

# 확률 통계적 일정 시뮬레이션

## - 민감도 분석을 이용한 최종 공사비 예측

### Predicting Construction Project Cost using Sensitivity Analysis in Stochastic Project Scheduling Simulation (SPSS)

이 동 은\* · 박 찬 식\*\*

Lee, Dong-Eun · Park, Chan-Sik

#### 요 약

프로젝트의 일정 네트워크는 선-후행 관계로 정의된 액티비티들로 구성되어있다. 액티비티를 완료하는데 소요되는 기간은 다양한 단축-지연 원인들에 의해 임의적이고, 확률-통계적인 특성을 지닌다. 이러한 특성은 최종공사기간을 불확실하게 하며, 재무리스크의 주요인이 된다. 본 연구는 선행 연구에서 개발된 확률-통계적 일정 시뮬레이션 시스템(Stochastic Project Scheduling Simulation)을 확장하여 액티비티 기간이 임의적으로 변동함에 따라 최종공사비가 어떻게 거동하는지 추정하는 방법론을 제시한다. 액티비티 기간을 임의의 변수로 취급하였고, 액티비티에 할당된 직접공사비에 공사기간의 단축-지연에 따른 간접비의 증감을 반영하여 최종공사비를 추정하였다. 액티비티 기간의 변동에 따라 의존 변수인 간접비가 변동하는 특성을 고려하여 시뮬레이션 출력값들(최종공사기간들)의 통계적 특성을 정량적으로 분석하여 최종공사비를 추정하였으며, 예비할 필요가 있는 지체보상금의 정도를 정량화하였다. 기존의 결정론적 기법이 불확실성을 내재한 체 지체보상금의 비율을 주관적으로 적용해 왔던 반면, 본 연구에서 제시된 기법은 확실성과 신뢰도를 가지고 지체보상금의 비율을 책정할 수 있도록 하는 방법론을 제시하고 있다. 하나의 예제 프로젝트가 시뮬레이션을 이용한 정량분석기법을 예시하기 위해 사용되었으며, 불확실성을 내포하고 있는 액티비티 기간들이 최종공사비에 미치는 영향을 검증하기위해 시뮬레이션 모의실험을 실행하였다. 자동화된 민감도분석 기법을 이용하여 액티비티 기간을 정의하는 확률분포함수의 통계적 위치를 변화시킴에 따라 최종공사기간 및 최종공사비가 어떠한 거동을 나타내는지 확인하였다. 예제로 사용된 표본 프로젝트에 내재되어있는 재무리스크에 대응하기위해 지체보상금을 어느 정도까지 보유할 필요가 있는지를 정량적으로 분석하고, 의사결정을 위해 어떻게 적용될 수 있는지를 소개한다. 본 연구에 제시된 기법은 연구자들 및 현업 종사자들에게 최종공사비 예측에 있어서 액티비티 기간 변화의 확률적 영향과 이론적 의미를 밝힘으로 프로젝트 자본계획과 관련된 위기관리에 진보된 예측 방법론을 제공한다.

키워드 : 확률통계, 시뮬레이션, 정량분석, 위기관리

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설 프로젝트 조달은 일정계획에 실행예산을 내재시키고, 계약서에 명시된 공기 및 공사비 이내에 조달하기위해서 예정공정 및 실행예산에 따라 원가를 집행하는 것을 의미한다. 프로젝트

초기단계에서 공사 원가 집행계획이 작업 항목들 별로 상세하게 분류되고, 작업항목별로 자금집행현황이 관리된다. 이러한 활동은 계획공기 및 실행예산 내에 프로젝트를 조달하기위해 수행된다[2].

결정론적 일정관리 기법을 기반으로 하는 현행 건설관리환경에서 직접비는 각 액티비티들에 할당되고, 간접비는 전체 공사 진행률에 비례해서 집행되는 것으로 취급되어왔다. 액티비티 기간은 다양한 원인들로 인해 단축-지연될 수 있고, 이로 인해 전체 프로젝트의 진행률이 달라지게 된다. 그러나, 현행 일정관리의 현실은 액티비티가 단축-지연될 때 간접비가 얼마만큼 절

\* 일반회원, Ph.D., Assistant Professor, Dept. of Construction Management, School of Engineering, Southern Illinois University

\*\* 종신회원, 중앙대학교 건축학부 교수, 공학박사

감-증대되는지 알 수 없고, 새로운 액티비티들이 추가-제거되는 경우 어느 정도의 간접비가 증-감되는지 관리되지 못하고 있다. 문제의 원인은 (1)간접비 산정기준의 미정비 및 (2)간접비를 액티비티별로 관리하지 않는 건설 일정관리의 실태에서 그 원인을 찾을 수 있다.

간접비 산정 기준의 미정비와 관련해서, 공공 공사의 경우 공기 지연으로 인한 간접비 손실이 2.25~3조원으로 추산되는 반면, 현업의 실태는 간접비 증가분에 대한 산정기준이 정비되어 있지 않고, 적극적인 관리대상의 중심에 있지 못했음을 인식해왔다. 간접비의 개념과 관련해서 현행[국가 계약법] 및 재정경제부 회계 예규인[원가 계산에 의한 예정가격 작성준칙]에서 규정하고 있는 회계 계정은 다양한 비목들이 공기 지연에 따른 간접비 손실에 포함될 수 있음을 내포하고 있다[3].

한국 건설 산업내에 간접비 회계계정 항목이 정확하게 규정되어 있지 않기 때문에 액티비티 비용의 일부로 분산-관리하는 대신 프로젝트 개시 통보 (Notice to Proceed) 시점부터 주요완료 (Substantial Completion) 시점을 연결하는 하나의 액티비티 (예, 일반관리)에 간접비 전체를 할당하여 간접비 집행을 관리해왔는데, 일정관리에서 이러한 방법이 사용되어온 이유는 건설사들이 간접비 항목을 정확하게 분류하거나 이러한 비용을 어떻게 각 액티비티 들에 할당하여 관리 할 것인지 명확한 개념을 정립하지 못하고 있기 때문이며, 이는 발주자측이 공사지연의 원인을 제공한 경우 발주자와 건설사 사이에 손실비용에 대해 상호 동의할 수 없고, 공기 지연에 따른 손실을 정량화하지 못하는 이유 중의 하나이다.

이러한 현실은 특정 손실비용 발생이 어떤 특정 액티비티와 연관되어있고, 전체 네트워크에 어떤 영향을 주어, 최종 공사기간에 어느 정도 영향을 주는지 추정하는 관리기능이 결여되어있는 것을 의미하였다. 문제는 이러한 관리 기법에 의해 추정되는 손실비용에 대해 발주자측이 온전히 동의할 수 없다는 사실이다. 또한, 간접비가 일정이라는 문맥 속에서 분류되고, 정량화되기 어려운 것이 되어 클레임을 위해 사용되기 어려운 관리의 공백상태가 존재해왔다.

따라서, 간접비를 액티비티 비용으로 할당하여 관리하는 것은 (1)기준에 존재했던 관리의 공백을 채우게하고, (2)발주자 측에 의해 공기지연이 발생했을 때 손실비용을 추정하고 클레임을 위한 법적 증거를 확보할 수 있게 하기 때문에 본 연구에서는 간접비를 액티비티 비용으로 할당하였다. 이는 "액티비티의 세분화 및 액티비티 비용의 분류의 정도는 일정 네트워크를 개발하는 목적에 따라 달라질 수 있고, 또한, 일정 네트워크에 액티비티 비용을 포함시키는 목적에 따라 현장 및 본사의 간접비를 각 액티비티 들에 할당할 수 있다[14]."는 공정관리 이론과 문맥을

같이한다.

최종공사비 예측 방법론들은 1)결정론적 모델과 2) 확률적 모델로 분류되며, 다시 세분화하면 1)실험적 모델; 2)회귀분석 (regression analysis) 모델; 그리고 3)확률적 시뮬레이션 모델로 분류된다[7].

