

접근성 지표를 도입한 중력모형의 2단계 정산기법 개발 및 적용

최성택 · 노정현*

한양대학교 도시대학원

Development and Implementation of a 2-Phase Calibration Method for Gravity Model Considering Accessibility

CHOI, Sung Taek · RHO, Jeong Hyun*

Graduate School of Urban & Real Estate, Hanyang University, 133-791, Korea

Abstract

Gravity model has had the major problem that the model explains the characteristics of travel behavior with only deterrence factors such as travel time or cost. In modern society, travel behavior can be affected not only deterrence factors but also zonal characteristics or transportation service. Therefore, those features have to be considered to estimate the future travel demand accurately. In this regard, there are two primary aims of this study: 1. to identify the characteristics of inter-zonal travel, 2. to develop the new type of calibration method. By employing accessibility variable which can explain the manifold pattern of trip, we define the zonal travel behavior newly. Furthermore, we suggest 2-phase calibration method, since existing calibration method cannot find the optimum solution when organizing the deterrence function with the new variables. The new method proceeds with 2 steps; step 1. estimating deterrence parameter, step 2. finding balancing factors. The validation results with RMSE, E-norm, C.R show that this study model explains the inter-zonal travel pattern adequately and estimate the O/D pairs precisely than existing gravity model. Especially, the problem with estimation of short distance trip is overcome. In conclusion, it is possible to draw the conclusion that this study suggests the possibility of improvement for trip distribution model.

기존의 중력모형은 통행비용 변수만으로 존 간 특성을 설명하기 때문에 많은 한계점을 갖게 된다. 현대 도시의 통행 패턴은 거리나 비용뿐만 아니라 존 별 특성과 교통인프라 수준 등의 영향을 받기 때문이다. 따라서 장래 통행을 합리적으로 추정하기 위해서는 이러한 특성을 고려한 모형이 개발되어야 한다. 본 연구는 이러한 관점에서 접근성 변수를 중력모형의 설명 변수로 도입하였다. 이와 함께 변수가 추가에 따른 2단계 정산기법을 제안하였다. 이는 통행저항함수의 계수를 회귀분석을 통해 우선 추정 한 뒤, 존별 균형인자를 순차적으로 추정하는 방법이다. RMSE, E-norm, C.R을 활용한 접근성을 도입한 중력 모형의 검증 결과, 기존의 중력모형보다 통행패턴의 구현 능력이 향상된 점을 확인하였다. 특히, 단거리 통행량 추정에 어려움을 겪은 기존 모형의 한계점을 해결하였다는 점이 주목할 만 하다. 결론적으로 본 연구는 새로운 중력모형의 정산기법을 제안함과 동시에 접근성 변수의 도입을 통해 존 간 특성을 구현하였다는 점에서 통행분포모형의 개선 가능성을 제시하였다.

Keywords

2-phase calibration, accessibility, extension of deterrence function, gravity model, inter-zonal travel characteristic
2단계 모형정산, 접근성, 저항함수 확장, 중력모형, 지역 간 통행 특성

* : Corresponding Author
jhrho@hanyang.ac.kr, Phone: +82-02-2299-0335, Fax: +82-02-2220-1214

Received 17 March 2015, Accepted 2 July 2015

서론

1. 연구의 배경 및 목적

장래 통행수요를 예측하는데 있어 일반적으로 활용되는 4단계 수요모형은 수요를 예측해 나가는 일련의 과정이 비교적 쉽고 간결하다는 장점이 있다(Rho, 2012). 이러한 4단계 과정의 두 번째 단계인 통행분포 모형은 첫 번째 단계의 모형인 통행발생 모형에서 추정된 각 출발 존(origin zone)의 총 유출량을 각 도착 존(destination zone)의 유입량에 맞게 배분하는 단계이다. 이렇게 배분된 각 존간 통행량은 수단분담 모형과 통행배정 모형을 통해 세분화된다. 따라서 선행 단계에서 추정된 교통량의 오차가 클 경우, 통행배정을 통해 얻게 되는 각 구간 별 교통량의 추정 오차는 더욱 커지게 된다. 그러므로 각 존별 통행량을 결정짓는 통행분포 단계는 매우 중요한 단계라 할 수 있다.

통행분포 모형 중에서 가장 일반적으로 활용되는 모형은 중력모형(gravity model)이다. 중력모형은 존간 교차통행량을 결정하기 위해 각 존의 유출량 및 유입량, 존 간의 통행저항요인(impedence factors) 등을 설명 변수(explanatory variable)로 활용한다(Ortuzar and Willumsen, 2011).

중력 모형은 존 간 통행량을 가장 합리적이고 쉽게 추정할 수 있다는 장점으로 인해 널리 활용되어져 왔다. 그러나 고밀 복합개발로 인한 토지 이용의 복합화, 광역 대도시권역의 고도성장, 도시 연담화¹⁾ 등으로 인해 존 간 통행거리로 설명되던 기존의 정형화된 통행 패턴은 매우 복잡하며 예측 불가능한 방향으로 변화하게 되었다(Kim, 2006). 즉, 기존의 중력모형 구조로는 다양한 특성이 혼재되어 있는 현재의 존 간 통행을 설명하기 어려워지게 된 것이다. 따라서 합리적인 장래 교통수요 예측을 위해 통행 패턴의 변화를 설명할 수 있는 추가적인 독립변수의 투입이 요구된다.(Stopher and Meyburg, 1975)

그러나 이러한 요구에 부응하는데 있어 현재의 중력모형은 다음과 같은 두 가지 한계점을 갖고 있다. 첫째, 지역 간 통행 특성을 설명하고 존 간 교차 통행량을 추정하는 과정에 있어 통행저항 변수의 설명력이 높지 않다는 점이다. 2010년 KTDB에서 배포된 전국지역 간 통행량 자료를 활용해 중력모형을 정산한 연구 결과, 중력

모형의 설명력은 50% 수준에 못 미치는 것으로 나타났다(Park, 2014).

둘째, 모형의 설명력 보완을 위한 추가적인 변수의 투입 시, 통행 저항에 따른 교통량 변화의 민감도를 의미하는 통행저항 계수(β)의 추정은 현실적으로 불가능에 가까워진다. 따라서 저항 계수 및 존별 균형인자를 산출할 수 있는 새로운 정산 기법이 제안되지 않는 한, 변수의 투입에 따른 모형의 정산은 현실적으로 불가능에 가깝다.

본 연구는 이러한 점을 극복하기 위해 존 간 통행 특성을 설명할 수 있는 변수(이하 존 간 통행특성 변수)의 도입과 중력모형의 구조 및 모형의 해법을 함께 제시하였다. 여기서 존 간 통행특성 변수는 각 존별 접근성으로 보다 구체화될 수 있다. 이렇게 정의된 존 간 통행특성 변수는 1차적으로는 중력모형의 저항함수 구조 안에 내재화된다. 단, 변수의 추가로 인해 기존 정산기법의 적용이 불가능하기 때문에 이를 해결할 수 있는 중력모형의 새로운 정산 기법을 2차적으로 제안하였다. 새로운 정산 기법은 중력모형의 정산에 있어 가장 핵심적인 부분인 저항함수의 계수 추정에 중점을 두고 있으며 이 후 존별 균형인자를 추정하는 2단계 구조로 이루어진다.

