

■ 論 文 ■

유료도로의 교통수요분석에 있어서 통행시간가치 차등화 필요성 검토

A Review about the Need for Modelling Toll Road with Different Value of Travel Time

김 재 영

손 의 영

정 창 용

(한국개발연구원 공공투자관리센터 (서울시립대학교 교통공학과 교수) (서울시립대학교 교통공학과 박사과정) 전문위원)

목 차

- I. 서론
- II. 선행연구 고찰
 - 1. 통행요금(Toll)과 교통분석모형
 - 2. 통행배정시 통행요금(Toll) 고려방안
 - 3. 통행시간가치와 시장분할
- III. 분석방법론 설정
 - 1. 분석의 기본전제
- 2. 모의네트워크 설정
- 3. 통행요금, 혼잡도, 통행시간가치
- 4. 통행배정 방법
- IV. 분석결과 검토
- V. 결론 및 향후연구과제
- 참고문헌

Key Words : 유료도로, 수요분석, 통행시간가치, 이용자 비동질성, 통행배정
Toll Roads, Demand Modelling, Value of Travel Time, User Heterogeneity, Traffic Assignment

요 약

도로 건설비용의 회수, 혼잡완화 등의 목적을 위해 일부 도로에서는 통행요금을 부과하고 있으며, 민간투자사업의 활성화로 인해 유료도로는 지속적으로 증가할 전망이다. 통행요금 부과는 이용경로, 출발시간, 수단선택 등에 영향을 주며, 이 중 경로선택에 가장 큰 영향을 미친다. 이 때 도로의 요금수준과 이용자의 지불의사 또는 통행시간가치가 중요한 변수로 작용하는데, 국내에서는 통상 임금수준에 기초한 통행시간가치를 적용하고 있다. 현행 방법론을 적용하여 도로의 요금수준에 따른 교통수요 변화를 살펴보면 요금탄력성이 상당히 높은 경우부터 낮은 경우까지 다양하게 나타나며, 대안 경로가 많지 않은 경우에는 특정 경로에 전량 배정되는 경우가 발생하기도 한다. 요금변화에 따른 수요의 변화는 통상 대안경로의 존재 및 혼잡정도에 따라 크게 영향을 받을 것이나, 최단경로에 전량배정되는 것과 비슷한 현상을 보이는 점은 다소 비현실적이라 판단된다. 현실적인 유료도로 수요를 추정하기 위한 방법론 개발은 장래 예상 수입액 산정 뿐만 아니라, 적정요금 수준 및 부과지점 선정, 요금부과 전략수립 등에 있어서도 매우 필요하다. 이에 본 연구에서는 교통수요 분석시 통행요금 고려방안을 중심으로 관련 문헌을 고찰하고, 통행시간가치를 차등화하여 통행배정을 수행하는 방안을 검토하였다. 분석결과 단일의 시간가치를 이용하는 것에 비해 시간가치를 차등화 하였을 때의 요금변화에 따른 유료도로 통행수요 변화 현상이 보다 현실적인 점을 알 수 있었다.

Some road charges toll to finance the cost or to manage traffic congestion. With a growth of PPI projects, toll roads would be increase continuously. Tolls have a considerable influence on user's route choice, and sometimes can affect to the departure time and even to mode choice. For modelling toll roads, user's WTP or VOT has an important role and it is general that VOT is equivalent to the wages of workers. The current way of modelling technique yields various toll price elasticity from low to high. When there exist few alternative routes, unrealistic result that all traffic assigned to some shortest path may occur. The toll price elasticity can be influenced by alternative route and congestion level, but some result shows nearly unrealistic patterns. The model to forecast more realistic toll road demand is very essential for estimating toll revenue, choice of optimal toll level & collecting location and establishing toll charge strategy. This paper reviewed some literatures about toll road modelling and tested case study about the assignment technique with different VOT. The case study shows that using different VOT yields more realistic result than the use of single VOT.

I. 서론

도로를 건설하는 비용의 일부 혹은 전부를 회수하거나 혼잡을 완화시키는 등의 목적을 위해 일부 도로에서는 이용자들에게 일정 수준의 요금을 부과하고 있으며, 민간투자사업의 활성화로 인해 요금을 부과하는 도로들이 앞으로 크게 증가할 전망이다. 이러한 요금부과를 통해 높은 수준의 지불의사(willingness to pay) 혹은 시간가치(value of time)를 가진 사람들에게 신설도로에 대한 이용기회를 높이고, 교통량 분산을 통해 전체 교통시스템의 혼잡을 완화시킬 수 있다. 또한 도시부에서는 혼잡이 극심한 지점 혹은 시간대에 대한 요금부과(Congestion Pricing)를 통해 이용자들이 지불의사에 따라 보다 적합한 경로를 선택하도록 함으로써 사회적인 순편익을 증대시키기도 한다.

도로에 요금을 부과할 경우 이용 경로나 출발시간 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 경쟁이 되는 대중교통수단이 존재할 경우에는 수단선택에도 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 이 중 가장 큰 영향을 주는 분야는 물론 경로선택일 것이며, 경로선택은 도로의 요금 수준과 이용자의 통행시간가치에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 교통수요 분석시 무료도로로만 이루어진 경우 주로 통행시간을 주된 변수로 하여 경로선택 행위를 고려하지만, 분석 영향권 내에 유료도로가 존재할 경우 무료도로와 유료도로 또는 서로 다른 요금수준의 유료도로들 간의 경쟁관계를 고려하기 위해 통행요금을 추가적인 변수로 포함하여 분석을 수행한다. 이때 통행배정 단계에서 통행시간가치라는 변수가 중요하게 사용되며, 국내에서는 통상 평균적인 임금수준에 기초한 통행시간가치를 적용하고 있다.

