

교통수요분석을 위한 정산과 예측 절차에 대한 재고찰



김익기

1. 머리말

대규모 도시 교통시설 건설 및 확장 계획에 대한 교통수요분석은 1960대 후반 이후부터 통행자의 통행 행태를 통행의 빈도수, 목적지, 교통수단 및 노선의 선택 항목으로 단계를 구분하여 순차적으로 계산하여 가는 교통수요 4단계분석방법이 국제적으로 보편화되었으며 현재에도 가장 보편적으로 활용되고 있다. 하지만 국내 및 국외의 교통관련 참고 서적이거나 실무 보고서에서 각 분석 단계별 모형의 종류와 정산방법 그리고 예측방법에 대해서는 설명이 되어 있으나 한 단계에서의 입력 자료와 출력자료가 어떤 형태로 구축되어 다음 단계로 어떻게 넘어가며 그 분석이 갖는 의미는 현실적 교통현상과 연관 지어 어떤 의미를 갖는가에 대해 구체적으로 명확히 제시한 문헌은 찾기가 매우 힘들다. 따라서 교통 분석을 담당하는 실무자들은 자신 나름의 논리성에 기반을 두어 분석이 이루어지고는 있으나, 본인이 수행하고 있는 방법이 다른 모든 전문가들이 공감하는 방법인가에 대한 확신을 갖지 못하고 혼란에 빠지는 경우가 많다고 고려된다. 따라서 본 글에서는 가장 보편적으로 공감될 수 있는 실무적 교통수요분석 과정을 단계별로 세부 항목까지 구체적으로 명확하게 제안하고자 한다. 또한 이 기회를 통해 많은 전문가들의 토론의 장을 열어 토론 과정을 거치며 분석 과정이 공론화된 기

본적 분석과정의 틀을 마련할 수 있는 동기를 제공하고자 하는 목적도 있다.

각 분석단계에서 다루어질 내용으로는 1) 교통수요모형의 정산에 사용되는 개별 자료형태의 조사자료와 예측 시에 적용되는 집합적 자료형태의 예측 입력자료 간의 자료 형태 차이로 인한 집합화 오차(aggregation error) 문제와 오차를 최소화하는 방법에 관한 내용, 2) 통행발생, 통행분포 과정에서 통행생성(trip production)과 통행유인(trip attraction) 개념으로 분석하다가 교통수단선택 분석과정과 노선배정 분석단계에서 통행유출(trip origin)과 통행유입(trip destination) 개념으로 전환되어 가는 과정에서 자료 처리 방법에 관한 내용, 3) 교통수단선택 분석에서 노선배정 분석단계로 넘어가면서 승용차 및 대중교통의 노선배정 분석 상에서 입력자료 및 출력자료의 형태와 분석 방법에 관한 내용을 중심으로 실무적 차원의 교통수요분석 흐름 전반에 관해 논의하였다. 다만 본 글에서는 통행시간과 같은 교통 공급 속성이 주어진 상태에서의 수요를 분석하는 수요분석인 통행발생(trip generation), 통행분포(trip distribution) 및 교통수단선택(mode choice) 분석단계에 초점을 두었다. 교통 공급인 서비스 수준과 주어진 서비스 수준에서의 통행자 행태인 교통 수요 간의 균형점을 찾는 교통수요-공급 균형분석단계인 노선배정(traffic assignment) 분석에 대한 내용은 그 주제 하나로도 많은 논의가 필요하므로 이 글에서는 생략하였다.

II. 교통수요 분석과정

교통수요는 개별 통행자들의 통행빈도 결정, 통행 목적지 설정, 이용 교통수단 선택, 이용 노선 선택, 출발시각 선택 등 일련의 통행에 관련된 통행자들의 결정 하나 하나가 모여서 도시 전체의 교통수요패턴을 결정하게 된다. 즉 도시의 각종 활동이 원활하게 이루어지도록 제공되는 교통서비스에 대해 각 통행자들은 가장 자신에게 좋은 방법의 통행을 결정하게 되고 이것이 집합적으로 모여 교통 수요로써 나타내게 된다. 일반적으로 도시교통정책을 결정하는데 개별적 통행자의 교통수요보다는 링크 교통량, 회전교통

량, 대중교통 이용 승객수, 승하차 승객수와 같이 집합적 개념의 교통수요를 필요로 하고 있다. 하지만 집합적인 교통수요는 개별 통행자의 통행행태 결정에서부터 시작되기 때문에 개별 통행자의 의사결정 원칙을 이해하지 못하고는 집합적 개념의 교통수요 원칙을 찾아내기가 쉽지 않게 된다. 이와 같은 개별적 통행패턴을 이해하기 위해 소득, 차량보유, 주택의 위치 등을 함께 공유하는 가정(household)을 단위로 하여 가구통행 실태조사가 일반적으로 이루어지고 있으며 교통수요분석의 기본단위로 활용되고 있는 경우가 많다.

이와 같이 가구단위로 조사된 과거와 현재의 통행실태 자료를 이용하여 교통서비스 수준, 사회경제지표, 통행특성과 통행자들의 통행결정 행태의 원칙을 찾아내어 수학적 상관관계식을 구축한 것이 교통수요모형인 것이다. 이렇게 발견된 원칙을 미래에도 그대로 유지된다는 가정을 갖고 미래의 변화된 활동체계(activity system) 또는 교통체계(transportation system) 하에서의 교통패턴을 예측함으로써 교통정책 결정에 유용한 정보를 정책 의사결정자에게 제공하고자 하는 것이 모형 구축의 궁극적 목적일 것이다. 이와 같은 교통수요모형을 구축하는 방법에는 크게 2가지 모형구조 접근방법으로 구분할 수 있다. 그 하나는 통행자의 통행결정을 모두 동시에 상호영향을 고려하며 하나의 모형에서 설명하고자 하는 방법인 직접수요 모형구조(Direct approach) 형태의 모형이 있다. 다른 하나는 직접수요모형이 현실적으로 모든 통행결정을 동시에 고려한 모형으로 구축되는 것은 수학적으로 불가능하다고 판단하고 통행빈도를 결정하는 통행발생모형, 목적지 결정을 하는 통행분포모형, 교통수단을 결정하는 교통수단선택모형, 그리고 주행할 노선을 결정하는 노선배정모형 등 각 통행자의 통행관련 결정이 순차적으로 단계별로 이루어진다고 가정하고 단계별로 교통수요모형을 구축한 순차적 모형구조(Sequential approach)가 있다. 이 논문에서는 도시교통분석에서 세계적으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 순차적 모형구조 형식인 정통적 교통수요 4단계 분석을 기본으로 하여 통행발생, 통행분포 및 교통수단선택 분석단계에 대해 실용적 응용 측면에서 모형 정산과 예측 방법에 대해 구체적으로 설명하고자 한다. 이와 같은 교통수요모형 정산과 예측 방법에 있어 학자 및 실무분석가에 따라 약간의 의견 차이는

