

복수 중력모형의 구축과 적용방법에 관한 연구

유영근*

영남교통정책연구원

A Study on the Development of Plural Gravity Models and their Application Method

RYU, Yeong-Geun*

Yeongnam Transportation Policy Institute, Gyeongbuk 712-800, Korea

Abstract

This study developed plural gravity models and their application method in order to increase the accuracy of trip distribution estimation. The developed method initially involves utilizing the coefficient of determination (R^2) to set the target level. Afterwards, the gravity model is created, and if the gravity model's coefficient of determination is satisfactory in regards to the target level, the model creation is complete and future trip distribution estimation is calculated. If the coefficient of determination is not on par with the target level, the zone pair with the largest standardized residual is removed from the model until the target level is obtained. In respect to the model, the removed zone pairs are divided into positive(+) and negative(-) sides. In each of these sides, gravity models are made until the target level is reached. If there are no more zone pairs to remove, the model making process concludes, and future trip distribution estimation is calculated. The newly developed plural gravity model and application method was adopted for 42 zone pairs as a case study. The existing method of utilizing only one gravity model exhibited a coefficient of determination value (R^2) of 51.3%, however, the newly developed method produced three gravity models, and exhibited a coefficient of determination value (R^2) of over 90%. Also, the accuracy of the future trip distribution estimation was found to be higher than the existing method.

본 논문에서는 중력모형의 예측 정확도 향상을 위하여 복수의 중력모형을 구축하여 적용하는 방법을 개발하였다.

개발한 방법은 결정계수(R^2)를 이용하여 목표수준을 결정하고, 중력모형을 구축한다. 구축된 중력모형의 결정계수가 목표수준을 만족하면 모형 구축을 종료하고, 장래 통행분포 예측을 행한다. 만약 결정계수가 목표수준을 만족하지 못하면 목표수준에 만족할 때까지 구축된 모형에서 표준화 잔차가 큰 순서로 존 페어(Zone pair)를 제거한다.

제거된 존 페어들은 구축된 모형을 기준으로 보면 +영역과 -영역으로 나누어지는데 각 영역에서 중력모형을 구축하고 목표수준에 도달할 수 있도록 한다. 제거해야 할 존 페어가 존재하지 않으면 모형구축 작업이 중단되고, 장래 통행분포량 예측을 한다. 사례연구에서 개발된 방법을 42개 존페어에 적용하여 보았는데, 기존방법, 즉 하나의 중력모형으로 구축하면 설명력(R^2)이 51.3%였으나, 개발된 방법은 3개의 중력모형을 구축하고, 설명력(R^2)이 90% 이상 되었다. 또한, 장래 예측 정확도도 기존 방법보다 월등히 높은 것으로 검정 되었다.

Key Words

Estimation Accuracy, Gravity Model, Growth Factor Method, Trip Distribution, O-D Table

예측정확도, 중력모형, 성장인자모형, 통행분포, O-D표

* : Corresponding Author
ygryu@chol.com, Phone: +82-53-811-7001, Fax: +82-53-811-7002

Received 16 October 2012, Accepted 23 January 2013

I. 서론

교통수요예측에서 일반적으로 행해지는 4단계 수요예측 과정 중 두 번째 단계인 통행분포예측은 그 중요성이 상당히 큰 것으로, 통행분포 예측 결과로부터 통행운영 정책수립은 물론, 도로건설, 지하철, 경전철 등의 도입 타당성, 노선 선정 등이 검토되고, 행해지게 된다.

즉, 정확도가 높은 장래 O-D 표가 작성되면 이로부터 새로운 교통수단의 도입 여부를 결정하거나, 기존 교통수단의 효율적인 개선 방향을 구축하는 등, 저비용으로 성공적인 교통정책을 시행할 수 있지만, 정확도가 낮은 O-D 표는 엄청난 손실로 이어질 수밖에 없다.

통행분포 예측을 위한 예측모형에는 성장인자 모형, 중력모형 등이 있으며, 분석 존 규모와 목표연도, 대상 지역 범위, 과거 예측의 정확도 등을 고려하여 선정, 적용하고 있다. 통행분포 예측에서 중력모형에 관한 연구는 1950년대에 시작되었고, 주로 미국과 영국에서 이루어 졌다(Goncalves 등). 연구의 방향은 계수추정의 효율성 향상이 주류를 이루고 있다.

Goncalves et al.(2001)은 중력-기회 복합모형의 계수추정에서 기존까지 비 볼록 함수(Non-convex function)를 이용하였던 것을 급강하법에 따른 임의 섭동(Random perturbation of a descent method)으로 추가하는 방법을 제안하였고, 실제 O-D 양을 이용한 사례연구를 통해 효과를 입증하였다.

