

■ 論 文 ■

교통수요관리 방안의 단기적 효과 분석모형의 구축

Building a TDM Impact Analysis System for the Introduction of Short-term Congestion Management Program in Seoul

황기연

(서울시정개발연구원 연구위원)

김익기

(한양대학교 교통공학과 부교수)

엄진기

(서울시정개발연구원 연구위원)

목 차

- I. 서론
- II. 교통수요관리 효과평가방법론에 관한 문헌고찰
- III. SCPM 실행을 위한 교통수요관리 기대효과 분석방법론
- IV. 기대효과분석작업의 실행: 서울시 사례
 - 1. 석자료
 - 2. 통행배정모형의 구축
 - 3. 수단선택모형의 구축
 - 4. 모형의 결합을 통한 주행세 부과시 기대효과 분석
 - V. 결론
 - 참고문헌
 - [부록] 노선배정을 위한 교통량-지체 함수식 (VDF: volume-delay function)

요 약

서울시는 IMF 경제위기 상황으로 교통시설 투자감소에 의한 공급정체 현상이 예상됨에 따라 교통수요관리에 대한 의존도를 높일 수밖에 없는 실정이다. 그러나 교통수요관리에 대한 기대에도 불구하고 기존의 서울시 교통수요관리 정책은 단기 교통수요관리 목표 및 수요관리정책 시행에 따른 효과 분석체계의 부재, 교통현상 변화에 대한 지속적 모니터링 체계의 결합등 문제점이 있음에 따라 그동안 정책효과에 대한 정확한 홍보가 미흡했으며 정책의 지속적 수용성 확보가 어려웠다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 서울시에서는 교통혼잡관리프로그램(CMP)의 도입이 필요하게 되었다. 이 프로그램은 서울시의 단기교통관리목표를 설정한 뒤 적정교통수준을 넘어서는 수요를 감축하기 위한 종합적 교통수요관리시책을 마련하고 선정된 대안의 기대효과를 예측할 수 있는 방법론을 구축하며, 신속하게 시행, 모니터링 함으로써 서울의 교통수준을 단기적으로 항시 적정수준으로 유지하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 연구에서는 서울시의 CMP의 실행을 위해 교통수요관리 프로그램의 효과예측모형(Seoul Congestion Management Model: SECOMM)을 개발하였다. SECOMM의 개발을 통해 단기교통관리목표를 달성하기 위한 적정 교통수요관리 프로그램의 실행전략을 보다 효과적으로 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

날로 심각해지는 서울시의 도로상 교통문제에 보다 효과적으로 대처하기 위해 1990년대 들어서면서 부터 서울시에서는 승용차의 이용억제를 중심으로 한 교통수요관리를 시행해오고 있다. 특히 IMF 경제위기 상황으로 서울시는 1999년 이후의 교통시설투자에 대한 신규발주계획을 갖지 못하여 2000년부터 2007년까지는 공급정체 현상에 직면하게 될 전망이다. 따라서 서울시는 교통문제에 대처하기 위해 교통수요관리에 대한 의존도를 높일 수밖에 없는 실정이다.

교통수요관리에 대한 의존도가 높아질 것으로 기대됨에도 불구하고 기존의 서울시 교통수요관리 정책은 몇 가지 문제점이 있는 것으로 지적되고 있다. 첫째, 기존의 도시교통정책이 장기간을 필요로 하는 투자계획을 포함하여 전시성 도시교통지표를 설정함에 따라, 단기적으로는 실효성 있는 관리지표가 없었다. 따라서 단기적으로 교통수요관리를 통해 감축해야할 승용차교통량의 목표치가 존재하지 않아서 효율적인 정책시행이 어려웠다. 둘째, 혼잡통행료, 주차요금정책, 기업체교통수요관리, 주행세 정책 등은 국지적, 단편적으로 실시되어 서울시 전체가 도로에 대한 개선효과가 명확하지 않았다. 셋째, 수요관리정책의 시행에 따른 교통현상 변화에 대한 지속적 모니터링 체계의 결함으로 정책효과에 대한 정확한 홍보가 이루어지지 못했고, 따라서 정책의 지속적 수용성 확보가 어려웠으며, 교통여건이 악화되어 새로운 시책을 도입할 때 과도한 준비기간이 소요되어 상황변화에 탄력적인 대응이 어려웠다.

이러한 문제를 해결하기 위해 서울시에서는 단기교통혼잡관리프로그램(Short-term Congestion Management Program: SCMP) 도입을 시도하고 있다. 이 프로그램은 1) 그 동안 서울시에서 도입한 교통수요관리시책에 대한 평가와 분석을 통하여 시책이 갖는 타당성 및 문제점을 파악하고, 2) 서울시의 단기교통관리목표를 설정한 뒤, 3) 적정교통수준을 넘어서는 수요를 감축하기 위한 종합적 교통수요관리시책을 마련하고, 4) 선정된 대안의 기대효과를 예측할 수 있는 방법론을 구축하며, 5) 신속하게 시행, 모니터링 함으로써 서울의 교통수준을 단기적으로 항시 적정수준으로 유지하고, 장기적 목표까지

도 점진적으로 달성하는 것을 목적으로 하고 있다(서울시정개발연구원, 1998).

서울시의 SCMP는 미국 캘리포니아주의 인구 5만 이상의 County에서 주정부에서 배분하는 휘발류세수의 일정액을 할당받기 위해 매년 수립하는 혼잡관리프로그램(CMP : Congestion Management Program)과 유사성이 있다. 이제도의 절차는 1) CMP Agency의 지정, 2) CMP 작성, 3) CMP 검토 및 채택, 4) CMP 수행, 모니터링, 목표달성여부 점검 등의 4단계로 구성된다. CMP의 작성은 1) 모니터링의 대상이 되는 교통체계의 구성, 2) 해당연도 대상교통체계의 LOS 목표, 3) 대중교통 서비스기준, 4) 교통수요관리 프로그램, 5) 대안시행에 따른 예상 효과분석 체계, 6) 해당연도의 토지이용 및 교통체계 투자 프로그램 등을 포함한다. CMP는 매년 성과달성을 점검하고, 정책목표수치에 미달하거나 미달할 것으로 예상되는 도로구간(segment)이나 교차로(Intersection) 또는 인근지역전체를 교통관리지구로 지정하고 이들 지역에 대해 별도의 결함지역계획(Deficiency Plan)을 수립하도록 하고 있다(US DOT, 1995).

본 연구의 목적은 서울시의 SCMP의 실행을 위해 다양한 교통수요관리 프로그램의 효과예측시스템을 구축하는데 있다. 이러한 시스템 구축을 통해 단기교통관리목표를 달성하기 위한 적정한 교통수요관리 프로그램의 실행전략을 보다 효과적으로 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 총 5장으로 구성되며, 제II장에서는 교통수요관리 효과평가에 관한 기존 문헌고찰, 제III장에서는 SCMP 실행을 위한 교통수요관리 평가체계 구축, 제IV장에서는 서울시를 대상으로 주행세도입시 기대효과예측을 구축된 평가체계를 활용하여 실행하고, 마지막으로 V장에서는 결론을 제시한다.

