

■ 論 文 ■

균형 통행분포모형연구

Equilibrium trip distribution model

임 용 택

(전남대학교 물류교통학전공 부교수)

목 차

- | | |
|--------------------|--------------|
| I. 서론 | IV. 모형의 평가 |
| II. 중력모형 | 1. 평가예제 |
| III. 균형 통행분포모형 | 2. 분석결과 |
| 1. 중력모형의 균형통행분포 조건 | V. 결론 및 향후연구 |
| 2. 균형조건 풀이 알고리즘 | 참고문헌 |

Key Words: 균형통행분포, 중력모형, 수리모형, 풀이 알고리즘, 고정점이론
 equilibrium trip distribution, gravity model, mathematical program, solution algorithm, fixed point theorem

요 약

통행분포(trip distribution)에서는 첫 단계인 통행발생(trip generation)에서 구해진 통행 유출량(trip production)과 통행 유입량(trip attraction)을 연결시키는 작업이 행해진다. 즉 하나의 존에서 유출되는 통행량을 다른 존에 분포시키는 과정이라 할 수 있다. 그런데, 통행분포모형에 사용되는 통행시간이나 비용 등의 통행저항들이 통행수요가 변함에 따라 함께 변함에도 불구하고 현재 사용하고 있는 중력모형에서는 이를 고려하지 못하는 한계를 갖고 있다. 즉, 목적지까지의 통행비용이 커지면 통행수요는 줄어들며, 반대로 통행비용이 적으면 통행수요가 커지는 것과 같은 관계가 존재하게 된다. 이런 측면에서 본 연구는 통행분포시 목적지간에 균형(equilibrium condition of trip distribution)이 존재함을 증명한다. 이를 위하여 대표적인 통행분포모형인 중력모형을 이용하여 통행분포시 균형조건을 유도하며, 이런 균형조건을 만족시키는 통행분포를 구하는 방법론을 제시한다. 또한, 본 연구에서 제시된 모형은 간단한 예제를 통하여 평가하며, 통행분포시 균형상태의 해가 도출됨을 확인한다.

Trip distribution is to connect travel demand for each OD pair based on travel cost, trip production and attraction derived from trip generation step. In real world the travel cost is a function of travel demand, but existing models could not fully consider such functional relation between travel cost and demand, which leads to an equilibrium in trip distribution model. This paper proves the equilibrium trip distribution by using gravity model. In order to obtain such equilibrium this paper also presents a solution algorithm based on fixed point theorem. The algorithm will be tested with an example and confirmed the equilibrium solution of trip distribution.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0021021).

I. 서론

전통적인 4단계교통수요모형의 두 번째 단계인 통행 분포(trip distribution)에서는 첫 단계인 통행발생(trip generation)에서 구해진 통행 유출량(trip production)과 통행 유입량(trip attraction)을 연결시키는 작업이 행해진다. 즉 하나의 존에서 유출되는 통행량을 다른 존에 분포시키는 과정이라 할 수 있다. 현재 사용되고 있는 통행분포 모형은 크게 성장인자 모형(growth factor model)과 중력모형(gravity model)으로 나누어지며, 성장인자 모형은 현재의 통행추세가 장래에도 지속될 것이라는 가정하에 성장인자를 이용하여 기종점간 통행수요를 분포시키는 방법이다. 이에 반해 중력모형은 기종점간 통행저항을 고려하기 때문에 좀 더 현실적인 통행분포모형으로 이에 대해서는 국내외 다수의 연구들이 수행되어 왔다(Hyman, 1969; Evans, 1970; Wilson, 1970; 윤성순, 1993; 김형진, 1996; 노정현, 1991; 노정현외, 2005; 신언교외, 1999; 원재무외, 2001; 임용택외, 2006), 이들 모형들은 대부분 통행분포(trip distribution)모형으로 널리 사용되는 중력모형(gravity model)의 통행저항함수(travel impedance function)에 존재하는 파라메타(parameter)를 추정하는 방법을 제시하고 있다.