이와 같은 방법론을 적용하여 도로의 요금수준에 따른 교통수요 변화를 살펴보면 요금탄력성이 상당히 높은 경우부터 낮은 경우까지 다양하게 나타나며, 대안 경로가 많지 않은 경우에는 특정 경로에 전량 배정되는 경우가 발생하기도 한다. 요금변화에 따른 수요의 변화는 통상 대안경로의 존재 및 혼잡정도에 따라 크게 영향을 받을 것이나, 최단경로에 전량배정되는 것과 비슷한 현상을 보이는 점은 다소 비현실적이라 판단된다. 최근 개통된 총 171개의 국도 및 고속도로를 대상으로 한 김강수(2007)의 연구에 따르면 평균적으로 수요가 약 22% 과다추정된 것으로 나타났으며, 민자사업은 약 50% 과다추정된 것으로 나타났다. S&P(2003)의 사례를 살펴보

아도 외국 또한 그 정도의 차이는 있을지언정 과다추정 현상이 존재함을 알 수 있다.

이와 같은 수요의 과다추정 현상은 근본적으로 사업에 대한 낙관적 편의(Optimism Bias)에 기인하는 바가 크다는 점이 여러 연구에서 지적되고 있으며, S&P(2003, 2004)에 의하면 높은 통행요금, 경제성장율의 하락 또는 실현 불가능한 개발계획의 반영, 경쟁도로의 개선, 생각보다 낮은 시간절감, 예상보다 낮은 트럭·비점두·주말 통행량 등과 지불의사의 잘못된 계산, 확률적 분포형 값이 아닌 단일 시간가치 적용 등을 과다한 수요추정의 원인으로 들고 있다. 장래 교통시설에 대한 민간투자가 지속적으로 증가하는 추세에 있으므로, 보다 합리적이고 정확한 교통수요의 예측에 대한 요구가 그 어느때보다 높아지고 있다. 이에 본 연구에서는 교통수요 분석모형에서 유료도로 통행료를 고려하는 방안을 중심으로 관련 문헌을 고찰하고 현재 적용중인 방법론의 개선필요성이 있는지 등을 살펴보고자 한다.

II. 선행연구고찰

1. 통행요금(Toll)과 교통분석모형

도로 이용에 대한 요금부과는 통행료를 거둬들여 도로건설에 소요된 비용을 회수하거나, 수요를 관리함으로써 혼잡을 완화하기 위한 목적을 갖고 있다. 이러한 목적을 효과적으로 달성하기 위해 여러 요금제도가 그동안 연구되어 왔고, 그 정의 및 종류 또한 연구자에 따라 상당히 다양한데 대체로 단일요금(균일요금, 거리비례요금, 이부요금), 차별요금, 잠재요금, 혼잡요금, 가변요금 등으로 분류할 수 있다. 과거에는 건설비용의 회수 및 정수의 용이성 등으로 인해 차종에 따라 균일한 요금이나 거리에 기반한 요금을 부과하는 단일요금이 많이 적용되어 왔다. 그러나 침두와 비침두로 구분되는 교통수요의 특성과, 일단 시설규모가 정해지면 침두시의 공급량을 늘리기가 어렵다는 교통시설의 특성 상 침두시 수요를 비침두시나 주변 도로로 전환시킴으로써 혼잡을 완화하거나 수익을 증대하고자 하는 노력이 대두되고 있다.

이를 위해 시 경계나 주요 지점에 일정 수준의 혼잡통행료를 부과하거나 시간대별로 서로 다른 요금을 부과하는 등의 여러 방안이 연구되었는데, 이러한 요금제도의 효과를 분석하는데 있어서 기존 교통분석모형의 문제와 한계점이 노출되었다. 지역기반 혼잡통행료 도입시 비가산성

(non-additive) 경로비용 문제를 풀기 위한 노력이 많이 있어 왔으며 국내에서도 최근 정점래(2008)의 연구에서 이러한 문제를 다룬 바 있다. 미 교통부(U.S. DOT) 주관하에 2005년 미국 Virginia에 개최된 “도로통행요금과 교통수요분석모형에 관한 전문가 포럼(Expert Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling)”은 통행요금을 고려한 교통수요분석 모형의 적용과 관련한 여러 실무적인 경험들, 앞으로 나아가야 할 방향 등을 잘 제시하고 있다.

Urban Analytics(2004)에 의하면 통행요금을 고려하기 위해 간단한 개략(Sketch) 모형에서 부터 복잡한 활동기반(Activity-Based) 모형까지 지역에 따라 다양한 모형을 적용중인 것으로 나타났다. 과거자료 활용이 가능한 기존 도로의 교통수요 분석시 시계열 분석모형이나 탄력성 모형 등이 쉽게 적용가능하나, 시간과 장소에 따른 전이성(Transferability) 문제로 인해 새로운 유료도로의 분석에 적용하기 어려운 것으로 알려져있다.

따라서 신설 유료도로를 포함해 보다 복잡한 분석을 위해 대부분 4단계 모형을 사용하고 있다. 그러나 4단계 모형은 통행요금을 고려함에 있어서 이용자들의 선택행위에 내재된 다양한 특성을 반영하기 어렵다는 단점이 많이 제기되고 있다. 요금부과방식에 따라 다르긴 하겠지만, 통행요금은 이용경로 뿐만 아니라 출발시간, 통행발생, 통행분포, 수단선택 등의 과정에도 다양하게 영향을 미칠 것이며, 이용자 특성에 따라서 많은 영향을 받는다. Vovsha(2005)는 앞으로 모형에서 중요하게 고려할 필요가 있는 요소로 도로의 신뢰성(Reliability), 이용자의 비동질성(Heterogeneity), 시간대 선택(Time of Day Choice) 등을 제시하고 있는데, 기존 4단계 모형에서 이와 같은 요소를 효과적으로 구현하기 어려운 것이 현실이다.

