

■ 論 文 ■

확률적 위험도분석을 이용한 ITS사업의 경제성평가모형

Development of Evaluation Model for ITS Project using the Probabilistic Risk Analysis

이용택

(감사원 자치행정감사국 감사관)

남두희

(교통개발연구원 책임연구원)

임강원

(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 범위 및 수행방법
 - II. 선행 연구고찰
 - 1. ITS사업의 경제성평가모형 고찰
 - 2. 교통분야 위험도분석모형 고찰
 - III. ITS사업의 경제성 평가모형 정립
 - 1. 위험변수선정
 - 2. 확률분포선정
 - 3. 위험변수의 난수발생
 - 4. 시뮬레이션 및 통계분석
 - 5. 사업평가방법
 - IV. 사례분석
 - 1. 분석자료 및 기본가정
 - 2. 시뮬레이션 분석결과
 - V. 결론
 - 1. 연구결과
 - 2. 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : ITS사업평가, 확률적 위험도분석(PRA), 결정적 경제성분석(DEA), 몬테카를로 시뮬레이션

요 약

본 연구는 결정적 경제성분석모형(Deterministic Economic Analysis : DEA)의 한계를 극복할 수 있는 확률적 위험도분석(Probabilistic Risk Analysis : PRA)모형을 이용하여 ITS사업의 경제성평가모형을 개발하고 사례분석을 통해 모형의 적합성(Goodness-of-fit)과 유용성을 검증하는 것이다. 즉 ITS사업의 경제성에 영향을 미치는 위험변수를 확률밀도함수(PDF), 누적확률밀도함수(CDF)로 산출하고 몬테카를로 시뮬레이션기법(Monte-Carlo Simulation Approach : MCSA)을 통해 산출된 결과변수(사업비, 경제성지표)의 통계값에 대한 합리적인 의사결정 방법론을 정립하였다.

대규모 지방자치단체 ITS사업의 사례분석(대전광역시 첨단교통모델도시사업) 수행결과, 통합시스템의 사업비·총사업비는 PRA모형을 통해 산출된 확률분포 상에서 편위(Bias)된 백분율값으로 나타났으며, 사업비·총사업비의 변동계수가(각각 15, 4) 일반교통사업에 비해 낮아, ITS사업의 위험도가 높은 것으로 나타났다. 또한 PRA모형의 결과변수(B/C, NPA, IRR)가 변동가능한 사업환경 하에서 90%이상 모두 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 총사업비·사업비의 우발성비용(목표관리값 85%기준)이 발생하는 것으로 나타나 경제성은 높으나 사업비 초과 위험도는 높은 사업으로 분류되었다. 또한 DEA모형의 경제성평가지표는 PRA모형의 확률분포 상에 단일 %값(B/C:27%값, NPV, 27%값, IRR:33%값)으로 나타나며, 평균값 또는 중앙값과 비교할 때, 경제성이 과소추정(Underestimate)되는 것으로 나타났다. 또한 단위시스템의 우선순위결정과정에서 모형에 따라 우선순위가 바뀌는 결과가 나타났다. 특히 대규모 ITS사업의 경제성평가 시 DEA모형이 편위된 하나의 사례만으로 경제성을 평가함으로써, 경제성을 과대·과소추정하거나 비합리적인 투자우선순위를 도출하는 오류를 범할 수 있는 것으로 나타났다.

The purpose of this study is to develop the ITS evaluation model using the Probabilistic Risk Analysis(PRA) methodology and to demonstrate the goodness-of-fit of the large ITS projects through the comparative analysis between DEA and PRA model. The results of this study are summarized below. First, the evaluation model using PRA with Monte-Carlo Simulation(MCS) and Latin-Hypercube Sampling(LHS) is developed and applied to one of ITS projects initiated by local government. The risk factors are categorized with cost, benefit and social-economic factors. Then, PDF(Probability Density Function) parameters of these factors are estimated. The log-normal distribution, beta distribution and triangular distribution are well fitted with the market and delivered price. The triangular and uniform distributions are valid in benefit data from the simulation analysis based on the several deployment scenarios.

Second, the decision making rules for the risk analysis of projects for cost and economic feasibility study are suggested. The developed PRA model is applied for the Daejeon metropolitan ITS model deployment project to validate the model. The results of cost analysis shows that Deterministic Project Cost(DPC), Deterministic Total Project Cost(DTPC) is the biased percentile values of CDF produced by PRA model and this project need Contingency Budget(CB) because these values are turned out to be less than Target Value(TV:85% value). Also, this project has high risk of DTPC and DPC because the coefficient of variation(C.V) of DTPC and DPC are 4 and 15 which are less than that of DTPC(19-28) and DPC(22-107) in construction and transportation projects. The results of economic analysis shows that total system and subsystem of this project is in type II, which means the project is economically feasible with high risk.

Third, the goodness-of-fit of PRA model is verified by comparing the differences of the results between PRA and DEA model. The difference of evaluation indices is up to 68% in maximum. Because of this, the deployment priority of ITS subsystems are changed in each model. In results, ITS evaluation model using PRA considering the project risk with the probability distribution is superior to DEA. It makes proper decision making and the risk factors estimated by PRA model can be controlled by risk management program suggested in this paper. Further research not only to build the database of deployment data but also to develop the methodologies estimating the ITS effects with PRA model is needed to broaden the usage of PRA model for the evaluation of ITS projects.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

교통인프라에 첨단 정보·통신기술을 접목하여 교통체계의 효율성과 안전성을 향상코자 도입된 지능형교통체계(ITS)에 대해 향후 2020년까지 8조 3천억원을 투자하는 「국가ITS기본계획21」이 정부에 의해 제시됨에 따라, ITS사업의 합리적 투자를 위한 평가방법론의 중요성이 대두되고 있다. ITS사업은 정보·통신기술을 기반으로 하여 기술주기가 짧으며, 통합기술(SI)을 도입함에 따라 복잡다공정을 필요로 하여 일반건설·교통사업보다 사업의 위험도가 높은 특성을 가지고 있기 때문에 타당성분석단계부터 사업의 위험도를 고려할 수 있는 평가방법론이 필요하다. 그러나 현재 일반건설·교통사업에 사용되고 있는 결정적 경제성분석모형(Deterministic Economic Analysis : DEA모형)은 사업의 위험도를 사전에 계량화하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 또한 DEA모형의 경제성지표인 편익/비용비, 내부수익률, 순현재가치는 사업의 특성에 따라 상이한 평가결과를 제공할 수 있다.(김동진,1997;Newton, 1972) 비용·편익항목 뿐만 아니라 할인율, 이자율 등 사업의적변수가 분석기간 내 장기간에 걸쳐 결정적인 값으로 적용되는 등 분석의 기본가정이 매우 경직되어 현실적인 결론 도출이 어렵다. DEA모형을 보완하기 위해 사용되는 민감도분석, 위험도프리미엄을 반영한 할인율, 스पा이더 다이어그램과 확률등고선기법 역시 분석기간 동안 장기간에 걸쳐 결정적인 예측값을 사용하고, 위험요인을 규명하거나 모형 내에 내재화하여 분석할 수 없는 DEA모형의 문제점을 동일하게 가지고 있다.(Newton,1972 ; Perry외,1985 ; 김인호,2001)

따라서 타당성단계부터 ITS사업의 경제성 변동을 종합적으로 고려하면서 DEA모형 자체의 문제점을 극복할 수 있는 평가모형의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 경제성 변동에 따른 사업의 위험을 내재화할 수 있는 확률적 위험도분석(Probabilistic Risk Analysis : PRA)모형을 이용하여 ITS사업의 경제성평가모형을 개발하고 합리적인 의사결정방법론을 정립한다. 또한 대규모 교통네트워크를 대상으로 사례분석을 수행하여 모형을 개발함으로써, 대규모 ITS사업에서의 모형 적합성(Goodness-of-fit)을 검증하였다. 아울러 기존 DEA모형과의 비교분석을 통하여 개발 모형의 유용성을 확인하였다.

2. 연구의 범위 및 수행방법

연구의 내용적 범위는 ITS사업의 경제성변동을 타당성단계부터 계량화할 수 있도록 위험도분석과 경제성평가모형을 결합하여 경제적 위험도분석모형을 정립하고 모형의 적합성을 검증하는 것이다. 연구의 공간적 범위는 첨단교통모델도시 중 광역권의 대규모 도로네트워크로 대전광역시를 선정하였다. 연구의 시간적 범위는 2002년을 구축기간으로, 2003년부터 2012년까지 10년간 운영하는 것으로 분석하였다. 아울러, 대상시스템 범위는 <표 1>과 같이 도시부 간선도로시스템, 교통정보제공시스템, 돌발상황관리시스템으로 제한하여 분석한다.

<표 1> 주요 시스템분석 범위

시스템 명	내용
도시부 간선도로시스템	63대 전자신호, 111대 신호신설
교통정보제공시스템	VMS 34개소, 2012년까지 차내 교통정보수신장치 25% 탑재
돌발상황관리시스템	CCTV 58개소, VMS·신호연계운영

연구의 수행방법은 다음의 절차와 같다.

