

ARENA를 활용한 터널공사계획모델 개발에 관한 연구 - NATM공법을 대상으로

Study on Development for Plan Model of Tunnel construction by using Arena
-on focused NATM

이시욱* · 김옥기** · 우성권***

Lee, Siwook · Kim, Okki · Woo, Sungkwon

요 약

건설공사의 공사 초기단계에서 총 공사기간과 공사비용의 예측은 매우 중요하다. 터널공사는 공기가 길고, 복잡한 공정이 반복적으로 이루어지는 건설공사의 일종이다. 시뮬레이션은 효과적인 건설공사 관리를 위하여 공사 장비 및 자재 등의 적절한 조합을 고려하고, 현장에 적합한 프로세스를 구성하여 실제 공사에 미칠 영향을 예측하고 분석할 수 있는 기법이다. 본 연구에서는 NATM공법으로 시공되는 양방향 도심지 지하철 터널공사에서 발파시간 등의 제한 사항을 고려한 모델을 Arena 시뮬레이션을 이용하여 개발하였다. 개발된 모델은 비주얼베이직을 이용하여 쉽게 사용할 수 있는 형태로 개발되었으며, 결과값으로 총 공사기간과 공사비용을 얻을 수 있다. 이 결과를 이용하여 공사 초기 단계에서의 의사결정 도구로서 사용될 수 있을 것이다.

키워드: 터널공사, 시뮬레이션, Arena, 의사결정

1. 서론

시뮬레이션은 실제 현장에서 발생할 수 있는 상황과 제한 조건을 가상의 컴퓨터 공간에서 구현함으로써, 공정 계획 및 비용을 포함한 공사 관리에서 최적의 방안을 계획할 수 있는 효과적인 관리 도구이다. 또한 실제로 발생할 수 있는 상황을 구현한 것이기 때문에 발생 가능한 문제점을 찾아낼 수 있다. 시뮬레이션은 효과적인 관리 도구임에도 불구하고 실제 현장에 적용된 사례는 드물게 보고되고 있다. 이는 현재까지 실제 현장에서 공정 시뮬레이션을 활용함에 있어 전문 인력의 부족과, 보수적인 공사 진행 관행 등의 원인에 따른 것으로 사료된다.(이한수, 2002)

그러나 공정 관리에 있어서의 시뮬레이션은 많은 물량이 반복적인 프로세스로 이루어지는 토목 시설물의 공사 수행에서 발생 가능한 제한 사항 및 문제점을 포함시킬 수 있을 뿐만 아니라 장비의 운용 등을 눈으로 확인할 수 있게 만들 수 있으므로, Bar-chart, PERT, CPM등을

통해 나타낼 수 없는 최적의 공정계획을 수립하는 유용한 도구가 될 수 있다. 또한 다양한 조건에서의 시나리오를 적용 및 검토할 수 있으므로, 프로젝트의 리스크를 최소화할 수 있는 유용한 관리 도구로 사용될 수 있다.

건설 계획에서 시뮬레이션 기법은 효율적인 관리 도구로서 이용될 수 있기 때문에, 꾸준한 연구와 그에 따른 개발이 수행되어 왔다. 천진용등(2005)의 연구에서는 사이클론을 활용하여 NATM 터널공정에 대한 시뮬레이션 모델 구현과 생산성 향상 분석을 수행하였으며, 서형범등(2006)의 연구에서는 버력처리 시스템을 중심으로 한 데이터 분포 특성에 대한 분석을 실시하였다. 그러나 이러한 연구는 전체 공정에 대한 연구가 아닌 일부 공정의 장비 조합 및 생산성에 대한 분석과 분포 특성에 관한 내용이었다.