U.S DOT(2005) 포럼 참석자간에 논의된 토론내용을 살펴봐도 많은 전문가들이 4단계 모형의 여러 제약요소와 동적 통행배정 및 개인의 다양한 특성에 대한 고려 필요성, 보다 직관적이며 빠른 결과도출 등의 장점으로 인해 활동기반(Activity-Based) 모형으로의 전환이 필요하다는 의견을 제시하고 있다.

실제 미국의 Portland나 Oregon 지역에서는 활동기반(Activity-Based) 모형을 적용하고 있기도 하지만, 예산부족 등으로 인해 모형의 개발과 관련한 많은 연구가 아직 부족한 실정이며 너무 급격한 전환은 바람직하지 않다는 의견도 존재한다. 국내 또한 제반여건의 부족

으로 활동기반모형을 이용하여 교통분석을 수행하는 것은 아직 요원하며, 4단계 모형에 대한 개선연구 조차도 많이 부족한 실정이다. 따라서 현 시점에서 적용 가능한 기존의 4단계 모형을 기본으로 하되, 결과에 큰 영향을 주는 통행배정 단계에서 통행요금을 고려하는 방안을 중심으로 개선안을 살펴볼 필요가 있을 것이다.

2. 통행배정시 통행요금(Toll) 고려방안

1) 경로선택에 영향을 미치는 요인

전통적인 경제학 이론에서는 인간의 합리적인 의사결정을 가정하고 있으며, 사람들은 그들이 선택할 수 있는 변수들 중에서 개인적 선호에 가장 적합한 조합을 선택한다. 이는 다시말해 개인의 효용을 극대화하는 선에서 선택이 이루어진다는 것인데, 교통분야의 경로선택에 있어서도 각 경로에 존재하는 여러 특성들을 조합해 전체적인 효용을 극대화하는 경로가 선택되는 것을 가정하는 것이 합리적일 것이다. 이는 곧 이용자가 통행시간의 단축과 같이 한 요소의 개선을 위해 통행요금과 같은 다른 요소를 희생할 수 있으며, 보다 큰 효용을 주는 경로를 선택할 확률이 높아짐을 의미한다(Pfeffer, 2001). 이러한 가정하에서 개인의 경로선택 행위를 모형화하기 위해서는 선택에 영향을 주는 요소가 무엇인지 우선적으로 살펴볼 필요가 있다.

Pfeffer(2001)는 경로선택에 영향을 주는 요소와 관련하여 Outram(1978), Thomas(1991), Bovy(1983), McEvoy(1995), Johnston(1990), Bain(1995) 등의 선행 연구를 잘 정리해서 나타내고 있는데, 각각의 결과를 요약해서 살펴보면 다음과 같다. 우선 Outram(1978), Thomas(1991) 등의 초기 연구에 따르면 경로선택시 통행시간, 거리, 연료비, 통행료, 혼잡도, 표지판, 안전성, 주변경치 등 다양한 요소가 존재하는 것으로 알려져 있다. 업무통행이 여가통행에 비해 빠른 경로를 선택할 경우가 높으며, 일부 여가통행에서는 주변 경치에 보다 가치를 두는 경우가 30%까지 나타나기도 했지만, 운전자의 경로선택에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 역시 시간과 거리인 것으로 나타났다. 반면, Bovy(1983), McEvoy(1995), Johnston(1990), Bain(1995) 등의 연구결과에 따르면 주로 통행시간에 의한 영향이 대부분인 것으로 나타났다. Bovy(1983)는 통행시간이 경로선택에 가장 큰 영향을 미치며, 다른 변수들을 사용해도 결과가 크게 개선되지는 않는 것으로 나타났다. McEvoy

(1995)가 호주 Queensland의 사례를 분석한 결과 운전자들은 주행거리와 관련한 차량운행비용(VOC)을 명확히 인식하지 못해 거리라는 변수는 경로선택시 그리 유의하지 않은 것으로 나타났으며, Johnston(1990) 또한 운전자의 40% 정도가 차량의 연료소모율에 대해 알지 못했고, 75% 정도는 차량운행비용에 대한 인지를 전혀 하지 못하는 것으로 나타났다. 다만, Bain(1995)은 승용차 이용자들의 경우 위의 결과가 현실적이지만, 트럭 운전자들에 있어서는 운행비용을 고려할 필요가 있다는 결론을 내리고 있다(Pfeffer, 2001).

이상의 연구들에서는 운행비용이 승용차 운전자의 경로선택에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타나긴 했으나, 대안 경로간에 거리차이가 클 경우 분명히 운행비용이 경로선택에 영향을 미칠 것으로 보인다. 실제로 영국(TAG, 2007)이나 미국의 여러 MPO에서 적용중인 교통분석모형을 살펴보면 일반화비용(GC) 산정시 통행시간과 통행료 외에 차량운행비용을 포함하고 있다. 실무적인 적용사례를 살펴보면 Pursula(1997), Huang(2007) 등의 연구에서도 경로선택 문제를 풀기위해 차량운행비용을 포함하고 있는 것으로 나타났다.

도로의 통행료 또한 경로선택에 있어서 매우 중요한 요소인데, Piron(1999)은 유료도로가 통상 대안 도로에 비해 빠르기 때문에 통행료를 지불하는 것은 결국 시간을 구매하는 것과 같다고 정의하고 있으며, 더 나아가 경로선택시 때로는 유료도로의 쾌적성이나 신뢰성 등의 요소도 고려할 필요가 있다고 보고 있다. 쾌적성의 경우 정량화하기 어려운 요소이며 비판의 소지도 많을 것이나, 신뢰성의 고려에 대한 공감대는 커지고 있다.(Abdel(1995), Small(2001))

이상의 검토결과를 종합하면, 도로이용자들은 경로선택시 통행시간, 차량운행비용, 통행요금, 신뢰성 등의 요소를 고려하는 것으로 나타났다. 그러나 국내의 경우 현재 통행시간과 통행요금만을 반영하고 있어, 앞으로 차량운행비용이나 신뢰성 등의 요소를 고려하는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 통행배정시 통행요금이라는 변수를 고려하는 방법을 중심으로 좀 더 살펴보고자 한다.

