

# 터널 버력처리 공정의 시뮬레이션 모델 구축에 관한 연구

## Event Oriented Modeling Approach on Tunnel Muck Hauling Operations

김 경 민\* · 서 형 범\*\* · 김 경 주\*\*\*

Kim, Kyoungmin · Seo, Hyeong Beom · Kim, Kyong Ju

### 요 약

시뮬레이션은 건설관리를 위한 도구로써 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 필요하며, 건설 주요 공정에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 적용성을 검증하는 것은 필수적인 프로세스라고 할 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 모델 구축 방법론을 소개하고 현장 측정 데이터와의 비교·분석을 통해 모델을 검증하였다.

키워드: 시뮬레이션(Simulation), 사건중심(Event oriented), 공정계획(Scheduling)

## 1. 서 론

도로, 터널, 댐 등과 같이 대량의 물량과 동일한 작업의 반복을 통해 수행되는 건설 사업의 경우, 공정계획을 수립함에 있어 시뮬레이션의 활용은 시간과 비용 측면에서 상당한 절감 효과를 얻을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 국내의 경우 마이크로 프로세스의 공정 평가에 적용을 시도하고 있는 단계에 머물러 있는데 건설 공정 시뮬레이션을 적용하기 위해서는 시뮬레이션 관련 데이터 수집과 모델 구축에 상당한 노력을 필요로 하기 때문이다.

실제 현장 데이터의 측정을 통해 운영 데이터의 분포특성을 분석하고 축적한다면, 유사 공종의 경우 장비 운행시간의 차이는 있으나 공정계획 수립시 운영 데이터의 재활용이 가능하다. 또한 건설 주요 공정에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 유사 공종에 대해 최소한의 수정으로 시뮬레이션 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 현장 장비 운영 데이터 축적과 주요 공정에 대한 시뮬레이션 모델의 적용성을 검증하여 건설 공정계획 수립시 시뮬레이션의 활용도를 높이고자 한다.

## 2. 현장 프로세스 분석 및 데이터 측정

### 2.1 현장 현황

본 연구에서 적용한 현장은 영동선 동백산~도계간 철도 이설 건설공사로서 총 연장 16.2km 인 장대 터널이며, 구간의 높이차로 인해 루프형으로 설계되었다. 영주방향 현장의 버력처리 시스템은 사갱입구로부터 막장까지의 거리에 따른 작업 효율성을 고려, 백호우와 덤프트럭을 이용한 장비조합으로 구성되어 있다. 또한, 12시간을 단위로 일일 두차례 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 1에 나타내었으며, 표 1에서는 버력처리 공정이 이뤄지는 구간을 운행 조건에 따라서 분류하였다.

### 2.2 현장 작업 프로세스 분석

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

\* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과, 박사과정  
kmkim@wm.cau.ac.kr

\*\* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과, 석사과정  
hbseo@wm.cau.ac.kr

\*\*\* 종신회원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수, 공학박사  
kjkim@cau.ac.kr

공종	수요장비	대수	수요시간	비고
전공	J / D	1	1시간	
H/B시공	차장카	1	1시간	
장막	차장카	1	50분	
발파			10분	
원기			20분	
버럭처리	B/H(0.6)	1	4시간	35%
	D/T(15ton)	6		
Sealing	C / P	1	1시간	
	M / T	2		
	S / M	1		
지보설치	차장카	1	1시간	
S/C타선	C / P		2시간	
	M / T			
	S / M	1		