- (1단계) ITS사업평가 분석모형의 문제점을 파악한다.
- (2단계) 1단계에서 제시된 문제점을 개선하기위해 교통분야 위험도분석에 대한 선행 연구를 고찰한다.
- (3단계) PRA모형을 이용한 ITS사업의 경제성평가모형을 정립하고 의사결정방법론을 제시한다.
- (4단계) 사례분석을 통해 정립한 모형을 개발하고 모형의 적합성 및 유용성을 검증한다.
- (5단계) 모형간 비교를 통해 개발모형의 특·장점 및 활용도를 확인하고, ITS사업 경제성평가 지침(Guideline)을 제공한다.

II. 선행 연구고찰

1. ITS사업의 경제성평가모형 고찰

DEA모형을 이용한 ITS사업의 경제성분석은 ITS서비스 목적에 따라 서비스 이용률을 교통수요예측모형을 통해 도출하여 이에 따라 대안별 비용과 편익항목을 각각 현재가치로 환산하고 이를 통해 편익/비용비, 순현재가치, 내부수익률 등 평가지표를 계산하는 일련의 과정

을 수행하게 된다. 이러한 DEA모형을 활용한 ITS사업의 경제성분석 적용사례는 국외의 경우 Brand(1994)의 연구가 대표적인데, 개별 사업을 프로그램단위로 세분화하고 관련 편익을 유발하는 사업을 집합화(Grouping)하여 주어진 예산범위 내에서 프로그램을 평가할 수 있는 경제성분석의 틀을 정립하였다. 국내의 경우, 교통개발연구원(1996, 1999, 2002), 김원규(1998)는 ITS사업의 사업효과를 계량화하기 위한 경제성평가모형으로 DEA모형을 이용하여 정립하였다. 상기 분석방법론을 기반으로 서울시, 과천시, 수원시 등 지자체 ITS사업평가모형으로 적용하였다. 적용결과, 사업평가지표의 변동이 심하고 사업전후의 사업효과가 상이한 사례가 나타났다. 또한 현행 사업성평가지침(건설교통부, 2001; 한국개발연구원, 2001) 역시 공급위주 교통시설투자평가로 교통정보 및 제어를 통한 교통운영의 동적인 변화를 계량화해야하는 ITS사업평가에는 부적합한 것으로 나타났다.

2. 교통분야 위험도분석모형 고찰

1990년대 이후 민간부문의 사회간접자본투자가 확

대되면서 교통사업의 재무성평가방법으로 PRA모형이 활용되어 왔다. PRA모형을 이용한 타당성분석에 관한 선행연구사례는 <표 2>와 같으며, 일반교통사업의 경제성분석에 적용된 PRA모형은 수렴조건 등 분석방법론이 미흡하고 계산비용과 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 의사결정 방법론이 애매하다는 문제점을 가지고 있다. 또한 대규모 공급위주의 교통투자사업에 대한 재무성평가를 위주로 자원(사업비, 공사기간) 관리 목적으로 개발되었을 뿐만 아니라, 사업의 위험변수에 대한 이력자료 부족과 분포추정의 오차에 대한 문제점, 확률분포의 적용과 해석에 있어 주관성이 개입할 수 있는 문제점을 가지고 있다. (PouliQuen, 1972 ; IBRD, 1972 ; Lam외, 1998 ; Malini, 1999 ; 원제무외, 1999 ; Touran, 1997 ; Grimsey외, 2000)

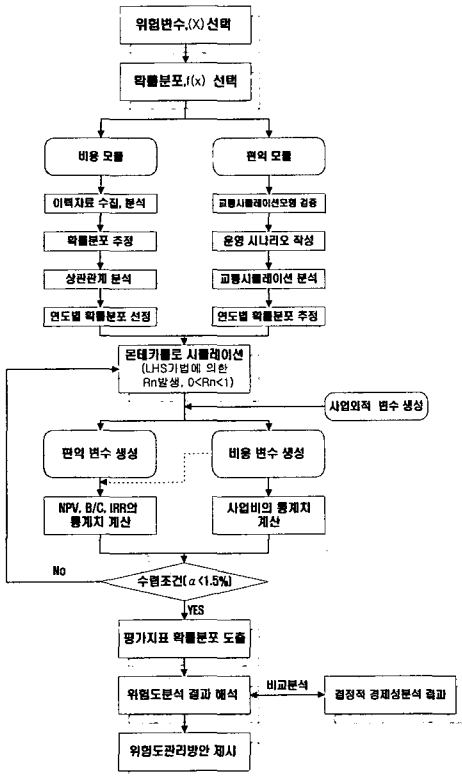
III. ITS사업의 경제성평가모형 정립

본 절에서는 몬테카를로시뮬레이션¹⁾기반의 PRA모형을 이용하여 ITS사업의 경제성분석을 수행하기 위한 분석방법론을 <그림 1>과 같이 정립하였다. 각 단계별 주요 절차 및 계산과정은 다음과 같다.

<표 2> 교통관련사업의 PRA모형 적용 사례

연구자	분석 목적	분석 대상	분석 방법 및 내용
Louis Y. Pouliquen (1972)	IBRD사업으로 저개발 국가에 대해 기존의 경제성분석(민감도분석)을 보완한 확률분석 개념 도입	소말리아 Mogadiscio 지역의 Lighterage항만 건설사업 (1967년)	몬테카를로시뮬레이션의 기본 개념을 도입하여 공학적 판단에 의한 사업비확률밀도 추정 및 IRR의 누적확률밀도 도출
IBRD (1972)	IBRD사업으로 불확실성이 높은 저개발 국가대상 사업에 대해 확률분석 개념 도입	잠비아의 Copper 벨트부터 탄자니아의 Dar-es-Salaam 항구에 이르는 965마일의 2차로 도로건설 사업	몬테카를로 기법을 활용하여 공학적 판단에 의한 비용의 확률밀도 및 IRR의 누적확률밀도 산정
Touran (1997)	미 대중교통국 (FTA)의 철도사업의 재무와 건설위험을 통합적으로 분석하기 위해 위험도분석모형 도입	미 대중교통국이 추진하는 19.3Km의 철도사업의 총건설비용 및 현금흐름분석	몬테카를로시뮬레이션기법을 활용하여, 발생비용의 재원조달방식별로 재무적 위험도를 분석하며, 총사업비의 누적확률밀도와 사업기간의 현금흐름분석을 도출
원제무 (1999)	민자유치 고속도로의 사업성분석을 위한 위험도분석기법 정립 및 사례분석	BOT방식의 2개 민자 고속도로를 대상으로 하여 사례분석 수행 (의곡순환고속도로, 대전-당진고속도로)	몬테카를로시뮬레이션 기법을 활용, 공학적 판단에 비용과 편익의 확률밀도합수를 선정, 총공사비, NPV의 누적확률밀도를 도출
김인호, 현창택 외 (2000)	경량전철에 관한 민간투자사업의 재무적 위험도 분석모형 정립	BTO방식의 중소 도시 경량철도민자투자사업의 사례분석 수행	몬테카를로시뮬레이션 기법을 활용하여 공학적 판단에 의해 비용, 편익의 확률밀도를 산정, 총사업비 및 NPV의 누적확률밀도를 도출
Darrin Grimsey, Mervyn K. Lewis (2000)	민·관협력, 민간자본 참여사업의 사업주체별 위험도분석모형 정립	스코틀랜드의 하수관리 민자사업에 대해 사례분석을 수행	몬테카를로시뮬레이션기법을 활용, IRR의 누적확률밀도 도출

1) 몬테카를로시뮬레이션기법은 협의적 해석과 광의적 해석으로 구분할 수 있는데, 협의적 해석은 결과변수의 확률변수를 입력변수의 확률분포로부터 추출하여 계산하는 샘플링기법을 의미한다. 반면 광의적 해석은 난수를 사용하여 모의실험을 반복적으로 수행하는 시뮬레이션기법을 포함하는 것으로 본 연구에서는 광의적 해석을 의미한다.



〈그림 1〉 PRA를 이용한 ITS사업경제성 분석절차

1. 위험변수선정

경제성평가를 위한 위험변수 선정은 교통개발연구원(1999)과 건설교통부(2002)의 ‘공공교통시설 개발사업에 관한 투자평가지침’을 준용하되, 국내·외 연구사례(Rossi,1993; Tarry,1996; Brand,1998 ; US. DOT,1999 ; 교통개발연구원,1996,1998, 2002 ; 김원규,1998)분석을 통해 ITS사업의 경제성분석 특성을 최대한 반영할 수 있도록 〈표 3〉과 같이 도출하였다. 먼저 비용변수는 크게 사업비와 운영비로 나뉘어 진다. 여기서 사업비는 시장가격이 활용되고, 유지관리비는 사업비의 매년 10%씩 발생하는 것으로 분석한다.