2) 통행료를 반영한 통행배정 방법

앞서 언급한 바와 같이 유료도로를 고려한 교통수요 분석에 큰 영향을 주는 것은 통행배정 단계이다. 통행배정모형의 유형을 분류하는 기준은 다양하나, 크게 도로

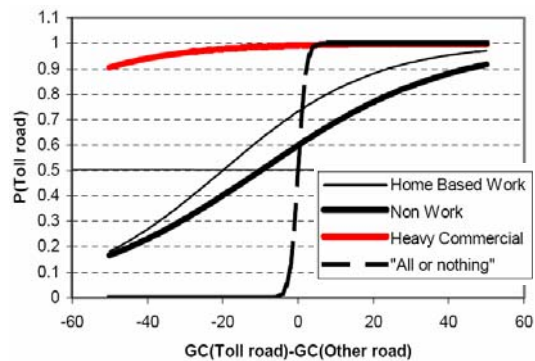
용량(Capacity) 또는 혼잡(Congestion)의 고려여부에 따라 균형모형과 비균형모형, 확률적(Stochastic) 요소의 고려여부에 따라 결정론적모형과 확률적모형으로 구분된다(Ortuzar et al, 1994). Pfeffer(2001)에 의하면 통행배정 단계에 있어서 경로선택시 통행요금을 고려하는 방안을 크게 다음과 같이 세가지로 분류하고 있다.

(1) 이용자균형배정모형

교통수요분석시 가장 많이 사용되며, 통행시간 외에 통행요금과 차량운행비 등의 요소를 시간화한 다음 이를 모두 합한 일반화 비용을 이용한다. 모형 적용을 위해 교통망, 기종점간 통행량 등의 기초자료 구축이 필요하며, 통행요금에 대해서 이용자가 인지하는 시간가치의 적용이 필요하다. 결과의 신뢰성을 높이기 위해 이용자를 동질적인 집단으로 분할한 다음, 각각의 특성을 고려하는 다차종 통행배정기법을 적용하기도 한다.

(2) 다항로짓(Multinomial Logit) 모형

이용자균형배정모형은 대안경로가 다양한 복잡교통망에 많이 적용되나, 경로가 얼마 안되는 경우 개별형태모형을 적용하여 이용자의 선택행위를 보다 간단하게 반영할 수 있다. 통상 로짓모형을 많이 적용하는데, 통행요금은 효용함수 $U(A_i)$ 를 구성하는 여러 변수 중 하나로 포함된다. 이때, 이용자균형배정모형과 마찬가지로 이용자를 통행목적 등에 따라 동질적 집단끼리 구분한 다음 결과를 도출하는 것이 바람직한데, <그림 1>은 Johnston(1990)의 적용사례이다.



<그림 1> 유료도로의 선택확률 예

(3) Dual Criteria 또는 Bi-Criterion 모형

앞서 살펴본 로짓 모형은 동일 이용자 집단내에서는

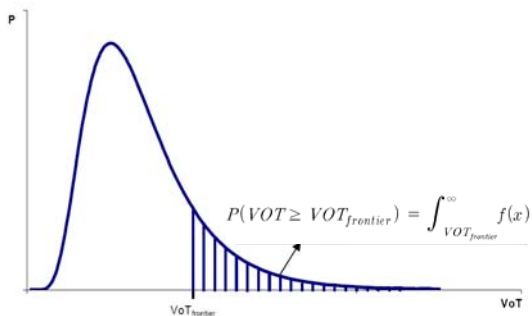
평균적인 시간가치를 가정하나, Gumbel 분포를 가정한 비관측 효용에 의해서 선택비율이 확률적으로 나타난다고 볼 수 있다. 그러나 동일 집단 내에서도 통행시간가치는 다양한 값을 가질 것이므로 비관측 효용보다는 통행시간가치의 분포에 의해서 선택확률을 계산하는 것이 더 현실적일 수 있다. 따라서 다음과 같이 두 대안경로의 통행시간과 통행요금을 바탕으로 한계대체율($VOT_{frontier}$)을 계산한 다음, 시간가치의 확률밀도함수를 이용해서 계산된 한계대체율($VOT_{frontier}$) 보다 높은 시간가치를 갖는 이용자의 비율을 계산할 수 있다. 이때 두 대안경로 간 한계대체율($VOT_{frontier}$) 산정식은 다음과 같다.

$$VOT_{frontier} = \frac{TC_{alt1} - TC_{alt2}}{TT_{alt1} - TT_{alt2}}$$

여기서, TC_{alt_i} : 경로 i 의 통행비용
 TT_{alt_i} : 경로 i 의 통행시간

이때, 대안경로의 선택확률은 시간가치(VOT)의 확률밀도함수를 나타낸 <그림 2>에서 앞서 계산한 한계대체율($VOT_{frontier}$) 보다 큰 부분을 적분한 값과 같다. 만약, 소득수준에 기반해서 시간가치를 추정할 경우 시간가치의 확률밀도함수는 통상 로그정규분포(lognormal distribution)의 형태를 갖는 것으로 알려져 있다 (Ben-Akiva, 1993).

이상의 검토결과를 종합하면 이용자균형배정모형은 복잡한 교통망에 적용이 용이하지만 평균적인 이용자 특성을 고려한다는 단점이 있으며, 확률적 모형은 이용자 및 경로별 특성을 보다 현실적으로 고려할 수 있지만 대안경로가 소수인 경우에 보다 적합하다는 점을 알 수 있



<그림 2> 대안경로의 선택확률

다. 이러한 점을 감안했을 때 대안경로가 다수이거나 혼잡이 심한 지역일수록 도로의 용량제약을 고려한 이용자균형모형이 보다 적합할 것이며, 대안경로가 적고 혼잡정도가 무시할 수준일 경우 확률적 통행배정모형을 적용하는 것이 보다 적합할 것으로 판단된다.