본 연구에서는 기존의 연구와 달리 터널 공정 전체에서 총 공사비 및 공사기간을 산정할 수 있는 모델을 만드는 것을 목적으로 하고 연구의 범위를 설정하였다. 도심지에서 시공되고 있는 인천공항철도 공사 구간 중 NATM공법으로 시공되고 있는 지하철 터널공사 구간을 대상으로 하였다. 현장을 가장 잘 반영할 수 있는 공정순서를 토대로 한 모델을 개발하고 이 모델에 측정된 데이터를 고정값, 지수, 베타, 삼각분포로 입력할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 공사 초기단계에 총 공기와 공사비를 예측할 수 있도록 하여, 의사결정의 수단으로 활용하고, 각종 분포를 적용한 데이터를 축적하여 향후 공사에 활용할 수 있는 도구로 활용하고자 한다.

* 일반회원, 인하대학교 대학원 토목공학과, 석사과정
daebak_life@hotmail.com

** 일반회원, 인하대학교 대학원 토목공학과, 박사과정
ok4455@iudc.co.kr

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

2. 시뮬레이션 모델 개발

2.1 현장 개요 및 대상 구간

본 연구의 대상 현장은 인천공항철도 공사 구간 중 NATM 터널로 시공되고 있는 2,180m의 00건설 지하철 터널공사 구간이다. 전체 2,180m의 구간 중 대상 공정에 해당하는 시기는 최초 수직구를 개착한 후로서, 공사의 초기 단계에 해당한다. 발파 후 파편이 비산되는 거리가 있기 때문에 안전거리를 확보하기 위하여 한 쪽 막장이 60m씩, 양쪽 막장 사이의 거리가 120m가 이격될 때까지는 1일 2발파를 실시할 수 없는 양쪽 막장 각 60m의 구간에 대한 제한적 모델링을 구축하였다.

발파 후 발생하는 버력의 양은 1회 발파 시, 터널의 단면적이 대략 75m²이며 발파 시 굴진장이 1.2m이므로 약 90m³ 정도 되었다. 현장 기준으로 이는 15ton 덤프트럭으로 대략 10대정도 되는 분량이다.

2.2 제한 사항

본 연구의 대상 현장이 도심지에 위치한 지하철 터널 구간이고 폭약을 이용한 발파를 실시하므로, 공사는 여러 가지 제한 사항을 갖게 된다. 이 제한 사항은 모델링에 반영되었으며, 공정 프로세스의 사이클에 영향을 미치게 된다. 모델링에 반영된 제한 사항은 다음과 같다.

(1) 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.

(2) 발파 공정 중에는 안전을 고려하여야 한다.

프로세스 상 발파가 진행 중일 때는 비산 거리 확보가 되지 않을 경우 안전에 문제가 있으며, 현장 안전상황과 동일하게 다른 공정이 진행될 수 없도록 하였다.

(3) 지보 패턴이 구간 별로 상이하다.

본 연구의 대상 현장은 표 1과 같은 3개의 지보 패턴을 가지고 있다.

표 1. 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 1D 이상	풍화토층 및 풍화암층 1D 이하
1회 굴진장	1.2m	1.0m	0.8m
록볼트 간격	1.2m	1.0m	0.8m

지보 패턴은 모델링 구현 상 대상 현장과 동일하게 구간별로 구성할 수 없으므로, 대상 현장의 전체 구간을 실제 현장에서 쓰이는 3개의 지보 패턴에 해당하는 3개의 구간으로 나누었다. 즉, 현장의 평면도 및 종단면도를 보고 계산한, 각 지보 패턴에 해당하는 연장을 각각 합하여 연속된 하나의 구간으로 보아, 총 3개의 지보 패턴 구간

을 만들었다.

2.3 공정 프로세스

공정은 천공 및 마킹, 장약, 발파, 버력처리, 슛크리트, 지보설치, 록볼트 천공 및 정착이라는 주요 공정으로 구성되며, 그림 1에 현장 사진을 일부 제시하였다.

