

# 터널 버력처리 공정의 시뮬레이션 적용성에 관한 연구

## Application of Discrete Event Simulation on Tunnel Muck Hauling Operations

김 경 민\* · 서 형 범\*\* · 황 호 정\*\*\* · 김 경 주\*\*\*\*

Kim, Kyoungmin · Seo, Hyeong Beom · Hwang, Ho Jung · Kim, Kyong Ju

### 요 약

시뮬레이션은 건설관리를 위한 도구로서 많은 잠재력을 가지고 있으나, 국내의 경우 대단히 제한된 범위에서 마이크로 프로세스의 공정 평가에 적용을 시도하고 있는 단계에 있다. 시뮬레이션을 건설 공정에 적용하기 위해서는 현장 특성을 반영한 입력 데이터 수집과 모델 구축에 상당한 노력이 필요하다. 본 연구에서는 시뮬레이션 모델 구축을 위한 장비 운영 데이터 활용과 시뮬레이션 모델 구축 방법론을 소개하고, 현장 측정 데이터와의 검증을 수행하였다. 그리고 버력 처리 시스템의 전체 운행 주기(Cycle Times)를 결정하는 주요 요인을 분석하고 장비운영 계획을 수립하기 위한 시뮬레이션 활용 방안을 제시하였다.

키워드 : 시뮬레이션(Simulation), 사건중심 시뮬레이션(Event-oriented Simulation), 건설 장비(Construction Equipment)

### 1. 서 론

도로, 터널, 댐 그리고 항만 등과 같은 대규모 건설 사업은 투입되는 자원이 대량·대형화되고, 작업공정이 복잡하게 연결되어 있어 엔지니어의 직관과 경험을 바탕으로 공정 계획을 수립하기에는 한계가 있다. 건설관리 도구로서 시뮬레이션을 활용하여 다양한 공정계획 시나리오를 검증할 수 있다면 시간과 비용 측면에서 상당한 절감 효과를 얻을 수 있다. 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 매개변수들) 아래에서 시스템의 거동을 실험함으로써 그 시스템의 거동을 사전에 예측하거나, 다양한 목적(시간, 비용의 효율성, 위험분석 등)을 만족시키는 시스템을 설계하기 위한 도구이다(김경주 2000).

국외에서는 콘크리트 댐의 시공공정과 터널공사의 버력처리 공정(Vanegas et al, 1993), 불연속 사건 시뮬레이션을 이용한 토공운반 시스템 분석(Smith et al, 1995), 시뮬레이션을 이용한 댐 시공공정의 쇄석 운반로에 대한 대안평가(Ioannou 1999) 등에 적용되고 있다. 국내에서는 웹 사이클론(Web-Cyclone)을 이용한 NATM 터널공정의 생산성 향상 분석(우성권 외 2005), Contract Net을 이용한 자동화 토공장비 할당 모델 개발에 대한 연구(김성근 외 2005) 등이 발표되고 있으며, 마이크로 프로세스의 공정 평가와 시뮬레이션 모델 개발 등에 적용을 시도하고 있는 단계에 있다.

시뮬레이션 모델링을 위한 데이터 수집은 현장 여건이 반영된 실제 운행주기(Cycle times)에 근간한 데이터를 측정하고 장비 운영 데이터의 분포특성을 분석함으로써 시뮬레이션의 입력 데이터로 활용할 수 있다. 실제 현장 데이터를 측정하고 운영 데이터의 분포특성을 분석하여 축적한다면, 유사 공종의 경우 장비 운행시간의 차이는 있으나 공정계획 수립 시 재활용이 가능하다. 또한 건설 주요 공정에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 유사 공종에 대해 최소한의 수정으로 적용이 가능하다. 본 연구에서는 현장 장비 운영 데이터의 활용과 주요 공정에 대한 시뮬레이션 모델의 적용성을 검증하여 건설 공정계획 수립 시 시뮬레이션의 활용도를 높이고자 한다.

영동선 동백산~도계간 철도이설공사 현장에서 측정한 데이터를 활용하여 시뮬레이션 모델링의 입력값으로 적용하였다. 사건 중심의 시뮬레이션 모델 구축 방법론을 적용한 대표적인 프로그램

\* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과, 박사과정, kmkim@wm.cau.ac.kr  
\*\* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과, 석사과정, hbseo@wm.cau.ac.kr  
\*\*\* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과, 석사과정, civilho@naver.com  
\*\*\*\*중신회원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수, 공학박사, kjkim@cau.ac.kr

공종	소요장비	대수	소요시간	비고
전공	J / D	1	1시간	
R/B시공	차징카	1	1시간	
장약	차징카	1	50분	
발파			10분	
환기			20분	35%
버력처리	B/H(0.6) D/T(15ton)	1 6	4시간	
Sealing	C / P	1		
	M / T	2	1시간	
지보설치	차징카	1	1시간	
S/C타설	C / P			
	M / T		2시간	
	S / M	1		