II. 교통수요관리 효과평가방법에 관한 문헌고찰

미연방고속도로청(FHWA)에서는 1992년 새로운 환경변화에 적응할 수 있는 교통수요모형의 개발을 제안하였다. 새로운 환경이란 미국육상교통효율화법

(ISTEA)과 미국대기청정법(CAAA)에서 제시된 CMS (Congestion Management System)와 TCM (Traffic Control Measures) 등의 내용이 통행행태의 변화를 수반하는 교통수요관리 프로그램들을 포함하고 있으며, Sierra Club과 같은 시민단체가 4 단계모형의 부정확성에 대해 법률소송을 제기한 것을 말한다(SFCTA, 1991).

전통적인 4단계 모형이 도로 및 대중교통시설 등 투자중심의 모형이기 때문에 이와 같은 분석방법으로는 개별적이고 상세한 결과를 요구하는 통행행태 변화의 예측에는 한계가 있다. 일반적으로 정적모형(static model) 형태이며 하루의 통행을 기본단위로 하여 분석하고 있는 전통적인 4단계 교통수요예측모형은 1) 시간대에 대한 차별 없이 집합적 개념의 통행을 분석의 기초단위로 설정하고 있기 때문에 통행자들이 발생시키는 서로 다른 시간대 통행간의 연관관계를 고려하지 못하며, 통행발생, 통행분포, 교통수단선택 및 노선배정의 각 분석단계가 독립적이며 앞단계의 결과에 종속적이어서 각 단계의 분석결과 간의 상호 연관성을 반영시키지 못하고, 2) 통행의 시간대별 전이현상을 설명하기 어려우며 (가령 혼잡통행료 실시시간대를 피해 통행시간을 이동할 경우), 3) 정적 분석이기 때문에 도로교통상황의 시간대별 변화에 따른 대응을 고려하기 어려우며, 4) 외생변수가 많다는 문제점 등이 여러 문헌에서 지적되고 있다 (Kitamura et al., 1996).

새로운 교통수요예측모형은 현재 4개의 연구그룹에서 추진중으로 1) RDC(Kitamura et al., 1996), 2) Caliper Co.(Slavin, 1996), 3) MIT(Ben-Akiva et al., 1996), 4) Louisiana TRC(Stopher et al., 1996) 등이 이에 해당된다. 이들 모형의 공통점은 1) 활동기반, 2) 확률적 통행행태 이론, 3) 변화에 대한 행태의 경험적 적응성, 4) GIS 기반, 5) 동적노선배정, 6) 비집계 선택모형, 7) 통행행태의 정산과 예측에 미시적 모의실험기법의 적용, 8) 행태관련 자료 및 정교한 자료의 요구 (예 : household activity diaries, SP survey, Longitudinal panels, detailed network) 등이다.

그러나 이들 새로운 수요모형은 이론적으로는 많은 발전을 이루었음에도 불구하고 모형을 구축하기 위해서는 많은 데이터가 필요하고, 미시적모의실험기

법, 동적통행배정 등을 위해서는 보다 발전된 기법의 개발이 필요하다. 하지만 아직까지 현실에 활용될 수 있는 프로그램의 개발이 되어 있지 않은 상태이고 실험적 프로그램을 개발하고 검증하는 단계에 있다. 따라서 현실적으로 교통수요관리 방안을 평가하고 예측하기 위해서는 기존 4단계 모형을 분석목적에 적절하게 보완하여 좀 더 미시적 통행패턴을 분석할 수 있도록 상세성과 정확성을 높이는 것이 현실적인 방법으로 판단된다.

III. SCMP 실행을 위한 교통수요관리 기대 효과 분석 방법론

SCMP를 실행하기 위해서는 단기 교통수요관리 프로그램의 실행효과를 예측하여 서울시교통관리목표를 달성하는데 적합한 수단인지에 대한 판단이 필수적이다. 본 장에서는 주로 교통수요관리 기대효과 분석을 위한 방법론을 논의한다. 따라서 서울시교통관리목표의 결정 및 시행결과의 모니터링 방법에 관한 사항은 논의의 예외로 한다.

교통수요관리 대안의 기대효과분석을 위한 총괄적 방법론은 <그림 1>에 나타나있다. 전체적으로 노선배정단계, 수단분담을 결정단계, 교통관리목표달성 단계 등의 3단계로 구성된다. 전장에서 논의되었듯이 기존의 4단계 모형을 대체할 모형의 실용화가 이루어지지 않은 상황에서 가능한 4단계접근법의 문제점을 최소화하고 외국 연구에서 제시한 새로운 분석방법에서 수용 가능한 분석방법은 최대한 수용하는 차원에서 방법론을 구축하고자 한다. 분석에 사용될 관련 프로그램은 EXCEL, ALOGIT, EMME/2 등이고 시스템의 통합적 효과분석을 위해서는 EMME/2내의 MACRO 기능을 이용하였다.

우선, 4단계수요분석 방법 중 통행발생과 통행분포 과정은 단기적으로 큰 변화가 없다는 가정 하에 대안의 시행효과분석은 교통수단선택과 노선배정 과정만을 고려하도록 한다. 교통수단선택 모형은 총통행량 및 O-D의 변화가 없는 것을 전제로 하여 수단분담율을 도출하기 때문에, 정책실시로 인하여 도로상에서 통행자체가 소멸되는 통행은 사전에 합리적인 기준으로 줄여서 분석하였다. 기존 수요관리정책 평가결과를 최대한 교통수단선택 모형의 계수 산정과정에 반

영하기 위해서 기존에 실시된 혼잡통행료, 주행세, 강제10부제, 유류가격인상 등에 대한 모니터링 결과를 이용하였다(서울시정개발연구원, 1998).

노선배정모형의 정산은 교통정책의 실행 시점과 자료조사 시점의 차이로 인한 자료간의 시간적 불일치를 없애기 위해 정책 시행 전의 자료로 일치시켰다. 즉, 정산된 노선배정모형의 통행시간, 교통량, 속도 등 결과는 자료조사후 시행된 혼잡통행료 징수에 따른 효과 분석을 위한 기준지표로서 이용하였다. 한편, 단기에서는 투자가 고정된 상황이므로 당해 연도 예산에 확정된 투자계획만을 노선배정모형에 반영하도록 하였다.

교통수요관리 대안 적용시 신속한 효과를 분석하기 위해 수단선택모형과 노선배정모형을 EMME/2의 매크로 기능을 이용하여 하나의 결합된 형태로 구성하여 상호간 변량을 각 모형에 반영시켜서 균형(equilibrium)을 이룰 때까지 반복적으로 수행한다. 예를 들면, 주행세로 인한 새로운 수단분담율을 산출하고, 변화된 수단별 통행량은 노선배정을 통해 새롭게 각 수단별 통행시간을 계산하게 되며, 이 결과는 다시 교통수단모형에 반영되어 새로운 수단분담율을 추정하게 된다. 이와 같은 계산은 균형상태에 이를 때까지 <그림 6>에서 보는 바와 같이 반복 계산된다.

