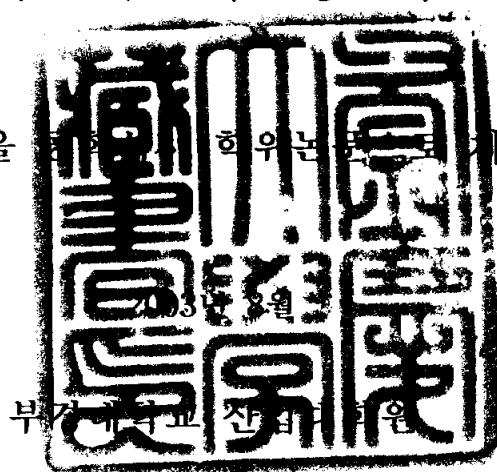


공학석사 학위논문

몬테카를로 시뮬레이션과 선형계획법을
이용한 최적의 일정 및 비용 산정방법

지도교수 이 영 대

이 논문을 학위논문으로 제출함



부경대학교 산학협력원

토목공학과

김민구

김민구의 공학석사 학위논문으로 인준함

2003년 6월 21일

주 심 공 학 박 사 이 상 호



위 원 공 학 박 사 이 종 출



위 원 농 공 학 박 사 이 영 대



목 차

1. 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 절차	1
1.3 연구동향	2
2. 이론적 연구	4
2.1 PERT/CPM의 개념	4
2.2 몬테카를로 시뮬레이션의 적용	12
2.3 선형계획법의 적용	19
3. 사례연구	27
3.1 사례 프로젝트 개요	27
3.2 사례분석절차	27
3.3 소요공기 및 소요비용의 추정	29
3.4 네트워크의 구성	30
3.5 주 경로 분석(Critical Path Analysis)	31
3.6 기간별 소요비용의 산정	32
4. 고찰	35
4.1 몬테카를로 시뮬레이션의 적용	35
4.2 선형계획법의 적용	39
5. 결론	44
참고문헌	45

표 차 례

표 1. 3점 견적법에 의한 예상기간의 추정	7
표 2. 주 경로(critical path)의 분산	9
표 3. 경로별 완료확률	17
표 4. 본선구간 세부개요	27
표 5. 사례공사의 3점견적법에 의한 예상기간의 계산	29
표 6. 사례공사의 소요비용 개요	30
표 7. 사례공사의 기간별 소요비용산정(조기일정)	32
표 8. 사례공사의 기간별 소요비용산정 (조기일정)	32
표 9. 사례공사의 기간별 소요비용산정 (만기일정)	33
표 10. 사례공사의 기간별 소요비용산정 (만기일정)	33
표 11. 여러 경로에 따른 전체공정의 완료확률	35
표 12. 주 경로의 예상기간 및 분산	35
표 13. 주 경로에 가장 근접한 경로의 예상기간 및 분산	36
표 14. 프로젝트 완료확률에 따른 프로젝트 소요공기	37
표 15. 활동변수와 이벤트변수의 정의	39
표 16. 목적함수의 정의	40
표 17. 제약조건의 정의	41
표 18. 목표공기에 따른 최소공기단축비용	42

그 립 차 례

그림 1. 연구흐름도	2
그림 2. PERT/CPM의 수행절차	5
그림 3. 3점 추정에 의한 β 확률분포	6
그림 4. 예상활동시간을 가진 네트워크 다이어그램	7
그림 5. 활동중심의 일정지표의 개념	9
그림 6. 프로젝트 이행시간을 위한 확률분포	10
그림 7. 16주가 목표종료일인 경우의 확률분포	11
그림 8. 시뮬레이션의 수행절차	12
그림 9. 몬테카를로 시뮬레이션의 수행절차	15
그림 10. 기대활동시간과 분산을 가진 PERT 네트워크 다이어그램	17
그림 11. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 프로젝트 소요공기의 추정	18
그림 12. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 프로젝트 소요공기의 통계치	18
그림 13. 선형계획법을 이용한 유효영역의 구성	23
그림 14. 목적함수 계수의 변동에 따른 민감도	24
그림 15. 기술계수 변동에 따른 민감도	25
그림 16. 자원의 변동에 따른 민감도	26
그림 17. 사례연구의 수행절차	28
그림 18. 사례공사의 네트워크 다이어그램의 구성	30
그림 19. 사례공사의 공정표 구성	31
그림 20. 사례공사의 요주의 경로의 식별	31
그림 21. 조기일정과 만기일정에 따른 S-Curve(기간별 소요비용)	34
그림 22. 조기일정과 만기일정에 따른 S-Curve(기간별 소요비용 비율)	34
그림 23. 주 경로의 몬테카를로 시뮬레이션 적용	36
그림 24. 주 경로에 가장 근접한 경로의 몬테카를로 시뮬레이션 적용	37
그림 25. 프로젝트 완료확률에 따른 프로젝트 소요공기	38
그림 26. 선형계획법의 모델링	42
그림 27. 목표공기에 따른 최소공기단축비용	43

A Method of Calculating Optimal Duration and Cost Using Monte Carlo Simulation and Linear Programming

Kim, Min Gu

*Department of Civil Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

It can occur to many problems on progressing step without close scope definition, interrelation definition between activities, resource plan, and schedule plan on planning step.

But it have not closely defined performance system on planning step because of many constraints of domestic construction industry.

Therefore this paper intends to discuss a method of calculating optimal cost and duration using Linear Programming that solves maximizing or minimizing problems among decision making methodology and Monte Carlo Simulation that decreases to probability errors.

With outcomes applying Linear Programming and Monte Carlo Simulation for calculating optimal cost and duration, follow as:

With outcomes applying Monte Carlo Simulation, it could calculate reliable estimator about project duration through removing various constraints.

With outcomes applying Linear Programming, it could calculate optimal value about project cost through defining various variables and constraints on many activities.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

프로젝트의 계획단계에서 명확한 업무의 정의와 업무간의 상관관계, 자원계획 및 일정계획이 수행되지 않으면, 공사의 진행 시에 많은 변경과 일정·비용 상의 문제를 가져올 수 있다. 그러나 건설공사에서는 여러 가지 제약에 의해서 프로젝트의 계획단계에 많은 노력을 기울이지 못하고 있으며, 프로젝트 생애주기(Life Cycle) 전반에 대한 정확한 수행체계가 정립되어있지 못한 상황에 있다.

프로젝트의 최종 목표는 주어진 소요공기 및 예산 내에서 프로젝트 최종 목적물을 인도하는 것이며, 계획단계에서는 정확한 소요공기 및 소요비용을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 국내의 건설공사에서 CPM(Critical Path Method)을 이용해서 공정계획을 수행하고 있으나, 많은 건설공사에서 전체공사에 대한 세부적인 측정 및 관리가 수행되지 못하고 있는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 사례연구를 중심으로 프로젝트 계획단계에서 최적의 소요공기 산정을 위해서 확률적 소요공기 산정방식인 PERT기법을 도입하고, 확률적 오차를 줄이기 위해 몬테카를로 시뮬레이션방식을 적용하고자 한다. 또한 최적의 소요비용을 산정하기 위해서 최대·최소문제를 해결하는 의사결정방식인 선형계획법을 적용하는 방안에 대해서 연구하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 절차

프로젝트 계획단계에서 정확한 소요공기 및 비용을 산정하기 위해서는 유사 프로젝트에 대한 신뢰할 만한 축적된 기본 자료가 있어야 하며, 모든 프로젝트 이해당사자들이 동의할 수 있는 신뢰할 만한 산정방식을 사용해야 한다. 그래서 주관적이고, 경험적인 판단에 기초한 소요공기 및 비용의 산정방식 보다는 논리적이고 체계적인 정량적 분석기술에 의해서 산정 되어야 한다.

본 연구에서는 프로젝트 계획단계에서 확률적인 소요공기 산정방식인 PERT기법을 이용해서 예상소요공기를 산정하고, 확률상의 오차를 해소하기 위해서 난수를 발생시켜 반복적 계산을 수행하는 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하고자 한다. 또한 각 활동별 단축가능일수를 파악하여, 최소의 소요비용으로 전체 프로젝트 소요공기를 단축하기 위해서 최대, 최소의 문제를 해결하는 선형계획법을 적용하고자 한다. 마지막으로 소요공기 및 비용 상의 변동울 가져올 수 있는 중요한 변수인자를 식별하여, 민감도 분석을 수행하는 것을 연구의 범위로 정한다.

본 연구의 수행절차를 도식화하면 그림 1과 같다.

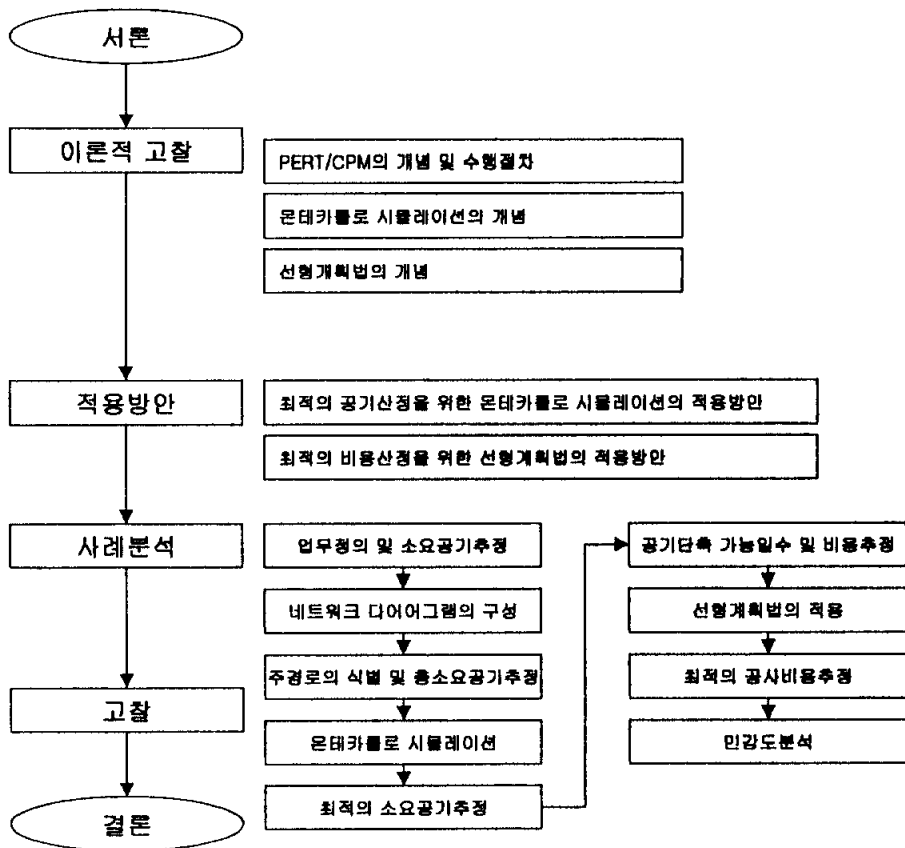


그림 1. 연구흐름도

1.3 연구동향

국내의 경우, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 정량적 분석에 관한 논문이 최근 들어와서 활발하게 늘어나고 있는 추세이며, 여러 건설 환경에 대한 의사결정 기법을 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 김경주(2000)는 건설공정 최적화 설계를 위해서 몬테카를로 시뮬레이션 기법의 적용방안을 제시하였으며, 강인석(2000)은 공사외적요인을 고려한 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 확률적 모의 조작에 의한 공정계획모듈을 제시하고, 실제 공동주택공사에 적용하여, 적합성을 검증하였다.

외국의 경우, Gibson, G. E 등(2000)은 건설프로젝트의 운영상에 새로운 접근 방법으로 몬테카를로 시뮬레이션을 도입하였다. 그 외 주요내용은 건설 공사의 시

간, 비용 측면에서의 최적화, 건설공사에 필요한 총 작업 시간의 예측, 건설 프로젝트 수행 초기단계에 있어서의 각종 위험요인의 분석과 위험분산분석 등이다. 또한 Do Ba Khang (1999)는 선형계획법을 적용하여 사례를 중심으로 최적의 시간, 비용 및 품질값을 산정하고자 하였으며, Ghaleb Y. Abbasi (2001)은 PERT 네트워크 상의 비관시간을 선형계획법을 이용하여 최소화하는 방안에 대해서 연구하였다.

2. 이론적 연구

2.1 PERT/CPM의 개념

대규모 조직을 구성하고 있는 기업이 수행하는 대부분의 실제 프로젝트는 규모가 크며 복잡한 경우가 많다. 한 예로 오피스 빌딩을 건축하는 건축주는 많은 비용과 업무활동을 이행해야 하며, 수많은 절차(process)가 요구될 때도 있다. 대부분의 모든 기업은 큰 규모의 복잡한 프로젝트를 효과적으로 관리하는 방안에 대해서 관심을 가지고 있으며, 리스크(risk)가 큰 어려운 문제에 직면할 때가 많다. 잘못된 계획에 따른 많은 비용을 낭비하는 경우도 있으며, 잘못된 공정구성에 따른 불필요한 일정지연을 초래 할 수도 있다.

PERT(Program Evaluation and Review Technique)와 CPM(Critical Path Method)는 관리자가 규모가 크고, 복잡한 프로젝트를 계획하고, 공정을 구성하고, 진도관리의 수행을 용이하게 하는 정량적 분석기술이다.

1) PERT/CPM의 수행절차

PERT/CPM은 일반적으로 다음의 6단계로 수행할 수 있다.

- (1) 프로젝트 및 프로젝트의 중요한 활동(activity)과 업무(task)를 정의한다.
- (2) 활동 간의 상관관계를 구성한다. 각 활동 간에 선후행관계를 정의한다.
- (3) 모든 활동을 연결하는 네트워크 다이어그램을 구성한다.
- (4) 모든 활동에 일정 및 비용견적을 할당한다.
- (5) 네트워크 상에 가장 긴 경로를 계산한다.(주 경로분석)
- (6) 프로젝트 계획, 공정 및 통제관리를 위해서 구성된 네트워크를 활용한다.

그림 2는 PERT/CPM의 수행절차를 나타내고 있다.