Celik(2010)는 대도시권에서 중력모형 계수추정을 위한 필요 표본 수를 연구하였는데, 표본 수가 많을수록 오차를 줄일 수 있는 것은 당연하나, 통행목적별로 1,000개 정도만 조사하면 장래 예측이 가능한 계수를 도출할 수 있다고 밝혔다.

Hallefjord et al.(1986)은 기존 중력모형에서 많이 적용한 엔트로피 극대화 모형 등에서의와 같이 하나의 목적함수를 이용하여 분포통행량의 조정자(A_i, B_j)를 산출하였던 것을 목적함수를 추가하고, 추가된 전체 목적함수들의 제약조건들로부터 조정자를 산출하여 적용하는 방법을 제안하였다.

목적함수는 엔트로피 극대화를 위한 목적함수 뿐만 아니라, 총 비용 최소화 목적함수, 총 이동거리 최소화 목적함수, 분포통행량 최대화 목적함수, 기준연도 관측 분포통행량의 편차 최소화를 위한 목적함수 등을 이용할 수 있는 것으로 제안하고 있다.

사례연구를 통하여 두 개의 목적함수를 이용하였을 경우,

세 개의 목적함수를 이용하였을 경우, 그리고 그 이상의 목적함수를 이용하였을 경우에 대하여 결과비교를 하였다.

결과는 기존 하나의 목적함수로부터 조정자를 결정하여 O-D표를 산출한 것 보다, 복수 목적함수를 적용하여 O-D 표를 산출하는 것이 더욱 안정적이라는 것을 밝히고 있다.

Giles et al.(1981)은 중력모형의 마찰인자 계수를 산정할 때, 일반적으로 최소자승법이나 최우추정법 등으로부터 하나의 값(point)을 결정하여 적용하였는데, 이는 여러 가지 제약 조건의 만족 등에서 고정적인 관계로 효율적이지 못한 점이 있다.

이의 개선을 위하여 점근적 공분산 행렬을 이용하여 범위(interval)를 적용하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 유입제약 조건의 중력모형, 유출제약 조건의 중력모형, 그리고 이중제약의 중력모형에서 적용하여 유용성을 입증하였다.

그 외 국내에서도 중력모형의 적용과 개선을 위한 연구들은 김형진(1996), 임성빈 et al.(1996), 유영근(2006), 김태균(2006), 임용택(2011) 등의 연구들을 포함하여 다수 존재한다.

대부분의 연구는 중력모형 계수추정 효율화에 관한 것이며, 중력모형을 변형하는 연구는 소수이다. 본 연구는 기존 중력모형의 연구방향과 달리한다.

일반적으로 중력모형의 구축은 기준연도 각 존 페어(Zone pair)의 통행분포량을 이용하여 잔차를 최소화하는 계수를 추정하고, 추정된 계수를 장래 변수에 같이 적용하여 예측한다. 그리고 변수와 통행분포량의 관계가 장래에도 같다는 것을 전제로 하는 것이고, 잔차의 합이 "0"일 뿐, 그 잔차의 존재는 부정할 수 없다.

즉, 잔차가 크다는 것은 예측값(Estimated O-D)과 실측값(Observed O-D, 조사치)이 많이 떨어져 있다는 것이고, 이 간격을 줄이려면 많이 떨어진 실측값에 가까운 예측 통행량이 산출될 수 있는 또 다른 중력모형이 구축되어 적용된다면 가능할 것이다.

본 연구에서는 장래 분포통행량의 예측 정확도를 높이기 위하여 복수의 중력모형을 구축, 적용하는 방법을 연구하였다.

II. 중력모형의 구조와 적합도 검증방법

1. 중력모형의 구조

중력모형은 3개의 변수만으로 장래 통행분포량을 예

측하는데, 적용변수는 통행분포량의 증가요인인 출발 존의 유출통행량과 도착 존의 유입통행량, 그리고 통행분포량 감소요인인 두 존간의 거리, 소요시간 등의 마찰인자이다.