편익변수는 사용자측면에서 통행시간·차량운행비 절감, 교통사고 감소, 운영자측면에서 운영비·유지관리비 절감, 생산성·수익증가를, 사회적 측면에서 대기오염 감소, 소음감소를 편익으로 고려한다. 본 연구에서는 DEA모형을 활용한 일반교통사업 및 ITS사업 경제성평가 결과의 비교분석을 통해 PRA모형의 적합성을 검증하기 위하여 국내 투자평가지침에서 사용되는 편익변수와 평가계수를 동일하게 사용, 분석하였다.

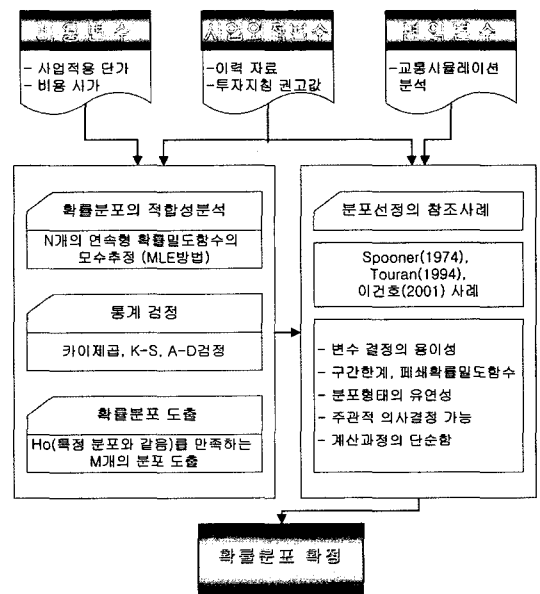
〈표 3〉 ITS사업의 경제성평가시 사업내적인자

구분	항목 구분	계량화 방안
비용	<ul style="list-style-type: none"> • 사업비(장비비, 설치비,)* • 운영비(인건비, 전기통신비등)* • 조사·설계·감리비* 	<ul style="list-style-type: none"> • 각 시스템 시설가격(원) • 운영 및 유지관리비(원) • 조사·설계·감리비(원)
	<ul style="list-style-type: none"> • 차량운행비 절감* • 통행시간 단축* • 교통사고의 감소* • 대기오염 감소* • 소음감소** • 운영비·유지관리비절감** • 접근성향상** • 생산성, 수익증가** 	<ul style="list-style-type: none"> • 통행비용(0원) • 통행시간(시간) • 교통사고의 사회적비용(원) • 오염종류별 배출량(g/대) • 소음의 가치(dB) • 운영비용, 유지관리비용(원) • 접근시간(시간) • 운영수익(원)

주 : *는 본 연구 적용변수
 **는 계량화방법 개발을 통해 장기적 분석이 필요한 변수

2. 확률분포선정

ITS사업의 경제성평가를 위해 선정한 위험변수(비용·편익변수)에 대해 확률밀도함수, $f(x)$ 를 산정한다. 이 과정은 PRA모형의 정확도를 결정하는 중요한 과정으로 위험변수의 특징에 따라 이력자료를 기반으로 한 통계분석방법과 Spooner(1974), Touran(1994)의 선정기준에 의한 방법으로 구분하여 〈그림 2〉와 같이 산출한다.



〈그림 2〉 위험변수 확률분포 및 모수추정 과정

1) 비용변수 확률분포

비용변수는 비용 발생특성과 수집자료의 양과 질을 고려, 이력자료를 이용하여 확률분포의 모수(μ, σ 또는 α, β)를 추정하는 방법을 사용한다. 통계적 추정방법으로는 최소자승법(Least Square Method), 최우추정방법(Maximum Likelihood Estimation Method)²⁾을 이용하여 통계검증(χ^2 , KS, AD검정)을 통해 확률밀도함수의 모수에 대한 적합성³⁾을 검증한다.

2) 편익변수 확률분포

편익변수는 ITS도입에 따른 사업효과를 운영측면에서 미시적으로 분석하기 위하여 이력자료에 의존하기보다 교통시물레이션을 통해 산출된 교통지표(통행거리, 통행시간, 통행속도, 배기가스배출량, 교통사고건수)를 통해 산출하였다. 발생가능한 운영시나리오를 작성하고, 교통시물레이션모형을 통해 산출한 시나리오별 교통분석결과를 교통지표로 산출한다. 운영시나리오별로 대안을 화폐단위로 계량화하고, 이를 근거로 확률분포 선정기준⁴⁾에 따라 편익변수의 확률분포를 도출한다.

3) 사업외적변수 확률분포

사업외적변수는 이력자료가 있는 경우(물가지수, 이자율) 이력자료를 활용한 통계적 검증을 통해서, 정부 권고안이 있는 경우(할인율) 확률분포선정기준을 통해서 산출한다.

3. 위험변수의 난수발생

1) 위험변수 난수 발생

- 2) 최소자승법(Least Square Method)은 임의의 n 곡선과 지점(X_i, Y_i)의 집합사이의 RMSE(Root Mean Square Error)를 최소화하는 계수(α)를 찾아가는 과정으로 하나이상의 계수를 산출할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation Method : MLE)은 주어진 자료 집합이 구성하는 확률분포의 우도함수, $L = \prod_{i=1}^n f(X_i, \alpha)$ 를 최대화하는 계수를 찾아내는 방법으로, 여기서 최우추정자를 최대화하는 계수(α)를 산출하기 위해 1차 미분이 0이 되는 값을 도출하는데, 이때 한 개 이상의 분포 계수를 도출할 수 있다. 또한 최우추정법은 표본수가 작은 경우 매우 편향(Bias)된 결과를 산출할 수 있어 확률분포선정 시 주의가 필요하다.
- 3) 본 연구에서는 입력변수의 분포와 모수의 적합성은 통계검증을 통해 결정하며 χ^2 검정을 기본으로 χ^2 검정의 묶음선정의 임의성을 보완하기 위해 KS검정, KS검정의 후미차이(Tail Discrepancies)를 검지하지 못하는 단점을 보완하기 위해서 AD검정을 사용한다
- 4) Spooner(1974), Touran(1994), 이진호(2000)등이 제시한 확률분포의 선정기준을 종합하면, 첫째, 분석가의 주관적 의견반영이 용이해야 한다. 둘째, 변수의 결정이 쉽게 이루어져야 한다. 셋째, 다양한 분포유형의 제공이 가능하도록 충분한 유연성을 가져야한다. 넷째, 구간한계, 폐쇄 확률밀도함수를 가져야 한다. 다섯째, 비대칭분포를 표현할 수 있어야한다. 여섯째, 단일형식으로 표현할 수 있어야한다. 일곱째 계산과정이 단순해야 한다. Spooner(1974), Touran(1994)은 균등분포는 상대적으로 변수의 변동범위가 작으면서 최우추정치가 불분명할 경우, 삼각분포는 위험변수의 최대값, 최우값, 최소값에 대한 정보가 비교적 정확하다고 판단될 경우 적용할 것을 권고하고 있다.
- 5) 몬테카를로기법은 확률분포 상에서 발생확률이 높은 지역의 입력변수가 집중되는 군집문제(Cluster Problem)를 야기시킨다. 이러한 결과는 낮은 확률을 가지지만 중요한 결과를 초래할 수 있는 사건을 고려하지 못함으로써, 사업의 위험도를 정확히 계량화하지 못하는 문제점을 가지고 있다.
- 6) 위험변수(x_i)의 합이 $X_{mi} = \sum_{i=1}^n X_i$ 일때, 위험변수합의 분산($Var(X_{mi}) = \sum_{i=1}^n Var(X_i) + \sum_{i \neq j}^n Cov(X_i, X_j)$)은 위험변수 분산과 공분산값으로 구성되며, 이때 상관관계($\rho^{(E, X)}$)와 공분산 $Cov(X_i, X_j)$ 의 관계는 $\rho^{(C, C)} = \frac{Cov(X_i, X_j)}{\sigma_i \times \sigma_j}$ 과 같다. 이때 분포간의 상관관계는 -1~1의 값을 가지며 0은 두변수가 독립적인 것을 의미하고, 1은 한 변수가 큰 값이 발생하면 다른 변수도 큰 값을 발생시키고, -1은 한 변수가 큰

결과변수(경제성평가지표)의 확률분포를 도출하기 위해서는 입력변수(위험변수)의 확률분포형태와 모수를 추정하는 다음, 분포들에 대한 난수를 발생하여 연산을 한다. 본 연구에서는 몬테카를로기법의 문제점⁵⁾을 개선한 Mackey, Beckman과 Conover(1979)의 LHS (Latin-Hypercube Sampling)기법을 도입하였다. LHS 기법은 누적확률분포상 Y축인 0~1사이의 P(x)값을 M개 구간으로 분할하고, 분할구간 내 대수학적기법의 일종인 Mixed Congruential방법에 따라 0과 1사이의 가난수(Rn)를 식(1)과 같이 발생시켜 누적분포상의 P(x)에 상응하는 위험변수값(X)을 반복적으로 M회(M=100회) 순차적으로 비복원 발생시킨다.

$$X_{n+1} = (aX_n + c) \text{ modulo } m, n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

여기서, X_0 : 초기값

a, c, m : 명시된 양의 정수

$$m = 2^{35}, a = 2^7 + 1, c = 1$$

이때 한번 추출된 구간에서 다시 표본을 선정하지 않음으로써, 전 구간에 고루 표본을 추출하기 때문에 위험변수의 추출표본이 확률분포에 빠르게 수렴한다.