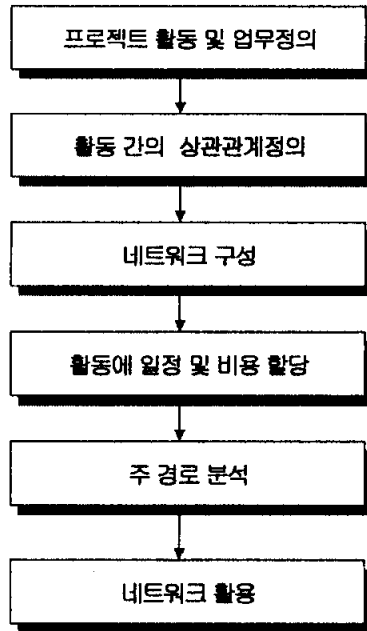


그림 2. PERT/CPM의 수행절차

특히 주 경로(critical path)를 찾는 것은 프로젝트를 통제하기 위한 중요한 업무이며, 주 경로 상의 활동에서 지연이 발생하면 전체 프로젝트에 지연을 가져올 수 있다. 프로젝트 관리자는 주 경로 상에 있지 않는 활동을 식별하고 재계획 하여 공정을 다시 구성하여야 하며, 자원재배치를 통해서 전체프로젝트를 유연하게 대처해야 한다.

2) 활동시간(Activity Times)의 추정

PERT 네트워크가 구성되면 각각의 활동에 소요되는 시간을 추정하고, 할당해야 한다. 모든 프로젝트에서나 새롭게 시작하는 프로젝트의 경우, 각각의 활동에 소요되는 시간을 추정하는 것은 쉬운 일이 아니며, 신뢰할 만한 과거자료(historical data) 없이 관리자가 각각의 활동을 추정하는 것은 리스크의 요소가 크게 안고 있다고 할 수 있다. 이런 이유로 PERT로 네트워크를 구성하는 관리자는 확률분포(probability distribution)를 도입하여 각각의 활동에 대한 세 가지 소요시간의 추정 값을 기준으로 한다.

낙관시간(optimistic time, a) : 모든 업무가 잘 수행될 것이라는 가정 하에 각 활동의 추정시간

비관시간(pessimistic time, b) : 모든 업무가 부적당한 조건에서 수행될 것이라는 가정 하에 각 활동의 추정시간

기대시간(most likely time, m) : 활동을 수행하기 위한 가장 현실적인 시간의 추정

PERT는 시간을 추정할 때 베타분포(beta probability distribution)를 따른다고 가정한다. 이 연속분포(continuous distribution)은 많은 사례를 통해서 활동의 이행시간의 분산과 기대값(expected value)을 결정하기 위해서 적절하다고 증명되었다.

그림 3는 3점 추정값을 가진 베타분포를 나타내고 있다.

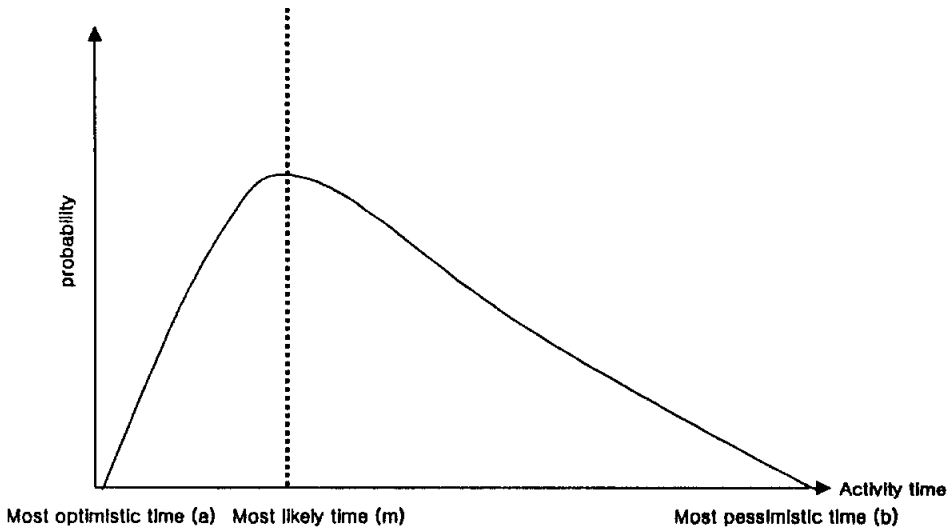


그림 3. 3점 추정에 의한 β 확률분포

예상되는 활동시간(expected activity time, t)을 찾기 위해서 베타분포는 다음과 같은 추정시간에 대한 가중치를 부여한다.

$$t = \frac{a + 4m + b}{6}$$

활동시간의 분산(variance)을 계산하기 위해서는 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\text{분산} = \left(\frac{b - a}{6} \right)^2$$

표 1은 앞에서 제시된 PERT 네트워크의 예시에 대해서 각각의 활동에 기대시

간, 낙관시간, 비관시간을 추정 한 값을 나타내고 있으며, 그림 4는 예상소요시간을 결정한 네트워크 다이어그램을 나타내고 있다.

표 1. 3점 견적법에 의한 예상기간의 추정 (단위:주)

액티비티	예상시간(t)	낙관시간(a)	기대시간(m)	비관시간(b)	분산
A	2	1	2	3	0.11
B	3	2	3	4	0.11
C	2	1	2	3	0.11
D	4	2	4	6	0.44
E	4	1	4	7	1.00
F	3	1	2	9	1.78
G	5	3	4	11	1.78
H	2	1	2	3	0.11

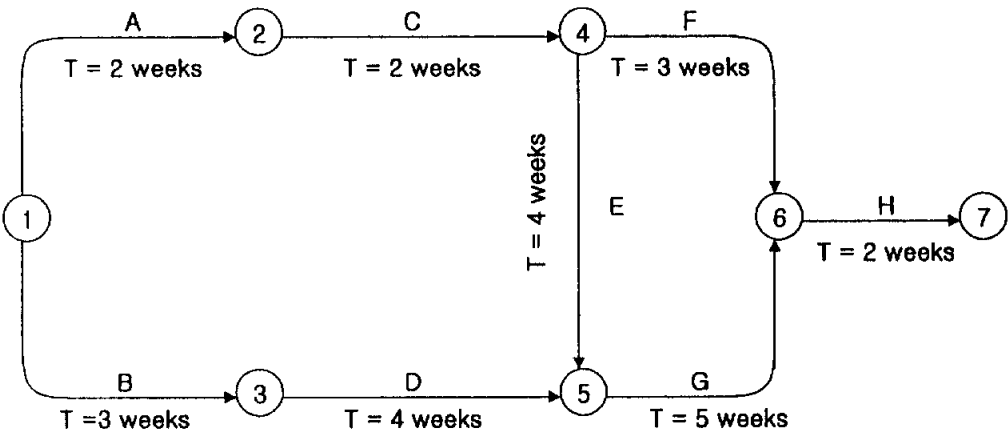


그림 4. 예상활동시간을 가진 네트워크 다이어그램

3) 주 경로(Critical Path) 분석

일단 각각의 활동에 대한 예상소요시간이 결정되면, 그 작업을 위한 실제 수행 시간으로 간주하게 된다. 예시에서 전체 활동에 대한 소요시간은 25주로 나타나지만, 네트워크 다이어그램을 보면 동시에 수행되는 활동이 있는 것을 알 수 있다. 프로젝트를 수행하기 위한 가장 긴 경로를 찾기 위해서는 네트워크에 대한 주 경로 분석을 수행해야 한다.

주 경로(critical path)는 네트워크 전반에 대한 가장 긴 경로를 말하며, 프로젝트 전체 소요시간을 줄이기 위해서는 주 경로상의 활동시간을 줄여야 한다. 반면

에 주 경로상의 활동에 지연이 발생하면 전반적인 프로젝트의 지연이 발생한다.

주 경로를 찾기 위해서는 네트워크상의 각각의 활동에 대한 다음 값들을 정량화해야 한다.

일차적으로 각 활동별 시작시간과 종료시간을 결정해야 하며, 여기에는 두 가지의 다른 시간개념이 있다. 하나는 모든 작업이 제약조건에 따라 조기에 시작해서 종료하는 시간을 나타내는 조기시간(earliest time)과 모든 작업의 제약조건에 따라 가장 늦추어서 시작해서 종료하는 시간을 나타내는 만기시간(latest time)이 있다.

조기시간(ET : Earliest Time)

- 조기시작시간(ES : Earliest Start Time)
- 조기완료시간(EF : Earliest Finish Time)

만기시간(LT : Latest Time)

- 만기시작시간(LS : Latest Start Time)
- 만기완료시간(LF : Latest Finish Time)

여기서 조기시간은 단계중심의 전진계산에 의해서 결정되며, 만기시간은 후진계산에 의해서 결정된다.

이 네 가지 활동중심의 일정지표가 각 활동별 조기착수와 만기완료의 한계를 나타내 주는 지표이며, 건설공사현장에서 작업을 수행할 때는 작업수행을 위한 기준 일정이 있어야 하며, 그 일정을 목표시작시간과 목표종료시간이라 정의한다.

목표시간(TT : Target Time)

- 목표시작시간(MTS : Master Start Time)
- 목표종료시간(MTF : Master Finish Time)

이 지표는 건설공사현장에서 작업하기 위한 기준일정을 설정할 때 반드시 분석되어야 할 일정분석의 개념이다.

목표시간을 식으로 나타내면 다음과 같다.

목표시작시간 : $MTS = ES + TF \times \alpha$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)

목표종료시간 : $MTF = MTS + D$

위에서 설명한 각 활동일정, 즉 조기일정과 만기일정 그리고 목표일정의 지표들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

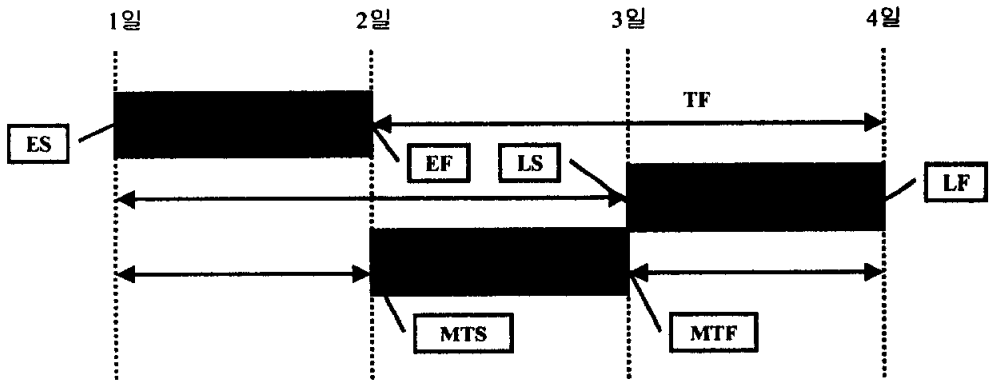


그림 5. 활동중심의 일정지표의 개념

4) 프로젝트 완료의 확률추정

주 경로 분석은 예상되는 프로젝트의 완료시점을 결정하는데 적용된다. 그러나 각각의 개별적인 활동의 소요공기를 추정함에 따라서 분산이 발생하고, 확률오차에 의해서 프로젝트의 예상 완료시점을 지나치는 경우가 발생할 수 있다. 주 경로 상에 있는 활동에 대한 분산의 정도에 따라 지연이 발생한 경우에 프로젝트 전체완료시점에 영향을 줄 수 있다.

PERT는 전체 프로젝트의 분산을 결정하기 위해 주 경로 상의 분산을 사용하며, 프로젝트 분산은 주 경로 상의 활동에 대한 분산의 합으로 계산된다.

$$\text{project variance}(\sigma_T^2) = \sum \text{variances of activities on the critical path}$$

표 2는 주 경로상의 활동에 대한 분산을 나타내고 있는 예시이다.

표 2. 주 경로(critical path)의 분산

Activity	Variance
A	0.11
C	0.11
E	1.00
G	1.78
H	0.11
project variance	3.11
project stan.dev.	1.76

이러한 정보는 프로젝트가 제시간에 완료될 확률과 관련이 되며, 두 가지 가정을 전제조건으로 한다. 첫째는 모든 전체 프로젝트의 완료시간은 정규분포를 따

른다는 것이며, 둘째 활동시간은 통계적으로 독립적이라는 것이다. 이러한 가정은 그림 6에 나타나는 종 모양의 곡선(bell-shaped curve)이 전체 프로젝트 완료날짜를 나타내는데 사용되며, 전체프로젝트 예상기간 내에 완료될 확률이 50%이고 예상기간을 초과할 확률이 50%임을 의미한다.

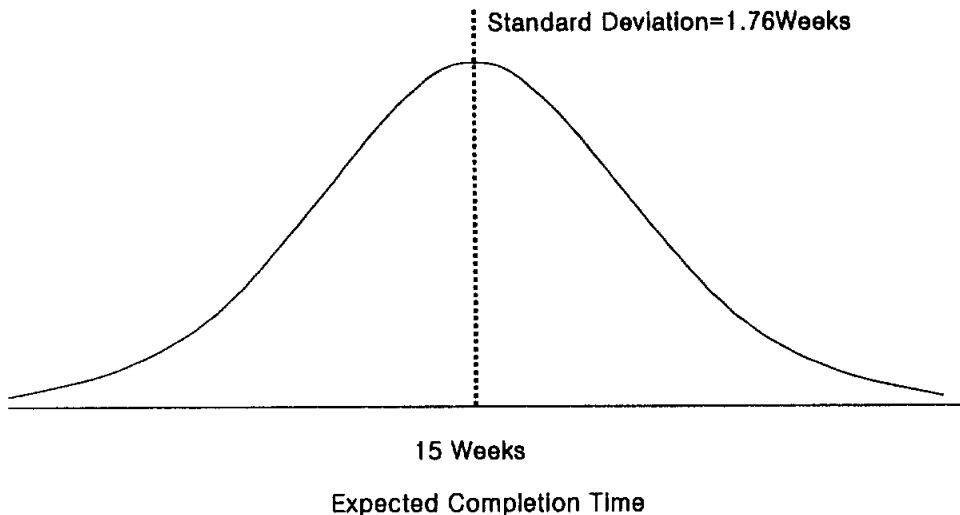


그림 6. 프로젝트 이행시간을 위한 확률분포

그림 6에서 15주가 예상소요기간으로 나타났는데 16주 이내에 완료할 확률을 찾는다면, 정규분포곡선 아래의 적정영역을 결정한 필요가 있으며 표준정규분포 방정식을 적용한다.

$$Z = \frac{\text{due data} - \text{expected date of completion}}{\sigma_T} = \frac{16\text{weeks} - 15\text{weeks}}{1.76\text{weeks}} = 0.57$$

Z값을 이용하여 정규분포표를 참조함으로써 16주 이내에 전체프로젝트를 완료할 확률이 71.6%임을 알 수 있다.

