

# 시뮬레이션 기반 터널공사계획모델 개발을 통한 생산성 향상 연구 - NATM 공법을 대상으로

## Productivity Improvement by Application of Simulation based Tunneling Operation Planning Model - focused on NATM

이 시 옥\*      우 성 권\*\*  
Lee, Si-wook      Woo, Sung-kwon

### 요 약

건설공사의 초기 단계에서 적절한 공사기간 산정과 공사비용의 예측은 공사 전반의 성패를 좌우하는 중요한 요소로서, 건설공사 수행의 효율성과 생산성 향상을 위하여 합리적인 분석 및 관리가 필요하다. 본 연구는 NATM 공법으로 시공되는 도심지 지하철 터널의 전 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하고 이에 기반하여 공정 계획 및 분석이 가능한 의사결정의 지원 도구를 제시하는 것을 목적으로 한다. 시뮬레이션 모델은 실제 사례 현장의 공정 프로세스 분석과 관련 데이터의 수집을 통해 개발되었으며, 발생 가능한 제한 사항을 반영하고 조건들을 수정 가능하게 하여 본 연구의 대상 사례 현장뿐만 아니라 타 현장에도 적용할 수 있는 일반성을 부여하였다. 본 연구를 통해 개발된 모델은 과학적이고 합리적인 분석을 통한 현실적인 공사 완료 시점을 예측하게 하고 계획 수립과정에서 의사결정을 지원함으로써, 건설사업의 총체적인 생산성과 효율성 향상 효과를 기대할 수 있다.

키워드: 시뮬레이션, NATM, 생산성, 의사결정

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설 사업은 같은 유형의 시설물이라 하더라도 모두가 상이하며 모든 면에서 동일한 사업은 존재하지 않는다는 고유성(uniqueness) 또는 비반복성의 특성을 가지고 있으며, 사업수행 과정에서 많은 불확실성과 다양한 변수들의 발생 가능성을 내포하고 있기 때문에 사업수행시스템의 규격화 및 정형화가 어렵다는 특성을 가지고 있다. 또한 기존 건설공사의 계획 및 수행 과정을 살펴보면, 과학적이고 체계적인 공정 정보의 분석과 이에 근거한 생산 계획이 이루어지기 보다는 아직도 많은 부분이 과

거의 관습과 경험에 근거하여 계획이 수립되고 의사결정이 이루어지는 실정이다.

물론 제조업에서와 같이 생산라인의 분석을 통한 최적의 프로세스를 구현·적용하는 것이 실외에서 수행되는 건설공정에 적용하기가 그리 쉽지 않다는 현실을 인정할 수 밖에 없다. 하지만, 이러한 어려움 속에서도 건설공사현장에서 수행되는 작업 정보와 수집된 데이터의 분석에 기초한 과학적인 분석 및 관리 기법의 적용을 통한 건설공정 수행의 효율성과 생산성을 향상시키고자 하는 노력은 계속되어왔으며, 그러한 대표적인 노력들 중의 하나가 시뮬레이션(simulation) 기법의 적용이다.

시뮬레이션 기법은 사업의 성공 여부에 결정적인 영향을 미치는 많은 불확실성과 가변적 요소들을 선천적으로 포함하며 많은 인력과 장비 등의 물량이 투입됨으로써 막대한 비용과 오랜 수행기간이 요구되는 건설공사의 특성과 잘 부합되는 측면을 가지고 있으며, 그렇기 때문에 시뮬레이션 기법을 적용하게 됨으로써 얻게 되는 효과는 매우 크다고 할 수 있다. 시뮬레이션

\* 일반회원, 인하대학교 토목공학과 대학원, 박사과정,  
leesw@inha.ac.kr

\*\* 종신회원, 인하대학교 토목공학과 조교수, 공학박사(교신서자),  
skwoo@inha.ac.kr

기법은 합리적이고 과학적인 공정계획의 수립을 가능하게 하는 유용한 도구이며, 합리적인 공정계획을 기반으로 “공사비 절감, 공사 기간 단축, 생산성 향상”이라는 중요 성과를 달성할 수 있게 한다. 또한 공사 초기에 공사 완료 시점과 공사 비용의 예측을 가능하게 하여, 건설 사업이 갖는 불확실성에 대한 리스크를 최소화시킬 수 있는 장점 또한 가지고 있다.

건설 프로젝트에 대한 시뮬레이션 기법의 적용은 많은 물량의 작업이 같은 과정의 반복을 통해 수행되는 경우 효과가 더욱 크다. 이러한 이유로 시뮬레이션을 활용한 국내의 연구 중, 반복적인 공정으로 수행되는 터널공사에 시뮬레이션 기법을 적용한 천진용 등(2005), 소병각 등(2008) 등의 연구와, 포장공정에 시뮬레이션을 적용하여 생산성을 분석한 김경주(2000) 등의 연구 등이 진행되었다. 이러한 관점에서, 선형(linear) 공사의 하나로서 몇 가지 단순 공정의 반복이라는 특성을 가지고 있는 터널 공사는 시뮬레이션 기법의 적용에 적합한 사업유형이라 할 수 있다. 터널공사, 그 중에서도 현재 가장 많이 사용되는 공법의 하나인 NATM(New Australian Tunneling Method) 공법은 천공·발파, 버력 처리, 숏크리트(shotcrete), 록볼트(rock bolt)의 개별 공정들이 한 사이클을 구성하며, 터널공사가 완료될 때까지 이 사이클이 반복적으로 진행되기 때문에, 시뮬레이션의 적용에 매우 적합한 공종이라 할 수 있다. 그렇기 때문에 터널공사는 전 공종에 대한 시뮬레이션 모델링과 분석을 수행함으로써 얻게 되는 총체적인 생산성과 효율성의 향상 정도에 대한 효과 또한 타 공사에 비해서 크다고 할 수 있다.

