

지역간 수단선택에 있어서 확률적 후회 최소화 모형의 적용 연구

Application of Random Regret Minimization Model in the Context of Intercity Travel Mode Choice

진우정 · 이장호*

Woo-Jeong Jin · Jang-Ho Lee

Abstract The multinomial logit model, based on random utility maximization (RUM) theory, has been the predominant model used in travel mode choice contexts. In this paper, the travel mode choice model based on random regret minimization (RRM) theory is proposed as an alternative to the RUM model, and the applicability of the RRM model is examined. The presented model is applied to the case of inter-city travel mode choice in Korea. The empirical results show that the RUM model and RRM model have parameters that are consistent with the intuition. The goodness of fit statistics in the RRM model improved compared with the results of the RUM model. Consequently, these results show the possibility of using the RRM model in the context of travel mode choice.

Keywords : Random Utility Maximization, Random Regret Minimization, Intercity Travel Mode Choice

초 록 통행자 수단선택 연구에는 확률 효용 최대화 원칙(RUM)에 입각한 다항로짓모형이 주로 사용되어왔다. 그러나 최근 들어 RUM 원칙을 대신할 대안적 방법론의 제시가 이루어지고 있으며, 이러한 대안적 방법의 하나로 제시된 것이 확률적 후회 이론모형(RRM)이다. 본 연구는 지역간 통행자의 수단선택 행태를 모사함에 있어 RRM 모형을 적용하고, RUM 원칙을 적용한 다항로짓모형의 구축결과와 비교를 통하여 RRM 모형의 적용가능성을 검토하였다. 분석 결과, RUM 모형과 RRM 모형 모두 모수 추정결과는 직관과 부합하는 결과를 보였으며, 모형의 자료 적합도는 RUM 모형보다 RRM 모형이 조금 더 높게 도출되었다. 결론적으로 자료적합성 측면에서 RRM 모형이 RUM 모형보다 낫다고 판단할 수 있으나, 아직 일부 사례에만 검토되어졌기 때문에 추후 경로선택, 화물 운송수단 선택 등 더 많은 통행자의 선택상황에 대한 추가적인 검토가 필요하다고 하겠다.

주요어 : 확률적 효용 최대화, 확률적 후회 최소화, 수단선택모형

1. 서 론

통행자 수단선택 연구에는 다항로짓모형(Multinomial Logit model, MNL), 중첩로짓모형(Nested Logit model), 혼합로짓모형(Mixed Logit model) 등이 다양하게 이용되어 분석된다. 그 중에서도 확률적 효용 최대화 원칙(Random Utility Maximization, RUM)에 입각한 다항로짓모형은 수단선택분석에 있어서 가장 널리 이용되어 왔다. 이렇듯 오랜 기간 적용된 확률적 효용 최대화 원칙은 의사결정자가 다양한 선택상황에 직면하게 될 때 가장 높은 효용을 가지는 대안을 선택한다고 가정한다.

그러나 최근 들어 기존의 RUM 원칙에 의존하여 통행 수요모형을 분석하는 것 보다는 통행자 행태를 좀 더 정확하게 모사하기 위한 대안적 방법론의 제시가 이루어지기 시작하였는데, 이는 통행자의 선택이 훨씬 더 복잡하고 다양하여 효용함수가 최대화하는 되는 원칙으로만 설명되기 어렵다는 점을 인식하고 있기 때문이다. 때로는 습관이나 관행적인 이유에서 선택되기도 하고, 모든 선택대안에 대한 합리적이며 객관적이 평가가 이루어지지 못하기 때문에 RUM 모형에 대한 대안을 검토하기 시작하였고, 제한적인(bounded) RUM 원칙을 도입하거나, Rule-based 원칙 등이 시도되기도 한다.

이러한 대안적 방법론 중 하나가 확률적 후회 최소화 원칙에 입각한 모형이라고 하겠으며, 이산선택모형에 있어서 이러한 방법론의 적용은 RUM에서와 같이 완전한 상호보상관계를 가정하지 않고, 불완전한 상호보상관계를 갖는 행태를 모사할 수 있기 때문이다[1]. 물론, 이러한 대안적 모형의 적용을 위해서는 의사결정 과정에서의 현실성 증가와 기존의 확률적 효용최대화 모형

*Corresponding author. Tel.: +82-70-8855-1657, E-mail: transwho@ut.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.1.87>

과의 비교분석을 진행하는 것이 필요하다.

본 연구는 지역간 통행자의 수단선택행태를 모사함에 있어서 확률적 후회 최소화 모형을 적용하고, 기존의 확률적 효용 최대화 원칙을 적용한 한 다항로짓모형의 구축결과와 비교를 통하여 확률적 후회 최소화 모형의 적용 가능성을 검토하는 데에 목적이 있다. 이를 위하여 모수추정결과에 대한 비교, 모형 적합도에 대한 비교, 시간가치 및 탄력성에 대한 산정결과 등을 검토하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 확률적 최소화 모형에 관한 선행연구를 살펴보고, 또한 국내에서 수단선택모형과 관련하여 다항로짓모형 이외의 방법론을 적용한 사례를 살펴본다. 제3장에서는 확률적 최소화 이론에 대해서 살펴보고, 제4장에서는 국내 지역간 수단선택 행태에 대하여 확률적 최소화 이론에 근거하여 모형을 구축하고 이를 다항로짓모형 추정결과와 비교한다. 끝으로 제5장에서는 본 연구의 결론과 한계점, 그리고 향후 과제 등에 대하여 기술한다.

2. 선행연구 고찰

2.1 국외 선행연구

통행자의 선택행태를 모사하는 모형구축 관련 국외 선행연구는 무수히 많지만, 그 중 확률적 후회 최소화모형(RRM)에 대한 연구는 그리 많지 않은 편이다. 본 절에서는 확률적 후회 최소화모형과 관련된 국외 선행연구를 고찰하였다.

