

■ 論 文 ■

통행분포/수단선택 통합모형 및 민감도분석

Integrated Trip Distribution/Mode Choice Model and Sensitivity Analysis

임 용 택

(전남대학교 물류교통학전공 교수)

— 목 차 —

- | | |
|---|---|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 통합모형의 구성 및 균형조건</p> <p> 1. 통행분포/수단선택 통합모형</p> <p> 2. 통합모형 균형조건</p> <p> 3. 풀이 알고리즘</p> <p>III. 민감도 분석</p> | <p>IV. 모형의 평가</p> <p> 1. 평가예제</p> <p> 2. 분석결과</p> <p>V. 결론 및 향후연구</p> <p>참고문헌</p> |
|---|---|

Key Words : 통합모형, 중력모형, 로짓 수단선택모형, 균형조건, 민감도, 탄력성
 integrated model, gravity model, logit mode choice model, equilibrium, sensitivity, elasticity

— 요 약 —

통행분포(trip distribution)는 4단계 통행수요추정의 첫 단계인 통행발생(trip generation)에서 구해진 통행 생성(trip production)과 통행 유인(trip attraction)을 연결시키는 작업이다. 즉 하나의 존에서 생성 또는 유인되는 통행량을 다른 존에 분포시키는 과정이다. 이에 반해, 통행수단선택(transport mode choice)은 통행자들이 어떤 교통수단을 선택할 것인지를 결정하는 단계이다. 그러나, 이들 통행분포단계와 통행수단선택단계는 서로 밀접한 관계가 있음에도 불구하고, 서로 독립적으로 수행되어온 경향이 있었다. 본 연구에서는 통행분포단계와 통행수단선택 단계를 통합한 모형을 제시하고 이를 풀기 위한 알고리즘도 제시한다. 통합모형의 통행분포모형으로는 중력모형(gravity model)을 적용되며, 수단선택모형으로는 로짓모형(logit model)을 이용한다. 본 연구의 통합모형은 각 단계별로 개별적으로 진행되는 추정단계가 하나의 모형 틀 안에서 통합적으로 이루어져 좀 더 현실적이며, 통행비용의 불일치 문제가 해소될 수 있다. 또한, 통합모형에서도 균형조건(equilibrium condition)이 존재함을 증명하며, 통합모형의 민감도 분석을 통하여 기존 모형과의 차이점을 설명한다.

Trip distribution is the second step of the conventional travel demand estimation process, which connects trips between origin and destination, while transport mode choice is the third step of the process, which chooses transport mode among several modes serving for each origin-destination pair. Although these two steps have closely connected, they have been estimated independently each other in the estimation procedure. This paper presents an integrated model combining trip distribution and transport mode choice, and also presents its solution algorithm. The model integrates gravity model adopted for the trip distribution process with logit model employed for the mode choice process. The model would be expected to cope with the inconsistency issue existing in the conventional travel demand estimation procedure. This paper also presents an equilibrium condition, sensitivity of the model, and compares them with those of existing models.

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

I. 서론

통행분포(trip distribution)는 4단계 통행수요추정의 첫 단계인 통행발생(trip generation)에서 구해진 통행생성량(trip production)과 통행유인량(trip attraction)을 연결시키는 작업이다. 즉 하나의 존에서 생성 또는 유인되는 통행량을 다른 존에 분포시키는 과정이다. 현재 사용되고 있는 통행분포 모형중 대표적인 모형이 중력모형(gravity model)인데, 이모형은 통행생성량과 통행유인량의 크기와 이들 기종점간의 통행저항, 즉 통행비용을 고려하여 통행수요를 분포시키는 모형이다. 중력모형과 관련하여 다수의 연구들이 이루어져 왔으며, 외국의 경우 Hyman(1969), Evans(1970), Wilson(1970) 등이 있으며, 국내에서는 1990년대 이후 여러 논문들이 발표되고 있다(윤성순, 1993; 김형진, 1996; 노정현, 1991; 신언교외, 1999; 임용택외, 2006 등). 이들 모형들은 대부분 중력모형의 파라미터(parameter)와 조정계수(balancing factor)를 추정하고 적합성을 평가하는 연구들이었다.

이에 반해, 통행수단선택(transport mode choice)은 통행자들이 어떤 교통수단을 선택할 것인지를 결정하는 단계로, 통행발생, 통행분포를 거쳐 산출된 통행량을 기종점간 각 교통수단에 분담하는 과정이다. 따라서, 통행수단을 선택하는 문제는 기종점간을 운행하는 여러 교통수단중 어떤 통행수단을 선택할 것인가를 결정하는 것으로서 현재까지 다양한 수단선택모형들이 제시되어 왔다. 대표적인 모형이 개별적으로 통행자의 행태를 분석한 개별행태모형으로 확률오차를 정규분포(normal distribution)로 가정한 프로빗 모형(probit model)과 검벨 분포(Gumbel distribution)로 가정한 로짓모형(logit model)이 있다. 이들 개별행태모형에 대해서는 광범위한 연구들이 있었으며, 이를 집대성한 연구가 Ben-Akiva et al. (1987)에 의해 이루어 졌는데, Ben-Akiva et al.은 이들 개별행태모형의 이론적인 틀과 모형의 속성, 그리고 현실 적용성 등으로 정리하였다.