본 연구는 NATM 공법으로 시공되는 도심지 지하철 터널의 전 공정을 포함하는 시뮬레이션 모델의 구축을 목적으로 하며, 발생 가능한 제한 사항을 구현하고 조건을 수정가능하게 하여 구축된 모델에 일반성을 부여하고자 한다. 구축된 모델을 통해 공사의 완료 시점을 예측하고 이를 의사결정의 지원도구로서 사용하여 객관적이고 합리적인 공정계획의 수립을 지원하고자 한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 인천공항철도 공사 구간 중 NATM 터널 공법으로 시공되고 있는 2,180m의 지하철 터널공사 구간 중 1,853m의 굴착 구간을 대상으로 한다. 해당 공사에서 수직구 굴착은 연구의 대상에서 제외하였으며, 천공, 발파, 버력 처리, 숏크리트(shotcrete), 록 볼트(rock bolt)의 개별 공정들이 한 사이클을 구성하는 프로세스를 모델링의 대상으로 한다. 시뮬레이션 모델의 구축에는 범용 시뮬레이션 프로그램인 아레나(Arena)를 사

용하였으며, 실제 현장에서 발생하는 제한 사항과 모델 구축과정에서 발생하는 제한 사항을 모두 반영하였다. 구축된 모델은 대상 현장에 대한 검증을 하였으며, 일부 모듈만 간단하게 각각의 현장에 맞도록 수정한다면 타 현장에도 적용할 수 있도록 하여 NATM공법으로 시공되는 도심지 지하철 터널 공사의 시뮬레이션 모델로써 일반성을 갖도록 하였다.

공정의 개요와 관련 데이터의 수집은 현장 방문을 통한 실측 데이터와 현장 담당자의 축적 데이터를 활용하였으며, 수집된 데이터에 확률 분포를 적용하여 모델링에 활용하였다. 모델링의 적정성 검토 과정에서 현장 담당자와의 인터뷰를 통해 현실에 가까운 모델을 작성하고자 하였다. 본 연구의 방법 및 수행과정은 그림 1과 같다.

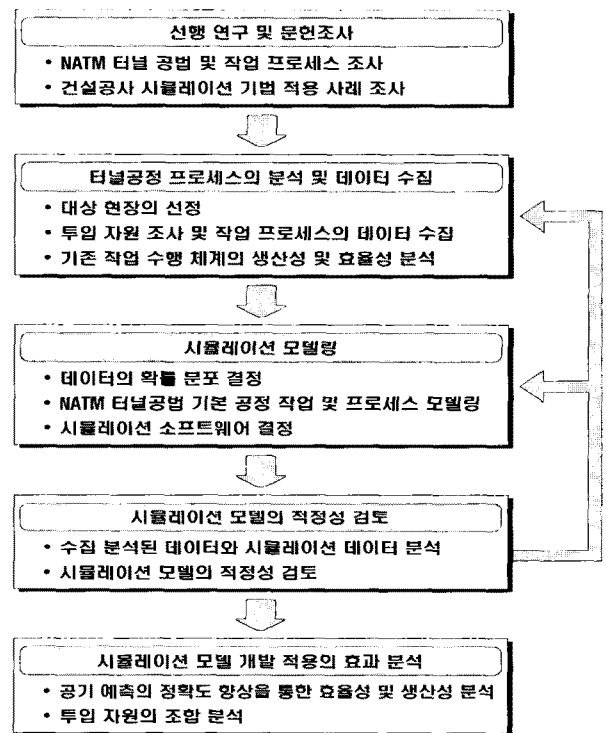


그림 1. 연구의 내용 및 수행 방법

## 2. 선행 연구 분석

### 2.1 시뮬레이션의 개요

Shannon(1975)은 시뮬레이션을 “실제 시스템을 모델화하고 그 모델을 통하여 시스템의 거동을 이해하기 위하여 실험을 하거나, 그 시스템의 운영을 개선하기 위한 다양한 전략을 평가하는 과정(process)”이라 정의한 바 있으며, Ng(1998)은 “시뮬레이션 방법과 그 모델은, 건설공사의 수행평가를 측정하는데 있

어 필수적인 지표적인 역할을 하는 프로젝트관리기준(project-control baseline)을 형성하며, 전략적 관리 단계에서 매우 유용하게 이용 할 수 있다. 또한, 발주자, 컨설턴트, 혹은 시공자의 지시에 변화가 가져온 작업 중단에 의한 생산율의 감소는 비용 측면에서 엄청난 충격을 가져오는데, 이를 조사하기 위한 전문가로부터 시뮬레이션 software의 효과는 가용화 될 수 있다."고 말한 바 있다. 많은 물량과 사업비 그리고 오랜 기간을 요하는 건설공사는 공사수행 기간 중 사업 성공에 영향을 미치는 수많은 위험과 매개 변수들을 내포하고 있다. 따라서 실제 사업을 수행하기 전에 이러한 요인들을 충분히 고려하여, 사업수행 전에 각종 위험을 미리 분석/예측하기 위한 도구로서 시뮬레이션은 건설 사업에 활용하는 효과가 크다고 할 수 있다. 특히, 터널, 도로, 항만, 댐, 빌딩 등의 건설과 같이 많은 물량의 작업이 같은 과정의 반복을 통해 수행되는 경우, 작업과정(one cycle)을 시간과 비용의 측면에서 최적화하기 위한 도구로 시뮬레이션을 활용함으로써, 전체 사업에서 막대한 시간과 비용의 절감효과를 얻을 수 있을 것이다.

## 2.2 국내외 선행 연구 분석

국내외에서 시뮬레이션을 활용한 연구는 활발히 진행되어 왔고, 진행되고 있다.

이러한 많은 연구 중 터널공사에 시뮬레이션 기법을 적용한 연구로는 Ioannou and Martinez(1995)가 터널의 재래식 공법과 NATM 공법을 비교한 연구와 MicroCYCLONE을 활용하여 NATM 터널공정에 대한 시뮬레이션 모델 구현과 생산성 향상 분석을 수행한 천진용 등(2005)의 연구가 있다. 이 연구에서는 버력처리 공정을 제외한 천공발파, 슛크리트, 록볼트에 대한 장비 및 공정을 고정시키고 트럭의 투입 대수에 따른 공정의 소요 시간을 분석하여 최적의 장비 투입대수를 파악한 결과를 제시하였다. 또한 소병각 등(2008)의 연구에서는 지하철 터널 공사의 공정 중, 버력처리 공정의 생산성 분석에 있어, 버력처리 공정에 투입되는 장비의 증가되는 갱내 거리에 따른 생산성을 분석하였다.