교통부문 모형화에 있어서 처음 확률적 후회 최소화모형을 도입한 것은 Chorus *et al.*[1]로 확률적 후회 최소화에 대한 개념과 도입 필요성을 제시하였다. 확률적 후회 최소화 모형은 통행자가 대안을 선택할 때 만족(효용)이 최대가 되는 것보다는 부정적인 감정을 피하기 위한 선택을 염두에 둔다고 하였으며, 통행자가 제한된 정보에 직면하였을 때 그들의 선택을 연기할 것인지 혹은 첫 정보보다 더 많은 정보를 찾을 것인지를 생각하기 위한 단순하고 직관적인 방법을 제공한다는 것을 보였다. 나아가 확률적 후회 최소화모형을 통행수요분석에 적용하게 된 동기와 후회이론을 정의하고 통행수요분석을 위한 확률적 후회 최소화모형의 형태를 제시하고 동일한 조건에서 제시된 형태를 기준으로 확률적 효용 최대화모형과 확률적 후회 최소화모형을 각각 분석, 비교하였다. 그러나 여기서 제시한 확률적 후회 최소화 모형은 우도함수가 곡선이 아니어서 미분이 불가능하며, 이에 따라 탄력성이나 미미한 효과분석을 할 경우 어려움이 따르는 문제가 있었다.

이후 Chorus[2]는 이러한 문제점을 극복하고자, 로그변환의 방법을 이용하여 좀 더 개선된 확률적 후회 최소화모형을 나타내었고, 이를 확률적 효용 최대화 모형과 비교하였다. 또한, 추가적으로 4가지 선택상황에 대한 모형화를 통하여 두 방법론간 비교분석을 실시하였는데, 통행 정보 구입 선택분석을 제외하고 통행수단·경로 선택, 주차장 선택, 쇼핑지역 선택분석에서 모두 기존 확률적 효용 최대화모형보다 확률적 효용 최소화모형의 자료 적합도가 더 높은 것으로 분석되었다. 이후 동일한 방법론을 기초로 더 많은 통행선택상황에 대한 비교를 수행하였는데, 경로선택, 쇼핑목적지 선택, 도착시간 선택, 차량종류 선택 등의 선택상황에서는 확률적 후회 최소화 모형이 더 적합함을 보였고, 통행수단선택, 교통정보획득, 여가 목적지 선택 등에서는 확률적 효용 최대화 모형이 더 적합하다는 결과를 보였다(Chorus[3]). 또한, 휘발유차량, 디젤차량, 하이브리드 차량의 차종선택에 있어서 RUM 모형과 RRM 모형의 결과를 비교하기도 하였다(Chorus *et al.*[4]).

한편, Chorus[5]는 경로선택상황에 대한 잠재 혹은 진술선호(Stated Preference, SP)자료를 근간으로 선택에 대한 바람직한 상황이나 선택대안에 대한 만족정도를 검토하고, 선택대안에 대한 만족도와 RUM, RRM 모형의 모수추정결과에 따른 Logsum 값간의 상관성을 분석을 통하여 두 모형간 비교를 하였는데, 이 때에는 RUM-Logsum과 RRM-Logsum은 거의 차이가 없는 것으로 나타나 두 모형간 유의한 차이를 확인하지 못하였다.

이후 RUM과 RRM이 결합된 하이브리드 모형을 제시하고, RUM 모형과 RRM 모형, 하이브리드모형(RUM+RRM)을 각각 구축하여 개별선택 모형에 어떻게 적용이 되었는지를 살펴보았다(Boeri *et al.*[6]). 추정된 하이브리드 모형의 계수를 기준으로 자료와 도출된 RRM 모형과 RUM 모형 추정결과를 비교하여 두 모형 중 하이브리드 모형과 더 가까운 모형을 확인하고 두 모형 중 분석과 더 적합한 모형을 찾았다. 또한 더불어 하이브리드 모형에 미치는 영향을 설명할 수 있는 지불의사사용의액을 추정하였다.

이상의 연구들이 모두 여객통행에 대한 모형화를 비교한 데에 반하여, Boeri, Masiero[7]는 스위스 물류담당자들을 대상으로 화물운송의 수단선택에 대한 모형을 구축하였다. 전형적인 운송서비스에 대하여 물류 관리자가 진술한 값을 이용하여 일반적 상황과 실제 손실이 발생하는 부정적 상황에 대하여 각각 모형을 구축하였는데, 모형은 RUM 원칙과 RRM 원칙을 기반으로 한 다항로짓모형과 혼합로짓모형을 비교했다. 다항로짓모형에서는 일반적 상황과 부정적 상황 모두 RRM 원칙 모형이 적합도가 높은 것으로 나타났고, 자가물류에 대한 혼합로짓모형 또한 RUM 원칙 모형보다는 RRM 원칙 모형의 적합도가 높은 것으로

로 나타났다. 다만, 제3자 물류 혼합로짓모형에서는 기본상황 RUM 모형 적합도가 다소 높고 부정적 상황의 RRM 모형은 RUM 모형보다 적합도가 높은 것으로 분석되었다.

2.2 국내 연구

통행자의 수단선택행태를 모형화하기 위한 국내 연구도 매우 다양하지만, 그 중 확률적 후회 최소화모형(RRM)에 대한 연구는 단 한 편에 불과하다. 따라서 본 절에서는 RRM 모형과 관련된 선행연구 외에 다항로짓모형 이외에 다른 방법론을 통해 수단선택모형을 구축한 사례를 추가적으로 검토하였다.