결정론적 모델에서 출력값들은 입력값들로서 어떤 값이 할당되느냐에 따라 결정론적으로 정해지는 반면, 확률적 모델은 확률통계이론에 따라 단지 추정값 (estimate)이 계산되는 불확실성을 반영하는 변수로 인식된다. 건설산업에 있어서 최종공사비의 예측은 확률적 특성을 띤다.

실험적 모델은 관찰, 경험, 혹은 직관에 의존하는 방법론으로써 실적공사 데이터베이스로부터 추출된 자료를 토대로 한다 [7]. 회귀분석 모델은 어떤 자료를 가장 잘 묘사하는 수학적 모델을 정의하는 기법으로써 ([7], [12]), 종속변수(dependent variable)로 표현되는 출력값(output)이 일단의 독립변수(independent variable)로 표현되며, 선형 혹은 비선형의 형태로 정의될 수 있다[12]. 기존의 역사적 자료에 의존하여 결정론적으로 예측하는 방법, 즉, 역사적-결정론적 방법론으로부터 패러다임이 전환되어야할 필요성이 역설되어왔다([8],[10]). 확률적 시뮬레이션 모델은 그러한 모델로부터 귀결되는 결과들이 사실 자체를 의미하는 것은 아니지만, 현실계를 가장 가까운 모형으로 투영하는 것을 이론의 중심에 두고 있다.

확률적 시뮬레이션 모델은 예측하고자하는 시스템이 현실계에서 어떠한 거동을 나타내는지 분석하기위해 컴퓨터 환경 내에 주의깊이 가장 유사하게 구현하는 것을 의미한다. 오랜 기간 주의 깊게 데이터를 수집하고 시스템을 구성하는 컴포넌트들 사이의 상호작용을 연구하며, 입력값을 수용하는 컴포넌트들의 확률통계적 특성을 어떤 확률분포함수로 정의하는 것이 관련된다. 물론 시뮬레이션 모델을 구현하는 것이 더 많은 시간과 비용을 요구하지만 건설사업에 있어서 결정론적으로 의사결정을 하기가 용이하지 않은 분야 (예, 입찰 혹은 비용예측)와같이 불확실성을 다루며, 수학적 방법으로 분석하거나 표현하기 어려운 복잡한 시스템을 구현하는데 적합하게 사용될 수 있다[7].

기존의 CPM 및 PERT 기법의 결정론적 특성에 기인한 단점을 보완하기 위해 불연속 이벤트 시뮬레이션 (Discrete Event Simulation)이 제안되어왔다. 이는 기존 기법들이 건설공사기간의 불확실성과 임의성을 고려하지 않고 결정론적 액티비티들로 네트워크를 모델링하는 반면, DES는 확률통계적이며 임의적인 특성을 띤 액티비티를 사용하여 모델링하는 것을 의미한다 ([9],[18],[21],[26],[28]). 물론, 기존 DES 연구들이 액티비티 기간 및 비용의 확률통계적 특성을 효과적으로 취급해왔지만, 액티비티 기간 지연에 따라 간접비가 어떠한 영향을 받으며, 전체

네트워크를 종료하는데 소요되는 최종공사비가 어떠한 영향을 받는지 고려하지 않았으며, 이러한 불확실성에 대응하기 위해 지체보상금을 어느 정도까지 보유할 필요가 있는지를 추정하는 기능이 없었고, 최종공사기간의 불확실성의 특성과 이에 수반하는 재무 리스크가 이론상 완전히 밝혀져 있지 않은 상태에 있었다.

그러므로 본 연구는 액티비티 기간의 변화가 간접비 및 최종 공사비의 변동에 어떠한 영향을 주는지 밝히며, 민감도분석을 사용해서 발견된 지식을 일반화시키는 방법론을 제시 한다는 점에서 이전 연구들과 독특한 차이점을 지니고 있다. 이전에 논의된 산업내의 문제점을 인식하여 간접비를 액티비티 특성에 따라 액티비티 비용의 일부로 할당하여, 액티비티 기간 변화가 간접비의 증가에 미치는 영향을 고려하여 최종 공사비가 어떠한 거동을 나타내는지 추정하는 예측 방법론을 제시하는 것을 목표로 한다. 이처럼, 액티비티 기간의 변동에 따른 간접공사비 및 최종 공사비의 거동을 감시하는 기능은 클레임을 위한 법적 증거를 확보하고, 경영이익을 극대화하며, 지체보상금 발생을 배제하는데 기여할 수 있다.

1.2 공기지연 원인 및 간접비의 정의

건설 프로젝트는 다양한 변수들 (예, 날씨, 노무 조달, 하도급자 수행성; 변경, 보수 및 재시공; 자재 및 재무 수급 불균형, 기성 지급지연, 저품질 계약관리; 노동분쟁, 미완결 설계 및 계획; 변경지시, 부적절한 현장조사; 작업지시를 위한 대기시간발생; 발주자측 자본 조달지연 등)에 의해서 공사기간이 지연되며 추가비용이 발생한다.

공기지연으로 인한 손실비용 산정은 매우 복잡하고, 이를 산정하는 기준 자체도 명확하게 정립되어 있지 않은 반면, 공기지연이 간접비를 증가시켜 최종공사비 증가에 큰 영향을 미친다는 사실은 주지의 사실이며 명료한 간접비 산정기준 및 일정관리와의 연계된 관리기법의 필요성이 인식되어왔다[1]. 직접비 및 간접비를 명확하게 분류하는 것은 클레임을 통해 손실비용을 보상받기위해 매우 중요하다. 반면, 직접비와 간접비를 구분하는 것은 매우 주관적이며, 분류하기 까다로운 정성적 정보와 관련되어있다. 간접비 개념은 프로젝트 참여자들 사이에 조금씩 다른 정의를 하고 있고, 건설사들은 간접비 항목을 정확하게 분류하거나 이러한 비용을 어떻게 각 액티비티들에 작업항목별로 할당하여 관리할 것이며, 특정 액티비티가 지연 되었을때 어떻게 손실을 정량화하여 클레임화 시킬 것인가에 명확한 개념을 정립하지 못하고 있다[24].

문헌들에서도 직-간접비의 분류에 대한 다양한 정의를 보이고 있다[6]. 그러나, 액티비티들에 할당되는 간접비의 정도가 다르며, 공기지연에 따른 영향이 서로 다르기 때문에 액티비티에

간접비를 할당하여 일정관리에 적용하는 것이 산업의 필요를 충족시키는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 간접비의 비용항목을 분류하는 것을 다른 연구주제로 남기면서 간접비의 비용항목이 클레임 대비를 위해 입찰 단계에서부터 명확하게 정의되고 액티비티 들에 할당되어 공사 지연 시 손실을 정량화해야할 산업적 필요를 반영하여 액티비티 비용의 일부로 간접비를 설정하였다.

1.3 확률통계적 최종공사기간 및 공사비 예측 연구

Van Slyke([29])가 시물레이션 기법이 예측 에러를 줄여서 PERT 기법을 보완한다고 주장한 이후, Crandall([11])은 시물레이션 횟수의 중요성을 논하였고, 시물레이션을 기반으로 하는 일정관리가 논의의 쟁점으로 부각되었다[5]. 이후, 건설 작업수준에서 프로세스를 모델링하고 분석하는 작업 프로세스 연구용 계열의 시물레이션 시스템들([22],[26])이 출현하였으며, 이를 변형시켜 건설 일정관리에 적용하려는 시도들([9],[21],[26])에 이어, Lu and AbouRizk는 DES를 PERT기법에 응용하여 CPM 및 PERT의 단점을 극복하고자 시도하였고, 근년 들어 이러한 작업 프로세스 분석용 시스템이 아닌 순수 일정관리목적 계열의 시스템들이 출현하였다. 이러한 시스템들은 액티비티 기간을 변수로 취급하여 최종공사기간 및 공사비를 추정하는 연구들로서, 시물레이션이 액티비티 기간의 확률통계적 특성을 효과적으로 취급하여 전통적인 일정기법에 비해 장점을 지니고 있고, 네트워크 내에 확률적 주 공정선의 선택을 효과적으로 취급할 수 있으며 향상된 일정관리로 인도할 수 있음을 증명해왔다([18],[28]).