그런데, 중력모형에 사용되는 통행시간이나 비용 등과 같은 통행저항들이 통행수요가 변함에 따라 함께 변함에도 불구하고 현재 사용하고 있는 중력모형에서는 이를 고려하지 못하는 한계를 갖고 있다. 즉, 통행분포단계에서 이들 통행저항이 일정한 상수값으로 적용된다는 문제가 있다. 또한, 통행자가 목적지를 선택할 때 목적지까지 통행하는데 소요되는 비용(저항)과 통행수요간에 일정한 관계가 존재한다는 점을 간과하고 있다. 즉, 목적지까지의 통행비용이 커지면 통행수요는 줄어들며, 반대로 통행비용이 적으면 통행수요가 커지는 것과 같은 관계가 존재하게 된다. 이는 마치 통행배정모형(traffic assignment)에서 경로선택(route choice)시 경로들간에 Wardrop의 사용자 균형(user equilibrium)이 존재하는 것처럼, 통행분포시에도 목적지간에 균형이 존재할 수 있다는 것이다. 그러나, 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

이런 측면에서 본 연구는 통행분포시 목적지간에 균형(equilibrium condition of trip distribution)이

존재함을 증명한다. 이를 위하여 대표적인 통행분포모형인 중력모형(gravity model)을 이용하여 통행분포시 균형조건을 유도하며, 이런 균형조건을 만족시키는 통행분포를 구하는 방법론을 제시한다. 또한, 본 연구에서 제시된 모형은 간단한 예제를 통하여 평가하며, 통행분포시 균형상태의 해가 도출됨을 확인한다. 여기서 하나 유의할 점은 본 연구의 기본전제로서 단기 균형만을 고려한다는 것이다. 즉, 토지이용변화에 따른 목적지 변화와 같은 장기적인 균형은 본 연구에서는 고려하지 않는다는 점이다. 또한, 통행자의 개인특성과 같은 통행비용외의 요소들도 목적지 선택에 영향을 미치나 이들 통행비용이외의 요소들의 영향은 없는 것으로 가정한다.

다음장에서는 대표적인 통행분포모형인 중력모형에 대하여 간단히 살펴보고, 제III장에서는 균형통행분포조건과 이를 구하기 위한 풀이 알고리즘을 제시한다. 제IV장에서는 예제를 통하여 제시된 알고리즘을 평가하며, 결론 및 향후 연구과제는 제V장에서 정리한다.

II. 중력모형

중력모형(gravity model)은 기종점간의 통행저항, 즉 통행시간이나 비용을 고려하여 통행수요를 분포시키는 모형으로 총량제약 중력모형(total flow constrained gravity model), 유출제약 중력모형(production-constrained gravity model), 유입제약 중력모형(attraction-constrained gravity model), 그리고 이중제약 중력모형(doubly constrained gravity model)등이 있다. 이들 모형중 이중제약 중력모형은 다음과 같이 표현된다.

$$q_{rs} = k_r O_r k_s D_s f_{rs}(c_{rs}) \quad (1)$$

$$\text{제약조건 : } \sum_s q_{rs} = O_r \quad (\text{유출제약}) \quad (2)$$

$$\sum_r q_{rs} = D_s \quad (\text{유입제약}) \quad (3)$$

여기서, O_r 은 기점 r 의 통행유출량(trip production)이며, D_s 는 종점 s 의 통행 유입량(trip attraction)이고, c_{rs} 는 기종점 rs 간 통행비용이다. 또한, k_r, k_s 는 기점 r 와 종점 s 의 통행유출입량과 관련된 조정계수(balancing factor)로 제약조건식(2),(3)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\sum_s k_r O_r k_s D_s f_{rs}(c_{rs}) = O_r \rightarrow k_r = \frac{1}{\sum_s k_s D_s f_{rs}(c_{rs})}$$

$$\sum_r k_r O_r k_s D_s f_{rs}(c_{rs}) = D_s \rightarrow k_s = \frac{1}{\sum_r k_r O_r f_{rs}(c_{rs})}$$

그런데, k_r, k_s 는 쉽게 구해지지 않는데, 수식에서 보듯이 k_s 수식에 k_r 이 포함되어 있고, k_r 식에 k_s 가 있기 때문이다. 이를 풀기 위하여 이들을 반복적으로 수행하는 Furness 방법이 제시되어 있다. 여기서, $f_{rs}(c_{rs})$ 는 기중점간 저항함수(impedance function)로 일반적으로 다음과 같은 함수를 주로 사용하며, 함수형태는 <그림 1>과 같다(Ortuzar et al., 1994)

