC→서울종점) 모두에 대해 앞의 <표-9>에 제시된 시간대별 교통량비율(k_i)과 시간대별 차종별 차량대수비율($k_{i,n}$)이 동일하게 적용된다는 가정하에서 추정된다. 먼저 네 세부구간별 실제 교통량-용량비를 식 (23)에 대입하여 각 세부구간의 실제혼잡비용을 추정한 다음, 진입지점부터 서울종점 사이에 있는 세부구간들의 실제혼잡비용을 더해 통행구간별 실제혼잡비용을 산정한다. 이러한 과정을 거쳐 추정된 통행구간별 실제혼잡비용은 <표-12>와 같다.

제1경인고속도로를 이용하는 차량이 부담하는 실제이용료에는 현행 고속도로 통행료뿐만 아니라 유류세 등의 세금이 포함된다. 차량이용에 따른 세금은 사회적 비용이 아니기 때문에 최적 교통량-용량비와 최적통행료 및 실제혼잡비용을 추정할 때는 차량운행비용에서 제외되었지만, 도로이용자의 관점에서는 실제로 지불하는 비용이다. 통행구간별 차종별 실제이용료는 다음 과정을 거쳐 추정된다. 먼저 각 세부구간의 시간대별 차종별 세금부담액은 교통개발연구원(1986)의 부록에 실려있는 '차종별 차량운행비용' 으로부터 추정한 차량의 통행속도와 세금부담액간 관계식과 각 세부구간에서 실제 관찰된 교통량-용량비를 식(14)에 대입해 구한 통행속도를 이용해 추정하였다. 이와 같이 추정된 세부구간별 차종별 세금부담액을 통행구간별로 합산한 다음, 이에 현행 제1경인고속도로 통행료를 합하여 <표-12>에 있는 실제이용료를 산출하였다.

<표-12>에서 볼 수 있는 것처럼, 제1경인고속도로의 통행구간과 차종에 관계없이 각 통행차량이 부담하는 실제이용료는 첨두시간대(시간대 2)에는 다른 차량에 미치는 실제혼잡비용보다 작은 반면 비첨두시간대(시간대 1, 3, 4, 5)에는 실제혼잡비용보다 크다. 즉 첨두시간대의 통행차량은 낮은 이용료를 부담하는 반면 비첨두시간대의 통행차량은 높은 이용료를 부담하고 있다. 이와 같은 이용료체계는 첨두시간대에는 고속도로의 과다이용을 초래하는 반면 비첨두

〈표-12〉 제1경인고속도로의 통행구간별 실제혼잡비용과 실제이용료

(단위: 원, 1991년 가격)

통행구간	차종	실제혼잡비용			실제이용료				
		승용차 소형버스 소형화물차	보통버스	중·대형 화물차	승용차	소형버스 소형 화물차	보통버스	중형 화물차	대형 화물차
인천→서울 (24.0km)	1	609	791	913	968	800	1391	960	1586
	시	1391	1808	2086	975	805	1396	963	1591
	간	626	814	939	973	803	1394	963	1590
	대	36	47	54	968	796	1384	956	1586
	5	1	1	1	968	796	1384	956	1588
가좌IC→서울 (17.88km)	1	576	748	864	901	776	1345	921	1514
	시	1316	1711	1974	908	781	1350	924	1520
	간	592	770	888	906	779	1348	924	1518
	대	34	44	51	901	772	1338	917	1514
	5	1	1	1	901	772	1338	917	1516
부평IC→서울 (9.72km)	1	490	638	736	535	452	699	582	844
	시	1121	1457	1681	541	457	704	585	849
	간	505	656	757	539	455	702	585	847
	대	29	38	43	534	448	692	578	842
	5	0	1	1	534	448	692	578	844
부천IC→서울 (4.9km)	1	310	403	466	469	424	651	542	773
	시	709	922	1064	472	430	654	544	776
	간	319	415	479	471	429	653	544	775
	대	18	24	28	467	424	646	539	771
	5	0	0	0	467	424	646	539	772

시간대에는 과소이용을 초래하므로, 고속도로의 기존용량을 보다 효율적으로 이용하기 위해서는 첨두시간대의 이용료를 인상하는 반면 비첨두시간대의 이용료를 인하할 필요가 있다.