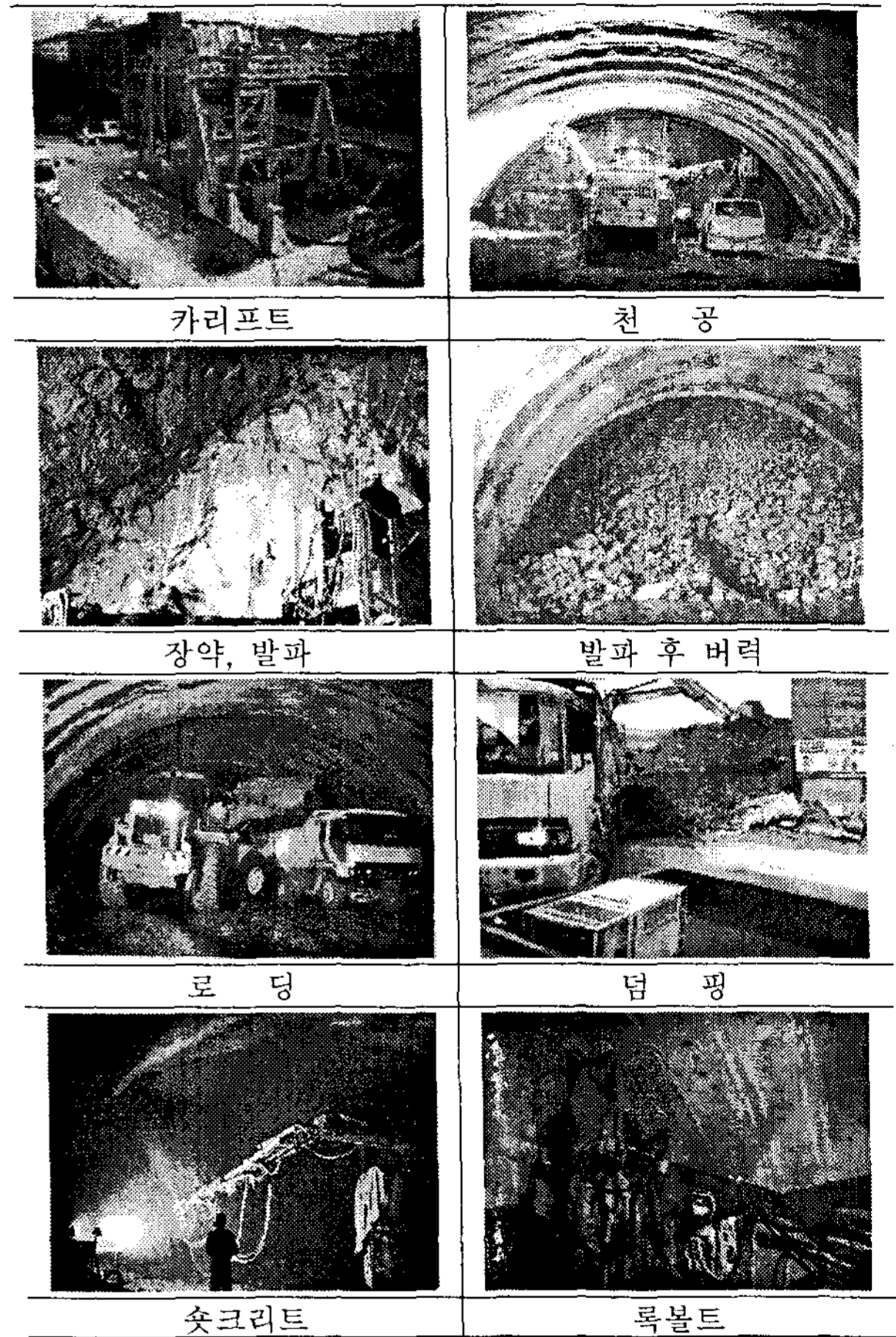


그림 1. 현장 사진

이러한 주요 공정은 Arena 시뮬레이션 상에서 구현되며, 주요 공정을 사이클로 모식하면 다음 그림 2와 같다.