있을 수는 있겠지만 본 글에서는 저자가 판단하기에 가장 논리적인 분석 과정이라고 고려되는 분석 방법론을 설명하였다.

III. 통행발생 모형정산과 예측

1. 통행발생 모형의 정산

폐쇄선(cordon line)으로 경계가 지워지는 분석대상의 도시지역 내(study area)에서의 가구통행실태 조사 자료는 연구대상지역의 내부간통행(internal-internal trip), 내부-외부통행(internal-external trip)에 대한 통행패턴을 파악하는데 활용되며 분석대상의 도시에 가장 많은 통행수를 차지하고 있는 것이 일반적이다. 따라서 이 통행패턴을 정확하게 파악하는데 많은 노력이 투입되는 것이 바람직하다. 그리고 외부-내부통행(external-internal trip)과 통과통행(external-external trip, through trip)의 경우는 외곽존(external zone)을 통행생성존(Production zone)으로 하는 통행발생량을 폐쇄선 조사(cordon line survey)를 통해 추정하게 되는데 자료의 제약성으로 통행발생량을 집약적이고 대략적 방법으로 분석하는 것이 일반적이다.

가구통행실태 조사에서 조사된 자료는 일반적으로 가구단위로 자료가 구축되고 이 자료를 기초로 하여 가구단위의 개별 자료를 이용한 회귀분석을 통해 통행생성(trip production) 모형을 구축하는 것이 교통존 기반(zonal-based)의 통행생성 모형보다 이론적으로 우수하다는 것은 이미 학계에 알려진 사실이다. 하지만 우리나라에서는 조사 자료에서 전수화 작업(expansion)을 통해 얻은 O/D표(P/A 표 이용이 이론적으로 우수한 것으로 알려져 있으나 아직 우리나라에서는 O/D자료를 이용하여 통행발생 모형을 정산하는 것이 대부분 임)를 이용한 교통존별 총량 기준의 통행유입 및 통행유출 모형을 정산하는 방법을 아직도 보편적으로 사용하고 있는 것이 현실이다. 교통존 기반이더라도 가정단위의 평균값을 적용하는 교통존 기반 trip-rate 모형이 개별자료(disaggregate data)보다는 이론적으로 문제점은 있지만 그래도 교통존 기반 trip-total 모형보다는 우수하며, 이 모형도 우리나라에서는 거의 적용

되고 있지 않는 것이 현실이다. 본 글에서는 이론적으로 우수하다고 학계에서 알려져 있으며, 이미 선진 외국에서는 실무에서 보편적으로 적용되고 있는 가구 단위의 개별 자료를 활용한 통행생성 모형 정산과 예측의 방법에 대해 서술하고자 한다. 반면에 통행유인 모형(Trip Attraction model)의 경우에는 백화점, 회사, 공장 등 단위 시설별로 개별적 자료를 구하기가 어려우며, 너무나 다양한 교통 유인시설에 대해 종류별로 모두 조사한다는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에 보통 가구통행 실태조사를 기반으로 전수화하여 구축된 P/A 표에서 통행유인량(Attraction)과 존의 사회경제지표와의 상관관계를 찾는 존 기반의 총량 값인 trip-total 모형 정산 방법이 보통 적용되고 있음은 인식할 필요가 있다. 여기서 용어의 명확한 이해를 돕기 위해 용어를 우선 정의하고자 한다. 가정기반통행(Home-based trip)은 “출발지나 도착지 중 어느 한쪽에 가정이 위치한 통행”이라 정의할 수 있으며, 비가정기반통행(Nonhome-based trip)은 “출발지와 도착지 중 어느 곳도 가정과 연관이 안 되는 통행”이라 정의할 수가 있다. 통행생성량(Production)은 “가정기반 통행의 경우 가정의 쪽에서 통행수를 센 통행량 또는 비가정기반 통행의 경우는 출발점에서 통행수를 센 통행량”으로 정의할 수가 있으며, 통행유인량(Attraction)은 “가정기반 통행의 경우 가정이 아닌 다른 쪽에서 통행수를 센 통행량 또는 비가정기반 통행의 경우는 도착점에서 통행수를 센 통행량”으로 정의할 수 있다. 이와 같은 정의를 가지고 설정한 전형적인 통행발생 모형 정산을 위한 수식의 예는 아래와 같다.

