

터널 버력처리 공정의 생산성 분석

-경부고속철도 원호터널을 중심으로-

Productivity Analysis of Tunnel Muck Hauling Operations

황 호 정* · 강 찬 성** · 김 경 민*** · 김 경 주****

Hwang, Ho Jung · Kang, Chan Sung · Kim, Kyoungmin · Kim, Kyong Ju

요 약

시뮬레이션을 건설 공정에 적용하기 위해서는 현장 특성을 반영한 입력 데이터 수집과 시뮬레이션 모델 구축에 상당한 노력이 필요하다. 본 연구에서는 장비 운영 데이터를 활용하여 시뮬레이션 모델을 구축하고 현장 측정 데이터와 시뮬레이션 결과값을 비교, 분석하여 구축된 모델의 적용성 검증하였다. 시뮬레이션 모델을 활용해 트럭의 투입대수에 따른 소요 시간과 소요 비용을 산정하여 버력처리 공정의 생산성을 비교·분석하였다. 시뮬레이션 분석 결과를 장비 운영 계획에 활용함으로써 보다 신뢰성 있는 의사 결정 자료를 제공하고자 한다.

키워드: 시뮬레이션, 공정계획, 건설 장비, 생산성

1. 서 론

건설공사를 실제로 수행하기 전에 시뮬레이션을 활용하여 재현함으로써 다양한 공정계획 시나리오를 평가할 수 있다. 건설 공정에 시뮬레이션을 적용하기 위해서는 현장 상황을 반영한 데이터를 수집하고 측정 데이터의 특성을 분석하여야 하며, 실제 현장에서 수행되는 단위공정의 진행 과정과 투입 자원에 대한 분석이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 현장 측정 데이터와 시뮬레이션 결과값을 비교하여 시뮬레이션 모델링의 적정성을 검증하고, 장비 조합에 따른 생산성 분석을 수행하여 장비운영 계획을 수립함에 있어 시뮬레이션의 활용방안을 제시하고자 한다.

불연속 사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation)은 프로세스 병목구간의 식별과 낭비 요소의 제거를 위한 도구로서 다양한 건설 사업에 활용되고 있다. 여러 장비에 의해 발생하는 교통 혼잡, 정박지의 길이, 컨테이너 수량, 트럭 통로의 평가 및 설계에도 활용된다.

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 대안 평가(Ioannou 1999) 등에 적용되고 있다. 국내에서는 여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구(김경주 2000), 웹 싸이클론(Web-Cyclone)을 이용한 NATM 터널공정의 생산성 향상 분석(천진용 외 2005) 등이 발표되고 있으며, 마이크로 프로세스의 공정 평가와 시뮬레이션 모델 개발 등에 적용을 시도하고 있는 단계에 있다.

본 연구에서는 경부고속철도 원호터널공사 현장에서 측정한 데이터를 활용하여 시뮬레이션 모델의 입력값으로 사용하였다. 버력처리 공정 내에서 발생하는 세부 사건의 상태 변화와 사건 간의 상관관계를 정의하여 사건 중심의 시뮬레이션 모델링을 지원하는 소프트웨어인 SIGMA (Schruben, 1992)를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

2. 현장 현황 분석 및 시뮬레이션 모델 구축

2.1 현장 현황

경부고속철도 노반시설 공사로 제 13-4 공구 구간인 원호터널 4,835m(총 13,280m), 평산터널 2,680m 및 교량으로 이루어진 공사현장이다. 원호터널 종점부는 상반과 하반(좌,우측)으로 구분하여 상반굴착 후 약 100m 뒤에서 하반

* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정(교신저자) civilho@naver.com

** 일반회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 kagreement@gmail.com

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

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

본 연구는 건설교통부 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제 번호 05기반구축D05-01.