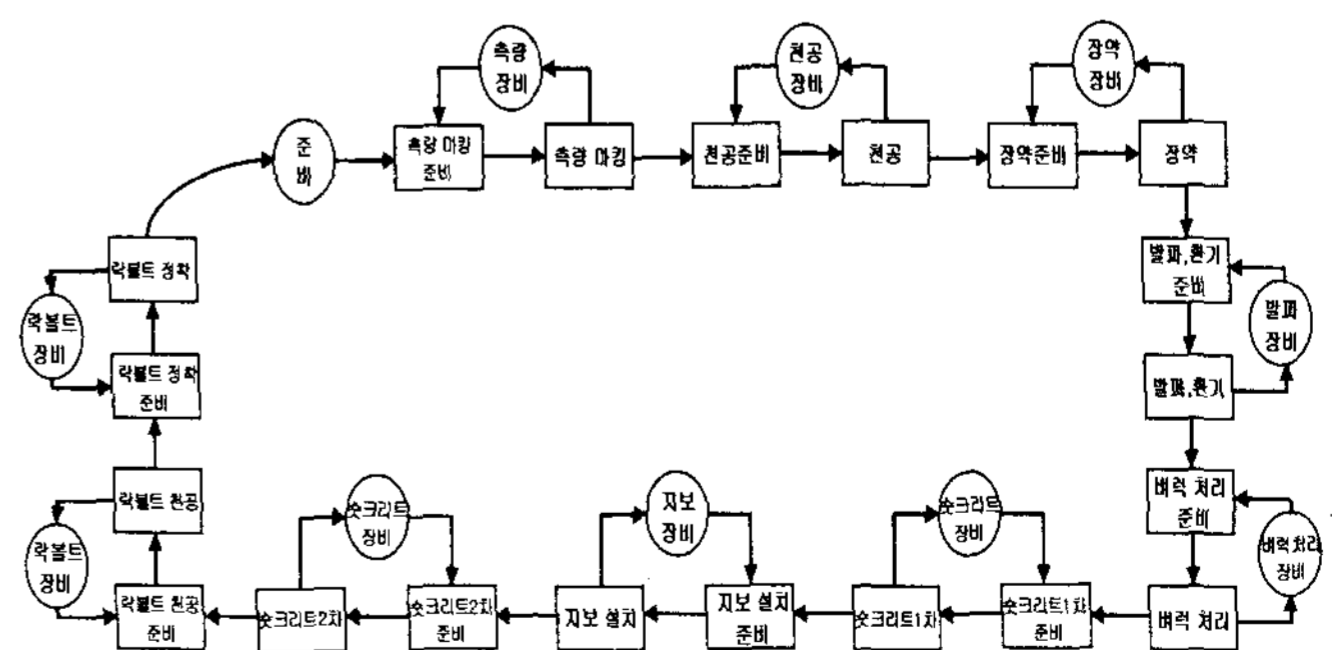


그림 2. 공정 프로세스

주요 공정을 제외한 부가적인 작업은 전체 공기에 큰 영향을 미치지 않으므로 표현하지 않는다. 각 공정은 유기적으로 연결되어 있으며, 반복적인 사이클로 수행된다.

공정 프로세스에는 현장에서 “돌관작업”이라 칭하는 대안적인 발파 공정을 조건으로 포함시켰다. 발파 공정이 1일 일출, 일몰 시에만 가능하도록 되어 있기 때문에 공정 지연 및 주민 민원 등의 원인으로 발파 공정 시간을 지킬 수 없게 되는 상황이 발생할 경우 공기 지연을 가져오게 된다. 이러한 경우 만회 대책의 일환으로 브레이커 등의 장비를 사용하여 굴착을 실시하는 것을 돌관작업이라고 한다. 이 돌관작업은 전체 공기를 산정하는데 있어서 중요한 개념으로 프로세스에 포함되었다.

2.4 모델링 구축

본 연구의 시뮬레이션 모델은 Arena 10.0을 기반으로 구축되었으며, VBA를 사용하여 사용자가 Arena 프로그램에 익숙하지 않더라도 쉽게 운영할 수 있도록 그림 3과 같이 사용자 인터페이스를 개발하였다.