중력모형(Gravity model)은 뉴턴의 만유인력의 법칙에 기초한 것으로 식(1)을 기본식으로 하고 있다.

$$X_{ij} = \frac{P_i \cdot P_j}{d_{ij}} \quad (1)$$

P_i = 존*i*의 인구

P_j = 존*j*의 인구

통행분포 예측에서는 기본식을 식(2)와 식(3)의 형태로 수정하여서 이용하고 있다.(Yun, 2008.; Kim, 2001).

$$\hat{X}_{ij} = k \frac{O_i^\alpha \cdot D_j^\beta}{C_{ij}^\gamma} \quad (2)$$

\hat{X}_{ij} : *i*존에서 *j*존으로의 장래 예측 통행분포량

O_i : *i*존의 장래 유출통행량

D_j : *j*존의 장래 유입통행량

C_{ij} : *i, j*간 마찰인자

k, α, β, γ : 계수

$$X_{ij} = K O_i D_j F_{ij}(c_{ij}) \quad (3)$$

K : 조정자

식(3)을 일반적으로 많이 이용하는 이중제약 형태로 변형하면 식(4)와 같다.

$$X_{ij} = A_i O_i B_j D_j C_{ij}^\beta \quad (4)$$

A_i, B_j : 조정자

식(2)는 통행분포량과 변수 간의 관계를 설명하는 계수를 추정하고, 변수와 통행분포량 간의 관계가 장래에도 같다고 가정하고 구축된 계수를 적용하여 장래 통행분포량을 예측하는 방식이다.

식(3) 및 식(4)의 형태는 많이 사용하고 있는 형태로, 총량 및 유출 통행량, 유입 통행량 등을 만족하게 하는 제약조건의 충족에 초점을 둔 형태이다.

본 연구에서는 분포 통행량의 예측 정확도 향상을 목적으로 하고 있으므로, 식(2) 형태의 중력모형을 적용하

였다. 상수(k) 및 계수(α, β, γ)는 실측 통행분포량과 변수 간의 모형 식(5)로부터 식(6)과 같이 대수 선형(Log-linear)화하여 회귀모형으로 추정한다.

$$\hat{X}_{ij} = k \frac{o_i^\alpha \cdot d_j^\beta}{c_{ij}^\gamma} \quad (5)$$

\hat{X}_{ij} : *i*존에서 *j*존으로의 실측 통행분포량

o_i : *i*존의 실측 유출통행량

d_j : *j*존의 실측 유입통행량

c_{ij} : *i, j*간 마찰인자

k, α, β, γ : 계수

$$\ln \hat{X}_{ij} = \ln K + \alpha \ln o_i + \beta \ln d_j - \gamma \ln c_{ij} \quad (6)$$

중력모형은 3개 변수를 적용하므로, 최소 5개 이상의 표본(통행분포량)이 필요하며, 이를 충족하지 못할 경우는 성장인자모형 등을 이용하여 통행분포 예측을 행한다.

2. 예측모형의 적합도 검증

구축하는 중력모형에서의 적합도는 추정된 계수를 적용한 중력모형으로부터 산출된 통행분포량(재현 값)이 모형구축 시 적용한 기준연도의 통행분포량과 어느 정도 근접하는가를 의미하는 것이다.

회귀분석에서 적합도 검증은 표준오차(Se)와 결정계수(R^2)에 의하여 행해지는데, 표준오차는 실측값이 회귀식으로부터 떨어져 있는 정도를 나타내는 것으로 식(7)로부터 산출할 수 있다.

$$Se = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2}{n^2 - 2}} \quad (7)$$

x_{ij} : *i*존에서 *j*존으로의 실측 통행분포량

\hat{x}_{ij} : *i*존에서 *j*존으로의 재현 통행분포량

n : 분석 존의 수

이 식(7)은 잔차들의 표준편차로 볼 수 있는데, 결과 해석은 실측값의 약 68%가 모형식의 $\pm 1 \cdot Se$ 안에 있게 되며, 실측값의 약 95%가 $\pm 2 \cdot Se$ 안에, 99.7%가 $\pm 3 \cdot Se$ 안에 있게 된다. 그러나 표준오차에 의한 적합도 검증은 실측단위에 따라서 변화가 있으므로 다른 분석에

서의 결과와 적합도 비교가 어려운 단점이 있다.

결정계수에 의한 적합도는 실측값의 평균을 기준으로 하여 실측값에 대한 예측값의 비율을 나타내는 것이다. 결정계수 산정 식은 식(8)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{x}_{ij} - \bar{x}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2} \quad (8)$$

\bar{x}_{ij} : 실측 통행분포량의 평균

결정계수는 0-1.0 사이 값을 가지며, 1.0에 근접할수록 예측 정확도가 높다고 판단할 수 있다.

구축하는 중력모형에서 계수추정은 전체 존간 통행분포량을 대상으로 하므로, 실측 통행분포량과 예측 통행분포량 간의 차이가 큰 존 페어들이 있을 수 있고, 차이가 적은 존 페어들이 있을 수 있다. 차이가 큰 존 페어는 일반적으로 통계학에서 쉽게 기술하는 오류로 해석되기 보다는 그 모형에서 적용된 계수가 부적합하다고 보는 것이 타당할 것이다. 즉, 차이가 큰 존 페어들의 통행분포량 재현에 적합한 계수를 추정하고, 추정된 계수를 중력모형에 적용하면 실측값과의 차이를 감소시킬 수 있다.