그러나, 이들 통행분포단계와 통행수단선택단계는 서로 밀접한 관계가 있음에도 불구하고, 서로 독립적으로 수행되어온 경향이 있었다. 즉, 통행수단 선택단계에서 고려된 통행비용이 통행배분단계에도 고려되어야 함에도 불구하고 실제 통행수요추정과정에서는 이런 과정이 무시되고 순차적인 절차에 따라 추정과정이 마무리됨에 따라 통행수요추정 단계간 통행비용의 불일치 문제가 발생

하고 있다. 이런 문제를 해소하기 위하여 다양한 결합모형(combined model)들이 제시되고 있으나, 대부분 통행배정(traffic assignment)모형을 중심으로 한 결합모형이 대부분이었다(Sheffi, 1985; Oppenheim, 1995; Miller, 2001).

본 연구에서는 위 결합모형과 달리 통행분포단계와 통행수단선택단계를 통합한 모형을 제시하고 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시한다. 통합모형의 통행분포모형으로는 중력모형(gravity model)을 적용되며, 수단선택모형으로는 로짓모형(logit model)을 이용한다. 본 연구의 통합모형은 각 단계별로 개별적으로 진행되는 추정 단계가 하나의 모형 틀 안에서 통합적으로 이루어져 좀 더 현실적이며, 통행비용의 불일치 문제가 해소될 수 있다. 즉, 통행분포 단계의 통행비용과 통행수단선택 단계의 통행비용이 서로 영향을 갖는 형태로 모형이 구축되며, 이는 기존 연구들과의 주된 차이가 된다. 또한, 본 연구에서는 통행배정단계의 사용자균형(user equilibrium: Wardrop, 1952)조건과 같이 통합모형에서도 균형조건(equilibrium condition)이 존재함을 증명하며, 통합모형의 민감도 분석을 통하여 기존 모형과의 차이점을 설명한다. 다음 장에서는 본 연구에서 제시하는 통합모형식과 균형조건, 그리고 이를 풀기 위한 알고리즘에 대하여 기술하며, 제III장에서는 민감도분석에 대하여 설명한다. 또한, 본 연구에서 제안된 통합모형은 간단한 예제를 통하여 제IV장에서 평가하며, 제V장에서는 결론 및 향후 연구과제에 대하여 기술한다.

II. 통합모형의 구성 및 균형조건

1. 통행분포/수단선택 통합모형

본 연구에서 제시하는 통행분포와 통행수단선택문제를 통합한 모형(integrated model)은 다음과 같은 기본식으로 표현될 수 있다.

[통합모형(integrated model)]

$$q_{rs}^m = q_{rs}(c_{rs}) \cdot P_m^{rs}(c_{rs}^m) \quad (1)$$

$$c_{rs} = c_{rs}(c_{rs}^m) \quad (2)$$

여기서, q_{rs}^m 은 기종점rs간 통행수단m을 이용하는 통행량이며, q_{rs} 은 기종점rs간 통행수요로 기종점간 통행

비용 c_{rs} 의 함수이다. 또한, $p_m^{rs}(c_{rs}^m)$ 은 기종점 rs 간 통행 수단 m 을 선택할 확률로 기종점 rs 간 통행수단 m 의 비용 c_{rs}^m 의 함수로 표현된다. 여기서, 기종점 rs 간 통행비용 (c_{rs})과 통행수단별 비용(c_{rs}^k)은 식(3)과 같은 관계가 존재한다. c_{rs} 는 Williams(1977)가 제시한 기대인지 통행비용함수(expected perceived travel cost function)로 이 비용은 다른 어떤 수단의 통행비용보다 크지 않다는 속성을 갖고 있다. 즉, $c_{rs} \leq c_{rs}^k$ 이다. 이런 부등조건이 성립하는 이유는 지수(exponential)함수와 로그(log)함수의 성질 때문인데, 만약 $c_{rs}^k = 0$ 이면 $c_{rs} = 0$ 이고, $c_{rs}^k > 0$ 이면 $c_{rs}^k > c_{rs}$ 가 성립한다.

$$c_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_{rs}^k) \quad (3)$$

여기서, 하나 유의해야할 점은, 통행분포와 수단선택이 순차적으로 진행되는 기존 모형(sequential model)에서는 기종점 rs 간 통행수단 m 을 이용하는 통행량은 식(4)로 구해진다는 점이다. 이런 관계식은 Sheffi(1985)에도 제시된 바 있다.