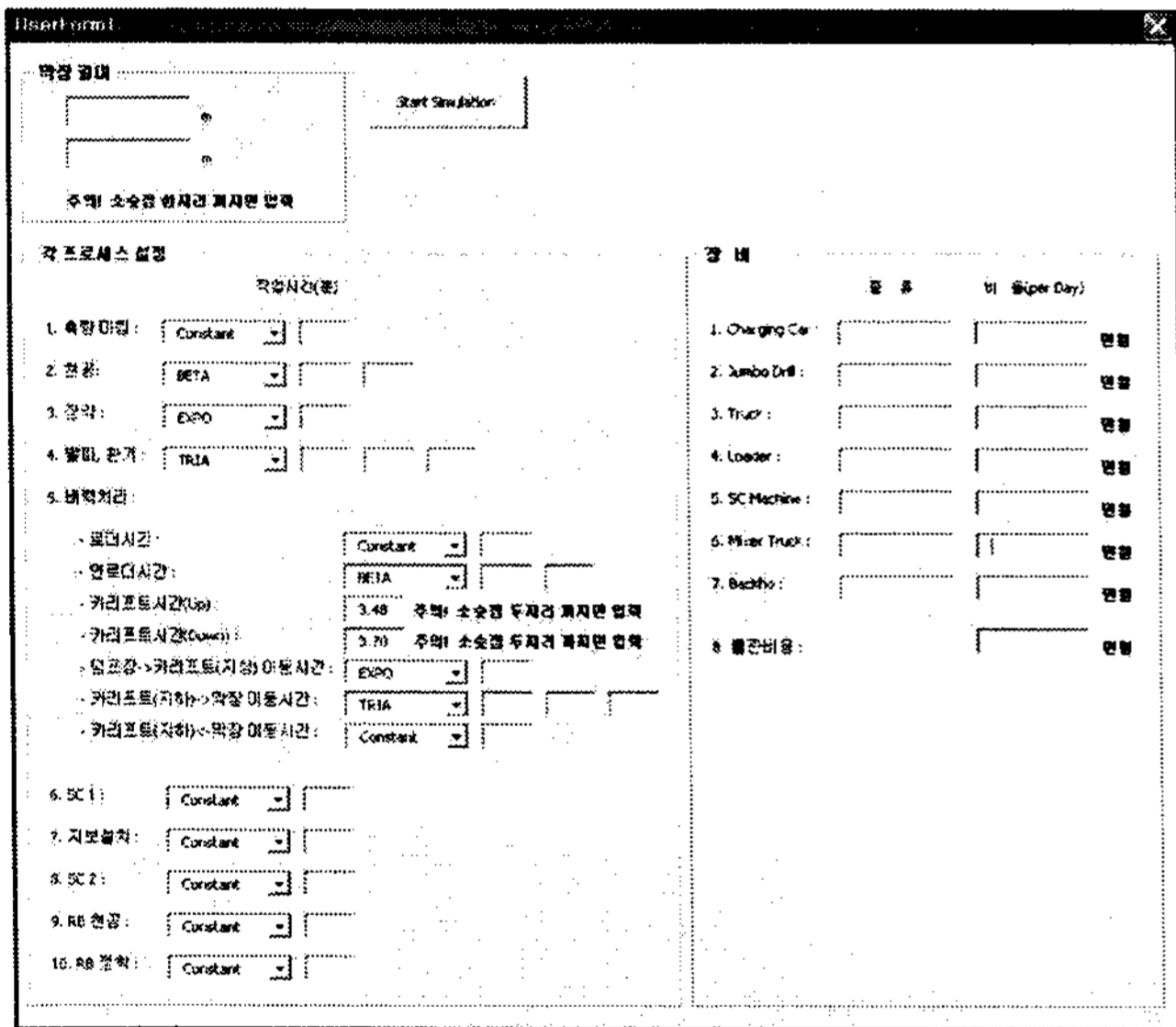


그림 3. 사용자 인터페이스

연구의 대상이 양방향 터널이므로 그림 3에 보이는 것처럼 각 방향별로 막장의 길이를 설정할 수 있으며, 프로세스별로 소요시간을 고정값, 베타, 지수, 삼각분포로 입력할 수 있다. 또한 각 장비의 소요 비용(만원/day)을 입력한다. 이러한 Input 데이터를 입력하고 시뮬레이션하면, Arena 상에 나타나는 최종 결과물에서 전체 공기와 소요 공사비를 Output으로 얻을 수 있다.