2) 위험변수간 상관관계

위험변수간 상관관계가 있을 경우, 분포에서 추출한 값이 다른 분포에 추출된 값에 영향을 주게 된다. 변수간 상관관계($\rho^{(E, X)}$)⁶⁾를 고려하기 위해 시물레이션 상에서 분포형태의 제약없이 다양한 분포간의 상관계수를 설

명할 수 있는 순위상관계수법(Rank Correlation Coefficient Method)을 적용한다. 이 방법은 먼저 Wearden의 순위점수를 N개 발생시켜 위험변수의 순위점수쌍을 N개 발생시킨다. 다음으로 식(1)에 의해 위험변수의 난수를 발생시키고, 위험변수(X1, X2, ..., Xn)를 순위별로 N번째까지 오름차순으로 나열하고 앞서 도출한 순위점수쌍(Rank Score)에 맞도록 재배열하여 연산에 필요한 변수쌍을 만든다. 이러한 분석방법은 이상적인 확률분포를 가정하고, 결합밀도함수를 통해 변수간 공분산값을 추정하는 통계적 방법에서 벗어나 어떤 분포 하에서도 변수간 상관관계를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

4. 시뮬레이션 및 통계분석

1) 몬테카를로 시뮬레이션 수행

위험변수의 결과변수 산정을 위해 사업비 및 경제성 분석 평가지표를 반복해서 계산한다. III.3.의 과정을 반복적으로 계산해나가되, N-1회까지 발생한 평가지표의 통계치(평균, 표준편차, 5%값, 50%값, 95%값)가 N회 발생한 결과변수의 통계치의 수렴조건(α=1.5%) 내에서 변화하면 시뮬레이션을 종료한다. 이때 반복횟수가 많을수록 매끄러운 확률분포곡선이 도출된다. 동시에 결과변수(사업비, NPV, B/C, IRR)의 통계지표(평균, 분산, 표준편차, 최대값, 최소값) 및 확률밀도함수, f(x)와 누적확률분포, F(X)를 도출한다.

2) 결과변수 통계분석

결과변수로는 사업비, 경제성평가지표, 변동계수를 활용한다. 사업비분석은 누적확률분포상 관리목표값(Co)을 설정하고, 공학적 원가계산을 통해 추계한 추정사업비(C*)를 비교하여 사업비의 위험도를 계량화하는 우발성비용(Contingency Budget)을 식(2)와 같이 산정한다.

$$CB = \sum P(C_o) \times (C_o) - \sum P(C^*) \times C^* \quad (2)$$

변동계수(Coefficient of Variation:C.V)는 결과변수의 기대값(μ)을 표준편차(σ)로 나눈 값으로, 결과

변수의 변동을 계량화하여 위험도를 판단하기 위한 평가지표로 사용한다.

$$C.V = \mu / \sigma \quad (3)$$

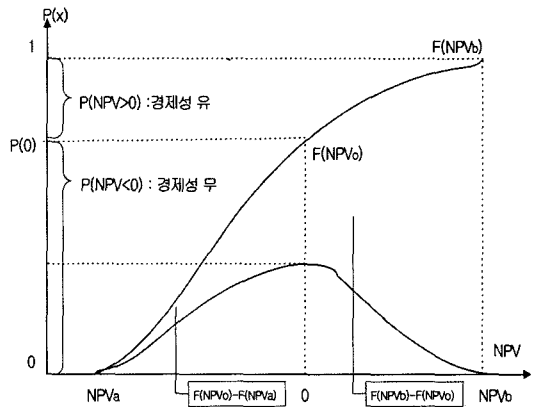
경제성평가는 평가지표(B/C, NPV, IRR)의 통계치(%값, 기대값) 및 누적확률분포 형태를 통해 판단한다. 결과변수는 비용·편익·사업의적변수의 확률밀도함수로부터 몬테카를로시뮬레이션을 통해 매회 난수쌍을 발생시키면서 이때마다 결과변수를 산출한다.

NPV의 경우, 누적확률밀도함수를 식(4)와 같이 추정하며, NPV의 통계치(평균, 분산, 표준편차, 최대값, 최소값)를 분석한다. 양(+)의 구간 %비율(1-p(0))이 높고, 0~1구간 전체의 NPV 기대값이 양수일 때 경제성이 높다. 또한 누적확률밀도함수의 분포형태가 완만하고, NPV 기대값이 음수이며, 결과변수의 변동계수가 작으면, 경제적 위험도가 높은 사업으로 분류한다.

$$F(x) = \int_{NPV_a}^{NPV_b} f(y) dy = F(NPV_b) - F(NPV_a) \quad (4)$$

여기서, $NPV \in I, I = [NPV_a, NPV_b]$,

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{B_i - C_i}{(1+d)^i}$$



<그림 3> NPV의 확률밀도함수와 누적확률밀도함수

값을 발생시키면 다른 변수는 매우 작은 값을 발생시키는 것을 의미한다. Touran(1993)은 위험변수에 대한 정보가 부족한 경우, 시뮬레이션 분석을 위한 위험변수간 상관계수 입력값으로 상관계수 강, 중, 약함에 따라 0.15, 0.45, 0.8를 사용토록 권고하고 있으며, 본 연구에서도 Touran(1993)의 권고값을 사용하였다.

5. 사업평가방법

ITS사업의 경제적 타당성평가는 사업대안의 경제성 유무와 주어진 예산 내 준공할 수 있는지를 판단하는 과정이다. 따라서 합리적인 의사결정을 위해서는 사업의 경제성 및 사업비의 변동을 동시에 고려해야 한다. 따라서 본 연구는 경제성평가지표(NPV⁷⁾)의 기대값과 우발성비용을 기준으로 위험도와 경제성을 동시에 고려하도록 사업유형을 4가지(I~IV)로 구분하였다. 사업 유형에 따라 투자우선순위가 유형 I>유형II·유형III⁸⁾>유형IV순으로 결정이 된다.

〈표 4〉 의사결정 판단기준

구분	大 ← 경제성 → 小	
위험 ↑ ↓ 大	○ I 유형 -경제성 높음, 사업비 미초과 -판별식 : $(E(A) > E(B)) \wedge (Co < C^*)$	○ III 유형 -경제성 낮음, 사업비 미초과 -판별식 : $(E(A) > E(B)) \wedge (Co < C^*)$
	○ II 유형 -경제성 높음, 사업비 초과 -판별식 : $(E(A) < E(B)) \wedge (Co < C^*)$	○ IV 유형 -경제성 낮음, 사업비 초과 -판별식 : $(E(A) < E(B)) \wedge (Co < C^*)$

주 : $E(A) = \int_0^0 NPVA f(y) dy$, $E(B) = \int_0^{NPVB} f(y) dy$
 Co = 관리목표값, C^* = 추정사업비

IV. 사례분석

1. 분석자료 및 기본가정

사례분석대상지로 대전광역시 첨단교통모델도시사업을 선정, PRA모형을 이용하여 경제성평가모형을 개발하고 DEA모형과 비교분석을 통해 대규모 ITS사업에서 모형의 적합성 및 유용성을 검증하였다.

1) PRA모형

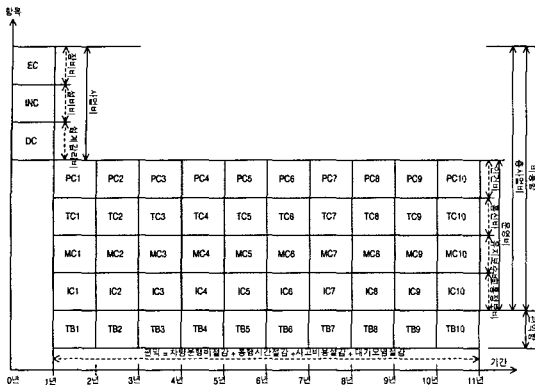
PRA모형의 위험변수는 사업내적변수인 비용·편익 변수와 사업외적변수로 구분할 수 있으며, 위험변수의 발생분포에 대한 기본가정은 〈그림 4〉, 〈표 5〉와 같이 연도별, 항목별로 상이하게 적용되었다.