의사결정의 지원 도구로서 시뮬레이션 모델을 활용한 연구로서, Zayed and Halpin(2001)은 piling 프로세스의 의사결정자에게 생산성을 계산하는데 있어서 시뮬레이션의 활용으로 보다 확실한 Tool을 제공함을 목적의 연구를 실시하였으며, 파일 기초의 시공에서 예상되는 여러 가지 불확실성에 대한 문제점을 극복하기 위해 시뮬레이션의 모델을 통한 분석을 수행하였다. 이 연구에서는 현장의 생산성 자료와 모델이 분석한 생산성 자

료의 일치하는 정도를 사용하여 모델의 79%이상의 output 자료 중에서 75% 이상의 일치성을 보여줌으로서, 시뮬레이션 모델의 활용이 불확실한 자료를 포함하고 있는 작업도 가능함을 보여주었다.

시뮬레이션 모델에 적용되는 데이터의 불확실성에 대한 확률 분포를 정의한 연구로는, 건설공사의 작업 과정에서 작업자들의 추가 작업시간 동안의 생산성을 분석하는 모델링 개발에서 발생하는 불확실성의 요소를 정의할 수 있는 적절한 확률분포의 선정에 관한 Woo(2005)의 연구와 버력처리 시스템을 중심으로 한 데이터 분포 특성에 대한 분석을 실시하여 적절한 확률 분포를 제시한 서형범 등(2006)의 연구가 있다.

본 연구는 국내 건설공사에 적용된 시뮬레이션 연구에서 다루지 않았던, NATM 터널 공법으로 시공되는 도심지 지하철 공사의 굴착 공정 전체에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하고, 각 공정 소요 시간에 적절한 확률분포를 적용하여, 공사 초기에 최종 공기를 예측을 통해 합리적인 의사결정을 할 수 있는 지원 도구로서의 시뮬레이션 모델을 개발하고자 한다.

## 3. 터널공정의 프로세스 분석

### 3.1 공사 개요 및 프로세스

인천공항철도 지하철 공사 구간 중 본 연구의 대상 현장은 NATM 터널공법으로 시공되고 있는 총 연장 2,180m에 해당하며, 공사 초기 설계서에 정해진 수직구를 굴착하고 수직구를 중심으로 NATM 터널공법으로 양방향 굴착을 실시한다. 공사기간은 2004년 7월부터 2009년 8월까지 총 61개월이다. 총 연장 2,180m 중 개착구간을 제외한 발파를 통한 굴착 구간은 1,853m이며, 이 구간이 본 연구의 대상 구간이다. 개착구간을 본 연구의 대상 구간에서 제외한 이유는 NATM 터널의 일반 공정 중 발파 프로세스의 중요성을 본 연구에서 중점적으로 다루고 있기 때문이다. 또한, 공사 초기 수직구 굴착에 해당되는 공정은 일반적인 사이클 형태의 터널 공정이 아니므로 제외한다. 일반적으로 터널 공사가 완료될 때까지 NATM 터널의 작업 사이클은 그림 2와 같다.

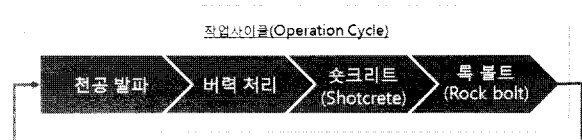


그림 2. NATM 터널공정의 작업 사이클

그러나 이러한 일반적인 작업 순서를 유지할 경우 발파시간, 카리프트의 사용 등의 제한 조건이 많은 도심지 지하철 터널 공사에서는 공기 지연이 발생한다. 즉, 공기 단축을 위하여 1일 2 발파를 실시하여야 하나 일반적 공중 순서로는 일출과 일몰시간으로 제약되는 발파시간을 맞출 수가 없다. 발파시간을 맞추지 못하게 되면 1일 2발파가 불가능해지며, 이는 공기 지연으로 이어지게 된다. 그러므로 실제 현장에 적합한 공정 순서는 재구성되어야 하며, 변경된 현장 중심의 NATM 공법의 공정순서를 구성하기 위하여 본 연구에서는 NATM 터널의 4개의 작업을 실제 공정에 맞게 세분화하여 모델링하였다. 각 작업은 총 10개로 구성되며 일부 작업은 모델링 상에서 장비 운용과 작업 인부 활용의 효율성에 따라 병행 작업으로 구성되었다. 10개의 작업 구성을 간략히 사이클로 모식화하면 그림 3과 같다. 이 그림은 공정 순서의 이해를 돕기 위한 그림으로서 매우 간소화된 형태의 그림이다.

그림 3에 나타난 바와 같이, 본 연구의 작업은 측량·마킹, 천공, 장약설치, 발파·환기, 버럭처리, 슛크리트 1차 타설, 지보설치, 슛크리트 2차 타설, 록볼트 천공, 록볼트 정착의 총 10개로 구성하였다.

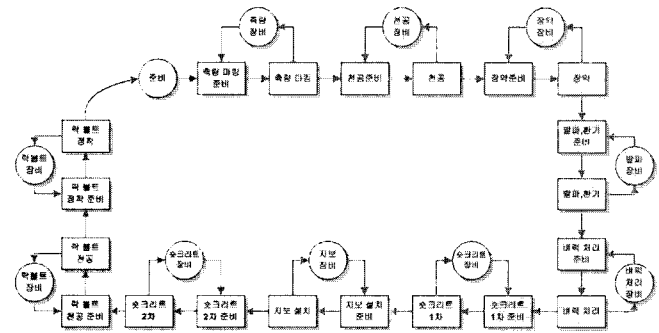


그림 3. 공정 프로세스

이 중 천공과 록볼트 천공, 장약설치와 록볼트 정착은 그 사용 장비와 작업 인부의 구성이 동일하고 병행 작업으로 구성하여도 선후행 작업에 지연을 발생시키지 않으므로, 사이클 상에서 동시 작업이 이루어지는 병행 작업으로 구성하여 모델링에 반영하였다.

NATM 터널 공정은 다음과 같은 프로세스로 이루어진다. 먼저 측량을 통하여 장약을 설치할 곳을 파악한 후 인부와 차징카를 사용하여 마킹을 실시하고 장약 설치를 실시한다. 장약 설치 후 발파를 실시하고 환기를 하여 후속 작업을 할 수 있는 여건을 마련한다. 발파 후 발생한 버럭을 로더와 트럭을 사용하여 외부로 반출하고, 이후 슛크리트를 1차로 타설한 후 지보를 설치하고 다시 슛크리트를 2차로 타설한다. 슛크리트 타설이 끝나면 록볼

트를 천공하고 정착시키며, 이 각 작업들이 하나의 사이클을 이루게 된다.