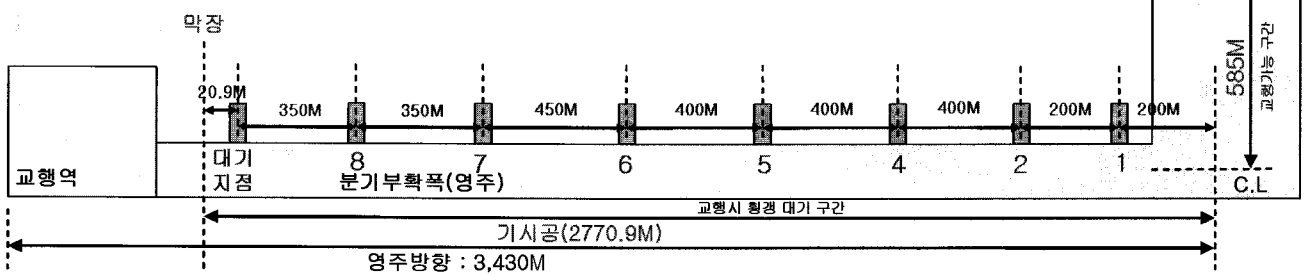
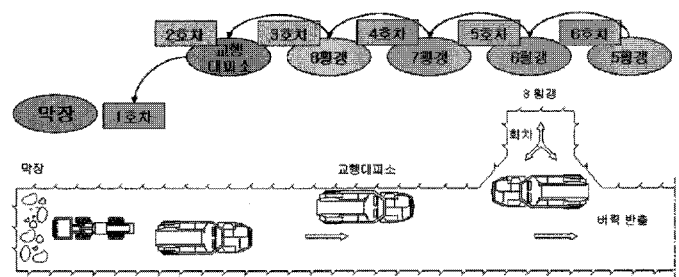


그림 1. 현장 현황 및 막장 교행 프로세스

램인 SIGMA (Schruben 1992)을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, 시뮬레이션의 수행 후, 결과 분석을 통하여 현장에서 측정된 데이터와의 검증이 수행하였다. 또한 버력처리 시스템의 운행 주기(Cycle Times)를 결정하는 주요 요인을 분석하였으며, 장비 운영 계획의 수립에 있어서 시뮬레이션의 활용 방안을 제시하였다.

## 2. 현장 프로세스 분석

### 2.1 현장 현황

본 연구에서 적용한 현장은 영동선 동백산~도계간 철도 이설 건설공사로서 총 연장 16.2km인 장대 터널이며, 구간의 높이차로 인해 루프(Loop)형으로 설계되었다. 영주방향 현장의 버력처리 시스템은 사갱입구로부터 막장까지의 거리에 따른 작업 효율성을 고려, 백호우와 덤프트럭을 이용한 장비조합으로 구성되어 있다. 또한, 12시간을 단위로 일일 두 차례 발파 및 굴착이 이루어지며 버력처리 공정은 전체 공정의 35%로써 가장 큰 비중을 차지하고 있어 시뮬레이션 모델 구축의 대상으로 선정하였다. 현장 현황과 터널 굴착 주기 및 막장에서의 교행 프로세스는 그림 1과 같으며, 표 1에서는 버력처리 공정이 이뤄지는 구간을 운행 조건에 따라서 분류하였다.

### 2.2 현장 작업 프로세스

터널 버력처리 공정의 전체 공정에서 차지하는 비율과 소요되는 시간은 임시 사토장으로부터의 거리 및 막장에서의 작업 여건(암질 및 지하수, 근접 횡광과의 거리 등의 변수)에 따라서 변화된다. 또한, 사갱입구로부터 C.L.(Center Line)에 이르기까지는 막장 방향 진입구간의 작업반경이 넓게 조성되어서 두 대의 트럭이 서로 교차하여 지나가는 것이 가능하다. 그러나 C.L.에서 막장으로 굴착이 진행되는 구간은 터널 단면이 단선으로

표 1. 버력처리 공정의 구간별 분류

Group No.	구간	거리 (m)	비율 (%)	이동 조건		
				적재 여부	차량 위치	교행 시 대기여부
1	사갱입구 ~ C.L. (갱내본선입구)	585.0	8.35	빈차	사갱내 이동	교행가능
2	C.L. ~ 대기지점	2,750.0	39.20	빈차	본선내 전진	교행시 횡광 대기
3	대기지점 ~ 막장	20.9	0.30	빈차	본선내 후진	
4	막장 (Backhoe 작업시간 / 적재시간)	-	-	적재중	막장내 정지	-
5	막장 ~ 대기지점	20.9	0.30	만차	본선내 출발	교행시 횡광 대기
6	대기지점 ~ C.L.	2,750.0	39.20	만차	본선내 전진	
7	C.L. ~ 야적장	785.0	11.20	만차	사갱내 이동	교행가능
8	야적장 ~ 사갱입구	100.0	1.45	빈차	갱외부 이동	교행가능
	총합	7,011.8	100.00			

계획되어 협소하므로 200m, 400m간격의 횡갱을 활용하여 트럭간의 교행이 가능하게 하였다. 막장과 바로 직전의 횡갱간의 거리에 따라 작업 효율이 크게 좌우되는데, 트럭 한 대가 적재를 완전히 끝내고 마지막 횡갱을 통과해야만 두 번째 트럭이 마지막 횡갱으로부터 막장까지 후진해서 진입이 가능하기 때문이다.

현장에서 운용되는 트럭의 총 대수는 6대로, 버력처리 공정이 시작되면 백호우를 선두로 하여 일정간격으로 진입을 한 뒤, 막장을 비롯하여 트럭간의 교차가 가능하기 위해 배수로에 매설한 강관(Pipe)과 막장으로부터 인접한 각 횡갱에서 순차적으로 대기한다. 적재가 시작되고 1호차부터 순차적으로 막장을 이탈하면 다음 트럭들은 한 횡갱 구간씩 이동하여 대기하는 방식으로 진행된다.

일반적으로 발파에 의한 터널 굴착 길이는 3.0~3.5m정도인데 본 현장에서는 막장의 압실이 불량하여 1회 굴착 시 굴진 길이는 1.5m로 평균굴착량의 절반 정도이며, 버력량은 1.5m×60.0m<sup>2</sup>(터널단면적)=90.0m<sup>3</sup>이 발생한다. 평균적으로 10대~12대 분량(트럭 한대당 적재용량 8.0)의 버력이 발생하기 때문에 트럭들은 보통 2번의 적재를 수행하게 되는데 본 현장 측정 시에는 버력량이 80.0m<sup>3</sup>(트럭 10대 분량) 정도 발생하였다. 첫 번째 운행 주기 때는 막장에서 적재하는 트럭으로 인하여 다음 트럭들이 대기하게 되지만 두 번째 운행 주기부터는 여러 대의 트럭이 동시에 대기하는 상황은 발생하지 않는다. 교행 시에는 막장으로부터 사갱입구로 이탈하는 적재된 트럭에게 우선권을 부여하는 원칙을 가지며, 횡갱에서 적재된 차량이 지나갈 때까지 대기하는 경우로 인하여 시간 지연이 발생한다. 그림 2는 적재 중인 트럭과 대기소 그리고 임시 적치장 전경을 나타내고 있다.