비용변수는 구축 시 사업비와 분석기간동안 발생하는 운영비를 포함하는 총사업비로 구분된다. 사업비는 장비비(Equipment Cost : EC), 설치비(INstall Cost : INC), 설계·감리비(Design·Supervision Cost : DSC)로 구성된다. 여기서 EC는 「불가정보지 및 사업자견적서」에서 ITS요소장비비 표본을 추출하여 요소장비별 비용의 확률분포를 추정하였다. 예를 들면, CCTV는 31개 표본을 수집, 최우추정법을 통해 통계검증(χ^2 ,KS,AD검정) 후, 식(5)와 같이 Lognorm (8.9백만원, 2.3백만원²⁾)이라는 최적 확률밀도함수를 도출하였다.⁹⁾ 또한 장비의 수명주기는 전산장비는 5년, 현

〈표 5〉 확률변수의 확률분포유형

확률변수	확률분포함수 유형
EC1(제어기)	Triang($Min_{EC1}, Most\ Likely_{EC1}, Max_{EC1}$)
EC2(검지기)	Triang($Min_{EC2}, Most\ Likely_{EC2}, Max_{EC2}$)
EC3(VMS)	Triang($Min_{EC3}, Most\ Likely_{EC3}, Max_{EC3}$)
EC4(CCTV)	Lognorm(μ_{EC4}, σ_{EC4})
EC5(속도단속기)	Triang($Min_{EC5}, Most\ Likely_{EC5}, Max_{EC5}$)
EC6(신호위반속)	Lognorm(μ_{EC6}, σ_{EC6})
EC7(중앙호스트)	Lognorm(μ_{EC7}, σ_{EC7})
EC8(소형서버)	Beta($\alpha_{EC8}, \beta_{EC8}$)
EC9(GIS)	Triang($Min_{EC9}, Most\ Likely_{EC9}, Max_{EC9}$)
EC10(상황판)	Lognorm($\mu_{EC10}, \sigma_{EC10}$)
EC11(통신설비)등	Weibull($\alpha_{EC11}, \beta_{EC11}$)
INC	EC × 18%
DSC	EC × 5.07%
PC	Uniform(Min_{PC}, Max_{PC})
TC	Triang($Min_{TC}, Most\ Likely_{TC}, Max_{TC}$)
MC	Triang($Min_{MC}, Most\ Likely_{MC}, Max_{MC}$)
IC	Triang($Min_{IC}, Most\ Likely_{IC}, Max_{IC}$)
TB1	Triang($Min_{TB1}, Most\ Likely_{TB1}, Max_{TB1}$)
합인율(d)	Triang($Min_d, Most\ Likely_d, Max_d$)
물가상승률(i)	Triang($Min_i, Most\ Likely_i, Max_i$)

7) ITS사업의 경제성평가지표로는 B/C, NPV가 많이 활용되고 있으나, 일반건설교통사업에 비해 사업비가 낮아 비용에 대한 영향이 적은 반면 교통네트워크상 운영개선을 통해 편익의 변화가 크게 산정되는 경향이 있어 순현재가치를 주로 이용했다.
 8) 유형II·유형III은 위험요인을 보험 등을 통해 다른 주체에 전가 또는 위험요인을 제외하고 사업을 추진하는 방식 등으로 관리할 수 있는 경우 경제성이 높은 유형II를, 관리가 불가능한 경우 유형III을 적용하는 것이 바람직하다.
 9) 위험변수(비용변수, 편익변수, 사업외적변수)의 확률분포와 모수추정은 Bestfit Version 4.0(Palisdade, 2000)으로 분석한다. CCTV의 확률분포와 모수선정을 위해 χ^2 검정, KS검정, AD검정을 수행한 결과, χ^2 통계량은 1.33으로 유의수준(0.05)내에서 검정통계량 3.88보다 작고, KS통계량은 역시 0.13으로 유의수준(0.05)내에서 검정통계량 0.73보다 작으며, AD통계량은 0.05로 유의수준(0.05)내에서 검정통계량 0.15보다 작아 귀무가설(H_0 : 입력자료가 특정분포를 따른)을 받아들여 로그정규분포가 적합한 것으로 분석된다.



〈그림 4〉 연차별 비용·편익항목 발생분포

장장비는 10년으로 분석하고 수명주기이후 재설치하는 것으로 분석하였다. 설계비(INC)는 장비비(EC)의 설치공사요율 18%, 설계비(DSC)는 공사비(EC+INC)의 5.07%로 전력기술관리법등 관계법령에 의한 요율을 적용한다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sqrt{2\pi \cdot 2.3\text{백만원}^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - 8.9\text{백만원})^2}{2 \cdot 2.3\text{백만원}^2}\right), & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad (5)$$

총사업비는 사업비에 분석기간 동안 투입되는 인건비(Manpower Cost:PC), 전기통신비(Electronic·Communication Cost:CC), 교통정보이용료(Information Cost:IC), 유지보수비(Maintenance Cost:MC)로 구성된다. 여기서 인건비(PC)는 「엔지니어링사업대가 기준」으로 시스템별인력 구성에 따라 달라지며, 균등분포를 적용한다. 전기·통신료는 「한국통신임대료요율 및 한국전력의 전력판매단가기준」에 따라 59원/Kw를 적용하며, 기기별 사용변화에 따라 삼각분포를 적용한다. 교통정보이용료는 핸드폰·CNS수신장치 보급을 통해 유료로 교통정보를 제공함으로써 발생하는 비용으로 식(6)과 같이 산정한다.

$$IC = \text{정보수신장비구입비} \times \text{구입차량수} + \text{수신장치 장착 차량} \times \text{정보이용료(원/월)} \times 12\text{개월} \quad (6)$$

여기서, 수신장치장착비용 : 2004년, 전체차량의 5% 부터 2012년 25%까지 보급, 격년마다 5% 씩 증가, 내구연한 : 5년

또한 유지보수비용(MC)은 장비비(EC)의 10%로 가정하여 분석하였다. 상기 방법을 통해서 도출된 PRA 모형의 비용변수 확률분포 및 모수추정결과는 〈표 6〉과 같다.

편익변수의 확률분포는 〈그림 2〉와 같은 절차를 통해 산정된다. 사업시행이전의 교통지표를 도출하기 위해 시스템별로 구축상황에 맞는 운영시나리오를 작성하여 교통시물레이션분석을 수행한다. 운영시나리오는 교통조건(돌발상황, 정상상황), 신호운영조건(실시간 신호제어 시행, 미시행) 교통정보조건(가변정보판 구축, 교통정보안내단말기 설치·정보이용(5%~30%))에 따라 발생 가능한 20개 대안을 작성하여¹⁰⁾ 교통시물레이션분석(INTEGRATION)을 활용하여 주요 교통지표의 변화를 분석하였다.¹¹⁾

시행 전·후, 대안별로 대전광역시 교통네트워크(대

〈표 6〉 비용변수 확률분포 및 모수추정결과

구분	장비비	인건비	전기통신비	교통정보료
통합시스템	통계추정 (표5참조)	Uniform (6.8,7.9억)	Triang (9.9,11,12억)	Triang (26,28,52억)
신호제어	"	Uniform (3.2,4.3억)	Triang (4.7,5.3,5.8억)	-
교통정보	"	Uniform (4.0,5.1억)	Triang (6.0,6.7,7.4억)	Triang (26,28,52억)
돌발상황	"	Uniform (4.0,5.1억)	Triang (9.9,11,12억)	Triang (26,28,52억)

주) 균등분포 : Uniform(최소값, 최대값)
삼각분포 : Triang(최소값, 최우값, 최대값)
설치비, 설계·감리비, 유지보수비는 장비비의 비율로 연동

10) 교통조건은 침투시 정상상황과 돌발상황을 구분하고 각각의 교통조건별로 신호제어시스템, 교통정보시스템, 돌발상황관리시스템에 대해 분석하였다. 돌발상황은 신호제어와 VMS 및 교통정보제공을 통해 경로전환이 가능한 주요 간선도로측 3개를 지정하여 무작위로 발생토록 하였으며, 돌발상황 발생 시 최대 2개 차로에 영향을 미치도록 설정하였다. 신호제어시스템은 주요 교차로 11개소에 신신호 구축을 통한 실시간 신호제어(Traffic Responsive Control)를 제공토록 하였다. 교통정보제공시스템은 주요 간선도로 28곳에 가변정보표지판(VMS)을 설치하여 운전자의 30%가 교통정보를 활용하여 경로를 전환하는 것으로 분석하였다. 또한 연차별로 승용차 보유대수의 5~30%까지 차내단말기를 탑재하여 실시간 교통정보를 활용하는 것으로 분석하였다. 돌발상황시스템은 혼잡상황 또는 돌발상황을 감지하여 정보제공시스템과 신호제어시스템을 연계하여 교통네트워크의 운영을 최적화하는 것으로 INTEGRATION내 돌발상황 입력프로파일을 이용하여 분석하였다.

11) 일일 OD교통량을 침투 1시간 동안 INTEGRATION을 통해 모의실험을 수행하여 총통행시간과 총통행거리를 도출하였으며 이를 K인자(K factor)로 나누어 일기준으로 환산하여 사용하였다. 여기서 K인자는 KHCM(대한교통학회,2001)의 도시부 0.07~0.11을 사용하되 대표값인 0.09를 사용하였다.