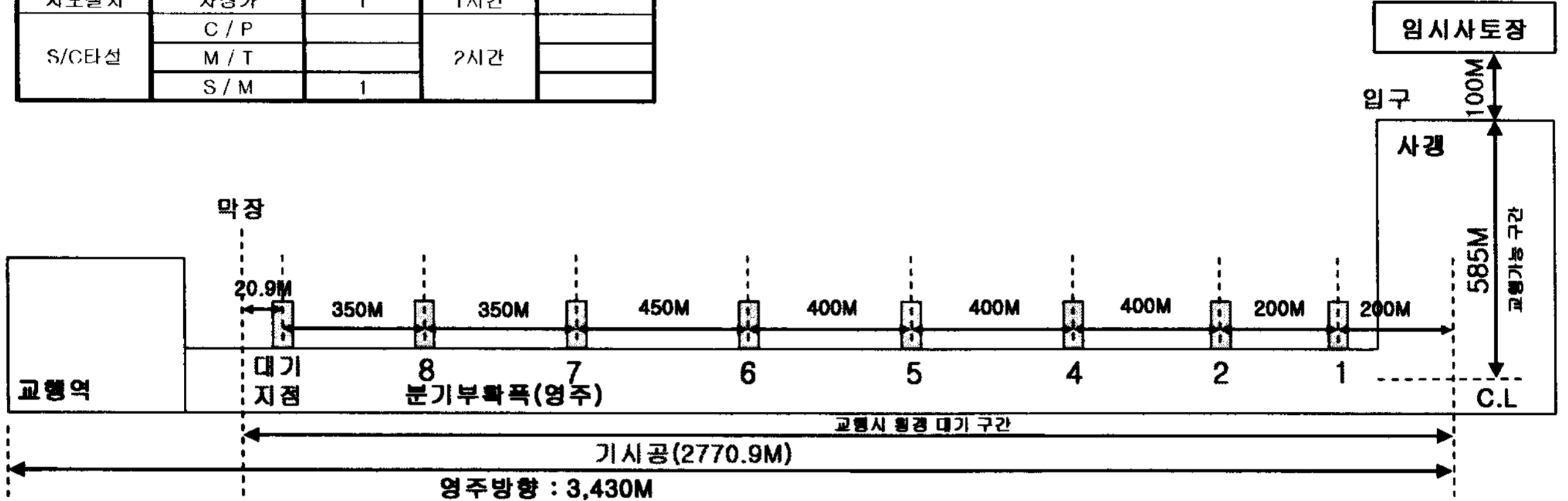
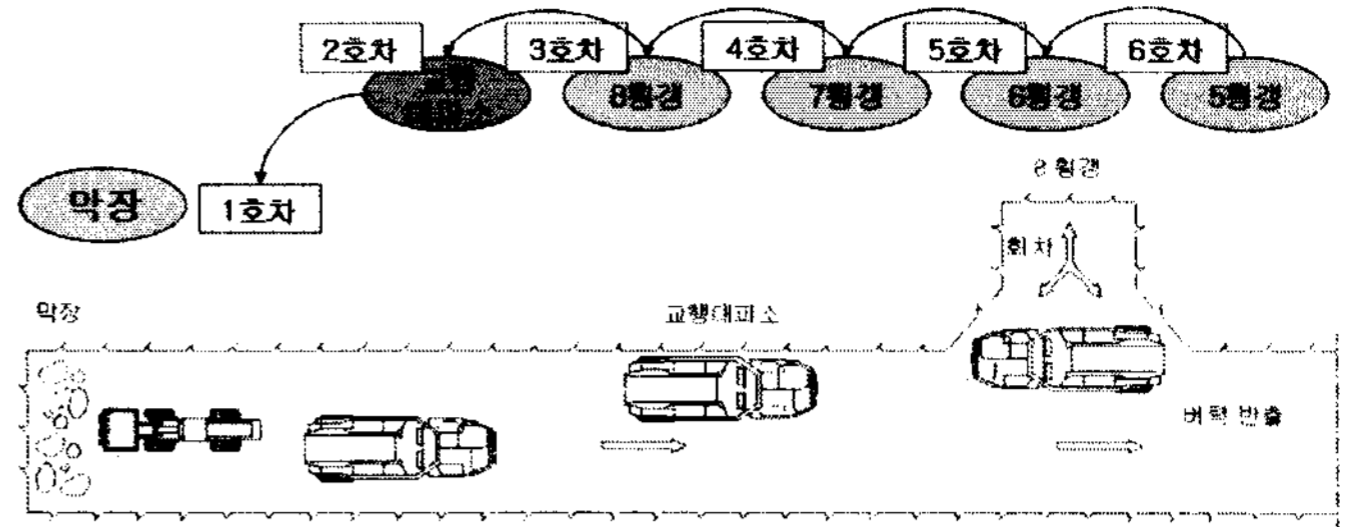