- ① 지수함수(exponential function)

$$f_{rs}(c_{rs}) = \exp(-\beta c_{rs})$$

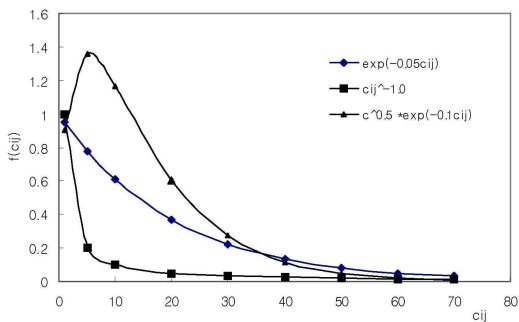
- ② 파워함수(power function)

$$f_{rs}(c_{rs}) = c_{rs}^{-\alpha}$$

- ③ 결합함수(combined function)

$$f_{rs}(c_{rs}) = c_{rs}^{-\alpha} \exp(-\beta c_{rs})$$

여기서, α, β 는 각 저항함수의 파라메타(parameter)로 이를 추정하는 연구들이 국내외에 다수 진행되어 왔다. 외국의 경우 Hyman(1969), Evans(1970), Wilson(1970) 등이 있으며, 국내에서는 1990년대 이후 최근에 여러 논문들이 발표되고 있다. 윤성순(1993)은 중력모형의 파라메터 정산을 위한 새로운 방법론을 제시하였으며, 김형진(1996)은 카이제곱검증을 통하여 중력모형의 적합성을 평가하였다. 노정현(1991)은 엔트로피 모형의 파라메타와 조정계수를 동시에 구할 수 있는 연립방정식과 이를 풀기 위한 Hybrid방법을 제시하였으며, 최근 노정현외



<그림 1> 통행저항함수형태

(2005)에서는 고속도로 차량을 대상으로 중력모형과 간섭기회모형을 비교하였다. 신언교외(1999)와 원제무외(2001)는 전국 고속도로를 대상으로 중력모형과 엔트로피 극대화모형의 파라메타를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한, 임용택외(2006)는 장래 통행패턴을 고려하여 중력모형의 파라메타를 추정하는 새로운 방법을 제시하였다.

III. 균형 통행분포모형

여기서는 본 연구에서 제시하는 중력모형의 균형조건에 대하여 기술하고, 이런 균형상태를 구하기 위한 풀이 알고리즘을 설명한다.

1. 중력모형의 균형통행분포 조건

[정리] 중력모형의 균형통행분포

지수함수(exponential function)를 저항함수로 갖는 이중제약 중력모형(doubly constrained gravity model)의 균형조건은 다음과 같다.

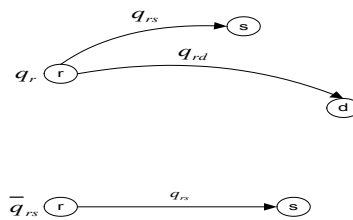
$$c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{k_s D_s}\right) = c_{rd} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rd}}{k_d D_d}\right) \equiv E_r^D \quad (4)$$

여기서, E_r^D 는 이중제약조건 중력모형에서 기점 r 에서의 균형상태 통행비용이다.

(증명)

이중제약 중력모형의 균형상태를 알아보기 위하여 먼저, 기점 r 에서 2개의 종점 s 와 d 로의 통행분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{rs} = k_r O_r k_s D_s \exp(-\beta c_{rs})$$



<그림 2> 균형 통행분포

$$q_{rd} = k_r O_r k_d D_d \exp(-\beta c_{rd})$$

여기서, q_{rs} 를 q_{rd} 로 나눈 뒤 양변에 로그를 취하면 다음과 같다.

$$\frac{q_{rs}}{q_{rd}} = \frac{k_s D_{s^*} \exp(-\beta c_{rs})}{k_d D_{d^*} \exp(-\beta c_{rd})}$$

$$\ln\left(\frac{q_{rs}}{q_{rd}}\right) = \ln\left(\frac{k_s D_{s^*} \exp(-\beta c_{rs})}{k_d D_{d^*} \exp(-\beta c_{rd})}\right)$$

따라서, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{k_s D_{s^*}}\right) = c_{rd} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rd}}{k_d D_{d^*}}\right) \equiv E_r^D$$

즉, 기점 r 에서 임의의 2개의 종점 s, d 의 통행량과 비용간에는 위와 같은 관계가 성립되며, 이 관계식이 이중 제약(doubly constrained) 중력모형에서의 균형(equilibrium)상태이다. 식에서 보듯이 균형상태에서는 기종점간 통행비용뿐만 아니라 통행수요와의 관계로 이루어짐을 알 수 있다. 또한, 만약 $\beta \rightarrow \infty$ 이면, $c_{rs} = c_{rd}$ 가 된다(증명끝).

위와 동일한 방법으로 총량제약 중력모형, 유출제약 중력모형, 그리고 유입제약 중력모형에 대해서도 균형조건을 구할 수 있으며, 이들 균형조건들은 [부록]에 기술되어 있다.