즉, 기존 방식인 단일 중력모형으로 예측하는 것 보다, 복수의 중력모형으로 예측하는 것이 예측 정확도를 높일 수 있게 된다.

III. 복수 중력모형과 적용대상 존 페어(Zone Pair)

1. 적합 존 페어와 비적합 존 페어

중력모형을 구축하고, 구축된 모형으로부터의 재현 값이 실측값과 근접되는 존 페어는 적용한 모형(계수)이 적합하다고 볼 수 있고, 재현 값과 실측 값의 차가 큰 경우는 적용한 모형이 부적합하다고 볼 수 있다.

여기서, 적합과 부적합은 절대적 개념이 아니라 상대적 개념이 되는데, 부적합은 통계학에서 다른 값들과 다른 형태를 보이는 실측값을 지칭하는 이상치(outliner)와 같은 의미로 해석할 수 있다.

통계학에서 이상치는 통상적으로 표준화 잔차(잔차를 척도 무관(Scale invariant)시킨 값, 식(9), 식(10))가 일정기준 (2.0, 또는 3.0) 이상인 경우로 정의하고 있다. 일반적으로 외표준화 잔차를 표준화 잔차로 인식하고 있다.

$$h_{ij}(\text{내표준화 잔차}) = 1/n^2 + (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 / S_{xx} \quad (9)$$

x_{ij} : i 존에서 j 존으로의 실측 통행분포량

\bar{x}_{ij} : 실측 통행분포량의 평균치

n : 분석 존페어의 수

S_{xx} : 실측 통행분포량의 표준편차

$$r_{ij}(\text{외표준화 잔차}) = e_{ij} / s \sqrt{1 - h_{ii}} \quad (10)$$

e_{ij} : i 존에서 j 존으로의 잔차통행량

즉, 잔차의 값이 큰 경우, 구축된 중력모형에서는 낮은 예측 정확도를 가지지만 잔차 값이 낮아지는 중력모형이 구축되면 높은 예측 정확도를 가지게 된다.

구축된 중력모형으로부터 표준화 잔차 크기에 따른 적합 존 페어와 비적합 존 페어 구분은 구축된 중력모형의 예측 정확도를 어느 정도 수준으로 할 것인가에 따라 다르게 할 수 있다.

적합 존 페어 집합은 중력모형을 구축하고 구축된 중력모형을 적용하는 존 페어들의 집합을 의미하며, 비적합 존 페어 집합은 예측 정확도를 높이기 위해 중력모형 구축에서 제외하는 존 페어들의 집합을 의미한다.

2. 복수 중력모형 적용과정

먼저 구축하는 중력모형의 예측 정확도 목표수준을 정한다. 예측 정확도 목표수준은 결정계수(R^2)로 하며, 결정계수 값이 80% 이상 또는 95% 이상 등으로 한다.

기준연도 전체 존 페어들을 적합 존 페어 집합으로 하고 중력모형을 구축한다. 구축 후, 결정계수가 목표수준을 초과하였으면 구축된 중력모형으로 장래 통행분포예측을 한다. 만약 구축된 중력모형의 결정계수가 목표수준에 도달되지 못하였다면, 표준화 잔차의 절대값이 큰 순으로 존 페어를 비적합 존 페어 집합으로 이동시키는데, 표준화 잔차값이 +이면 +비적합 존 페어 집합으로, 표준화 잔차값이 -이면 -비적합 존 페어 집합으로 이동시킨다.

이동시킨 후 적합 존 페어 집합 내의 존 페어들에 대해서만 중력모형을 구축하고, 구축한 중력모형의 결정계수가 목표수준에 도달할 때까지 반복한다.

하나의 중력모형을 구축한 후, 다음으로는 비적합 존 페어 집합에 대하여 똑같은 방법으로 중력모형을 구축한다. 비적합 존 페어 집합은 +비적합 존페어 집합이나, -