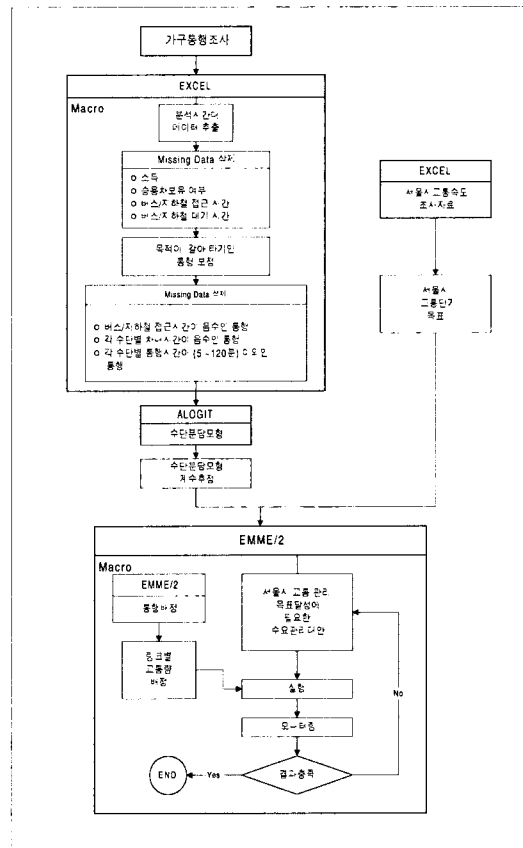
IV. 기대효과 분석작업의 실행 : 서울시의 주행세 도입 사례

본 장에서는 전장에서 구축된 방법론을 구체화하여 서울시에서 주행세를 도입하였을 경우의 기대효과를 분석하였다. 효과분석은 대안의 실행에 따른 교통수단 분담율의 변화, 분담율 변화에 의한 수단별 통행량 변화, 네트워크의 속도 및 교통량의 변화를 추정함으로써 가능하게 된다. 이를 위해서는 기준년도 각종 교통지표 및 기초자료를 이용하여 분석모형의 정산과정이 선행되어야 한다. 모형의 정산과정은 교통수단선택 모형의 정산과정과 노선배정 모형의 정산과정의 2부분으로 구분할 수 있으며, 이 둘은 정산 이후 하나의 결합된 형태로 각 수요관리 정책의 효과 분석에 이용된다. 본 장의 구성은 다음과 같다: 1) 평가에 사용된 자료에 대한 설명, 2) 교통수단분담모형의 구축, 3) 노선배정모형의 구축, 4) 두 모형의

결합을 통해 서울시에서 휘발유 값을 인상(주행세)하였을 경우의 시행효과 예측 등이다.

1. 기대효과분석을 위한 데이터베이스의 구축

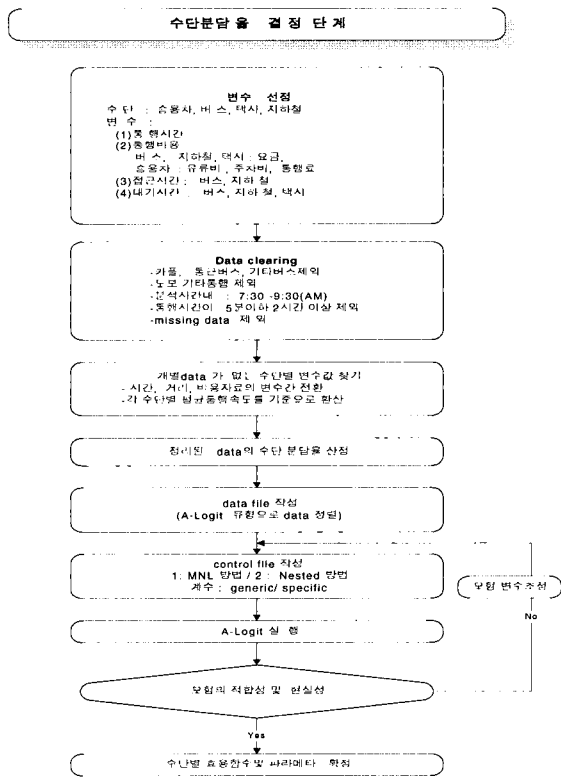
교통수요관리 시행에 따른 기대효과분석을 위해 서울시에서 시행한 '96년 서울시 교통센서스의 가구통행실태 조사자료와 가로망 조사자료를 활용하였다. 수단분담모형을 결정하기 위한 자료로서 가구통행실태조사의 개인별 일주일 일기식자료 중 수요일 자료를 이용하였다. 그리고 노선배정은 수도권 수단별 O/D(첨두, 비첨두, 전일)자료와 가로망 및 대중교통 노선망 자료를 이용하였다. 구축된 모형의 검증을 위해 기존에 실시된 수요관리정책인 혼잡통행료에 의한 해당구간의 승용차통행수요 변화, 총교통량 및 속도 변화 결과를 활용하였으며, 또한 징수대상 지역 및 주변지역과 관련된 연도별 교통량조사자료 및 정거속도자료를 <표 1>과 같이 구축하였다.



<그림 1> 연구분석 과정도

〈표 1〉 관련 연구자료 및 모니터링자료

내 용	데이터 형식	날 짜	출 처	
통행량/ 통행실태	'96년 수도권 수단O/D - 첨두시 및 비첨두시	일 별 시간대별	1997.10 ~ 1998.3	본연구원
	'96년 일기식 가구통행조사 자료 - 통행선호도 및 개인별 1주일 통행자료(수요일)	일 별	1997.10 ~ 1998.3	본연구원
네트워크	수도권 가로망자료 대중교통 노선망자료	시간대별	1996.11.11 ~ 1998.4	본연구원
교통량	남산1·3호터널 일일차량통행량 (혼잡통행료 징수자료)	시간대별	1996.11.11 ~ 1998.4	서울시 시설관리공단
	대중교통 수송인원 자료 등 서울시 교통량 조사자료	시간대별	1996, 1997	서울시 지방경찰청
속 도	서울시 정기속도 조사자료	시간대별	1996, 1997	서울시



〈그림 2〉 수단분담율 결정 과정도

2. 수단분담모형의 구축

1) 수단분담모형 구축방법론

수단분담모형의 구축 방법론은 〈그림 2〉에서 요약

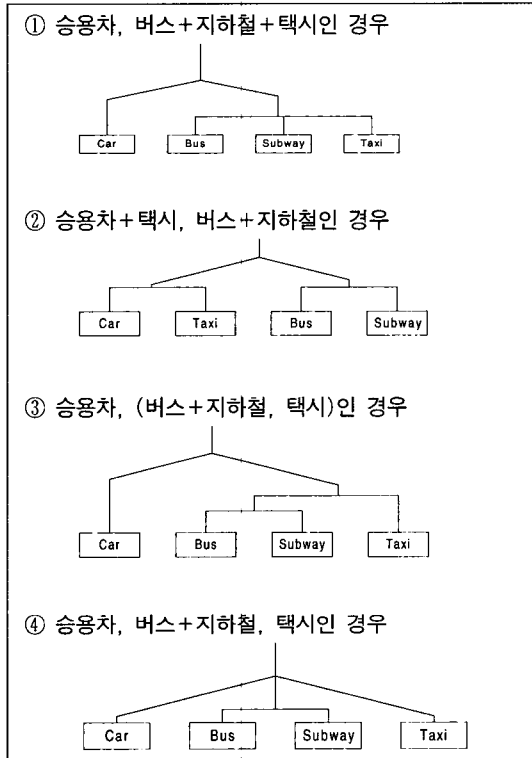
된 것과 같다. 1) 교통수요관리의 정책효과 분석을 위한 비집계 로짓모형의 변수를 선정하는 과정, 2) 비집계 로짓모형 분석을 위한 조사자료의 자료정리 (data clearing)와 자료입력 과정, 3) 다양한 모형들의 정산작업을 통해 통계적으로 최적 모형의 선정 과정, 4) 모형의 검증작업을 통한 모형의 적합성 및 현실 적용성의 시험과정으로 구성되어 있다. 변수의 선정, 자료의 정리에 관한 사항은 별도의 문헌 (황기연 외, 1998)에 상세히 기재되어 있으므로 본 연구에서는 생략하고 모형선정과 검증에 관한 사항만 논의한다.