학계의 이러한 진전과 더불어 소프트웨어 시장에서는 몬테카를로 시물레이션을 기반으로 하는 일정관리 프로그램들 (e.g., [23],[25])이 출현하였다. 그러나, 어느 시스템도 일정관리에 시물레이션을 사용 할 때 직면하게 되는 중요한 의문점들 - (1)몇회의 시물레이션을 시행해야하는지, (2)액티비티 기간의 변동이 간접비 변동에 어떠한 영향을 주며, 이에 수반하여 최종공사비에 어떠한 영향을 주는지- 에 적절한 답을 제시하지 못했다.

본 연구는 액티비티 기간의 변화가 간접비의 변동에 어떠한 영향을 주고, 최종 공사기간 및 최종 공사비에 어떤 영향을 주는 지 민감도분석을 사용해서 지식을 발견하고, 발견된 지식을 일반화시키고자하였다.

1.4 연구의 범위 및 방법

본 연구는 기존의 SPSS([20])를 확장하여 액티비티 기간을 모델링하는 확률분포함수의 확률통계적 위치를 변동시킴에 따라 최종공사비가 어떻게 거동하는지를 예측하는 기능을 구현한다.

자동화된 민감도 분석기법은 액티비티 기간을 모델링하는 확률 분포함수의 종류는 변화시키지 않으면서, 해당 확률분포함수의 매개변수들(Parameters)의 입력값을 변화시켜 여러 시스템 구성 상태(alternative system configurations)를 비교하는 것을 가능하게 한다. 이는 시뮬레이션 모형을 사용자가 관여하지 않고 자동으로 변이성(Variability)과 비대칭도(Skewness)를 변화 시킴에 따라 최종공사기간과 최종공사비가 어떠한 거동을 나타 내는지를 발견학습적으로 밝혀내는 것을 의미한다. 그림 1의 연구 흐름도에 연구 방법이 단계적으로 제시되어있다.

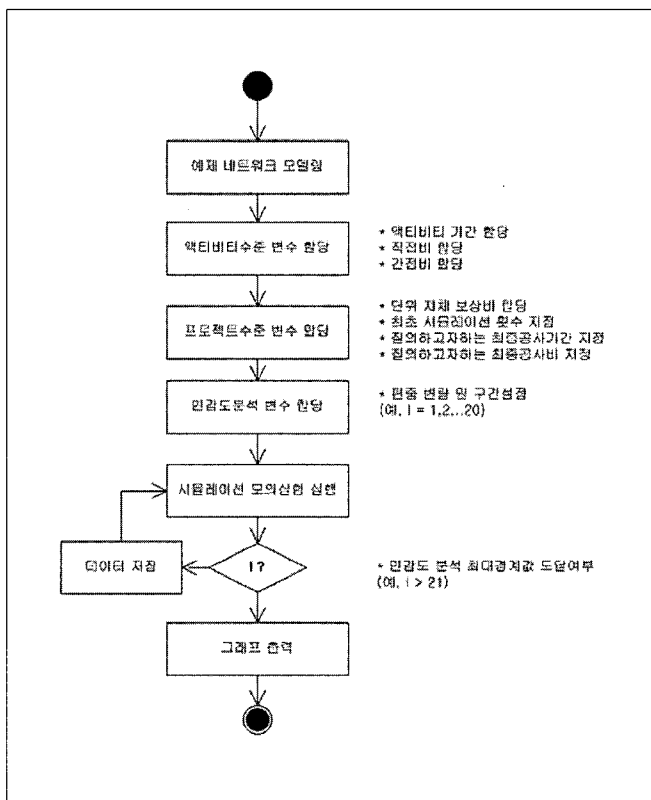


그림 1. 연구흐름도

기존의 연구([18], [19], [20])가 단일 네트워크 모델의 시뮬레이션 실험으로부터 획득한 하나의 모집단에 대한 확률통계적 분석기법의 적용이었던 반면, 본 연구는 네트워크의 구성은 같지만 여러 개의 다른 시스템 구성들로부터 얻어진 모집단들의 통계적 특성을 분석한다.

먼저 하나의 예제 프로젝트를 모델링하고, 액티비티 수준의 변수들(예, 액티비티 기간, 직접비, 간접비 등) 및 프로젝트 수준의 변수들(예, 단위 지체 보상비, 초기 시뮬레이션 횟수, 질의하고자하는 최종공사기간 및 공사비 등)을 할당하며, 민감도분석을 위한 변수들(예, 최빈 기간값 증가폭 등)을 정의한다. 지정된 인수를 사용하여 지정된 횟수(예, 120회)만큼 시뮬레이션을 실행하여 얻어진 여러 개의 모집단들(예, 20개 모집단)을 사용

하여 최종공사기간 및 공사비의 거동을 그래프 형태로 제시한다. 액티비티의 확률분포함수의 통계적 위치가 변화될때, 액티비티의 간접비 증감에 따른 최종공사비의 변동을 추정한다. 또한, 결정론적 CPM과 확률적 DES기법을 통해 얻어지는 최종공사기간 및 공사비와의 비교를 통해 지체보상 예비비를 추정하였다. 개발된 분석 기법은 시뮬레이션기법을 적용하여 최종공사비를 정량화하고, 결정론적 CPM에의해 계산되는 최종공사비에 비해서 어느정도의 지체보상금을 보유할 필요가 있는지 유추해내며, 사용자가 질의하고자하는 특정 공사비 이내에 프로젝트를 조달할 확률을 계산해낸다.

1.5 연구의 한계

직접비가 변화되는 경우란, (1)새로운 액티비티가 추가-삭제되거나, (2)중대한 설계변경으로 인해 기존 액티비티에 할당되어있는 시공 물량에 변화가 발생한 경우를 의미하기 때문에 프로젝트 자체에 변경을 가져오는 것을 의미한다. 따라서, 액티비티 직접공사비를 어떤 확률분포함수로 모델링하는 것 대신에 액티비티에 할당된 실행예산이 100% 집행될 것을 가정하는 조건하에, 임의적 특성을 띄고서 변화하는 액티비티 기간이 간접비 및 최종공사비에 미치는 확률통계적 특성을 밝힌다. 이는 액티비티 기간의 변동에 따른 간접비의 변화만을 고려함으로 동일한 시스템에 대한 분석으로 분석대상의 범위를 제한하는 것으로, 전체 액티비티 수, 네트워크구조 및 액티비티에 할당된 원 실행 예산에 변동이 없다는 가정하에 액티비티 기간의 증감에 따른 간접비의 변동 및 최종 공사기간의 변화에 따른 지체보상금 발생을 고려하는 것을 의미한다.

또한, 특정 액티비티 유형에 대한 공사기간의 지연 요인들을 정량적으로 모델링하는 것은 지속적인 데이터 수집과 데이터 마이닝 기법을 이용한 추론을 요구하며, 이러한 변수들의 발생형태를 확률통계적 절차로 모델링한다 하더라도, 각 프로젝트마다 이를 공통적으로 적용하는 것은 일반화의 문제가있기 때문에 이러한 요인들을 입력값으로 도입하지 않았고, 해당 네트워크가 지니고 있는 특성이 간접비의 증감에 어떠한 영향을 주며, 최종 공사비가 액티비티 기간의 변화에 어떠한 영향을 받는지 추정하는 것으로 연구범위를 한정하였다.