통행목적별 통행생성 모형의 예 :

$$P_h^c = \beta_0^c + \beta_1^c I_h + \beta_2^c M_h + \beta_3^c C_h \quad (1)$$

통행목적별 통행유인 모형의 예 :

$$A_j^c = \alpha_0^c + \alpha_1^c E_j + \alpha_2^c S_j + \alpha_3^c H_j \quad (2)$$

여기서 A_j^c : 교통존 j의 통행목적 c의 총 통행유인량

c : 가정기반 출퇴근통행(HBW), 가정기반 쇼핑(HBS), 가정기반 기타(HBO), 비가정기반(NHB) 등과 같은 통행

목적 index 코드

- C_h : 가정 h의 차량보유 대수
- E_j : 교통존 j의 고용자 수
- h : 조사된 가구의 index 코드
- H_j : 교통존 j 내의 총 가구 수
- I_h : 가정 h의 월 가구 소득
- j : 교통존 코드
- M_h : 가정 h의 가족 수
- F_h^c : 가정 h의 통행목적 c의 통행생성량
- S_j : 교통존 j의 주택 외 건물바닥면적의 총합

위 식(1)에서 볼 수 있는 것과 같이 통행생성량 및 기타 독립변수의 값이 가구 단위의 개별 자료가 입력 자료로 사용되었음을 알 수가 있다. 또한 각 통행목적별로 별도의 모형 식을 구축하고 있음을 수식은 표현하고 있다. 반면에 식(2)에서는 통행유인량 및 독립변수 모두가 교통존에 대한 총량적 자료가 입력 자료로 사용되었음을 알 수 있으며, 통행생성 모형과 마찬가지로 동일한 통행목적 분류 c를 똑같이 적용하고 있음을 표현하고 있다. 본 글에서는 대략적 분석 보다는 좀 정교한 분석이 요구되는 경우에 적용하는 입력 자료의 형태와 회귀분석 방법에 의한 모형 정산방법을 서술한 것이다. 그렇지만 외곽존(external zone)의 통행생성과 통행유인에 대한 예측의 경우에는 성장률법과 같은 대략적 방법으로 밖에 이루어질 수 없으므로 모형 정산과정에서도 외곽존의 과거 자료를 활용한 성장률 패턴 및 개발계획을 파악하여 놓아야 할 것이다.

2. 통행발생 예측

통행발생 모형정산 과정에서는 개별 조사 자료가 있으므로 가구단위의 개별 자료를 이용한 분석이 가능하였으나, 예측 시에는 개별 가정마다 예측이 불가능하므로 존별 집합적 총량 또는 평균값을 예측하여 정산된 통행생성 모형과 통행유인 모형에 입력하여 통행발생량을 예측할 수밖에 없게

된다. 그 결과 개별 자료에 구축된 모형에 Naive approach 예측방법을 적용하여 존 단위의 평균값을 적용할 경우 집합화 오차(aggregation error)가 발생할 수가 있다. 선형 관계의 함수를 적용할 경우는 Jansen's inequality 문제가 발생하지 않으나 비선형적 관계를 변수 transformation을 통해 선형화하여 회귀분석에 평균값을 적용할 경우 Jansen's inequality 문제가 생겨 집합화 오차가 발생하게 된다. 이와 같은 집합화 오차를 줄이기 위한 예측 방법으로 classification approach, sampling approach 등의 방법이 있을 수 있는데 그 중 classification에 의한 방법을 설명하고자 한다. 이 방법으로 통행생성을 예측하는 수식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_g = \beta_0^c + \beta_1^c I_g + \beta_2^c M_g + \beta_3^c C_g \quad (3)$$

$$P_i^c = \sum_{g=1}^G NH_{ig} \times P_g \quad (4)$$

- 여기서 P_g : 가정특성 분류 그룹 g의 가구당 평균 통행생성량
- P_i^c : 존 i에 대한 통행목적 c의 예측 통행생성량
- NH_{ig} : 존 i의 가정특성 분류 그룹 g에 해당하는 가정의 수
- I_g, M_g, C_g : 가정특성 분류 그룹 g에 대한 평균 소득, 평균 가족수 및 평균 차량보유대수에 대한 예측 값

독립변수에 대한 예측의 가능성에 따라 적합하게 가정특성을 $g=1, \dots, G$ 까지 분류하여 예측하면 되고, 분류가 어려울 경우에는 $G=1$ 로 하여 하나의 평균값을 적용하는 Naive approach를 적용할 수도 있을 것이다. 하지만 통행 유인량 예측의 경우에는 정산 시의 입력변수가 모두 교통존 단위의 총량으로 모형이 정산되었으므로 예측 시에도 총량단위로 그대로 예측된 독립변수 값을 넣고 직접 각 존의 통행유인량을 예측하면 될 것이다. 이렇게 예측된 통행목적별 총 통행생성량과 총 통행유인량은 이론적으로 동일한 값이 되어야 하나 각각 별도의 모형에 의해 예측되었기 때문에 예측된 통행생성량과 통행유인량의 총합은 다르게 된다. 따라서 두 값을 동일하게 조정

하는 과정이 필요한데 일반적으로 예측이 상대적으로 정확한 쪽을 기준으로 다른 쪽을 수정하고 있다. 즉 통행생성량이 보통 더 정확하다고 보기 때문에 통행생성량을 기준으로 통행유인량을 일반적으로 아래 식과 같이 조정하고 있다.

$$A_j^{c*} = A_j^c \times \frac{\sum_{i=1}^I P_i^c}{\sum_{j=1}^I A_j^c} \quad (5)$$

하지만 통학목적의 통행과 같이 각 가정에서의 학생 수 예측보다는 학교에서의 학생 수가 더욱 정확하게 예측될 수 있는 경우에는 통행유인량을 기준으로 통행생성량을 조정하기도 한다.

IV. 통행분포 모형정산과 예측

1. 통행분포 모형의 정산

통행분포 모형의 정산은 통행발생 모형과는 달리 집합적인 통행의 공간적 분포패턴을 현실적 패턴과 유사하게 설명할 수 있는 모형형태와 계수 값을 찾게 된다. 학계 연구에서는 개별 자료에 의한 통행 목적지 선정에 관한 연구는 있지만 현재 실무에서 대부분 적용하고 있는 집합적인 통행공간분포 패턴에 관한 모형에 국한하여 설명하도록 하겠다. 실무적 차원에서 좀 더 구체적으로 설명하면 가구실태 조사 자료의 표본 P/A표와 사회경제지표를 이용하여 추정된 전수화 P/A표를 이용하여 일반적으로 중력모형(Gravity model) 형태로 통행목적별 저항함수(impedance function) 식을 설정하고, 그 함수의 계수 값을 추정하거나 Friction factor 값을 추정하는 과정을 거치게 된다. 중력모형 외의 엔트로피 모형(Entropy model) 및 기회간섭모형(intervening opportunity model)의 경우는 모형 태생의 차이로 인한 해석적 측면에서는 차이가 있으나 최종적인 수학적 식 형태는 동일하므로 이 논문에서는 가장 보편적인 중력모형에 대한 설명으로 국한하기로

한다. 성장률법에 해당되는 모형들(Growth factor models)은 모형 정산 과정이 필요 없는 모형이므로 정산 과정에 대해 설명할 필요가 없다.