2) 모형의 선정 및 검증

본 모형에서 교통수단 선택대안집합은 조사된 『승용차, 버스, 지하철, 택시, 오토바이, 자전거, 도보, 기타 등』 8개의 수단 중에서 현실성 있는 분석을 위한 단순화 과정을 통해 『승용차, 버스, 지하철, 택시』의 네 가지 선택대안 집합으로 결정하였다. 설명 변수는 크게 통행비용에 관한 변수, 통행시간에 관한 변수, 더미변수 그리고 개인속성변수로 구분되어지며 이러한 범주 내에 드는 독립변수 가운데 통계적으로 관측자료를 가장 잘 설명하는 변수를 선택하여 최종적 교통수단모형으로 설정되어지게 된다. 여러 가지 설명변수를 조합하여 현실을 가장 잘 설명하는 모형을 찾아내기 위하여 여러 가지 형태의 다항로짓모형 (MNL)에 대한 통계적 분석을 한 결과 선택된 모형은 IIA 문제가 있어서 (서울시정개발연구원, 1998)

Nested logit 모형구조를 채택할 필요가 있는 것으로 나타났다.

Nested 구조를 결정하기 위해 본 연구에서는 <그림 3>과 같이 현실적으로 가능한 4가지로 nested 구조를 정하였다.



<그림 3> 선택 가능한 Nested 구조

①번제는 승용차와 준대중교통수단인 택시를 포함한 대중교통으로 분리한 경우이고, ②번제는 대중교통수단끼리 묶고 속성이 비슷한 승용차와 택시를 묶어 두 그룹으로 나눈 경우이다. ③번제는 대중교통과 준대

중교통으로 나눈 그룹과 승용차와 비교한 경우이고, 마지막으로 ④번제는 승용차, 대중교통 그리고 택시의 세 그룹으로 나눈 경우이다.

위의 4개 모형의 효용함수는 식(1)과 같이 표현되며 각각의 nested 구조를 Alogit Program으로 분석한 결과는 <표 2>에 정리되어 있다.

$$V_i = \text{상수}_i + \beta_1 TTime_i + \beta_2 TCost_i \quad (1)$$

여기서 V_i : i 수단¹⁾의 효용함수

상수 i : i 수단의 Constant (버스는 제외)

$TTime_i$: i 수단의 총 통행시간(분)

$TCost_i$: i 수단의 총 통행비용(원)

β_1, β_2 : 설명변수의 계수

본 연구에서는 기준 교통수단으로써 버스를 정하고 나머지 수단에 대해서 수단고유상수를 포함시켜 효용의 차이를 분석하고자 하였다. 위의 표에서 ③번제 모형은 Cost의 부호가 ⊕이고 승용차상수의 t-value가 0.3으로 너무 낮고 θ 값이 1보다 크기 때문에 nested 구조로 적합하지 못한 것으로 나타났다(Ben-Akiva and Lerman, 1987). 그러나 나머지 3개의 모형은 ρ^2 값이나 θ 값, 계수값의 부호와 t-값 모두가 통계적으로 유의하여 모형의 적합성을 나타내고 있다.

③번을 제외한 3가지 nested logit 모형의 수단분담율을 살펴보면 ④번 모형은 입력자료의 분담율과 차이가 많아 설명력이 떨어져서 이 모형을 제외하였다. 나머지 ①번과 ②번 모형은 수단분담율이 입력자

<표 2> nested logit 모형대안의 계수 값과 T-value 비교

모형	설명변수	Cost	Time	승용차 상수	지하철 상수	택시 상수	θ_1	θ_2	ρ^2	\bar{r}^2
		계수값	t-value	계수값	t-value	계수값	t-value	계수값		
①	계수값	-0.000175	-0.03417	-0.6845	-0.8317	-2.211	0.9065	-	0.2434	0.1078
	t-value	-5.6	-21.9	-5.9	-14.3	-8.7	21.6	-		
②	계수값	-0.00023	-0.03988	-0.9568	-0.9200	-1.979	0.5084	0.3897	0.2489	0.1143
	t-value	-5.0	-20.9	-4.1	-14.1	-6.4	7.9	5.1		
③	계수값	0.000083	-0.03753	0.0717	-0.8515	-1.7600	0.0445	11.61	0.2469	0.1119
	t-value	2.8	-21.8	0.3	-14.2	-8.4	2.8	9.9		
④	계수값	-0.000124	-0.03472	-0.6525	-0.8361	-2.173	0.8391	-	0.2440	0.1085
	t-value	-3.3	-21.8	-5.5	-14.3	-9.1	16.8	-		

1) 승용차, 버스, 지하철, 택시

료와 유사하며 시간가치도 11,695원과 10,292원으로 현실적합성이 높은 것으로 나타났다(서울시정개발연구원, 1998). 다음으로 모형 ①과 ②에 대하여 탄력성을 비교해 본다면 모형 ①에서 승용차의 가격탄력성이 -0.5로 크기에 있어서 기존 연구에서 제시하는 범위내에 속한 반면(서울시정개발연구원, 1998; Goodwin, 1992; Oum et.al, 1992), 모형 ②는 -0.7로 다소 크게 나타나 모형 ①을 본 연구의 최적모형으로 결정하였다.

남산 1·3호 터널에 혼잡통행료 시행 1년 후의 관측된 교통량의 변화를 보면 시행전보다 12.4%가 감소한 것으로 나타났다(서울시, 1997). 선택형 ①번 모형의 계수를 이용하여 승용차 비용에 혼잡세 2,000원(왕복통행 : 4,000원)을 추가했을 경우를 분석한 결과, 승용차의 분담율이 12.4% 감소한 것으로 나타났고, 승용차이용 감소율이 38.2%로 남산 1,3호 터널의 감소율 36.3%와 아주 유사하게 나타나 본 연구의 최적모형이 현실을 잘 설명하고 있다고 판단된다(서울시정개발연구원, 1998).