RRM 모형을 적용한 국내 연구는 송민승[8]이 유일한데, 이 연구에서는 기존 모형의 한계점을 보완할 수 있는 대안적 접근법으로 Chorus[2]에서 서술된 RRM을 선택하여 이를 RUM과 비교 분석하였다. 도시부 수단선택에 대하여 SP 설문조사로 구축된 자료를 근간으로 RRM 모형과 RUM 모형을 각각 구축하고, 비교분석을 통하여 검증하였다. 결과적으로 RRM 모형이 후회이론의 비경제학적 행태를 설명하는데 보다 효과적인 지표들을 도출한다는 것을 확인했으며, RRM 모형의 계수, 시간가치, 탄력성 등의 의미를 고찰하여 RRM방법론의 적용가능성을 확인하였다.

RUM 원칙의 틀 안에서 다항로짓모형을 벗어나 좀 더 개선된 형태의 모형을 적용한 것으로는 중첩로짓모형(nested logit model)을 우선 꼽을 수 있다. 김항배[9]는 부산, 대구, 광주, 대전 등 4개 대도시 권역을 대상으로 새로운 급행대중교통수단 도입 시 시가지 내 통행자 수단선택 행태 변화를 파악하고자 중첩로짓모형을 구축하였으며, 김익기 등[10]은 1999년 및 2001년 부산울산권의 가구통행실태조사를 기반으로 총 통행시간, 통행비용, 성별, 가구소득, 나이변수를 추가하여 중첩 모형구조를 포함하는 총 4개의 모형을 제시하였다. 윤대식[11]은 대학생의 등교통행 교통수단과 통행시간대에 대한 선택을 분석하고자 나이, 학생, 성별, 통행비용, 등교 소요시간, 주차장에서 강의실 까지 도보시간, 버스정류장에서 강의실까지 도보시간 등을 변수로 이용하여 중첩로짓모형을 구축하였다.

이후 시뮬레이션 기법을 적용하는 혼합로짓모형(mixed logit model)이 개발되면서, 이에 대한 연구가 활발해 졌는데, 추상호[12]는 2006년 서울시의 가구통행실태조사자료를 이용하여 활동기반자료를 구축하고 선택적 활동을 중심으로 활동요소가 통행 수단선택에 미치는 영향을 분석하였는데, 이 때에 혼합로짓모형을 적용하여 각 활동별 수단선택에 대한 통행시간과 통행비용의 선호 이질성을 검토했다.

이러한 시도 이외에도 김강수, 조혜진[13]은 화물운송수단 SP자료를 활용하여 기존 순위확장(exploded logit)모형이 가지는 각 순위별 자료의 오차는 동일하고 독립적인 선택자료로 변환할 수 있다는 가정을 검증하고 순위에 따른 오차정도를 반영하여 이를 극복할 수 있는 방법론을 제시하였고, 김현기 등[14]은 2002년 수도권 가구 통행실태 조사를 기반으로 베이지안망을 이용한 모형을 제시하여 선형 효용함수에 대한 한계를 극복하고자 하였다. 또한, 김원진[15]은 성남시에서 서울시로 출근하는 통행자를 대상으로 집단 별로 개인특성 및 통행특성이 교통수단선택에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 다변주 로지스틱스 회귀모형을 이용하였다.

이상에서 국내의 연구동향을 살펴보면, 통행자 수단선택연구에는 다항로짓모형분석 뿐만 아니라 RUM원칙을 따르는 중첩로짓모형, RUM모형 확장을 반영한 혼합로짓모형 등 다양하게 이용하는 추세이며, 순위로짓모형, 베이지안망을 이용한 모형, 다변주로지스틱스 회귀모형이 시도된 바 있다.

2.3 시사점

앞선 선행연구 고찰결과를 정리하면, 대부분의 기존 연구들은 RRM 모형에 대한 이론과 RRM 모형과 RUM 모형을 비교를 통하여 RRM 모형의 적용성을 중점적으로 검토하였다. 그러나 기존의 연구들은 대부분이 해외사례를 통하여 연구되어진 방법으로 국내 상황에 맞는 적용사례를 확인하기에는 어려운 점이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 기존연구에 근거하여 RRM 모형과 RUM 모형의 구축결과를 비교하되, 국내의 실증적 자료를 활용하여 RRM의 적용성을 검토하는 것이 필요하다고 하겠다. 앞서 송민승(2013)은 국내에서는 처음으로 RRM 모형을 시도한 사례로 의미가 있으나, 30명의 표본을 대상으로 도시부 수단선택에 대하여 5개의 진출선택(SP) 시나리오를 조사하여, 총 150개 자료를 근간으로 모형화를 하였다. 이는 자료수의 부족, 진출선택호자료의 한계 등으로 실제 통행행태의 반영이 되었다고 보기 어렵다. 또한, 설명변수로 통행시간, 통행비용만을 고려하고, 통행목적이나 차량보유수준 등 수단선택에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인들을 배제하였기 때문에 모형을 통한 수단선택행태의 모사에 있어서 한계가 있다고 하겠다. 따라서 본 연구는 1,100개 이상의 실제 현시선택(RP)자료를 근간으로 통행시간과 통행비용 외에 사회경제적 속성변수 등을 포함하여 실질적인 분석과 이를 통한 비교가 이루어질 수 있도록 하였다. 지역간 수단선택에 영향을 미치는 변수들을 가지고 RUM 모형과 새로운 RRM 모형의 비교를 통하여 RRM 모형 적용성을 검토하고자 한다.