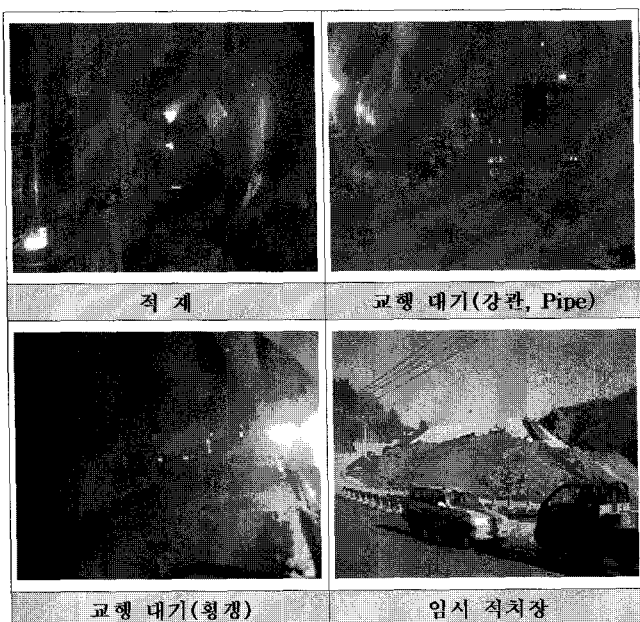


그림 2. 현장 사진

### 2.3 현장 데이터 수집 및 분류

사갱입구에서 출발하는 작업 차량에 탑승하여 구간별 이동 시간, 횡갱 내 대기 시간, 버력의 적재를 위한 대기 시간, 적재 시간, 적재 후 구간 별 막장 이탈 시간 그리고 임시 사토장에서 적재된 버력의 덤핑 시간 등을 측정하였다. 표 2와 같이 실제 수행된 현장 프로세스 및 데이터의 시간 값을 속도로 계산한 후 분류된 구간별로 속도 데이터들의 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)를 구하여 통계적 수치로서 나타내었다. 작업 차량 간 무선 교신을 통하여 차량 간 거리 및 위치를 파악함으로써 갱내 진출입 차량 간의 양방향 교행 발생 시 이동 특성도 분석하고자 하였다. 본선 내부 진출입 구간(C.L.~대기지점까지의 진입구간 및 막장~C.L.까지 이탈구간)에서 획득한 데이터를 시물레이션 모델링 구축에 있어서 입력 데이터로 활용하였다.

표 2. 데이터의 그룹별 통계치

구 간	위 치	영주 방향(km/h)		
		평균	표준편차	COV
사갱입구 ~ C.L.		8.27	0.17	0.02
C.L. ~ 대기지점		7.64	1.15	0.15
대기지점 ~ 막장		0.80	0.42	0.52
막장(상차시간)		483.75(sec)	127.44(sec)	0.26
막장 ~ 대기지점		1.20	-	-
대기지점 ~ C.L.		8.61	1.64	0.19
C.L. ~ 야적장		7.28	4.38	0.60
야적장 ~ 사갱입구		3.00	-	-

주) 서형범·정원지·김경민·김경주(2006). "건설 장비 운영 데이터 분포 특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -." 대한토목학회논문집, 제26권 제4호, 대한토목학회, pp. 661-670.

## 3. 버력처리 공정 시물레이션 모델 구축

### 3.1 시물레이션을 위한 기본 가정

본 연구에서는 교행 상황을 구현하고자 한번 이상의 운행 주기(Cycle Times)가 발생한 영주방향의 버력처리 공정을 대표적으로 적용하였다. 버력처리 공정은 적재 → 트럭 이동 → 덤핑의 반

1) 본 연구에서 적용한 현장 측정 데이터와 측정 방법에 대한 내용은「서형범·정원지·김경민·김경주(2006). "건설 장비 운영 데이터 분포 특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -." 대한토목학회논문집, 제26권 제4호, 대한토목학회, pp. 661-670.」에 설명되어 있다. 실제 현장에서 측정된 데이터의 분포 특성을 정규분포, 삼각분포, 베타분포를 이용하여 분석하였으며, 베타분포의 특성과 가장 유사한 경향을 나타내었다.