3. 통행시간가치와 시장분할

이상으로 교통수요 분석시 개인의 경로선택에 영향을 주는 여러 요소와 이 중 유료도로 분석에서 중요한 요소인 통행요금을 통행배정모형에서 고려하는 방법을 살펴 보았다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 이용자균형배정모형에서는 통행요금에 통행시간가치(VOT)를 적용하여 요금을 시간화하고 있는데, 이때 개인들이 인식하고 가치화하는 정도가 서로 다른 점을 고려해야 한다는 측면이 많이 제기되고 있다(Oppenheim, 1995). 통행시간가치는 통행자의 소득수준, 통행목적, 지불방법 등에 따라 서로 다른 것으로 알려져 있으며, 이러한 차이를 반영하기 위해 통행자들을 동질성 있는 그룹으로 분할하는 방안이 가장 일반적으로 사용되고 있다.

교통수요 분석에 있어서 이와 같이 시장을 분할 (market-segmentation)하는 것에 대한 연구는 1970년대 중반부터 이루어져왔으며(Dobson, 1979), 국내에서도 김태희 등(2003)의 연구에서 통행목적(업무, 비업무 등)이나 소득수준(고소득, 저소득) 등의 지표를 사용하여 이용자를 계층별로 분할한 바 있다. 몇가지 사례를 좀 더 살펴보면, 우선 Takehiko(1992)은 평균 소득수준을 이용하여 추정된 시간가치가 실제 운전자들이 인지하는 가치와 차이가 있다고 보고, 선호의식(SP) 조사 방식에 의해 지역별·도로유형별로 시간가치를 추정하였다. William(2006)은 소득과 관련한 통계자료를 이용해서 이용자를 계층별로 분리한 다음, 각 계층별로 시간가치를 추정하였다. Cheung(1999)도 소득수준에 따라서 시간가치를 구분해 적용하였으며, 동일한 시간가치를 이용할 경우 낮은 요금에서는 과소추정, 높은 요금에서는 과대추정이 되기 때문에 유료도로 건설시 시간가치를 계층별로 차등화할 필요가 있는 것으로 나타났다.

Vovsha(2005)는 통행시간가치가 소득수준, 통행목적, 성(Gender), 고용상태, 시간대, 재차인원 등에 의해 영향을 받으며, 통상 고소득자, 업무통행, 여성, 직업을 갖고 있는 사람, 침두시간대, 다인승 탑승차량의 시간가치가 높은 것으로 보고 있다. Small(2001)은 비동질

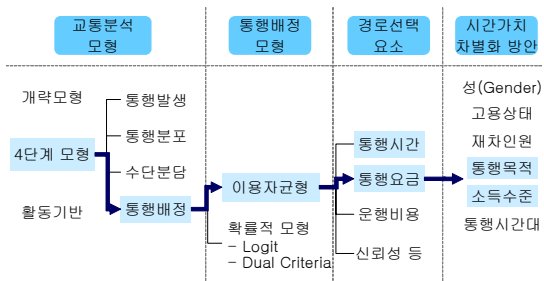
성(heterogeneity)과 관련해 관측가능한 부분과 그렇지 못한 부분이 존재해, 시장분할과 확률적 요소를 결합할 필요가 있다는 견해를 제시하였다.

이상의 검토결과를 종합하면 유료도로의 교통수요분석시 통행요금에 대한 저항정도를 반영함에 있어서 이용자마다 서로 다른 특성을 어떻게 고려하는가가 주된 관건임을 알 수 있다. 이용자 특성의 반영을 위해 이용자를 동질적인 집단끼리 분할하거나, 확률적 분포모형을 적용하는 2가지 방안이 가장 일반적이라 할 수 있다. 전자는 이용자 계층을 마냥 분할할 수 없다는 점과 확률적 모형에 비해 이용자의 개별적 특성에 대한 고려가 약하다는 단점이 있으나, 대규모 교통망에서 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이용자 계층을 충분히 분할할 경우 평균값을 적용하는 경우에 비해 덜 민감한 요금탄력성으로 짓모형과 같이 S형태의 변화곡선을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다.

III. 분석방법론 설정

1. 분석의 기본전제

기존의 연구들을 살펴본 결과, 보다 현실적인 결과를 도출하기 위해 다양한 방법론이 연구되고 적용되어 왔음을 알 수 있다. 주로 도로 이용자의 다양한 특성을 고려하기 위한 모형의 개발에 초점이 맞춰져 있으며, 이를 위해 이용자를 계층별로 분할하거나 개별행태를 보다 잘 반영할 수 있는 확률적 모형, 활동기반모형 등의 도입 등에 관한 검토가 진행되어 왔다. 그러나 아직 국내에서는 4단계 모형을 이용한 분석이 주를 이루고 있으며, 모형의 한계는 있지만 대규모 교통망의 분석에 적합하다는 점과 이용자를 계층별로 분할할 경우 개인별 특성을 어느 정도 반영할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구

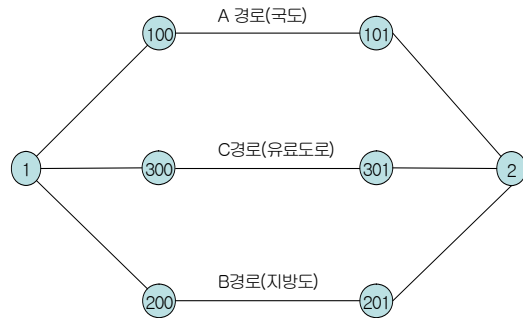


<그림 3> 분석의 기본전제

에서는 4단계 모형을 적용하되, 통행시간가치를 단일값이 아닌 통행목적과 소득수준 등에 따라 차등화 하는 방안의 적용가능성을 검토해 보고자 한다. 이상의 기본전제를 그림으로 나타내면 <그림 3>과 같다.