프로세스 타임을 여러 가지 분포로 입력할 수 있도록 한 것은 사용자가 다양한 분포를 활용하여 입력함으로써, 해당 현장에 적합한 결과값을 얻을 수 있도록 하기 위함이다. 제한 사항이 되는 발파 시간과 트럭이 싣고 나오는 버력의 양, 발파패턴은 Arena 내부에서 수정할 수 있다.

모델링 상에 구현된 “돌관작업”은 앞서 설명한 바와 같이, 현장 담당자의 판단에 의해 공기가 촉박하거나 사이클이 나오지 않았을 때 브레이커 등으로 추가 작업을 수행하는 것을 말한다. 모델링 상에서는 이러한 돌관작업을 수행함으로써 인해 얼마나 많은 공기를 단축할 수 있는지에 대해 집중하였으며, 결과값으로 돌관작업을 수행하

였을 때의 공기와 돌관의 횟수를 알 수 있도록 하였다. 또한 사용자가 돌관작업에 소요되는 비용을 입력하여 전체 공사비에 합해지도록 하여 의사결정에 이용할 수 있도록 하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 데이터 입력

시뮬레이션 모델에 입력된 값은 다음 표 2와 같으며,

표 2. Input Data

공정	분포	시간(분)
측량,마킹	Constant, Expo.	53
	Beta	42, 90
	Triangle	42, 58, 90
천공	Constant, Expo.	63
	Beta	51, 105
	Triangle	51, 69, 105
장약	Constant, Expo.	85
	Beta	32, 98
	Triangle	32, 80, 98
발파,환기	Constant, Expo.	71
	Beta	35, 82
	Triangle	35, 73, 82
로딩	Constant, Expo.	2.3
	Beta	1.98, 2.88
	Triangle	1.98, 2.21, 2.88
언로딩	Constant, Expo.	0.7
	Beta	0.47, 0.8
	Triangle	0.47, 0.69, 0.8
카리프트 업	Constant, Expo.	4.1
	Beta	3.67, 4.29
	Triangle	3.67, 4.18, 4.29
카리프트 다운	Constant, Expo.	3.7
	Beta	3.65, 3.78
	Triangle	3.65, 3.7, 3.78
지상 이동	Constant, Expo.	2.3
	Beta	1.82, 2.78
	Triangle	1.82, 2.27, 2.78
막장 후진이동	Constant, Expo.	5.3
	Beta	4.88, 8.3
	Triangle	4.88, 5.13, 8.3
막장 전진이동	Constant, Expo.	4.9
	Beta	3.18, 7.48
	Triangle	3.18, 3.59, 7.48
숏크리트 1차	Constant, Expo.	133
	Beta	85, 305
	Triangle	85, 142, 305
지보설치	Constant, Expo.	59
	Beta	49, 71
	Triangle	49, 58, 71
숏크리트 2차	Constant, Expo.	128
	Beta	93, 280
	Triangle	93, 142, 280
록볼트 천공	Constant, Expo.	56
	Beta	39, 74
	Triangle	39, 51, 74
록볼트 정착	Constant, Expo.	55
	Beta	41, 72
	Triangle	41, 55, 72

입력된 데이터는 본 연구의 현장에서 실측한 값과 현장에서 보유하고 있는 기록을 토대로 한 것이며, 사용자 인터페이스에 입력할 수 있는 선택 가능한 분포로 나누어져 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 사이클 숫자는 반복적인 횟수를 통한 안정된 결과 값을 제공하기 위하여 시뮬레이션 사용자에게 의해 결정된다. 본 연구에서는 사이클 숫자를 100으로 결정하였다. Input Data를 통하여 얻어진 결과값은 다음 표 3과 같다. 공사비용은 현재까지의 연구로는 돌관비용의 계상에 대한 논의가 필요하여 결과값으로 제시하지 않는다.