중력모형을 정산하는 방법에는 크게 2가지 방법이 있을 수가 있다. 그 하나는 P/A간 통행시간을 일정 시간간격(예:1분)으로 나누고 각 통행시간 구간별로 각각의 F-factor(friction factor) 값을 통행목적별로 구하는 방법이다. 다른 하나는 F-factor의 값을 P/A간 통행시간의 연속함수로서 하나의 수식으로 표현한 저항함수(impedance function)를 통행목적별로 적용하는 방법이다. 이와 같은 중력모형 정산방법은 잘 알려진 방법으로 상세한 설명은 생략하도록 한다. 다만 교통존 크기 및 통행목적에 따라 조사 P/A를 가장 잘 설명할 수 있는 적합한 저항함수 형태와 함수의 계수 값을 찾아내는데 세심한 분석이 필요함을 강조하고자 한다. 조사된 전수화 P/A 표에서 F-factor 값을 찾는 경우는 시간 간격별로 별도의 F-factor 값을 찾게 되므로 특정한 함수형태를 가정할 필요가 없고, 시간 간격별로 가장 잘 설명하도록 어떠한 값이라도 갖게 되어 조사된 P/A 분포패턴을 잘 표현할 수 있다는 장점을 갖게 된다. 하지만 중력모형의 기본적 가정인 "P/A 통행량은 통행생성(trip production)과 통행유인(trip attraction)에 비례하며 통행저항에 반비례 한다"라는 원칙 외에 복잡한 다른 사회경제적 요인이 그 값에 간접적으로 포함되어 값이 설정된 것이라고 해석할 수가 있다. 따라서 전체적인 F-factor 값 변화 경향이 특정 통행시간 간격에서 돌출적인 값을 가질 수도 있어, 장기적인 예측에서 그와 같은 사회경제적 요인이 없다면 모형의 예측 능력이 매우 떨어질 수 있다는 가능성이 있음을 인식할 필요는 있다. 따라서 일부 분석가들은 F-factor에 의한 중력모형 정산을 할 경우 특정 저항함수를 이용한 선형회귀분석을 하여 돌출부가 없는 연속 함수형태로 바꾸는 smoothing 과정을 거쳐 새롭게 구한 저항함수를 예측 과정에 적용하는 경우도 있다.

직접적으로 저항함수를 이용하여 중력모형을 정산할 경우는 일반적으로 통행목적별로 아래의 3가지 저항함수 형태 중에 통행패턴 설명이 잘되는 하나를 선택하여 정산에 이용하고 있다.

$$\text{power function : } F^c(C_{ij}) = (C_{ij})^{-\beta} \tag{6}$$

$$\text{exponential function : } F^c(C_{ij}) = \alpha e^{-\beta C_{ij}} \quad (7)$$

$$\text{modified gamma function : } F^c(C_{ij}) = \alpha (C_{ij})^\gamma e^{-\beta C_{ij}} \quad (8)$$

여기서 C_{ij} : 통행생성존 i에서 통행유인존 j에 이르는 일반비용
혹은 통행시간

$F^c(C_{ij})$: 일반비용이 C_{ij} 인 존 i와 j 간 통행목적 c의 friction
함수 값

α, β, γ : 계수

위의 3가지 저항함수 중 power function 형태는 계수가 하나 밖에 없어 line search 방법에 의해 쉽게 구할 수 있으나 exponential 및 gamma function 형태는 여러 개의 계수가 있어 계수 값 추정이 쉽지 않다. 따라서 일반적으로 F-factor 값을 여러 통행시간 구간에 대해 구한 후에 exponential 또는 gamma function의 양변에 로그 값으로 변수 전환(transformation)한 후 선형회귀분석을 통해 계수 값을 추정하고 있다. 이렇게 통행목적별로 가장 적절한 중력모형의 F-factor 값 혹은 저항함수의 계수 값을 이용하여 통행분포 예측에 활용하게 된다.

2. 통행분포 예측

통행발생 분석단계에서 예측된 통행목적별 통행생성량(P_i^c)과 통행유인량(A_j^c)을 입력 자료로 하고, 조사 자료로부터 정산된 중력모형과 계수 값을 적용하여 단순히 계산하면 중력모형에 의한 예측 PA_{ij}^c 를 얻을 수 있다. 성장률법을 적용할 경우에는 조사 자료에서 전수화하여 얻은 기준년도의 P/A표와 통행발생 단계에서 예측된 P_i^c 와 A_j^c 를 적용하여 통행생성량의 성장률과(또는) 통행유인량의 성장률을 만족시키는 예측 PA_{ij}^c 를 계산하게 된다. 그 계산방법에 대한 설명은 생략하도록 하고 다만 수학적 수식만 정리하고자 한다.

$$\text{중력모형에 의한 예측 : } PA_{ij}^c = \alpha_i \beta_j P_i^c A_j^c F^c(C_{ij}) \quad (9)$$

$$\text{성장률법에 의한 예측} : PA_{ij}^{c(t+1)} = \tau(g_i^c, g_j^c) \times PA_{ij}^{c(t)} \quad (10)$$

- 여기서 $PA_{ij}^{c(t)}$: t년도의 통행생성존 i와 통행유인존 j 사이의 PA 통행량
- α_i : 통행생성존 i를 기준으로 하는 balancing factor
- β_j : 통행유인존 j를 기준으로 하는 balancing factor
- $\tau(g_i^c, g_j^c)$: 통행목적 c에 대한 통행생성존 i의 통행생성 성장률 g_i^c 와(또는) 통행유인존 j의 통행유인 성장률 g_j^c 을 반영한 PA_{ij}^c 의 growth factor

통행분포의 예측은 집합적 개념에서 모형 정산을 한 후 직접 집합적인 공간적 통행패턴을 예측하는 것으로 수학적인 단순 계산 외에는 특별히 주의할 내용은 없다고 보인다. 다만 예측 시에 각 도시의 토지이용의 변화 및 교통체계의 변화 정도에 따라 적절한 모형을 선택하는 것이 중요하다고 고려된다.