2. 확률통계적 프로젝트 최종공사비 시뮬레이션

2.1 DES를 기반으로하는 확률통계적 일정 시뮬레이션

DES는 건설 생산 시스템을 모델링하는 효과적인 방법으로 적용되어왔다. SPSS([18])는 확률분석 시뮬레이션 기법을 자동화시킨 JAVA프로그램으로써, 프로젝트 일정의 확률통계적 특성을

모델링하기위해 각 액티비티 기간에 해당하는 변수값들을 어떤 확률분포함수(probability distribution function)로 정의하고, 사용자에게 의해 지정되는 횟수만큼의 시뮬레이션을 통해 최종공사기간에 해당하는 모집단을 수집하며, 수집된 출력결과들(Simulation output data)에 대해 통계적 분석기법(Statistical Analysis)을 적용하는 방법을 구현하였다.

DES를 응용한 정량분석에 있어서 가장 중요한 관건인 이벤트 생성(event generation)과 시뮬레이션 시계(simulation clock)의 전진, 및 이벤트 리스트 [17] -어떤 생성된 액티비티의 시작과 종료 시간들과 관련된 데이터를 시간적 순위에 따라 데이터를 정렬, 유지 및 관리- 관리 기능이 SPSS의 전-후진 일정 계산과 최장경로 계산 알고리즘에 내재되었다.

### 2.2 액티비티 입력 확률분포함수 정의

DES에 기반을 둔 건설 생산 시스템 모델의 입력값 들은 불확실성을 표현하기위해 어떤 확률분포함수로 정의된다. 시뮬레이션 모델 설계자는 어떤 액티비티를 모델링하기 위해서 특정한 확률분포함수를 선택하고, 매개변수에 인수값을 할당함으로써 액티비티와 관련된 불확실성의 구성형태를 모델링한다([4],[15]). 이는 시뮬레이션을 이용한 예측의 정확도를 좌우하는 주요 관건이다.

일반적으로 시뮬레이션 모델링 및 분석 기법은 불확실성을 유추해내는 충분한 데이터가 존재하는 경우에 효과적이다. 데이터가 제한적인 경우에 입력 확률분포 함수와 인수값을 선택하는 것은 결코 쉬운 일이 아니며, 출력 데이터의 분석에 영향을 주어 시뮬레이션의 유효성(validity)에 의문을 남기게 된다.

기존 데이터가 존재한다면, "최량적합(BestFit)" 소프트웨어(Palisade, inc: www.palisade.com)를 사용하여 입력확률분포함수를 밝혀내는 것이 가능하나, 본 연구에서는 그러한 과정들을 생략하고 모델링의 단순화를 위해 삼각확률분포함수로 액티비티 기간을 정의한다.

Law and Kelton([17])은 다양한 확률분포함수들의 특성에 대해 설명하고 있고, 입력 확률분포함수를 유추해낼 수 있는 역사적 자료가 존재하지 않거나, 존재하더라도 입력 확률분포함수를 정의하고 적합성을 검증하기 어려운 경우, 혹은 전문가 견해(Expert opinion)를 반영하고자하는 경우에 Beta 혹은 삼각분포함수를 사용할 것을 추천하고 있다. 이 두 가지 확률분포함수는 건설 프로세스 시뮬레이션에 주로 적용되어왔으며, 건설일정 시뮬레이션 응용에 채택되어 왔다([13], [15], [27], [18]).

그러나 일정 전문가들이 액티비티 기간을 확률분포 함수의 매개변수 형태가 아니라, 언어학적 관점으로 생각하기 때문에 Beta 확률분포보다는 삼각 확률분포함수를 사용하는 것이 액티

비티 기간을 더 효과적이면서 외부로 정확히 표현되는 방식으로 모델링 하게 할 수 있다[16].

### 2.3 시뮬레이션을 이용한 최종공사비 추정

최종공사기간과 최종공사비가 불확실성을 내포한다는 사실이 일반적으로 받아들여지긴 하지만, 액티비티 기간의 임의적인 특성이 최종공사기간과 최종공사비에 어떠한 영향을 끼치는지, 또한, 이 두가지 출력 값들이 어떠한 일반적인 거동 특성을 띠고 있으며, 어떠한 상호관계를 갖고 있는지 밝혀지지 않았다.

본 연구는 최종공사비의 확률통계적 특성을 추정하기위해 시뮬레이션을 응용하여 최종공사비를 대표하는 임의의 변수(Independent and Identically Distributed Random Variable)의 확률통계적 특성을 밝혀내는 기법을 구현하였다. 확장된 시스템은 어떤 특정 비용 이하로 전체 프로젝트를 조달할 가능성이 몇 퍼센트인지를 계산하여 사용자에게 알려주며, 민감도 분석기법의 발견학습적 특성을 이용하여 최종공사기간과 최종공사비의 상관관계를 밝힌다.

최종 공사기간과 관련해서는 CPM보다 PERT 가 보수적인(혹은 비관적인) 입장을 취하는 반면, DES는 프로젝트에 따라 낙관적이거나 비관적인 입장을 취할 수 있다[18]. 그러나, 공사비용과 관련해서 어떤 입장을 취하는지, 또한, 최종공사기간과 최종공사비의 확률통계적 특성이 상호 어떤 관계가 있는지 밝혀지지 않았다. 본 연구를 통해 구현된 최종공사비용 추정 기법은 그러한 의문에 답을 제시한다.

#### 1) 액티비티 공사비 기대값 계산

실행예산(Budgeted Cost) 및 1일 공사지연(단축)에따른 할증(할인) 간접비(Indirect Cost: \$/day)를 액티비티의 데이터 항목으로 도입하여 최종공사비 예측에 사용하였다. 액티비티 공사비를 어떤 확률분포함수로 모델링하여 임의적 특성을 반영하는 대신, 고정값을 사용함으로써 순수하게 액티비티 기간의 변동에 의한 최종공사기간 및 최종공사비의 영향을 밝혀내었다. 액티비티 공사비 기대값은 액티비티 기간 생성을 위해 할당된 임의의 난수(random number)에 따라 표 1의 알고리즘에 의해 생성된다.

임의의 난수에 따라 생성되는 액티비티 기간의 기대값( $D_{EXP}$ )이 최빈값( $D_{Most-Likely}$ )보다 큰 경우  $(D_{EXP}-D_{Most-Likely})*(C_{IC})$ 만큼의 추가 간접비가 발생하며, 액티비티 공사비 기대값은 원 실행예산( $C_{BC}$ )에 해당 추가 간접비를 더한 값이된다. 한편, 액티비티 기간의 기대값( $D_{EXP}$ )이 최빈값( $D_{Most-Likely}$ )과 동일한 경우, 추가적인 간접비 발생이 없고, 액티비티 공사비 기대값은 원 실행예산( $C_{BC}$ )이 된다. 그리고 액티비티 기간의 기대값( $D_{EXP}$ )이 최빈값( $D_{Most-Likely}$ )보다 작은 경우  $(D_{Most-Likely}-D_{EXP})*(C_{IC})$ 만큼의 간접비

표 1. 액티비티 기간 변화에 따른 간접비 증감

```

if (  $D_{EXP} > D_{Most-Likely}$  ) {
     $C_{BC} = C_{BC} + (D_{EXP} - D_{Most-Likely}) * C_{IC}$  ;
    return  $C_{BC}$  ;
}
else if (  $D_{EXP} = D_{Most-Likely}$  )
    return  $C_{BC}$  ;
else (  $D_{EXP} < D_{Most-Likely}$  ) {
     $C_{BC} = C_{BC} - (D_{Most-Likely} - D_{EXP}) * C_{IC}$  ;
    return  $C_{BC}$  ;
}

```

여기서,

- \*  $D_{EXP}$  : 액티비티 기간의 기대값.
- \*  $D_{Most-Likely}$  : 액티비티 기간의 최빈값.
- \*  $D_{Optimistic}$  : 액티비티 기간의 낙관값.
- \*  $D_{Pessimistic}$  : 액티비티 기간의 비관값.
- \*  $C_{IC}$  : 액티비티 1일 공사기간 지연(단축)에 따른 간접비 증감.
- \*  $C_{BC}$  : 액티비티의 실행예산

절감효과가 발생하며, 액티비티 공사비 기대값은 원 실행예산 ( $C_{bc}$ )에서 해당 추가 간접비를 뺀 값이 된다.