그림 7은 16주 이내에 전체프로젝트가 완료될 확률분포를 나타내고 있다.

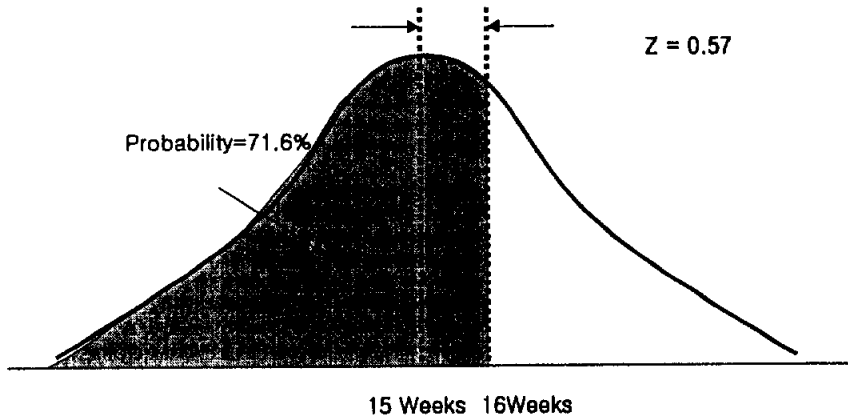


그림 7. 16주가 목표종료일인 경우의 확률분포

PERT/CPM은 프로젝트를 수행 시에 다음과 같은 이점이 있다.

- (1) 프로젝트의 예상완료기간을 정의할 수 있다.
- (2) 어떤 특정시점까지 전체 프로젝트의 완료확률을 계산할 수 있다.
- (3) 전체 프로젝트 활동 중 주 경로상의 활동을 정의할 수 있다.
- (4) 주 경로 상에 있지 않는 활동들은 여유시간을 가지게 되며, 전체 프로젝트의 소요기간을 단축하기 위해서 유연성 있게 여유시간을 활용할 수 있다.
- (5) 각각의 활동에 대한 시작시점 및 종료시점을 이용한 세부적인 공정을 구성할 수 있다.

2.2 몬테카를로 시뮬레이션의 적용

1) 시뮬레이션의 개념

시뮬레이션(Simulation)이란 "실제 시스템을 모형화(modeling)하고 그 모델을 통하여 시스템의 거동을 이해하기 위하여 실험을 하거나, 그 시스템의 운영을 개선하기 위한 다양한 전략을 평가하는 과정(Process)"을 말한다(Shannon 1975). 즉, 시뮬레이션이란 실제로 한 시스템이 구축되기 전에 축소된 물리적인 모형이나, 수학적인 모델, 또는 시스템을 묘사하는 다양한 모델을 구축하고, 이를 통해 다양한 환경(시스템의 효율성에 영향을 미치는 매개 변수들) 아래에서 시스템의 거동을 실험함으로써 그 시스템의 거동을 사전에 예측하거나, 다양한 목적(시간, 비용의 효율성, 위험분석 등)을 만족시키는 시스템을 설계하기 위한 도구이다. 따라서 시뮬레이션은 실제 건설사업을 수행하기 이전에 다양한 조건하에서 컴퓨터 상에 수행해 봄으로서, 건설사업의 수행에 있어서 많은 문제점을 사전에 예측하고 분석하며, 시간과 비용측면에서 최적의 계획을 가능케 하는 사업관리에 있어서의 중요한 도구를 제공한다.

시뮬레이션은 실제 시스템의 모델을 설정하고 그에 대해 반복적 실험을 실시하는 것을 포함한다. 일반적인 시뮬레이션의 수행절차는 그림 8과 같다.

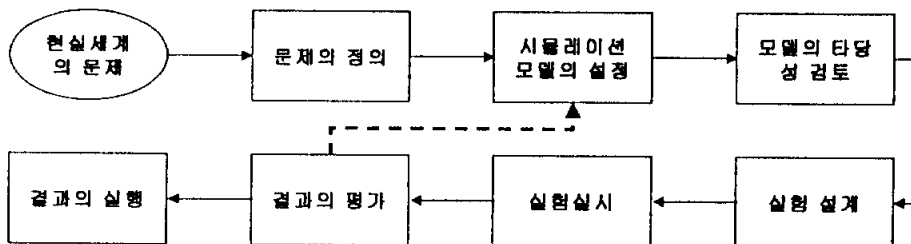


그림 8. 시뮬레이션의 수행절차

(1) 문제의 정의

시뮬레이션 과정의 첫 단계는 분석하고자 하는 시스템에 대하여 문제가 명시되어야 하고 해가 달성하고자 하는 목적을 밝혀야 한다. 일반적으로 시뮬레이션 실시의 목적은 시스템이 어떤 조건에서 어떻게 반응하는가를 결정하는 것이다.

모델설정에 필요한 정보를 결정한다. 예컨대 재고시스템을 시뮬레이션 할 때 문제가 되는 것은 어떤 재주문점(reorder point)에서 주문량을 얼마나 할 것인가이다. 이 단계에서 평가기준, 결정규칙, 모델의 매개변수 등을 명시해

야 한다. 또한 시스템의 결정변수와 그들의 관계들을 명시해야 한다. 재고시스템에서는 이 단계에서 평가기준으로서의 비용, 재주문점을 위한 결정규칙, 그리고 수요량, 조달기간, 안전재고 등의 결정변수를 명시해야 한다.

(2) 시뮬레이션 모델의 설정

필요한 자료의 수집 및 분석 후에는 컴퓨터 언어를 사용하여 프로그램을 작성해야 한다. 예컨대 대기행렬시스템에서 도착 및 서비스시간에 관한 실제 자료는 모델을 테스트하고 타당성검토를 하는데 필요하다. 모델을 설정하는데 따르는 비용을 최소로 하면서 중요한 변수와 그의 함수적 관계를 꼭 포함하여 실제 시스템의 형태를 정확하게 예측할 수 있도록 해야 한다.

(3) 모델의 타당성 검토

모델의 타당성 검토는 모델의 개발과 동시에 진행해야 한다. 타당성 검토의 목적은 모델이 실제 시스템을 정확하게 묘사하고 있는가를 결정하기 위함이다. 이는 항상 시뮬레이션의 결과를 똑같은 상황에서의 시스템의 현재와 과거의 형태와 서로 비교함으로써 이루어진다. 타당성 검토에서 모델의 가정이나 매개변수의 값을 검토해야 하며 현실 세계를 잘 아는 사람과 시뮬레이션 결과를 사용할 사람의 판단과 의견도 반영해야 한다.

이 단계에서 시뮬레이션 모델의 프로그래밍에 주의를 기울여야 한다. 아무리 모델이 정확하게 설정되었다 하더라도 모델의 프로그래밍이 잘못되면 부정확한 결과를 초래하게 되기 때문이다.

(4) 실험설계 및 실시

시뮬레이션 모델의 타당성이 평가되면 실험이 설계된다. 시뮬레이션 모델을 사용할 때는 수많은 대안에 대하여 실험을 해야 하기 때문에 수많은 시뮬레이션 실행(run)이 필요하고 또한 실험을 설계하는 것이 복잡하다. 예컨대 투자대안이 10개이고 이들 각각에 5개의 값을 가정한다면 5^{10} 의 대안이 가능하여 천만 번의 실행(run)이 실시되어야 한다.

시뮬레이션의 실행이 많으면 많을수록 결과는 더욱 정확해지지만 실험에 따르는 비용이 증가하므로 이러한 실행의 크기, 표본크기, 비용, 품질, 결과분석용 통계기법의 사용 등에 대해 심사숙고해야 한다.

(5) 결과분석 및 실행

시뮬레이션 과정의 마지막 단계는 시뮬레이션 결과의 분석과 이의 실행이다. 결과의 해석은 시뮬레이션 모델이 현실을 근접하는 정도에 크게 의존한다. 근접할수록 결과를 조정할 필요가 없게 된다. 또한 근접할수록 결과를 적용하는 데 따른 위험도 적어진다.

2) 몬테카를로 시뮬레이션의 개념

몬테카를로 시뮬레이션이란 불확실한 상황에서의 의사결정을 목적으로 확률적 시스템(probabilistic system)의 모의실험에 이용되는 절차를 말한다. 몬테카를로 시뮬레이션의 핵심은 모델의 확률요소들에 대한 실험인데 이는 확률적 또는 우연 결과(chance outcomes)를 발생시켜 주는 도구를 이용하여 수행된다. 이 도구는 모델에서 가정한 확률분포에 따라 무작위 표본화(random sampling)에 의해서 우연결과를 발생시켜 주는 데 이용된다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션을 모의적 샘플링 기법(simulated sampling technique)이라고 한다.

표준정규화 된 몬테카를로 시뮬레이션의 일반식은 다음과 같다.

$$Q_i = (\mu + \sigma t_i)$$

여기서 Q_i 는 발생자료계열, μ 는 실측자료의 평균, σ 는 실측자료의 표준편차, t_i 는 분산이 1이고 평균이 0인 표준정규난수를 말한다.

대수정규분포의 경우는 다음식과 같다.

$$Q'_i = EXP(\mu_y + \sigma_y t_i)$$

여기서 Q'_i 는 발생자료계열, μ_y 는 실측치를 대수로 취한 값의 평균, σ_y 는 표준편차를 말한다.

정규난수의 발생을 위해서는 Box-Muller가 제안한 다음식과 같다.

$$t_i = (2l nu_1)^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(2\pi u_2)$$

$$t_{i+1} = (-2l nu_1)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(2\pi u_2)$$

여기서 u_1 과 u_2 는 분산이 1이고 평균이 0인 난수를 표시한다.

3) 몬테카를로 시뮬레이션의 수행절차

시스템 내에서 확률변동을 하는 요소들을 포함하면 몬테카를로 시뮬레이션 기법이 적용가능하다. 몬테카를로 시뮬레이션의 핵심은 모델 내 확률요소의 무작위 표본화(random sampling)을 통한 실험이라고 했듯이 주된 관심은 바로 이 모델의 시행에 있으며, 몬테카를로 시뮬레이션의 시행을 위한 단계적 절차는 그림 9와 같다.

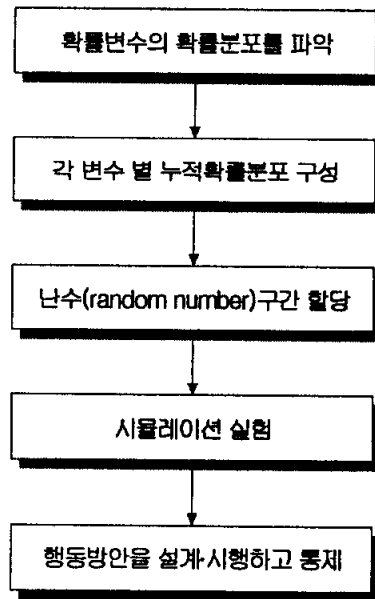


그림 9. 몬테카를로 시뮬레이션의 수행절차

(1) 확률변수의 확률분포를 얻는다.

몬테카를로 시뮬레이션의 기본적인 아이디어는 모델을 구성하는 변수들의 값을 발생시키는 것이다. 실제 시스템에서 고려되는 확률변수의 예를 들면 다음과 같다.

- 매일 또는 매주의 재고수요량
- 재고주문이 도착하는 조달기간
- 서비스시설에서 발생하는 도착사이의 시간
- 기계고장 사이의 시간
- 서비스시간
- 프로젝트의 활동을 완료하는 시간
- 매일 결근하는 종업원의 수

확률변수의 확률분포를 얻는 보편적인 방법은 역사적 자료(historical data)를 검토하거나 경험이 많은 전문 관리자의 예측으로부터 얻는 것이다. 이 분포는 포아송, 지수, 이항, 또는 정규분포 등과 같이 이미 알려진 분포로 나타낼 수 있다.

(2) 각 변수에 대해 누적확률분포를 구성한다.

누적확률분포는 내림차순으로 더해 나가는 “이하”형이거나, 오름차순으로 더해가는 “이상”형일 수가 있다. 일반적으로 얼마 이하일 확률을 나타내는 “이하”형 누적확률이 사용된다.

(3) 확률변수의 값이나 값의 범위를 나타내기 위해서 적절한 난수의 집합인 난수구간을 할당한다.

이 단계에서는 먼저 전체적인 난수의 범위를 결정하고, 이 범위를 적절한 구간으로 나누어야 한다. 각 구간은 하나의 특정한 결과와 대응되어야 하며 이 구간의 길이는 대응되는 특정 결과의 발생비율과 같아야 한다.

(4) 램덤 샘플링(random sampling)을 이용하여 시뮬레이션 실험을 실시한다.

(5) 행동방안을 설계·시행하고 통제한다.

이 단계에서는 시뮬레이션 된 확률분포를 검토하고 이들을 이용하여 매개 변수들을 추정하며, 관리적 조치를 취한다. 예를 들면 시뮬레이션 된 이익분포를 이용하여 이익의 양상을 검토하고 이익의 평균 및 표준편차를 얻게 된다.

이익의 양상이 관리자에게 만족스럽지 못한 것이라면 수요를 개선할 수 있는 새로운 방법이나 한계이익 개선방안 등을 탐색하게 된다.