비(13.2%)를 적용하여 승합차 통행량을 별도로 구축하였다. 노선버스는 특정 노선을 가지고 있음에 따라 노선이 통과하는 가로구간의 시간당 버스운행대수에 승용차환산계수(PCU)를 적용하여 최종 통행량배정을 위한 별도 자료로 구축하였다. 각 수단별 재차인원은 센서스의 교통량 조사결과를 토대로 승용차(1.45人), 승합차(1.64人), 택시(1.82人), 버스(15.7人)를 적용하였으며, 버스의 승용차환산계수는 도시형 및 좌석버스(2.5), 마을버스(2.0)를 적용하였다(서울시, 1998)

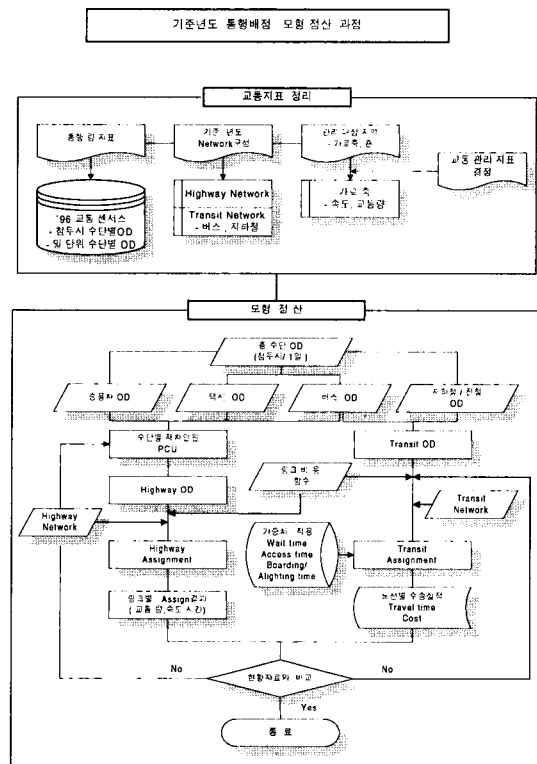
적용된 네트워크는 '96년 현재 서울시의 폭원 12M 이상인 도로와 경기도 지역의 주요 지방도를 포함하고 있으며, 서울시의 도로위계 내용을 살펴보면 5개의 도로등급(도시고속도로, 주간선도로, 보조간선도로, 집분산도로, 국지도로)으로 구성된다. 각 도로등급을 고려한 차선당 용량에 따라 총 11개의 차별화된 교통량-지체함수식(VDF:Volume-Delay Function)을 구축, 적용하여 노선배정(assignment) 분석에 이용하였다(부록참조). 대중교통 노선에는 서울시 지하철/전철 노선과 시내버스 노선, 버스전용차로 등이 포함되어 있다.

3. 노선배정모형의 구축

1) 통행료 징수전 모형정산

〈그림 4〉는 네트워크 정산과정을 나타낸 것으로 대중교통 노선을 포함한다. 네트워크의 정산을 위해서는 그림에서 보는 바와 같이 먼저 기준년도(혼잡통행료 징수 전) 통행량 자료와 네트워크 자료의 정리 작업이 필요하며, 주기적으로 획득이 가능한 자료에 기초하여 교통지표를 결정하게 된다.

기준연도의 모형정산은 오전 첨두시를 기준으로 수행하였으며, '96년 서울시 교통센서스결과에 의한 수단별 통행량 자료 중 오전 첨두시 통행량자료를 이용하였다. 공로를 통행하는 승용차, 택시, 버스의 교통수단별 통행량을 각각의 재차인원을 적용하여 차량단위의 기준점통행량(O/D)으로 환산하였고, 마을버스와 출퇴근, 통학버스와 같이 특정노선을 알 수 없는 기타버스 통행량은 승용차환산계수(PCU)를 적용하여 승용차 교통량으로 구축하였다. 한편, 승합차 O/D는 따로 구분되어 있지 않음에 따라 PCU 교통량에 교통량조사로부터 산출한 승용차와 승합차 구성



〈그림 4〉 모형정산 과정도

'96년 관측자료와 모형정산결과를 비교하면 모형정산에 의한 속도 및 교통량 결과를 관측자료와 비교하면 <표 3>에서 보는 바와 같이 속도는 4km/h이내의 차이를 보이고

있으며, 1·3호터널의 교통량 또한 20%전후의 차이를 보이고 있다. 따라서, 모형에 의한 정산속도 및 관측교통량 결과가 큰 차이를 나타내지 않고 있다.

<표 3> 오전 첨두시 관측자료와 모형의 정산속도 및 교통량 비교

구분	평균 속도(km/h)			구분	남산 1·3호터널 교통량					
	관측 속도 ¹⁾	정산 속도	정산-관측 (%)		관측교통량 ²⁾		정산교통량		정산/관측(%)	
					유입	유출	유입	유출	유입	유출
도심	22.58	23	0.42(1.9)	1호터널	2,207	1,435	2,536	1,847	14.9	28.7
간선	18.63	16	-2.63(-14.1)	3호터널	2,439	2,037	2,591	2,180	6.2	8.4
도시고속	31.39	29	2.39(-7.6)							
서울시 ³⁾	20.79	24	3.21(15.4)							

주 : 1) 관측속도자료는 '96년 속도조사자료의 오전시간대임.
 2) 교통량 비교자료는 '96년 경찰청 조사지점을 기준으로 하였음.
 3) 서울시 전체의 평균속도의 경우 관측속도는 799.3km의 주요간선도로만을 대상으로 한 것이고 정산속도는 12m이상도로 모두에 대한 것임.

2) 남산1,3호 터널 혼잡통행료 징수 후 분석모형정산

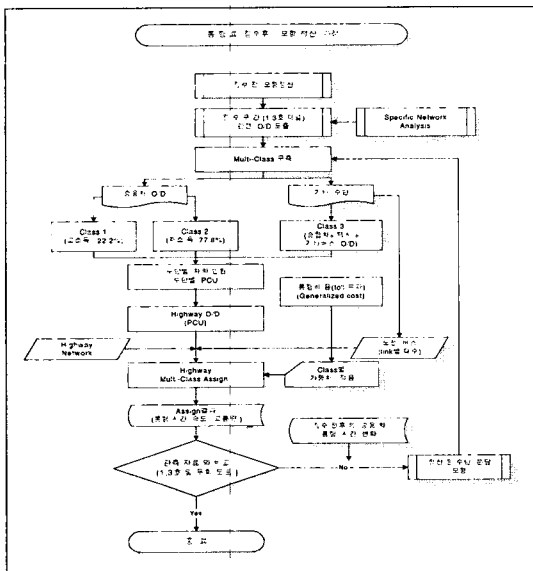
본 연구에서 사용된 자료의 조사시점이 남산1,3호 터널에서 혼잡통행료가 징수되기 이전시점이기 때문에 미래예측에 적용될 노선배정모형에서는 이러한 점을 고려하여 교통망에 대한 수정작업이 필요하다(<그림 5> 참조).

우선, 소득수준이 높은 계층은 통행료징수에 따른 영향이 적거나 빨라진 시간혜택 때문에 더 높은 이용률을 보일 수 있기 때문에 본 연구에서는 이들 고소득층에 대하여 통행료 징수구간의 통행의지는 변하지 않는다고 가정하였다.

승용차 수단통행의 소득수준별 통행량 분리를 위해서 교통센서스의 가구통행 실태조사 가구별 소득자료와 소득수준에 관한 각종지표를 이용하였다. 즉, 고소득층과 저소득층의 경계를 월평균 1인당 임금을 기준으로 제시된 자료2)(225,000원; '80년)로부터 소득증가율을 고려하여 '96년 월평균 임금이 약 158만원 이상을 고소득층으로 분류하였으며 이를 가구별 소득자료와 비교한 결과 상위 22.2%가 고소득층에 해당되는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 전체 승용차 통행량 중 고소득층을 22.2%, 저소득층을 77.8%로 정의하였다. 소득수준에 따른 승용차 통행량 분리는 남산1·3호 터널을 통과하는 기종점통행량(O/D)을 대상으로 적용하였다.