[기존모형(sequential model)]

$$q_{rs}^m = q_{rs} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m) \quad (4)$$

즉, 이 식은 기종점 rs 간 통행수요(q_{rs})가 앞 통행분포 단계에서 구해진 값으로 고정된 수요(fixed demand)이며, 이 수요는 기종점간 통행비용 c_{rs} 의 함수가 아니라는 점이다.

그러나 본 연구에서 제시하는 통행수요(q_{rs})는 식(1)에서 보듯이 통행비용(c_{rs})의 함수이며 따라서 c_{rs} 가 변함에 따라 변하게 된다. 그런데, c_{rs} 는 식(3)과 같이 각 통행수단의 비용(c_{rs}^k)의 함수로 각 수단별 통행비용이 변하면 달라지게 된다. 이점이 기존 연구들과의 주된 차이가 된다.

1) 통행분포모형

본 연구에서는 통행분포모형으로 이중제약 중력모형(doubly constrained gravity model)을 적용하며 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$q_{rs} = k_r O_r k_s D_s f_{rs}(c_{rs}) \quad (5)$$

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

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

여기서, O_r 과 D_s 는 기점 r 의 통행생성량과 종점 s 의 통행유인량을 나타내며, k_r, k_s 는 기점 r 와 종점 s 의 통행생성량 통행유인량과 관련된 조정계수(balancing factor)로 제약조건으로부터 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 방법(윤대식, 2001 참조)이 제시되어 있다. 또한 $f_{rs}(c_{rs})$ 는 기종점간 저항함수(impedance function)로 다음과 같은 지수함수(exponential function)를 사용한다.

$$f_{rs}(c_{rs}) = \exp(-\beta c_{rs}) \quad (6)$$

여기서, β 는 통행저항함수의 계수(parameter)이다.

2) 수단선택모형

통행수단 선택모형으로는 다음과 같은 로짓수단선택 모형(logit mode choice model)을 적용한다. 로짓 수단선택모형을 이용하여 기종점 rs 간 통행수단 m 을 선택할 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$p_m^{rs} = \frac{\exp(V_m^{rs})}{\sum_{w \in W} \exp(V_w^{rs})} \quad (7)$$

여기서, W 는 통행수단집합이며, 로짓모형의 효용함수는 다음과 같다고 가정한다.

$$V_m^{rs} = \theta_1 x_{m1} + \theta_2 x_{m2} + \dots + \theta_k x_{mk}$$

위 효용함수에서 m 은 통행수단이며, k 는 통행시간, 통행요금 등 속성값이고, x_{mk} 는 통행수단 m 의 k^h 번째 속성변수(attribute variable)이다. 만약, 속성변수가 통행수단 m 의 통행비용(c_{rs}^m)으로만 구성되어 있다면 효용함수는 다음과 같이 표현된다.

$$V_m^{rs} = -\theta c_{rs}^m$$

여기서 θ 는 현장 자료를 통하여 추정되는 계수(parameter)이다.

2. 통합모형 균형조건

본 연구에서 제시한 통행분포/수단선택 통합모형(integrated model)의 균형조건(equilibrium condition)은 다음과 같이 증명할 수 있다. 통합모형이 아닌 통행분포(trip distribution model)와 수단선택모형(mode choice model)의 개별적인 균형조건에 대해서는 임용택(2010a, 2010b)에 자세히 기술되어 있다.

먼저, 식(1)과 식(5), 그리고 식(6), 식(7)로부터 기종점 rs 간 통행수단 m 을 이용하는 통행량은 다음과 같이 계산된다.

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

이와 마찬가지로, 기종점 rd 간 통행수단 n 를 선택할 확률은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, q_{rs}^m 를 q_{rd}^n 으로 나누어 정리하면,

$$\frac{\frac{q_{rs}^m}{k_s D_s p_m^{rs}}}{\frac{q_{rd}^n}{k_d D_d p_n^{rd}}} = \exp(-\beta c_{rs} + \beta c_{rd})$$

이 되며, 양변에 로그(logarithm)를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}^m}{k_s D_s p_m^{rs}}\right) = c_{rd} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rd}^n}{k_d D_d p_n^{rd}}\right)$$

위 식이 통합모형의 균형조건(equilibrium condition)으로, 식(8)과 같이 기점 r 에서 임의의 종점 s 와 임의의 통행수단 m 에 대하여 동일한 값(E_r)을 갖게 된다.

$$E_r = c_{rs} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{q_{rs}^m}{k_s D_s p_m^{rs}}\right) \quad \forall s, m \tag{8}$$

3. 풀이 알고리즘

본 연구에서 제시한 통합 통행분포/수단선택모형은 다음과 같은 절차를 통하여 해를 구할 수 있다.