4) 비 주경로(Non-Critical Path)에 대한 문제점

PERT의 통계적 수행절차는 지나치게 최적의 결과를 가져온다는 비판을 받고 있다. 그림 10과 표 3은 주 경로와 주경로의 예상소요시간에 근접한 두 가지 경로를 나타내는 있다

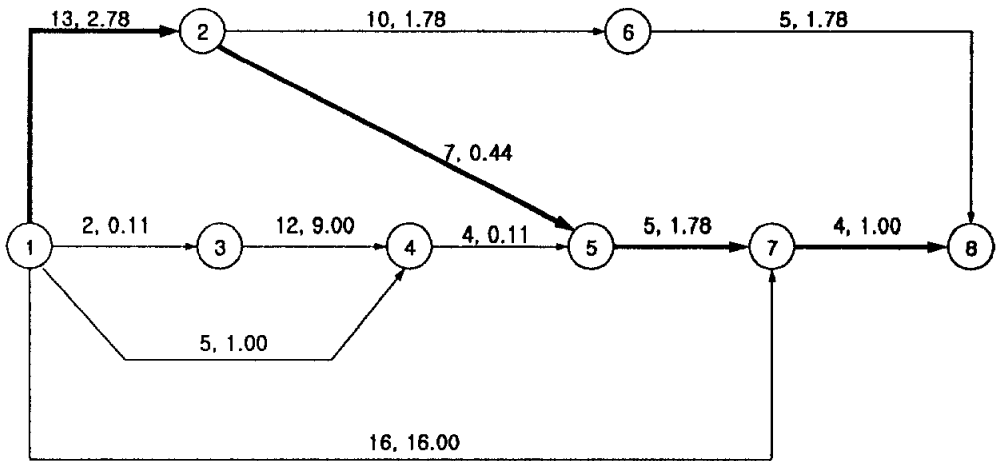


그림 10. 기대활동시간과 분산을 가진 PERT 네트워크 다이어그램

표 3. 경로별 완료확률

(29일 기준, 단위:일)

path	expected time	variance	sta. dev.	z	chance of completion
(A) 1-2-6-8	28	6.34	2.52	0.40	65.4%
(B) 1-7-8	20	17.00	4.12	2.18	98.5%
(C) 1-2-5-7-8	29	6.00	2.45	0.00	50.0%
(D) 1-4-5-7-8	18	3.89	1.97	5.58	100.0%
(E) 1-3-4-5-7-8	27	12.00	3.46	0.58	71.8%
chance of completing all paths					23.2%

각각의 활동별 예상소요시간과 분산이 나타나 있으며, 프로젝트를 수행하는 A, B, C, D, E의 5가지 경로로 구성된다. 각각의 경로에 대한 예상소요시간과 분산을 산정하면 표 3과 같다.

주 경로의 예상소요시간에 근접한 경로(A, E)의 분산(variance)은 잘 진행이 되지 않는 경우에 초기의 주 경로상의 일정인 29일을 초과하여 주 경로(critical path)가 될 가능성이 충분히 많은 값이다. 29일 이내에 경로 A와 E가 완료되지 못할 확률은 33%와 28%이다. 그래서 이러한 경로가 주 경로가 될 확률이 다분히 높다고 할 수 있다. 프로젝트 관리자는 초기의 주 경로만을 강조한다면, 이러한 분산의 값이 크고, 주 경로의 예상소요시간과 비슷한 경로를 무시하게 되는 경우가 많다.

또한 정규분포로 가정함으로써 29일 이내에 프로젝트가 완료될 50%의 확률은 지나치게 낙관적일 수 있다. 네트워크 내에 모든 활동은 전체 프로젝트가 완료되기 전에 완료해야 하기 때문에 29일 이내에 프로젝트가 완료될 확률은 29일 이내에 모든 다섯 개 경로가 완료될 확률과 같다. 비록 경로 B, D는 29일 이내에 완료될 확률이 100%에 가깝지만, 경로 A와 E는 67%와 72%이다. 그래서 모든

경로가 29일 이내에 완료될 확률은 각 경로의 완료될 확률의 곱($1.0 \times 1.0 \times 0.67 \times 0.72 \times 0.5$)으로써 25%보다 작은 값이 된다.

5) 몬테카를로 시뮬레이션의 적용

몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션은 주 경로와 주 경로가 될 가능성이 있는 경로의 영향을 고려하는 방식이다. 각각의 활동시간 추정값은 확률분포로부터 무작위로 선택되어진다. 그리고 주 경로는 이러한 시간을 통해서 계산된다. 이러한 절차가 프로젝트 전체소요공기의 분포를 생성하기위해서 수 천번 반복되는 방식이다. 이러한 방식은 이전의 PERT 확률분석에 비해서 더욱 현실적인 프로젝트 소요시간과 표준편차를 산정할 수 있다. 또한 다른 경로가 주 경로가 될 확률 또한 계산할 수 있다.

이러한 방식은 기존의 PERT의 확률분석에서 각각의 활동은 독립적이고, 프로젝트 소요시간에 대해서 정규분포를 따른다는 가정의 제약조건을 피할 수 있다.

그림 11과 그림 12는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 프로젝트 완료시간을 추정한 것이다. 주 경로인 C 경로에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 것으로 1000회의 반복 시행으로 평균이 PERT에 의한 추정치인 29일보다 다소 적은 28.92로 나타났다.

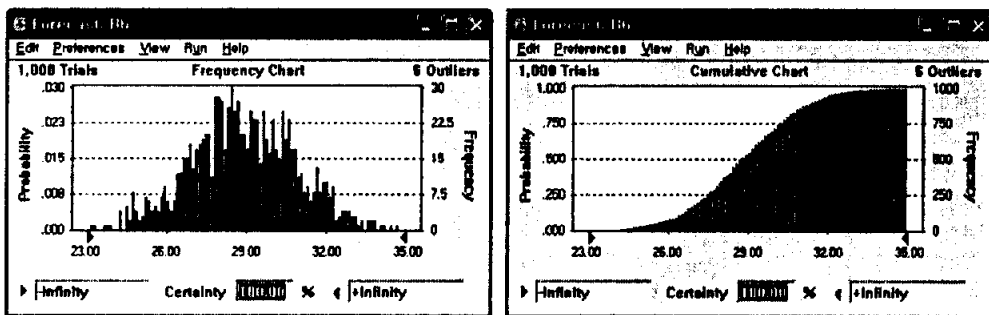


그림 11. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 프로젝트 소요공기의 추정

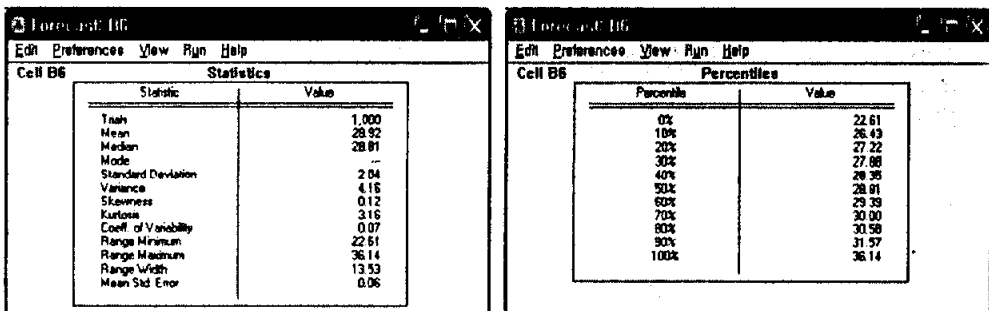


그림 12. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 프로젝트 소요공기의 통계치

2.3 선형계획법(Linear Programming Models)의 적용

1) 선형계획법의 개념

많은 관리자들은 조직의 자원을 가장 효과적으로 사용하려고 노력하며, 자원은 일반적으로 장비, 인부, 자금, 시간, 저장 공간, 원자재 등을 포함하며, 이러한 자원은 제품이나 서비스를 제공하는데 사용된다. 선형계획법은 프로젝트 관리자가 최적의 자원할당 및 비용추정과 관련하여 계획하고, 의사결정을 수행할 때 사용되는 수치적 모델링 기술이다.

선형계획법은 모든 선형제약조건을 동시에 만족시키면서 선형 목적함수(objective function)를 최대(maximization) 또는 최소(minimization)화하는 결정변수(decision variables)들의 값을 찾아내는 방식이다. 이렇게 찾아진 결정변수의 값을 최적해(optimal solution)라고 한다.

선형계획문제의 일반적인 구조는 다음과 같다.

최대화 (목적함수)

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \cdots + C_nX_n$$

제약조건

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \cdots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

⋮

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \cdots + a_{mn}X_n \leq b_m$$

$$X_1 \geq 0, X_2 \geq 0, \cdots, X_n \geq 0$$

위의 모형을 간략하게 표시하면 다음과 같다.

최대화 (목적함수)

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

일반제약조건

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i$$

비음제약조건

$$X_j \geq 0$$

X_j : 결정변수

C_j : 기여계수

a_{ij} : 기술계수

b_i : 우항

모형에서 보듯이 모든 선형계획법의 문제는 다음 세 가지의 요소로 구성되어 있다.

(1) 선형의 목적함수

모든 선형계획법의 문제는 관리자가 달성하고자 하는 목적이 무엇이나에 따라 최대화 또는 최소화문제로 나누어진다. 목적함수는 결정변수와 고려중인 하나의 목적과의 관계를 나타내는 수학적 표현으로 일반적으로 이익(benefit), 비용(cost) 등이 목적으로 사용된다. 목적함수를 구성하는 결정변수의 계수를 기여계수라고 하는데 이는 직접적으로 목적함수 값에 기여하는 정도를 나타낸다.

(2) 일반제약조건

만약 최대화문제에서 제약조건식이 없다면 결정변수의 값이 증가함에 따라 목적함수의 값은 무한히 증가할 것이다. 그러나 제한된 자원을 나타내는 제약조건에 의하여 목적함수의 값은 제약을 받게 된다.

제약조건식의 한정된 자원을 나타내는 우변값을 우항(right hand side)이라고 하고 제약조건식에 있는 결정변수의 계수값을 기술계수라고 한다.

(3) 비음(non-negativity) 제약조건

이는 선형계획문제의 최적해로서 얻는 결정변수의 값이 음수이어서는 안된다는 것을 의미한다.

2) 선형계획법(LP)을 통한 문제해결을 위한 요구조건

선형계획법은 군, 산업, 금융, 마케팅, 회계 및 농업분야의 문제와 같이 광범위하게 적용되어 왔으며, 여러 응용분야로 나누어져 있어도 모든 선형계획법의 문제에는 일반적인 네 가지 특성이 있다.

(1) 모든 문제는 이익 및 비용과 같은 수량(quantity)에 대한 최대값 및 최소값을

구한다. 선형계획법 문제에서 목적함수(objective function)로써 이 특징을 나타낸다. 일반적인 건설프로젝트의 주요 목적은 소요시간의 최소화 문제와 소요비용의 최소화문제라고 할 수 있다.

- (2) 선형계획법의 일반적인 두 번째 특징은 목적을 이루고자 할 때 현실적으로 발생하는 제한사항 및 제약조건이 존재한다는 것이다. 예를 들자면 제조회사 내에서 얼마나 많은 제품을 생산할지를 결정하는 것은 이용할 수 있는 인력 및 장비에 의해서 제한을 받게 된다.
- (3) 선택해야 할 여러 의사결정 대안이 있으며, 여러 대안을 통해 수행해야 한다는 것이다. 예를 들자면 어떤 회사가 세 가지 다른 제품을 생산한다고 가정하고, 관리자가 한정된 생산자원으로 그것들을 어떻게 할당할 것인지 선형계획법을 사용한다면 여러 대안이 있을 것이다. 첫 제품에만 모든 생산능력을 사용할 수도 있고, 각각의 제품에 같은 양을 생산할 수도 있을 것이다. 또한 각각의 제품에 다른 비율로 자원을 할당할 수도 있을 것이다.
- (4) 선형계획법을 이용한 문제의 해결은 목적함수와 제약조건을 선형방정식 또는 부등식으로 나타내야 한다. 선형의 수학적 관계는 목적함수 및 제약조건식에 사용되는 모든 항은 1차식이라는 것이다.

3) 선형계획법의 기본가정(Basic Assumptions of LP)

기술적으로 인지해야하는 선형계획법의 문제에 관한 추가적인 5가지 요구조건이 있다.

- (1) 확실한 조건이 존재한다고 가정한다. 다시 말해서 목적함수나 제약조건의 수치는 확실히 알고 있는 값이며, 문제해결과정 동안에는 변동이 없다는 것이다.
- (2) 목적함수와 제약조건식은 비례성(proportionality)이 있다. 이것은 하나의 제품에 하나의 특정자원이 3시간이 소요된다면, 10개의 제품에는 특정자원에 30시간이 소요된다는 것이다.
- (3) 세 번째 기술적인 가정은 부가성(additivity)이 있다. 이것은 모든 활동들은 개별적 활동의 합과 같다는 것이다.
- (4) 네 번째 기술적인 가정은 가분성(divisibility)이 있다는 것으로 분리될 수 있

으며 수학적으로 분수를 가질 수 있다는 의미이다.

- (5) 마지막으로 모든 해(solution)나 변수(variable)는 비음수(non-negative)라는 가정이다. 물리적 양에 대한 음의 값은 불가능하며, 예를 들자면 컴퓨터 부품의 음의 수를 생산할 수 없는 것과 같다.

4) 선형계획법의 적용방법

선형계획법을 이용한 문제해결 방법은 크게 도식적 방법, 심플렉스법, 컴퓨터를 이용한 방법으로 구분할 수 있으며, 도식적 방법은 결정변수의 수가 2개인 경우에만 이용하는 반면, 심플렉스법이나 컴퓨터를 이용하는 방법은 결정변수의 수에 제한을 받지 않는다. 도식적 방법은 간단한 선형계획모델의 해에 이용되지만 이는 모델의 해가 결정되는 과정을 시각적으로 관찰할 수 있을 뿐만 아니라 선형계획법의 기본적인 개념이나 심플렉스법을 이해하는데 유용하다.

많은 선형계획법을 이용한 문제해결은 수익과 같은 최대화 문제를 다루기도 하고 소요비용과 같은 최소화문제를 포함한다. 예를 들자면 식당주는 총 종업원의 수를 최소화하면서 직원구성원의 요구조건에 부합되는 작업일정을 개발하기를 원할 것이고, 건설 프로젝트의 경우에는 각각의 자원에 소요되는 비용을 최소화하면서, 일정을 목표공기이내에 끝내길 원할 것이다.

최소화 문제는 도식적 방법으로 최소비용이 발생하는 변수 X_1 과 X_2 를 찾아야 하며, 수행절차는 먼저 유효영역(feasible solution region)을 구성하고, 교차점 방식(corner point method)과 등가비용선 방식(iso cost line approach)을 이용해서 문제의 해를 찾는 것이다.

선형계획법을 공식화하기 위해서는 우선 변수를 정의하고, 최대 및 최소의 문제를 해결하기 위한 목적함수를 정의한다. 그리고 각각의 변수에 대한 제약조건을 정의하여 도식화하면 그림 13과 같다.