그림 1 현장 현황 및 막장 교행 프로세스

표 1. 버럭처리 공정의 구간별 분류

Group No.	구 간	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	교행 시 횡경 대기
3	대기지점 ~ 막장	20.9	0.30	빈차	본선내 후진	교행가능
4	막장 (Backhoe 작업시간/ 적재시간)	-	-	적재중	막장내 정지	-
5	막장 ~ 대기지점	20.9	0.30	만차	본선내 출발	교행 시 횡경 대기
6	대기지점 ~ C.L.	2,750.0	39.20	만차	본선내 전진	교행가능
7	C.L. ~ 야적장	785.0	11.20	만차	사갱내 이동	교행가능
8	야적장 ~ 사갱입구	100.0	1.45	빈차	갱외부 이동	교행가능
		7,011.8	100.00			

진행되는 구간은 터널 단면이 단선으로 계획되어 협소하므로 200m 또는 400m 간격의 횡경을 시공하여 트럭간의 교행이 가능하게 하였다. 막장과 바로 직전의 횡경간의 거리에 따라 작업 효율이 크게 좌우되는데, 트럭 한 대가 로딩을 완전히 끝내고 마지막 횡경을 통과해야만 두 번째 트럭이 마지막 횡경으로부터 막장까지 후진해서 진입이 가능하기 때문이다.

현장에서 운용되는 트럭의 총 대수는 6대로, 버럭처리 공정이 시작되면 백호우를 선두로 하여 일정간격으로 진입을 한 뒤, 막장을 비롯하여 트럭간의 교차가 가능하기 위해 배수로에 매설한 강관(Pipe)과 막장으로부터 인접한 각 횡

경에서 순차적으로 대기한다. 로딩이 시작되고 1호차부터 순차적으로 막장을 이탈하면 다음 트럭들은 한 횡경 구간씩 이동하여 대기하는 방식으로 진행된다.

일반적으로 발파에 의한 터널 굴착길이는 3.0~3.5m 정도인데 본 현장에서는 막장의 암질이 불량하여 1회 굴착시 굴진 길이는 1.5m로 평균굴착량의 절반 정도이며, 버럭량은  $1.5m \times 60m^2$ (터널단면적) =  $90m^3$ 이 발생한다. 평균적으로 10대~12대 분량(트럭 한대당 적재용량  $8m^3$ )의 버럭이 발생하기 때문에 트럭들은 보통 2번의 로딩을 수행하게 되는데 본 현장 측정시에는 버럭량이  $80m^3$ (트럭 10대 분량)정도 발생하였다. 첫번째 운행 주기 때는 막장에서 로딩하는 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, 횡경에서 적재된 차량이 지나갈 때까지 대기하는 경우로 인하여 시간 지연이 발생한다.

### 2.3 현장 데이터 수집 및 분류

사갱입구에서 출발하는 작업 차량에 탑승하여 구간별 이동 시간, 횡경 내 대기 시간, 버럭의 로딩 작업을 위한 대기 시간, 로딩 시간, 로딩 작업 후 구간 별 막장 이탈 시간 그리고 임시 사토장에서의 적재된 버럭의 덤핑 시간을 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 수치로써 나타내었다. 작업 차량간 무선 교신을 통하여 차량 간 거리 및 위치를 파악함으로써 갱내 진출입 차

량 간의 양방향 교행 발생 시 이동 특성도 분석하고자 하였다.

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, "건설 장비 운영 데이터 분포특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -", 대한토목학회논문집, 제26권 제4D호, 2006, pp. 661-670\*

표 2와 같이 본선 내부 진출입 구간(C.L.~대기지점(또는 10횡갱)까지의 진입구간 및 막장~C.L.까지 이탈구간)에서 획득한 데이터를 시뮬레이션 모델링 구축에 있어서 입력 데이터로 활용하였다.