〈표 7〉 편익변수 확률분포 및 모수추정결과

구분	2003년	2006년	2011년
통합시스템	Triang (50, 54, 60억)	Triang (92, 98, 102억)	Triang (195, 228, 238억)
신호제어	Uniform (46, 49억)	Uniform (79, 82억)	Uniform (171, 179억)
교통정보	Triang (49, 50, 60억)	Triang (80, 86, 92억)	Triang (175, 181, 186억)
돌발상황	Uniform (59, 60억)	Triang (96, 98, 102억)	Triang (217, 228, 238억)

전광역시, 2000)의 총통행거리와 총통행시간을 기준으로 건설교통부(2002) 투자평가지침기준에 따라 통행시간절감 편익, 운행비용절감 편익, 교통사고절감 편익, 환경오염 절감편익의 4개 항목으로 계량화하여 합산한다. 이렇게 도출된 시스템 대안별 편익값은 시스템특성을 고려하여 Spooner와 Touran의 적용기준에 따라 복수대안의 경우, 삼각분포(최소값, 최우값, 최대값) 또는 이중대안의 경우 균등분포(최소값, 최대값)를 적용한다. 예를 들어 교통정보시스템은 2003년 편익기준으로 최소값은 정상교통상황 VMS제공시, 최우값은 돌발교통상황 VMS제공시, 최대값은 돌발상황 차내탑재장치를 통한 교통정보제공 대안으로 입력하여 Triang(49억, 50억, 53억)으로 확률밀도함수를 산출한다. 편익변수의 확률분포 및 모수추정결과는 〈표 7〉과 같다.

사업외적변수로는 할인율은 6~12%까지 변동하며 일반적으로 7.5%를 적용하고 있다. 따라서 할인율의 확률분포는 삼각분포를 기반으로 6, 7.5, 12%를 최대값, 최우값, 최대값으로 하여 식(7)과 같이 Traing(6, 7.5, 12)로 설정한다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(X-6)}{(7.5-6)(12-6)} & \text{if } 6 \leq x \leq 12 \\ \frac{2(7.5-x)}{(12-6)(7.5-12)} & \text{if } 12 < x \leq 7.5 \\ 0 & \text{기타} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, a : 최대값

b : 발생가능성이 가장 높은 값

c : 최대값

물가상승율은 35년간(1966년-2002년) 이력자료를 수집, 통계분석을 통하여 생산자물가지수는 Triang(0.34, 2.69, 16%), 소비자물가지수는 Triang(-2.9, 1.5, 15.4%)를 적용하였다.

〈표 8〉 DEA모형 비용변수 입력자료 (단위:억원,2002년)

구분	사업비			운영비			
	장비비	설치비	설계·감리	인건비	전기통신비	유지보수	교통정보료
통합시스템	86.4	15.5	5.2	6.8	10.9	8.6	26
신호제어	32.1	5.8	1.7	3.2	5.2	3.2	-
교통정보	50.0	9.0	2.6	4.0	6.7	5.0	-
돌발상황	35.7	6.4	1.9	4.0	6.1	3.6	26

〈표 9〉 DEA모형 편익변수 입력자료 (단위:억원)

구분	2003년	2006년	2011년
통합 시스템	54	98	228
신호제어시스템	46	78	171
교통정보시스템	50	76	181
돌발상황시스템	59	98	217

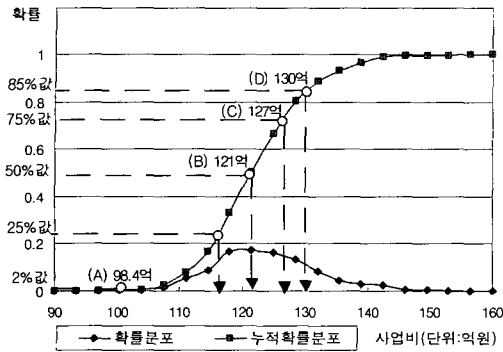
2) DEA모형

PRA모형과 비교분석을 위하여 DEA모형을 개발한다. DEA모형의 비용변수는 사업비와 운영비로 구분되며, 사업비에 해당하는 장비비용, 설치비, 설계·감리비는 2002년 첨단모델도시사업 실시설계 단가를 적용하였다. 운영비용중 인건비, 전기통신비, 유지관리비는 실시설계의 인력투입계획, 유지보수계획, 장비의 전력사용계획에 따른 적용단가를 적용한다. 또한 교통정보이용료는 식(6)과 같이 산정·적용한다.

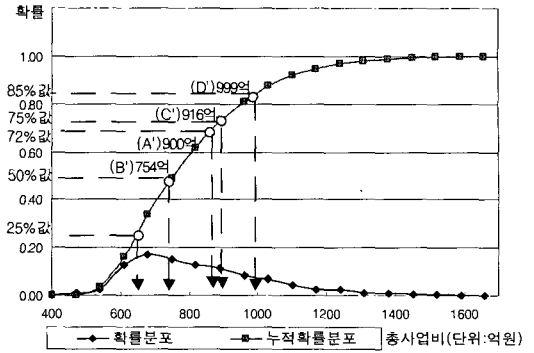
편익비용은 시나리오중 시스템 구축대안을 적용하여 PRA모형과 동일한 편익산정절차를 통해 〈표 9〉와 같이 적용한다. 아울러 사업외적변수의 경우, 할인율은 「건설교통부 공공투자지침」 권고값인 7.5%, 물가상승률은 이력자료의 평균값을 사용하여 생산자물가지수 2.69%, 소비자물가지수 1.5%를 적용하였다.

2. 시뮬레이션 분석결과

PRA모형을 이용한 ITS사업경제성평가모형은 윈도우환경에서 작동가능토록 @RISK3.4.2를 기본으로 엑셀 매크로와 VBA를 활용하여 모형에 Add-in 할 수 있도록 개발하였다. 경제성평가의 입력변수에서 난수를 발생·연산하여 결과변수의 수렴조건(a=1.5%)에 도달하면 결과변수의 통계분석을 통해 사업비 및 경제적 타당성을 분석한다.



〈그림 5〉 사업비의 확률분포와 누적확률분포



〈그림 6〉 총사업비의 확률분포와 누적확률분포

1) 사업비 분석

사업비는 사업구축 시 소요되는 총비용으로, 적용단가를 집계한 사업비(DEA모형)는 98.4억원이며, 이는 〈표 10〉, 〈그림 5〉와 같이 PRA모형을 통해 산출된 사업비의 누적확률분포(CDF)상 2%값(지점A)에 해당한다. 이는 실시설계단계에서 집계된 사업비(DEA모형)를 초과할 확률이 98%에 해당하게 된다. 따라서 본 사업은 사업구축 시 사업비 초과로 인한 사업의 위험도가 높은 사업으로 분석된다.

사업비는 사업비에 운영비, 유지관리비를 포함한 비용으로, 실시설계를 기준으로 적용단가를 집계한 총사업비(DEA모형)는 900억원으로, PRA모형을 통해 산출된 총사업비는 〈표 10〉, 〈그림 6〉과 같이 누적확률분포 상 72%값에 해당한다. 이는 실시설계단계에서 집계된 총사업비를 초과할 확률이 28%로 사업의 위험도가 높다고 해석할 수 있다.

변동계수는 결과변수의 평균을 분산으로 나눈 값으로 높을수록 사업의 위험도가 낮아지는 것으로 해석한다. 본사업의 사업비와 총사업비의 변동계수는 〈표 10〉과 같다. 분석결과, ITS사업의 사업비, 총사업비의 변동계수가 일반교통사업보다 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 ITS사업이 일반교통사업과 다른 사업특성으로 인해 사업비변동의 위험도가 일반교통사업보다 높은 것을 의미다. 특히 운영비를 포함한 총사업비의 변동이 사업비의 변동보다 큰 것으로 나타내고 있다.

〈표 10〉 사업비, 총사업비 통계분석

통계치	사업비	총사업비
25%	116	648
50%	121	754
75%	127	916
평균	122	797
표준편차	8	193
변동계수	15	4

〈표 11〉 타 사업과의 사업비·총사업비 비교결과

연구자	사업비			총사업비		
	사례 분석	경동육의 (2000) ¹²⁾	US.DOT (1996) ¹³⁾	사례 분석	US.DOT (1994) ¹⁴⁾	US.DOT (1996) ¹⁵⁾
대상	ITS사업	경량철도	철도사업	ITS사업	철도사업	철도사업
μ	122억	4,855억	5,762만불	797억	120,250만불	9,927만불
σ	8억	45억	259만불	193억	6,300만불	354만불
C.V= μ/σ	15	107	22	4	19	28

우발성비용(CB)은 결과변수의 누적확률분포상 관리목표값(Target Value)을 설정하고, 단위원가를 집계한 사업비(DEA모형)와 비교하여, 사업비보다 관리목표값이 높은 경우 우발성비용을 식(2)와 같이 산정하여 예비비로 확보한다. 이때 관리목표값은 사업비의 변동 위험을 관리하기위해 누적확률분포상의 임의의 점으로 선정한다. 〈그림 5, 6〉상에서 사업비(A)를 누적확률분포상 관리목표값을 50%값(B), 75%값(C), 85%값(D)으로 선정, 우발성비용을 분석하였다. 위험도 관