혼잡통행료 징수 후의 모형 정산을 위해서 1차적으로 정산된 징수 전 교통망 관련 자료에서 남산 1,3호 터널 혼잡통행료 부과지점을 통과하는 수단 O-D 중 승용차 O-D량을 수단분단모형 정산결과에 따라 감축시킨다.



<그림 5> 징수후 모형정산 과정도

2) 원제무 「중로축 출근통행에 대한 로짓모형의 적용」 1984.

다음으로 승용차수단 혼잡통행료 2,000원을 수단 부담모형 정산결과 산정된 시간가치(11,695원)를 고려하여 약 10분으로 시간가치화하여 혼잡통행료 징수 구간인 남산1·3호터널에 추가 링크비용으로 고려하였다. 다만 혼잡통행료에 대한 부담은 징수대상 차량 인지의 여부, 소득수준 등에 따라 차이가 나기 때문에 이를 반영했다.

서울시 한강 이남지역 중 강남, 서초, 송파, 강동구 및 경기도 분당, 하남, 성남시에 속한 존과 서울시 한강 이북지역 중 종로, 중구, 서대문, 은평구에 속한 존간의 기종점통행량(O/D)이 주로 이에 해당된다. 택시 및 버스 수단은 통행료 징수대상에 포함되지 않음에 따라 남산 1·3호 터널 통과시 속도향상만을 반영한다.

이상과 같은 혼잡통행료 징수 후 모형정산은 소득 수준 및 수단별(승용차, 택시, 버스)로 여러 개의 그룹(class)으로 분리하여 emme/2의 다계층 차량통행 배정법(multi-class on auto assignment with additional volume)을 이용하여 노선배정 분석을 실행하였다. 이때, 노선버스의 링크교통량은 주어진 값으로 링크에 고정 배정(pre-loading)하였으며, 혼잡통행료에 의한 영향은 각 그룹별로 다른 값의 가중치를 적용하여 통행료에 대한 그룹별 영향을 구분하여 반영시키도록 하였다.

계층(class)은 통행료에 영향을 받는 승용차 이용자를 고소득층과 저소득층의 2개로 구분하였고, 통행료에 영향을 받지 않는 택시와 기타버스를 하나의 계층으로 하였으며, 노선버스의 특정노선 교통량을 또 다른 계층으로 구분하였다.

혼잡통행료는 시간가치로 고려하여 노선배정모형을 정산하였고 이렇게 정산된 모형을 이용하여 추정된 차량 평균 속도와 통행요금 징수 후의 실제로 관측된 평균속도('97, '98)를 비교하여 오차 비율을 산출하였으며, 이와 같은 도로 특성별 링크의 오차비율을 이용하여 모형에 의해 추정된 속도를 현실적으로 보정하는데에 적용하였다.

오차비율에 따른 보정계수(adjustment factor)는 식(2)와 같이 설정되며, 정산과정에서 이와 같이 설정된 보정계수를 이용하여 아래의 식(3)과 같이 예측 평균 통행속도를 계산할 수 있게 된다.

$$\frac{S_L^{obs}}{S_L^{est}} = f \tag{2}$$

$$S_L^{pre} = S_L^{est} \times f \tag{3}$$

여기서 S_L^{obs} : 링크 그룹 L의 조사 평균속도 (observed speed)

S_L^{est} : 노선배정에 의해 추정된 링크 교통량을 이용하여 추정한 링크 그룹 L의 평균 속도 (estimated speed)

S_L^{pre} : 링크 l의 예측된 평균 속도 (predicted speed)

f : 보정계수 (adjustment factor)

관측속도와 보정된 모형상의 속도변화치를 비교해 보면 서울시 오전평균 속도가 '96년 20.79km/h에서 '97년 21.91km/h로 1.12km/h(5.39%)의 속도개선을 보이고 있고, 모형상에서는 20.79km/h에서 20.96km/h가 되어 0.17km/h(0.81%)의 개선이 추정되고 있다.

관측된 '97년 서울시 속도에는 혼잡통행료 이외의 유가 및 주차요금인상등 속도증가에 영향을 주는 요소가 포함되어 있고, 모형에서는 혼잡통행료의 영향만 고려한 점을 감안하였을 때 <표 4>에서 보는 바와 같이 모형이 현실을 반영하고 있음을 알 수 있다.

<표 4> 남산 1,3호터널 혼잡통행료 징수전 : 후 관측속도와 모형속도 비교

구 분	평균 속도(km/h)					
	관측 속도 ¹⁾			모형 속도		
	징수전 ('96)	징수후 ('97)	변화폭 (%)	징수전	징수후	변화폭 (%)
도 심	22.58	- ²⁾	-	22.58	22.84	+0.26 (1.16)
서울시 ³⁾	20.79	21.91	+1.12 (5.39)	20.79	20.96	+0.17 (0.81)

주 : 1) 관측속도자료는 '96년, '97년 속도조사자료의 오전평균 속도임.

2) '97년 도심 관측속도는 청계고가로, 청계천로의 공사관계로 혼잡통행료 징수효과 비교자료가 없음.

3) 서울시 전체의 평균속도는 속도조사자료의 주요도로(799.3km)를 대상으로 하였음.

4. 모형의 결함을 통한 주행세 부과시 기대효과 분석

1) 주행세 부과효과 정산과정

일반적으로 주행세 또는 휘발유가격 인상은 승용차 이용율을 저하시키고 대중교통이용율을 증가시켜서

도로상 통행속도의 개선효과를 가져오게 된다. 그러나, 어느 정도의 교통수단분담율 및 교통량감소효과, 통행속도의 개선효과를 가져올 것인가를 예측하기 위해서는 효과적인 분석체계가 구축되어야만 한다. 본 절에서 효과분석은 앞에서 정산된 수단분담모형과 노선배정모형들을 교통수요분석 패키지인 Emme/2의 Macro기능을 활용하여 통합함으로써 수단분담율의 변화와 도로여건상의 변화가 지속적인 환류작업을 통해 Emme/2 한 패키지 내에서 신속하게 균형을 이루도록 하였다. 분석과정은 <그림 6>에서 보는 바와 같다.

먼저 초기화 단계(단계 0)에서는 본 연구에서 구축된 수단분담 모형과 노선배정 모형을 결합하기 위하여 네스티드로그 모형에 의해 추정된 각 수단별 더미변수 값과 비용 및 시간변수에 대한 파라메타 값을 저장한다. 또한 주행세에 따른 효과를 비교하기 위해 주행세 시행 전 노선배정을 통한 수단별 통행량, 속도, 통행시간을 저장하며 추정된 수단분담 모형의 통행시간자료와 주행세 도입 전 상황에서의 배정에 의한 통행시간을 비교하여 보정치를 산출하여 저장한다.

주행세의 유가반영분 결정단계(단계 1)에서는 분석할 주행세 반영분(ℓ 당 휘발유요금)을 결정하여 입력한다. 새로운 수단분담을 계산단계(단계 2)에서는 주행세 크기가 결정된 상태에서의 각 수단별 효용함수(Utility Function)의 계산 및 새로운 분담율을 산출한다.