### 3. 버력처리 공정 시뮬레이션 모델 구축

#### 3.1 불연속 사건 시뮬레이션 모델 구축

시뮬레이션이란 실제로 한 시스템이 구축되기 전에 축소된 물리적인 모형이나, 수학적 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). 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 버력처리 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

버력처리 공정은 로딩 → 트럭 이동 → 덩핑 → 트럭 이동의 반복적인 작업으로 이루어지며, 로딩 장소와 교행 장소(횡갱 및 대기소)에서 트럭의 대기가 발생한다. 막장에서 로딩 작업이 진행되면 트럭의 대기 행렬이 발생하게 되는데, 막장의 작업장소가 협소하여 막장 부근의 대기소(배수

\* 본 연구에서 적용한 현장 측정 데이터와 측정 방법에 대한 내용은 「서형범, 정원지, 김경민, 김경주, "건설 장비 운영 데이터 분포특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -", 대한토목학회논문집, 제26권 제4D호, 2006, pp. 661-670」에 설명되어 있다. 실제 현장 측정 데이터의 분포특성을 정규분포, 삼각분포, 베타분포를 이용하여 분석한 결과, 베타분포 특성과 가장 유사한 경향을 나타내었다.

로에 매설한 강관)와 각 횡갱에서 트럭이 대기하게 된다.

시뮬레이션 모델링을 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 현장 조건 : 로딩 장비 - 백호우, 트럭 투입 대수 - 6대, 버력처리량 - 약  $80 m^3$ (15ton 트럭 10회 분량)
- 2) 트럭의 투입은 사갱입구에서 약 2분 간격으로 실시한다(현장 상황 반영 : 트럭의 투입 시간은 횡갱간 이동 시간을 초과하지 않으며, 순차적으로 한 대씩 투입).
- 3) 각 횡갱에서 트럭의 진행은 다음 횡갱이 휴지(IDLE) 상태에서만 진입 가능 : 작업 초기에 트럭은 일정 간격으로 투입되어 막장(1번 트럭, 로딩 작업 수행) - 대기소(2번 트럭) - 8횡갱(3번 트럭) - 7횡갱(4번 트럭) - 6횡갱(5번 트럭) - 5횡갱(6번 트럭)에서 대기하며, 막장에서의 로딩 작업이 끝나면 1번 트럭이 지나가는 횡갱의 차량이 다시 막장 방향으로 한 횡갱씩 진행하게 된다.
- 4) 막장 방향 차량과 야적장 방향 차량의 교행 발생 시 야적장 방향 차량 우선통과, 막장 방향 차량은 횡갱에서 대기한다.
- 5) C.L. → 야적장(임시사토장) → 사갱 입구 → C.L. 구간 내에서는 트럭의 교행이 허용된다.

각 사건의 상태 변화와 사건 간의 상관관계 정의를 통하여 버력처리 시스템의 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, 사건 중심의 시뮬레이션 모델링을 지원하는 소프트웨어(SIGMA, 1992)를 이용하여 모델을 구축하였다(그림 2). 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 로딩 시간 역시 측정값들의 평균 로딩 시간값을 입력하였다. 이는 실제 현장을 시뮬레이션으로 재현함에 있어 구축된 모델의 적정성을 검증하기 위함이다.

#### 3.2 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 모델의 적정성을 검증하기 위하여 버력처리 공정의 측정 데이터와 시뮬레이션 결과 데이터를 비교·분석하였다. 버력량  $80m^3$ 을 처리하는데 소요된 시간은 현장 측정은 약 174분이고, 시뮬레이션 결과는 약 177분으로 거의 유사하게 나타났다.

현장 측정으로부터 얻어진 데이터들의 분석 결과는 표 3과 그림 3에 나타내었다. 1회 굴착의 버력량을 처리하는데 소요된 전체 시간은 약 174분으로써, 구성 비율은 진입 시 이동시간 14.9%, 회귀 시 이동시간 15.9%, 교행에 의한 지체시간 7.7%, 로딩을 위한 소요시간 61.5%로 나타났다. 시뮬레이션 데이터로부터 얻어진 분석 결과는 표 4와 그림 4와 같이 전체 소요시간은 약 177분이며, 구성 비율은 진입 시 이동시간 14.6%, 회귀 시 이동시간 15.6%, 교행에 의한 지체시간 9.6%, 로딩을 위한 소요시간 60.2%로써 현장 측정 결과와 거의 일치하는 것으로 분석되었다.