따라서 본 연구에서 제안한 중력모형을 활용한다면 기존에는 불가능하였던 존 간 통행특성 변수의 도입과 모형의 정산이 가능해질 것으로 기대한다. 이로 인해 교통수요 추정 과정은 보다 정교해질 것이며 장래 교통수요에 대한 신뢰도 또한 향상될 수 있을 것이다.

2. 연구의 범위

1) 내용적 범위

본 연구는 기존연구 검토를 통한 착안점 도출, 중력모형의 2단계 정산기법 개발, 접근성 변수로 대표되는 존 간 특성변수를 도입한 통행 저항함수의 확장과 이를 활용한 중력모형의 개발, 결론 등의 내용을 포함하고 있다.

기존연구 검토는 중력모형 관련 연구를 연구 흐름에 따라 3단계로 나누어 검토하였다. 그 중에서 최근에 수행된 중력모형의 보완 및 개선에 관련된 연구를 집중적으로 검토하였다. 이를 통해 저항함수의 계수를 추정할 수 있는 2단계 정산기법 개발과 존 간 통행특성을 반영할 수 있는 변수의 도입이라는 연구의 착안점을 도출하

1) 근접한 몇 개의 도시가 성장하여 일련의 주거, 공업, 기타 상업 및 업무 등의 기능이 상호 연결되어 공간적으로 결합되어 가는 현상을 의미함

었다. 2단계 정산기법 개발은 중력모형의 핵심 변수인 저항함수의 계수를 추정하기 위한 새로운 기법을 개발하고 이를 검증하는 내용으로 구성된다. 존 간 특성변수를 도입한 중력모형수의 개발에서는 통행특성을 대표하는 변수를 검토한 뒤, 최종 선정된 변수의 도입을 통한 중력모형의 개발을 다루고 있다. 결론에서는 본 연구의 내용을 전반적으로 종합하고 각 단계별 연구 결과를 요약함과 동시에 본 연구가 갖는 의의와 시사점을 제시하였다. 이와 함께 향후 관련 연구의 방향을 개략적으로 제시하였다.

2) 시간적 · 공간적 범위

본 연구에 활용된 자료는 KTDB에서 공식적으로 배포한 2010년 전국지역간 O/D자료이다. 전국지역간 O/D 자료는 251개 전국 시 · 군 · 구 지역을 존 단위로 설정한 자료이다. 이는 수도권, 또는 광역권 O/D와 같이 국지적이며 세분화된 존 체계상에서의 통행보다는 시 · 군 · 구 단위의 중 · 장거리 통행에 초점을 맞추는 것이 본 연구의 목적에 부합된다는 점에 중점을 둔 결과이다.

단, 통행특성이 뚜렷하며 존 간 통행저항과 함께 다양한 존 간 통행특성이 개입될 가능성이 많은 업무, 여가, 출근 목적에 대해 분석을 수행하였다. 최종 분석 대상 지역은 전국 지역 시 · 군 · 구 251개 지역 중 지리적 특수성으로 인해 통행특성이 상이한 울릉도, 제주도를 제외한 248개 존을 선정하였다.

기존문헌 검토

1. 이론 및 실증분석

통행분포 단계의 가장 대표적인 모형인 중력모형은 연구 흐름에 따라 모형의 이론적 검증, 모형의 적용성, 모형의 보완 및 개선 등 3단계로 구분할 수 있다.

1단계는 중력모형이 소개되고 모형의 이론적 검증이 진행된 시기이다. 일반적인 중력모형의 형태와 다양한 정산기법 등을 소개하고(Stophor and Meyberg, 1975; Wong, 1981; Rho, 1991) 통행비용만으로 존 간 통행을 설명할 수 없다는 한계점을 제시하며 이러한 점은 사회 · 경제 현황의 변수화(K_{ij})를 통해 모형이 보완되어야 함을 주장하였다(Stophor and Meyberg, 1975).

2단계는 중력모형의 현실 구현 능력을 평가하기 위해

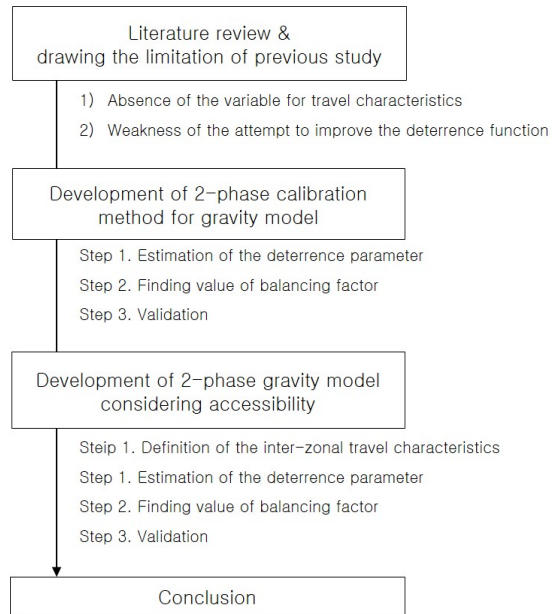


Figure 1. Flowchart of study

다양한 연구 대상 지역에 모형을 적용한 단계로 정의할 수 있다.

Sumi and Kuwahara(1983)은 일본의 히로시마, 오카야마 지역과 필리핀의 마닐라 다바오 지역 등을 연구 대상 지역으로 설정하여 제약조건에 따라 중력모형을 총 5개로 분류한 뒤 각 모형의 적용성을 개별적으로 검토하였다.

Arasan et al.(1996)은 인도의 중존 체계 도시구조를 활용, 3개의 통행목적과 5개 수단에 대해 집합화(stratification)된 존별에 대한 모형(type I)과 미국 BPR 모형(type II)으로 구별하여 중력모형을 정산하였다.

Wang et al.(2006)은 엔트로피 극대화 모형의 설명력을 비교 검증하기 위해 중국 창천시의 2001년 통행자료를 활용하였다. 특히 다양한 제약 조건 수준에 따른 모형의 설명력 변화를 수단별로 정산한 뒤 비교하였다. 그 결과 목적 함수를 제약하는 조건이 많을수록 모형의 설명력이 상승한다는 점을 밝혔다.

국내의 경우, 서울 및 수도권 지역과 대구시 등의 광역권 통행자료, KTX와 같은 광역 교통수단의 이용수요 등을 활용해 통행분포 패턴을 분석하고 저항 계수를 추정하였다(Kim, 1995; Jung, 1998; Kim, 2011; Jo, 2012; Ryu and Woo, 2012). 이를 통해 국내 여건에 대한 중력모형의 설명력을 검토함과 동시에 장기 예측시

의 문제점, 통행저항 변수의 한계점, 집합화된 존 단위에
서의 한계점 등 몇 가지 문제점을 도출하게 되었다.