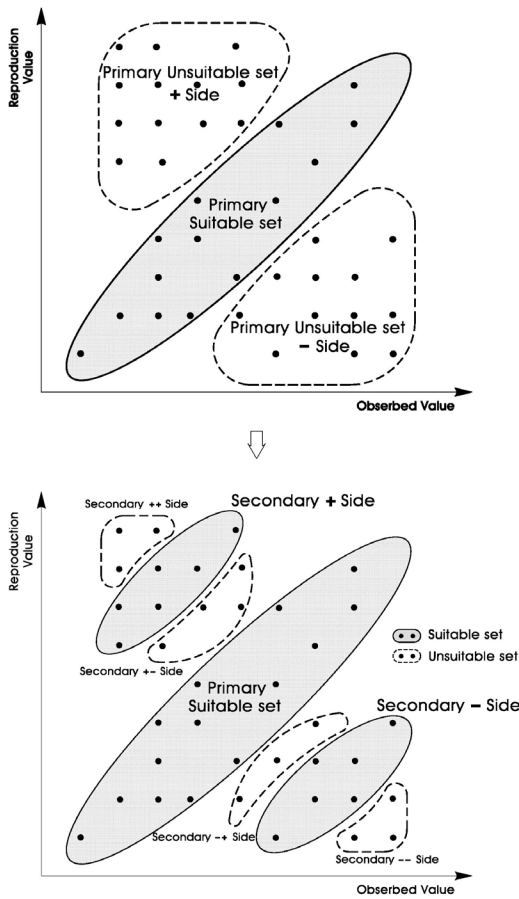


Figure 1. Plural gravity models making concept

비적합 존페어 집합 두 개가 형성되므로, 각 비적합 존페어 집합에 대해 차례대로 진행한다.

이 과정은 높은 결정계수를 목표수준으로 하고, 존 수가 많으면서(존 페어가 많음), 존간 통행분포량의 분산이 큰 경우, 다수의 반복이 진행되면서 중력모형들이 많이 구축되게 된다. 이 과정의 개념은 Figure 1에서 나타내었다.

적합 존 페어 집합에서 +비적합 존 페어 집합 또는 -비적합 존 페어 집합으로 이동되어온 존 페어가 5개 이상이면 그 비적합 존 페어 집합을 적합 존 페어 집합으로 하여 중력모형 구축을 한다. 그러나 비적합 집합에서 5개 미만의 존 페어 통행분포량이 있다면 통계적으로 중력모형을 구축할 수 없으므로(중력모형 변수가 3개이므로) 이 경우에 해당하는 존 페어들의 통행분포량 예측은 근접되어 구축된 중력모형을 적용하여 행한다. 그러나 첫 번째 단계에서 5개 미만의 존 페어가 비적합 집합에

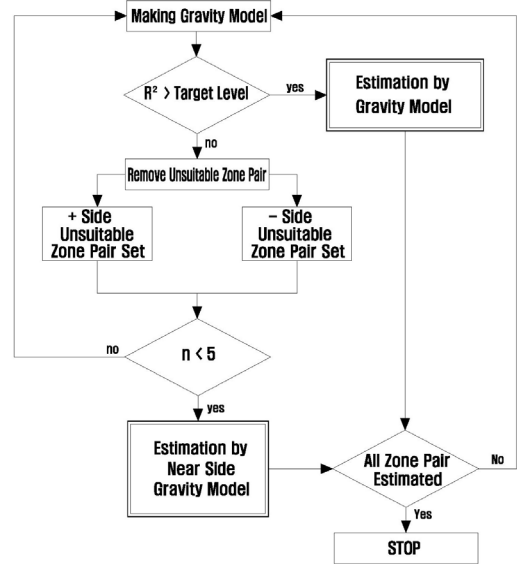


Figure 2. Adaptation process of plural gravity models

있는 경우는 적합 집합에서 구축된 중력모형 적용보다 전체 존 페어를 대상으로 구축했던 최초 중력모형을 적용하는 것이 더 바람직할 수 있다. 그것은 최초 중력모형 구축 시에는 비적합 집합 존페어의 통행분포량이 고려되어 구축된 것이고, 적합 집합에서의 중력모형에서는 이를 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 해당 존 페어에 대해서는 두 개 중력모형에서의 재현 값을 산출하고, 양호한 재현 값을 산출한 중력모형을 그 존 페어 장래 통행분포량 예측에 적용하도록 한다. 반복적인 진행 후, 어떠한 존 페어도 비적합 존 페어 집합에 남아있지 않다면 종료되고, 구축된 복수의 중력모형으로 장래 통행분포 예측을 한다.

이상의 진행 과정을 Figure 2에서 나타내었다.

IV. 유용성 검증

1. 검증과정

복수 중력모형 적용방법의 유용성을 검증하기 위하여 대구시에서 사람통행실태 조사를 통하여 구축된 1992년 O-D 자료와 2004년 O-D 자료를 이용하였다. 분석 존 규모는 7개의 대존으로 하였고, 존내 통행을 제외한 42개 존 페어의 분포통행량을 적용하였으며, 마찰인자 (C_{ij})는 존간 실거리를 적용하였다.