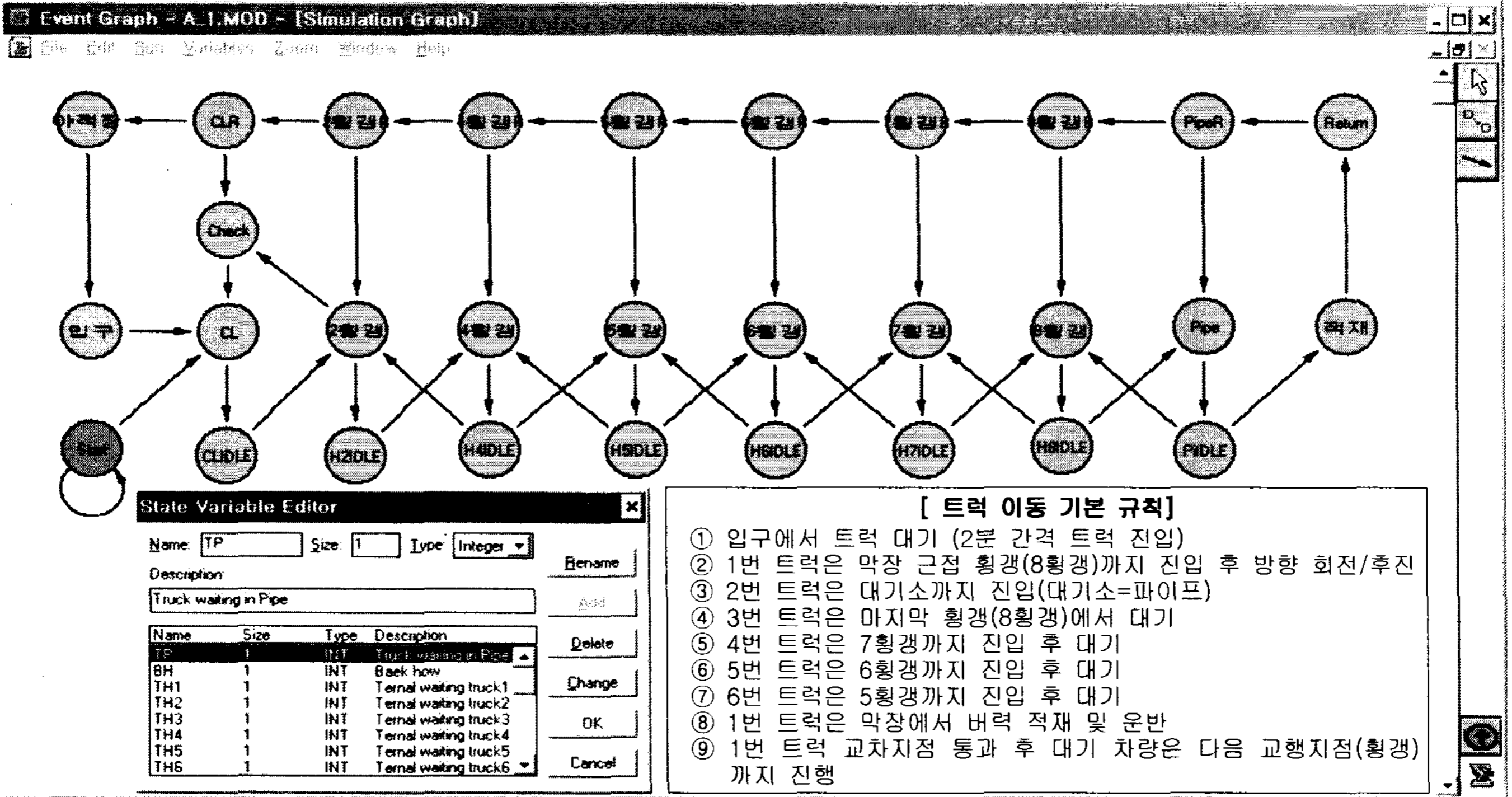


그림 2. SIGMA를 활용한 시뮬레이션 모델 구축

표 3. 현장 데이터 분석

현장 측정 데이터 항목	소요 시간(분)	백분율(%)
진입 시 이동 시간	25.8	14.9
회귀 시 이동 시간	27.6	15.9
교행에 의한 지체 시간	13.43	7.7
로딩을 위한 소요 시간	106.8	61.5
총 소요 시간	173.7	100.0