2. 모의 네트워크 설정

분석을 위하여 <그림 4>와 같은 모의 네트워크를 구축하였으며, 각 경로별 특성값은 <표 1>과 같다.



<그림 4> 모의 네트워크의 구축

<표 1> 대안경로별 특성값

경로	연장 (km)	자유속도 (kph)	차로용량 (pcu/hr)	차로수	BPR 계수	
					α	β
A	20	80	1,000	3.0	0.15	4.0
B	20	70	1,000	2.0	0.15	4.0
C	15	100	2,200	2.0	0.645	2.047

3. 통행요금, 혼잡도, 통행시간가치

유료도로의 통행량은 요금수준과 주변 도로의 혼잡도에 큰 영향을 받기 마련이다. 따라서 통행요금, 혼잡도에 대해 몇가지 사례를 가정하여 분석을 수행하고자 한다. 우선 통행요금의 경우 현행 도로공사 요금설정 기준에 따르면 15km인 경우 약 1,470원이 산정된다. 이에 요금수준을 250원~2,500원까지 250원 단위로 총 10개의 요금수준을 가정하였다. 도로의 혼잡상태는 2,000PCU~10,000PCU까지 2,000PCU 단위로 총 5개의 혼잡도 수준을 가정하였다.

통행시간가치는 외국의 사례와 같이 통행목적별, 소득수준별로 차등화하는 것이 가능할 것이나 이와 관련한 국내의 사례는 그리 많지 않다. 본 연구에서는 현행 예비

<표 2> 통행시간가치 차등화 시나리오 및 내역

차등화 시나리오	구분	통행량 비율(%)	시간가치 (원/시간)	요금가중치 (분/원)
단일값	가중평균	100.0	10,486	0.0057
업무/비업무	업무차량	19.5	22,932	0.0026
	비업무차량	80.5	7,499	0.0080
업무/비업무 + 소득수준별 차등화	업무_상	5.9	39,290	0.0015
	업무_중	5.9	21,581	0.0028
	업무_하	7.8	11,673	0.0051
	비업무_상	24.2	12,848	0.0047
	비업무_중	24.2	7,057	0.0085
	비업무_하	32.2	3,817	0.0157
단일값 + 소득수준별 차등화	1분위	10.0	2,939	0.0204
	2분위	10.0	4,872	0.0123
	3분위	10.0	6,143	0.0098
	4분위	10.0	7,398	0.0081
	5분위	10.0	8,537	0.0070
	6분위	10.0	9,823	0.0061
	7분위	10.0	11,246	0.0053
	8분위	10.0	13,006	0.0046
	9분위	10.0	15,790	0.0038
	10분위	10.0	25,105	0.0024

타당성조사 표준지침에서 제시하고 있는 지역간 업무/비업무 통행비율과 통계청(2008)에서 제시하고 있는 도시근로자가구의 소득 10분위별 가구당 월평균 가계수지를 이용하여 통행목적별, 소득수준별로 시간가치를 <표 2>와 같이 총 4개 시나리오로 차등화 하였다.

4. 통행배정 방법

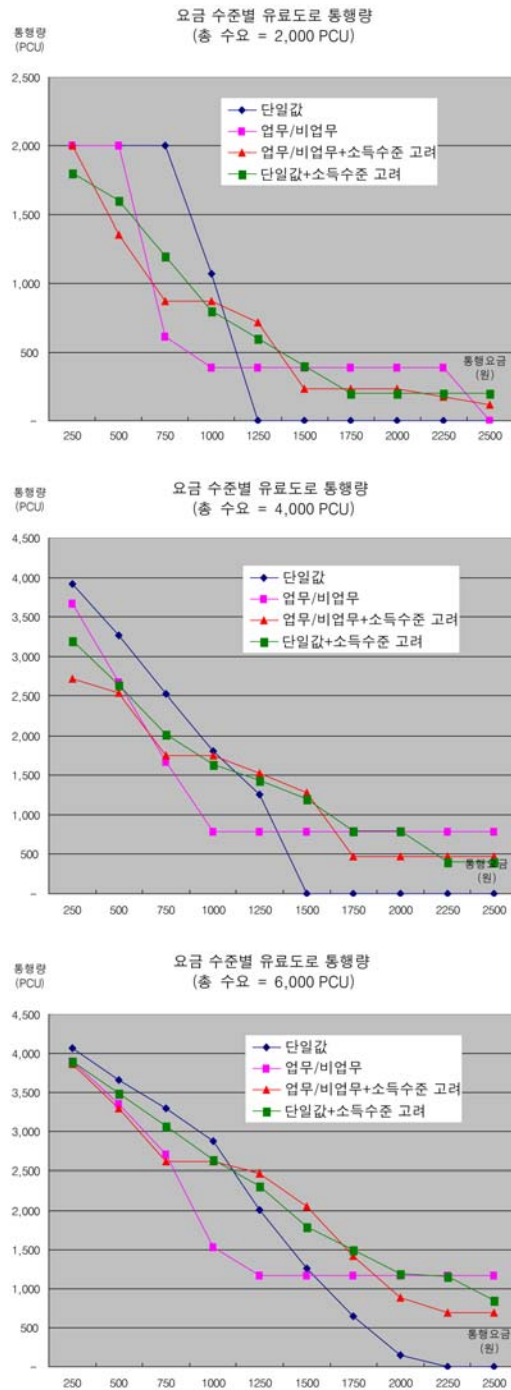
이용자 계층을 차등화한 통행배정 결과를 얻기 위해 Emme/2의 다차종(Multi-class) 통행배정 Module을 적용해 각각의 이용자 계층별로 서로 다른 요금가중치를 고려하였다. Emme/2의 다차종 통행배정 모형에서 사용하는 목적함수는 다음과 같으며, 수식에 제시된 바와 같이 각 차종별로 혼잡을 야기시키는 정도가 같으며, 단지 각 차종별로 통행비용을 서로 다르게 인식한다는 가정하에 해를 도출한다.