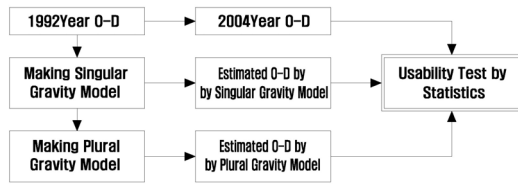


Figure 3. Usability test process

1992년을 기준연도로 하고 2004년을 목표연도로 하여 분석을 하였는데, 구축한 복수 중력모형으로부터의 예측결과를 2004년 실측값과 비교하는 과정으로 유용성을 검증하였다. 그리고 기존의 단일 중력모형에 의한 통행분포량 예측결과와 비교를 하였다.

2. 중력모형 구축

1) 단일 중력모형 구축

1992년 기준연도의 통행분포량을 이용하여 기존 방식대로 단일 중력모형을 구축한 결과는 Table 1에 나타났다.

구축된 중력모형의 결정계수는 51.3%로 분석되었고, 실측값과 구축된 중력모형에서의 재현 값 관계는 Figure 4에서 나타났다. 구축된 모형이 중위권 정도의 예측 정확도를 가질 것으로 판단된다.

Table 1. Parameters of singular gravity models

Const.	Parameters			R^2
K	α	β	γ	
2.396×10^{-6}	1.224	1.339	0.769	0.513

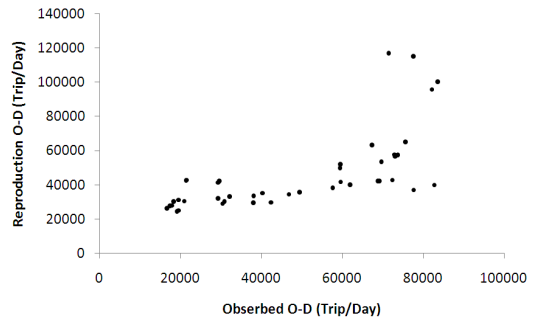


Figure 4. Reproducibility of singular gravity model

2) 복수 중력모형 구축

단일 중력모형에서 결정계수가 51.3%로 분석되었는데, 복수 중력모형 구축에서는 결정계수 90.0%를 목표수준으로 하였다. 복수 중력모형 구축결과는 Figure 5에서 나타내었다.

전체 42개 기준연도 통행분포량에서 결정계수를 90% 이상으로 하기 위하여 표준화 잔차 절대값이 큰 순으로 제거하였다. 제거된 존 페어는 22개로 전체 존 페어의 50%를 약간 넘어섰고, 제거된 22개 존 페어중 +표준화 잔차를 가지는 존 페어가 6개(1차 +비적합 집합에 속한 존 페어 6개)였으며, -표준화 잔차를 가지는 존 페어가 16개(1차 -비적합 집합에 속한 존 페어 16개)였다.

1차로 20개 존 페어의 통행분포량으로 중력모형을 구축하였는데, 결정계수가 90.6%였다.

다음으로 -비적합 집합을 대상으로 분석하였는데, 하나의 존 페어 제거도 없이 구축된 중력모형의 결정계수가 95.2%로 분석되었다.