[단계0] 초기화

반복수 $v=0$

초기값 θ 및 β 설정

$q_{rs}^{m,v} = 0$

(단계0.1) 초기 통행수단별 비용($c_{rs}^{m,v}$) 및 수단선택

비율($p_m^{rs,v}$) 설정

(단계0.2) k_r^v, k_s^v 계산 및 $q_{rs}^v = k_r^v O_r k_s^v D_s f_{rs}^v(c_{rs})$ 계산

(단계0.3) $q_{rs}^{m,v} = q_{rs}^v \cdot p_m^{rs,v}(c_{rs}^m)$ 계산

[단계1] $v = v + 1$

[단계2] 통행수단별 선택비율($p_m^{rs,v}$) 계산

[단계3] 기종점 통행분포($q_{rs}^v(c_{rs})$) 계산

(단계3.1) 조정계수 k_r^v, k_s^v 값 계산

(단계3.2) $c_{rs}^v = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_{rs}^{k,v})$ 계산

(단계3.3) OD통행분포 계산

$q_{rs}^v = k_r^v O_r k_s^v D_s f_{rs}^v(c_{rs}^v)$

[단계4] $q_{rs}^{m,v} = q_{rs}^v \cdot p_m^{rs,v}(c_{rs}^m)$ 계산

[단계5] 수렴성 검토

만약 $|q_{rs}^{m,v} - q_{rs}^{m,v-1}| < \epsilon, \forall rs, m$ 이면, 중지, 그렇지 않으면 [단계1]로 진행

위 풀이과정의 [단계2]의 통행수단별 선택비율은 로짓모형을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

[단계0] 초기화

대안 통행수단 설정 : $m \in M$, 여기서 M 은 대안집합 반복수 $k = 1$

초기값설정 : 통행수요 q_{rs} 및 수단별 선택확률 $p_{rs}^{m,0}$,
 통행량 $q_{rs}^{m,0}$, 분산 파라메타 θ

[단계1] 통행수단별 통행비용 $\{c_{rs}^{m,k}(q_{rs}^{m,k})\}$ 계산

[단계2] 수단별 선택확률계산 : $\{c_{rs}^{m,k}(q_{rs}^{m,k})\}$ 을 가지
 고 각 통행수단별 선택확률과 통행량 계산

$$p_m^{rs,k} = \frac{\exp(-\theta c_{rs}^{m,k})}{\sum_w \exp(-\theta c_{rs}^{w,k})}$$

[단계3] 수렴성검토

만약 $|p_m^{rs,k} - p_m^{rs,k-1}| < \epsilon, \forall rs, m$ 이면, 정지
 그렇지 않으면, $k = k + 1$ 후 [단계1]로 진행

III. 민감도 분석

통행분포/수단선택 통합모형의 통행비용에 대한 민감도(sensitivity)는 다음과 같이 구할 수 있다. 민감도는 특정변수의 단위 변화에 대한 다른 변수의 변화정도를 나타내는 값으로 본 연구에서는 통행비용의 변화에 대한 통행량의 변화를 살펴본다. 먼저, 식(1)로부터 기종점 rs 간 통행수단 m 을 이용하는 통행량(q_{rs}^m)의 통행비용(c_{rs}^m)에 대한 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} = \frac{\partial}{\partial c_{rs}^m} \{q_{rs}(c_{rs})\} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m) + q_{rs}(c_{rs}) \cdot \frac{\partial p_m^{rs}}{\partial c_{rs}^m}$$

$$= \frac{\partial q_{rs}}{\partial c_{rs}} \frac{\partial c_{rs}}{\partial c_{rs}^m} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m) + q_{rs}(c_{rs}) \cdot \frac{\partial p_m^{rs}}{\partial c_{rs}^m}$$

민감도를 구하기 위해서는 우변의 각항에 포함된 편미분항을 구해야 하는데, 이를 위하여 본 연구에서는 통행저항함수로 지수함수를 갖는 이중제약 중력모형(식(5))과 로짓 수단선택모형(식(7))을 적용한다. 먼저, 식(5)와 식(6)으로부터

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

$$\frac{\partial q_{rs}}{\partial c_{rs}} = k_r O_r k_s D_s \exp(-\beta c_{rs}) (-\beta) = -\beta q_{rs} \quad (9)$$

또한, 식(3)으로부터

$$\frac{\partial c_{rs}}{\partial c_{rs}^m} = -\frac{1}{\theta} \ln(\exp(-\theta c_{rs}^m)) (-\theta) = -\theta c_{rs}^m \quad (10)$$

마지막으로 식(7)의 로짓 수단선택모형과 $V_m^{rs} = -\theta c_{rs}^m$ 으로부터

$$\frac{\partial p_m^{rs}}{\partial c_{rs}^m} = \frac{(-\theta) \exp(-\theta c_{rs}^m) \sum_k \exp(-\theta c_{rs}^k) - \exp(-\theta c_{rs}^m) (-\theta) \exp(-\theta c_{rs}^m)}{\left(\sum_k \exp(-\theta c_{rs}^k)\right)^2}$$

$$= -\theta p_m^{rs} + \theta (p_m^{rs})^2 = -\theta p_m^{rs} (1 - p_m^{rs}) \quad (11)$$