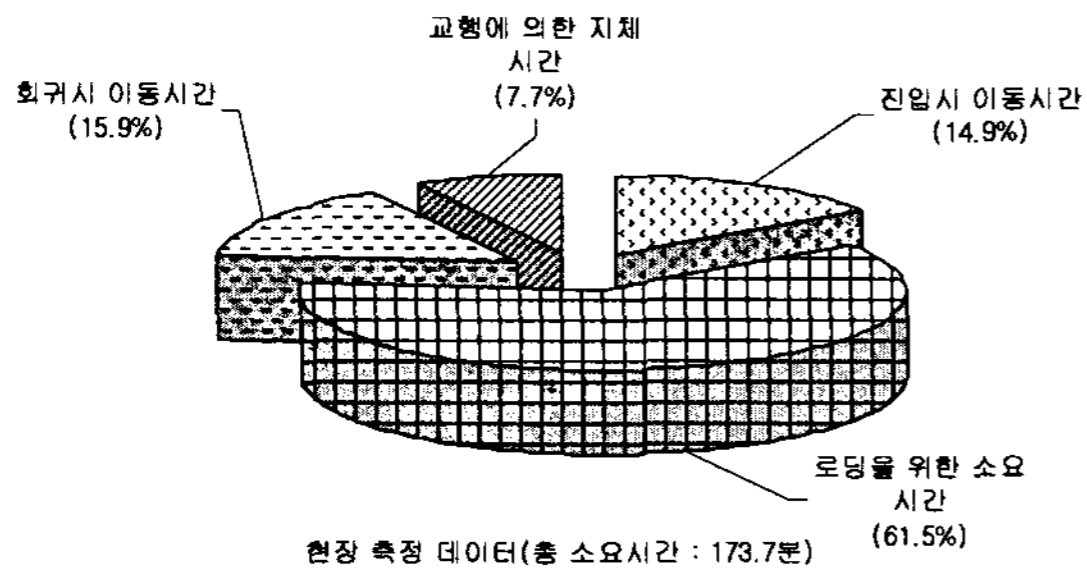


그림 3. 현장 데이터 분석

표 4. 시뮬레이션 결과 데이터 분석

시뮬레이션 데이터 항목	소요 시간(분)	백분율(%)
진입 시 이동 시간	25.8	14.6
회귀 시 이동 시간	27.6	15.6
교행에 의한 지체 시간	17.04	9.6
로딩을 위한 소요 시간	106.8	60.2
총 소요 시간	177.3	100.0