3. 확률적 후회 최소화 모형

확률적 후회 최소화 모형은 후회이론을 기반으로 통행자 개인이 선택하지 않은 대안이 선택했던 대안보다 더 매력적인 수단으로 밝혀지는 것을 피하려는 상황을 반영한다. 이에 따라 확률적 후회 최소화 모형의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 통행자는 대안 간 쌍대비교를 통하여 부정적인 감정을 피하는 방향으로 선택확률을 산정한다. 둘째, 확률적 효용 최대화 모형이 효용함수를 구성하는 속성 간 완전한 상호보상(Fully Compensatory)이 가능하다고 보는 것과는 달리, 확률적 후회 최소화 모형은 한 속성의 안 좋은 점이 다른 좋은 속성으로부터 완전한 상호보상이 가능하지 않다고 보며, 통행자가 의사결정을 할 때 이를 따르지 않는다고 가정하여 수단선택에 반영하도록 한다[1].

Chorus *et al.*[1]이 제시한 바와 같이 확률적 후회 최소화 모형에 따라 대안을 선택하는 과정을 설명하면 다음과 같다. 만일 통행자가 선택할 수 있는 대안이 3개 (i, j, k)가 있고, 각 대안은 x, y, z 와 같은 3개의 속성을 가지고 있다면, 통행자가 선택할 수 있는 대안 i, j, k 는 대안 속성 x, y, z 에 따라 $i=\{x_i, y_i, z_i\}$, $j=\{x_j, y_j, z_j\}$, $k=\{x_k, y_k, z_k\}$ 와 같이 표현할 수 있다.

대안 j 와 비교할 때 대안 i 의 후회값은 각 속성별로 다음의 식 (1)처럼 산정되며, 여기서 β 는 각 속성변수의 모수(parameter)를 의미한다. 이렇듯 통행자는 기준 대안에 대하여 다른 대안과의 쌍대비교를 통하여 식 (1)의 후회값을 계산한다.

$$\begin{aligned}\varphi_x(x_i, x_j) &= \max\{0, \beta_x \cdot (x_j - x_i)\} \\ \varphi_y(y_i, y_j) &= \max\{0, \beta_y \cdot (y_j - y_i)\} \\ \varphi_z(z_i, z_j) &= \max\{0, \beta_z \cdot (z_j - z_i)\}\end{aligned}\quad (1)$$

식 (1)에서 산정된 속성별 후회값을 가지고, 대안 j 와 비교할 때 대안 i 의 후회값은 각 속성별 후회값을 합하여 식 (2)와 같이 산정한다.

$$R_{ij} = \varphi_x(x_i, x_j) + \varphi_y(y_i, y_j) + \varphi_z(z_i, z_j) \quad (2)$$

최종적으로 대안 i 의 후회값은 대안 j 와 비교할 때의 후회값과 대안 k 와 비교할 때의 후회값을 비교하여 둘 중 최대값으로 산정되며, 이를 다른 대안에 대해서도 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}R_i &= \max\{R_{ij}, R_{ik}\} \\ R_j &= \max\{R_{ji}, R_{jk}\} \\ R_k &= \max\{R_{ki}, R_{kj}\}\end{aligned}\quad (3)$$

식 (3)에서 산정된 각 대안의 최종 후회값 (R_i, R_j, R_k) 중 후회값이 제일 작은 대안을 선택하게 된다.

효용이론과의 비교를 위하여 아래와 같은 예시를 통해 동일한 모수를 갖는 경우에도 효용이론에 입각하여 선택을 하는 경우와 후회이론에 입각하여 선택을 하는 경우에 다른 선택이 될 수 있음을 보이고자 한다.

우선, 통행수단 1의 특성은 통행시간 75분, 통행비용 1천원이고, 통행수단 2의 특성은 통행시간 40분, 통행비용 3천원, 통행수단 3의 특성은 통행시간 60분, 통행비용 1.5천원으로 가정하고, 이 때의 모수는 $\beta_{\text{통행시간}}=-0.01$, $\beta_{\text{통행비용}}=-0.5$ 로 가정한다. 이를 기존의 확률적 효용 최대화 이론으로 계산하면, 각 대안의 효용함수는 아래와 같이 산정된다.

$$\begin{aligned}U(1) &= -0.01*75 - 0.5*1 = -1.25 \\ U(2) &= -0.01*40 - 0.5*3 = -1.90 \\ U(3) &= -0.01*60 - 0.5*1.5 = -1.35\end{aligned}$$

이에 따르면 효용값이 가장 큰 대안 1을 선택하는 것으로 의사결정을 표현한다. 그러나 확률적 후회 최소화 이론으로 각 대안간 쌍대비교를 하면, 각 대안의 속성별 후회값은 아래와 같이 산정된다.

$$\begin{aligned}R_{12} &= \max\{0, -0.01*(40-75)\} + \max\{0, -0.5*(3-1)\} = 0.35 \\ R_{13} &= \max\{0, -0.01*(60-75)\} + \max\{0, -0.5*(1.5-1)\} = 0.15\end{aligned}$$

$$R_{21} = \max\{0, -0.01*(75-40)\} + \max\{0, -0.5*(1-3)\} = 1$$

$$R_{23} = \max\{0, -0.01*(60-40)\} + \max\{0, -0.5*(1.5-3)\} = 0.75$$

$$R_{31} = \max\{0, -0.01*(75-60)\} + \max\{0, -0.5*(1-1.5)\} = 0.25$$

$$R_{32} = \max\{0, -0.01*(40-60)\} + \max\{0, -0.5*(3-1.5)\} = 0.20$$

그리고 최종적인 각 대안별 후회값은 쌍대비교값 중 최대값인 $R_1=0.35$, $R_2=1$, $R_3=0.25$ 가 되어 최종적인 대안선택은 후회값이 가장 적은 대안 3을 선택하는 결과를 보인다.