2. 중력모형의 보완

3단계는 앞서 도출된 문제점을 해결하기 위한 다양한
시도가 이루어진 시기로 정의된다. 3단계 연구는 연구의
특징에 따라 다시 2개로 유형화 할 수 있다.

첫째는 보정 계수의 적용을 통한 모형의 설명력 보완
연구이다. 연구 방법론은 출발도착지 간의 사회·경제적
특성을 지역간 유인력으로 정의하여 이를 추정하는 연구
와(Kim, 2006; Jeon, 2011) 지역간 유형화를 통해
개별 모형을 구축하는 연구(Park, 2014)가 있다. 그러
나 장래 예측성 측면에서 갖는 한계점과 통행저항 변수
의 낮은 설명력은 여전히 개선되지 못하였다는 한계점이
존재한다.

둘째는 통행 저항함수의 구조를 보완한 연구이다. 이
연구 또한 존 간 통행 패턴을 통행저항 변수만으로 설명할
수 없다는 전제 아래 이를 보완하기 위해 저항변수, 또는
저항함수 구조의 개선을 시도한 연구로 정의할 수 있다.

You(2001)는 서울 수도권권을 대상으로 서울에 대한
의존도를 변수로 정의하여 기존의 중력모형 함수에 의존
도 함수를 곱하여 중력모형의 오차를 보정하였다. 그 결
과, 모형의 추정력은 일부 개선되었으나 장래 통행수요의
추정력 향상 측면에서는 큰 기여를 하지 못하였다.

Lee(2003)는 전국 246개 존을 대상으로 2중 제약모
형과 새로운 제약식을 추가한 3중 제약 모형을 각각 정
산하였다. 그 결과, 단거리 통행분포에 있어 큰 오차를
보였던 점을 개선한 결과를 얻게 되었다. 단, 개선 효과
가 일부 단거리 통행에 국한되었다는 점과 존 간 통행특
성의 구현이 아닌 균형계수의 도입으로 인한 설명력 향
상에 그쳤다는 측면에서 한계점을 갖는다.

3. 기존 연구의 한계점 및 착안점 도출

기존연구 검토를 통해 도출한 연구의 한계점은 다음
과 같다.

첫째, 지역 간 통행 특성을 규명하고 이를 대변할 수
있는 변수에 대한 고찰이 미흡하였다. 지역 간 사회·경
제적 특성을 바탕으로 형성된 존 간 상호 교류 특성으로
인해 기존의 통행저항 변수는 통행을 설명함에 있어
한계점을 가질 수밖에 없으나 이를 개선할만한 대안을

제시하지 못하였다.

둘째, 모형의 설명력 개선을 위한 저항함수 구조의 개
선에 대한 연구가 미흡하였다. 저항함수는 존 간 통행을
설명하는 함수로 통행저항 변수의 부족한 설명력을 보완
하기 위해서는 추가적인 변수 도입을 통한 저항함수의
적극적인 개선 노력이 요구된다. 그러나 기존 연구에서
는 실측치와 추정치간의 오차를 보정하는 수준에서 추가
적인 변수가 고려되었을 뿐, 음지수 함수 형태의 저항함
수 구조는 일관되게 사용되었다. 즉 기존 연구는 오차를
보정하기 위한 단편적인 방법에 그쳤을 뿐, 추가 변수의
도입을 위한 저항함수 구조의 확장을 시도하지 못한 것
으로 사료된다.

본 연구는 이러한 한계점을 인지하고 존 간 통행특성
을 현실적으로 구현할 수 있는 중력모형의 구조 및 정산
기법을 함께 제안하였다. 우선 통행저항 변수의 한계점
을 인지하여 존 간 통행특성 변수를 도입하여 이를 해결
하고자 하였다. 존 간 통행특성 변수로는 각 존의 사회·
경제적 특성, 교통인프라 특성 등을 대변할 수 있는 접근
성(accessibility) 변수를 선정하였다.

단, 추가적인 변수를 도입할 경우에는 기존의 중력모
형 해법은 최적 해를 찾지 못한다는 단점이 존재한다. 특
히 모든 제약 조건을 만족하는 저항계수(β)의 해를 찾
지 못하게 되는 현상이 발생한다(Rho, 1991). 따라서
저항함수 계수 추정을 포함한 새로운 중력모형의 정산기
법을 개발하였다. 이 정산기법은 중력모형의 로그변환을
통해 균형인자의 영향력을 배제하고 교차 통행량과 통행
저항 간의 관계를 회귀분석(regression analysis)을 통
해 우선적으로 추정하는 방법이다. 이러한 정산 기법을
활용한다면 접근성 변수에 대한 저항 계수를 함께 추정
할 수 있기 때문에 기존 정산기법이 가진 문제점을 해결
할 수 있다는 장점이 있다.

중력모형의 2단계 정산기법

1. 정산기법의 개요

2단계 정산기법의 핵심은 종속변수인 교차통행량과
통행비용과의 관계를 1차원적 선형관계로 설정하여 통
행비용의 계수를 회귀 분석을 통해 추정한다는 점이다.
이는 교차통행량과 통행비용은 반비례한다는 전제조건을
바탕으로 한 결과이다. 여기서 존별 균형인자는 상수로
정의되어 통행비용의 계수가 결정된 이후에 추정된다.

2단계 정산기법의 세부적인 과정은 다음과 같다.

1단계는 교차통행량 분포와 저항변수 간의 선형관계를 정의하고 저항함수의 계수를 통계적 기법을 통해 추정하는 과정으로 구성된다. 기존의 양편제약 중력모형의 구조는 식(1)과 같다.

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(-\beta c_{ij}) \tag{1}$$

여기서 식(2)와 같이 유출, 유입 균형인자인 A_i, B_j 를 상수 K 로 정의한다. 이는 각 존의 유출, 유입 균형인자는 통행저항 변수가 설명하지 못하는 존 간 통행패턴의 양을 맞추어 주는 역할만을 수행하기 때문에 정산의 우선순위에서 고려되지 않기 때문이다.

$$T_{ij} = K O_i D_j \exp(-\beta c_{ij}) \tag{2}$$

그리고 양 변을 각 존의 유출, 유입량으로 나눈 뒤, 로그 변환을 취하면 식(3)을 얻을 수 있다. 이는 표준화 기법과 유사한 개념으로 교차 통행량의 양이 아닌 각 존의 상대적 규모를 고려할 수 있는 일종의 비율 형태로 변환됨을 의미한다.

$$\frac{T_{ij}}{O_i D_j} = K \exp(-\beta c_{ij}) \tag{3}$$

위 식의 양변을 자연로그를 활용해 대수변환하면 식(4)와 같이 단순 회귀식을 유도할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{T_{ij}}{O_i D_j}\right) = \ln K - \beta c_{ij} \tag{4}$$

결과적으로 기존의 중력모형은 존 별 유출입 통행량 대비 교차통행량의 비율을 종속변수로 하는 단순 회귀 모형의 형태로 유도된다. 독립변수는 존 간 통행비용 변수로 정의되며 계수는 기존 중력모형의 저항 계수를 의미하는 β 와 동일한 개념으로 해석 될 수 있다.