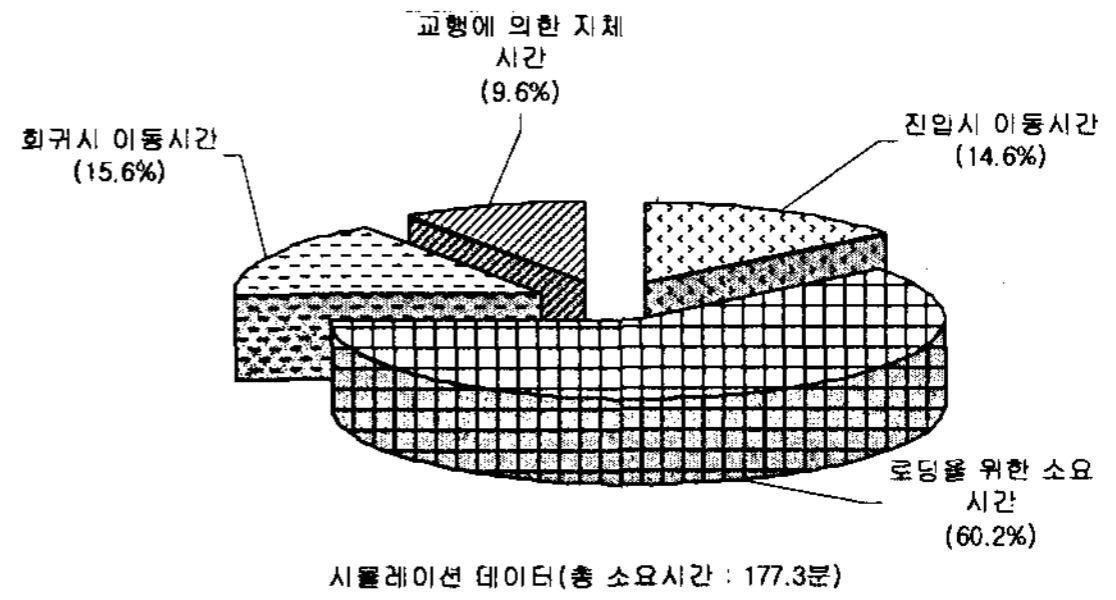


그림 4. 시뮬레이션 결과 데이터 분석

작업별 소요시간을 비교한 결과, 교행에 의한 지체 시간에 의해 결과의 차이를 나타내는데 실제 현장에서는 첫 번째 트럭의 덤프 후 터널 재진입시 무전 연락을 통해 로딩 대기열이 '0'이 되기 전에 막장에 도착하도록 양보한 결과이다. 진입 시 이동 시간은 첫 번째 트럭의 로딩 장소까지 이동하는데 소요된 시간이며, 회귀 시 이동 시간은 마지막 트럭이 로딩 후 야적장에 적치하고 입구에 도착한 시간이다. 그 외 트럭(2~8번 트럭)의 이동 시간은 백호우의 로딩 작업이 진행되는 상황이므로 전체 운행 주기에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 교행에 의한 지체 시간은 첫 번째 트럭이 덤프 후 다시 로딩하기 위해 터널 내로 진입하여 적재 차량에 의해 횡행에서 대기한 시간으로써, 백호

우의 작업 휴지 시간으로 발생하게 된다. 처음 6대의 트럭이 진입하여 각 대기 장소에서 로딩 대기열을 이루는데, 첫 번째 트럭이 로딩 대기열이 '0'이 되기 전에 덤프 후 로딩 장소에 도착하는 것이 백호우의 작업 효율을 높이는 것으로 분석되었다.

본 현장의 버력처리 시스템에서 가장 높은 비율을 나타내는 장비의 운행 주기는 백호우의 작업 시간이다. 현재 위치의 막장에서는 암질 상태로 인하여 1회 굴착량이 적어 로딩 장비로써 백호우를 활용하고 있는데, 적재 효율을 높이기 위해서는 백호우의 버킷 용량을 높이거나 로더와 같은 특수 장비를 적용하는 것이 처리 시스템의 전체 운행 주기를 단축할 수 있는 가장 중요한 요소로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 영동선~도계간 철도이설공사 현장의 버력처리 공정을 대상으로 하여 사건중심(Event Oriented)의 시뮬레이션 모델을 구축함으로써 현장 특성을 구현하였다. 현장 측정 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교·분석하여 시뮬레이션 모델링의 현장 재현에 대한 적정성을 검증하였다. 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.

시뮬레이션은 반복적으로 수행되는 토목 공사를 시간, 비용 측면에서 효율적으로 계획할 수 있도록 지원할 수 있을 뿐만 아니라, 건설 공사에 필요한 장비 운영 계획의 수립에 있어서 중요한 도구를 제공한다. 실제로 현장은 굴착량에 따라서 트럭 이동 거리 및 횡갱의 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 : 05 기반구축 D05-01)의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 김경주, "건설 공정 시뮬레이션을 위한 독립 자원모델 구축방안 연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제4D호, 2000, pp. 389-402
2. 김경주, "여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제4D호, 2000, pp. 403-412
3. 서형범, 정원지, 김경민, 김경주, "건설 장비 운영 데이터 분포특성에 관한 연구 - 버력처리 시스템을 중심으로 -", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권 제4D호, 2006, pp. 661-670
4. Lee W. Schruben, SIGMA(Graphical Simulation Modeling), 1992

---

#### 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 the fields. This study introduces the methodology to build the simulation model, then verifies the model with the operation data.

**Keywords** : Simulation, Event Oriented, Scheduling

---