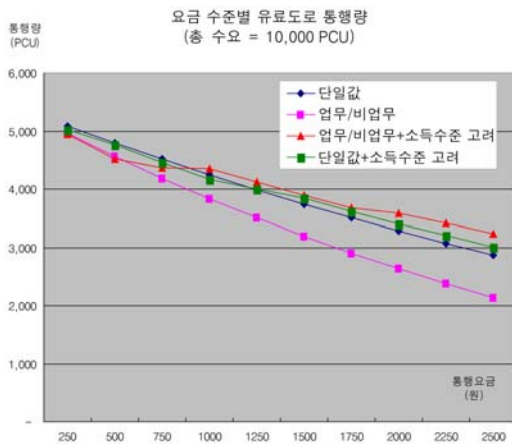
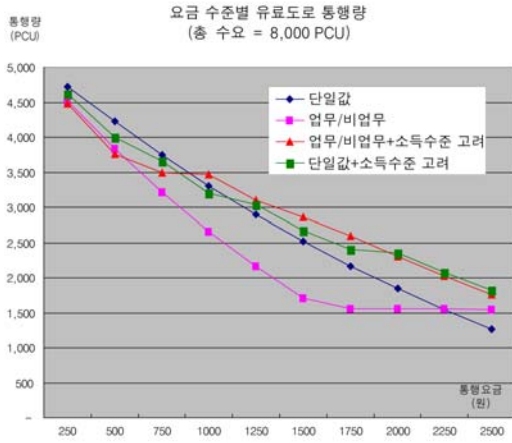
$$\text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} S_a(v) dv + \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} v_a^m b_a^m$$

여기서, $s_a(v)$: 링크 a의 교통량이 v일 때 교통량-지체함수식을 통해 산출된 비용
 b_a^m : 차종(m)별 링크 a의 인지비용

IV. 분석결과 검토

앞서 설정한 통행요금, 혼잡정도, 통행시간가치에 따라 유료도로의 교통량의 변화를 살펴보면 <그림 5>와 같다.





<그림 5> 요금수준별 · 혼잡도별 통행량 비교

전반적으로 혼잡의 정도가 높을 때는 통행시간가치의 고려방법에 따른 차이가 별로 없으나, 혼잡의 정도가 낮은 경우에는 통행시간가치를 어떻게 고려하는가에 따라 결과가 상당히 달라짐을 알 수 있다.

그동안 통상적으로 적용해온 단일시간가치 적용방안은 혼잡의 정도가 높을 경우에는 요금수준에 따른 교통수요 변화의 기울기가 비교적 안정적이거나, 혼잡의 정도가 낮을 경우에는 요금수준에 따라 유료도로를 전량 이용하거나 전혀 이용하지 않는 것으로 나타나 다소 비현실적인 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 현상이 나타나게 된 근본적 이유는 적용된 일부 요금수준이 분석에서 사용한 이용자의 평균소득 보다 매우 낮거나 높기 때문이다. 평균보다 높은 소득수준을 갖는 이용자의 경우 요금수준이 비록 높더라도 어느 정도까지는 유료도로를 이용할 것이며, 평균보다 낮은 소득수준을 갖는 이용자의 경우 요금수준이 비록 낮더라도 유료도로를 이용하지

않을 것이나 단일의 평균값을 사용한다면 이러한 차이를 반영할 수 없기 마련이다.

이용자를 통행목적에 따라 업무와 비업무 통행으로 구분한 적용방안은 다른 방안에 비해 통행요금 변화에 따른 교통수요의 변화현상이 미미하게 나타났으며, 이용자를 업무와 비업무로 구분하되 소득 수준에 따라 상, 중, 하의 총 6개 계층으로 구분한 방안과, 통행 목적을 구분하지 않은 단일값에 소득수준에 따라 총 10개의 계층으로 구분한 방안은 다른 방안들과 비교해 비교적 S자 형태의 합리적인 수요변화 현상을 보여주고 있다. 또한 단일의 평균시간가치를 적용할 경우 높은 요금수준에서는 과소추정의, 낮은 요금수준에서는 과다추정의 경향이 있다는 기존의 연구결과들과 일치하는 현상을 보여주고 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

교통수요를 분석하는데 있어서 고려해야 할 이용자 및 교통특성에는 다양한 요소가 존재한다. 여러 요소들 중에서 경로선택시 통행시간이 미치는 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으며, 유료도로 사업의 분석에 있어서는 통행요금을 추가적으로 고려하고 있다. 현재 국내에서는 유료도로의 교통분석시 통행요금을 시간가치에 의해서 시간화 한 일반화 비용으로 변환하는 방식을 이용하고 있다. 이 과정에서 적용하고 있는 통행시간가치는 소득수준 또는 통행목적에 따라 큰 차이를 보이고 있는 것으로 알려져 있으나, 아직 이에 대한 연구 및 적용사례가 부족한 실정이다.

현실적인 유료도로 수요를 추정하기 위한 방법론 개발은 장래 예상 수입액 산정 뿐만 아니라, 적정요금 수준 및 부과지점 선정, 요금부과 전략수립 등에 있어서도 매우 필요하다. 이에 본 연구에서는 통행시간가치를 차등화하여 통행배정을 수행하는 방안을 검토하였다. 분석결과 단일의 시간가치를 이용하는 것에 비해 시간가치를 차등화 하였을 때의 요금변화에 따른 유료도로 통행수요 변화 현상이 보다 현실적인 점을 알 수 있었다.