각 작업에 필요한 장비는 다음 표 1과 같이 구성된다. 발파 작업은 장비가 아닌 재료가 필요하므로 장비 구성에 포함시키지 않았다.

표 1. 작업별 주요장비

작업	주요장비	소요대수	작업	주요장비	소요대수
측량, 마킹	차징카	1	지보설치	백호우	1
천공	점보드릴	1	스�크리트 타설	스�크리트 머신	1
				믹서트럭	1
장약설치	차징카	1	록볼트 천공	점보드릴	1
버럭처리	카리프트	1	록볼트 정착	차징카	1
	로더	1			
	트럭	2			

장비의 구성은 대상 현장에서 이미 지하철 터널공사라는 현장 상황에 맞도록 최적화된 장비 규격과 소요 대수를 적용하고 있었으므로, 본 연구에서는 최대한 현장을 반영한 시뮬레이션 모델을 구현하기 위하여 현장의 장비 구성을 활용하였다. 발파 공정은 양 막장 1일 2발파를 기본으로 하여 실제 현장에서 발생하는 제한 사항 등을 고려하여 구현하였다.

### 3.2 제한 사항

본 연구는 도심지에서 시공되는 지하철 터널 공사 현장을 대상으로 하고 있으므로, 프로세스의 시뮬레이션에 있어서 여러 가지 제한 사항을 갖게 된다. 이러한 제한 사항은 실제 공정에 영향을 미치는 요인들로서 각 제한 사항이 공사 전체에 미치는 영향이 크므로 실제 시뮬레이션 모델에 반영하였으며, 시뮬레이션 모델에 반영한 제한 사항은 다음과 같다.

1) 발파 후 비산에 따른 안전거리 확보가 필요하다.

수직구 굴착 후 양방향 굴착을 실시함에 있어서, 발파 후 비산에 따른 안전 거리가 확보되는 시점은 양쪽 막장간 거리가 120m 확보되는 시점이다. 즉, 이 거리가 확보되지 않은 시점에서는 한쪽 막장에서 발파 작업이 실시된다면 다른 막장은 작업을 실시하지 않고 대피한다.

2) 발파는 일출과 일몰 시간으로 제한된다.

발파 가능 시간은 봄, 여름, 가을, 겨울이 각기 다르며, 여름을 기준으로 가능한 발파시간은 오전 7:30~8:30, 오후 5:30~7:00이다. 본 연구의 모델에서는 여름을 기준으로 일출, 일몰에만 발파 프로세스가 진행되도록 하였다.

3) 카리프트를 사용한다.

모든 장비의 막장 내 진출입은 카리프트를 활용하여야 한다.

그러므로 버력처리 공정과 그 이외 장비의 진출입에 카리프트를 활용하도록 구현하였다.

4) 버력처리 공정이 공사 진행에 따라 달라진다.

초기 안전거리 확보 단계와 각 막장 300m 정도의 굴착 단계까지는 버력처리 공정이 매우 중요한 공정이다. 발파 후 버력처리를 하지 못하면 다음 작업들이 진행될 수 없기 때문이다. 버력처리는 외부로 버력을 반출하여야 하기 때문에 매우 긴 시간이 소요되는 작업이며, 신속한 버력처리는 전체 터널 공정에 미치는 영향이 크다. 그러나 각 막장 굴착거리가 300m를 넘어서면 신속하게 트럭을 사용하여 외부로 버력을 외부로 반출하지 않고, 작업구간에서 일정거리 정도 후방에 버력을 쌓아둘 수 있다. 즉, 현장의 막장이 넓기 때문에 트럭을 활용하여 후방에 쌓아놓고 버력을 작업 구간에서 치우면 다음 작업을 시행한다. 다른 작업이 시행되는 동안 트럭은 할 일이 없으므로 이 기간동안 막장에 쌓인 버력을 외부로 반출한다. 굴착거리 300m 이후의 이러한 버력처리 프로세스 역시 시뮬레이션 모델 내에 구현하였다.

5) 지보 패턴이 구간 별로 상이하다.

표 2. 표준 지보패턴 (대상 현장)

구분	PD-4	PD-5-1	PD-5-2
분류등급	IV	V	V
RMR	40~21	20이하	20이하
적용지반 조건	연암층 이상	풍화암층 ID 이상	풍화도층 및 풍화암층 ID 이하
1회 굴진장	1.2m	1.0m	0.8m
룩볼트 간격	1.2m	1.0m	0.8m

본 연구의 대상 현장은 표 2와 같은 3개의 지보 패턴을 가지고 있다. 이 지보패턴은 건설교통부 표준품셈의 암반 분류 중 본 대상 현장에 적용되는 것만을 나타낸 것이다. 지보 패턴은 모델링 구현 상 대상 현장과 동일하게 구간구간 하나하나 나누어 구성할 수 없으므로, 전체 구간을 실제 현장의 3개의 지보 패턴에 해당하는 거리만큼씩 나누어 3개의 구간으로 구성하였다. 즉, 현장의 평면도 및 종단면도를 보고 계산한, 각 지보 패턴에 해당하는 연장을 각각 합하여 연속된 하나의 구간으로 보아, 총 3개의 지보 패턴 구간을 만들었다.

### 3.3 시뮬레이션 모델 개발

#### 3.3.1 데이터 분석

본 연구의 해당 공사의 각 작업과 전체 공정에 대한 공사비 데이터는 현장 자료를 활용하였다. 장비 소요 대수와 규격은 현장

상황을 반영하고 현장 담당자와의 인터뷰를 통하여 실제 현장의 변동성 여부를 확인하였다. 또한, 각 작업의 소요 시간에 대한 데이터는 현장 방문을 통한 실측 데이터와 축적 데이터를 모두 활용하였다. 본 연구가 시공자가 공사 초기에 공사 완료 시기와 공사비를 개략적으로 예측해보기 위한 시뮬레이션 모델을 구축하는 것이므로, 사용자의 편의를 고려하여 데이터는 각 작업의 준비부터 종료까지의 시점을 하나로 보고 산출하였다. 단, 버력처리 공정은 트럭의 이동과 카리프트의 사용이라는 상황을 고려하여 트럭의 지상 이동시간, 카리프트 하강 시간, 막장 내 이동시간(후진), 로더의 로딩 시간, 막장 내 이동시간(전진), 카리프트 상승 시간, 덤핑 시간의 각 단계로 나누어 데이터를 축적하였다.