2) 프로젝트 최종공사비의 신뢰구간 추정

시뮬레이션 출력값인 최종공사기간, 최종공사비의 기대값 및 분산은 임의적 특성을 띤다. 다음은 액티비티 공사비가 변동함에 따라 최종공사비를 산정하는 시뮬레이션 실험 절차를 상세하게 기술한다.

먼저, 1회 시뮬레이션 실행시 하나의 최종공사비가 식 1에 의해 계산된다

$$X_i = \sum_{j=1}^k C_{EXP}^j \dots \dots \dots \text{식.1}$$

여기서,

- k: 액티비티 수
- $C_{EXP}^j$  : j번째 액티비티의 공사비 기대값
- $X_i$ : i번째 시뮬레이션을 통해서 얻어진 최종공사비

식 1에따라 사용자에의해 지정된 횟수(예, 120회)만큼 시뮬레이션을 수행함으로써 생성된 모집단 (최종공사비)을 사용하여 95% 신뢰구간에 해당하는 모평균 구간을 추정하는 평균공사비를 식 2을 사용하여 추정한다.

$$m_x - \frac{t_{\alpha/2} \times S_x}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq m_x + \frac{t_{\alpha/2} \times S_x}{\sqrt{N}} \dots \dots \text{식.2}$$

여기서,

- $\mu$  : N 회의 시뮬레이션을 통해서 얻어지는 평균 최종공사비 범위
- $m_x$ : 공사를 완료하는데 걸리는 N 개의 최종공사

비들의 평균  $\left( \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \right)$

- $t_{\alpha/2}$  : t-분포의 지수값(Critical value)
- $S_x$  : 표준 분산
- $N$  : 시뮬레이션 횟수

식 2에서,  $t_{\alpha/2}$ 의 값은 자유도(the degrees of freedom: v) 및 신뢰수준(the level of confidence: 1-)에 따라 다르다(Khistry and Mohammadi 2001).  $t_{\alpha/2}$ 의 값은 t-테이블로부터 1-가 0.95이고, v가 119(N = 120 runs)일 때 1.98을 얻을 수 있다.

SPSS는 N회(예, 120회)의 시뮬레이션 횟수에 상응하는 N개의 최종공사비를 생성시킨다. 평균 프로젝트 최종공사비( $m_x$ )는 N개의 최종공사비들의 평균값이다. SPSS의 DES 모드를 사용해서 통계지표들 (즉, 평균 프로젝트 최종공사비 및 표준편차)이 획득되었고, 이러한 지표들을 사용해서 식 2에 제시된 것처럼 최종공사비의 신뢰구간이 추정되었다.

시뮬레이션을 이용한 최종공사비 추정에 있어서, 임의의 변수가 액티비티 기간을 대표하여 사용되었기 때문에, 프로젝트 최종공사비 역시 임의적인 특성을 띤다. 신뢰구간을 추정하는 것은 언제나 두가지, 즉, 실제 평균값(actual mean)과 실제 표준편차 (actual standard deviation)와 관련되어있다. 하지만, 실제 표준편차는 알려져 있지 않기 때문에, 표준편차의 추정값 (unbiased estimate( $S_x$ ) of the standard deviation)이 사용된다[17]. 본 시뮬레이션 실험에서 시뮬레이션 횟수는 120가 사용되었는데, 이는  $t_{\alpha/2}$ 의 값이 120회를 넘어서는 매우 미묘하게 증가하며, 120회가 t-table에서 계산을 위해 이용 가능한 경계 값이기 때문이다.

3) 지체보상금 예비비 산정

CPM기법의 건설문화에서는 지체 보상금의 책정이 주관적인 요율을 적용하는 방식이 주류를 이루고, PERT를 적용하는 경우는 항상 최종공사기간이 더 비관적인 입장을 취함으로써 지체보상

금을 더 많이 확보하도록 제안하는 반면, DES는 경우에 따라 양수 혹은 음수 지체 보상비를 제안한다. DES 기법을 사용하여 최종공사비를 예측하는 경우 다음과 같이 식 3에 따라 지체보상금을 위한 예비비를 확보할 것이 제안된다.

$$DC = (C_{CPM}^{Final} - C_{DES}^{Final}) * (C_{DelayComp}) \dots \dots \dots \text{식 3}$$

여기서,

- DC : 지체보상금 예비비
- $C_{CPM}^{Final}$  : 결정론적 기법에의해 얻어지는 최종공사비
- $C_{DES}^{Final}$  : 확률적 기법에의해 얻어지는 최종공사비
- $C_{DelayComp}$  : 지체보상비율 (\$/day)

만약,  $DC < 0$  이면 예비비를 확보할 필요성이 대두되며 식 3에서처럼, CPM 기법을통해 얻어지는 최종공사비와 DES를 통해 얻어지는 최종공사비의 차이에 지체보상비율(Delay compensation rate: &/day)을 곱한 금액만큼의 지체보상금을 확보할 필요성이 대두된다.

프로젝트를 조달할 가능성이 몇 %에 상응하는 공사기간을 사용할 것인지는 각 사업주체의 정책에 따라 다를 수 있다. 본 시스템은 공사지연에따르는 재무 리스크에 대응하기위해 확보해야할 지체보상용 예비비의 범위를 사용자에게 알려준다.

2.4 민감도 분석을 이용한 발견학습적 접근

입력확률분포함수의 통계적 위치를 정의하는 인수값들이 실제 데이터에 기반을 두는 것이 아니라 프로젝트 일정 전문가에 의해 주관적으로 선택된 값이므로 일정 전문가들로부터 수집된 데이터를 토대로 삼각 확률분포함수를 3가지 인수값(e.g., 낙관적, 최빈적, 비관적 시간)으로 정의한 후에 민감도 분석기법을 적용함으로써 보다 현실적이고, 신뢰성 있는 방식으로 최종공사기간 및 최종공사비의 거동을 예측할 수 있게 된다.

최종공사비에 영향을 주는 액티비티의 공사기간을 삼각확률 분포함수(Triangular PDF)로 표현하며, 최종 공사기간과 공사비용의 상호관계를 총체적 관점에서 평가하고 예측한다. 액티비티 기간의 확률통계적 위치를 정의하는 3가지 인수값의 조합을 선택하는 것이 시뮬레이션 출력 데이터(예., 최종공사기간, 누적 간접비, 및 최종공사비)에 미치는 영향을 분석하기위해 민감도 분석기법을 사용하였다. 낙관적 및 비관적 시간들은 변화시키지 않으면서, 최빈시간 (Most-likely time)을 낙관시간에서부터 비관시간까지 일정 간격으로 증가시켰을 때 최종공사기간 및 최종공사비의 거동을 확인하였다. 민감도 분석에 있어서 최빈시간 (Most-likely time)이 독립변수이고, 최종공사기간 및 최종공사

비는 의존변수이다.

2.5 시뮬레이션 모의실험의 유효성 검증

시뮬레이션 모의실험에서, 시뮬레이션 최소 횟수는 프로젝트를 구성하는 액티비티의 수, 액티비티들 사이의 선행관계, 주공정선(critical path)을 구성하는 액티비티들의 구성, 그리고, 액티비티들에 할당된 공사비용의 확률통계적특성과 같은 많은 요소들에 의해 종합적으로 영향을 받기때문에 프로젝트마다 달라진다.