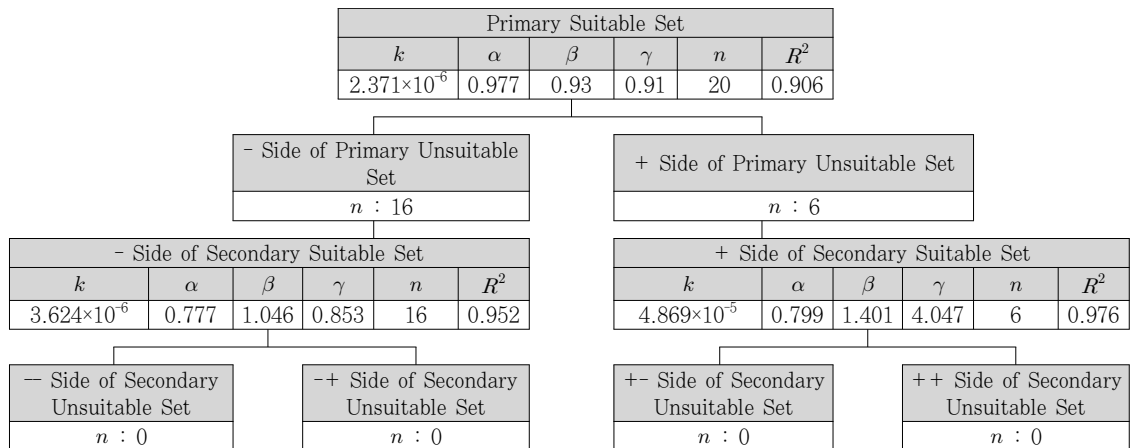


Figure 5. Mated plural gravity models

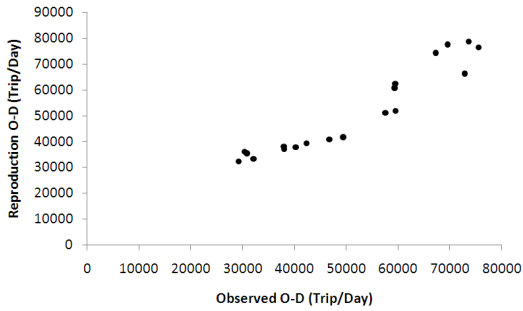


Figure 6. Reproducibility of primary suitable set gravity model

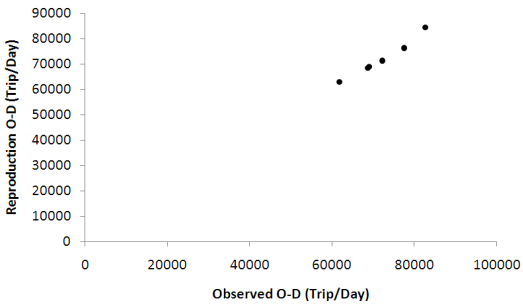


Figure 7. Reproducibility of secondary +side suitable set gravity model

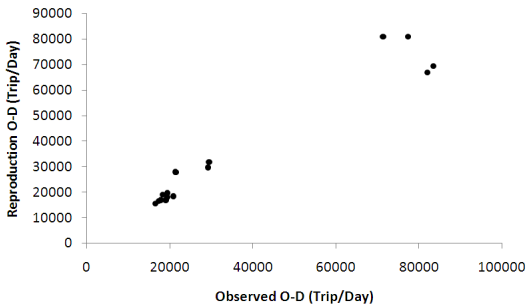


Figure 8. Reproducibility of secondary -side suitable set gravity model

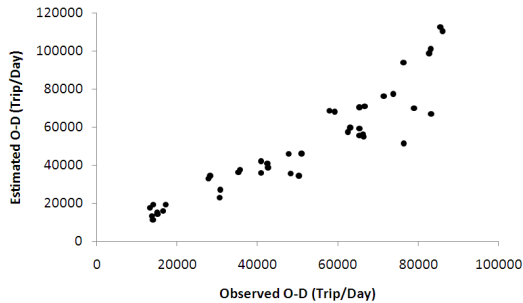


Figure 9. Reproducibility of plural gravity models

+비적합 집합의 분석에서도 6개의 존 페어 모두를 적용하여 구축한 중력모형의 결정계수가 97.6%로 상당히 높게 분석되었다.

2차 비적합 집합에 포함되어야 하는 존 페어는 하나도 남아있지 않으므로, 복수 중력모형 구축은 3개의 중력모형을 구축하고 종료되었다.

구축된 중력모형의 재현성은 Figure 6-Figure 8에 나타내었는데, 결정계수가 높으므로, 재현성도 좋게 나타났다.

3. 장래 통행분포량 예측과 유용성 검증

1) 장래 통행분포량 예측

구축된 복수 중력모형을 적용한 장래 통행분포 예측은 해당 존 페어가 속한 집합에서 구축된 중력모형을 적용하여 행한다. 본 사례분석에서 구축된 3개 중력모형 중 1차 적합 집합 중력모형으로는 20개 존 페어의 통행분포량을 예측하고, 2차 +적합 집합에서 구축된 중력모형으로는 6개, -적합 집합에서 구축된 중력모형에서는 16개 존 페어의 통행분포량을 예측한다.

복수 중력모형으로 2004년을 예측하였고, 예측결과와 2004년 실측값의 상관을 나타낸 것이 Figure 9이다.

실측값과의 상관은 0.925로 상당히 높은 예측 정확도를 가지는 것으로 분석되었다.

2) 비교 통계량

기존 하나의 중력모형으로 예측한 결과와 복수 중력모형으로 예측한 결과를 비교하기 위하여, 상관계수, PRMSE(백분평균제곱근 측정), PSD(백분표준편차측정), Theil의 부등계수 비교 통계량을 이용하였는데, 식(11)-식(14)와 같다.