그러나 본 연구는 보다 신뢰성 있는 유료도로 교통수요모형의 개발을 위한 초기 단계의 검토연구로서, 미흡한 점이 많이 존재하며 앞으로 많은 추가적인 연구를 지속할 필요가 있다. 우선 본 연구는 현재 일반적으로 가장 많이 적용하고 있는 유료도로 요금제도를 대상으로 하여 분석을 수행하였으며, 지역기반의 혼잡통행료 부과와 같이 비가산성(non-additive) 경로비용 문제가 발생하는

경우 맞지 않을 수 있다. 다음으로는 시간가치를 소득수준에 기반하되 업무/비업무 통행과 가구소득에 의해 차등화하였는데, 소득수준이 아닌 지불의사에 기반하거나 또는 통행목적과 소득수준에 따라서 가장 합리적이고 적합한 차등화 방안을 찾을 필요가 있겠다. 또한 앞서 살펴본 바와 같이 유료도로의 교통분석에 있어서 확률적 모형이나 활동기반모형의 적용에 관한 연구들이 계속되고 있다. 이들 모형은 집합화된 특성에 기반한 4단계모형에 비해서 개인적 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 것으로 알려진 만큼, 향후 국내에서도 이와 관련한 다양한 연구가 진행되길 기대한다.

마지막으로 유료도로 교통수요 추정에 큰 영향을 주는 요인으로는 방법론적 측면 외에도 분석가의 낙관적 편향이 중요한 요인인 것으로 나타났다. 따라서 보다 현실적인 모형의 개발도 필요하지만, 전문가들이 합리적이고 객관적인 수요를 예측할 수 있는 토대를 마련하는 것 또한 매우 중요하다고 하겠다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제60회 학술발표회(2009. 2.21)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

1. 김태희 등(2003), “유료도로의 통행시간가치 산정에 관한 연구 - 수도권 지역을 중심으로”, 국토연구원.
2. 김강수(2007), “SOC 투자 의사결정 합리화 방안”, 한국개발연구원.
3. 정점래(2008), “지역기반의 비가산성 혼잡통행료 부과에 따른 교통망 균형모형 개발”, 경기대학교 대학원, 박사학위 논문.
4. Abdel-Aty et al(1995), “Investigating effect of travel time variability on route choice using repeated-measurement stated preference data”, *Transportation Research Record* (1493), pp.39~45.
5. Bain et al(1995), “Traffic and revenue forecasting for toll roads in developing countries: An Indonesian Case Study”, *Proceedings Seminar L. 23rd European Transport Forum. PTRC, London, 201-216.*
6. Ben-Akiva et al(1993), “Estimation of travel choice models with randomly distributed values of time”, *Transportation research record*(1413), pp.88~97.
7. Bovy et al(1983), “An evaluation of traffic assignment predictions using route choice analysis and error decomposition”, *PTRC Annual Summer Meeting. Transportation Planning Methods, London, pp.101~113.*
8. Cheung et al(1999), “Modeling private toll roads with heterogeneous users”, *Proceedings of the Conference of the Hong Kong Society for Transportation Studies, pp.189~198.*
9. UK Department for Transport(2007), “Transport Analysis Guidance(TAG)”.
10. Dobson(1979), “Market segmentation : A tool for transport decision-making”, *Behavioural transport modelling, Chapter 10. London.*
11. Hai Yang et al, The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem, *Transportation research Part B, Methodological, v.38 no.1, pp.1~15.*
12. Hensher et al(2004), “Using values of travel time savings for toll roads: avoiding some common errors”, *Transport policy, v.11 no.2, pp.171~181.*
13. Huang et al(2007), “A multiclass, multicriteria logit-based traffic equilibrium assignment model under ATIS”, *European journal of operational research, v.176 no.3, pp.1464~1477.*
14. Johnston et al(1990), “Toll roads - a method for estimating usage and revenue”, *Proceedings of the 15th ARRB Conference, Part 4. pp.191~209.*
15. McEvoy et al(1995), “Toll road modelling approaches for Queensland”, *Road and Transport Research, Vol 4 No 3, pp.102~113.*
16. Ortuzar J. de D. & L.G.Willumsen(1994), “Modelling Transport”.
17. Outram et al(1977), “Driver route choice - Behavioural and motivational studies”, *Seminar Proceedings on Transportation Models, PTRC, London.*

18. Outram et al(1978), "Driver perceived costs in route choice", Seminar Proceedings on Transportation Models, PTRC, London.
19. Pfeffer(2001), "Toll Road Demand Forecasting - A Dual-Criteria Assignment Model", MSc thesis, Cranfield University.
20. Piron(1999), "The political acceptability of toll roads", Background paper for the conference 'Bridging Gaps in Financing Infrastructures II', Warsaw.
21. Pursula(1997), "Comparison of user and system equilibrium assignment in the Helsinki metropolitan area network using Emme/2", The 6th European EMME/2 User's Group Conference 1997, Helsinki Finland.
22. Small et al(2001), "The value of 'Value Pricing' of roads : Second-best pricing and product differentiation", Journal of Urban Economics, v.49, Issue 2, pp.310~336.
23. Standard & Poor's(2003), "Traffic Forecasting Risk: Study Update 2003".
24. Standard & Poor's(2004), "Traffic Forecasting Risk: Study Update 2004".
25. Takehiko Daito et al(1992), "Practical Traffic Assignment for Multiple Highway Routes using Distribution of Value of Time", 6th WCTR, Lyon France, 1992.
26. Thomas(1991), "Traffic assignment technique".
27. U.S. DOT(2005), "Expert Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling Proceedings".
28. Urban Analytics Inc. et al(2004), "Estimating Demand for Value Pricing Projects - State of the Practice", Expert Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling.
29. Vovsha et al(2005), "Making the State of the Art the State of the Practice: Advanced Modeling Techniques for Road Pricing", Expert Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling.
30. William Stockton et al(2006), "Estimating toll road user value of time by income category", Expert Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling.

✉ 주 작 성 자 : 김재영

✉ 교 신 저 자 : 손의영

✉ 논문투고일 : 2009. 2. 21

✉ 논문심사일 : 2009. 5. 8 (1차)

2009. 6. 1 (2차)

✉ 심사판정일 : 2009. 6. 1

✉ 반론접수기한 : 2009. 12. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필