이러한 구조는 존 간 유출 및 유입량의 규모를 함께 고려하고 비용과의 상관관계를 선형적으로 추정할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 기존 정산기법은 통행저항 계수와 존별 균형인자를 동시에 산출하기 때문에 안정성 측면에서 단점이 있다는 점을 고려한다면 본 정산기법은 이를 보완할 수 있다는 강점이 있다.

2단계는 회귀분석을 통해 산출된 저항함수 계수를 활용해 식(5), 식(6)과 같이 존 별 유출입 제약조건을 만족하는 균형인자를 산출하는 과정으로 구성된다. 이는 기존의 반복평형기법에서 존 별 균형인자를 찾기 위해 수행하는 과정과 동일하다.

$$A_i = \left(\sum_{j=1}^n B_j D_j \exp(-\beta c_{ij})\right)^{-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

$$B_j = \left(\sum_{i=1}^n A_i O_i \exp(-\beta c_{ij})\right)^{-1} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

이와 같은 2단계 과정을 통해 본 연구모형은 통행저항에 대한 계수 값과 각 존별 유출입 균형인자를 산정하게 된다. 이는 변수의 추가 투입으로 인해 모형의 정산이 불가능했던 기존의 한계점을 극복하는 기법이라는 점에서 큰 의미를 갖는다. 또한 기존의 기법보다 직관적인 계산 과정으로 이해하기 쉬우며 저항계수의 산출 또한 용이하다는 장점이 존재한다.

2. 정산기법의 검증

2010년 전국지역간 목적별 O/D자료를 활용한 저항함수 계수의 회귀분석 결과는 Table 1과 같다. 모형의 설명력이 가장 뛰어난 업무 모형의 R^2 는 약 0.3, 설명력이 가장 낮은 출근 모형의 R^2 는 약 0.1로 나타났다. 이러한 결과는 통행비용 변수의 낮은 설명력에 기인하며 일반적인 관점에서 우수한 모형이라고 볼 수 없다. 그러나 서두에서 밝혔듯이 복잡한 통행패턴으로 인해 통행비용이라는 독립변수의 설명력은 높지 않다는 점을 고려할 때, 기존 기법과의 설명력 비교를 통해 2단계 정산기법의 타당성을 최종 판단할 필요가 있다.

기존 기법은 음지수 함수 형태의 중력모형으로 유도되는 엔트로피 극대화 모형의 반복평형기법으로 선정하였다.

Table 1. Regression analysis results by purpose

Purpose	R^2	Independent variable	Coefficient
Business	0.30	constant	-13.768*
		distance	0.024*
Leisure	0.14	constant	-13.426*
		distance	0.008*
Commuting	0.05	constant	-14.945*
		distance	0.063*

note: * indicates p-value is under 0.01

저항함수 계수 및 균형인자 수렴 기준인 상대 오차 (relative gap)는 0.0001, 최대 반복횟수 (maximum iteration)는 10,000번을 적용하였다.

3개 통행 목적에 대해 반복평형기법과 본 연구기법 등 2개 기법의 설명력 비교·검증을 수행하였다. 기법의 검증을 위한 지표는 RMSE(root mean square error), E-norm, C.R(coincidence ratio)를 선정하였다.

RMSE는 추정치와 실측치간의 평균값에 대한 분산 정도를 의미하는 값으로 가장 직관적이면서도 의미 있는 근사모델의 정확도 평가 방법이다. 산정방식은 식(7)과 같다. 여기서 T_{ij} 는 존간 교차통행량, o 는 관측통행량, p 는 추정통행량, n 은 존의 개수를 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (T_{ij}^o - T_{ij}^p)^2}{n}} \quad (7)$$

E-norm은 식(8)과 같이 측정된 두 변수 간의 표준 편차 개념으로 이해될 수 있다. 값이 작을수록 실측 통행량 대비 오차율이 낮음을 의미하기 때문에 설명력이 뛰어나다고 해석 할 수 있다. 여기서 T_{ij} 는 존간 교차통행량, o 는 관측통행량, p 는 추정통행량, n 은 존의 개수를 의미한다.

$$E-norm = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{ij}^o - T_{ij}^p}{T_{ij}^o} \right)^2}{n}} \quad (8)$$

C.R은 미국의 통행수요 모형 검증 매뉴얼에서 제시 되는 통행분포 모형의 검증 기법 중 하나이다. 0과 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 모형의 추정치가 실측치와 유사한 분포를 갖는다고 해석할 수 있다. 산정 방식은 식(9)와 같다. 여기서 T 는 급간²⁾, PM_T 는 T 급간의 추정 교차통행량 비율, PO_T 는 T 급간의 실측 교차통행량 비율을 의미한다.

$$CR = \frac{\sum_{T=1}^n [\min(PM_T, PO_T)]}{\sum_{T=1}^n [\max(PM_T, PO_T)]} \quad (9)$$

2개 기법의 검증결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of validation results with existing method

	Purpose	RMSE	E-norm	C.R
Business	Existing method	632	0.057	0.512
	2-phase method	652	0.059	0.505
Leisure	Existing method	622	0.097	0.401
	2-phase method	659	0.115	0.382
Commuting	Existing method	1,291	0.110	0.660
	2-phase method	1,380	0.147	0.642

업무 모형의 저항계수는 0.027과 0.024로 유사하게 산출된 점을 확인할 수 있다. 기법의 설명력은 RMSE가 약 20통행, E-norm이 약 0.002, CR은 0.007 차이로 기존모형의 설명력이 근소하게 우수한 것으로 나타났다.

여가모형과 출근모형 또한 근소한 차이로 기존 기법의 설명력이 뛰어난 것으로 분석되었다. 여가 모형의 저항계수는 0.014과 0.008, 출근 모형의 저항계수는 0.075와 0.063로 나타나 상대적으로 큰 편차는 존재하지 않는 것으로 판단된다. 여가 및 출근 모형의 설명력은 각각 RMSE가 약 37통행, 90통행 차이가 발생하며 E-norm이 약 0.018, 0.037, CR은 0.019와 0.018 차이가 발생하였다.

통행거리 급간별로 실측 통행량, 모형별 추정 통행량의 분포를 검토한 결과는 다음과 같다.

Figure 2는 업무목적 통행의 C.R 검증결과를 보여 준다. 거리 급간 변화에 따른 두 정산기법의 패턴이 유사한 점에 비추어 볼 때 2단계 정산기법의 추정 능력은 기존 모형과 유사한 수준하다고 판단된다. 급간별 비교 결과, 두 기법 모두 단거리 통행 급간에 대한 설명력이 높지 않은 점을 확인할 수 있으며 실측 통행 패턴과는 상이한 패턴을 보이고 있다는 점을 확인할 수 있다.