위의 예시를 통해 같은 조건에서도 확률적 효용 최대화 이론에 근거한 선택은 확률적 후회 최소화 이론에 근거한 선택과는 다를 수 있음을 알 수 있는데 이러한 결과의 차이는 완전한 상호보상의 특성을 갖고 있지 않는 데에서 기인한다. 확률적 효용 최대화 이론에서는 통행수단 1의 통행시간이 75분으로 타 대안에 비해 크게 증가하지만, 통행비용이 저렴하여 이를 보상할 수 있다는 데에서 최종 선택대안으로 통행수단 1이 결정되지만, 확률적 후회 최소화 이론에서는 통행수단 1은 통행시간 측면에서, 통행수단 2는 통행비용 측면에서 배제되어, 결국 통행수단 3을 최종 선택대안으로 도출하게 된다.

또한, 선행의 효용함수를 갖는 확률적 효용 최대화 모형(다항로짓모형)은 비관련 대안간 독립성(Independence of Irrelevant Alternatives)의 특성을 갖고 있지만, 확률적 후회 최소화 모형은 그러한 특성을 갖고 있지 않다[2].

다만, 앞서 살펴 본 바와 같이 확률적 후회 최소화 모형은 두 대안간 쌍대비교를 근간으로 하기 때문에, 대안 2개인 이항선택에서는 확률적 효용 최대화 모형과 동일한 결과를 도출하게 되며, 두 모형 간 비교는 다항선택상황에서만 적용가능하다고 하겠다.

4. 지역간 수단선택모형 구축

본 장에서는 지역간 수단선택자료를 근간으로 확률적 후회 최소화 모형과 확률적 효용 최대화 이론에 근간하여 각각 모형을 구축하고 이의 비교를 통하여 확률적 후회 최소화 모형의 적용가능성을 검토한다.

4.1 자료 구축

본 연구에서 지역간 수단선택모형은 2012년 한국철도시설공단 「철도투자평가체계 개선방안 제4차 연구」에서 지역간 통행자를 대상으로 실시한 통행실태 조사자료를 활용하였다. (<표 1> 참조) 통행자 선택대안은 승용차, 버스(고속버스/시외버스), 고속철도(KTX), 일반철도(새마을/무궁화)로 설정하였으며, 항공 선택대안은 설문조사에서 선택자료 개수 부족으로 제외하였다. 또한 전체 원 자료 중 선택대안이 전체 4개 대안 중 3개만 존재하는 지역 - 예를 들어 고속철도 미정차지역 - 은 모형의 안정성을 위하여 분석에서 배제하였다. 자료 분석은 총 1138개의 설문조사 자료 결과를 이용하였다.

Table 1. Sociodemographic and trip characteristics in the sample.

Alternative choice	Car	Bus	High-speed rail	Conventional rail	Total	
Share	315(28%)	306(27%)	343(30%)	174(15%)	1,138(100%)	
Trip purpose	Business	Leisure	Others	Total		
Share	389(34%)	373(33%)	376(33%)	1,138(100%)		
Car ownership	0	1	+2	Total		
Share	174(15%)	936(82%)	28(2%)	1,138(100%)		
Travel party size	1	2	3	4	+5	Total
Share	346(30%)	430(38%)	165(14%)	175(15%)	22(2%)	1,138(100%)
Travel with/without child	With		Without		Total	
Share	144(13%)		1,024(87%)		1,138(100%)	
Travel with/without baggage	With		Without		Total	
Share	140(12%)		998(88%)		1,138(100%)	
Monthly income	Under 6 million won/month		Over 6 million won/month		Total	
Share	935(82%)		203(18%)		1,138(100%)	

해당 연구의 설문조사는 다음 항목을 포함하고 있다.

- 통행자 속성 조사항목: 업무터미, 여가터미, 동행인원, 유아터미, 수하물터미, 차량보유대수, 고소득자터미(600만원 이상)
- 대안 속성 조사항목: 접근시간, 통행시간, 통행비용

이렇게 구축된 자료를 이용하여 RUM 모형과 RRM 모형의 모수추정을 위해서 NLOGIT 5.0 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램에서는 최적화를 위하여 Chorus[2]가 제시한 바와 같이 로그변환된 확률적 후회최소화 모형을 구축하게 되며, 이 때 의사결정을 위한 후회간 차이의 임계값이 추정되지는 않는다. 이는 확률적 효용최대화 모형에서도 의사결정을 위한 효용임계치가 추정되지 않는 것과 마찬가지로 하겠다.

4.2 모형 구축

지역 간 수단선택에 대한 RUM 모형과 RRM 모형의 효용함수식 및 후회함수식은 다음 식과 같은 형태로 사용되었으며, 모수추정결과는 <표 2>와 같다.

$$\begin{aligned}
 U_{\text{승용차}} &= \alpha_{car} + \beta_t * \text{통행시간} + \beta_{c1} * \text{통행비용} + \beta_b * \text{업무터미} + \beta_f * \text{여가터미} + \beta_{ca} * \text{차량보유대수} \\
 U_{\text{버스}} &= \alpha_{bus} + \beta_t * (\text{접근시간} + \text{통행시간}) + \beta_{c2} * \text{통행비용} \\
 U_{\text{고속철도}} &= \alpha_{hsr} + \beta_t * (\text{접근시간} + \text{통행시간}) + \beta_{c3} * \text{통행비용} + \beta_{ac} * \text{동행인원} \\
 U_{\text{일반철도}} &= \beta_t * (\text{접근시간} + \text{통행시간}) + \beta_{c3} * \text{통행비용} + \beta_{ac} * \text{동행인원}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, α_{car} : 승용차 수단특정상수, α_{bus} : 버스 수단특정상수, α_{hsr} : 고속철도 수단특정상수, β_t : 통행시간(단위: 분), $\beta_{c1}, \beta_{c2}, \beta_{c3}$: 통행비용([c1: 승용차, c2: 버스, c3: 고속철도 및 일반철도], 단위: 백원), β_b : 업무터미(터미변수, 업무통행이면 1, 아니면 0), β_f : 여가터미(터미변수, 여가통행이면 1, 아니면 0), β_{ac} : 동행인원, β_{ca} : 차량보유대수