12) 총연장 10.3Km에 BTO방식으로 민간투자사업으로 추진되는 U시 경량전철 건설사업의 재무위험도분석 추정결과

13) 매릴랜드 교통국(MTA)의 경량철도 구축 II단계 사업으로 총 7.5마일의 철도확장 사업의 사업비용 추정결과

14) 총연장 19.3Km 철도구축사업의 재무 및 건설 위험분석을 위한 사업비용 추정결과

15) 12)사업을 설계·구축을 통합한 터키발주 시 사업비용 추정결과

〈표 12〉 사업유형별 우발성비용 산정 (단위:억원)

관리목표값		50%값 (B)		75%값 (C)		85%값(C)	
		사업유형	CB	사업유형	CB	사업유형	CB
사업비	(2%값:A)	위험수용형	22.6	위험수용형	28.6	위험수용형	31.6
총사업비	(72%값:A')	위험회피형	0	위험수용형	16	위험수용형	99

주 : 위험수용형 사업 : 추정공사비 < 관리목표값,
 위험회피형 사업 : 추정공사비 > 관리목표값,
 위험중립형 사업 : 추정공사비 = 관리목표값

리목표값을 85%수준(C)으로 설정한 경우, 31.6억원, 75%값(B)에서는 28.6억원, 50%값(C)의 경우 22.6억원의 우발성비용이 필요하다. 또한 총사업비의 관리목표값을 85%수준(D')으로 설정한 경우 99억원, 75%값(B)에서는 16억원의 우발성비용이 필요하다. 따라서 사업추진 시 우발성비용을 예비비로 확보하여 사업비 초과에 대한 위험도에 대응해나갈 수 있다.

2) 경제성 분석결과

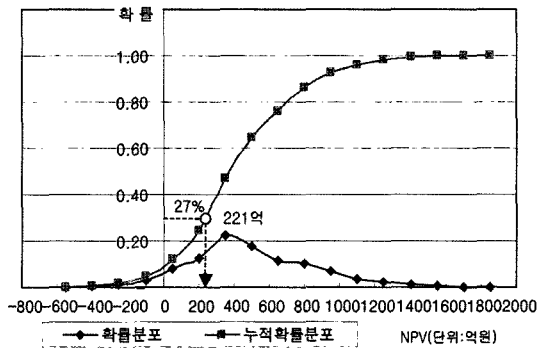
통합시스템의 경제성 분석결과, DEA모형은 B/C, NPV, IRR이 각각 1.3, 221억원, 33%로 사업의 경제성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 PRA모형의 결과변수 B/C, NPV의 확률분포 상에서 27%, 33%값에 해당한다. 또한 변동가능한 사업환경에서 B/C, NPV, IRR 각각 91%(B/C)1일 확률, 91%(NPV)0일 확률, 95%(IRR)7.5일 확률은 경제성이 있는 것을 의미한다. 또한 결과변수의 변동계수(C.V= μ/σ)는 B/C가 3.1 NPV가 1.2, IRR이 2.6으로 낮게 계산되고, 총사업비의 우발성비용이 (목표관리값을 총사업비 누적확률분포상 85%값으로 가정시) 99억원으로 경제성은 높으나 사업비 변동이 큰 사업으로 〈표 4〉의 의사결정 판단기준 사업분류에 따라 II유형으로 분류된다.

단위시스템의 경제성분석 결과, DEA모형은 경제성측면에서 B/C, NPV, IRR값이 큰 순으로 신호제어시스템 - 교통정보시스템 - 돌발상황관리시스템이 우선순위가 높은 시스템으로 선정된다. 그러나 PRA모형의 경우(16), 본 사업은 사업비의 우발성비용이 (목표관리값이 총사업비 누적확률분포상 85%값을 기준으로 가정시) 신호제어시스템, 교통정보시스템, 돌발상황시스템이 각각 42억원, 41억원, 141억원으로 경제성은 높으나 사업비 변동

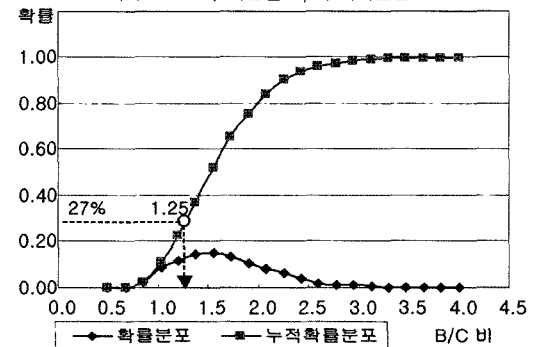
〈표 13〉 통합시스템의 경제성분석 결과분석

구분	총비용 (단위:억원)	총편익 (단위:억원)	NPV (단위:억원)	B/C	IRR (단위:%)	
PRA 모형	μ	801	1221	420	1.5	35.6
	σ	192	300	341	0.5	13.5
	C.V	4.2	4.1	1.2	3.1	2.6
DEA 모형	-	900	1121	221 (27%)	1.3 (27%)	30.1 (33%)

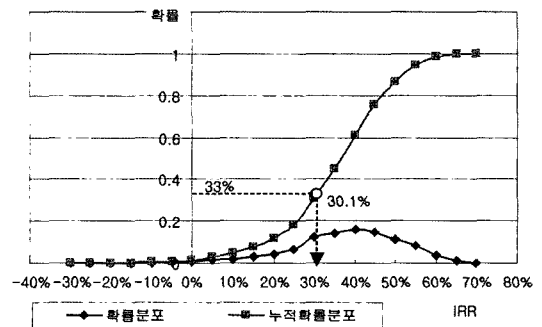
주 : ()는 경제성평가지표의 확률분포 상 백분율값



(a) NPV의 확률분포, 누적확률분포



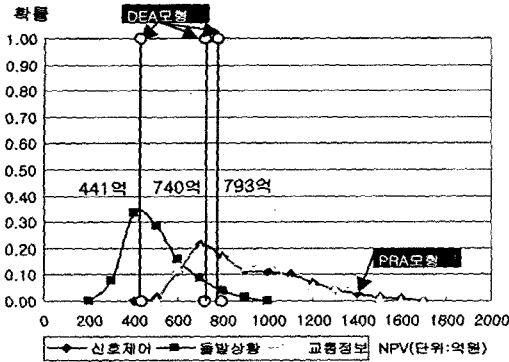
(b) B/C의 확률분포, 누적확률분포



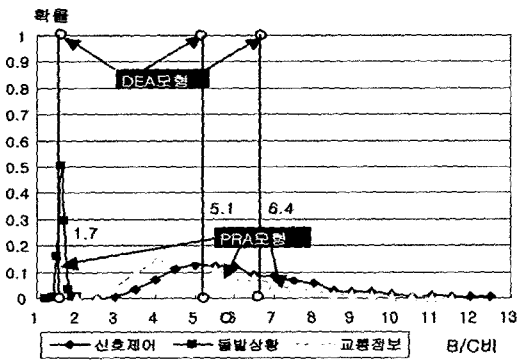
(c) IRR의 확률분포, 누적확률분포

〈그림 7〉 통합시스템 결과변수의 확률분포

16) 복수대안에 대해 사업의 경제성 및 사업비의 변동을 동시에 고려하여 사업의 유형에 따라 사업타당성 유형별로 분류하고 동일 사업유형 내에서는 B/C>1, NPV>0, 총사업비의 변동계수가 높은 시스템을 우선 선정하게 되며, 경제성 평가지표 중에는 예산제약이 없는 경우 NPV를, 예산제약이 있는 경우 B/C가 높은 대안에 우선순위를 부여한다.



(a) 모형별 NPV의 누적확률분포



(b) B/C의 누적확률분포

〈그림 8〉 모형별 서브시스템의 평가지표 분포

이 큰 사업으로 〈표 4〉의 의사결정 판단기준 사업분류에 따라 II유형으로 분류된다. 〈표 16〉을 참조하여 예산제약이 없는 가정하에서는 교통정보시스템 - 신호제어시스템 - 돌발상황시스템으로 우선순위를 선정할 수 있으며, 예산제약이 있는 가정 하에서는 신호제어시스템 - 돌발상황시스템 - 간선도로교통정보시스템으로 우선순위를 선정할 수 있다. 또한 총사업비 관리측면에서는 교통정보시스템 - 신호제어시스템 - 돌발상황시스템으로 우선순위를 선정할 수 있다.