각 작업 시간의 데이터에 대한 적절한 확률 분포를 설정하고, 이를 검증하기 위하여 Arena 프로그램 상의 입력 분석기(Input analyzer)를 활용하였다. 입력분석기를 통해 알 수 있는 자료의 적합성 정도에 대한 수치 척도는 표준 통계적 가설 검정 방법 중 평균 자승 오차(mean square error)와 카이 제곱( $\chi^2$ )을 통해 검증할 수 있다. 또한, 대응 p값(corresponding p-value)가 0.05 보다 작으면 분포가 그다지 잘 맞지 않는다는 것이므로 유의하여야 한다.(문일경 등, 2005) 입력분석기를 활용한 데이터의 검증 결과는 표 4에 나타나있다.

표 4의 결과 중 버력처리에 관련된 데이터는 초(sec)단위이며, 나머지 데이터는 분(min)단위 데이터이다. 모델링에 적용된 현장 장비비는 표 3과 같다.

표 3. 굴착 주요 장비비(일대)

장비명	장비비(일)	장비명	장비비(일)
백호우	40만원	믹서트럭	15만원
정보도릴	74만원	덤프트럭	30만원
숏크리터머신	62만원	페이로더	41만원
차징기	32만원		

#### 3.3.2 시뮬레이션 모델 구축

본 연구의 대상 현장은 양방향 굴착으로서, 인천 방향과 용산 방향의 2개 막장으로 작업 구간이 구성된다. NATM 터널의 작업 순서를 막장 A와 막장 B에서 장비 및 인부의 중첩 및 간섭이 발생하지 않도록 구성하여 양방향이 원활하게 공사가 진행될 수 있도록 구성하였다. 또한, 장비와 작업 인부가 동일하게 구성되기 때문에 병행작업으로 판단하고 동시 작업을 진행시켜도 선후행 작업을 지연시키지 않는 “천공”과 “룩볼트 천공”, “장약설치”와 “룩볼트 정착”을 병행작업으로 하여 전체 공정 시간을 줄일 수 있도록 하였다.

표 4. 데이터의 확률 분포 검증 결과

구분	측량·마킹	전공	장약설치	발파환기	
샘플 개수	40	66	52	25	
설정 분포	Beta	Beta	Uniform	Beta	
Expression	41.5 + 33 * BETA(0.872, 0.973)	43.5 + 25 * BETA(1.94, 2.05)	UNIF(42.5, 62.5)	32.5 + 21 * BETA(1.21, 1.04)	
square error	0.023007	0.012671	0.026923	0.020048	
p-value	0.487	0.616	0.338	0.163	
버력처리					
구분	적재 시간	막장 (후진)	막장 (전진)	경외 이동	덤핑 시간
샘플 개수	27	27	27	27	27
설정 분포	Beta	Gamma	Uniform	Beta	Weibull
Expression	119 + 55 * BETA(0.68, 0.79)	226 + GAMM(288, 0.642)	UNIF(165, 580)	128 + 89 * BETA(0.849, 1.14)	27.5+WEIB (12.2,2.59)
square error	0.030451	0.008708	0.001646	0.041606	0.021914
p-value	0.151	> 0.15	> 0.75	0.665	0.0876
구분	RB전공	RB정착	숏크리트	지보설치	
샘플 개수	49	70	27	40	
설정 분포	Triangular	Beta	Erlang	Triangular	
Expression	TRIA(23.5, 49, 114)	37.5 + 47 * BETA(0.856, 0.913)	32.5 + ERLA(10.6, 2)	TRIA(41.5, 53, 74.5)	
square error	0.017782	0.012525	0.034245	0.014254	
p-value	0.535	0.204	0.0782	> 0.75	

이러한 공정에 관한 여건을 고려한 모델을 실제 현장에 부합하도록 구축하기 위하여 본 연구는 모델을 2가지 형태로 구분하였다. 우선, 발파 후 비산의 영향으로 인해 양방향 1일 2발파가 어려운 막장 간 이격거리 120m이전 모델을 Type1으로 하여 구축하였다. Type1의 특징은 용산방향이나 인천방향 막장에서 발파 및 환기 작업을 진행하고 있을 경우 반대편 막장은 모든 작업을 중지한다는 것이다. Type2 모델은 비산 거리에 대한 안전 여부가 확보되는 120m 이후 모델로서, 각 막장 간 진행 거리가 300m를 넘지 않으면 정상적으로 카리프트를 사용하여 버력처리를 진행하고, 300m를 넘으면 버력 처리 공정에서 실제 현장 상황과 유사하게 카리프트를 사용하지 않고 버력을 막장 후방으로 쌓아둔 후 후행 작업 상황에서 처리하는 개념으로 구축하였다. Type1모델과 Type2모델의 모듈 구성은 동일하며, 내부 조건의 차이를 두었다. 아레나(Arena) 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 모델링을 한 결과는 그림 4.1~그림 4.9와 같다. Type1 모델과 Type2모델 모두 현장에서 “돌관작업”이라고 부르는 대안적인 발파 작업을 하게 되는 조건을 정하여 모델링에 반영하였다. “돌관작업”이란 공정 시간의 지연이나 민원 등의 상황으

로 인하여 발파를 실시할 수 없게 될 경우, 공기지연을 우려하여 브레이커 등의 장비로 대안적인 굴착을 통한 시공을 하는 것을 말한다. 이러한 “돌관작업”을 수행함으로써 인해 공사기간이 단축되는 효과를 가져오게 되고, 실제 현장에서 발파를 하지 못하고 추가적인 굴착을 몇 회 실시하게 될 것인가에 대한 예측을 할 수 있는 효과를 갖게 하여 의사결정에 활용할 수 있다. 돌관작업은 그림 4.4 발파 및 환기의 모듈에 구성되어 있으며, 그림 4.4의 모듈 중 12, 13, 14에서 지보패턴에 따른 현장 상황을 반영할 수 있도록 하였다.

모델링의 조건 중 다음의 조건은 아레나(Arena)내부에서 수정하여 대상 현장에 적합하게 모델을 적용할 수 있다.