따라서, 위 식(9),(10),(11)을 이용하면 통행비용에 대한 민감도는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} = \frac{\partial q_{rs}}{\partial c_{rs}} \frac{\partial c_{rs}}{\partial c_{rs}^m} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m) + q_{rs}(c_{rs}) \cdot \frac{\partial p_m^{rs}}{\partial c_{rs}^m}$$

$$= (-\beta) q_{rs} (-\theta) c_{rs}^m p_m^{rs} + q_{rs} (-\theta) p_m^{rs} (1 - p_m^{rs})$$

$$= -\theta q_{rs} p_m^{rs} (1 - \beta c_{rs}^m - p_m^{rs}) \quad (12)$$

또한, 위 민감도를 이용하여 탄력성(elasticity)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{c_{rs}^m}^{q_{rs}^m} = \frac{c_{rs}^m}{q_{rs}^m} \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} = \frac{c_{rs}^m}{q_{rs}^m} \{(-\theta) q_{rs} p_m^{rs} (1 - \beta c_{rs}^m - p_m^{rs})\} \quad (13)$$

$$= -\theta c_{rs}^m (1 - \beta c_{rs}^m - p_m^{rs})$$

한편, 기존 모형(식(4))에서의 민감도를 살펴보면 다음과 같다. 앞에서 구한 식(11)과 식(4)로부터 기존 모형의 민감도는 다음과 같이 구해진다. 즉, 식(4)

$$q_{rs}^m = q_{rs} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m) \text{로부터,}$$

$$\frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} = q_{rs} \cdot \frac{\partial p_m^{rs}}{\partial c_{rs}^m}$$

$$= q_{rs} (-\theta) p_m^{rs} (1 - p_m^{rs})$$

$$= -\theta q_{rs} p_m^{rs} (1 - p_m^{rs}) \quad (14)$$

또한, 위 민감도를 이용하여 탄력성(elasticity)을 구할 수 있는데 다음과 같다.

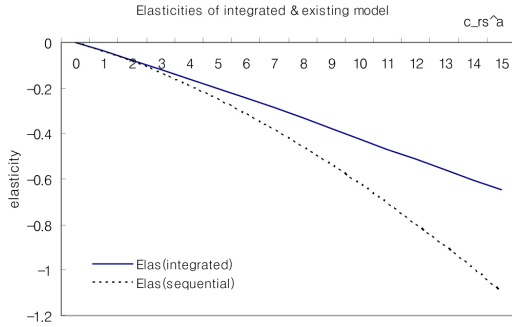
$$\mu_{c_{rs}^m}^{q_{rs}^m} = \frac{c_{rs}^m}{q_{rs}^m} \frac{\partial q_{rs}^m}{\partial c_{rs}^m} = \frac{c_{rs}^m}{q_{rs}^m} \{(-\theta) q_{rs} p_m^{rs} (1 - p_m^{rs})\} \quad (15)$$

$$= -\theta c_{rs}^m (1 - p_m^{rs})$$

따라서, 본 연구에서 구한 민감도(식(12)) 및 탄력성(식(13))과 기존 모형의 민감도(식(14)) 및 탄력성(식

〈표 1〉 통합모형과 기존모형의 비교

구분	통합모형 (integrated model)	기존모형 (sequential model)
모형식	$q_{rs}^m = q_{rs}(c_{rs}) \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m)$	$q_{rs}^m = q_{rs} \cdot p_m^{rs}(c_{rs}^m)$
민감도	$-\theta q_{rs} p_m^{rs} (1 - \beta c_{rs}^m - p_m^{rs})$	$-\theta q_{rs} p_m^{rs} (1 - p_m^{rs})$
탄력성	$-\theta c_{rs}^m (1 - \beta c_{rs}^m - p_m^{rs})$	$-\theta c_{rs}^m (1 - p_m^{rs})$



〈그림 1〉 통합모형과 기존모형의 탄력성 비교

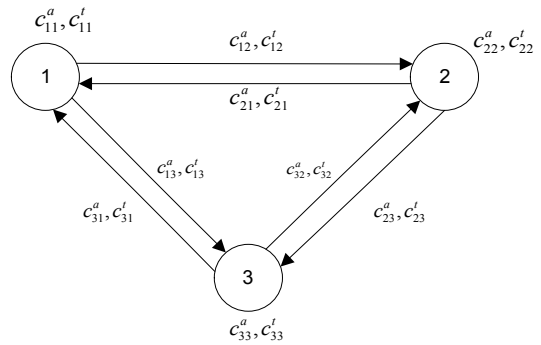
(15))에는 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 〈표 1〉은 본 연구의 통합모형과 기존 모형의 민감도와 탄력성을 서로 비교한 내용이다.