수단별 통행량 재구성단계(단계 3)에서 수단별 통행량 자료는 '96 서울시 교통센서스에서는 구축된 승용차, 택시, 마을버스, 기타버스, 노선버스, 지하철, 기타(도보제외)의 7개 수단 통행량을 이용하였지만, 수단분담모형과 결합하기 위하여 마을버스, 기타버스, 노선버스를 버스로 통합하고, 기타수단은 제외하여 승용차, 택시, 버스, 지하철 등 4개 수단으로 하였다. 주행세에 의해 변화한 분담율은 수단분담모형상의 분담율과 network상 수단통행량의 분담율 차이를 보정할 수 있는 보정치를 구하여 각 수단별 O/D를 재구성하였다.

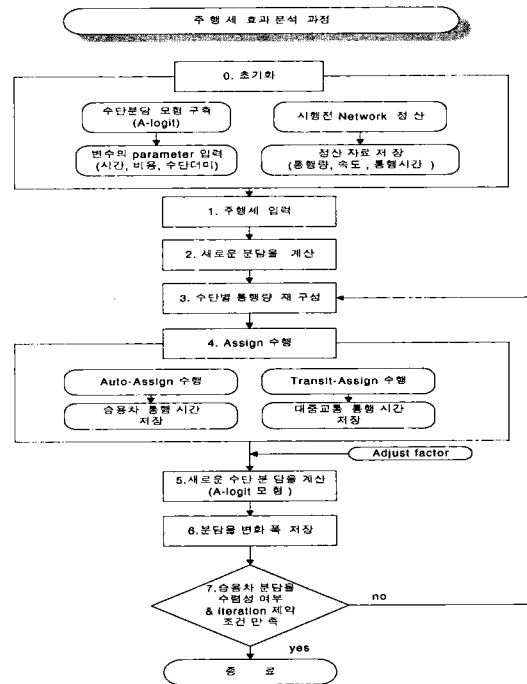
노선배정(단계 4)은 승용차와 대중교통으로 나뉘어서 실시하며, 이때 승용차노선배정을 위한 통행량은 공로상을 운행하는 모든 통행량을 고려하여야 하므로 승용차, 택시, 버스, 화물, 기타통행을 승용차로 환산하여 이용하였다. 이때 수요는 각 차량별 평균재차인원 및 PCU를 적용하여 차량단위로 환산하였다. 버스 전용차로상의 버스는 승용차통행에 영향을 주지 않으

므로 평균재차인원만을 적용하였다.

대중교통 배정은 도로상에서 주행세의 영향을 직접적으로 받는 노선버스(시내, 좌석, 순환버스 등)만을 대상으로 하였다. 지하철은 주행세에 의한 통행시간 및 통행비용 변화가 없는 것으로 가정하여 통행시간 및 통행비용은 수단분담 모형구축 시 주어진 통행비용, 통행시간을 그대로 적용하였다.

대중교통배정은 승용차배정의 결과로서 얻어지는 링크 통행시간을 버스 통행시간에 반영하여 수행하게 되며 이때 일반차로와 버스전용차로를 달리 고려하여 수행하였다. 버스노선이 일반차로 구간에 속해 있을 때는 승용차, 택시, 화물 등 차량에 의해 버스 통행속도가 영향을 받기 때문에 이를 버스통행시간에 반영하였으며, 전용차로 구간에 속해 있을 때는 이에 영향을 받지 않도록 하였다.

노선배정 결과로서 얻어지는 새로운 승용차통행시간과 대중교통통행시간을 활용하여 다시 수단분담율을 계산(단계 5)하게 된다. 새로운 분담율과 이전단계의 승용차 수단분담율과 차이를 저장한 후(단계 6) 승용차 분담율이 수렴하지 않을 경우 3단계(수단별 통행량 재구성)로 되돌아가 조건을 만족할 때까지 반복한다(단계 7).



<그림 6> 주행세 부과효과 분석과정도

2) 모형정산결과

주행세를 도입하여 유류가격을 기존보다 리터당 100원, 200원, 300원으로 인상하였을 경우 기대효과를 분석한 결과 서울시 통행속도 변화(표 5), 승용차분담율 변화(그림 7), 첨두시 승용차 교통량변화(표 6)에 요약되어 있다.

Network상의 서울시 속도는 25.19km/h에서 25.33km/h(100원/ℓ), 25.72km/h(200원/ℓ), 26.10km/h(300원/ℓ)로 개선되는 것으로 추정되어 주행세가 커짐에 따라 속도 개선폭이 높아지는 것으로 나타났다. 도로별로는 신호등과 같은 교통통제 시설에 의해 영향을 받지않는 연속류 시설인 도시고속도로의 속도개선효과가 가장 큰 것으로 예측되었다.

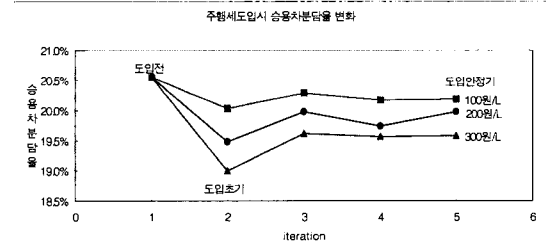
분담율의 경우 분석결과 도입초기에는 승용차분담율이 20.5%에서 20.0%(100원/ℓ), 19.5%(200원/ℓ), 19.0%(300원/ℓ)까지 급격하게 감소하지만 그 결과 통행속도의 개선으로 승용차이용이 편리해져 다시 승용차 분담율이 상승하게 된다. 이러한 과정을

반복하면서 도입안정기에는 승용차분담율이 도입초기보다 높은 20.2%(100원/ℓ), 20.0%(200원/ℓ), 19.6%(300원/ℓ)에 이르게되는 것으로 추정된다. 한편, 오전첨두시 승용차교통량 감소는 -1.8%(100원/ℓ), -2.6%(200원/ℓ), -4.8%(300원/ℓ)인 것으로 추정되었다.

〈표 6〉 주행세 도입시 서울시 오전첨두시 승용차 교통량 감소효과

구 분	도입전	100원/ℓ 인상시	200원/ℓ 인상시	300원/ℓ 인상시
첨두시승용차 교통량(대/시)	275,491 ¹⁾	270,493	268,329	262,420
감소대수 (%)	-	-4,998 (-1.8)	-7,162 (-2.6)	-13,071 (-4.8)

주 : 1) 도입전 승용차교통량은 '97년 교통센서스결과와 서울시 첨두시 승용차 수단O/D에 평균재차인원을 적용한 차량대수임.



〈그림 7〉 주행세 도입에 따른 승용차 분담율

- 주) 1. 주행세 도입전 수단분담율(20.56%)은 '96년 서울시 교통센서스결과를 이용하여 추정된 '97년 승용차 수단분담율 결과임.
- 2. 주행세 도입안정기는 주행세 도입후 승용차비용증가, 승용차 통행시간감소에 의한 균형상태를 반영한 결과임.