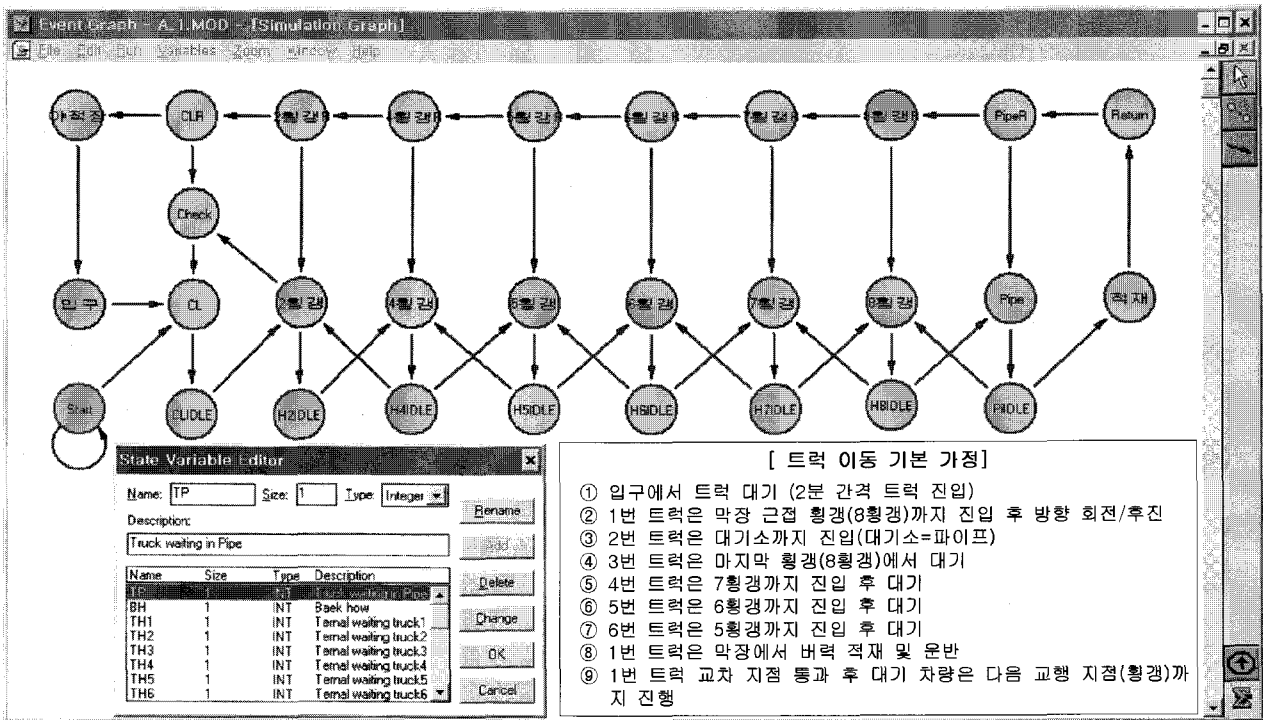


그림 3. SIGMA를 활용한 시뮬레이션 모델 구축

복적인 주기로 이루어지며, 적재 장소와 교행 장소(회갱 및 대기소)에서 트럭의 대기가 발생한다. 일반적으로 철도 터널은 도로 터널보다 터널 단면이 작아 트럭의 교행이 회갱과 대기소에서만 가능하며, 이로 인하여 트럭의 이동 중 대기시간이 발생하게 된다. 따라서 막장에서 적재가 진행되면 트럭의 대기 행렬이 발생하게 되는데, 막장의 작업장소가 협소하여 막장 부근의 대기소(배수로에 매설한 강관)와 각 회갱에서 트럭이 대기하게 된다.

실제 현장 상황을 시뮬레이션으로 구현하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 현장 조건 : 적재 장비 - 백호우, 트럭 투입 대수 - 6대, 버럭처리량 - 약 80m<sup>3</sup>(15ton 트럭 10회 분량)
- 2) 트럭의 투입은 사갱입구에서 약 2분 간격으로 실시한다(현장 상황 반영 : 트럭의 투입 시간은 회갱간 이동 시간을 초과하지 않으며, 순차적으로 한 대씩 투입).
- 3) 각 회갱에서 트럭의 진행은 다음 회갱이 IDLE 상태에서만 진입 가능 : 작업 초기에 트럭은 일정 간격으로 투입되어 막장(1번 트럭, 적재 수행) - 대기소(2번 트럭) - 8회갱(3번 트럭) - 7회갱(4번 트럭) - 6회갱(5번 트럭) - 5회갱(6번 트럭)에서 대기하며, 막장에서의 적재가 끝나면 1번 트럭이 지나가는 회갱의 차량이 다시 막장으로 한 회갱씩 진행하게 된다.
- 4) 막장 방향 차량과 야적장 방향 차량의 교행 발생 시 야적장 방향 차량 우선통과, 막장 방향 차량은 회갱에서 대기한다.

- 5) C.L. → 야적장(임시사토장) → 사갱 입구 → C.L. 구간 내에서는 트럭의 교행이 허용되며, 대기상태가 발생하지 않는다.

### 3.2 시뮬레이션 모델 구축

본 연구에서는 시뮬레이션 모델의 구축을 위해서 복잡한 건설현장의 다양한 상황을 표현하는데 있어 필요한 여건을 제공하는 사건중심(Event-Oriented)의 시뮬레이션 모델링 기법을 적용하여 실제 터널 버럭처리 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 불연속 사건 모델 구축을 위한 단계적 절차는 다음과 같다.

#### 1) 공정에 포함된 개체들과 각 개체들의 속성 값

- ① 트럭
  - 총 트럭 대수
  - 트럭의 구간별 이동 속도(시간)
  - 트럭 식별 번호
  - 야적장에서의 덤핑 시간
  - 야적장에서의 덤핑 횟수
  - 각 회갱 및 대기소에서의 대기 시간
- ② 백호우
  - 백호우의 버킷 용량
  - 트럭 1대 버럭 적재 시간

- 적재 완료 후 다음 적재 작업까지 대기 시간
- ③ 각 횡갱 및 대기소(파이프 매설 장소)
  - 각 횡갱 및 대기소간 이동시간
  - 각 횡갱 및 대기 지점(파이프)에서 교행 간 발생하는 양보 차량의 대기 시간