통행자 속성변수로 통행목적과 유아동반여부, 대형수하물 소지여부, 소득수준 등의 통행자 특성 등을 함께 고려하였는데, 업무통행이나 여가통행 이외에 통근, 친지방문, 쇼핑 등 타 목적통행에 대한 터미변수는 통계적 유의성이 없어서 제외하였다. 또한, 소득수준에 따른 영향이나 유아동반여부, 대형수하물 소지여부 등도 통계적 유의성이 확보되지 않아 배제하였다. 대안속성 변수에서는 접근시간과 통행시간을 분리하여 우선 추정하였으나, 두 모수에서 통계적으로 유의한 차이를 가지지 않아 접근시간과 통행시간을 결합하였고, 수단별로도 유의한 차이를 보이지 않아 일반화변수(generic variable)로 사용하였다. 반면, 통행비용

Table 2. Estimation results of RUM and RRM in the context of intercity travel mode choice.

Variables		RUM			RRM			
		Parameters	Std. error	t-statistics	Parameters	Std. error	t-statistics	
Alternative specific constants	Car	-1.94431***	0.35626	-5.46	-0.97439***	0.14228	-6.85	
	Bus	0.26769	0.27656	0.97	0.15399	0.13448	1.15	
	High-speed rail(HSR)	-0.86297***	0.21652	-3.99	-0.42839***	0.09532	-4.49	
Socio-economic variables	Business trip - car	0.27834	0.17710	1.57	0.13198	0.09227	1.43	
	Leisure trip - car	0.34753**	0.17704	1.96	0.18015*	0.09356	1.93	
	Party size - conventional rail (CNR)	-0.30466***	0.08866	-3.44	-0.14232***	0.03854	-3.69	
	Car ownership - car	0.64377***	0.20201	3.19	0.35165***	0.11872	2.96	
Level-of-service variables	Total travel time (min)	-0.01685***	0.00125	-13.48	-0.01037***	0.00071	-14.51	
	Travel cost (100 won)	Car	-0.00210***	0.00036	-5.75	-0.00096***	0.00015	-6.48
		Bus	-0.00511***	0.00088	-5.79	-0.00243***	0.00034	-7.06
		HSR/CNR	-0.00350***	0.00058	-6.03	-0.00189***	0.00026	-7.23

*: 10% significance level.
 **: 5% significance level.
 ***: 1% significance level.

은 수단마다 영향이 다르게 나타나 승용차, 버스는 분리하고, 유의한 차이가 없었던 고속철도와 일반철도는 결합하여 변수를 추정하였다.

모수추정결과, 두 모형 모두 차량보유대수가 높을수록, 여가, 업무통행일수록 통행자가 승용차를 선호하는 것으로 나타났으며, 차량보유대수가 승용차수단선택에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 통행인의 규모가 커질수록 일반철도를 선호하지 않는 것으로 분석되었다. 통행시간 및 통행비용 모수는 모두 음(-)의 부호를 나타내 직관과 위배되지 않는 추정결과를 보였으며, 버스의 수단특정상수와 업무통행 터미변수를 제외하고 통계적 유의성 또한 모두 높게 나왔다. 다만, 두 모형간 비교에서는 RRM 모형의 적합도가 RUM 모형보다 높은 결과를 보였다(<표 3> 참조).

Table 3. Comparison of goodness of fit statistics between RUM and RRM.

Summary Statistics	RUM	RRM
Number of observations	1138	
Number of parameters	11	
Log-likelihood at constant $L(c)$	-1544.64	-1544.64
Log-likelihood at convergence $L(\hat{\beta})$	-1382.49	-1363.54
Rho-squared (ρ^2)	0.1050	0.1172
Rho-bar-squared $\bar{\rho}^2$	0.1021	0.1144

4.3 모형 적용가능성 검토

지역 간 수단선택모형의 구축결과를 토대로 RUM 모형과 RRM 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 시간가치 분석결과와 탄력성 분석결과 등을 살펴보았다.

통행 시간가치 분석은 통행시간과 통행비용간 모수의 비율차이를 활용하는 한계대체율법에 의해 도출되는데, 이는 통행자의 행태를 통행시간과 통행비용 등의 관계로 모형화하고 추정된 통행시간과 통행비용 모수의 비율을 통하여 시간가치를 산정하는 방법으로 본 연구에서 추정된 모형의 통행시간 모수와 통행비용 모수의 비율로서 추정하였다(식 (5) 참조).

RRM 모형에 따른 시간가치 도출은 RRM 모형이 실제 속성간 완전한 보상관계(Fully Compensatory)를 가지지 않아 통행자 시간가치 분석에 이용할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 지역간 수단선택 RUM 모형에 대한 시간가치 만 도출하고, RRM 모형에 대한 시간가치는 배제하였다.

$$\frac{\partial U/\partial t}{\partial U/\partial c} = \frac{\beta_t}{\beta_{c1,c2,c3}} \quad (5)$$

지역간 통행자의 시간가치는 시간당 승용차 29,629원, 버스 12,176원, 고속철도·철도 17,777원으로 도출되었는데, 이는 한계 임금율법을 사용하는 2013년 교통시설 투자평가지침[16]의 시간당 승용차 9,819원, 버스 5,071원, 고속철도 11,419원, 철도 7,418원의 통행자 시간가치보다 높은 금액으로 나타났다. 한계대체율법을 사용한 이장호[17]에서는 시간당 지역간 통행자 시간가치를 19,400원으로 추정하였고, 본 연구의 분석자료 기준년도의 물가상승률을 반영할 경우 26,558원으로 나타나 본 연구의 시간가치 추정결과와 유사하게 나타났다.