2. 균형조건 풀이 알고리즘

앞에서 증명한 균형 통행분포 조건을 만족시키는 해는 고정점 이론(fixed point theorem)에 기초하여 쉽게 구할 수 있다. 이 방법은 중력모형을 직접 적용하는 것으로 통행배정문제에도 적용한 연구가 있다(임용택, 2003). 만약 중력모형에서 임의의 기점 r 에서 각 종점까지의 통행비용(c_{rs})을 정확히 알 수 있다면, 균형상태의 통행분포(q_{rs})는 바로 구할 수 있다. 그러나, 각 종점까지의 통행비용은 통행수요에 따라 변하기 때문에 통행비용(c_{rs})과 통행분포(q_{rs})간에 반복적인 순환과정이 필요하다. 이는 고정점이론(fixed point theorem)에 따라 유일한 균형해가 존재하게 되며, 따라서 일반적으로 다음과 같은 알고리즘을 구성할 수 있다.

$$q_{rs}^n = c_{rs}(q_{rs}^{n-1}), \text{ 반복수 } n=0,1,2 \dots$$

이런 반복과정은 모든 기점에서 종점간 동일한 균형 값(E_r)을 갖을 때까지 반복되며, 이를 이중제약 중력모형의 경우에 대하여 정리하면 다음과 같다.

[step 0] 초기화(initialization)

반복횟수 $n=0$ 설정

초기값 설정 : O_r, D_s, β

초기 설계변수 q_{rs}^0 설정

[step 1] $n=n+1$

[step 2] q_{rs}^{n-1} 를 가지고 c_{rs}^{n-1} 계산 및 Furness방법에 의해 k_r^{n-1}, k_s^{n-1} 계산

[step 3] 통행수요 갱신(update) 및 균형값 계산

$$q_{rs}^n = k_r^{n-1} O_r k_s^{n-1} D_s \exp(-\beta c_{rs}^{n-1})$$

$$E_r^{D,n} = c_{rs}^{n-1} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}^n}{k_s^{n-1} D_s}\right) \quad \forall s$$

[step 4] 수렴성 검토(convergence test)

$$\text{만약 } \frac{\max |E_{rs}^{D,n} - E_{rd}^{D,n}|}{\max_{w \in M} \{E_{rw}^{D,n}\}} < \epsilon,$$

$\forall s \neq d \in M(\text{destination set})$ 이면, 정지

그렇지 않으면, [단계1]로 진행

여기서, ϵ 는 수렴조건으로 아주 작은 값으로 미리 설정

위 풀이과정에서 [step 2]의 Furness방법은 k_r^{n-1} 과 k_s^{n-1} 를 반복해서 구하는 방법으로 다음과 같다.

(단계0) 반복수 $m=0$

$k_s^m = 1$ 로 놓고 다음 식으로 k_r^m 값 계산

$$k_r^m = \frac{1}{\sum_s k_s^m D_s \exp(-\beta c_{rs}^{m-1})}$$

(단계1) $m=m+1$

(단계2) 구해진 k_r^{m-1} 값을 다음 식에 대입하여 k_s^m 값 계산

$$k_s^m = \frac{1}{\sum_r k_r^m O_r \exp(-\beta c_{rs}^{m-1})}$$

(단계3) 구해진 k_s^m 값을 아래 식에 대입하여 k_r^m 값 계산

$$k_r^m = \frac{1}{\sum_s k_s^m D_s \exp(-\beta c_{rs}^{m-1})}$$

(단계4) 수렴성 검토

$$\text{만약 } |k_i^m - k_i^{m-1}| \approx 0 \quad i=r,s \text{ 이면 중지}$$

그렇지 않으면 (단계1)로 진행

IV. 모형의 평가

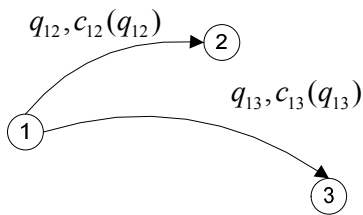
1. 평가 예제

본 연구에서 제시한 모형을 유출제약 중력모형 (production-constrained gravity model)과 이중제약 중력모형(doubly constrained gravity model)에 대하여 평가코자 한다. 평가를 위하여 <그림 3>과 같이 3개의 존으로 이루어진 교통망을 이용한다. 각 존별 통행발생량(O_r)과 통행유입량(D_s)은 <표 1>과 같으며, 이들 기종점간 통행비용함수는 다음과 같이 각 기종점간 통행수요의 함수로 구성한다. 즉, 통행수요가 증가함에 따라 증가하는 형태이다.