목적함수

$$\text{최소비용} = 2X_1 + 3X_2$$

제약조건

$$5X_1 + 10X_2 \geq 90 \quad (\text{성분 A의 제약조건})$$

$$4X_1 + 3X_2 \geq 48 \quad (\text{성분 B의 제약조건})$$

$$0.5X_1 \geq 1.5 \quad (\text{성분 C의 제약조건})$$

$$X_1 \geq 0 \quad (\text{비음수성 제약조건})$$

$$X_2 \geq 0$$

(비음수성 제약조건)

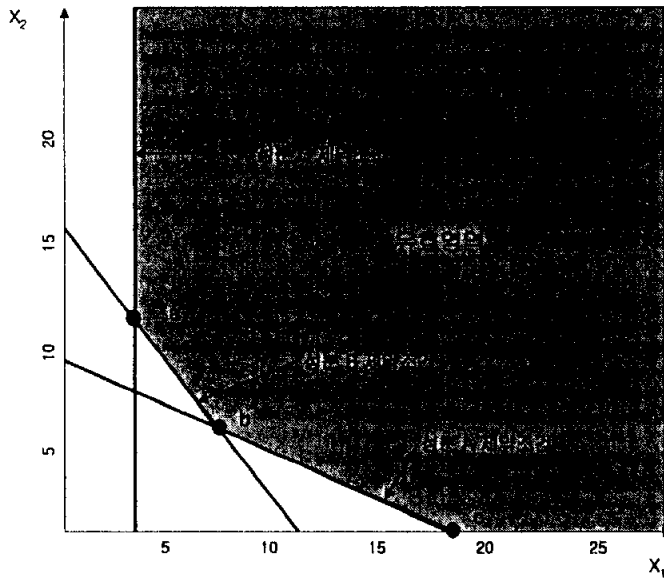


그림 13. 선형계획법을 이용한 유효영역의 구성

각 제약조건의 도식화를 통해서 유효영역을 구했다면, 최소비용을 구하기 위해 각각의 교차점의 값을 구한다. 각 교차점 a, b, c에 발생하는 변수(X_1 , X_2) 및 비용은 교차하는 2개의 제약조건식의 조합으로 구할 수 있다.

계산을 수행해 보면, 교차점 b에서 $X_1=8.4$, $X_2=4.8$ 로 최소비용 31.2가 발생하는 것을 알 수 있다.

5) 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

선형계획문제의 최적 해는 고정된 기술, 가격, 자원수준 등 모델의 매개변수가 일정함을 전제한다. 이러한 가정은 확실성, 정태적 조건, 완전한 지식을 의미한다. 그러나 이러한 매개변수들은 실제로 예측치이기 때문에 시간이 흐름에 따라 변경할 수 있고 따라서 모델을 작성할 때와 상이할 수가 있다.

따라서 최적해가 모델의 데이터 및 매개변수의 변화에 어느 정도 민감한가를 결정할 필요가 있다. 민감도분석이란 모델의 여러 가지 계수가 변할 때 최적해와 목적함수의 값이 어떻게 영향을 받는지를 연구하는 분야이다. 민감도분석은 최적해가 구해진 이후에 시작하므로 사후분석(post-optimality analysis)이라고 한다. 최적 해에 영향을 미치는 변화는 다음 다섯 가지로 구분할 수 있다.

- 목적함수 계수의 변화
- 가용자원 또는 생산요구량 수준의 변화
- 기술계수의 변화
- 새로운 제약조건식의 추가
- 새로운 변수의 추가

(1) 목적함수 계수의 변동

현실적인 문제에서는 목적함수상의 이익이나 비용의 분배비율은 기간에 따라 변동하게 된다. 이것은 그래프상에 제약조건식에 의해서 형성되는 유효영역은 정확하게 변동이 없이 같을 지라도, 비용선(cost line) 및 수익선(profit line)의 경사가 변동하게 된다. 그림 14는 이익의 분배비율의 변동에 따른 수익선의 변동을 나타내고 있다.

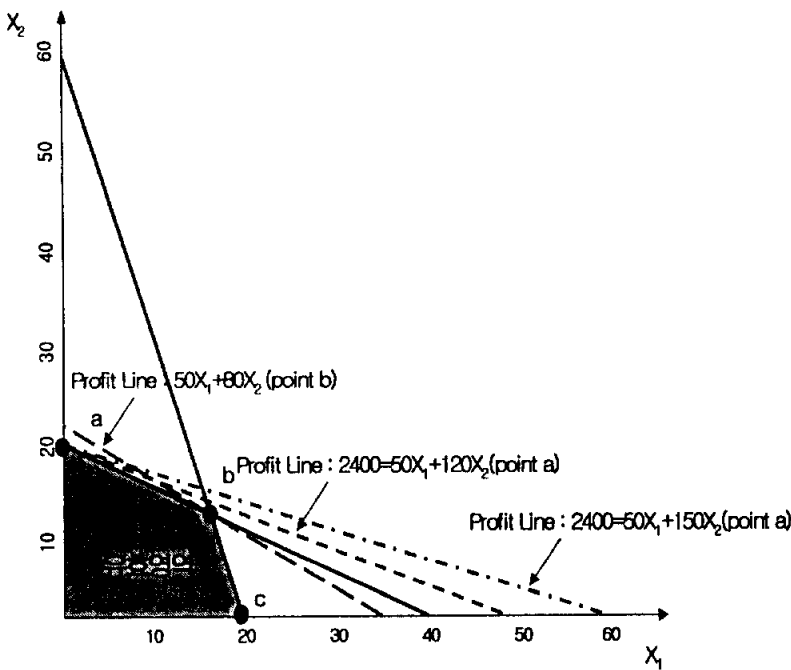


그림 14. 목적함수 계수의 변동에 따른 민감도

(2) 기술계수의 변동(Change in the Technological Coefficients)

기술계수의 변동은 기술적 상황의 변동을 반영한 것이다. 만일 필요한 자원이 많아지거나 작아진다면, 제약조건 방정식 상의 계수가 변동이 발생하게 된다. 이러한 변동은 목적함수에는 아무런 영향을 주지 못하지만, 제약조건식의 변동에

의해서 유효영역의 모양이 변동하게 되고, 그에 따라 최적의 수익과 비용도 변동하게 된다.

그림 15는 제약조건식의 계수의 변동에 따른 유효영역의 변동을 볼 수 있다.

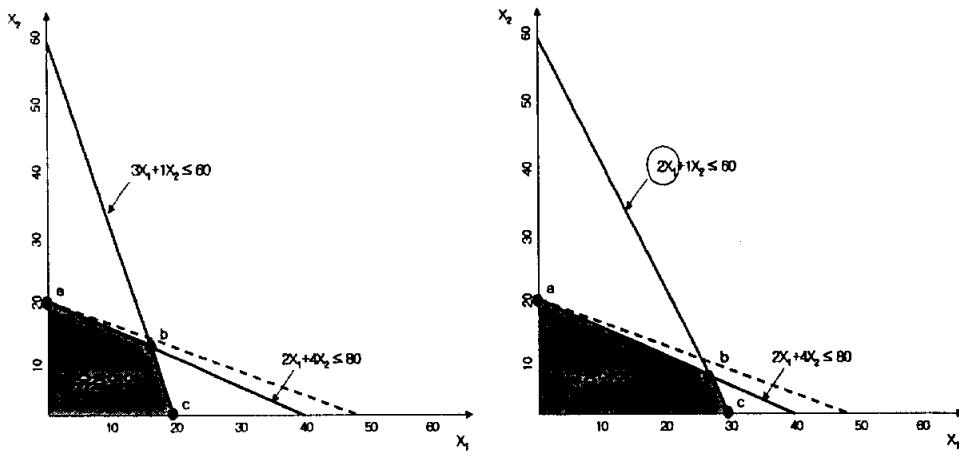


그림 15. 기술계수 변동에 따른 민감도

(3) 자원 및 우항(RHS:Right Hand Side)의 변동

선형계획법의 제약조건식에서 우변에 있는 값들은 회사가 이용할 수 있는 자원을 나타내는 것으로 생각할 수 있으며, 이러한 자원은 이용할 수 있는 노동시간 또는 장비의 소요시간 및 생산 원자재 와 비용으로 나타낼 수 있다. 동적인 시장 조건 하에서는 이러한 자원상의 변동에 따른 민감도를 파악하는 것을 아주 중요하다.

오른 편에 있는 값은 유효영역 및 최적 해의 변동을 가져온다. 그림 16은 각 주마다 이용할 수 있는 전기공의 시간의 변동에 따른 유효영역과 최적 해의 변화를 보여주고 있다.

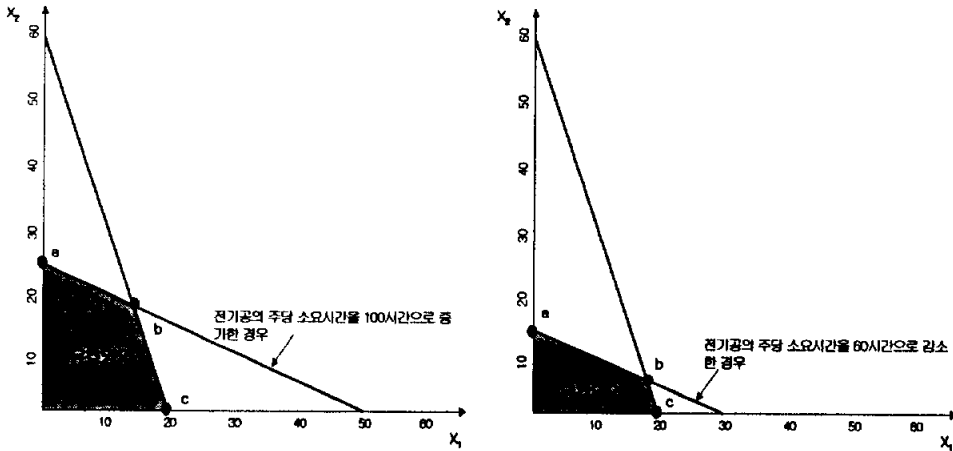


그림 16. 자원의 변동에 따른 민감도

6) 네트워크 상에 선형계획법의 적용

선형계획법은 비용이나 수익에 대한 최소값 및 최대값을 구하는 경우에 자주 사용되는 의사결정기법으로 건설 프로젝트의 영역에도 적용이 가능하다. 프로젝트 계획단계에서 업무의 범위를 정의하고, 각각의 활동에 대한 소요공기와 소요비용을 추정한다면, 최적의 소요공기를 추정하기 위해서 소요비용의 최소화문제를 선형계획법으로 적용이 가능하다.

프로젝트 계획단계에서 소요비용의 최소화문제를 해결하기 위해서 선형계획법을 적용하는 수행절차는 다음과 같다.

- (1) 프로젝트의 업무범위 및 업무관계를 정의한다.
- (2) 프로젝트의 여러 활동에 대한 소요공기 및 소요비용을 추정한다.
- (3) 프로젝트에 대한 네트워크 다이어그램을 구성한다.
- (4) 각각의 활동에 대한 단축가능일수와 공기단축에 따른 추가소요비용을 추정한다.
- (5) 최소의 소요비용으로 프로젝트 목표일정이내에 완료할 수 있도록 선형계획법을 적용한다.
 - ① 활동변수와 이벤트변수를 정의한다.
 - ② 일정단축에 따른 제약조건을 정의한다.
 - ③ 목표완료일정에 대한 제약조건을 정의한다.
 - ④ 네트워크 구성에 관한 제약조건을 정의한다.
 - ⑤ 프로젝트 전체 소요비용의 최소화를 위한 목적함수를 정의한다.
 - ⑥ 최소의 프로젝트 전체 소요비용의 산정

3. 사례연구

3.1 사례 프로젝트 개요

본 사례는 부산지하철 ○호선 ○○○공구 토목공사로써 본선구간공사에 대한 네트워크를 구성하고 최적의 소요공기 및 소요비용을 산정해 보고자 한다. 표 4는 본선구간에 대한 사례의 세부개요를 나타내고 있다.

표 4. 본선구간 세부개요

본선구간		
본선구간		
위치	덕천R ~ 구포 배수펌프장 앞	덕천교차로 구포 성심병원 앞
연장	L=177.0M	L=32.80M
규격	H=7.5M, B=20.0M	H=12.9M, B=24.3M
설계수량	파일박기 : 306본 차 수 공 : 11,927M 토공굴착 : 53,584M³ 구 조 물 : 7,957M³ 1,896TON 되메우기 : 36,636M³ 포 장 : 39.64a	파일박기 : 76본 차 수 공 : 3,057M 토공굴착 : 17,632M³ 구 조 물 : 3,220M³ 592TON 되메우기 : 12,113M³ 포 장 : 7.60a

3.2 사례분석절차

본 사례연구의 수행절차는 다음과 같다.

- (1) 업무범위의 정의 및 소요공기추정
- (2) 네트워크 다이어그램의 구성
- (3) 공기단축 가능일수 및 비용추정
- (4) 몬테카를로 시뮬레이션의 적용
- (5) 선형계획법의 적용
 - 변수 정의
 - 제약조건 정의
 - 목적함수 정의
 - 실행
- (6) 최적공기 및 최적소요비용추정
- (7) 민감도 분석

그림 17은 사례연구의 세부적인 수행절차를 나타내고 있다.