**2) 각 개체별 상태 변수**

- ① 입구(START)에서 출발하는 트럭의 대수 I(총 6대)
- ② 막장으로 진입하는 트럭에 대한 각 횡갱별 상태 변수 TH# : 비었을 경우 TH#=0, 트럭이 횡갱에 대기할 경우 TH#=1, 트럭이 횡갱으로 진입하고 있는 경우 TH#=2
- ③ 막장 인접 대기소(Pipe 매설지점)의 상태변수 TP, RP : 비었을 경우 TP & RP=0, 대기 지점에 트럭이 대기할 경우 TP & RP=1, 트럭이 대기 지점으로 진입하는 경우 TP=2
- ④ 막장의 백호우의 상태 변수 BH : 휴지 상태 BH=0, 작업 상태 BH=1
- ⑤ 막장에서 회귀하는 트럭에 대한 각 횡갱별 상태 변수 RH# : 양 구간 사이에 이동하는 트럭이 없을 경우 RHn=0, 회귀하는 트럭이 n번 횡갱과 n+1번 횡갱 사이에 이동하고 있을 경우 RHn=1
- ⑥ 야적장에 도착하는 트럭의 덤핑 횟수 D

**3) 각 시스템의 상태 변수들이 변화하는 사건(Event)의 정의**

- ① 사갱 입구에서 1번 트럭이 최초 진입하면서 공정이 시작되며, 1번 트럭의 사갱 입구 진입 후, 2분 간격으로 "START" 사건(트럭 투입)이 발생
- ② 트럭이 횡갱에 도착할 때 횡갱 내 트럭이 대기하는 상태의 "#횡갱" 사건(횡갱 도착)과 트럭이 횡갱을 벗어났을 때 횡갱이 비어 있는 상태의 "#횡갱 IDLE" 사건(횡갱 출발) 발생
- ③ 트럭이 막장 직전에 인접하여 있는 대기소 (Pipe 매설지점)에 도착할 때 Pipe 지점에 트럭이 대기하는 상태인 "Pipe" 사건(대기소 진입)과 트럭이 대기소를 벗어났을 때 Pipe(대기소) 지점이 비어 있는 상태인 "PIPE IDLE" 사건(대기소 출발 및 막장 진입) 발생
- ④ 트럭이 막장에 도착함과 동시에 백호우가 적재를 실행하는 "적재" 사건이 발생하며 이때 백호우는 휴지 상태에서 작업 상태로 변경(트럭이 적재를 끝내고 막장을 벗어나면서 백호우는 작업 상태에서 휴지 상태로 변환)
- ⑤ 버력을 싣고 막장에서 야적장 방향으로 향하는 트럭이 각 횡갱을 지나치면서 막장 진입을 위해 전방 횡갱에 도착한 트럭을 횡갱 내에서 대기시킨다. 회귀하는 트럭은 진입 트럭이 대기하는 횡갱을 지나가면서 횡갱 내 대기 중인 진입

- 트럭을 진행을 진행시키는 "#횡갱" 사건(횡갱 진입) 발생
- ⑥ 트럭이 야적장에 도착하여 버력을 덤핑하는 "야적장" 사건(덤핑 실시) 발생
- ⑦ 덤핑 작업을 마친 트럭은 다시 입구로 이동하여 "입구" 사건(입구 통과)을 발생시키며 횡갱으로 진입하여 버력처리 운행 주기(Cycle Times) 다시 반복

**4) 각 사건에서의 상태 변수들의 변환 및 사건 간의 상관관계**

- ① 트럭 투입(START)
  - $I=I+1$  (트럭의 투입 대수 계산)
  - 트럭 투입 대수가 6대이므로 I<6의 조건까지 실행하도록 계획
- ② 횡갱(#횡갱, #횡갱R)
  - TH#=0 (막장 방향으로 진입 시 횡갱의 상태를 변환)
  - RH#=0 (야적장 방향으로 회귀 시 횡갱의 상태를 변환)
  - 막장 방향과 야적장 방향의 트럭 이동을 위해 "횡갱(#횡갱, #횡갱R)" 사건이 발생하도록 계획
- ③ 대기소(TP & RP)
  - TP & RP = 0 (대기소의 상태를 변환)
  - 막장 진입을 위한 트럭의 이동을 위해 "대기소(Pipe, PipeR)" 사건이 발생하도록 계획
- ④ 운반(트럭 이동)
  - 운반, 즉 트럭의 이동은 앞의 횡갱 및 대기소가 비었을 경우와 막장에서의 적재가 휴지 상태일 때 "트럭의 이동(횡갱, 대기소, 막장)" 사건이 발생하도록 계획
- ⑤ 버력 적재
  - BH = 0 (백호우의 적재 상태를 변환)
  - 버력 적재를 위한 작업시간이 경과한 후, 트럭이 운반 상태로 변환
- ⑥ 덤핑
  - $D = D+1$  (덤핑 횟수 계산)
  - 총 버력처리량이 트럭 10회분이므로 D<5의 조건까지 실행하도록 계획

각 사건의 상태 변화와 사건 간의 상관관계 정의를 통하여 버력처리 시스템의 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, 사건 중심의 시뮬레이션 모델링을 지원하는 소프트웨어인 SIGMA(Schruben 1992)를 사용하였다(그림 3). 각 구간별 지연 시간(Delay time)은 표 2와 같이 현장에서 측정된 시간 데이터를 속도로 변환한 후 그 값들의 평균값(평균 속도)을 이용하여 도출된 시간값을 입력하였으며 막장에서의 적재 시간 역시 측정 값들의 평균 적재 시간값을 입력하였다. 이는 실제 현장을 시뮬레이션으로 재현함에 있어 구축된 모델의 적정성을 검증하기 위함이다.