Figure 3은 여가목적 통행의 C.R 검증결과를 의미한다. 두 기법의 패턴이 유사한 점에 비추어 볼 때 2단계 정산기법의 추정 능력은 기존 기법과 유사하다고 판단된다. 급간별 비교 결과, 업무모형과 유사하게 두 기법 모두 단거리 통행 급간에 대한 설명력이 높지 않음 점을 확인할 수 있다.

2) 본 연구에서는 5km를 적용하였음

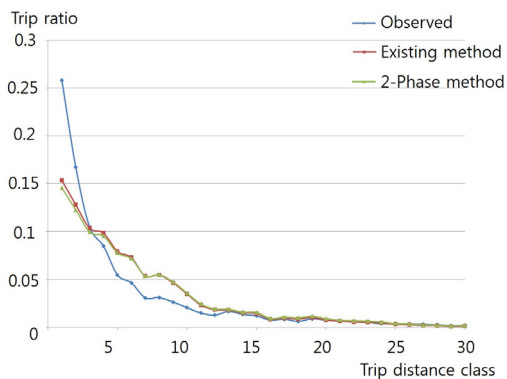


Figure 2. Coincidence ratio (business trip)

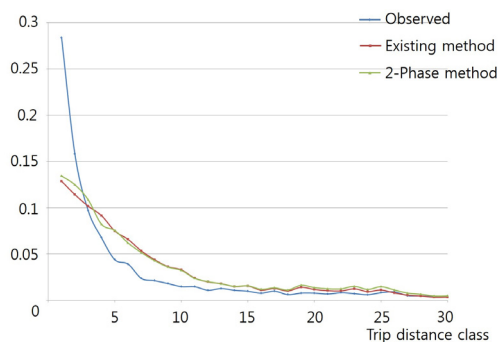


Figure 3. Coincidence ratio (leisure trip)

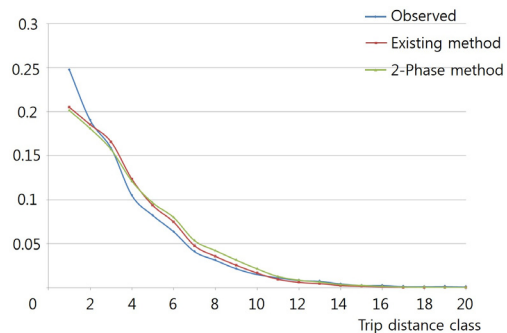


Figure 4. Coincidence ratio (commuting trip)

Figure 4는 출근목적 통행의 C.R 검증결과를 의미한다. 전반적으로 두 기법 모두 실측통행 패턴과 유사한 형태를 보이고 있다. 단, 2급간(10km)이전까지는 실측치 대비 과소 추정되는 경향이 강하며 2급간 이후부터 전반적으로 과대 추정되는 경향이 강하다. 전반적으로는 단거리 통행에 대한 설명력이 타 목적에 비해 우수함을 확인할 수 있다.

Table 3. Results of paired t-test

Purpose	Average difference	Std. deviation	Std. error	t-value
Business	0.000	46.070	0.474	0.000
Leisure	0.000	94.945	1.079	0.000
Commuting	0.000	285.488	3.272	0.000

최종적으로 두 기법간의 차이를 통계적 기법을 활용해 검증하였다. 이를 위해 반복평형기법의 추정치와 본 연구 기법의 추정치를 각각 짝지어 수행하는 대응표본 t-검정 (paired t-test)을 활용하였다. 분석 결과, Table 3과 같이 세 개 목적 모두 t-value가 0.000으로 나타나 두 집단 간 평균차이는 없다는 귀무가설을 채택하게 되었다. 따라서 반복평형기법과 2단계 정산 기법의 추정치는 개별 추정 값 간의 일부 편차는 존재하지만 전체적인 평균의 차이는 없다고 결론내릴 수 있다.

3. 소결

두 정산기법의 정산 및 검증결과를 비교한 결과, 다음과 같은 두 가지 사실을 확인하였다.

첫째, 회귀모형을 활용한 2단계 중력모형의 정산 기법의 설명력이 기존 정산기법의 설명력과 유사함을 확인하였다. 이는 검증 지표인 RMSE, E-norm, CR와 정산기법 간 t-검정 결과를 통해 증명되었다. 따라서 2단계 정산기법은 기존 추정기법과 비교 시, 실측 통행량을 구현하는 수준을 의미하는 모형의 설명력 측면에서 큰 차이가 없다는 결론을 내리게 되었다. 이러한 결론은 추가적인 존 간 통행특성 변수 투입 시, 통행비용 변수 및 존 간 통행특성 변수의 계수를 회귀분석을 통해 추정할 수 있다는 근거로 활용될 수 있다.

둘째, 전반적으로 10km 미만의 단거리 통행은 과소 추정, 10km 이상 50km미만의 중거리 통행은 과대 추정되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 실제 통행 패턴에서는 통행저항 이외의 요소가 작용함을 의미한다. 특히 서울 및 수도권 지역, 광역권 내부에서 집중된 단거리 통행으로 인해 이러한 현상은 더욱 두드러지게 된다. 따라서 존 간 통행특성으로 인해 통행저항 변수만을 활용하는 기존 모형의 해법은 한계를 가질 수밖에 없으며 이를 개선하기 위해서는 존 간 통행특성 변수의 도입을 통해 중력모형의 설명력을 보완할 필요성이 있다는 타당성을 확보하게 되었다.

접근성을 도입한 중력모형의 개발

1. 접근성을 도입한 중력모형의 구조

도시 계획적 관점에서 존 간 통행 특성의 규명은 지역 간 교통 수요, 토지이용 패턴의 변화, 사회·경제적 상호 교류 특성을 이해하는데 중요한 요소로 인식되어져 왔다. (Kim and Jo, 1992) 본 연구는 존 간 통행 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상되는 경제적 의존성과 접근성 개념을 함께 검토하였다. 그 결과, 식(10)과 같이 존 간 통행저항 요소와 존 별 규모를 가중 평균한 수요 기반(demand based) 접근성 변수(Choi, 2003)를 최종적으로 선정하였다. 여기서 a_i 는 i 존의 접근성, P_j 는 j 존의 인구, d_{ij} 는 지역 간 통행거리를 의미한다.

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_j}{\sum_{j=1}^n d_{ij} P_j} \quad (10)$$

즉, 접근성을 의미하는 변수 a_i 는 i 존을 기준으로 i 존을 제외한 모든 존의 대한 상대적 거리와 인구 규모에 대한 가중평균 한 값으로 정의할 수 있다. 접근성 변수는 해당 존의 지리적 접근성이 뛰어나고 주변 지역의 인구 규모가 크다면 접근성 변수 값은 커지게 된다.

존 간 통행특성 변수가 도입된 확장된 저항함수의 개략적인 구조는 식(11)과 같다. 여기서 존 간 통행특성을 의미하는 A_{ij} 는 통행비용 변수(c_{ij})와 선형 결합의 형태로 정의된다.

$$f(c_{ij}) = \exp(\alpha A_{ij} - \beta c_{ij}) \quad (11)$$

따라서 최종적인 중력모형의 형태는 식(12)와 같다.