시뮬레이션 횟수는 시뮬레이션 모의실험의 유효성과 직결되는 가장 중요한 요소이기 때문에 통계적 기법을 사용하여 시뮬레이션 최소횟수를 계산하였으며, 유효성을 검증하였다. 120회의 시뮬레이션을 통해얻어진 출력 데이터(최종공사비값들)를 토대로 최소 시뮬레이션횟수를 계산하기위해 확률통계적 기법이 적용되었다. 예제로 사용된 프로젝트의 경우, 시뮬레이션에 의해 얻어지는 값이 공분산-시불변 (Covariance-stationary)이라는 사실로부터 1회 실험값이 모집단 군을 대표하는 것으로 간주되었다. 식 2에 제시된 신뢰구간으로부터 프로젝트 최종 공사비 평균값이 식 4처럼 변환된다[17].

$$m_x = \mu \pm \left[ \frac{t_{\alpha/2} \times S_x}{\sqrt{N}} \right] \dots \dots \dots \text{식 4}$$

식 4를 평균값( $\mu$ )으로 나눔으로써, 에러간격(error term)이 식 5처럼 얻어지게 된다. 에러간격이 작을수록 신뢰구간의 폭이 줄어들게 되며, 추정 값의 정확도(the estimation accuracy)가 커지게 된다.

$$\Delta = \pm \left( \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right) \times \left( \frac{S_x}{\mu} \right) = 2 \times \left( \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right) \times \left( \frac{S_x}{\mu} \right) \dots \dots \text{식 5}$$

식.6에 제시된 시뮬레이션 횟수는 에러간격을 1% 그리고 = 1.98로 가정함으로 유도 된다.

$$N = 2^2 \times \left( \frac{t_{\alpha/2}}{\Delta} \right)^2 \times \left( \frac{S_x}{\mu} \right)^2$$

$$= 2^2 \times \left( \frac{1.98}{0.01} \right)^2 \times \left( \frac{S_x}{\mu} \right)^2$$

$$= 156,816 \times \left( \frac{S_x}{\mu} \right)^2 \dots \dots \dots \text{식 6}$$

식 6을 통해 알 수 있듯이, 시뮬레이션 횟수는  $S_x$  와  $\mu$ 의 함수이며, SPSS에 의해 자동으로 계산되어진다. 무한횟수의 실험을 한다면 충분한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 평균의 어렵감이

실제평균값에 가장 근사한 값이 되겠지만, 현실적으로 무한횟수의 실험을 한다는 것은 불가능하며, 임의적으로 충분히 큰 수라고 여겨지는 횟수만큼 실행하고서 실제평균값 으로서 받아들이는 것은 과학적 접근방법이 아니며, 공학의 경제성이라는 정신에 위배된다[17].

### 3. 예제 프로젝트를 사용한 시물레이션 모의시험

액티비티 기간 및 최종공사기간의 불확실성이 최종공사비에 어떤 영향을 미치는가 밝혀내기 위해 그림 2와같이 액티비티 기간 및 실행예산을 할당한 예제 프로젝트를 사용하여 모의실험이 수행되었다. 시물레이션 모의실험은 불확실한 공기에서 최종공사비와 관련된 리스크의 특성을 밝혀낸다.

그림 2에서처럼, SPSS는 빠른(혹은 늦은) 시작시간과 빠른(혹은 늦은) 완료시간 및 전체 플로우트를 하나의 노드에 표현하고 있고, 사용자에게 각각의 노드, 액티비티 기간(예, Tri(90,100,110)), 실행예산(예, B(60,000)) 및 선- 후행관계와 같은 관련된 모든 정보를 모델링하여 제공한다. 그림 2의 예제 네트워크에 있어서, SPSS의 CPM 모드는 주요 공정선을 찾고, 240일이라는 결정론적 공사기간을 계산하여 제시한다.

그림 3의 DES 모드에서는 간접비, 지체보상요율, 시물레이션 횟수, 질의하고자하는 최종공사기간 및 최종공사비를 입력한 다음에, 시물레이션 횟수(예, 120회)만큼 시물레이션 모의실험을 수행한다. 각 시물레이션 실행시 주공정선을 찾으며, 95 퍼센트 신뢰도에서 최종공사기간 및 공사비의 신뢰구간을 추정해낸다. 그림 3의 "Budgeted Cost"는 액티비티에 할당된 실행예산이며, "Indirect Cost"는 1일당 간접비 (즉, 1일 공사지연(단축)에 따라 할증(할인)되는 단위 간접비(\$/day))를 의미한다. "Delay Compensation"은 1일 지연당 지체보상비율(\$/day)이며, 시물레이션을 통해 얻어지는 최종공사기간과 CPM 기법을 통해 얻어지는 최종공사기간의 차이에 지체보상비율을 곱한 금액만큼의 지체보상금을 예비할 필요성이 예측된다. 그림 3에서처럼, 간접비 요율이 600.0 \$/일, 지체보상요율이 5000.0 \$/일(총공사비의 1.25% 가정)이 적용 되었을 때, 결정론적 CPM에 의해 계산되는 최종공사비는 400,000.0 \$이며, DES에 의해 추정되는 평균 최종공사비는 397867.23 \$, 최종공사비의 표준편차는 4873.83\$, 95% 신뢰구간은[396995. 20, 398739.28]으로 계산되었다. 또한, 결정론적 CPM에 의해 계산되는 최종공사기간은 240일이며, DES에 의해 추정되는 평균 최종공사기간은 242.5 일, 표준편차는 4.3626일, 95% 신뢰구간은[241.75, 243.33]으로 밝혀졌다.