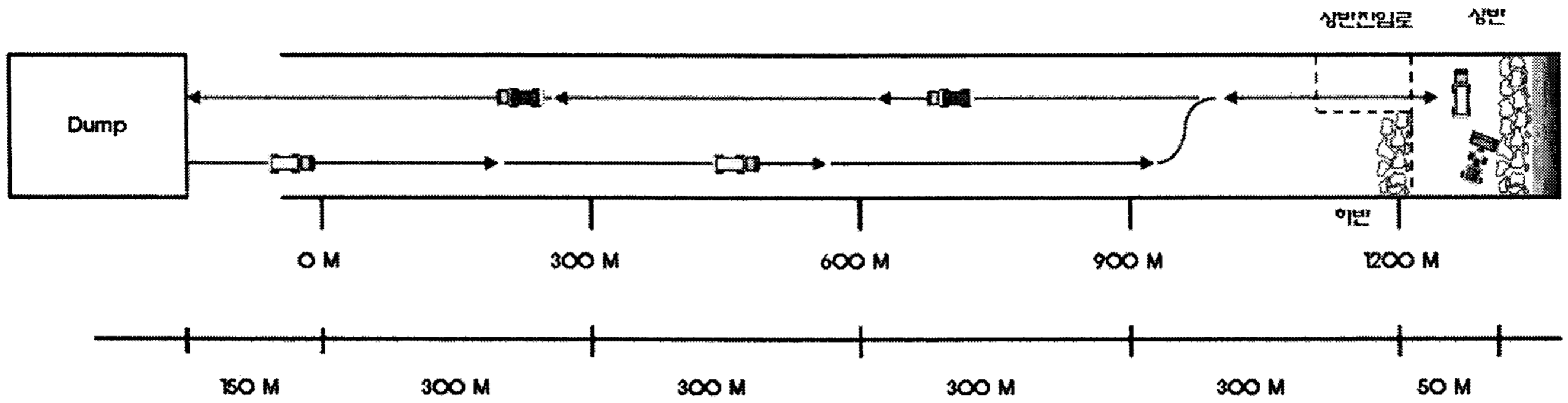


그림1. 원호터널현장 현황

굴착이 이루어지고 하반굴착 시는 좌측과 우측으로 구분되며 약 30~50m 굴착 후 반대편 하반굴착을 시행하여 발파와 버력 처리가 이루어진다.

약 1,400m를 왕복하며, 버력량에 따라 차이는 있지만 상반 평균 버력처리량은 35~40대 분량이 나오기 때문에 트럭들은 약 8번의 적재작업이 필요하다.

표1. 공정별 평균소요시간

공정	상반		하반	
	소요시간 (min)	백분율 (%)	소요시간 (min)	백분율 (%)
천공	180	25.00	120	25.00
장약, 발파	120	16.67	90	18.75
버력처리	300	41.67	180	37.50
숏크리트타설	90	12.50	60	12.50
막장정리	30	4.17	30	6.25
합계	720	100	480	100

현장 측정 시점에서 15ton 트럭 한대당 적재량은 대략 8 m³이고 1회 발파 시 굴진 길이는 3.5m 정도이다. 굴착 여건이나 여러 변수들에 따라 달라지지만 대략 상반 265m³, 하반(좌,우측) 120m³ 선에서 공정 계획이 이루어지고 있다. 그러므로 1회 발파 후 버력 운반 횟수(상,하반)는 총 45~50회(15ton 트럭) 가량이고 1일 상반 2회 발파, 하반 3회 발파가 이루어지므로 1일 버력량은 약 890m³이 됨을 예상하고 작업이 진행된다. 또한, 24시간 작업 중 버력처리 공정이 각각 41.67%, 37.5%로써 가장 큰 비중을 차지하고 있으므로, 시뮬레이션 분석의 대상으로 선정하였다.