Table 4. Estimated value of travel time.

(Unit: won/passenger-hour)

This research		MOLIT [16]		Lee [17]
Car user	29,629	Car user	9,819(10,165)	19,400 (26,558)
Bus user	12,176	Bus user	5,071(5,250)	
HSR/CNR user	17,777	HSR user	11,419(11,822)	
		CNR user	7,618(7,887)	

*Values in parenthesis are corrected by inflation index.

한편, 수요모형의 탄력성은 속성(독립변수)의 변화율에 따른 수단선택확률의 변화율(종속변수)로 추정한다. 이 때 탄력성은 직접탄력성과 교차탄력성으로 구분되며, 직접탄력성은 수단의 속성변화가 그 대안의 선택확률변화를 측정하는 척도이며, 교차탄

Table 5. Estimated direct and cross elasticities.

Elasticities from RUM					
Travel mode		Car	Bus	High-speed rail(HSR)	Conventional rail(CNR)
Direct	Travel time	-1.8707	-2.1625	-1.5215	-2.7048
	Travel cost	-0.5754	-0.9991	-0.9976	-0.9050
Cross	Travel time	1.4447	0.7586	0.4134	0.2704
	Travel cost	0.1639	0.3255	0.4508	0.1518

Elasticities from RRM					
Travel mode		Car	Bus	High-speed rail(HSR)	Conventional rail(CNR)
Direct	Travel time	-0.4607	-0.4360	-0.1288	-0.5044
	Travel cost	-0.2542	-0.4768	-0.5512	-0.4738
Cross	Travel time	0.1882	0.0136	0.0436	0.1417
	Travel cost	0.0848	0.1539	0.2294	0.0957

탄력성은 어느 한 대안 속성변화에 따른 다른 대안의 선택확률변화를 측정하는 척도이다. 본 연구에서 구축된 모형에서 도출된 탄력성은 <표 5>와 같다.

직접탄력성과 교차탄력성 모두 통행비용보다는 통행시간에 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, RUM모형의 경우 통행시간에 따른 직접탄력성은 -1.5~-2.7, 통행비용에 따른 직접탄력성은 -0.6~-1.0 수준을 보였다. 반면, RRM모형은 각각 -0.1~-0.5, -0.25~-0.55 수준을 나타내 RRM 모형에서 도출된 탄력성이 더 낮은 수치를 보인다. 이는 속성간 완전한 상호보상(fully compensatory)관계를 가정하는 효용이론에서 유도되는 탄력성이 상대적으로 완전한 상호보상관계를 가정하지 않는 후회이론에서의 탄력성보다 높게 나타나게 되는 것으로 판단된다.

결국 상대적으로 탄력성 수치가 높은 RUM 모형을 적용하는 경우 운임인하에 따른 수요증가나 통행시간 단축에 따른 수요 증가를 더 크게 추정하게 되고, 반대로 운임을 인상하는 경우나 통행시간이 증가되는 경우 수요감소를 더 크게 추정하게 된다고 하겠다. 두 모형에서 유도된 탄력성 중 어떤 모형에서 유도된 수치가 실제 값에 가까운 지 단언할 수는 없지만, 자료적합도가 더 높은 RRM에서 도출된 탄력성이 현실과 더 가까울 수 있다고 판단할 수 있고, 철도수요의 운임탄력성이 -1.0에 가까운 RUM 모형에서의 탄력성 수치는 선행연구들에 비해 높다고 할 수 있으므로 RUM 모형을 적용할 때 수요추정에 오류가 커질 가능성이 높다고 하겠다.

한편, 교차탄력성은 비관련대안간 독립성을 갖는 RUM 모형처럼 RRM 모형도 수단에 관계없이 교차탄력성이 동일한 것으로 분석되어 모형간 구조적인 차이가 존재하지는 않았다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구는 확률적 효용 최대화 원칙에 입각한 모형의 대안적 방법론으로 제시되고 있는 확률적 후회 최소화(RRM) 모형의 적용성 평가를 위하여 의사결정 과정에서의 현실성 증가와 기존의 확률적 효용최대화 모형과의 비교분석을 진행하였다. 지역간 수단선택자료를 활용하여 확률적 후회 최소화(RRM) 모형과 기존의 확률적 효용 최대화(RUM) 모형을 각각 구축하였고, 모수 추정치의 적절성, 모형의 자료적합도에 대한 비교, 시간가치나 탄력성 등 모수추정치에서 유도되는 정책변수 등을 가지고 모형의 적용가능성을 검토하였다.

모형 구축 결과, 두 모형 모두 대안속성변수 계수가 음(-)으로 추정되어 직관과 부합하는 결과를 보였으며, 사회경제적 변수의 모수들도 직관과 부합하는 결과를 보였다. 모형의 자료 적합도는 확률적 효용 최대화 모형보다 확률적 후회 최소화 모형이 좀 더 높은 것으로 분석되어 실제 지역간 수단선택행태를 더 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

모수추정결과를 기초로 한 통행자의 시간가치 도출은 RRM 모형의 경우 완전한 보상관계가 성립되지 않아 시간가치분석이 부적절하여 제시하지 않았으며, RUM 모형에 대하여 한계대체율법으로 통행자의 시간가치를 도출하였다. 그 결과, 지역간 통행자의 시간가치는 기존 교통시설 투자평가지침에서 제시된 한계임금율법에 의한 통행자의 시간가치보다 다소 높게 산정되었는데, 이는 시간가치 산정방법론의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