통행구간별 최적통행료는 앞의 〈표-11〉에 있는 1km당 최적통행료에 통행구간별 고속도로의 연장을 곱해 산정하였으며, 그 결과는 〈표-13〉과 같다. 〈표-12〉와 〈표-13〉의 비교로부터 다음 두 가지 결론을 도출할 수 있다. 첫째, 통행구간과 적용할인율에 관계없이 야간(시간대 4, 5: 20시~익일 6시)을 제외하고는 제1경인고속도로의 교통량-용량비가 최적수준을 유지할 수 있도록 도로에 대한 투자가 이루어졌을 때 각 통행차량이 다른 차량에 미치는 혼잡비용과 같은 최적통행료는 실제혼잡비용보다 낮다. 특히 부평IC로부터 서울까지의 구간에서는 최적통행료가 실제혼잡비용보다 아주 낮다. 이는 제1경인고속도로의 최적 교통량-용량비가 1991년 현재 관찰되는 교통량-용량비보다 작기 때문이다. 따라서 제1경인고속도로의 전체 구간, 이 중에서

〈표-13〉 제1경인고속도로의 통행구간별 최적통행료

(단위: 원, 1991년 가격)

통행구간	차종	할인율 = 7%			할인율 = 13%		
		승용차 소형버스 소형화물차	보통버스	중·대형 화물차	승용차 소형버스 소형화물차	보통버스	중·대형 화물차
인천→서울 (24.0km)	1	364	473	546	510	664	766
	시 2	624	812	937	876	1139	1314
	간 3	361	469	541	506	658	759
	대 4	87	112	130	121	158	182
	5	11	15	17	16	20	24
가좌IC→서울 (17.88km)	1	271	352	407	380	494	570
	시 2	465	605	698	652	848	979
	간 3	269	350	403	77	490	566
	대 4	64	84	97	90	117	136
	5	8	11	13	12	15	18
부평IC→서울 (9.72km)	1	147	192	221	207	269	310
	시 2	253	329	379	355	461	532
	간 3	146	190	219	205	267	308
	대 4	35	46	53	49	64	74
	5	5	6	7	6	8	10
부천IC→서울 (4.9km)	1	74	97	111	104	135	156
	시 2	127	166	191	179	232	268
	간 3	74	96	111	103	134	155
	대 4	18	23	26	25	32	37
	5	2	3	3	3	4	5

도 특히 부평IC로부터 서울종점인 신월까지의 구간을 확장하는 것이 바람직하다. 24) 이와같이 최적용량의 경인고속도로를 건설하였을 때 부과해야 할 (장기)최적통행료는 제1경인고속도로의 기존용량을 효율적으로 이용하기 위해 부과해야 할 실제혼잡비용 만큼의 (단기)최적통행료보다 크게 낮아질 것이다.

둘째, 제1경인고속도로의 통행구간, 시간대 및 차종에 관계없이 각 통행차량이 부담하는 실제이용료는 최적통행료보다 높다. 게다가 〈표-5〉와 〈표-10〉의 비교로부터 알 수 있는 것처럼, 실제 관찰되는 교통량-용량비는 시간대와 적용할인율에 관계없이 최적 교통량-용량비보다 높다. 즉 1991년 현재 제1경인고속도로를 통행하는 각 차량은 최적수준보다 높은 이용료를 부담하고 있을 뿐만 아니라 최적수준보다 심한 교통혼잡을 감내하고 있다. 따라서 고속도로 건설이

24) 실제로 신월부터 부평까지의 구간은 연구년도인 1991년 직후인 1992년에 왕복 4차선으로부터 8차선으로 확장되었다.

규모에 대해 수확불변이라면 고속도로관리기관은 현재 이용료수입으로 도로건설·유지비용을 충당하고 있을 뿐만 아니라 상당액의 흑자를 보고 있다고 추정된다.

V. 結論

본 연구는 제1경인고속도로를 대상으로 실제혼잡비용과 최적도로용량 및 최적통행료를 구하였다. 분석결과는 1991년 현재 도로관련 행정기관이 제1경인고속도로를 이용하는 통행차량에 대해 부과하는 실제이용료(현행통행료와 차량이용에 따른 세금의 합)가 단기적 및 장기적 관점 모두에서 비효율적임을 보여주고 있다.

도로의 용량, 즉 차선수가 불변인 단기적 관점에서 기존용량을 효율적으로 이용하기 위해 부과해야 할 이용료에 해당하는 실제혼잡비용은 차중에 관계없이 첨두시간대(주간인 오전 9시부터 오후 5시까지)에는 실제이용료보다 높은 반면 비첨두시간대(오후 5시부터 익일 오전 9시까지)에는 낮은 것으로 추정된다. 시간대에 관계없이 일률적으로 부과되는 현행 고속도로이용료는 첨두시간대에는 고속도로의 과다이용을 초래하는 반면 비첨두시간대에는 과소이용을 초래하므로, 첨두시간대의 이용료를 인상하는 반면 비첨두시간대의 이용료를 인하하면 고속도로의 기존 용량을 보다 효율적으로 이용할 수 있을 것으로 분석된다.