V. 결론

본 연구의 목적은 서울시의 단기교통혼잡관리를 위해 교통수요관리 방안의 효과분석체계를 구축하는데 있다. 이를 위해 교통수요관리 대안의 효과예측을 위한 분석방법은 전통적인 4단계 모형을 사용하였으며, 단기적으로 통행발생, 통행분포는 고정되어 있다고 가정하고 수단분담과 노선배정 과정만을 중심으로 분석방법을 제시하였다. 수단분담모형을 구축하기 위해 '96년 실시한 서울시 가구통행조사자료를 활용하였으며 행태적 변화를 충분히 반영하기 위해 비집계수단선택모형 중 Nested Logit 모형을 선택하였다. 한편 노선배정은 '96년 교통망에 근거하여 실시하였으며, 교통

〈표 5〉 주행세 도입시 평균속도 변화

구 분	현재 속도	평균 속도(km/h)								
		주행세 도입시								
		100원/ℓ 인상시			200원/ℓ 인상시			300원/ℓ 인상시		
속도	속도 변화	증가율	속도	속도 변화	증가율	속도	속도 변화	증가율		
도심	20.18	20.36	+0.2	0.9	20.39	+0.2	1.0	20.61	+0.4	2.1
간선	23.97	24.21	+0.2	1.0	24.34	+0.4	1.5	24.64	+0.7	2.8
도시고속	42.54	43.08	+0.5	1.3	43.53	+1.0	2.3	44.18	+1.6	3.9
서울시	25.19	25.33	+0.1	0.6	25.72	+0.5	2.1	26.10	+0.9	3.6

주) 1. 현재속도는 '98년현재 서울시 오전첨두시 모니터링 조사결과임.

망이 구축된 이후 징수하기 시작한 남산1,3호터널 혼잡 통행료에 대해서는 그 효과를 반영하여 교통망을 수정하였다. 수단선택 및 노선배정모형 정산 결과 기존에 시행한 다양한 서울시 교통수요관리 정책들의 효과와 유사한 기대효과를 모형상에서 반영할 수 있는 것으로 나타났다. 효과예측방법론에 근거하여 주행세 효과예측을 한 결과, 주행세를 부과하여 휘발류값을 현재 보다 리터당 300원 인상하였을 경우 서울시의 속도는 3.6% 개선되고, 승용차분담율은 0.9% 감소하며, 승용차통행량도 4.8% 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 분석체계의 구축을 통해 1) 신속하게 교통수요관리 대안의 시행효과를 예측하고, 2) 목표달성에 적합한 수준의 교통수요관리를 실행함으로써 그동안 문제시 되었던 과도한 규제라는 시민들의 불평을 최소화할 수 있으며, 3) 단기적으로 서울시의 교통상황을 최적수준으로 유지할 수 있는 수단을 마련함으로써 서울의 경쟁력을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 교통수요관리 이외에도 TSM, 도로투자, 지하철 투자와 같은 교통공급적인 변화도 구축된 교통망을 수정하여 기대효과 분석에 반영할 수 있으며, 또한 본 연구에서 구축된 분석모형을 다양한 목적으로 확장하여 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 모형의 어려움에 걸친 유용성을 높이기 위해서는 1) 서울시 교통상황에 대한 지속적인 모니터링을 통한 모형결과치의 점검, 2) 적어도 5년 단위로 통행발생, 통행분포, 수단분담 과정의 보완등이 수반되어야 할 것이며, 3) 매년 도로 및 대중교통망 등의 변화를 network에 반영하여야 하며, 4) 정기적 통행설문조사, 각종 정책에 대한 지속적 모니터링을 통해 통행행태의 변화를 검증할 수 있는 체계를 구축해야 한다.

참고문헌

- 국내문헌 -

1. 서울시정개발연구원, 총량적 교통수요관리 방안 연구, 중간보고서, 1998.
2. 서울특별시, 1997년도 정기속도조사자료, 1997. 6.
3. 서울특별시, 시내버스 개혁종합대책, 1997. 7.
4. 서울특별시, 혼잡통행료 시행1년 평가 및 효과분석, 1997. 11.
5. 서울특별시, 서울시 '97년 교통지표분석 및 데이터베이스 구축, 보도자료, 1998.
6. 원제무 (1984), 종로구 출근통행에 대한 로짓모형의 적용, 대한교통학회지.
7. 황기연, 김익기, 이우철(1998) 서울시 교통수요관리의 교통수단선택효과 예측을 위한 다항로짓모형의 계수추정 및 검증, 대한교통학회지.

- 외국문헌 -

1. Ben-Akiva, M. and Lerman, S., Discrete Choice Analysis, The MIT Press, 1987.
2. Ben-Akiva, M. Bowman, J. and Gopinath, D. (1996), "Travel demand model system for the information era," Transportation, Vol.23, No.3.
3. Goodwin, P.B. (1992) : "A Review of New Demand Elasticities with Special Reference to Short and Long Run Effects of Price Changes," May.
4. Kitamura, R., Pas, E., Lula, C., K. Lawton, P. Benson (1996) "The sequenced activity mobility simulator(SAMS): an integrated approach to modeling transportation," land use and air quality, Transportation, Vol.23, No.3.
5. Oum, T. H., W.G. Waters II & Jong-Say Yong (1992) : "Concepts of Price Elasticities of Transport Demand and Recent Empirical Estimates," Journal of Transport Economics and Policy, May.
6. SF County Transportation Authority, City and County of San Francisco Congestion Management Program, Oct. 1991.
7. Slavin, H. (1996) "An Integrated, dynamic approach to travel demand forecasting," Transportation, Vol.23, No.3.
8. Stopher, P., D. Hartgen, and Y. Li (1996) "SMART: simulation model for activities, resources and travel," Transportation, Vol.23, No.3.
9. US DOT, Developing Effective Congestion Management Systems: Four Case Studies, DOT-T-96-06, 1996.

[부록] 노선배정을 위한 교통량-지체 함수식
(VDF: volume-delay function)

■ Emme/2 link 구성내용

link type	도로 위계	함수(vdf)	비 고
1	외곽순환도로	1,2,5,6,7,9,11	
2	동부간선도로, 서부간선도로, 강변북로, 올림픽로등 자동차 전용도로	1 ~ 11	
3	교량, 주간선도로	3 ~ 11	
4	보조간선도로	4 ~ 11	
5	집분산도로 (3차선 이하)	4, 7, 8, 9, 10, 11	
6	고속도로 I.C램프	6,7,11	
7			
33	국도 + 인천	3 ~ 11	
44	일산, 분당, 과천, 안양	3 ~ 11	
55	일산, 분당, 과천, 안양	2, 3, 5, 7, 8, 10, 11	
88	지하철	1	
89	버스전용차로	13	
90	전용차로와 연결된 링크	14	
99	센트로이드 connector	11	

■ Link 함수 입력

함수번호	함 수 식
vdf 1	$length / 100 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 1100)) ^ 3.9)$
vdf 2	$length / 80 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 900)) ^ 3.9)$
vdf 3	$length / 80 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 850)) ^ 3.9)$
vdf 4	$length / 70 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 800)) ^ 3.9)$
vdf 5	$length / 70 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 750)) ^ 3.9)$
vdf 6	$length / 60 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 700)) ^ 3.9)$
vdf 7	$length / 60 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 650)) ^ 3.9)$
vdf 8	$length / 60 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 600)) ^ 3.9)$
vdf 9	$length / 50 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 550)) ^ 3.9)$
vdf 10	$length / 50 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 500)) ^ 3.9)$
vdf 11	$length / 40 * 60 * (1 + .15 * ((vol + volad) / (lanes * 450)) ^ 3.9)$