이들 두 모형의 탄력성을 살펴보면, 통합모형의 경우 괄호안에 $-\beta c_{rs}^m$ 이 포함되어 있는데, $\beta > 0$, $c_{rs}^m \geq 0$ 이며, $\theta > 0$ 이기 때문에 전체적으로 통합모형의 탄력성이 기존모형의 탄력성보다 작거나 같게 된다. 이들 관계가 〈그림 1〉에 표현되어 있다. 이 그림은 승용차(a)와 대중교통(t)으로 이루어진 수단선택모형에서 대중교통의 통행비용을 $c_{rs}^t = 5$ 로 고정하고, 승용차의 통행비용(c_{rs}^a)을 0에서 15까지 점증적으로 증가시킨 경우의 통합모형(integrated)과 기존모형(sequential)에 대한 승용차의 탄력성을 나타낸 것이다(여기서, $\beta = 0.02$, $\theta = 0.1$). 그림에서 보듯이 기존모형이 좀 더 탄력적임을 알 수 있다.

IV. 모형의 평가

1. 평가예제

본 연구에서 제시한 통합모형을 평가하기 위하여 〈그림 2〉과 같이 3개의 존으로 이루어진 교통망을 이용한다. 각 존별 통행생성량(Q_r)과 통행유인량(D_s)은 〈표 2〉와 같다. 또한, 각 존간에는 승용차와 대중교통 등 2개의 통행수단이 운행된다고 가정하며, 로짓 모형의 효용함수는 각 통행수단의 통행비용으로만 이루어 졌다고 설



〈그림 2〉 평가 예제교통망

〈표 2〉 기존점별 통행생성량과 통행유인량

D \ O	1	2	3	Q_r
1				160
2				450
3				180
D_s	200	370	220	790

〈표 3〉 기존점간 수단별 통행비용함수

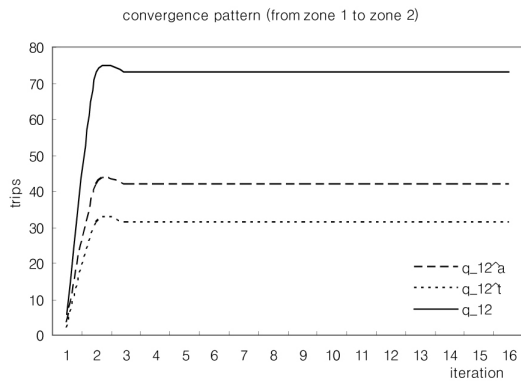
D \ O	1	2	3
1	$c_{11}^a = c_{11}^t = 7$	$c_{12}^a = 5 + 0.05 \cdot q_{12}^a$ $c_{12}^t = 10$	$c_{13}^a = 10 + 0.05 \cdot q_{13}^a$ $c_{13}^t = 12$
2	$c_{21}^a = 5 + 0.05 \cdot q_{21}^a$ $c_{21}^t = 10$	$c_{22}^a = c_{22}^t = 7$	$c_{23}^a = 5 + 0.05 \cdot q_{23}^a$ $c_{23}^t = 10$
3	$c_{31}^a = 10 + 0.05 \cdot q_{31}^a$ $c_{31}^t = 12$	$c_{32}^a = 5 + 0.05 \cdot q_{32}^a$ $c_{32}^t = 10$	$c_{33}^a = c_{33}^t = 7$

정한다, 즉, $V_m^{rs} = -\theta c_{rs}^m$ 이다. 따라서, 〈그림 2〉에서 c_{rs}^a 는 승용차(auto)의 통행비용을 나타내고, c_{rs}^t 는 대중교통(transit)의 통행비용이다. 각 기존점간 통행수단별 비용함수는 〈표 3〉에 나타나 있다. 표에서 보듯이 각 존의 내부통행의 통행비용은 승용차, 대중교통 모두 7로 설정하며, 각 존간 통행비용은 대중교통은 고정된 상수값으로, 승용차의 통행비용은 승용차 통행량의 함수로 설정한다. 여기서, 중력모형에 포함된 통행저항함수의 파라메타 $\beta = 0.02$ 로 설정하며, 로짓 수단선택모형의 스케일 파라메타 $\theta = 0.1$ 로 설정한다.

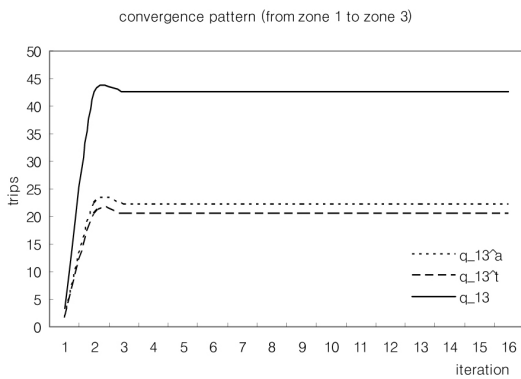
2. 분석결과

1) 모형의 수렴 및 분석결과

먼저, 통행수단별 통행량의 수렴과정이 〈그림 3〉에



(a) 기점1 → 종점2의 통행



(b) 기점1 → 종점3의 통행

〈그림 3〉 통행수단별 통행량의 수렴과정

〈표 4〉 통행수단별 통행분포결과

D \ O	1	2	3	O_r
1	42.7 (21.3/21.3)	74.4 (42.5/31.9)	42.9 (22.4/20.5)	160
2	113.5 (62.1/51.4)	212.1 (106.1/106.1)	124.4 (67.3/57.1)	450
3	43.8 (22.8/21.0)	83.4 (47.2/36.2)	52.7 (26.4/26.4)	180
D_s	200	370	220	790