- 1) 오전, 오후의 발파 가능 시간 조정
- 2) 한 대의 트럭이 신고 나올 수 있는 버력양 조정
- 3) 지보패턴에 따른 1회 발파 후 굴착 가능 거리 조정
- 4) 지보패턴 조정
- 5) 돌관작업 실시 조건(시간에 따른) 조정

본 연구의 시뮬레이션 모델은 사용자의 편의를 위하여 Arena 시뮬레이션 프로그램을 잘 알지 못하더라도 VBA(Visual Basic Application)를 활용하여 만들어진 “사용자 인터페이스”에 원하는 입력값을 넣어 그 결과를 확인할 수 있도록 하였다.

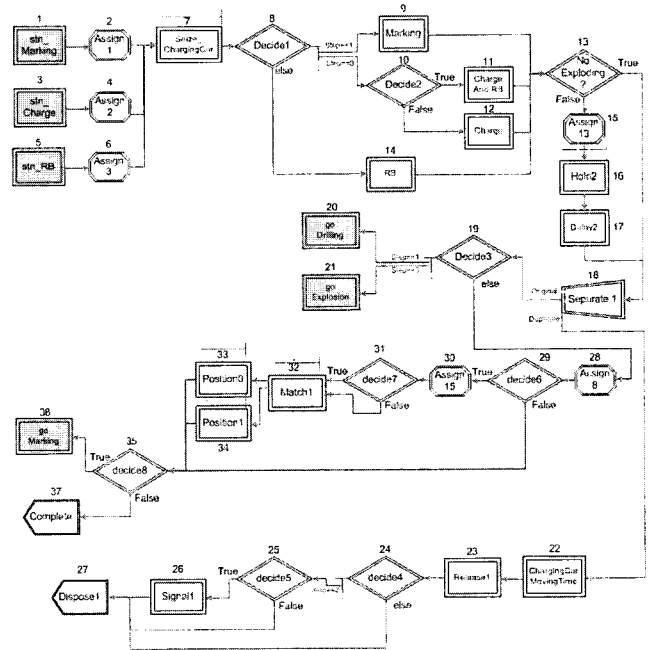


그림 4.1 측량마킹/장약설치/록볼트정착

즉, 데이터가 충분히 확보되어 원하는 확률분포에서의 expression을 얻을 수 있어 아레나 내부에 값을 입력할 수 있거나 아레나 내부 모듈을 수정하면서 사용할 수 있을 경우 더 정확