2.2 현장 작업 프로세스 분석

원호터널 현장에서 운용되는 트럭의 총 대수는 굴진 길이에 따라 트럭의 투입 대수가 변화하지만 현장 측정 시점에는 트럭 5대(원계획은 6대이며, 차량정비로 인해 5대로 작업)로 버력처리가 수행되었다. 현장에서는 투입되는 장비들의 효율을 높이기 위해 상반과 하반의 작업이 연계되어 수행되도록 계획되었다. 버력처리 공정이 종료되어야 후행 공정들이 진행될 수 있으므로 버력처리 공정 소요 시간을 감소시킬수록 전체 공정의 소요 시간을 감소시킬 수 있다. 현장에서는 첫 발파 시 상반과 하반을 동시에 발파하고 버력량이 상대적으로 적은 하반을 먼저 처리하고 하반 처리 후 연속하여 상반을 처리하는데 이때 하반은 지보와 굴착이 순차적으로 수행된다. 트럭 5대가 막장과 사토장 사이

2.3 현장 데이터 수집 및 정리

터널입구에서 출발하는 작업 차량에 탑승하여 300m 간격으로 구간별 이동 시간, 로딩 작업을 위한 대기 시간, 로딩 시간, 로딩 작업 후 구간 별 막장 이탈 시간 및 사토장에서 적재된 버력의 덤핑 시간을 원호터널 종점부 상반과 하반으로 나누어 측정하였으며 각 구간별 거리를 기준으로 결과를 정리하였다(표2).

표2. 데이터의 그룹별 통계치

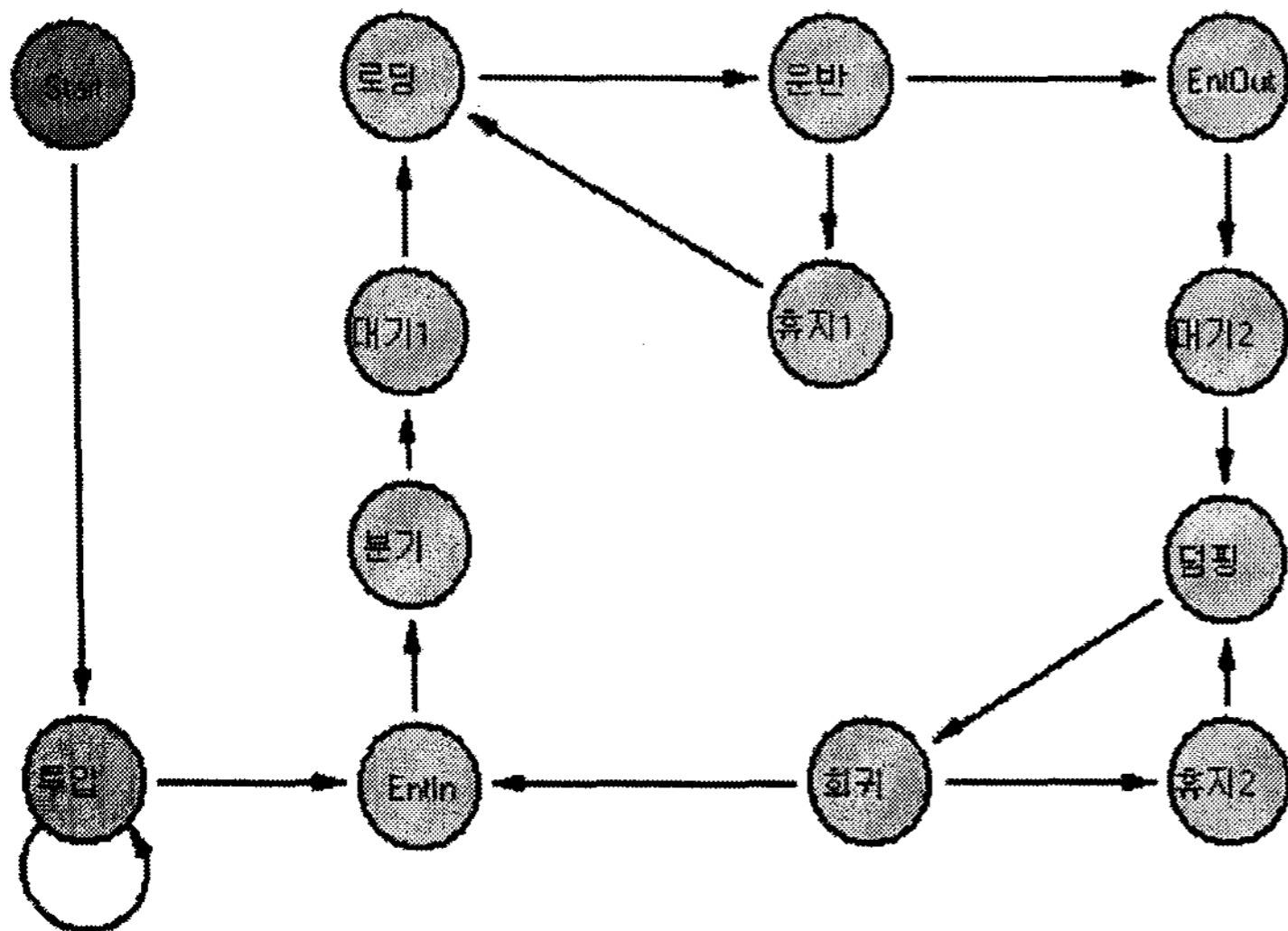
구간	이동속도(km/h)	이동속도(km/h)		
		평균	표준편차	변동계수(%)
사토장 ~ 터널입구	150m	9.8	2.28	23.39
터널입구 ~ 1,200m	1,200m	14.8	2.21	14.93
1,200m ~ 막장	50m	4.7	2.01	42.46
로딩(sec)	-	123.86 sec	105.16 sec	84.90
막장 ~ 1,200m	50m	5.3	1.31	24.65
1,200m ~ 터널입구	1,200m	14.7	2.88	19.55
터널입구 ~ 사토장	150m	11.8	2.64	22.30
덤핑(sec)	-	37.00 sec	13.87 sec	37.49