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(\alpha A_{ij} - \beta c_{ij}) \quad (12)$$

여기서 존 간 통행특성을 의미하는 A_{ij} 변수를 접근성 변수로 정의한다면 해당 변수는 출발존 i 의 접근성 a_i 와 도착존 j 의 접근성 b_j 로 분리된다. 따라서 접근성 계수 또한 α , β 로 각각 정의되고 통행 저항계수는 γ 로 새롭게

정의된다. 단 이들 변수는 최적화 모형의 제약조건 상에서 비음 파라메타를 유도하기 위해 역수의 형태로 저항함수 내에 도입된다. 따라서 최종적인 중력모형의 형태는 식(13)과 같이 정의된다.

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(-\alpha \frac{1}{a_i} - \beta \frac{1}{b_j} - \gamma c_{ij}) \quad (13)$$

위와 같은 구조상에서 모형의 정산은 다음과 같은 2단계 정산기법을 통해 진행된다.

우선 A_i , B_j 는 존 별 균형인자라는 측면에서 1단계 정산에서 제외된다. 1단계에서는 유출 및 유입 접근성 계수에 해당하는 α , β 와 통행 저항계수를 의미하는 γ 의 해를 찾게 된다. 즉 식(16)은 식(17)과 같이 로그 변환되며 회귀분석을 통해 α , β , γ 등 세 개의 계수를 우선적으로 추정하게 된다.

$$\ln(\frac{T_{ij}}{O_i D_j}) = \ln K - \alpha \frac{1}{a_i} - \beta \frac{1}{b_j} - \gamma c_{ij} \quad (14)$$

이 후, 2단계 과정에서는 식(15), 식(16)과 같이 회귀분석을 통해 산출된 저항함수 계수를 활용해 존 별 유출 및 유입 제약조건을 만족하는 균형인자를 산출하게 된다. 이는 통행저항함수에 접근성 변수가 추가되었다는 점을 제외하면 기존의 반복평형기법에서 존 별 균형인자를 찾기 위해 수행하는 과정과 동일하다.

$$A_i = (\sum_{j=1}^n B_j D_j \exp(-\alpha \frac{1}{a_i} - \beta \frac{1}{b_j} - \gamma c_{ij}))^{-1} \quad i=1, \dots, n \quad (15)$$

$$B_j = (\sum_{i=1}^n A_i O_i \exp(-\alpha \frac{1}{a_i} - \beta \frac{1}{b_j} - \gamma c_{ij}))^{-1} \quad j=1, \dots, n \quad (16)$$

2. 모형의 정산

회귀분석을 활용한 저항함수 계수의 추정 결과는 Table 4와 같다. 4개의 목적 모두 접근성 변수의 도입으로 인해 회귀모형의 적합도가 향상된 점을 확인할 수 있다. 여가 목적의 경우 $adj-R^2$ 값이 0.3 이상, 출근 목적의 경우 0.4 가까이 상승하였다. 모든 계수의 통계적 유의성은 99% 유의수준에서 확보되었다. 모든 계수의 부호는 양(+)의 부호를 나타내므로 부호 검증의 결과도 유의한 점을 확인할 수 있다.

Table 4. Regression analysis results considering accessibility by purpose

Purpose	R ²	Independent variable	Coefficient	VIF
Business	0.566	constant	-12.529*	
		α	0.010*	1.081
		β	0.027*	1.044
		γ	0.025*	1.054
Leisure	0.430	constant	-12.426*	
		α	0.017*	1.046
		β	0.012*	1.073
		γ	0.007*	1.159
Commuting	0.403	constant	-13.443*	
		α	0.027*	1.196
		β	0.084*	1.066
		γ	0.066*	1.164

note: * indicates p-value is under 0.01

접근성 변수의 경우, 변수를 정의하는데 있어 존 간 통행거리 변수가 활용되었다는 점에서 회귀분석에 대한 다중공선성³⁾이 의심될 수 있다. 이를 검증하기 위해 각 독립변수에 대한 분산팽창계수(variance inflation factor, VIF) 값을 검토하였다. 모든 설명변수에 대한 분산팽창계수는 1.0에서 1.2사이에 형성되어 설명변수 간의 다중공선성은 존재하지 않는 것으로 나타났다.

정산 결과, 접근성 변수의 도입으로 인하여 모형의 적합도가 괄목할만한 수준으로 향상되었음을 확인할 수 있다. 이는 접근성 변수가 현재 관측된 존 간 통행패턴을 설명하는 하나의 변수로 선정될 수 있음을 의미한다. 따라서 접근성 도입 모형의 검증 결과 또한 기존의 모형보다 향상된 개선된 결과를 보일 것으로 예상된다. 이후, 앞서 도출된 세 개의 계수를 적용해 2단계 정산을 수행하여 각 존별 유출 및 유입 균형인자를 추정하였다.

3. 모형의 검증

2단계 정산기법을 활용하여 개발된 접근성 변수를 도입한 중력모형의 검증 결과는 Table 5와 같다. 검증 지표로는 RMSE, E-norm, CR을 동일하게 활용하였다. 검증결과와의 비교를 위한 모형은 앞서 구축한 통행저항 변수만을 활용한 기존의 엔트로피 극대화 모형을 그대로 활용하였다.

Table 5. Comparison of validation results with existing model

Purpose	RMSE	E-norm	C.R	
Business	Existing model	632	0.057	0.512
	study model	434	0.039	0.641
Leisure	Existing model	622	0.097	0.401
	study model	489	0.072	0.515
Commuting	Existing model	1,291	0.110	0.660
	study model	938	0.085	0.807

업무모형의 접근성 변수 도입 결과, 기존 모형 대비 RMSE 189통행 감소, E-norm 0.018 감소, CR 0.129 증가한 것으로 분석되었다. 이는 기존 모형의 설명력 수준을 고려한다면 유의미한 개선 효과이다.

여가모형도 접근성 변수의 도입으로 RMSE 133통행 감소, E-norm은 0.025 감소, CR은 0.114 증가한 것으로 나타났다. 이는 3개 목적 통행 중 개선 효과가 가장 뚜렷한 결과이다.

출근모형의 접근성 변수 도입 결과, RMSE 353통행 감소, E-norm은 0.025 감소, CR은 0.147 증가한 것으로 분석되었다. 출근목적 통행의 비중이 가장 높다는 점을 감안한다면 개선효과는 뛰어나다고 할 수 있으며 접근성 변수의 도입으로 급간별 교차통행량 구현율이 실측 통행의 80% 이상을 설명하는 점을 C.R 지표를 통해 확인할 수 있다.

접근성을 도입한 중력모형의 개선 효과는 Figure 5, 6, 7을 통해서 보다 객관적으로 파악할 수 있다.

업무모형의 경우, 3급간 이후 과대 추정되던 기존 모형의 패턴이 접근성 변수의 도입으로 일부 감소된 점을 확인할 수 있다. 3급간 이전까지는 과소 추정되던 기존 모형의 단점 또한 개선되어 실측 통행패턴과 상당히 유사한 패턴을 구현하는 점을 확인할 수 있다.