V. 교통수단선택 모형정산과 예측

1. 교통수단 부담률 분석방법 제안

교통수단 부담률 분석을 위해 과거에는 전환곡선(Diversion curve)을 이용하여 교통 수단분할(modal split) 분석이 이루어졌었지만, 이산선택 모형이 교통 수단선택(mode choice) 분석에 응용되면서 대부분의 교통수단 선택 분석이 이산선택모형들 중 대표적 모형인 로짓모형(LOGIT: LOGistic probability unIT)을 이용하여 모형정산이 이루어지고, 그 결과로써 예측모형으로 활용되고 있다. 이산선택모형 중에 프로빗모형(PROBIT: normal PROBibility unIT)은 확률변수(random variable)간의 상호관계를 통계적으로 반영할 수 있어 이론적으로는 우수하나 확률함수의 적분을 단순화시킬 수가 없어 정산과 계산이 어려워 현실 정책분석에 응용이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 반면에 로짓모형은 확률변수가 IID(Independently and

Identically Distributed) Gumbel 분포를 갖는다는 가정 하에 함수식에 적분이 포함되지 않고 간단한 수학적식으로 선택확률을 계산할 수가 있어 계산상의 용이성이라는 장점을 갖고 있다. 하지만 이와 같은 확률변수가 독립적이고 동일한 분포를 가지고 있다는 가정으로 인해 '비관련대안으로부터의 독립성(IIA, Independence from Irrelevant Alternatives)'이라는 특성을 갖게 되어, 이 특성과 일치하지 않는 통행 선택행태 현상에 대해서는 왜곡된 분석결과를 제공하게 되는 단점을 갖고 있다. 이 논문에서는 현실적 정책분석에 초점을 두고 있으므로 모형정산과 계산의 용이성에 장점이 많은 로짓모형에 초점을 두고 논의하고자 한다. 다만 모형정산 과정 중에 로짓모형의 효용함수 구축(model specification)과 계수 값 추정(parameter estimation)에 대해서는 Ben-Akiva(1985)의 제7장에 설명이 잘 되어 있으므로 통계적 분석기법과 해석에 대한 논의는 생략하도록 한다. 우선 이 논문에서 제안하고자 하는 교통수요 분담률 분석의 방법론에 대해 각 단계별로 설명하고자 한다.

교통수단선택 분석과정에서 중요한 관점 중의 하나는 통행발생과 통행분포까지 적용되었던 P/A 개념의 통행단과 교통존간 통행량 패턴을 방향성을 갖는 O/D 개념의 교통존간 통행량 패턴으로 어떤 단계에서 어떤 방법으로 전환을 할 것인가에 대한 문제이다. 이와 같은 방법론이 결정되어야 만이 그 방법에 따른 모형정산이 적합하게 수행되고 예측시의 방법과 일치되어 일관된 분석이 가능하기 때문이다. 예를 들어 승용차와 대중교통의 선택에 있어 가정기반통행의 경우 왕복통행의 서비스수준을 비교하여 교통수단을 선택하게 될 것으로 추측되므로 각 통행의 방향별로 분석되기 보다는 왕복통행에 대해 분석되는 것이 옳다고 보인다. 즉 P/A개념의 통행패턴을 가지고 교통수단선택 분석이 가능하다고 보인다. 하지만 일단 대중교통을 이용하기로 결정하였다면 각 통행방향별로 다른 대안 대중교통수단을 선택할 수 있으므로 방향성이 중요할 수가 있다. 따라서 이 경우는 P/A 개념의 통행패턴 자료보다는 O/D개념의 통행패턴 자료가 더 적합할 수가 있다고 고려된다. 본 논문에서는 P/A통행량에서 O/D통행량으로 전환하는 분석과정의 단계와 관련지으면서 대중교통 의존승객(transit captive rider)의 통행과 선택적 통행자(choice rider)의 통행을 구분하는 통행단 교통수단분할(trip-end modal split) 분석(1단계 분석), 승용차와 집합적 대중교통 대

안(composit transit alternative)으로써의 대중교통의 분담률을 계산하는 단계(2단계 분석), 그리고 앞 단계 결과인 집합적 대중교통에 대해 각 대중교통수단별 분담률을 계산하는 단계(3단계 분석)로 구성된 3단계 위계 구조(Hierarchical structure)의 분석방법을 제안하고자 한다.

제안된 교통수단분담률 분석은 대중교통 의존통행자와 선택적 통행자를 구분하여 고정적인 대중교통 통행을 분리하는 통행단 교통수단분할(trip-end modal split) 분석으로부터 1단계 분석이 이루어지게 된다. 일반적으로 통행단 교통수단분할 분석은 통행발생 분석단계 바로 다음에 이루어지는 경우가 많이 있다. 즉 통행생성존(production zone)에서의 가정(household)의 경제사회지표 자료의 활용이 가능한 단계에서 대중교통 의존통행을 우선 분리시키는 의미가 있다. 모형의 단순성을 위해 선택적 통행자와 대중교통 의존통행자의 평균 통행발생량이 동일하다는 전제 하에 본 연구에서 제시한 아래의 수식은 통행발생 분석단계 바로 다음에 적용하여 대중교통 고정승객의 통행발생량을 계산하는 수식의 예제이다. 대중교통 고정승객의 통행량을 구분하는 통행단 교통수단분할에 관한 연구가 많지 않은 관계로 본 연구에서는 논리적 수식만을 제공한 것이기 때문에 현실 관측실험 연구의 결과에 따라 다른 수식을 적용할 수도 있을 것이다.