상반의 경우 트럭 37대 분량의 버력이 발생되어 5대의 트럭이 투입되어 7~8 번의 운반 횟수로 버력을 처리하였으며, 각 구간별 이동시간과 이동속도를 정리하였고 실제 현장에서 소요된 굴진장당 총 버력처리 공정의 소요 시간은 약 159.5분이었다.

2.4 시뮬레이션 모델 구축

버력처리 공정은 적재 → 트럭 이동 → 덤핑 → 트럭 이동의 반복 작업으로 이루어지며 고속철도용 터널이므로 트럭의 교행이 가능하여 교행이나 방향회전으로 인한 대기는 발생하지 않는다. 선행 트럭의 적재와 트럭의 주유 및 타이어 점검을 위한 대기가 발생한다.

현장 상황을 시뮬레이션 모델로 구현하기 위한 기본 조건은 다음과 같다.



Name:	Size: 1	Type: Integer	Buttons: Rename, Add, Delete, Change, OK, Cancel																																				
Description:																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Size</th> <th>Type</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TL</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>로딩 대기 트럭 수</td> </tr> <tr> <td>TD</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>운반 대기 트럭 수</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>로더의 상태</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>하역장의 상태</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>버럭 투입을 위한 카운터</td> </tr> <tr> <td>JD</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>로더 회전 수</td> </tr> <tr> <td>JL</td> <td>1</td> <td>INT</td> <td>로더 회전 수</td> </tr> <tr> <td>LT</td> <td>512</td> <td>REAL</td> <td>로딩 시간</td> </tr> </tbody> </table>				Name	Size	Type	Description	TL	1	INT	로딩 대기 트럭 수	TD	1	INT	운반 대기 트럭 수	L	1	INT	로더의 상태	D	1	INT	하역장의 상태	C	1	INT	버럭 투입을 위한 카운터	JD	1	INT	로더 회전 수	JL	1	INT	로더 회전 수	LT	512	REAL	로딩 시간
Name	Size	Type	Description																																				
TL	1	INT	로딩 대기 트럭 수																																				
TD	1	INT	운반 대기 트럭 수																																				
L	1	INT	로더의 상태																																				
D	1	INT	하역장의 상태																																				
C	1	INT	버럭 투입을 위한 카운터																																				
JD	1	INT	로더 회전 수																																				
JL	1	INT	로더 회전 수																																				
LT	512	REAL	로딩 시간																																				