여가모형 또한 단거리의 과소 추정 및 중·단거리의 과대 추정 현상 또한 개선된 점을 확인할 수 있다. 접근성을 도입한 중력모형의 전반적인 통행 패턴이 실측 통행 패턴과 상당히 유사하게 구현되고 있다. 특히, 3급간 이후 과대 추정으로 인한 오차 비율이 컸던 기존의 모형에 비해 오차 비율이 상당수 감소한 점을 확인할 수 있다.

3) 설명변수가 여러개인 다중 회귀분석을 수행할 경우, 설명변수 간의 상관관계로 인해 분산 및 공분산 행렬의 행렬식이 0에 가까운 값이 되어 회귀 계수의 정밀도가 낮아지는 현상을 의미

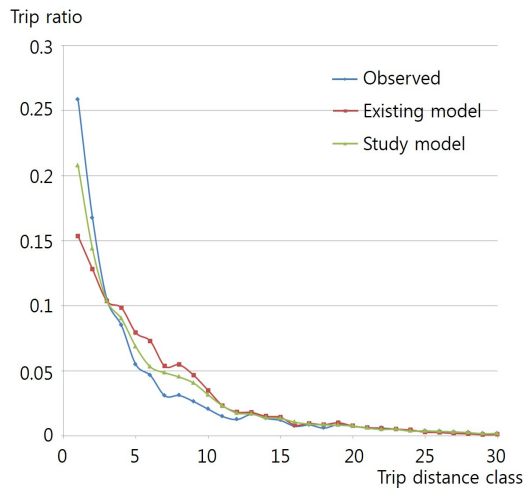


Figure 5. Coincidence ratio with accessibility (business trip)

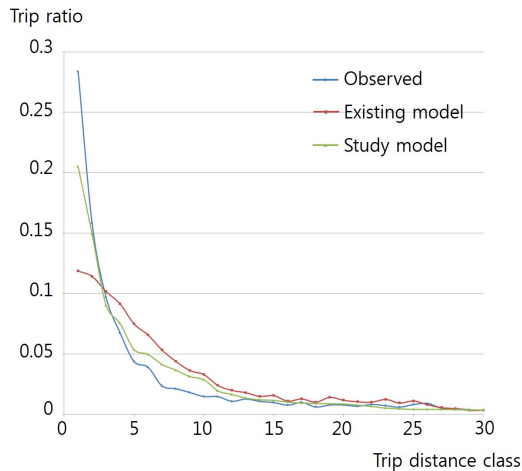


Figure 6. Coincidence ratio with accessibility (leisure trip)

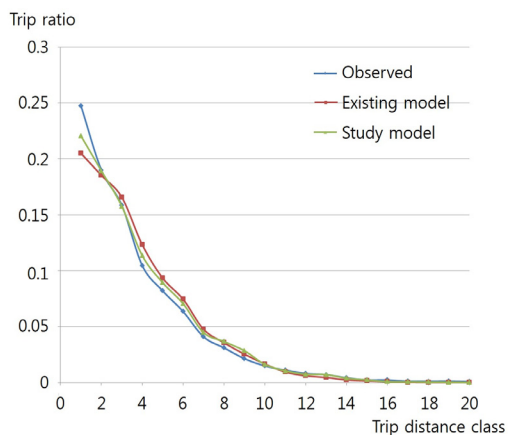


Figure 7. Coincidence ratio with accessibility (commuting trip)

3급간 이전까지는 지나치게 과소 추정되던 기존 모형의 단점 또한 개선되어 실측 통행패턴과 상당히 유사한 패턴을 구현하는 점을 확인할 수 있다.

출근모형도 단거리의 과소 추정 및 중·단거리의 과대 추정 현상 또한 개선된 점을 확인할 수 있다. 접근성을 도입한 중력모형의 전반적인 통행 패턴이 실측 통행패턴과 상당히 유사하게 구현되고 있다. 그러나 기존모형의 구현 패턴이 실측 패턴과 크게 차이나지 않는 관계로 개선효과는 타 목적에 비해 크게 두드러지지 않는다. 3급간 이후 과대 추정되던 기존 모형의 패턴이 접근성 변수의 도입으로 일부 감소된 점을 확인할 수 있다. 3급간 이전까지는 과소 추정되던 기존 모형의 단점 또한 개선되어 실측 통행패턴과 상당히 유사한 패턴을 구현하는 점을 확인할 수 있다.

결론

1. 요약 및 시사점

본 연구는 반복 계산을 통한 발견적 방법과 비선형 연립방정식 체계로 대표되는 중력모형에 대해 저항함수의 계수를 우선 추정할 수 있는 정산 기법을 제안하였다. 이와 함께 존 간 통행특성을 반영할 수 있는 접근성 변수를 도입함으로써 전반적인 모형의 설명력 향상을 도모함과 동시에 다양한 방식에서의 확장이 가능한 중력모형의 구조를 제안하였다.

즉, 본 연구는 존 간 특성변수의 도입과 정산을 가능하게 한 2단계 정산기법 개발과 접근성 변수를 도입한 저항함수의 확장 등 두 가지 요소로 차별화될 수 있다. 이에 대한 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 기존의 중력모형 구조를 변환하여 교차통행량과 통행 저항함수 간의 회귀 분석을 통해 저항함수의 계수를 우선 추정하고 존별 균형인자를 2차적으로 추정하는 2단계 정산기법을 제안하였다. 2단계 정산기법의 검증 결과, 전반적인 설명력 수준은 기존 기법과 대등한 것으로 나타났다. 일부 모형의 경우, 기존 정산기법보다 다소 낮은 설명력을 보인 경우도 존재하였으나 대응표본 t-검정 결과, 두 기법의 추정치 간 평균의 차이는 없다는 결론을 얻었다.

둘째, 존 간 통행특성을 대변하는 변수로 접근성을 도

입한 중력모형을 새롭게 정의하였다. 접근성 변수는 각 존의 상대적인 인구 규모 및 입지적 특성을 반영하는 변수로 기존의 통행비용 변수가 갖는 한계점을 극복할 수 있다는 장점이 있다. 그 결과 모형의 설명력이 전반적으로 향상되었으며 기존 모형이 갖고 있던 단거리 통행의 과소 추정 문제를 일정 수준 이상 개선한 결과를 얻게 되었다. 기존 모형의 경우, 서울을 포함한 수도권 및 광역권 내부에서 발생하는 도심권 내부 30km 미만의 단거리 통행을 충분히 설명하지 못하였다. 이러한 통행은 통행비용의 설명력과 함께 존 간 사회·경제적 규모와 상호 교류 특성으로 인해 설명되어야 한다. 따라서 접근성 변수의 도입이 단거리 통행에 해당되는 수도권 및 광역권 지역의 내부 통행 특성을 대표한 결과로 해석된다.