주) 괄호안 통행량 : (승용차/대중교통)

나타나 있다. 그림(a)에서 보듯이 기점1에서 종점2로 통행하는 승용차 통행(q_{12}^a)과 대중교통 통행(q_{12}^t), 그리고 전체 통행량(q_{12})이 반복수 3~4회에 이르면 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 즉, 승용차는 42.5통행으로, 대중교통은 31.9통행으로 수렴하고 있으면 전체 통행수요는 74.4통행으로 수렴하고 있다. 그림(b)는 기점1에서 종점3으로의 통행패턴을 보여주고 있는데, 역시 일정한 값으로 수렴하고 있다.

〈표 5〉 중력모형의 존쌍별 조정계수(k_r, k_s)

기점(r)		종점(s)	
k_1	0.131716	k_1	0.010144
k_2	0.129583	k_2	0.009844
k_3	0.131583	k_3	0.010137

최종적으로 각존별 통행분포결과가 〈표 4〉에 제시되어 있다. 표에서 보듯이 각존별 분포된 유출량의 합과 유입량의 합이 〈표 2〉와 일치하여 유출제약과 유입제약을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한, 각셀의 괄호안 수치는 각 존별로 분포된 통행수단별 통행량으로 각존별 통행수요가 승용차와 대중교통으로 수단선택이 이루어졌음을 의미한다. 〈표 5〉는 최종적으로 구해진 통행분포모형의 조정계수(balancing factor)이다.

2) 균형 및 민감도분석 결과

본 연구에서 제시한 모형이 균형(equilibrium)에 도달했는지는 〈표 6〉을 통하여 확인할 수 있다. 제Ⅱ장 제2절에서 기술한 것처럼, 본 연구에서 제시한 통합모형의 균형조건은 식(8)과 같으며, 〈표 6〉에서 보듯이 각 기종점쌍별 통행수단간 E_r 값이 서로 일치하여 균형해에 도달했음을 알 수 있다. 즉, 임의의 종점 s 와 통행수단 m 에 대하여 동일한 값을 갖고 있다. 예를 들어, 기점1에서 종점1, 종점2, 그리고 종점3으로 통행하는 경우, 통행비용

〈표 6〉 통합모형 균형상태

기점 r	종점 s	mode (m)	c_{rs}^m	c_{rs}	q_{rs}^m	p_m^{rs}	E_r
1	1	auto	7.000	0.069	21.350	0.500	152.403
		transit	7.000	0.069	21.350	0.500	152.403
	2	auto	7.127	1.529	42.536	0.571	152.403
		transit	10.000	1.529	31.913	0.429	152.403
	3	auto	11.118	4.618	22.370	0.522	152.403
		transit	12.000	4.618	20.482	0.478	152.403
2	1	auto	8.105	2.076	62.108	0.547	203.291
		transit	10.000	2.076	51.389	0.453	203.291
	2	auto	7.000	0.069	106.051	0.500	203.291
		transit	7.000	0.069	106.051	0.500	203.291
	3	auto	8.364	2.217	67.278	0.541	203.291
		transit	10.000	2.217	57.123	0.459	203.291
3	1	auto	11.142	4.630	22.841	0.521	158.242
		transit	12.000	4.630	20.963	0.479	158.242
	2	auto	7.360	1.662	47.200	0.566	158.242
		transit	10.000	1.662	36.249	0.434	158.242
	3	auto	7.000	0.069	26.374	0.500	158.242
		transit	7.000	0.069	26.374	0.500	158.242

($c_{r,s}^m$)과 통행량($q_{r,s}^m$), 그리고 선택확률($p_{r,s}^m$)은 통행수단 별로 서로 다르지만, E_r 값은 모두 동일한 152.403으로 균형조건을 만족하고 있다. 즉, 본 연구에서 제시한 통합 모형과 이를 풀기 위한 알고리즘이 균형해를 도출함을 확인할 수 있다.