$$R_{iP}^{TC} = 1 - \frac{Near_i \times Occ}{Pop_i} \tag{11}$$

$$R_{jA}^{TC} = 1 - \frac{Park_j \times Occ \times Turn}{\sum_c A_{jc}} \tag{12}$$

$$P_{ic}^{TC} = P_{ic} \times R_{iP}^{TC} \tag{13}$$

$$a_{jc}^{TC} = A_{jc} \times R_{jA}^{TC} \tag{14}$$

$$A_{jc}^{TC} = a_{jc}^{TC} \times \frac{\sum_i P_{ic}^{TC}}{\sum_j a_{jc}^{TC}} \tag{15}$$

여기서 A_{jc} : 교통존 j의 통행목적 c의 총 통행유인량(Attraction)

- A_{jc}^{TC} : 교통존 j의 통행목적 c의 대중교통 의존통행 유인량
 a_{jc}^{TC} : A_{jc}^{TC} 를 구하기 위한 임시적 값
 $Ncar_i$: 교통존 i의 등록된 승용차 차량등록 대수
 Occ : 연구 대상지역의 평균 승용차 재차인원
 P_c : 교통존 i의 통행목적 c의 총 통행생성량(Production)
 P_{ic}^{TC} : 교통존 i의 통행목적 c의 대중교통 의존통행 생성량
 $Park_j$: 교통존 j의 활용 가능한 주차면의 총 수
 Pop_i : 교통존 i의 활동 인구수
 R_{iP}^{TC} : 통행생성존 i에서 발생통행량 중에 대중교통 의존통행의 비율
 R_{jA}^{TC} : 통행유인존 j에서 발생통행량 중에 대중교통 의존통행의 비율
 $Turn$: 하루 기준으로 주차장의 평균 이용회전 횟수

위에서의 분석결과를 받아서 대중교통의 존간 통행시간과 승용차의 존간 통행시간을 별도로 적용하여 대중교통 의존 사람통행(person trip)의 통행 분포 분석과 선택적 통행자의 사람통행(person trip)의 통행분포 분석을 별도로 하여 통행목적별 선택적 통행자의 P/A 통행량(PA_{ijc}^{CR})과 대중교통 의존통행의 P/A 통행량(PA_{ijc}^{TC})을 구하는 분석이 수행되어지게 된다. 그리고 그 결과를 받아서 교통수단선택 분석단계에서 선택적 통행자의 통행 P/A 자료를 이용하여 승용차와 집합적 개념의 대중교통의 선택행태 분석인 2단계 분석이 이루어지게 된다. 이항로짓모형(Binomial Logit model)이 적용되는 경우는 다음과 같은 수식으로 표현할 수가 있다.

$$pa_{ijc}^{TR} = PA_{ijc}^{CR} \times \frac{\exp(V_{ijc}^{TR})}{\exp(V_{ijc}^{car}) + \exp(V_{ijc}^{TR})} \quad (16)$$

$$PA_{ijc}^{TR} = pa_{ijc}^{TR} + PA_{ijc}^{TC} \quad (17)$$

$$PA_{ijc}^{car} = PA_{ijc}^{CR} \times \frac{\exp(V_{ijc}^{car})}{\exp(V_{ijc}^{car}) + \exp(V_{ijc}^{TR})} \quad (18)$$

- 여기서 PA_{ijc}^{CR} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c의 선택적 통행자의 PA 통행량
 PA_{ijc}^{TC} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c의 대중교통 의존 PA 통행량
 PA_{ijc}^{car} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c의 승용차 이용 PA 통행량
 pa_{ijc}^{TR} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c의 선택적 통행자 중 대중교통을 선택한 PA 통행량
 PA_{ijc}^{TR} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c의 총 대중교통 PA 통행량
 V_{ijc}^{nr} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c 왕복통행에 있어 승용차 이용 시의 효용함수 값
 V_{ijc}^{TR} : 통행생성존 i와 통행유인존 j의 목적통행 c 왕복통행에 있어 이용 가능한 모든 대중교통 수단 중 최대 효용의 기대값

2단계 분석 결과에서 승용차 이용 P/A통행량은 노선배정 분석을 위해서는 방향성이 필요하게 되므로 승용차 P/A를 승용차 O/D로 전환하여야 한다. 이때 주의할 점은 현재까지의 P/A와 O/D는 사람통행(person trip) 단위이기 때문에 승용차의 평균 재차인원(occupancy rate)을 이용하여 사람통행에서 차량통행(vehicle trip, PCU 단위)의 O/D로 전환하여야 한다. 승용차 P/A에서 O/D로 그리고 pcu 단위의 O/D로 전환되는 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$OD_{ijc}^{car} = \lambda_{ijc}^{car} PA_{ijc}^{car} + (1 - \lambda_{ijc}^{car}) PA_{ijc}^{car} \quad (19)$$

$$OD_{ijc}^{car(pcu)} = OD_{ijc}^{car} \times Occ_c^{car} \quad (20)$$

- 여기서 OD_{ijc}^{car} : 통행목적 c로 유출존(origin zone) i에서 유입존(destination zone) j으로 가는 승용차 이용의 사람통행량(person trip)

- $OD_{ijc}^{car(pcu)}$: 통행목적 c로 유출존(origin zone) i에서 유입존(destination zone) j으로 가는 승용차 단위(pcu)의 교통량(승용차 1대 = 1 pcu)
- Occ_c^{car} : 통행목적 c의 경우 승용차의 평균 재차인원
- λ_{ijc}^{car} : 승용차 통행의 경우 생성존이 i이고 유입존이 j인 P/A 통행량 중에 유출존이 i이고 유입존이 j인 O/D 통행량이 차지하는 평균 비율