120회로 구성된 한 번의 시물레이션 모의실험을 통해 얻어진

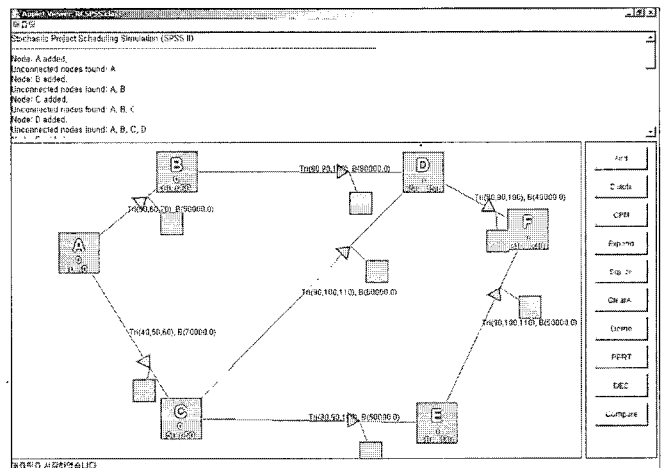


그림 2. 예제 네트워크 모델 - 액티비티 기간의 확률분포함수 정의 및 실행 예산 할당

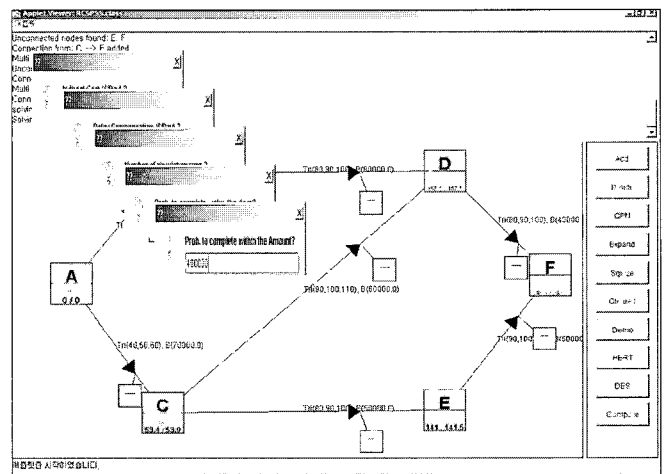


그림 3. 시물레이션 모의실험

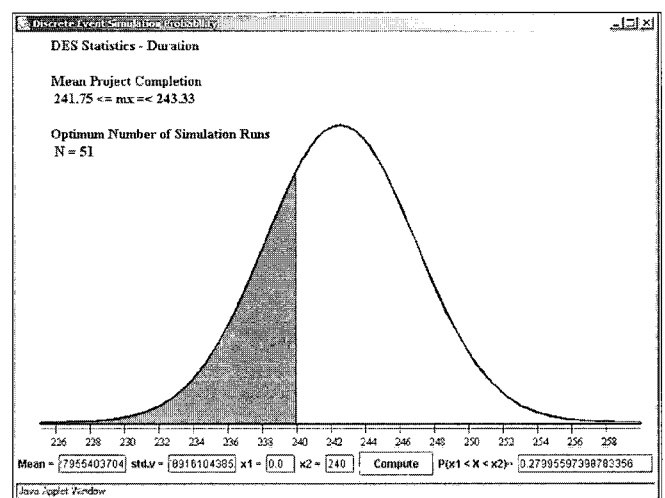


그림 4. 최종공사기간 출력결과

모집단을 토대로 95% 신뢰구간에 해당하는 최종 공사비가 계산된다. 그림 4에 제시된 것처럼 이러한 결과 값은 시물레이션 최소횟수와 함께 사용자에게 제시된다. 최종공사비 평균과 95%



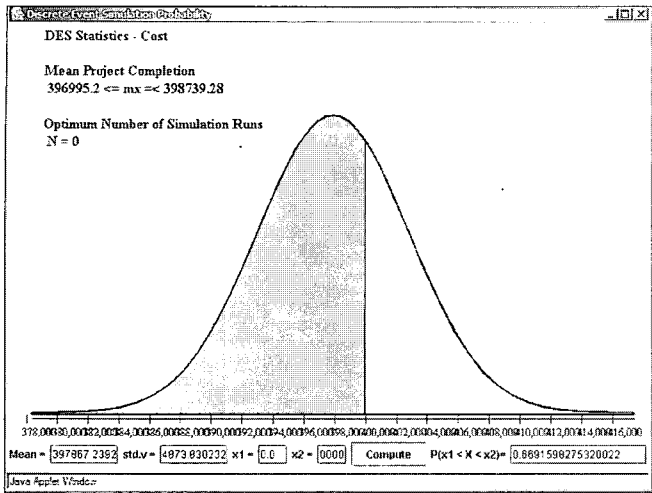


그림 5. 최종공사비 출력 결과

신뢰구간이 최소 시뮬레이션 횟수(120회)로 구성된 여러 번의 시뮬레이션 실험을 수행함으로써 계산되었다.

한편, 240일 이내에 공사를 조달할 확률(참조: 그림 4)이 약 28%에 그치는 반면, 400,000 \$에 공사를 조달할 확률(참조: 그림 5)은 67%에 달하고 있는 사실은 확률 통계적 일정 시뮬레이션에 있어서 최종공사비가 최종공사기간과 함께 거동하지 않는다는 사실을 입증한다. 예제 프로젝트의 경우 건설사가 240일 이내에 프로젝트를 조달할 가능성으로서 97.5%를 정적으로 선택한 경우, 공식 3에 따라  $DC = (243.33 \text{ day} - 240 \text{ day}) * (5,000 \text{ \$/day})$  으로 16,650 \$의 지체 보상금을 예비할 필요가 있다.

그림 6에 제시된 민감도 분석 최종 결과는 액티비티 기간의 Skewness(비대칭도)를 좌측편중(leftly skewed)상태에서부터 우측으로 편중(rightly skewed)되게 할수록, 즉, 액티비티 기간을 정의하는 인수 중 최빈시간을 낙관시간에 가까운 위치로부터 비관시간에 가까운 위치로 변동시킴에 따라 최종공사기간과 최

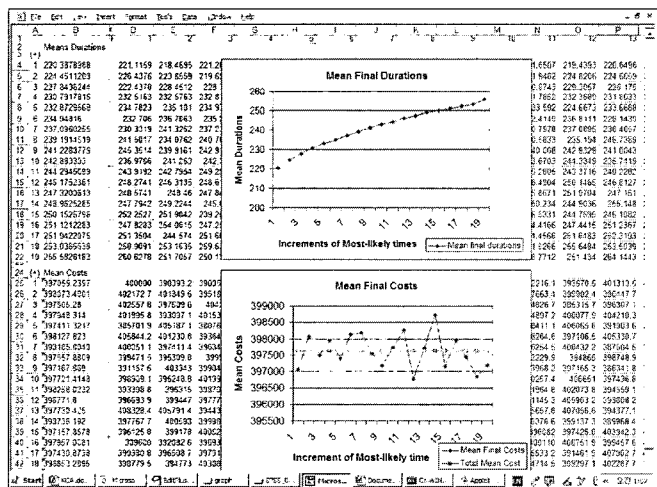


그림 6. 민감도 분석 최종 결과

종공사비가 어떻게 거동하는지를 보여준다. 최종공사기간은 우측으로 편중될수록 선형적으로 증가하는 경향을 띠게 되는 반면, 최종공사비용은 액티비티 기간의 확률분포함수의 통계적 위치에 선형적으로 증가하지 않는다. 따라서, 최종공사기간과 최종공사비는 상관관계를 가지고 거동하지 않고, 최종공사비는 액티비티 기간이 증가되는 만큼 비례해서 증가하지는 않는다는 사실이 발견되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 확률통계적 프로젝트 일정 시뮬레이션 시스템을 확장하여 액티비티 기간의 확률통계적 위치 변화에 따른 최종공사기간 및 최종공사비의 거동 특성을 민감도 분석기법을 활용하여 예측하는 방법론을 제시하는 목표를 달성했을 뿐만 아니라, CPM기법과 DES기법의 응용을 통해서 지체보상금 예비비를 추정하는 기법을 구현하였다. 기존에 CPM기법을 기반으로 주관적으로 선택해서 적용해왔던 지체보상금을 확실성과 신뢰성을 가지고 책정할 수 있는 방법론으로 패러다임을 전환시켰으며, 이러한 패러다임의 전환은 확률통계적 견지에서 최종공사비를 예측하는 것을 가능하게 하였다.

"액티비티 기간과 관련하여 삼각분포의 형태를 우측 편중시킬수록 최종공사기간이 선형적으로 증가한다."는 규칙은 시뮬레이션을 기반으로 하는 일정관리 전문가들에게 직관적으로 이해가 가능한 규칙을 확인하는 것으로 여겨질 수 있다. 그러나 본 연구에서는 민감도분석을 활용하여 이러한 연관규칙을 확인하는 방법론을 제시하여, 기존에 공리로 받아들여졌던 상식을 확증하였을 뿐만 아니라, 이러한 방법론을 적용하는 과정을 거치면서 간접비(손실비용) 증가로 인한 최종공사비 증가는 액티비티 공기가 증가할수록 선형적으로 증가하지 않는다는 지식을 발견하게 하여 상식으로 받아들여지던 지식에 오류가 있을 수 있음을 확인하여 수정할 수 있는 근거를 제시하였다.

또한, 자동화된 민감도분석기법의 적용은 각 프로젝트 네트워크가 어떠한 구성을 가지고 있든 액티비티 공기 증가에 따른 최종공사비의 거동을 예측하게 하는 기법을 제공한다.