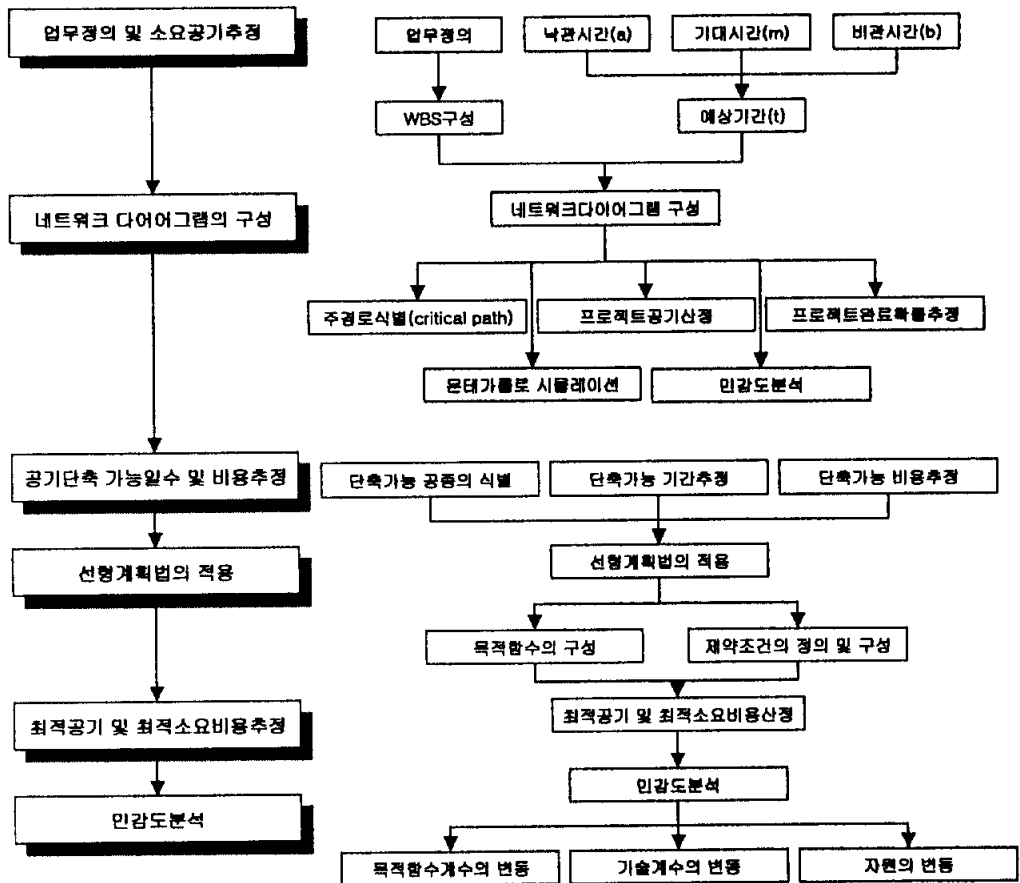


그림 17. 사례연구의 수행절차

3.3 소요공기 및 소요비용의 추정

본선구간에는 본체와 환기구#3업무로 분류되며, 하위의 18개 실행업무로 정의된다. 각각의 소요공기를 산정하기 위해서 PERT기법을 이용한 3점 견적법을 적용하였으며, 표 5는 사례공사의 예상기간(t)과 분산을 산정한 값이다.

표 5. 사례공사의 3점견적법에 의한 예상기간의 계산 (단위:일)

WBS	공종	예상시간(t)	낙관시간(a)	가정상기(m)	비관시간(b)	분산
A.1	본체					
A.1.1	복공설치 및 차수공	334	290	334	378	215.11
A.1.2	토공굴착	275	245	274	284	42.25
A.1.3	본선구조물	365	336	365	374	40.11
A.1.4	부대시설구조물	153	115	152	164	66.69
A.1.5	버림보설치	245	209	245	251	49.00
A.1.6	가시설해체	488	445	487	497	75.11
A.1.7	측벽되매우기	457	413	457	465	75.11
A.1.8	노체/노상	92	72	91	105	30.25
A.1.9	포장	89	75	89	96	12.25
A.1.10	뒷정리	61	51	60	73	13.44
A.2	환기구#3					
A.2.1	복공설치 및 차수공	334	302	333	343	46.69
A.2.2	토공굴착	304	278	303	309	30.25
A.2.3	구조물(지하1,2,3층)	365	334	364	374	44.44
A.2.4	버림보설치	245	207	244	252	56.25
A.2.5	가시설해체	335	301	335	337	36.00
A.2.6	측벽되매우기	273	236	272	282	58.78
A.2.7	노체/노상	122	98	122	129	26.69
A.2.8	포장	92	71	91	98	20.25

본 사례의 소요비용의 산정은 도급내역서를 통해서 산정하였으며, 프로젝트 전체 소요공기의 단축을 위해서, 각각의 활동에 일정을 단축하는데 소요되는 비용과 단축가능일수를 산정하였다. 그리고 각 활동별 일정단축에 따른 영향정도를 나타내고 비용경사도 산정하였다.

표 6은 사례공사의 소요비용개요를 나타내고 있다.

표 6. 사례공사의 소요비용 개요

(단위:원)

WBS	과목	소요비용	인건단가비용	소요인건수	단가/인건수	비율/가치
A.1	본선구간	3,607,521,031	4,366,726,809			
A.1.1	복공설치 및 치수공	1,382,457,600	1,847,048,720	334	61	7,616,215
A.1.2	토공굴착	542,497,798	597,310,463	275	63	870,042
A.1.3	본선구조물	1,124,584,390	1,410,298,780	365	61	4,683,842
A.1.4	부대시설구조물	37,937,520	58,897,116	153	61	343,600
A.1.5	버팀보설치	65,671,488	74,121,246	245	33	258,053
A.1.6	가시설해체	249,744,424	265,937,442	488	123	131,651
A.1.7	측벽되매우기	40,064,160	43,355,160	457	122	26,975
A.1.8	노채/노상	22,169,028	22,859,236	92	31	22,285
A.1.9	포장	37,606,863	40,925,126	89	30	110,609
A.1.10	덧정리	4,787,760	5,975,520	61	30	39,592
A.2	환기구#3	1,155,990,600	1,368,693,022			
A.2.1	복공설치 및 치수공	335,541,140	430,508,520	334	61	1,556,842
A.2.2	토공굴착	228,863,636	254,685,836	304	29	890,421
A.2.3	구조물(지하1,2,3층)	436,321,740	521,107,480	365	61	1,389,930
A.2.4	버팀보설치	35,208,928	37,815,296	245	3	868,789
A.2.5	가시설해체	89,604,500	93,039,378	335	62	55,401
A.2.6	측벽되매우기	18,485,880	18,724,940	273	30	7,969
A.2.7	노채/노상	4,754,580	4,965,180	122	30	7,020
A.2.8	포장	7,210,196	7,846,392	92	31	20,522

3.4 네트워크의 구성

프로젝트 전체의 업무범위와 소요공기 및 소요비용이 산정되었으므로, 다음 단계는 네트워크 다이어그램의 구성이다. 각각의 활동에 대한 명확한 선후행 관계를 정의하였으며, 그림 18은 사례공사의 네트워크를 구성한 것이다.

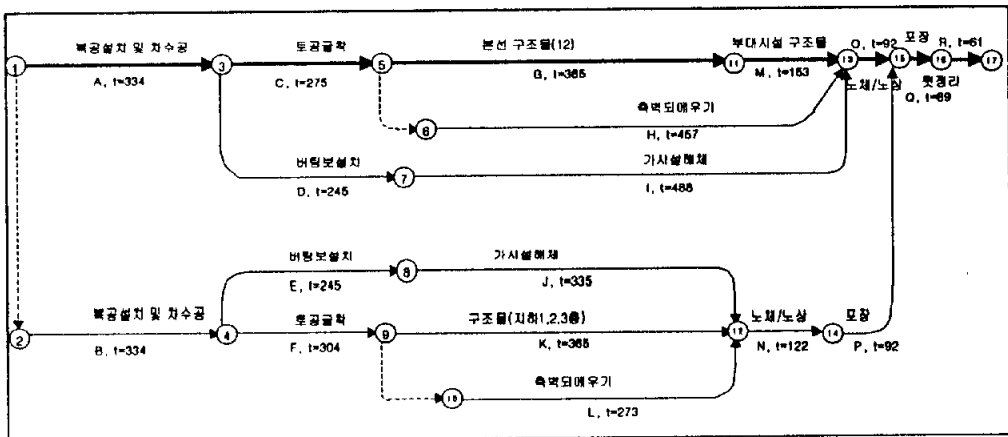


그림 18. 사례공사의 네트워크 다이어그램의 구성

그림 19는 공정관리 소프트웨어(MS PROJECT)를 통해서 사례공사의 공정표를 구성한 것으로서, 전체 프로젝트 소요공기는 1369일로 나타났으며, 하위업무인 본체구간은 1369일, 환기구 #3은 1217일이 소요되는 것으로 나타났다.

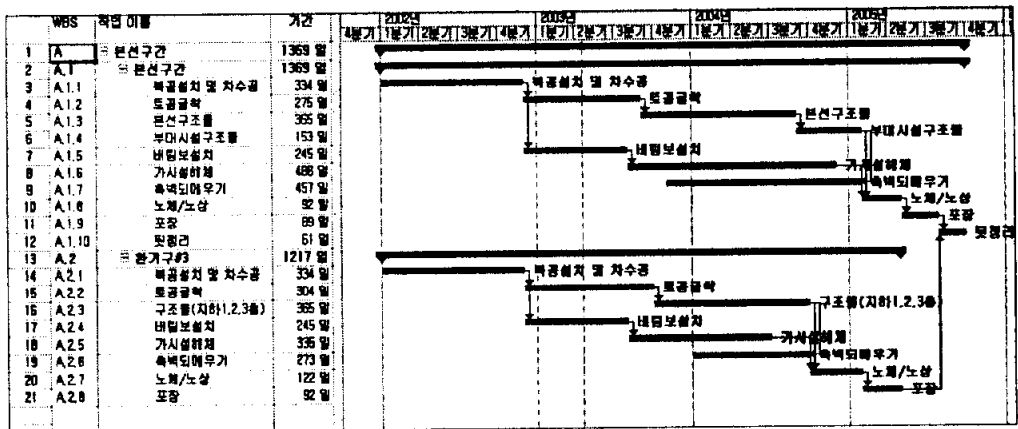


그림 19. 사례공사의 공정표 구성

3.5 주 경로 분석

사례공사의 네트워크 다이어그램 및 공정표가 구성을 통해서 프로젝트 전체 소요공기와 각각의 활동 간의 선후행 관계를 명확하게 정의하였다. 다음 단계는 전체 프로젝트에 대한 주 경로를 분석하는 것이다.

그림 20은 사례공사의 주 경로를 나타낸 것으로 본체구간의 하위활동인 복공 설치 및 차수공, 토공굴착, 본선구조물, 부대시설구조물, 노체/노상, 포장, 뒤편리

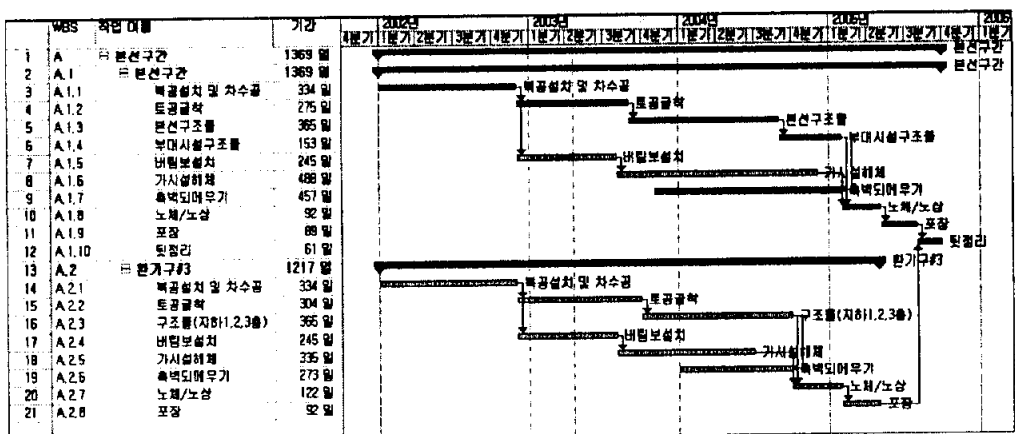


그림 20. 사례공사의 요주의 경로의 식별

3.6 기간별 소요비용의 산정

네트워크 다이어그램을 통해서 명확한 활동 간의 선후행관계가 정의하였다면, 전체 활동에 대한 조기일정과 만기일정을 구성할 수 있으며, 각 일정에 따른 소요비용을 산정할 수 있다. 전체프로젝트 조기일정과 만기일정의 범위를 벗어나서는 안되며, 범위 내에서 활동이 원활하게 수행될 수 있도록 조정되어야 할 것이다.

표 7~10은 사례공사의 조기일정과 만기일정에 따른 기간별 소요비용을 산정한 것이다.

표 7. 사례공사의 기간별 소요비용산정 (조기일정, 단위:원)

WBS	공종	2002 1분기	2분기	3분기	4분기	2003 1분기	2분기
A.1	본선구간	372,518,518	376,657,612	380,796,707	382,949,624	301,668,954	203,900,721
A.1.1	복공설치 및 차수공	372,518,518	376,657,612	380,796,707	252,484,773		
A.1.2	토공굴착				81,154,298	177,544,735	179,517,455
A.1.3	본선구조물						
A.1.4	부대시설구조물						
A.1.5	버림보설치				8,309,453	24,124,219	24,392,266
A.1.6	가시설해체						
A.1.7	측벽되매우기						
A.1.8	노체/노상						
A.1.9	포장						
A.1.10	덧정리						
A.2	환기구#3	90,415,274	91,419,889	92,424,503	89,074,539	80,689,572	81,589,123
A.2.1	복공설치 및 차수공	90,415,274	91,419,889	92,424,503	81,281,484		
A.2.2	토공굴착				23,338,087	67,755,679	68,508,520
A.2.3	구조물(지하1,2,3층)						
A.2.4	버림보설치				4,455,008	12,933,893	13,077,803
A.2.5	가시설해체						
A.2.6	측벽되매우기						
A.2.7	노체/노상						
A.2.8	포장						

표 8. 사례공사의 기간별 소요비용산정 (조기일정, 단위:원)

3분기	4분기	2004 1분기	2분기	3분기	4분기	2005 1분기	2분기	3분기
262,671,912	335,799,918	334,924,794	334,924,794	253,612,423	83,119,136	24,621,482	32,459,778	17,886,779
124,281,315								
89,350,541	283,456,887	280,375,834	280,375,834	191,025,293				
8,845,547				7,438,730	22,812,107	7,686,688		
30,194,510	47,082,965	46,571,194	46,571,194	47,082,965	32,241,596			
	5,260,066	7,977,766	7,977,766	8,065,434	8,065,434	2,717,701		
						14,217,093	7,951,933	
							24,507,844	13,099,020
								4,787,758
69,784,877	134,584,783	139,283,866	139,283,866	115,517,466	3,585,424	8,910,661	2,429,522	
69,261,361								
	109,976,984	108,781,582	108,781,582	108,781,582				
4,742,427								
15,781,089	24,607,799	24,340,323	24,340,323	534,952				
		6,161,959	6,161,959	6,161,959				
				38,972	3,585,424	1,130,188		
						4,780,673	2,429,522	

표 9. 사례공사의 기간별 소요비용산정

(만기일정, 단위:원)