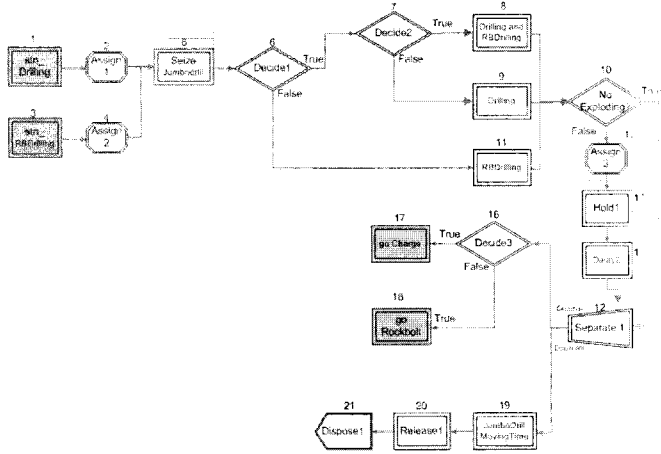


그림 4.2 천공/로봇트천공

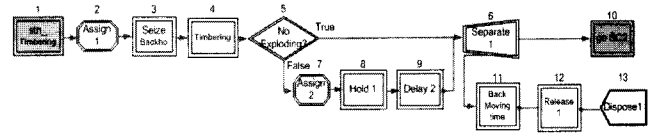


그림 4.3 정보설치

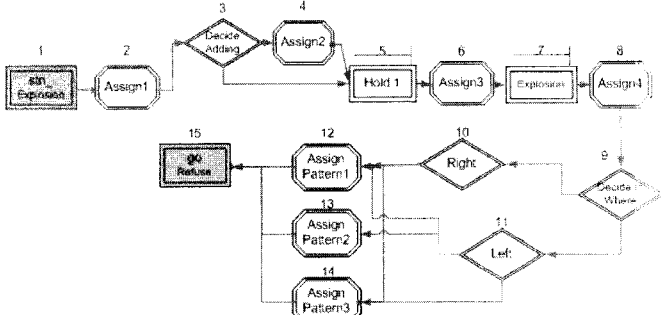


그림 4.4 발파 및 환기

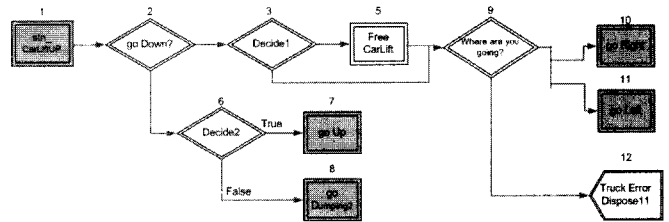


그림 4.5 카리프트 상태

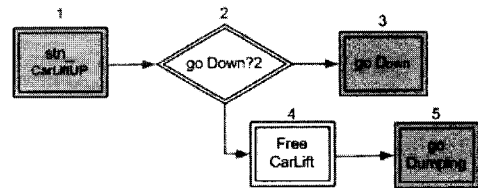


그림 4.6 카리프트 조정

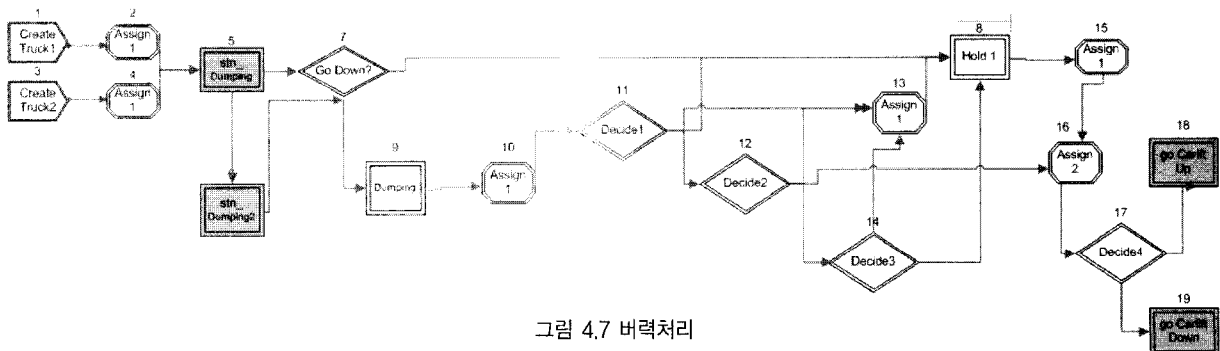


그림 4.7 버럭처리

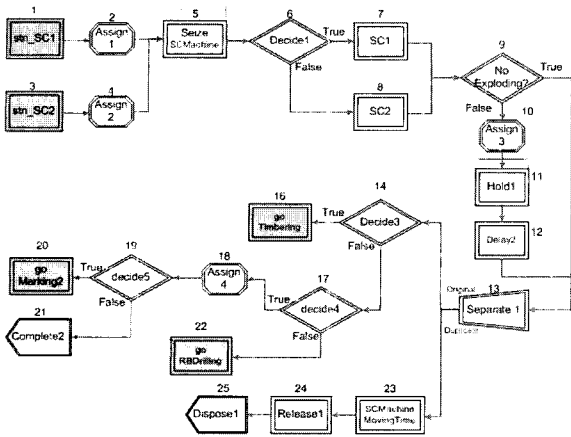


그림 4.8 솟크리트 작업

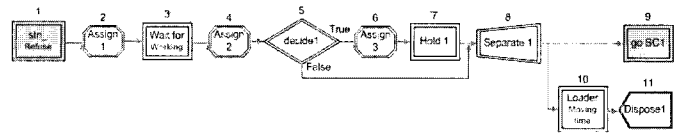


그림 4.9 트럭 및 로더 작업

한 결과값을 얻을 수 있지만, 데이터가 충분하지 않거나 아레나 프로그램에 잘 모르는 사용자의 경우에도 사용자하고자 하는 확률분포와 모수(parameter)값을 사용자인터페이스에 입력하면 결과를 확인할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 만들어진 사용자 인터페이스는 그림 5와 같다. 이 사용자 인터페이스를 이용하여 사용자가 막장 길이, 작업 소요 시간, 확률 분포, 비용을 input data로서 입력할 수 있다. 확률 분포를 선택할 수 있도록 한 것은 각 사용자가 축적하고 있는 데이터에 대한 적절한 확률 분포를 사용자가 직접 선택할 수 있도록 하기 위함이다.

### 3.4 시뮬레이션 결과 및 분석

연구 과정에서 확보된 데이터를 앞의 표 3의 결과를 활용하여 검증한 expression을 시뮬레이션 모델에 반영하면 총 공기와 총 소요 장비비를 구할 수 있다. 단, 장비비를 포함한 실제 현장에서 소요된 공사비에 대한 데이터는 확보에 어려움이 있어서 연구의 결과와 비교·검증을 할 수는 없다. 향후 현장의 실제 소요 공사비 데이터가 확보된다면 공사비 비교를 통한 검증도 가능할 것으로 판단된다. 본 연구의 대상 현장은 막장 A가 1013m, 막장 B가 840m의 작업 구간을 이루고 있다.

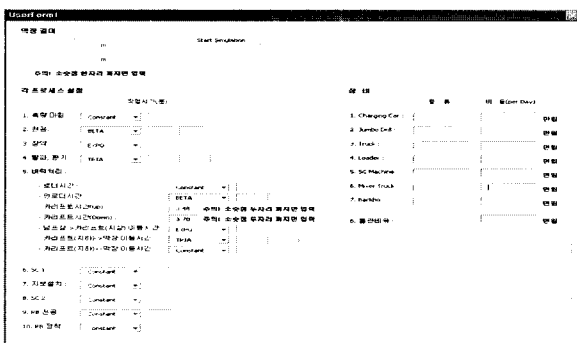


그림 5. 사용자 인터페이스

현장 공기에 영향을 주는 Critical Path가 막장 A이므로 공정 관리 프로그램인 Primavera(이하 P3)를 활용하여 산정한 예정 공기와 실제 현장 공기 데이터, 시뮬레이션 모델을 통하여 산정된 예측 공기 데이터 분석은 막장 A를 대상으로 하였다. 막장 B는 참고 사항으로 예정공기와 시뮬레이션 예측공기의 비교를 실시하였다. 막장 A의 공기 비교는 그림 6과 같다.

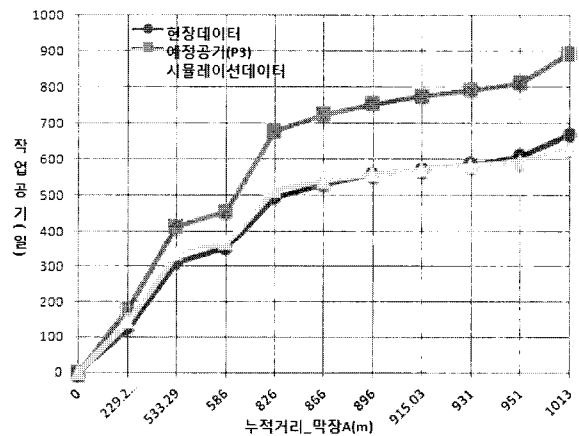


그림 6. 막장 A의 공기 비교

P3를 활용한 대상 현장의 굴착공정의 공기는 총 895일이었다. 이 예측값은 실제 현장 소요 공기 669일과 비교해 보았을 때, 약 66%의 정확도 수준이었다. 본 연구의 시뮬레이션 모델을 통한 예측공기는 총 639일이었으며, 대상 현장의 공기를 약 95%의 정확도로 예측한 것이었으므로 약 30% 이상의 정확함을 나타내고 있다. 이는 막장 B의 예정공기와 시뮬레이션 예측공기의 비교는 그림 7과 같다.