3) 모형의 비교분석결과

DEA, PRA모형의 특성을 비교분석하기 위해 모형간 편차분석과 우선순위 결정과정을 분석하였다. 편차분석은 PRA모형에서 결과변수의 대표값(50%값)과 DEA모형에서 도출된 경제성평가지표의 결정적인 값과 차를 모형간의 편차로 정의한다. 이는 발생가능한 사업환경 하에서의 대표적인 값과 DEA모형을 통해 도출된 임의의 값 사이의 차이를 확인할 수 있다. 통합시스템

〈표 14〉 통합시스템에 대한 모형별 편차분석

구분	PRA (A)	DEA (B)	편차 (A-B)	(A-B)/B ×100
총사업비 순현재가치	754억 (50%값)	900억 (72%값)	146억	- 16 %
순편의의 순현재가치	370억 (50%값)	221억 (27%값)	149억	68 %
편익/비용비	1.5 (50%값)	1.25 (27%값)	0.25	20 %

주 : * 는 PRA모형 결과인 확률분포 상에서 DEA모형의 결과값에 대한 백분율값

〈표 15〉 ITS사업대안의 투자우선순위 변화

구분	DEA 모형	PRA 모형
예산제약 유	교통신호 < 교통정보 > 돌발상황	교통신호 < 교통정보 > 돌발상황
예산제약 무	교통신호 < 교통정보 > 돌발상황	교통정보 < 교통신호 > 돌발상황
총사업비관리	분석 불가능	교통정보 < 교통신호 > 돌발상황

사례를 대상으로 총사업비 및 순편의에 대한 순현재가치와 편익/비용비에 대한 모형별 편차를 산정한 결과, DEA모형의 추정치는 PRA모형의 중앙값(50%값)에서 편의(Bias)되어있는 것으로 나타났다. DEA모형을 통해 산출된 총사업비, 순편의의 순현재가치, 편익/비용비는 〈표 14〉와 같이, PRA모형의 해당 확률분포 상에 각각 72%, 27%, 27%값으로 중앙값(50%값)에 비해 각각 -16%, 60%, 20% 편의되어 있다. DEA모형의 총사업비(900억), 순현재가치(221억), B/C비(1.25) 값은 사업기간동안 발생가능한 사업환경중 임의의 한 사례를 근거로 의사결정을 수행함으로써, 매우 편의된 의사결정이 가능할 수 있다.

또한 단위시스템의 우선순위 결정과정 분석결과, 〈표 15〉와 같이 적용모형별로 투자의 우선순위가 바뀌는 것으로 나타나, DEA모형만을 고려하여 시스템 도입타당성을 결정할 경우, 매우 편의된 사례만으로 의사결정을 수행할 오류를 범할 수 있다는 것을 의미한다.

V. 결론

1. 연구결과

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 확률

〈표 16〉 서비스시스템의 경제성분석결과 비교

구분		PRA모형				DEA모형		
		총사업비 (단위:억원)	NPV (단위:억원)	B/C	IRR (단위: %)	B/C	NPV (단위:억원)	IRR (단위: %)
신호제어시스템	평균값	161	850	6.4	108	6.4	793	119
	표준편차	26	244	1.8	11			
	변동계수	6.2	3.5	3.7	9.8			
돌발상황관리 시스템	평균값	675	452	1.7	68	1.7	441	105
	표준편차	176	129	0.06	9			
	변동계수	3.8	3.5	27.8	7.5			
간선도로 교통정보시스템	평균값	192	852	5.5	91	5.1	740	89
	표준편차	30	251	1.5	9			
	변동계수	6.4	3.4	3.7	10.1			

적 위험도분석모형을 이용하여 ITS사업특성을 반영한 경제성평가모형을 개발하고, 본 모형을 기반으로 사업비·경제성분석 시 합리적 의사결정을 위한 해석방법을 정립하였다. 둘째, 지자체 ITS사업에 대한 사례분석을 수행하여 대형 ITS사업에 있어 모형의 적합성 및 유용성을 확인하였다.

셋째, 사례분석결과(대전시 첨단교통모델도시사업), 통합시스템의 경우, PRA모형의 결과변수(B/C, NPV, IRR)가 변동가능한 사업환경하에서 각각 91%, 91%, 95%가 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 총사업비의 우발성비용이 (목표관리값 85%값 가정시) 99억으로 나타나 경제성은 높으나 사업의 변동이 큰 사업(사업유형 II)으로 나타났다. 또한 DEA모형은 B/C, NPV, IRR값이 각각 1.3, 221억원, 33%로 나타났으며, 이는 PRA모형의 해당 확률분포상에 27%, 27%, 33%값으로 나타나, DEA모형에 의한 경제성평가 시 경제성이 과소추정되는 것으로 나타났다. 특히, DEA모형은 임의의 결정적 값으로 경제성을 판단함으로 편익된 사례만으로 의사결정을 수행할 오류를 범할 수 있는 것으로 나타났다.

넷째, 사례분석을 통해 총사업비·사업비의 변동계수를 비교한 결과 일반교통사업의 변동계수가 19-28인 반면, 사례분석 ITS사업의 총사업비·사업비 변동계수는 각각 4, 15로 일반교통사업에 비해 낮아, ITS사업의 위험도가 높은 것으로 나타났다. ITS사업은 일반건설교통사업보다 위험도가 높아 타당성단계부터 위험도를 고려하는 경제성평가방법론의 도입이 필요한 것으로 판단된다.

셋째, DEA모형과 PRA모형의 비교분석을 위해 모형간

의 결과변수에 대한 편차분석과 단위시스템의 우선순위결정과정을 분석하였다. 사례분석결과, 편차분석은 PRA모형의 경제성평가지표의 대표값(50%, 값)과 DEA 모형이 경제성평가지표값의 차로, 통합시스템의 경우 총사업비, 순편익의 순현재가치, 편익/비용 각각 -16%, 60%, 20%로 편익된 것으로 나타났다. 또한 단위시스템의 우선순위 결정 분석결과, 모형별로 각각 단위시스템의 투자우선순위가 바뀌는 것으로 나타났다.

2. 향후 연구과제

향후연구과제로 위험도분석을 이용한 ITS사업 경제성평가를 위해 입력변수인 비용·편익항목에 대한 데이터베이스화가 지속적으로 이루어져야 하겠다. 또한 ITS사업의 사전타당성을 평가하기 위해서는 다양한 ITS서비스를 모의실험 할 수 있는 교통시물레이션모형과 통합된 위험도분석모형 개발을 통해 모형의 활용도를 증대시킬 수 있다. 그러나 국외 교통시물레이터들은 국외 도로·교통환경과 운전자행태를 바탕으로 개발되어 국내 환경에 맞도록 정산(Calibration)을 통해서만 적용이 가능할 뿐만 아니라, 도입배경이나 적용모형이 국내 ITS사업의 효과추정에 부적합하여 추가적인 연구개발이 필요하다.

또한 합리적인 사업비책정을 위해서는 표준규격과 이에 대한 표준품셈을 정립하는 객관적인 사업비 산정방안도 정비되어야 한다. 아울러, ITS사업의 경제성분석 시 필요한 위험변수 및 추가적인 ITS사업 편익변수를 발굴, 계량화연구가 지속적으로 필요하다. 즉 ITS사업 확대 및 도로·교통환경 변화로 인해 새로이 들출

되는 위험변수에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 시간 가치(VOT), 차량운행비용(VOC), 사고비용 등 편익의 계량화 연구도 사회경제환경의 변화에 따라 지속적으로 갱신되어야 한다.

참고문헌

1. 김동건(1997), 비용편익분석, 박영사.
2. 김인호(2001), 건설사업의 리스크관리, 기문당.
3. 양지청(1998), 민자유치대상고속도로의 사업성 분석, 국토연논, 국토개발연구원.
4. 이용택·김상범·원제무(1999), 민자유치대상고속도로 투자의 위험도분석, 대한교통학회지, 제17권 제5호, 대한교통학회, pp.33~427.
5. 임강원의(2004), ITS경제성분석 모형간 비교연구, 대한토목학회 학술발표회논문집.
6. 이용택·남두희·박동주(2004), 국내 지능형교통체계(ITS) 사업평가체계 도입방향 (한국·미국·유럽 사례 비교분석을 중심으로), 대한교통학회지, 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.215~226.
7. Palisade(2002), BestFit Version 4.5.
8. Palisade(2002), @RISK Version 4.5.
9. Curran(1989) "Range Estimating" Journal of Cost Engineering and Management, ASCE., 31(3), pp.18~26.
10. De Rus and Chris Nash(1998), "Recent Developments in Transportation Economics" Ashgate.
11. Devore(1991), "Probability and statistics for engineering and the sciences", Brooks /Cole Publishing Co., Pacific Grove, Calif.
12. Diekmann(1983) "Probabilistic estimating: Mathematics and applications" Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 109(3), pp.297~308.
13. Newton(1972), Cost-Benefit Analysis in Administration, George Aleen & Unwin Ltd.
14. Peter Bonsall(2000), "Information Systems and other Intelligent Transport System Innovations", Handbook of Transport Modelling, Pergamon.
15. PouliQuen(1972), Risk Analysis in Project Appraisal, IBRD, Johns Hopkins Press.
16. Spooner(1974), "Probabilistic Estimating", Journal of the Construction Division.
17. Touran and Wisser (1974), "Monte Carlo technique with correlated random variable" Journal of Cost Engineering and Management, ASCE, 11(2), pp.258~272.
18. Touran(1993), "Probabilistic Cost Estimation with Subjective Correlation", Journal of Cost Engineering and Management, ASCE, vol.119 No.1.
19. Touran(1994), "Integration of Financial and Construction Risk", TRR1450, pp.15~22.

✉ 주 작 성 자 : 이용택

✉ 논문투고일 : 2005. 2. 25

논문심사일 : 2005. 3. 22 (1차)

2005. 4. 28 (2차)

심사판정일 : 2005. 4. 28

✉ 반론접수기한 : 2005. 10. 31