표 3. 현장 데이터 분석

현장 측정 데이터항목	소요시간(분)	백분율(%)
진입 시 이동시간	25.8	14.9
회귀 시 이동시간	27.6	15.9
교행에 의한 지체시간	13.43	7.7
적재를 위한 소요시간	106.8	61.5
총 소요시간	173.7	100.0

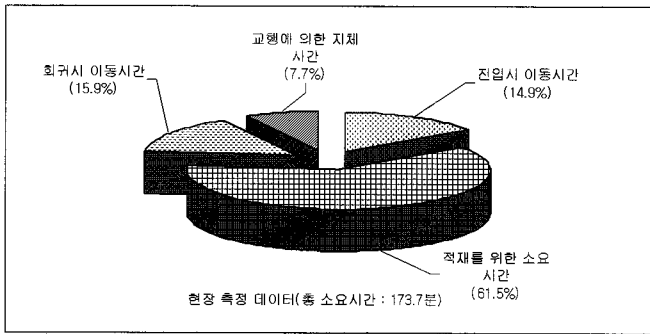


그림 4. 현장 데이터 분석

표 4. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 데이터항목	소요시간(분)	백분율(%)
진입 시 이동시간	25.8	14.6
회귀 시 이동시간	27.6	15.6
교행에 의한 지체시간	17.04	9.6
적재를 위한 소요시간	106.8	60.2
총 소요시간	177.3	100.0

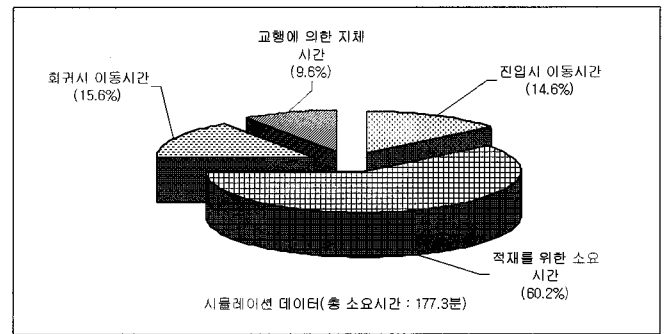


그림 5. 시뮬레이션 결과 분석

3.3 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 모델의 적정성을 검증하기 위하여 버력처리 공정의 측정 데이터와 시뮬레이션 결과 데이터를 비교·분석하였다. 버력량을 처리하는데 소요된 시간은 현장 측정은 약 174분이고, 시뮬레이션 결과는 약 177분으로 거의 유사하게 나타났다.

현장 측정으로부터 얻어진 데이터들의 분석 결과는 표 3과 그림 4에 나타내었다. 1회 굴착의 버력량을 처리하는데 소요된 전체 시간은 약 173.7분으로써, 구성 비율은 진입 시 이동시간 14.9%, 회귀 시 이동 시간 15.9%, 교행에 의한 지체 시간 7.7%, 적재를 위한 소요 시간 61.5%로 나타났다. 전체 작업 중에서 백호우의 적재 시간이 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 터널의 연장으로 인해 트럭의 이동시간이 그 다음 비중을 나타내었다.

시뮬레이션 데이터로부터 얻어진 분석 결과는 표 4와 그림 5과 같이 전체 소요 시간은 177.3분이며, 구성 비율은 진입 시 이동 시간 14.6%, 회귀 시 이동 시간 15.6%, 교행에 의한 지체 시간 9.6%, 적재를 위한 소요 시간 60.2%로써 현장 측정 결과와 거의 유사한 것으로 분석되었다. 소요 시간을 비교해 보면, 교행에 의한 지체 시간에 의해 차이를 나타내는데 실제 현장에서는 첫 번째 트럭의 덤핑 후 터널 재진입시 트럭 간 상호 무전 연락을 통해 막장에서의 적재 대기열이 '0'이 되기 전에 막장에 도착하도록 양보했기 때문이다. 진입 시 이동 시간은 첫 번째 트럭의 적재 장소까지 이동하는데 소요된 시간이며, 회귀 시 이동 시간은 마지막 트럭이 적재 후 야적장에 적치하고 입구에 도착한 시간이다. 그 외 트럭(2~8번 트럭)은 백호우의 적재가 진행되는

동안 한 횡갱씩 전진하게 된다. 교행에 의한 지체 시간은 첫 번째 트럭이 덤핑 후 다시 적재하기 위해 터널 내로 진입하여 적재 차량에 의해 횡갱에서 대기한 시간으로써, 백호우의 작업 휴지 시간으로 분석되었다. 최초 6대의 트럭이 진입하여 각 대기 장소에서 적재 대기열을 이루는데, 대기열이 '0'이 되기 전에 첫 번째 트럭이 덤핑 후 적재 장소에 도착하는 것이 백호우의 작업 효율을 높이는 것으로 나타났다.

본 현장의 버력처리 시스템에서 가장 높은 비율을 나타내는 장비의 운행 주기는 백호우의 작업 시간으로 분석되었다. 현재 위치에서는 막장의 암질 여건으로 인하여 1회 굴착량이 적어 적재 장비로써 백호우를 활용하고 있는데, 적재 효율을 높이기 위

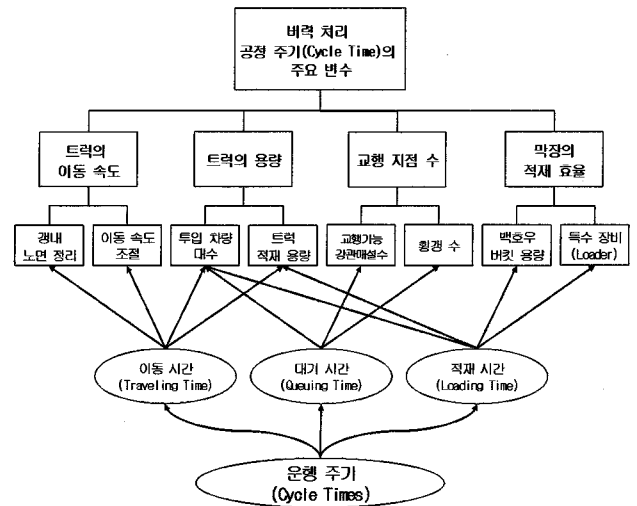


그림 6. 버력처리 시스템의 운영 주기(Cycle Times) 주요 변수

해서는 백호우의 버킷 용량을 높이거나 로더와 같은 특수 장비를 적용하는 것이 처리 시스템의 전체 운행 주기를 단축할 수 있는 가장 중요한 요소로 판단된다.