대중교통 수단선택 분석에서는 대중교통 선택 P/A 통행량과 통행단 분석의 결과인 대중교통 의존승객 P/A 통행량을 식(20)과 같이 합하여 전체 대중교통 P/A 통행량을 구하게 된다. 본 연구에서 제시한 방법에 따르면 방향별로 대중교통수단 선택이 다를 수 있다는 논리에 의해 P/A 통행량을 방향성 특성을 갖는 O/D 통행량으로 전환하는 단계를 거치게 된다. 즉 다음 수식과 같이 O/D 통행량으로 전환하면 된다.

$$OD_{ijc}^{TR} = \lambda_{ijc}^{TR} PA_{ijc}^{TR} + (1 - \lambda_{ijc}^{TR}) PA_{jic}^{TR} \quad (21)$$

이렇게 계산된 총 대중교통 O/D 통행량을 가지고 각 대중교통 수단별 선택행태 분석과정을 거치면서 3단계 분석 모두가 완료되어진다. 로짓모형에 의한 대중교통 수단별 O/D 통행량은 아래와 같이 계산하면 된다.

$$OD_{ijc}^{TR(m)} = OD_{ijc}^{TR} \times \frac{\exp(V_{ijc}^{TR(m)})}{\sum_{k=1}^K \exp(V_{ijc}^{TR(k)})} \quad (22)$$

- 여기서 $OD_{ijc}^{TR(m)}$: 통행목적 c로 대중교통 수단 m을 이용하여 유출존 i와 유입존 j의 O/D 통행량
- $V_{ijc}^{TR(k)}$: 유출존 i와 유입존 j의 목적통행 c 편도통행에 있어 대중교통수단 k의 효용함수 값

이상에서 설명한 내용이 본 논문에서 제안한 교통수단 분담률 분석 방법론에 따른 단계별 분석과정이다.

2. 교통수단선택모형 정산

교통수단선택 모형의 정산과정도 통행발생 모형의 정산과 마찬가지로 존 기반의 집합자료(zonal-based aggregate data)가 아닌 개별 통행자 자료(disaggregated data)로 모형 정산을 하는 것이 이론적으로 더 우수하다. 통행발생모형에서는 자료의 단위가 가정(household)이었던 것에 반해 교통수단선택모형에서는 통행자 개인(individual traveler)의 각 개별 통행 단위의 자료가 사용되는 점에서 차이가 있다. 또한 통행발생모형의 경우 선형회귀분석이 많이 적용되어 변수의 변형(transformation)이 없는 한 선형적 관계를 가정으로 분석하여 집합화 오차(aggregation error)가 심각하지 않지만 로짓모형의 경우 비선형 모형인 관계로 집합화 오차에 대한 배려가 필요하다는 점에서 차이가 있다. 또한 교통수단선택 행태는 통행분포와는 달리 공간적 분산패턴을 파악하는 것이 아니고 통행발생모형과 같이 통행자의 행태를 파악하는 모형으로 표본자료의 수는 아주 많지 않아도 통행자의 선택 행태를 파악하는데 통계적으로 유의한 모형을 구할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이러한 점들을 고려할 때 교통수단선택 모형의 정산에 사용될 조사 자료는 각 통행자의 개별 통행 자료인 것이 이론적으로 바람직하다. 하지만 실무적 정책분석 차원에서 자료 취득의 한계성이 있을 경우 분석 결과의 해석에 주의하면서 존기반의 집합자료를 모형 정산에 사용하기도 한다.

로짓모형에 의한 교통수단선택모형 정산과정에서 기본적으로 가정하고 있는 것은 각 통행자들의 개별 통행에 대한 대안 교통수단집합을 알고 있다는 전제와 통행시간, 통행비용 등과 같은 모든 대안 교통수단의 속성들을 정확하게 조사되었다는 전제 하에서 분석이 되고 있다. 하지만 현실적으로는 각 통행자의 개별 통행에 대한 가능한 교통수단의 집합을 정확하게 조사되기가 쉽지 않다. 또한 통행자가 선택한 교통수단에 대한 서비스는 직접 경험을 한 것이므로 오차가 존재할 지라도 어느 정도 유사하게 설문 응답한 자료가 존재 할 수가 있으나 통행자가 선택하지 않은 대안 교통수단에 대해서는 그 서비스 속성을 정확하게 모르는 것이 일반적이다. 현재까지 대부분의 설문조사에서는 통행자가 선택한 교통수단의 속성에 대한 조사 항목이 있으나 선택되지 않은 교통수단에 대한 속성에 대한 조사항목이 없었던 것

이 일반적이다. 이와 같이 불완전한 조사 자료로써는 교통수단선택모형의 정산이 실질적으로 가능하지가 않다. 따라서 개별자료에 의한 교통수단선택모형 정산분석을 위해서는 조사단계에서부터 조사항목에 정산이 가능하도록 필수적인 조사항목이 누락되지 않게 철저히 설문조사 설계가 선행되어야 할 것이다. 하지만 만일 모든 대안 교통수단에 대한 속성자료가 조사되지 않았다면 부족한 조사항목을 대략적이거나 현실적 논리성에 맞게 추정하는 방법을 찾아서 오류의 가능성을 감수하고 모형정산 과정을 분석하는 수밖에 없을 것이다.

통행행태 자료조사의 한계로 특정 통행자의 특정한 위치의 출발점과 도착점에 대한 대중교통 대안의 집합과 각 대안 대중교통수단의 서비스 속성이 모두 조사되어 질 수 있다면 이와 같은 개별자료로 앞에서 설명한 승용차와 집합적 개념의 대중교통(composit transit alternative)을 선택하는 Binomial Logit model 정산을 위한 자료는 다 구할 수 있다. 즉 우선적으로 각 대중교통 수단을 선택하는 식(22)의 모형식 부터 정산을 하여 효용함수와 계수 값을 추정하고, 이 식을 이용하여 대중교통의 최대효용 기댓값(Inclusive value 혹은 Log-sum value)을 계산하여 식(16)과 식(18)의 모형식을 정산할 수가 있다.