WBS	공종	2002 - 1분기	2분기	3분기	4분기	2003 - 1분기	2분기
A.1	본선구간	372,518,518	376,657,612	380,796,707	313,639,071	193,596,596	203,909,721
A.1.1	복공설치 및 차수공	372,518,518	376,657,612	380,796,707	252,484,773		
A.1.2	토공굴착				81,164,298	177,544,735	179,517,465
A.1.3	본선구조물						
A.1.4	부대시설구조물						
A.1.5	버림보설치					16,350,860	24,392,266
A.1.6	가시설해체						
A.1.7	측벽되메우기						
A.1.8	노체/노상						
A.1.9	포장						
A.1.10	덧장리						
A.2	환기구#3		90,415,274	92,424,503	92,424,503	82,962,076	73,107,238
A.2.1	복공설치 및 차수공		90,415,274	92,424,503	92,424,503	60,276,850	
A.2.2	토공굴착					22,585,226	68,508,520
A.2.3	구조물(지하1,2,3층)						
A.2.4	버림보설치						4,598,717
A.2.5	가시설해체						
A.2.6	측벽되메우기						
A.2.7	노체/노상						
A.2.8	포장						

표 10. 사례공사의 기간별 소요비용산정

(만기일정, 단위:원)

3분기	4분기	2004 - 1분기	2분기	3분기	4분기	2005 - 1분기	2분기	3분기
238,292,168	335,566,193	334,924,794	334,924,794	283,612,423	77,960,506	40,486,394	82,459,778	17,896,779
124,281,315								
89,350,541	283,456,887	280,375,834	280,375,834	191,025,293				
				7,438,730	22,812,107	7,686,688		
24,660,313	268,047							
	46,571,194	46,571,194	46,571,194	47,082,965	47,082,965	15,864,912		
	5,260,066	7,977,766	7,977,766	8,065,434	8,065,434	2,717,701		
						14,217,093	7,951,933	
							24,507,844	13,099,020
								4,787,758
82,482,674	82,925,235	129,532,687	139,283,865	140,614,457	137,531,217	9,507,480	5,949,833	2,429,522
69,261,361	68,508,520							
	1,195,402	108,781,582	108,781,582	109,976,984	107,586,180			
13,221,313	13,221,313	4,187,588						
		18,583,517	24,340,323	24,607,799	24,072,847			
			6,161,959	6,229,673	6,094,246			
					77,944			
						3,507,480	1,189,180	
							4,780,873	2,429,522

그림 21과 그림 22은 조기일정과 만기일정에 따른 누적 비용-일정곡선(S-curve)를 나타낸 것이다. 프로젝트 중반시점에서 각 일정에 따른 비용편차가 상대적으로 크게 남을 알 수 있으며, 중반시점에 여유공기(float)에 대한 효율적인 조정을 통해서 최적의 공정관리를 수행할 수 있을 것이다.

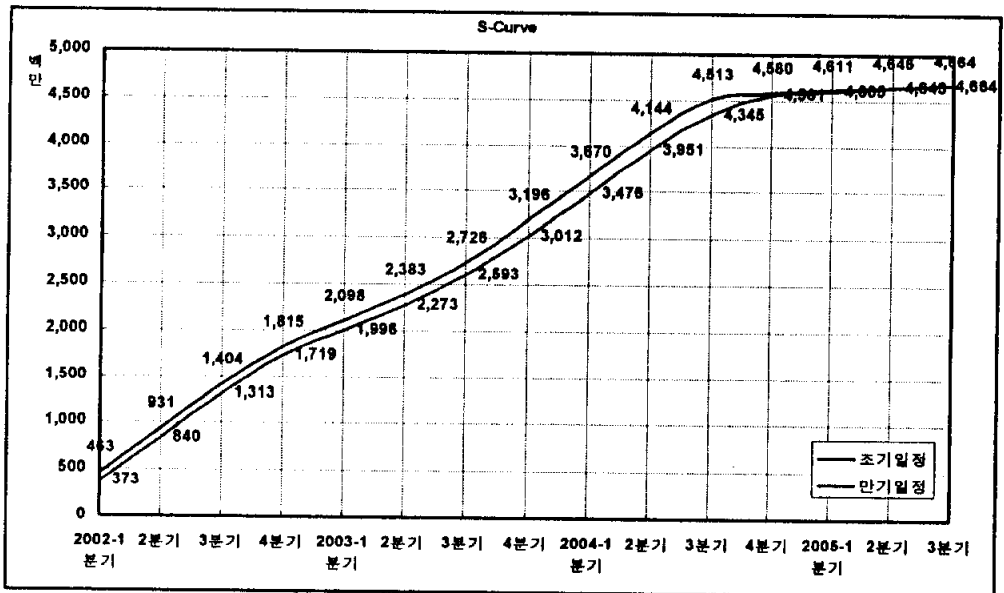


그림 21. 조기일정과 만기일정에 따른 S-Curve(기간별 소요비용)

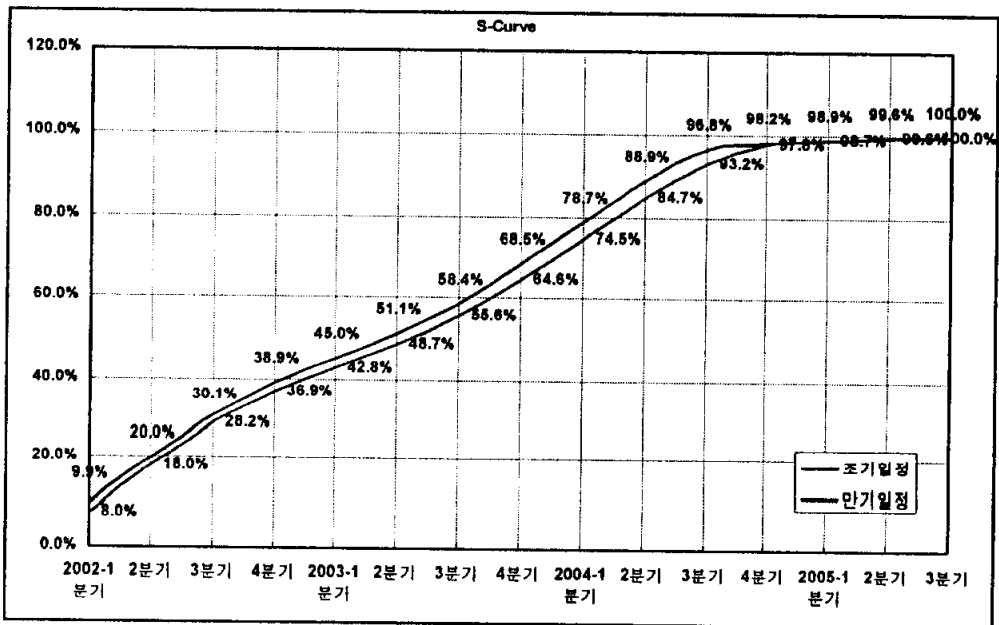


그림 22. 조기일정과 만기일정에 따른 S-Curve(기간별 소요비용 비율)

4. 고찰

4.1 몬테카를로 시뮬레이션의 적용

사례공사의 네트워크 상에는 6가지 경로가 있으며, 각 경로에 대한 예상기간과 완료확률을 산정하였으며 표 11과 같다. 그래서 모든 경로가 프로젝트의 주 경로상의 소요공기인 1369일 이전에 완료할 수 있는 전체 프로젝트의 완료확률은 81.59%로 나타났다. 그리고 B-F-K-N-P-Q-R경로는 예상기간이 1367일로써 주 경로의 소요공기인 1369일 가장 근접한 경우로써, 주 경로가 될 가능성이 가장 큰 경로로 나타났다.

표 11. 여러 경로에 따른 전체공정의 완료확률 (단위:일)

경로	예상기간	최악기간	가능기간	최악기간	분산	표준편차	Z-value	완료확률
A-C-G-M-O-Q-R	1369	1250	1364	1535	57.82	7.60	0.00	50.00%
A-C-H-O-Q-R	1308	1193	1304	1441	61.19	37.96	1.61	94.60%
A-D-I-O-Q-R	1309	1201	1301	1453	62.43	38.12	1.57	94.23%
B-E-J-N-P-Q-R	1278	1175	1274	1407	32.60	37.51	2.43	99.24%
B-F-K-N-P-Q-R	1367	1283	1362	1481	24.30	38.48	0.05	52.07%
B-F-L-N-P-Q-R	1275	1180	1270	1398	30.33	37.39	2.51	99.40%
전체공정의 완료확률								81.59%

여러 경로에 대한 완료확률을 분석한 결과, 주 경로와 주 경로에 가장 근접한 경로에 대한 세부적인 분석이 요구된다. 표 12와 표 13은 주 경로와 주 경로에 가장 근접한 경로에 대한 예상기간과 분산을 나타내고 있다.

주 경로의 예상기간은 1369일이며, 분산은 57.82로 나타났으며, 주 경로에 가장 근접한 경로는 1367일이며, 분산은 24.30으로 나타났다.

표 12. 주 경로의 예상기간 및 분산 (단위:일)

WBS	공종	활동	예상기간 (t)	최악기간 (a)	예상기간, 기간 (m)	최악기간 (b)	분산
A.1.1	복공설치 및 차수공	A	334	290	334	378	215.11
A.1.2	토공굴착	C	275	264	272	298	32.11
A.1.3	본선구조물	G	365	356	365	394	40.11
A.1.4	부대시설구조물	M	153	136	151	180	53.78
A.1.8	노책/노상	O	92	75	92	110	34.03
A.1.9	포장	Q	89	82	89	103	12.25
A.1.10	빗정리	R	61	47	61	72	17.36
합계			1369	1250	1364	1535	57.82

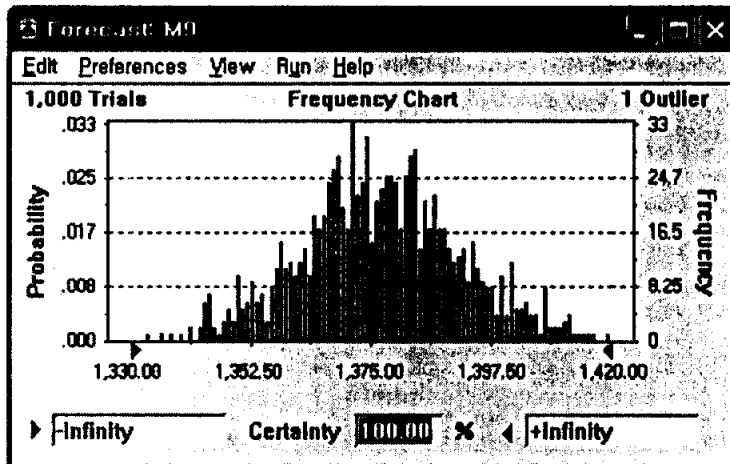


그림 24. 주 경로에 가장 근접한 경로의 몬테카를로 시뮬레이션 적용

주 경로와 주 경로에 가장 근접한 경로에 대한 완료확률을 분석한 결과, 표 14와 그림 25와 같이 나타났다. 3점 견적법에 의해 추정된 주경로에 대한 프로젝트 소요공기가 1369일로 나타났으나, 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 현실적 값을 추정한 결과 1385일로 나타났다. 이는 3점 견적법의 추정을 통한 전체 프로젝트 소요공기가 비교적 낙관적으로 추정되었음을 알 수 있다. 그리고 주경로와 근접 경로의 차가 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산정한 결과, 9일의 편차가 있으며 이는 3점 견적법에 의한 추정시 2일 보다 크게 벌어진 것을 알 수 있다.

표 14. 프로젝트 완료확률에 따른 프로젝트 소요공기 (단위:일)

Percentile	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
주경로	1312	1353	1364	1372	1378	1385	1390	1397	1404	1415	1460
근접경로	1332	1357	1364	1369	1372	1376	1380	1384	1389	1396	1420

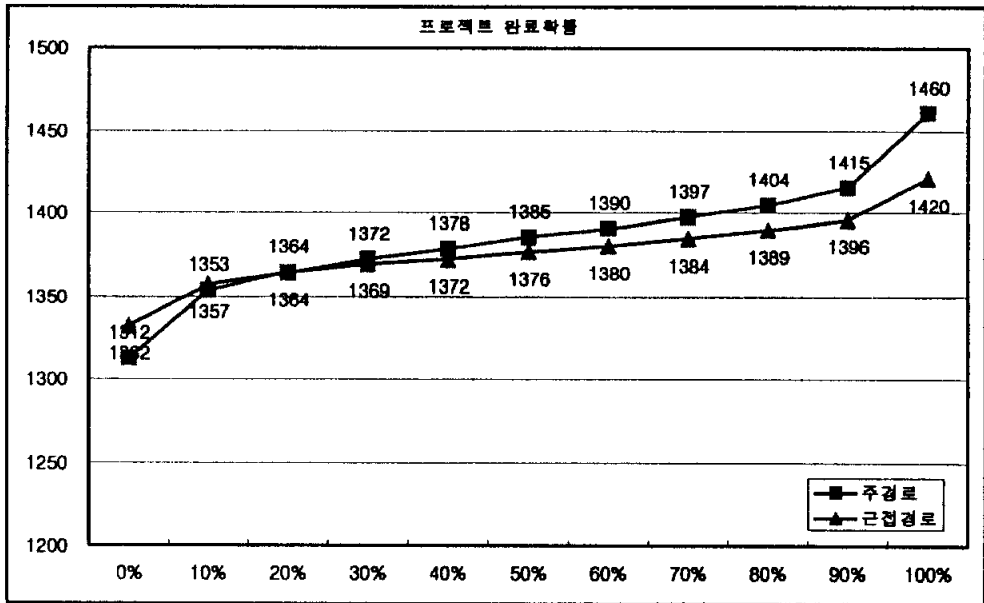


그림 25. 프로젝트 완료확률에 따른 프로젝트 소요공기

4.2 선형계획법의 적용

프로젝트에 대한 네트워크가 구성되었다면, 최소의 소요비용으로 최적의 소요공기 내에 프로젝트를 완료해야 하는 목표를 가지게 되며, 수십, 수백 개의 활동에 대한 최적의 소요공기 및 소요비용을 산정하기 위해서 선형계획법을 적용하였다. 선형계획법을 적용하기 위해서는 프로젝트의 네트워크 다이어그램에 대한 변수를 정의해야 하며, 각각의 제약조건 및 목적함수를 정의해야 한다.

(1) 변수정의

최소의 비용으로 최적의 소요공기 내에 프로젝트를 완료하기 위해서는 네트워크 다이어그램 상에 표 15와 같은 변수를 정의해야 한다. 변수에는 활동변수와 이벤트변수로 나눌 수 있으며, 활동변수는 각 활동에 대한 단축 가능한 소요시간으로 정의되고, 이벤트 변수는 각 이벤트가 시작되는 시간으로 정의한다.