도로의 차선수를 선택할 수 있는 장기적인 관점에서 최적용량의 제1경인고속도로를 건설할 때 부과해야 할 최적통행료는 거의 모든 시간대에 대해 실제혼잡비용과 실제이용료보다 낮은 것으로 추정된다. 따라서 1991년 현재 제1경인고속도로를 통행하는 각 차량은 최적수준보다 심한 교통혼잡을 감내하고 있을 뿐만 아니라 최적수준보다 높은 이용료를 부담하고 있는 반면, 고속도로관련 행정기관은 실제이용료 수입으로 도로건설 및 유지비용을 충당하고 있을 뿐만 아니라 초과이익을 얻고 있는 것으로 분석된다. 이는 제1경인고속도로의 기존용량이 최적용량보다 작고 실제이용료가 최적통행료보다 높기 때문이므로, 최적용량수준으로의 도로확장과 함께 최적통행료 수준으로 고속도로 이용료를 인하한다면 고속도로 이용에 따른 순편익을 극대화할 수 있고 고속도로관련 행정기관은 이용료수입 총액이 모두 도로건설 및 유지비용으로 지출되므로 정상이윤만을 얻게 될 것이다.

본 연구의 결과는 분석시 사용된 모형의 단순성 때문에 제한적이라고 할 수 있다. 즉 고속도로의 통행료 부과에 따른 여러 효과 가운데 다음 효과들을 고려할 수 없었기 때문이다. 무시된 효과로는 낮은 통행료가 부과되는 시간대로 고속도로 통행시간을 변경하는 데 따른 효과, 고속도로 통행료를 내지 않기 위해 대체도로인 무료국도를 이용하는 데 따른 효과, 그리고 낮은 통행료가 부과되는 차종으로 이용차량을 변경하는 데 따른 효과 등을 들 수 있다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구의 분석결과는 제1경인고속도로의 일부 구간(서울부터 부평까지의 구간)이 연구년도 다음 해인 1992년 편도 2차선으로부터 4차선으로 확장되어 개통

였다는 사실에 비추어 타당하다고 할 수 있다. 이 사례는 본 연구의 분석결과 중 일부, 즉 제1경인고속도로의 1991년 용량이 최적용량보다 작으므로 고속도로를 확장한다면 순편익이 증가할 것이라는 점을 예증한다고 할 수 있기 때문이다.

參考文獻

가. 國內文獻

- 건설부(1993), 「도로용량편람」.
- 교통개발연구원(1986), 「화물수송체계 개선에 관한 연구」.
- 교통개발연구원(1992a), 「교통혼잡비용 예측연구」.
- 교통개발연구원(1992b), 「인천직할시 지하철(전철)건설 타당성조사사업 부록보고서」.
- 교통개발연구원(1992c), 「경인·경수고속도로 전용차선제 실시방안 공개토론회」.
- 교통개발연구원(1992d), 「인천직할시 도시교통정비 기본계획 수정안」.
- 국토개발연구원(1990), 「도로사업에 대한 민자유치방안 검토」.
- 김경환·서승환(1994), 「도시경제론」, 홍문사.
- 서선덕(1991), “도로용량함수와 혼잡비용,” 「교통정보」, pp. 18~28.
- 원제무(1985), “사회비용을 반영한 최적 택시 거리·시간 병산요금구조,” 「대한교통학회지」, 제3권 제1호, pp. 46~57.
- 통계청(1994), 「1993 물가연보」.
- 한국개발연구원(1987), 「공공투자의 적정할인을 분석」.
- 한국도로공사(1980), 「한국고속도로 10년사」.
- 한국도로공사(1992), 「고속도로교통량조사 1991」.
- 한국도로공사(1994), 「업무통계」.
- 한양대학교(1991), 「고속도로편익조사와 통행요금체계에 관한 연구」.

나. 外國文獻

- Gomez-Ibanez, Jose A. and John R. Meyer (1992), *The Political Economy of Transport Privatization: Successes, Failures and Lessons from Developed and Developing Countries*. Cambridge, MA: Harvard University.
- Henderson, James M. and Richard E. Quandt (1980), *Microeconomic Theory*. 3rd ed., McGraw-Hill.
- Keeler, Theodore and Kenneth A. Small (1977), “Optimal peak-load pricing,

- investment, and service levels on urban expressways." *Journal of Political Economy*, Vol. 85, No. 11, pp. 1~25.
- Meyer, John R. and Mahlon Straszheim (1971), *Techniques of Transportation Planning*, Vol. 1, Pricing and Project Evaluation. Washington, D.C.: Brookings Institution.
- Mohring, Herbert and Mitchell Harwitz (1962), *Highway Benefits: An Analytical Framework*. Evanston, Illinois: Northwestern University Press.
- Morrison, Steven A. (1983), "Estimation of long-run prices and investment levels for airport runways." *Research in Transportation Economics*, Vol. 1, pp. 103~130.
- Morrison, Steven A. (1986), "A survey of road pricing." *Transportation Research*, Vol. 20A, No. 2, pp. 89~97.
- Small, Kenneth A. (1977), "Estimating the air pollution costs of transport modes." *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 11, pp. 109~132.
- Small, Kenneth A. (1992), *Urban Transportation Economics*. Chur, Switzerland: Harwood Academic Publishers.