### 3.4 시뮬레이션을 활용한 장비 운영계획

버력처리 시스템의 전체 운행 주기는 야적장에서 버력을 덩핑하는 시간을 제외한 이동 시간, 대기 시간 및 적재 시간으로 구성된다(그림 6). 트럭의 이동 시간에 영향을 미치는 요소는 갭내 노면의 상태, 트럭의 평균 이동 속도, 트럭의 투입 대수 및 적재 용량이며, 대기 시간에 영향을 미치는 요소로는 교행을 위한 대기소 및 횡행의 수, 그리고 트럭의 투입 대수 등이다. 적재 시간은 백호우 버킷의 용량 및 적재 효율이 좋은 로더와 같은 특수 장비의 활용, 트럭의 투입 대수와 적재 횟수에 영향을 받게 된다. 각 작업공정에 공통적으로 적용되는 영향변수는 트럭의 용량과 투입대수 그리고 백호우의 적재 효율이며 가변적인 변수로 적용이 가능하다. 그 외 갭내 노면상태와 이동속도 그리고 교행 지점 수는 현장의 외부 여건에 따른 변수로서 조정에 한계가 있다.

본 현장의 여건을 고려하여 주요 장비인 트럭과 백호우를 변수로 설정하였으며, 버킷 용량 0.4, 0.6, 1.0 그리고 2.0(m³)에

표 5. 백호우의 운행 주기

버킷용량	0.4(m³)	0.6(m³)	1.0(m³)	2.0(m³)
횟 수	20회	13회	8회	4회
소요시간	12,404(min.)	8,063(min.)	4,962(min.)	2,481(min.)
기본 시간	1회 운행시간 = 483.75sec/13(회) = 37.212 sec/회			

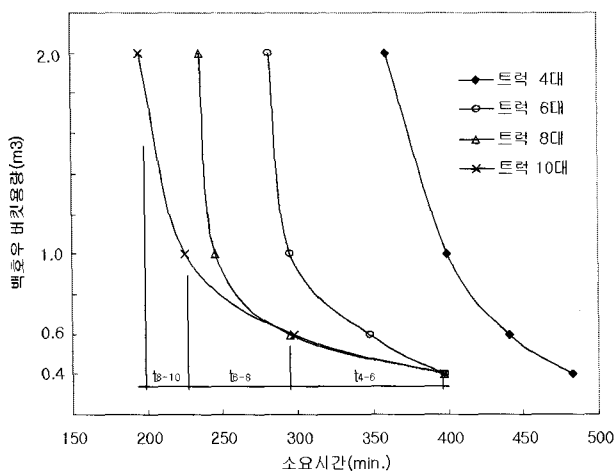


그림 7. 트럭 대수와 백호우 버킷용량에 따른 전체 소요시간

표 6. 전체 소요시간

트럭 대수 \ 버킷용량	0.4(m³)	0.6(m³)	1.0(m³)	2.0(m³)
4대(15TON)	482,081 (min.)	440,325 (min.)	399,847 (min.)	359,690 (min.)
6대(15TON)	396,854 (min.)	347,547 (min.)	294,610 (min.)	281,567 (min.)
8대(15TON)	396,854 (min.)	294,610 (min.)	245,534 (min.)	235,713 (min.)
10대(15TON)	396,854 (min.)	297,011 (min.)	225,688 (min.)	195,600 (min.)

대하여 트럭 대수를 4대, 6대, 8대 그리고 10대로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 백호우의 운행 주기는 현장에 측정한 데이터를 사용하여 1회 운행시간을 구하였으며, 백호우 용량별로 15TON 트럭(8.0m³)에 대한 적재 횟수를 산정하였다(표 5). 일반적으로 터널의 1회 굴착 길이는 3.0~3.5 정도이므로 60m²×30m=180m³, 15TON 트럭(8.0m³) 23대의 버력량을 가정하였다.

백호우 용량과 트럭 대수별 시뮬레이션 수행결과는 그림 7 및 표 6과 같이 나타났다. 백호우 용량 0.4m³의 경우, 트럭 대수 6대 이상에 대해서는 트럭 대수 증가에 따른 소요시간 단축 효과가 거의 나타나지 않으며, 0.6m³의 경우도 트럭 대수 8대 이상에서는 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 백호우 용량 1.0m³과 2.0m³에서는 트럭 대수 증가에 따라 소요 시간이 단축되고 있으나, 백호우 용량과 트럭 대수 증가에 따른 버력처리 공정의 전체 운행 효율이 점점 감소한다(t4-6 > t6-8 > t8-10). 백호우 용량을 높여 적재 시간을 줄이더라도 트럭 대수 증가에 따라 트럭간의 교행지체 시간과 막장에서의 대기 시간이 길어지게 되어 결

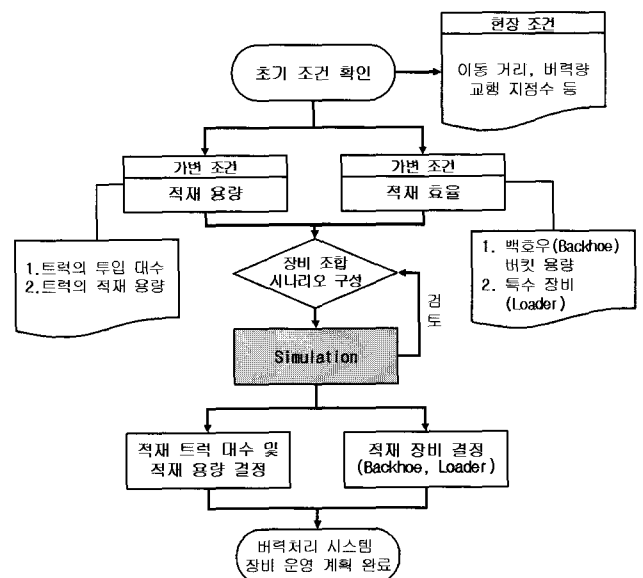


그림 8. 시뮬레이션을 이용한 장비 운영 계획

과적으로 전체 운행시간의 단축효과가 감소하게 된다. 이러한 요인들을 고려하여 버력처리 공정의 전체 운행주기를 단축시키고 투입 장비를 효율적으로 운영할 수 있도록 장비 운영 계획을 수립하여야 할 것이다. 본 현장 조건에서는 트럭 투입대수 6~8대(15TON)와 백호우 버킷용량 0.6~1.0m³범위 내에서 투입 장비를 계획하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다.