PRMSE, PSD, Theil 부등계수는 값이 낮을수록 예측 정확도가 높은 것이고, 상관계수(r)는 값이 클수록 예측 정확도가 높다.

$$\text{상관계수}(r) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{X}_{ij} - \bar{\hat{X}}_{ij})(X_{ij} - \bar{X}_{ij})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{X}_{ij} - \bar{\hat{X}}_{ij})^2 \sum_{k=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2}} \quad (11)$$

X_{ij} : 실측 통행분포량

\hat{X}_{ij} : 모형에서의 예측 통행분포량

$$PRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\widehat{X}_{ij} - X_{ij})^2}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\widehat{X}_{ij} - X_{ij})} \quad (12)$$

$$PSD = 100 \times \frac{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|\widehat{X}_{ij} - X_{ij}|)}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad (13)$$

Theil의 부등계수(U) =

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \widehat{X})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}^2} + \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \widehat{X}_{ij}^2}} \quad (14)$$

3) 비교 결과

4개의 비교 통계량으로 단일 중력모형을 적용한 예측 결과와 복수 중력모형을 적용한 예측결과를 비교 통계량으로 분석한 결과는 Table 2에서 나타내었다. 단일 중력모형을 적용한 결과보다 복수 중력모형을 적용한 예측 결과가 월등히 우수한 것으로 분석되었다.

PRMSE 분석에서는 복수 중력모형에서 68.833으로 분석되었으나, 단일 중력모형은 101.971로 그 차가 상

Table 2. Estimation results comparison of singular gravity model and plural gravity models

Statics	PRMSE	PSD	THEIL's Inequality Coefficient	Correlation Coefficient (r)
Plural(A)	68.833	20.695	0.182	0.925
Singular(B)	101.971	53.97	0.448	0.601
Gap(A-B)	-33.138	-33.275	-0.266	0.324

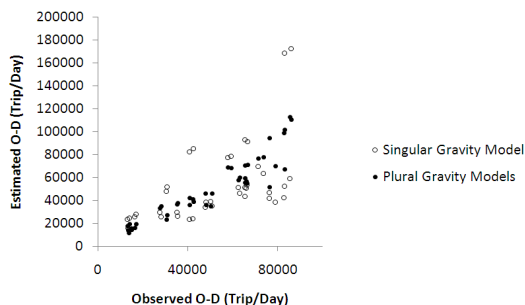


Figure 10. Reproducibility comparison of singular gravity model and plural gravity models

당하며, PSD 에서도 복수 중력모형의 분석결과는 단일 중력모형에서의 결과에 반 이하로 나타났다.

Theil 부등계수 분석에서는 복수 중력모형 분석결과가 0.182, 단일 중력모형의 분석결과는 0.448로 복수 중력 모형의 예측 정확도가 우수함을 보여주고 있다. 실측 값과의 상관도 단일 중력모형의 분석결과는 0.601로 보통의 상관으로 분석되었으나, 복수 중력모형은 0.925로 높은 상관을 나타내는 것으로 분석되었다. 두 방법의 실측값과의 상관관계 비교는 Figure 10에서 나타내었다.

V. 결론 및 향후과제

교통수요예측에서 절대적 중요한 통행분포량의 예측은 중력모형에 의해 많이 이루어져 왔다. 중력모형은 이해가 쉽고 단순한 구조에 비해 비교적 높은 예측 정확도를 가지는 모형으로 인식되어 왔다.

물론 중력모형은 장점만이 있는 것이 아니라, 존재 통행의 예측문제, 마찰인자의 산정과 적용문제 등 단점도 있다. 중력모형의 단점을 개선하기 위한 연구는 지속해서 진행됐고, 성과 있는 연구들도 제시되고 있다.

본 연구에서 개발한 방법은 통행분포 예측 정확도를 높이기 위하여 기존 단일 중력모형을 구축하여 통행분포량을 예측하는 것을 복수의 중력모형을 구축하여 예측하는 방법이다.

개발한 방법은 기본적인 중력모형 적용방법의 확장으로 중력모형의 장점이 그대로 유지되는 효과도 가진다.

유용성의 검증결과, 기존 하나의 중력모형을 적용하였을 때는 높지 않은 예측 정확도를 얻었으나, 복수 중력모형을 적용한 경우에는 상당히 높은 예측 정확도를 얻는 것으로 분석되었다.

이 방법의 단점은 기존 단일 중력모형을 적용할 때보다 예측 소요시간이 길어진다는 점인데, 이는 동적(動的)인 통행분포량 예측 시 해결해야 할 과제가 될 수 있으나, 정적(靜的)인 경우는 문제가 되지 않는다. 즉, 어느 정도 예측 소요시간이 증가하여도, 분포통행량의 예측 정확도를 높일 수 있다면 예측 소요시간이 긴 방법을 적용하는 것이 당연히 타당한 것이다. 그리고 교통량 배분과 달리 통행분포량의 예측은 대부분은 정적(靜的)으로 행해지고 있다.

차후 연구과제는 더욱 다양한 통행분포량 예측 조건들에서 본 연구에서 개발한 복수 중력모형 적용 방법의 예측결과와 성장인자모형 등 타 예측모형들에서의 예측