또한, 본 연구에서 제시한 통합모형과 기존 모형의 민감도(sensitivity) 값이 <표 7>에 나와 있다. 표에서 보듯이 본 통합모형의 민감도 값과 기존 모형의 민감도 값에는 차이가 존재하는데, 본 예제에서는 기존 모형의 민감도가 더 큼을 알 수 있다. 즉, 어떤 수단의 통행비용이 1단위 증가하면 기존 모형의 통행량이 좀 더 많이 감소한다는 의미이다. 예를 들어 기점1에서 종점2간의 통행 수요에 대한 민감도를 살펴보면, 통행비용이 1단위 증가함에 따라 본 통합모형에서 승용차는 1.217통행이 감소하고 대중교통은 1.185통행 감소하는데 반해, 기존 모형에서는 각각 1.823통행이 감소하게 된다. 이런 차이는 민감도식인 식(12)와 식(14)의 차이에 기인하는데, 이는 궁극적으로 통합모형과 기존모형의 구조차이에서 발생한다. 즉, 기존 모형에서는 통행분포와 수단선택이

순차적(sequential)으로 계산되어 수단선택시 통행비용이 통행분포에 고려되지 않지만, 본 통합(integrated) 모형은 이들 비용들이 서로 연관되어 있어 이런 차이가 발생하게 되는 것이다. <표 8>은 이 경우 탄력성(elasticity) 값을 보여주고 있는데, 민감도와 마찬가지로 기존 모형의 값이 좀 더 큼을 알 수 있다. 이런 탄력성의 차이는 과대추정(over-estimation)과 관련되는데, 예를 들어 기점1에서 종점3으로 통행하는 승용차의 경우, 통행비용(예를 들어 휘발유값)이 10% 증가하는 경우, 본 통합모형에서는 2.84% 통행수요가 감소하는데 비해, 기존 모형에서는 5.31%감소하는 것으로 나타나게 된다. 즉, 기존모형이 과대추정할 우려가 있다.

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 순차적으로 통행분포와 통행수단을 적용하는 기존4단계 통행수요추정단계가 갖고 있는 논리적인 불일치 문제를 해소하기 위하여 통행분포와 통행수단단계를 통합한 모형을 제시하고 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시하였다. 또한, 통행비용에 대한 민감도 분석도 수행하였다. 본 통합모형에서는 통행수단 단계의 통행비용이 통행분포단계에 반영되는 환류(feedback)과정이 포함되어 있어 각 단계간 통행비용의 불일치 문제가 해결되어 좀 더 현실적인 해를 도출할 것으로 예상되며, 통합모형에서 균형(equilibrium)이 존재함을 수학적으로 보여주었다. 균형이 중요한 이유는, 균형상태에서는 더 이상의 목적지 변경이나 통행수단의 변경이 발생하지 않기 때문이다.

간단한 예제를 통하여 분석한 결과, 본 연구에서 제시한 통합모형이 합리적이며 균형해를 도출함을 확인할 수 있었으며, 민감도 분석결과 기존모형이 통합모형에 비해 좀 더 민감하게 나타나고 있는데, 이는 과대추정할 우려가 있음을 시사한다.

본 연구에서는 통행분포와 통행수단을 통합한 모형을 제시하였지만, 이에 통행배정(traffic assignment)단계를 추가한 좀 더 일반화된 통합모형과 균형조건에 대한 연구도 남아 있다. 또한, 본 연구에서는 통행비용에 대한 민감도분석만 이루어졌지만, 통행분포모형과 통행수단선택 모형에 포함된 계수에 대한 민감도 분석도 필요할 것으로 보인다. 이외에 본 연구에서 사용된 파라메타들이 외생적(exogenous)으로 주어졌지만, 현장 데이터를 이용하여 이들 파라메타들을 내생적(endogenous)으로 추정(estimation)하는 형태로 확장하는 연구도 남아 있다

<표 7> 민감도 비교

기종점		본 통합모형		기존모형	
기점	종점	승용차 (auto)	대중교통 (transit)	승용차 (auto)	대중교통 (transit)
1	1	-0.769	-0.769	-1.067	-1.067
1	2	-1.217	-1.185	-1.823	-1.823
1	3	-0.572	-0.578	-1.069	-1.069
2	1	-1.805	-1.784	-2.812	-2.812
2	2	-3.818	-3.818	-5.303	-5.303
2	3	-1.964	-1.947	-3.089	-3.089
3	1	-0.584	-0.590	-1.093	-1.093
3	2	-1.356	-1.325	-2.050	-2.050
3	3	-0.949	-0.949	-1.319	-1.319

<표 8> 탄력성 비교

기종점		본 통합모형		기존모형	
기점	종점	승용차 (auto)	대중교통 (transit)	승용차 (auto)	대중교통 (transit)
1	1	-0.252	-0.252	-0.350	-0.350
1	2	-0.204	-0.371	-0.305	-0.571
1	3	-0.284	-0.338	-0.531	-0.626
2	1	-0.236	-0.347	-0.367	-0.547
2	2	-0.252	-0.252	-0.350	-0.350
2	3	-0.244	-0.341	-0.384	-0.541
3	1	-0.285	-0.338	-0.533	-0.626
3	2	-0.211	-0.366	-0.320	-0.566
3	3	-0.252	-0.252	-0.350	-0.350