[기종점간 통행비용함수]

$$\begin{aligned} c_{11} &= 2 + 0.05 \cdot q_{11} & c_{12} &= 10 + 0.05 \cdot q_{12} & c_{13} &= 10 + 0.05 \cdot q_{13} \\ c_{21} &= 10 + 0.05 \cdot q_{21} & c_{22} &= 2 + 0.05 \cdot q_{22} & c_{23} &= 10 + 0.05 \cdot q_{23} \\ c_{31} &= 10 + 0.05 \cdot q_{31} & c_{32} &= 10 + 0.05 \cdot q_{32} & c_{33} &= 2 + 0.05 \cdot q_{33} \end{aligned}$$

또한, 중력모형에 포함된 통행저항함수의 파라메타 $\beta = 0.05$ 로 설정한다.



<그림 3> 평가 예제교통망

<표 1> 기종점별 통행유출량과 통행유입량

| O \ D | 1 | 2 | 3 | O_r |
|-------|-----|-----|-----|-------|
| 1 | | | | 160 |
| 2 | | | | 250 |
| 3 | | | | 180 |
| D_s | 200 | 170 | 220 | 590 |

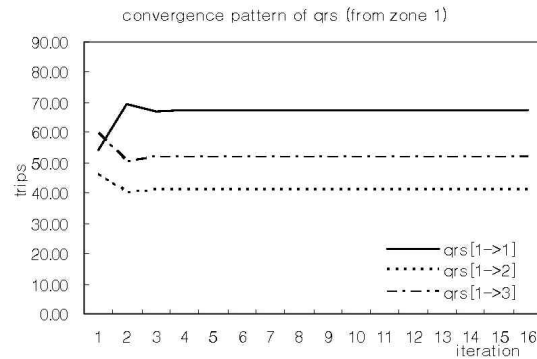
2. 분석결과

1) 유출제약(production-constrained)인 경우

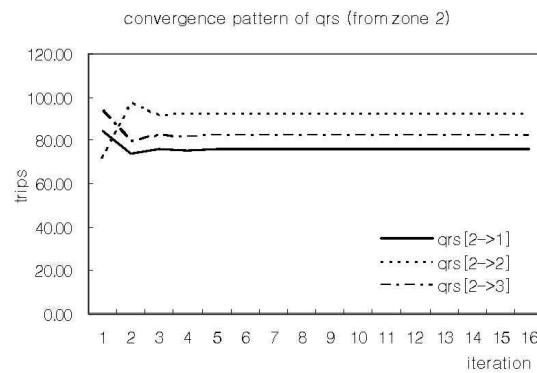
(1) 수렴성 및 분석결과

먼저, 각 기종점쌍별 통행분포의 수렴과정은 <그림 4>에 나타나 있다. 그림(a)는 기점1에서 각 종점으로 분포되는 통행수요의 변화를 보여주고 있는데, 그림에서 보듯이 각 종점별로 통행하는 수요는 반복수 3~4회에 이르면 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 기점2에서 유출하는 통행수요 역시 그림(b)와 같이 일정한 값으로 수렴하고 있다(기점3도 동일하여 여기서는 생략함).

최종적으로 구해진 각 존쌍별 통행분포결과가 <표 2>에 제시되어 있다. 표에서 보듯이 각존별로 분포된 유출량의 합은 <표 1>과 일치하여 유출제약(production-constraint) 조건이 만족함을 알 수 있다. 그러나, 통행유입량의 합은 <표 1>과 일치하지 않는데, 이는 유출량 제약조건만을 고려했기 때문이다. <표 3>은 최종적으로 구해진 통행분포모형의 조정계수(balancing factor)이다.



(a) 출발존 1



(b) 출발존 2

<그림 4> 각존쌍별 통행수요의 수렴과정(유출제약)

<표 2> 산출된 최종 통행분포(유출제약)

| | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| D \ O | 1 | 2 | 3 | Q_r |
| 0 | | | | |
| 1 | 67.36 | 40.99 | 51.65 | 160.00 |
| 2 | 75.76 | 92.20 | 82.04 | 250.00 |
| 3 | 53.02 | 45.88 | 81.10 | 180.00 |
| D_s | 196.13 | 179.07 | 214.80 | 590.00 |

<표 3> 산출된 조정계수(유출제약)

| | | |
|---|----------|----|
| 존 | k_r | 비고 |
| 1 | 0.002753 | |
| 2 | 0.003019 | |
| 3 | 0.002772 | |