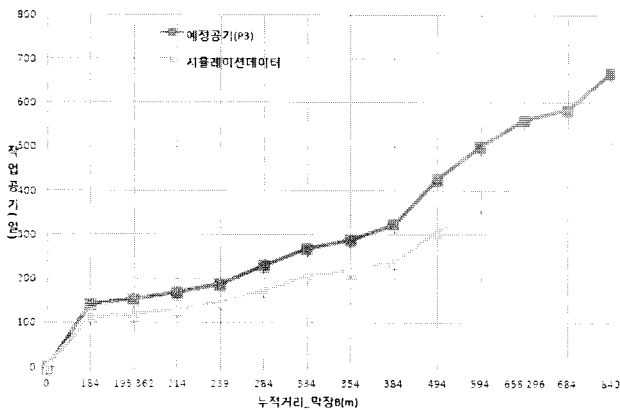


그림 7. 막장 B의 공기 비교

막장 B는 Critical Path가 아니므로 실제 공기와 예측공기의 비교는 큰 의미를 갖지 않는다고 판단되어 직접적인 비교는 하지 않았다. 또한, “돌관작업”을 21시까지 발파작업을 하지 못했을 경우로 설정하였을 때, 총 돌관횟수는 67회로 예상되었다. 돌관작업의 설정으로 현장 담당자의 판단에 따른 돌관 조건 설정을 통하여 전체 공사 중 발생할 수 있는 돌관작업의 횟수를 예측해볼 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 도심지에서 NATM 공법으로 시공되고 있는 지하철터널공사를 대상으로 하여 작업 공기의 예측과 공정 계획의 수립을 포함한 의사결정 지원도구로 활용될 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해서 터널공사의 일부 제한된 공정을 중심으로 장비 조합에 대한 효율성 분석을 실시하거나 분포 특성에 대한 검증이 수행되었던 기존의 시뮬레이션 연구들과는 달리, NATM 공법으로 시공되는 도심지 지하철 터널 공사의 전 공정을 대상으로 하는 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

본 연구를 통해 제시된 모델은 사전에 정의된 작업들의 소요 기간과 이들의 선후행관계에 따라서 확정적으로 공정을 모델링하고 공기를 분석하는 일반적 공정관리 프로그램과는 달리, 다양한 구성요소들의 변동성(variability)을 반영할 수 있는 시뮬레이션 기법이 가지는 특성과 장점을 이용한 의사결정지원(decision supporting) 도구로서의 활용성에 있어 차별성을 가지고 있다. 개발된 모델에는 실제 현장의 특성과 공사 진행 정도 등의 환경 변화에 따라 달라지는 작업 수행조건들이 반영되었으며, 이러한 조건 변화에 따라 달라지는 작업들의 구성과 내용 그

리고 소요 기간 등에 대한 변동성을 포함하였다. 몇 가지 예를 들면, 실제 사례현장에서 병행작업으로 수행되었던 천공과 록볼트 천공, 장약설치와 록볼트 정착 작업, 공사 특성에 따른 발파 시간의 제약조건, 발파 후 비산거리 확보 정도에 따른 수행 작업들의 변화, 공사 진행 정도에 따른 버력 처리 작업의 변화 등이 반영되었다.

또한, 개발된 모델은 지보패턴 등 공사 특성에 따른 환경과 제한조건의 설정이 가능하여 특정 현장만이 아닌 일반 도심지 지하철 NATM 터널 현장에도 적용이 가능하다는 적용의 일반성을 가지고 있다.

검증 결과 본 연구에서 제시된 시뮬레이션 모델을 통해 산출된 예측 공기는 실제 공기와 비교했을 때 95% 정확도의 높은 결과를 보였다. 이는 본 연구의 모델이 실제 현장의 특성과 환경변화를 적절히 반영하였기 때문으로 판단되며, 실제 현장을 적절히 표현한 시뮬레이션 모델로서의 근거가 된다고 할 수 있다. 연구를 통해 개발된 시뮬레이션 모델을 P3와 같은 공정관리 프로그램과 연동시킨다면, 본 시뮬레이션 모델을 통한 분석 결과의 적용 범위와 활용도와 더욱 높아질 것이라 기대된다.

본 연구의 범위는 공기(time) 측면만을 고려한 시뮬레이션 모델의 개발이었지만, 향후 공사비 데이터를 확보하여 공사비(cost) 측면을 반영할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발한다면 의사결정 지원도구로서의 활용도는 더욱더 높아질 것이다. 또한 향후 추가적인 데이터 수집을 통해 작업 시간에 대한 확률 분포의 신뢰성을 확보하고 실제 현장 여건의 모델을 구축함으로써 본 연구의 시뮬레이션 모델을 보완하여 모델의 신뢰성을 더욱더 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

“이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.”(KRF-2006-331-D00594)

## 참고문헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계편람
2. 김경주(2000), "여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제4-D호, pp.403-412.
3. 문일경, 윤원영, 조규갑, 최원준(2005), ARENA를 이용한 시뮬레이션, 3판, 교보문고.
4. 서형범, 정원지, 김경민, 김경주(2006), "건설장비 운영 데이터 분포 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제26권 제4-D호, pp.661-670.
5. 소병각, 우성권, 이시욱(2008), "터널 버력처리 공정의 생산성 분석을 위한 시뮬레이션 모델 개발", 대한토목학회논문집, 제 28권, 제 1-D호, pp. 83-91.
6. 천진용, 소병각, 추장식, 우성권(2005), "시뮬레이션 모델링을 통한 NATM 터널공정 생산성 향상 분석", 대한토목학회논문집, 제25권 제3-D호, pp. 457-462.
7. Martinez, J. and Photios, G. Ioannou A.M.(1995), "Evaluation of Alternative Construction Process Using Simulation Proceedings", Construction Congress 95, ASCE, pp.22-26.
8. Ng, W. M., Khor, E. L., Tiong, L. K., and Lee, J.(1998), "Simulation modeling and management of large basement construction project", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 101-110.
9. Shannon, R. E.(1975), System Simulation: The Art and Science, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
10. Woo, Sungkwon(2005), "Selection of a Probability Distribution for Modeling Labor Productivity during Overtime", Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol.6 No.1, pp. 49-57.
11. Zayed, T. M. and Halpin, D. W.(2001), "Simulation of concrete batch plant production", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp. 132-141.

논문제출일: 2008.02.12  
심사완료일: 2008.04.18

### Abstract

The initial step in the construction process, estimating appropriate construction time and expense is the most important factor that would influence the result of the construction. In order to enhance productivity and efficiency, there is a need to analyze and manage rationally. The purpose of this project is to make a simulation model for all subway tunnel construction based on the NATM method, also give an support equipment that would make available to plan and analyze the construction. The development of simulation model is based on a real case construction analysis process and also on the reference data. It reflects restrictive elements, make it possible to modify the conditions, and not only adapt to our project's construction but other projects as well. The model developed by this project will be able to reasonably predict the construction completion time and support the process of decision making during the planning. Therefore we can expect the productivity and efficiency of the whole construction projects.

Keywords : simulation, NATM, productivity, decision-making