표 15. 활동변수와 이벤트변수의 정의

활동변수		이벤트변수	
YA	활동 A에 단축가능한 소요기간	X1	이벤트 1이 시작하는 시간
YB	활동 B에 단축가능한 소요기간	X2	이벤트 2이 시작하는 시간
YC	활동 C에 단축가능한 소요기간	X3	이벤트 3이 시작하는 시간
YD	활동 D에 단축가능한 소요기간	X4	이벤트 4이 시작하는 시간
YE	활동 E에 단축가능한 소요기간	X5	이벤트 5이 시작하는 시간
YF	활동 F에 단축가능한 소요기간	X6	이벤트 6이 시작하는 시간
YG	활동 G에 단축가능한 소요기간	X7	이벤트 7이 시작하는 시간
YH	활동 H에 단축가능한 소요기간	X8	이벤트 8이 시작하는 시간
YI	활동 I에 단축가능한 소요기간	X9	이벤트 9이 시작하는 시간
YJ	활동 J에 단축가능한 소요기간	X10	이벤트 10이 시작하는 시간
YK	활동 K에 단축가능한 소요기간	X11	이벤트 11이 시작하는 시간
YL	활동 L에 단축가능한 소요기간	X12	이벤트 12이 시작하는 시간
YM	활동 M에 단축가능한 소요기간	X13	이벤트 13이 시작하는 시간
YN	활동 N에 단축가능한 소요기간	X14	이벤트 14이 시작하는 시간
YO	활동 O에 단축가능한 소요기간	X15	이벤트 15이 시작하는 시간
YP	활동 P에 단축가능한 소요기간	X16	이벤트 16이 시작하는 시간
YQ	활동 Q에 단축가능한 소요기간	X17	이벤트 17이 시작하는 시간
YR	활동 R에 단축가능한 소요기간		

(2) 목적함수정의

본 연구에서의 목적함수는 최소의 일정단축비용의 산정이다. 최소의 일정단축비용은 각각의 활동에 대한 단축가능일수에 각각의 비용경사를 곱한 값들의 합을 말한다. 그래서 변수인 단축가능일수의 최적해를 구해서 최소단축비용을 구하고자 하는 것이다.

표 16. 목적함수의 정의

일정단축가능기간	비용감사	일정단축가능기간+비용감사
YA	7,616,215	7616215*YA
YB	1,556,842	1556842*YB
YC	870,042	870042*YC
YD	256,053	256053*YD
YE	868,789	868789*YE
YF	890,421	890421*YF
YG	4,683,842	4683842*YG
YH	26,975	26975*YH
YI	131,651	131651*YI
YJ	55,401	55401*YJ
YK	1,389,930	1389930*YK
YL	7,969	7969*YL
YM	343,600	343600*YM
YN	7,020	7020*YN
YO	22,265	22265*YO
YP	20,522	20522*YP
YQ	110,609	110609*YQ
YR	39,592	39592*YR
최소 일정단축비용		Σ(일정단축기간*비용감사)

(3) 제약조건정의

제약조건은 일정단축에 관한 제약조건, 프로젝트 목표일정에 관한 제약조건 및 네트워크 구성에 관한 제약조건으로 나누어진다. 일정단축에 관한 제약조건은 각각의 활동에 대한 단축가능일의 제한을 말하며, 목표일정에 관한 제약조건은 전체 프로젝트 소요공기의 제한을 말한다. 또한 네트워크 구성에 관한 제약조건을 각각의 활동 간의 명확한 업무의 선후행관계를 정의하기 위한 제한조건이다.

표 17. 제약조건의 정의

인건비축에 관한 제약조건	프로젝트 목표인건비에 관 한 제약조건	메모리구축에 관한 제약조건
$YA \leq 61$	$X17 \leq 1100$	$X1 = 0$
$YB \leq 61$		$X2 = 0$
$YC \leq 63$		$X3 - 0 + YA \geq 334$
$YD \leq 33$		$X4 - 0 + YB \geq 334$
$YE \leq 3$		$X5 - X3 + YC \geq 275$
$YF \leq 29$		$X6 - X5 + 0 \geq 0$
$YG \leq 61$		$X7 - X3 + YD \geq 245$
$YH \leq 122$		$X8 - X4 + YE \geq 245$
$YI \leq 123$		$X9 - X4 + YF \geq 304$
$YJ \leq 62$		$X10 - X9 + 0 \geq 0$
$YK \leq 61$		$X11 - X5 + YG \geq 365$
$YL \leq 30$		$X12 - X9 + YK \geq 365$
$YM \leq 61$		$X12 - X8 + YJ \geq 335$
$YN \leq 30$		$X12 - X10 + YL \geq 273$
$YO \leq 31$		$X13 - Y11 + YM \geq 153$
$YP \leq 31$		$X13 - X6 + YH \geq 457$
$YQ \leq 30$		$X13 - X7 + YI \geq 488$
$YR \leq 30$		$X14 - X12 + YN \geq 122$
		$X15 - X14 + YP \geq 92$
		$X15 - X13 + YO \geq 92$
		$X16 - X15 + YQ \geq 89$
		$X17 - X16 + YR \geq 61$

(4) 선형계획법의 모델링

35개의 변수와 변수를 포함하는 41개의 제약조건이 구성되었으며, 각각의 변수에 대한 최적해를 산정해서 최적해를 통한 목표값을 찾아야 한다. 그러기 위해서는 선형계획법 상용 소프트웨어(QM for Windows)를 통해서 식을 구성하고, 실행을 해야 한다.

그림 26는 상용 소프트웨어를 통해서 선형계획법의 모델링을 수행한 것이다.

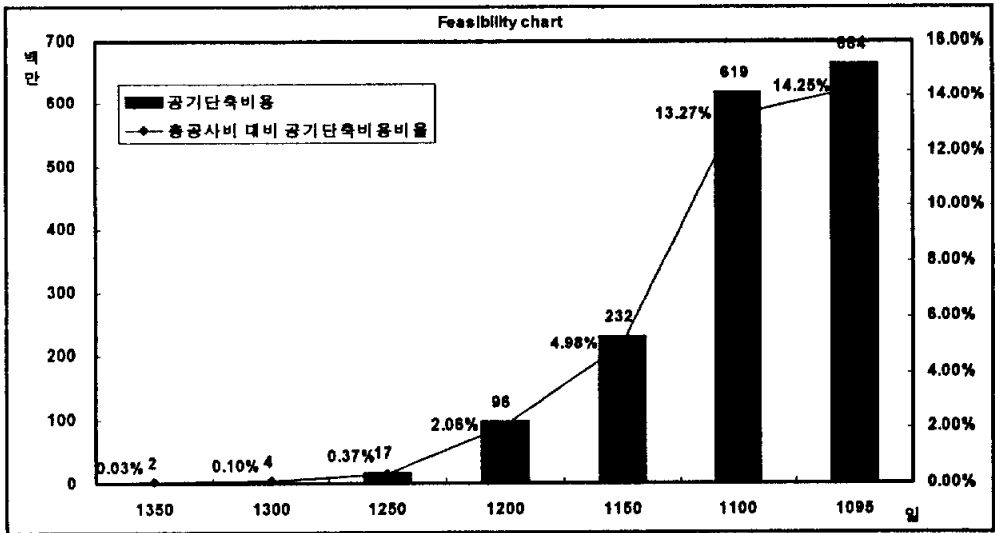


그림 27. 목표공기에 따른 최소공기단축비용

5. 결론

최적의 소요공기와 소요비용을 산정하기 위해서 몬테카를로 시뮬레이션과 선형계획법을 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

몬테카를로 시뮬레이션을 사용함으로써 각각의 활동이 독립적이고, 프로젝트 소요공기에 대해서 정규분포를 따른다는 가정의 제약조건을 해소함으로써 보다 신뢰할 만한 소요공기의 추정이 가능하였으며, 주 경로와 주 경로에 근접한 경로에 신뢰할 만한 일정편차를 계산할 수 있었다.

선형계획법을 통해서 대규모 공사의 수백 개의 공종에 대한 변수 및 제약조건의 정의를 통해 최적의 소요비용 산정이 가능하였으며, 프로젝트 목표소요공기의 변동에 따른 총공사비 대비 단축비용의 비율을 파악하여 최적의 목표공기를 산정할 수 있었다.

사례 프로젝트를 통해서 주 경로와 주 경로에 가장 근접한 경로에 대한 완료확률을 분석한 결과, 3점 견적법에 의해 추정된 주 경로에 대한 프로젝트 소요공기가 1369일로 나타났으나, 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 현실적 값을 추정한 결과 1385일로 나타났다. 이는 3점 견적법의 추정을 통한 전체 프로젝트 소요공기가 비교적 낙관적으로 추정되었음을 알 수 있다. 그리고 주 경로와 근접경로의 차이를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산정한 결과, 9일의 편차가 있으며 이는 3점 견적법에 의한 추정시 2일 보다 크게 벌어진 것을 알 수 있다.

목표공기의 변동에 따른 최소공기단축비용을 분석한 결과, 기존 프로젝트 목표공기(1369일)에 대비하여 1200일로 단축할 경우, 단축에 따른 소요비용은 9600만원으로 나타났으며, 전체 공사비대비 2.06%로 나타났다.

참고문헌

1. 김문한, 건설경영공학, 기문당, 2003
2. 박광태, 김민철, 의사결정, 박영사, 1999
3. 한국건설산업연구원, 건설관리 및 경영, 보성각, 2000
4. Kim, Kyong J. and Gibson, G. E. "A New Approach to Simulation of Heavy Construction Operations." 14th ISARC, Pittsburgh, 1997
5. Barry Render and Ralph M. Stair, Jr, "Quantitative Analysis for Management", Prentice Hall, 2000
6. Do Ba Khang, "Time, cost and quality trade-off in project management: a case study", International Journal of Project Management, 1999
7. Ghaleb Y. Abbasi, "Crashing PERT networks' using mathematical programming", International Journal of Project Management, 2001
8. Kathy Schwalbe, "Information Technology Project Management", Course, 2000
9. Law, A.M., and Kelton, W.D, "Simulation Modeling and Analysis", Second Edition. Mcgraw Hill, Inc., New York, 1991
10. Martin Elkjaer, "Stochastic Budget Simulation", International Journal of Project Management, 2000
11. PMI, "A Guide to the Project Management Body of Knowledge", PMI, 2000
12. Wideman R. Max, "Project and Program Risk Management", PMI, 1992
13. Schruben, R. E, "A graphical simulation modeling program", The Scientific Press., South San Fransco, CA, 1992
14. Shannon, R. E, "System Simulation:The Art and Science", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1975
15. Sevkinaz Gumusoglu, "An analysis method in project management using primal-dual relationships", International Journal of Project Management, 1998

감 사 의 글

옛말에 세월의 흘러감이 물과 같고, 그 빠르기가 화살과 같다고 했습니다. 대학원생활을 시작한지 벌써 2년 6개월이 지나가고 있으니 옛 성현들의 말씀이 더욱더 새롭게 가슴에 와 닿는 것 같습니다. 그 동안 추억도 많았고, 여러 사람들과 소중한 인연도 맺었습니다. 그 추억과 인연들이 제게는 더없이 아름답고 소중한 기억으로 일상의 한 부분을 차지하고 있습니다.

이렇게 아름답고 소중한 추억거리를 만들어 주시고 또한, 한없이 부족한 저에게 아낌없는 배려와 가르침으로 정성껏 지도하여주신 이영대 교수님께 먼저 머리숙여 가슴깊이 감사드리며, 앞으로도 교수님의 가르침을 잊지 않고 명심하여 뒷사람을 공경하고 아랫사람을 따뜻하게 감싸 안을 수 있는 예절바른 사람이 되도록 노력하겠습니다.

그리고 미흡한 제가 논문을 완성할 수 있도록 충고와 지적으로 심사해주신 이종출 교수님, 이상호 교수님께 깊은 감사를 드리며, 대학원 생활을 비롯하여 학문연구를 아낌없이 지도해주신 김종수 교수님, 김상용 교수님, 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 이환우 교수님, 정두희 교수님, 국승규 교수님께도 감사드립니다.

아울러 부족한 저에게 가르침의 길을 마련해 주시고 그 길을 올바르게 걸을 수 있도록 용기와 격려를 아끼지 않으신 경남정보대학 김희규 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

특히, 같이 학업을 하면서 여러모로 도움을 주신 김옥수님, 신정철님께도 감사의 말을 올리며 비록 끝까지 같이하지는 못하였지만 직장관계로 현장을 서울로 발령받아 중도휴학하신 박환배님 그리고 지금 산대 석사과정 2년차인 윤대진님과 시공 및 건설사업관리연구실의 강병욱 후배님, 김영후배님, 천용현 후배님, 박정현 후배님, 김용득 후배님에게도 감사의 뜻을 전합니다.

오늘 감사의 글을 적을 수 있을 때까지 한없는 사랑과 정성으로 아껴주고 배풀어 주신 부모님과 가족들 그리고, 말없이 옆에서 묵묵히 도와준 아내(황주연)의 내조에 감사드리며, 항상 귀가시간이 늦은 아빠의 사랑이 부족하여 같이 있을 땐 곁에서 떨어지지 않는 두딸(김은경, 김은영)에게 미안함과 고마운 마음을 담아 더욱 크고 많은 사랑으로 대하겠다고 약속합니다.

돌이켜 보건데 지난날들은 참으로 즐겁고 재미있었습니다.

다시 한번 배움의 기쁨과 즐거움을 알았고, 학교생활의 재미도 맛보았습니다.

그러나, 즐거웠던 시간도 이제 서서히 막을 내릴 때가 되었습니다.

하지만 오늘의 끝은 곧 내일의 시작으로 이어지듯이 여기에서 멈추지 않고 계속 전진할 수 있도록 힘써 노력하겠습니다.

사람들마다 자신이 소중하게 생각하는 추억이 있듯이 저에게도 아름다운 추억이 있습니다.

지난 대학원생활은 소중한 분들과 함께 할 수 있었던 아름다운 추억을 비롯하여 너무나도 많은 추억을 제게 선사하여 주었습니다.

저에겐 너무나 과분했던 이러한 추억들을 간직할 수 있도록 아낌없는 사랑과 도움을 주신 분들께 미약하나마 다시 한번 감사의 마음을 전합니다.

2003년 7월

김 민 구