(2) 균형상태

본 연구에서 제시한 모형이 균형(equilibrium)에 도달했는지는 <그림 5>와 <표 4>를 통하여 확인할 수 있다. 제III장 제1절에서 기술한 것처럼, 본 연구에서 제시한 유출제약 중력모형의 균형상태(부록 참조)로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 즉, <그림 5>의 (a)와 (b)에서 보듯이 반복수가 증가함에 따라 균형해에 도달하고 있다. <표 4>는 각 기종점쌍별로 E_r^P 값이 서로 일치하여

<표 4> 유출제약 중력모형 균형조건 확인(E_r^P)

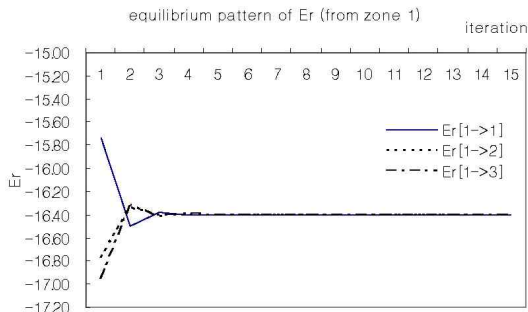
| | | | | |
|-------|-------|----------|----------|---------|
| 기점(r) | 종점(s) | c_{rs} | q_{rs} | E_r^P |
| 1 | 1 | 5.37 | 67.36 | -16.39 |
| | 2 | 12.05 | 40.99 | -16.39 |
| | 3 | 12.58 | 51.65 | -16.39 |
| 2 | 1 | 13.79 | 75.76 | -5.63 |
| | 2 | 6.61 | 92.20 | -5.63 |
| | 3 | 14.10 | 82.04 | -5.63 |
| 3 | 1 | 12.65 | 53.02 | -13.90 |
| | 2 | 12.29 | 45.88 | -13.90 |
| | 3 | 6.06 | 81.10 | -13.90 |

여기서, $E_r^P = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln(\frac{q_{rs}}{D_s}) \quad \forall s$

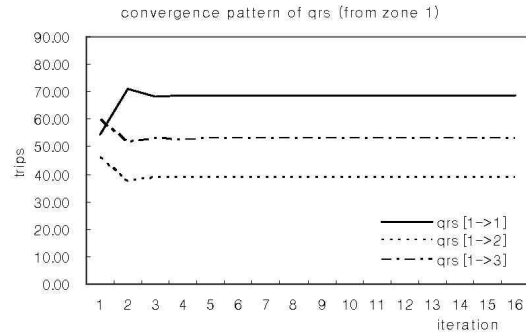
균형해에 도달했음을 다시 한번 확인할 수 있다. 예를 들어, 기점1에서 종점1,종점2, 그리고 종점3으로 통행하는 경우, 통행비용(c_{rs})과 통행수요(q_{rs})은 서로 다르지만, E_r^P 값은 모두 동일한 -16.39로 균형조건을 만족하고 있다. 즉, 본 연구에서 제시한 알고리즘이 균형해를 도출함을 확인할 수 있다.

2) 이중제약(doubly-constrained)인 경우

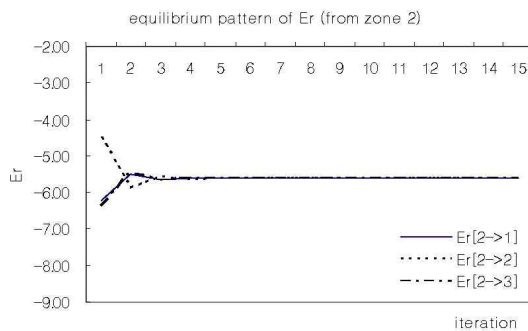
유출제약과 유입제약을 동시에 고려한 이중제약 중력



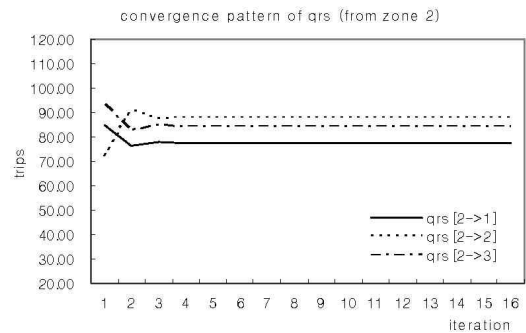
(a) 출발존 1



(a) 출발존 1



(b) 출발존 2



(b) 출발존 2

<그림 5> 각 존쌍별 균형(E_r) 패턴(유출제약)

<그림 6> 각존쌍별 통행량의 수렴과정(이중제약)