확률 통계적 일정 시뮬레이션에 있어서 최종공사비는 액티비티의 공사비가 예산보다 적게 소요되는 경우와 더 많이 소요되는 경우가 서로 상쇄되기 때문에 최종공사기간의 길이에 선형적으로 비례해서 증가하지는 않는다는 것이 검증되었고, 지체보상금을 위한 예비비를 산정하는 방법론을 제시하고 있다. 민감도 분석의 결과는 액티비티 기간의 분산이 커질수록, 최빈값이 비관값에 가까워질수록 최종공사기간이 커지는 경향을 보이는 반면, 최종공사비의 평균값 및 표준편차에 큰 차이를 가져오지 않

는다는 사실을 밝히고 있다. 액티비티 기간의 변동에 따른 간접비 및 최종공사비의 변동은 무시할 수 있는 정도인 반면, 최종공사기간의 지연에 따른 지체보상금의 확보는 불확실성을 배제하기 위해 상당한 관심이 관리의 중심에 놓일 필요가 있음을 제시하고 있다.

본 연구를 통해 제시된 방법론은 건설 사업주체가 어떤 프로젝트를 획득하고자 할 때 떠안게 되는 재무관련 리스크 (Financial Risk)를 평가하고 정량화하는데 중요한 역할을 할 수 있다. SPSS를 사용한 리스크의 정량화는 건설사가 어떤 프로젝트를 획득하였을 때 재무적 리스크를 파악하는 기법을 제공한다. 예를 들어, 프로젝트 A와 B가 CPM기법에 의해서 동일한 최종공사기간과 최종공사비를 계산해낸다면, CPM기법으로는 동등한 매출규모와 사업성을 지니고 있는 것처럼 여겨질 수 있다. 그러나 시뮬레이션 모의실험을 통한 확률통계적 예측은 프로젝트 A가 프로젝트 B에비해서 일정 및 재무 리스크 측면에서 획득할 가치가 있다고 추정될 수 있다. 이처럼, SPSS를 사용하여 건설하고 리스크가 낮은 프로젝트들을 획득해서 프로젝트 포트폴리오로 구성하는 건설사는 프로젝트 리스크 측면에서 더 건설한 위치에 서게 되는 것은 자명한 사실이다. 이처럼, 프로젝트 재무 리스크의 정량적 측정과 예측은 시뮬레이션 모의실험을 통해서 얻을 수 있는 SPSS의 독특한 필요성과 타당성을 뒷받침한다.

### 참고문헌

1. 손창백, (1999), "지하철공사에 있어서 공기 증가가 공사원가에 미치는 영향에 관한 연구", 대한 건축학회 논문집.
2. 신현식 (1995), 공사관리 핸드북, 태림문화사, P.153-198.
3. CERIK (1999), "공기 지연 보상 청구의 기준 및 조건", 건설 산업동향, 55호.
4. AbouRizk, S. and Halpin, D.W., and Wilsonn, J.R. (1992), "Visual Interactive Fitting of Beta Distributions," Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 117, No. 4, p.589-605.
5. Ahuja, N. T. H., and Nandakumar, V. (1985). "Simulation Model to Forecast Project Completion Time." J. Constr. Eng. Mgnt, ASCE, 111(4), 325-342.
6. Ahuja, H. N., and Campbell, W. J. (1988). Estimating from concept to completion. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
7. Ashworth, Allan. (1988) Cost studies of buildings. Harlow, Essex, UK. Longman Scientific & Technical.
8. Barraza, A. Gabriel, Back, W. Edward, and Mata, Fernando. (2004). "Probabilistic Forecasting of Project Performance Using Stochastic S Curves." Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(1), 25-32.
9. Bennett, F. L. (2001). "Discussion: Simplified CPM/PERT Simulation Model." J. Constr. Eng. Mgnt, ASCE, 127(6), 513-515.
10. Crandall, K. C., and Woolery, J. C. (1982). "Schedule development under stochastic scheduling." J. Constr. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 108(2), 321-329.
11. Crandall, C. K. (1977). "Analysis of Schedule Simulation." J. Construction Division, ASCE, 133(2), 387-394.
12. Elazouni, Ashraf, M. and Nosair, Ibrahim, A. (1997) "Estimating resource requirements at conceptual design stage using neural networks." Journal of Computing in Civil Engineering, 11(4), 217-224.
13. Evans, M., Hastings, N., and Peacock, B. (2000). Statistical Distributions. Wiley, New York.
14. Glavinich, E. Thomas. (2004). Construction Planning and Scheduling. The Associated General Contractors of America. 2nd.
15. Halpin D.W. and Riggs, L.S. (1992). Planning and Analysis of Construction Operations. John Wiley & Sons, Inc. New York.
16. Kim, Gyooseok and Fishwick, P.A. (1997). "A method for Resolving the Consistency Problem Between Rule-based and Qualitative Models using Fuzzy Simulation." Technical Report. University of Florida.
17. Law, M. A., and Kelton, W. D. (2000). Simulation Modeling and Analysis. 3rd ed, McGraw-Hill, Boston, MA.
18. Lee, Dong-Eun. (2005). "Probability of Project Completion Using Stochastic Project Scheduling Simulation (SPSS)." J. Constr. Eng. Mgnt, ASCE, 131(3), P. 310-318
19. Lee, Dong-Eun. (2004). "Statistical Analyses for Simulating Schedule Networks" Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, IEEE Press, Washington, D.C. p.1283-1289.
20. Lee, Dong-Eun. (2005). "Stochastic Project

- Scheduling Simulation System (SPSS III)" Korean. J. of Constr. Eng. Mgnt, KICEM, 6(1), P.79-89.
21. Lu, M. and AbouRizk, S. M. (2000). "Simplified CPM/PERT Simulation Model." J. Constr. Eng. Mgnt, ASCE, 126(3), 219-226.
  22. Martinez, C. J. and Ioannou, G. P. (1997) "State-Based Probabilistic Scheduling Using STROBOSCOPE's CPM Add-On" Proceedings, Construction Congress V, Stuart D. Anderson, ed, ASCE, Minneapolis, MN, 438-445
  23. Monte Carlo 3.0 for Primavera. (1995). Project Risk Analysis Software, Primavera Systems, Inc., Bala Cynwyd, Pa.
  24. Nancy L. Holland, Dana Hobson, (1999). "Indirect cost categorization and Allocation by Construction contractors." Journal of Architectural Engineering, 5(2), P.49-56
  25. ProjectGear Inc. (Risk 4.0 for MS Project). <http://www.cs-solutions.com/riskplus.htm>
  26. Shi, J. (1999). Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation Method." J. Constr. Eng. Mgnt, ASCE, 125(5), 354- 360.
  27. Shi, J. (2001). Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation, Dept. of Civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, IL.
  28. Symphony. (2003). "Template for Project Scheduling Risk" NSERC/Alberta Construction Industry, <http://irc.construction.ualberta.ca/html/research/PERT.html>
  29. Van Slyke, M. R. (1963). "Monte Carlo Methods and The PERT Problem." Operation Research, 11, 839-860.

논문제출일: 2005.01.21

심사완료일: 2005.06.23

### Abstract

Activity durations retain probabilistic and stochastic natures due to diverse factors causing the delay or acceleration of activity completion. These natures make the final project duration to be a random variable. These factors are the major source of financial risk. Extending the Stochastic Project Scheduling Simulation system (SPSS) developed in previous research; this research presents a method to estimate how the final project duration behaves when activity durations change randomly. The final project cost is estimated by considering the fluctuation of indirect cost, which occurs due to the delay or acceleration of activity completion, along with direct cost assigned to an activity. The final project cost is estimated by considering how indirect cost behaves when activity duration change. The method quantifies the amount of contingency to cover the expected delay of project delivery. It is based on the quantitative analysis to obtain the descriptive statistics from the simulation outputs (final project durations). Existing deterministic scheduling method apply an arbitrary figures to the amount of delay contingency with uncertainty. However, the stochastic method developed in this research allows computing the amount of delay contingency with certainty and certain degree of confidence. An example project is used to illustrate the quantitative analysis method using simulation. When the statistical location and shape of probability distribution functions defining activity durations change, how the final project duration and cost behave are ascertained using automated sensitivity analysis method.

**Keywords** : probability and statistics, Quantitative analysis, Risk Management, Simulation