이와 같은 본 연구의 개선 효과는 다음과 같은 시사점을 갖는다. 우선, 2단계 정산기법의 개발을 통해 기존의 정산기법이 갖는 한계점을 극복하였다. 기존 연구에서는 저항함수가 확장될 경우, 중력모형의 정산이 불가능하다는 한계점으로 인해 적극적인 변수의 도입을 시도하지 못하였다. 그러나 2단계 과정을 통한 저항함수 계수의 추정이 통계적으로 유의하며 모형의 설명력 또한 기존의 정산 기법과 대등한 수준에서 형성됨이 밝혀짐에 따라 보다 적극적인 중력모형의 개선이 이루어질 수 있는 환경이 마련되었다.

이와 함께 접근성 변수의 도입에 따른 모형의 개선 효과를 제시하고 존 간 통행을 대표할 수 있는 다양한 특성 변수가 고려될 수 있음을 증명하였다. 다양한 특성 변수와 함은 다양한 토지이용 특성이 혼재되어 감에 따라 복합화되어가는 도심의 특성을 대표할 수 있는 요소를 의미한다. 존 간 통행 패턴을 설명할 수 있는 변수가 추가될수록 중력모형의 신뢰도는 향상될 것이며 현재 활용되는 단계적 통행수요 모형의 가장 큰 문제점인 장래 교통수요 추정의 낮은 신뢰성 또한 회복될 수 있을 것이다. 특히 대규모 광역교통 시설의 입지에 따른 장래 통행패턴의 변화를 예측하는데 있어 접근성을 포함한 존 간 통행특성 변수의 도입은 가시적인 성과를 보일 것으로 기대한다.

마지막으로 존 간 통행특성을 밝히기 위한 연구는 궁극적으로 도시의 공간 구조 및 도시 간 상호 교류 특성을 밝히는 연구로 확장될 수 있다. 그 결과, 도시의 공간 구조 및 시설 입지, 통행패턴의 변화에 따른 토지이용 체계 변화, 토지이용 및 교통 균형 체계 등 다양한 분야의 연구와 접목되어 활발히 연구될 수 있을 것이다.

2. 향후 연구방향

본 연구는 다음과 같은 한계점을 보완해 교통수요 추정의 신뢰성을 공고히 할 필요가 있다.

첫째, 2단계 정산기법의 설명력 감소 현상이다. 출근 목적의 검증 결과는 기존의 정산기법과 다소 큰 차이를 보인다. 이는 통행저항 변수의 낮은 설명력에 기인하는 것으로 판단되지만 보다 면밀한 검토를 통한 원인 파악이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 수도권 및 광역권 O/D자료를 통한 적용성 검토가 이루어질 필요가 있다.

둘째, 다양한 존 특성 변수가 고려되어야 한다. 수요 기반 접근성 변수는 존의 인구 규모와 입지적 특성을 반영한 변수라는 점에서 중력모형에 투입된 설명변수와 그 특성이 일부 중첩된다. 통계적 검증을 통해 발생 가능한 문제점들은 사전에 검토 완료하였지만 현재 활용된 접근성 변수에 대한 논란의 여지는 남아있는 상황이다. 따라서 인구 규모와 존 간 거리뿐만 아니라 출발 및 도착지의 특성을 함께 고려할 수 있는 방향성을 가진 특성이 변수화 된다면 이러한 논란은 불식될 수 있으며 모형의 신뢰도는 향상될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Arasan T. V., Wermuth M., Srinivas B. S. (1996), Modeling of Stratified Urban Trip Distribution, *Journal of Transportation Engineering*, 122(5), 342-349.
- Choi Y. J. (2003), Spatial Area Structure Analysis of Potential Opportunity Considering Accessibility of Railway System Network in South Korea, Master's Thesis, Sungshin Women's University.
- Jeon Y. H. (2011), Development of a Trip Distribution Model Reflecting Land Uses: Focused on Commute Trip in Seoul, Master's Thesis, Hanyang University.
- Jung Y. K. (1998), The Derivation of Travel Impedance Factors Using Highway O/D Matrix Data, Master's Thesis, Hanyang University.
- Kim D. S. (2011), Parameter Estimation and Elasticity Analysis of Gravity Model by Using Public Transport Card Data, Master's Thesis, Chonnam National University.

- Kim H. C., Cho W. R. (1992), Analysis of the Changes in Inter-regional Accessibility by the Highway Construction, *J. Korean Soc. Transp.*, 10(3), Korean Society of Transportation, 43-58.
- Kim J. H., Oh Y. T., Son Y. T., Park W. S. (2002), A Study in Estimating Level-of-Service for Pedestrian Facilities, *J. Korean Soc. Transp.*, 20(1), Korean Society of Transportation, 149-156.
- Kim S. (1995), Travel Demand Forecasting Models in the Seoul Metropolitan Area(I): Trip Generation and Distribution, The Seoul Institute.
- Kim T. G. (2006), Development of a Trip Distribution Model Introducing Interzonal Relative Attractiveness, Ph. D. Dissertation, Hanyang University.
- Lee U. R. (2003), Nationwide Travel Demand Estimation Using 3-Dimensional Balancing Technique, Master's Thesis, Kookmin University.
- Ortúzar J. D., Willumsen L. G. (1990), *Modelling Transport - 4th Edition*, Wiley.
- Park H. W. (2014), A Typological Approach to Estimating Interzonal Trips Using Gravity Model by Regional Characteristics, Master's Thesis, Hanyang University.
- Rho J. H. (1991), Development of an Efficient Solution Method for the Wilson's Trip Distribution Model, *J. Korean Soc. Transp.*, 9(2), Korean Society of Transportation, 121-126.
- Rho J. H. (2012), *Transportation Planning - Transportation Demand Theory and Modeling*, Nanam.
- Ryu Y. G., Woo Y. H. (2012), A Study on Trip Distribution Estimation Model's Accuracy: Using Daegu City O-D Tables, *J. Korean Soc. Transp.*, 30(5), Korean Society of Transportation, 43-59.
- Stopher P. R., Meyburg A. H. (1975), *Urban Transportation Modeling and Planning*, Lexington Books.
- Sumi T., Kuwahara M. (1983), Application of Trip Distribution Models, *Proc. of JSCE*, 339, 219-226.
- Wang D., Yao R., Jing C. (2006), Entropy Models of Trip Distribution, *Journal of Urban Planning & Development*, 132(1), 29-36.
- Wong D. S. (1981), Maximum Likelihood, Entropy Maximization, and the Geometric Programming Approaches to the Calibration of Trip Distribution Models, *Transportation Research Part B*.
- You S. (2001), Development of a Trip Distribution Model Reflecting Interregional Dependency - on the Basis of Work Trip in Seoul Metropolitan Area, Master's Thesis, Hanyang University.

✉ 주 작성자 : 최성택
 ✉ 교신저자 : 노정현
 ✉ 논문투고일 : 2015. 3. 17
 ✉ 논문심사일 : 2015. 5. 7 (1차)
 2015. 6. 12 (2차)
 2015. 7. 2 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2015. 7. 2
 ✉ 반론접수기한 : 2015. 12. 31
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필