3. 교통수단분담율의 예측

교통수단 분담율 예측에 있어서도 통행발생 단계에서의 통행생성량 예측의 경우와 마찬가지로 분석의 어려움이 있다. 즉 교통수단선택 모형정산 시에는 조사된 개별자료가 입력자료로 이용될 수 있으나, 예측 시에는 개별자료로써의 예측이 불가능하다. 그러므로 집합화 예측이 불가피한데 이 경우 로짓모형의 경우 통행발생의 선형회귀분석과는 달리 로짓모형이 비선형함수이므로 집합화 오차(aggregation error)의 문제가 더 심각하게 된다. 따라서 우리나라에서 현재까지 가장 보편적으로 적용하는 O/D 쌍별로 평균적 통행자 속성이 입력하여 예측하는 Naive approach 방법은 예측 상의 오류가 발생할 확률이 높은 것이다. 따라서 본 논문에서는 통행발생 예측의 경우와 같이 집합화 오차의 규모를 최소화하기 위해 classification에

의한 방법을 제시하고자 한다. 즉 통행자 특성별로 그룹을 $g=1, \dots, G$ 까지 분류하고 각 그룹별로 별도 예측한 후에 모든 그룹의 교통수단별 통행량을 합하여 총 교통수단별 통행량을 예측하는 방법을 제안하고자 한다.

본 논문에서 제안한 3단계 위계구조(Hierarchical structure)의 교통수단 분담률 분석방법에 의해 예측하기 위해서는 각각 다음과 같은 분석 과정이 이루어질 것이다. 1단계인 통행단 교통수단분할 분석은 통행발생 분석단계 바로 다음에 통행자의 사회경제지표에 따라 모형을 적용하면 쉽게 대중교통 의존승객(transit captive rider)의 통행과 선택적 통행자(choice rider)의 통행량을 구할 수 있을 것으로 고려된다. 네스티드 로짓모형(Nested Logit model) 적용에 따른 예측과정인 2단계(네스티드 로짓의 상위 구조)와 3단계(네스티드 로짓의 하위 구조)에 해당하는 분석은 동시에 분석이 수행되어야 할 것이다. 즉 하위구조인 대중교통 수단 간의 선택모형에 장래 수단별 서비스 수준과 통행자 그룹별 속성자료를 입력하여 상위구조의 집합적 개념의 대중교통대안(composit transit alternative)에 대한 최대효용 기댓값인 Inclusive value의 값을 해당 수식에 따라 계산하여 구하여 네스티드 로짓모형에 적용함으로써 모든 교통수단에 대한 분담률을 예측할 수 있게 된다. 혹은 네스티드 로짓의 하위구조에 대해서는 별도로 모든 대중교통수단의 노선이 포함된 통합대중교통망을 이용한 대중교통 노선배정(transit assignment) 분석을 수행함으로써 환승 교통수단 각 개별 수요까지 분석이 가능한 교통수단분담과 대중교통 노선의 각 구간별, 정류장 승차차별 수요를 파악할 수 있는 노선배정을 동시에 분석하는 방법을 적용할 수도 있을 것이다.

이상에서 구한 통행목적별 수단별 O/D 통행량이 예측되면 수단별 O/D로 통합한 후에 승용차 및 택시의 경우는 재차인원을 반영하여 사람통행(person trip)에서 차량통행(vehicle trip)으로 전환하여 버스와 트럭 통행량을 반영하면서 도로 노선배정(Highway Traffic Assignment) 분석을 수행하고, 대중교통의 경우는 사람통행(person trip) 단위로 대중교통 노선배정(Transit Assignment) 분석을 수행하면 모든 교통수요 4단계 예측분석이 완료되는 것이다.

VI. 결론

기존의 교통관련 참고 서적이거나 실무 보고서에서 각 분석 단계별 모형의 종류와 정산방법 그리고 예측방법에 대해서는 설명이 되어 있으나, 한 단계에서 다음 단계로 진행되면서 입력자료 및 출력자료의 구체적 구축 과정에 대한 설명은 매우 부족하다. 따라서 본 논문에서는 전통적 교통수요 4단계 분석 과정 중에 통행발생, 통행분포 및 교통수단선택 분석 단계의 모형정산과 예측 분석을 가능한 상세하게 설명하고, 앞 분석단계 분석결과와 출력자료가 다음 단계에 입력되는 형태 등과 같이 분석 단계별로 넘어가는 분석 흐름을 구체적이고 명확하게 정리하고자 노력하였다. 특히 현재 우리나라의 교통 실무분석에서 O/D통행과 P/A통행의 개념을 명확하게 도입해가는 과정에서 각 수요분석 단계 중에 어떤 개념의 통행이 적용되어야 할 것이며, P/A통행에서 O/D통행으로 전환은 어느 단계에서 이루어지는 것이 바람직한 것인지 그리고 어떻게 계산되는 것인지에 대해 좀 더 명확하게 설명하고자 하였다. 또한 모형정산 과정에서의 입력 자료 형태가 개별 자료 형태인 경우와 교통존 단위의 집합적 자료 형태인 경우의 이론적 적합성에 대한 명확한 논의가 이루어졌으며, 예측 시에의 집합적 오차의 규모를 가능한 최소화하기 위해 Classification 방법을 적용하는 예측 기법을 구체적으로 제안하기도 하였다. 교통수단선택분석에 있어서는 현실적인 통행자의 행태를 가능한 유사하게 모형이 설명할 수 있도록 승용차와 집합적 개념의 대중교통수단 선택행태는 왕복 통행의 속성을 고려한 P/A기반의 선택모형을 제안하였으며, 대중교통수단 간의 선택행태는 편도 통행의 속성을 고려한 O/D기반의 선택모형을 제안하여 이 두 가지의 모형을 네스티드 로짓모형의 상위구조와 하위구조에서 동시에 반영하는 분석 방법도 제안하였다.