<표 5> 산출된 최종 통행분포(이중제약)

| | | | | | |
|-------|---|--------|--------|--------|--------|
| | D | | | | |
| 0 | | 1 | 2 | 3 | O_r |
| 1 | | 68.51 | 38.66 | 52.83 | 160.00 |
| 2 | | 77.57 | 88.07 | 84.37 | 250.00 |
| 3 | | 53.93 | 43.27 | 82.80 | 180.00 |
| D_s | | 200.00 | 170.00 | 220.00 | 590.00 |

<표 6> 산출된 조정계수(이중제약)

| | | |
|---|----------|----------|
| 존 | k_r | k_s |
| 1 | 0.274381 | 0.010234 |
| 2 | 0.303407 | 0.009407 |
| 3 | 0.276156 | 0.010292 |

<표 7> 이중제약 중력모형 균형조건 확인(E_r^D)

| | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|---------|
| 기점(r) | 종점(s) | c_{rs} | q_{rs} | E_r^D |
| 1 | 1 | 5.43 | 68.51 | 75.64 |
| | 2 | 11.93 | 38.66 | 75.64 |
| | 3 | 12.64 | 52.83 | 75.64 |
| 2 | 1 | 13.88 | 77.57 | 86.57 |
| | 2 | 6.40 | 88.07 | 86.57 |
| | 3 | 14.22 | 84.37 | 86.57 |
| 3 | 1 | 12.70 | 53.93 | 78.12 |
| | 2 | 12.16 | 43.27 | 78.12 |
| | 3 | 6.14 | 82.80 | 78.12 |

여기서, $E_r^D = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{q_{rs}}{k_s D_s} \right) \quad \forall s$

모형을 적용한 경우의 수렴과정이 <그림 6>에 나타나 있다. 그림(a)에서 보듯이 기점1에서 각 종점별로 통행하는 수요는 반복수 3~4회에 이르면 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있으며, 기점2에서 유출하는 통행수요 역시 그림(b)와 같이 일정한 값으로 수렴하고 있다.

최종적으로 각 존쌍별 통행분포결과가 <표 5>에 제시되어 있다. 표에서 보듯이 각존별로 분포된 유출량의 합과 유입량의 합이 <표 1>과 정확히 일치하여 이중제약 조건을 모두 만족함을 알 수 있다. 이때 최종적으로 구해진 통행분포모형의 조정계수는 <표 6>에 나와 있다.

또한, 이중제약 중력모형의 균형상태(equilibrium)에 도달했는지는 <표 7>을 통하여 알 수 있는데, 각 기점별로 구해진 E_r^D 값이 모두 동일하여 제III장 제1절에서 기술한 균형해에 도달했음을 다시 한번 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 통행분포시 목적지를 선택하는 과정에 균형(equilibrium condition of trip distribution)이

존재함을 증명하고 이런 균형조건을 만족시키는 균형해를 구하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 위하여 대표적인 통행분포모형인 중력모형을 이용하여 통행분포시 균형조건을 유도하였다. 또한, 본 연구에서 제시된 모형은 간단한 예제를 통하여 평가하였으며, 통행분포시 균형상태의 해가 도출됨을 확인하였다. 학술적인 측면에서 균형상태를 확인하는 것은 의미가 있는데, 균형상태에서는 더 이상 통행분포의 변화(목적지 변화)가 발생하지 않는 안정된 상태이기 때문이다.

본 연구에서 제시한 통행분포시 균형은 통행배정시의 경로간 사용자 균형(user equilibrium)에 상응하는 개념이다. 따라서 이런 균형상태는 통행수단 선택(transport mode choice)시에도 존재한다(임용택, 2010). 또한, 통행분포 및 통행수단선택 그리고 통행배정과정을 통합한 모형에서도 균형이 존재할 것으로 예상되며, 특히, 네트워크의 혼잡상태를 고려해야 좀 더 현실적이기 때문에 통행배정을 도입하는 부분은 의미가 있다고 판단되어 이들 연구는 향후과제로 남겨 둔다. 또한, 균형(equilibrium)에 대응하는 최적 통행분포(system optimum trip distribution)에 대한 연구도 남아 있다. 이외에 본 연구에서는 통행비용만을 고려하여 목적지 선택을 결정하였으나, 통행자의 직장여부, 가족구성원의 나이와 학교, 성별, 집값 등 통행비용이외의 요소들에 의한 영향을 고려한 연구도 남아 있다.