그림 8에서는 시뮬레이션을 이용하여 버력처리 시스템의 장비 운영 계획 과정을 나타내고 있다. 이동 거리, 버력 처리량, 교행 가능 조건 등의 현장 여건을 파악한 후, 사용 가능한 장비, 즉 트럭과 적재 장비를 선정하여 시뮬레이션을 수행하고, 동적 요소인 투입 장비 대수 및 용량을 결정함으로써 장비 운영 계획을 수립하는 과정을 설명하고 있다. 제한된 현장 여건에 대하여 가변 조건의 요소들을 변화시켜 장비조합 시나리오를 구성하고 시뮬레이션 결과를 검토하여 트럭의 투입 대수 및 용량 그리고 적재 장비를 결정함으로써 최종적으로 버력처리 시스템의 장비 운영 계획을 완료할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 영동선~도계간 철도이설공사 현장의 버력처리 공정을 대상으로 하여 사건중심(Event-Oriented)의 시뮬레이션 모델을 구축함으로써 현장 특성을 구현하였다. 또한, 실제 건설공사에 대한 시뮬레이션의 활용성을 검토하고 현장 측정 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교·분석함으로써 시뮬레이션 모델의 적정성을 검증하였다. 백호우 용량과 트럭의 투입대수를 변화시켜 시뮬레이션을 수행한 결과, 백호우 용량을 높여 적재 시간을 줄더라도 트럭 대수 증가에 따라 트럭간의 교행지체 시간과 막장에서의 대기 시간이 길어지게 되어 결과적으로 전체 운행시간의 단축효과가 감소하는 경향을 나타내었다. 구축된 시뮬레이션 모델은 현장 여건 변화를 반영하여 유사한 공정에 최소한의 수정을 통해 적용할 수 있음은 물론, 언급된 방법론을 이용하여 새로운 시뮬레이션 모델링의 구축 또한 가능할 것이다. 건설공정에 대한 시뮬레이션의 활용도를 높이기 위해서는 실제 현장조건이 반영된 데이터 축적과 모델링 구축에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

시뮬레이션은 반복적으로 수행되는 토목 공사를 시간, 비용 측면에서 효율적으로 계획할 수 있도록 지원할 수 있을 뿐만 아니라, 건설공사에 필요한 장비 운영 계획의 수립에 있어서 중요한 도구를 제공한다. 실제로 현장은 굴착량에 따라서 트럭 이동 거리 및 횡행의 수 등의 조건이 변화되므로 시뮬레이션을 활용한 장비 운영 계획을 실시함으로써 보다 신뢰성 있는 의사 결정

자료를 제공할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설기술기반구축사업(과제번호 : 05기반구축 D05-01)의 지원으로 이루어졌으며, 영동선~도계간 철도이설공사 현장 관계자분들에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김경주 (2000). "건설 공정 시뮬레이션을 위한 독립 자원모델 구축방안 연구.", 대한토목학회논문집, 제20권 제4D호, 대한토목학회, pp. 389~402.
2. 김경주 (2000). "여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구.", 대한토목학회논문집, 제20권 제4D호, 대한토목학회, pp. 403~412.
3. 천진용·소병각·추장식·우성권 (2005), "시뮬레이션 모델링을 통한 NATM 터널공정 생산성 분석" 대한토목학회논문집, 제25권 제3D호, 대한토목학회, pp. 457~462.
4. 김성근·이덕규·김홍철 (2005), "Contract Net을 이용한 자동화 토공장비 할당 모델" 대한토목학회논문집, 제25권 제5D호, 대한토목학회, pp. 721~727.
5. 서형범·정원지·김경민·김경주 (2006). "건설 장비 운영 데이터 분포 특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -." 대한토목학회논문집, 제26권 제4D호, 대한토목학회, pp. 661~670.
6. Vanegas, J.A., Bravo, E.B., and Halpin, D.W.(1993), "Simulation technologies for planning heavy construction processes" Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 110 No. 2, June, pp. 336~354
7. Smith, S.D., Osborne, J.R., and Forde, M.C. (1995), "Analysis of earth-moving system using discrete-event simulation", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 121 No. 4, December, pp. 388~396.
8. Ioannou, P.G. (1999), "Construction of a dam embankment with nonstationary queues" Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp. 921~928
9. Schruben, L. W. (1992), SIGMA - Graphical Simulation



Modeling, Cornell University.

논문제출일: 2006.07.14

심사완료일: 2007.02.06

---

### Abstract

Simulation has considerable potential as the tool of construction management, but in the case of domestic, it is at an early stage applying simulation to micro-process assesment. For applying simulation to the construction process, much effort is needed to collect input data and to build the model including the characteristics of site. This study introduces the methodology to collect operation data of construction equipment and build the simulation model, then verifies the model with the operation data. In addition, this study identifies main factors to determine the cycle time of the muck hauling system so that it suggests the method of construction process planning through operation and combination of construction equipments.

**Keywords** : Simulation, Event-oriented Simulation, Construction Equipment

---