표 3. Output Data

분포	총 공사기간(일)			돌관횟수(회)		
	최소	평균	최대	최소	평균	최대
Const.		52			100	
Expo.	44	49	53	71	82	90
Beta		27			102	
Tria.	52	53	54	91	99	100

대상 현장의 실제 안전거리 확보 이전 총 120m의 공사 기간은 약 6개월이었다. 돌관이 하루에 한 번도 발생하지 않았다고 가정하였을 때, 고정값의 경우 총 152일이 소요된 것이므로, 실제 현장 공기보다 작다. 그러므로, 현 모델은 현장을 구현하는데 무리가 없다고 판단된다. 각 분포에서 돌관작업을 약 100회 실시하였을 때, 평균 50여 일의 공사기간이 소요되는 것으로 나타났다. 베타분포만으로 구성하였을 때는 결과값이 불안정하게 나타났다. 이는 모델링의 간소화를 위하여 전체 공정에 동일한 분포를 적용하였기 때문이며 향후 연구에서는 각 공정에 다양한 분포를 적용하여 신뢰성 높은 결과값을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 도심지 지하철 터널 공사 중 NATM공법을 사용하는 양방향 터널에 대하여 공사 초기 단계의

공정 프로세스에 대한 모델링을 하고 그 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 기존의 연구는 전체 공정에 대한 것보다는 일부 공정의 장비 조합 및 생산성에 대한 것이었다. 그러나, 본 연구는 전체 프로세스를 도심지에서 발생 가능한 제한 사항과 공정을 최소화하기 위한 돌관작업이라는 개념을 사용하여, 공사 초기 단계에서 총 공사비 및 공사비용을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

터널공사를 포함하여 건설 산업은 다양한 공정이 유기적으로 연결되며 반복적인 사이클을 갖는 경우가 잦다. 이러한 경우에 시뮬레이션은 발생 가능한 상황을 예측하고 관리할 수 있는 유용한 도구로 사용된다. 본 연구에서 개발된 모델은 극히 제한적인 공사구간에 관한 내용이며, 차후 연구를 통하여 공사구간 전체를 반영할 수 있는 모델을 개발할 수 있을 것이다. 후속 연구에서는 비용측면에 대한 내용을 추가하여 더 객관적인 분석을 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김경주, "건설 공정 시뮬레이션을 위한 독립 자원모델 구축방안 연구", 대한토목학회논문집, 제20권 제4D호, 2000, pp. 389-401
2. 이한수, "공정 시뮬레이션을 활용한 건설 생산성 향상에 관한 연구", 석사학위논문, 2002
3. 천진용, 우성권 "시뮬레이션 모델링을 통한 NATM 터널공정 생산성 향상 분석, 대한토목학회논문집, 제25권 제3D호, 2005, pp. 457-462
4. 이시욱, 신정민, 우성권 "카리프트의 성능 변화에 따른 터널공사 버력처리 공정 생산성 분석 연구", 한국건설관리학회 학술발표대회논문집, 2006, pp.593-596
5. 서형범, 정원지, 김경민, 김경주 "건설장비 운영 데이터 분포 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제26권 제4D호, 2006, pp.661-670
6. W.David Kelton, Randall P.Sadowski and David T. Sturrock, "Simulation with Arena, 3th", McGrawHill, 2005

Abstract

Estimation of total construction period and cost in the early stage of the project is very important. Simulation is one of the method considering proper compound such as tools, materials for effective construction management and estimating and analysing affected factors to construction through making suitable process. This study is to develop the model by using Arena simulation considering limited facts like blast time in a subway tunnel construction of both sides inner city. Developed model is easily useful type by using Visual Basic program, and can obtain total construction period and cost as a result. It could be used as a decision making tool in early stage of the construction.

keyword :tunnel construction, simulation, Arena, decision making