참고문헌

1. 김형진(1996), “중력모형의 적합도 검증”, 대한교통학회지, 제14권 제1호, 대한교통학회, pp.43~50.
2. 노정현(1991), “엔트로피 극대화 통행배분모형의 효율적 해법개발”, 대한교통학회지, 제9권 제2호, 대한교통학회, pp.121~126.
3. 노정현, 김재진, 김태균(2005), “고속도로 이용차량에 대한 통행분포모형의 적합성 연구: 중력모형과 간접기회모형의 비교”, 국토연구, 제45권, pp.93~104.
4. 신연교·황부연·신승원(1999), “고속도로 영업소간 기·종점통행량으로부터 교통존간 기·종점통행량 추정기법 연구”, 대한교통학회지, 제17권 제1호, 대한교통학회, pp.7~17.
5. 원재무·강경우·정용기 (2001) “고속도로 O/D자료를 이용한 Entropy극대화모형의 통행저항계수 추

정에 관한 연구”, 대한국토도시계획학회지, 제36권 제7호, 대한국토도시계획학회, pp.101~110.

6. 윤성순 (1993) “일반화중력모형 파라미터의 새로운 최우추정기법 개발”, 대한교통학회지, 제11권 제1호, 대한교통학회, pp.55~66.

7. 임용택 (2003), “확률적 로짓 통행배정모형의 해석 알고리즘”, 대한교통학회지, 제21권 제2호, 대한교통학회, pp.95~105.

8. 임용택·김상구 (2006) “장래 통행패턴을 고려한 중력모형의 파라미터 정산방법”, 국토연구 제50권, pp.93~104.

9. 임용택 (2010), “로짓 수단선택모형의 균형연구”, 대한교통학회지, 제28권 제5호, 대한교통학회, pp.131~139.

10. Ortuzar,J., L.G.Willumsen (1994) Modelling Transport, Wiley.

11. Evans A.W.(1970) “Some properties of trip distribution methods”, Transportation Research 4, pp.19~36.

12. Hyman,G.M.(1969) “The calibration of trip distribution models”, Environment and Planning 1(3), pp.105~112.

13. Wilson,A.G.(1970) “Entropy in urban and regional modelling”, London, Pion Ltd

14. Wardrop,J.G.(1952) “Some theoretical aspects of road traffic research”, Proceedings, Institution of Civil Engineers II(1), pp.325~378.

✉ 주 작 성 자 : 임용택
 ✉ 교 신 저 자 : 임용택
 ✉ 논문투고일 : 2010. 10. 16
 ✉ 논문심사일 : 2010. 11. 26 (1차)
 2010. 12. 27 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2010. 12. 27
 ✉ 반론접수기한 : 2011. 4. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필

[부록] 제약조건별 중력모형의 균형조건(지수함수가 저항함수인 경우)

| 제약조건 | 표준형 | 조정계수 | 균형조건 |
|----------------------------------|--|--|---|
| 총량제약 (Total flow constrained) | $q_{rs} = k O_r D_s \exp(-\beta c_{rs})$ s.t $\sum_r \sum_s q_{rs} = q$ | $k = \frac{q}{\sum_r \sum_s O_r D_s \exp(-\beta c_{rs})}$ | $E_r^T = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{D_s}\right) \quad \forall s$ |
| 유출제약 (Production-constrained) | $q_{rs} = k_r O_r D_s \exp(-\beta c_{rs})$ s.t $\sum_s q_{rs} = O_r$ | $k_r = \frac{1}{\sum_s D_s \exp(-\beta c_{rs})}$ | $E_r^P = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{D_s}\right) \quad \forall s$ |
| 유입제약 (Attraction-constrained) | $q_{rs} = O_r k_s D_s \exp(-\beta c_{rs})$ s.t $\sum_r q_{rs} = D_s$ | $k_s = \frac{1}{\sum_r O_r \exp(-\beta c_{rs})}$ | $E_r^A = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{k_s D_s}\right) \quad \forall s$ |
| 이중제약 (Doubly-constrained) | $q_{rs} = k_r O_r k_s D_s \exp(-\beta c_{rs})$ s.t $\sum_s q_{rs} = O_r$ $\sum_r q_{rs} = D_s$ | $k_r = \frac{1}{\sum_s k_s D_s \exp(-\beta c_{rs})}$ $k_s = \frac{1}{\sum_r k_r O_r \exp(-\beta c_{rs})}$ | $E_r^D = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}}{k_s D_s}\right) \quad \forall s$ |

* note here that E_r^P is identical to E_r^T and E_r^D is identical to E_r^A as well, also note that if $\beta \rightarrow \infty$, then all $E_r = c_{rs} \quad \forall s$.