모형의 직접·교차 탄력성 분석에서는 직접탄력성과 교차탄력성 모두 비용보다는 시간에 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, RUM 모형에서 도출된 탄력성이 RRM 모형에서 도출된 탄력성보다 큰 것으로 나타났다. 이는 RUM 모형의 변수가 완전한 상호보상관계를 반영하는 데에 반하여, RRM 모형은 그렇지 않기 때문에 판단된다. 따라서 기존 RUM 모형에 따라 추정된 탄력성은 실제 현실보다 높을 가능성이 있으며, 정책변화에 따른 철도수요 분석을 시행하는 경우 오류가 커질 가능성이 높다고 하겠다. 결과적으로 본 연구에서 RRM 모형은 RUM 모형과 비교하여 시간가치 산정을 제외하고는 모형의 자료 적합도 측면이나, 탄력성 분석에 있어서 더 적합한 측면을 보여주었다. RUM 모형이 속성변수간 완전한 상호보상적 관계를 갖는 데에 반하여 RRM 모형은 부분적인 혹은 불완전한 상호보상적 관계를 갖기 때문에 완전한 보상관계를 갖지 않는 통행자의 선택행태를 조금 더 현실적으로 설명한다는 측면에서 장점이 있다고 하겠다.

그러나 본 연구나 선행연구를 포함하여 RUM 모형과 RRM 모형간의 자료적합도 차이가 크지 않아, 과거 오랜 기간 안정적으로 널리 적용되어 온 RUM 모형을 무시할 수 없다. 또한, 모수추정을 위하여 Chorus[2]가 적용한 로그변환을 적용하면서, 이항선택은 RUM 모형과 동일해진다는 점에서 일반적으로 적용하는 데에 한계가 있다고 하겠다.

본 연구를 통해 RRM 모형이 RUM 모형보다 지역간 통행자의 수단선택행태를 조금 더 잘 모사할 수 있다고 판단할 수 있다. 다만, 자료적합도의 차이가 크지 않기 때문에, 통행목적 등 관측가능한 선호다양성(observed heterogeneity)이나 관측불가능한 선호다양성(unobserved heterogeneity)을 반영하여 혼합로짓모형 형태로 비교하는 것이나, RRM과 RUM의 하이브리드 모형에 대한 검토도 필요하리라 판단된다. 또한, 본 연구는 지역간 수단선택에 대해서만 RRM 모형 구축이 이루어졌으므로, 추후 경로 선택, 차로선택, 화물운송 수단선택 등 더 많은 통행자의 선택상황에 대한 RRM 모형 적용성 검토가 추가적으로 이루어질 필요성이 있다고 하겠다. 끝으로, 통행자의 선택행태가 어떠한 원칙에 의해 의사결정이 이루어지는 지에 대한 심리학적 접근도 더 면밀한 검토도 요구된다고 하겠다.

References

- [1] C.G. Chorus, T.A. Arentze, H.J.P. Timmermans (2008) A random regret minimization model of travel choice, *Transportation Research Part B*, 42(1), pp. 1-18.
- [2] C.G. Chorus (2010) A new model of random regret minimization, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 10, pp. 181-196.
- [3] C.G. Chorus (2012a) Random regret minimization: an overview of model properties and empirical evidence, *Transport Reviews*, 32(1), pp. 75-92.
- [4] C.G. Chorus, J.M. Rose, D.A. Hensher (2013) Regret minimization or utility maximization: it depends on the attribute, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(1), pp. 154-169.
- [5] C.G. Chorus (2012b) Logsums for utility-maximizers and regret-minimizers, and their relation with desirability and satisfaction, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(7), pp. 1003-1012.
- [6] M. Boeri, R. Scarpa, C.G. Chorus (2014) Stated choices and benefit estimates in the context of traffic calming schemes: Utility maximization, regret minimization, or both?, *Transportation Research Part A*, 61, pp. 121-135.
- [7] M. Boeri, L. Masiero (2014) Regret minimization and utility maximization in freight transport context, *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(6), pp. 548-560.
- [8] M.S. Song (2013) A study of mode choice behavior based on regret theory, *Master's Thesis*, Yonsei University.
- [9] H.B. Kim (2012) A study of mode choice analysis of blind spot areas for public transportation in four metropolitan cities, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(6), pp. 565-569.
- [10] I.K. Kim, K.S. Kim, Y.C. Kim (2005) Model specification and estimation method for traveler's mode choice behavior in Busan metropolitan area, *Journal of Korean Society of Transportation*, 23(3), pp. 7-19.
- [11] D.S. Yoon (2001) Analysis of travel mode and home departure time choice for university students' commuting trips, *Journal of Korea Planners Association*, 36(1), pp. 197-209.
- [12] S.H. Choo (2012) Exploring impacts of activity factors on travel mode choice: focused on discretionary activities, *The Korea Spatial Planning Review*, 74, pp. 163-173.
- [13] K.S. Kim, H.J. Cho (2004) Development of scaled explosion logit model considering reliability of ranking data, *Journal of Korean Society of Transportation*, 22(6), pp. 197-206.
- [14] H.G. Kim, K.S. Kim, S.M. Lee (2004) Design and implementation of travel mode choice model using the bayesian networks of data mining, *Journal of Korean Society of Transportation*, 22(7), pp. 77-86.
- [15] W.J. Kim (2003) Analysis of the commuter's mode choice behavior : the case study of Sunnam residents, *Master's Thesis*, Yonsei University.

- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013) Investment appraisal guide for transportation facilities, 5th Ed. pp. 172-176.
[17] J.H. Lee (2003) A mixed logit model accommodating travelers'taste variations and error structure among alternatives, *PhD. Thesis*, Seoul National University.

(Received 7 October 2015; Revised 26 October 2015; Accepted 23 November 2015)

Woo-Jeong Jin: jin0346@koti.re.kr

Dept. of Railway Transport Research, The Korea Transport Institute, 370 Sicheong-daero, Sejong 339-007, Korea

Jang-Ho Lee: transwho@ut.ac.kr

Dept. of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi 437-763, Korea