그림2. SIGMA를 활용한 시뮬레이션 모델 구축

- 1) 현장 조건 : 적재장비 - 3.5m³ 페이로더 1대, 운반장비 - 15ton 덤프트럭 5대, 버럭처리량 - 평균 상반 약 265m³(측정당시 상반 약 296m³), 하반 약 120m³
- 2) 하반 버럭처리 공정 완료 후 상반 버럭처리 공정이 실행된다.
- 3) 입구로부터 상,하반까지의 거리차이는 트럭의 이동시간의 차이로 표현한다.
- 4) 트럭의 투입은 터널입구에서 약 2분 간격으로 실시한다.
- 5) 로더가 휴지상태에서만 대기 중인 트럭이 적재를 위해 진입하고 야적장에서 덤프는 1대씩 가능하다.

본 연구에서는 복잡한 건설 현장의 다양한 상황을 표현하는데 있어 필요한 여건을 제공하는 사건중심의 시뮬레이션 모델링 기법을 적용하여 실제 터널 버럭처리 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하였다(그림2). 각 구간별 지연 시간(Delay time)은 표2와 같이 현장에서 측정된 시간 데이터를 속도로 변환한 후, 그 값들의 평균값(평균 속도)을 이용하여 도출된 시간값을 입력하였으며 막장에서의 적재 시간 역시 측정값들의 평균 적재 시간값을 입력하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 생산성 분석

3.1 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 모델의 적정성을 검증하기 위하여 버럭처리 공정의 측정 데이터와 시뮬레이션 결과 데이터를 비교·분석하였다. 상반 버럭량 296m³을 처리하는데 현장에서 측정된 시간은 약 159.5분이고 시뮬레이션 결과는 약 148.9분으로 거의 유사하게 나타났다. 시뮬레이션 모델의 간략화를 위해 포함되지 않은 주유나 차량 점검 시간으로 인하여 현장 측정으로부터 얻어진 데이터가 시뮬레이션 결과보다 10.6분의 편차가 발생한 것으로 판단된다. 적재를 위한 로더의 작업시간과 버럭처리 공정의 총소요시간을 나누어 로

더의 평균 효율성을 구하고 적재와 덤프를 위해 트럭이 기다린 총 시간을 공정의 총소요시간으로 나누어 트럭의 평균 효율성을 구하였다.

시뮬레이션 수행 결과와 현장에서 측정된 작업 효율성에 대한 데이터를 비교하면 표3과 같다. 이러한 비교를 통하여 구축된 시뮬레이션 모델은 현장의 작업을 근사적으로 재현함을 알 수 있다. 본 연구에서 구축된 모델을 사용하여 투입 장비의 조합에 따른 현장의 장비 운영계획을 수립하는데 활용할 수 있다. 실제 현장 데이터를 측정하고 운영 데이터의 분포특성을 분석하여 축적한다면, 유사 공종의 경우 장비 운행시간의 차이는 있으나 공정계획 수립 시 최소한의 수정으로 재활용이 가능하다.

표3. 버럭처리 공정에 대한 현장과 시뮬레이션 결과 비교

	현장측정 데이터	시뮬레이션 결과 데이터	편차
페이로더 효율성(%)	47.89	52.30	+8.43
덤프트럭의 효율성(%)	89.92	94.96	+5.31
총소요시간 (min)	159.50	148.90	-10.60

3.2 생산성 분석

버럭처리 공정은 적재 시간과 트럭의 이동 시간이 전체 소요 시간에서 가장 큰 비중을 차지한다. 트럭의 이동 시간에 영향을 미치는 요소는 트럭의 평균 이동 속도, 트럭의 투입 대수 및 굴진거리이고 적재 시간은 로더의 용량과 트럭의 용량에 따른 적재 횟수에 영향을 받게 된다. 본 현장의 여건을 고려하여 트럭의 투입 대수를 가변적인 변수로 설정하며, 트럭 투입 대수 3~10대에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 트럭의 작업 시간은 현장에서 측정된 데이터를 사용하여 이동 속도를 구하였으며 416m³(상반 296m³, 하반 120m³)으로 버럭량을 설정하였다.

표4. 트럭 투입대수별 운행시간

대수 m	3	4	5	6	7	8	9	10
1,200	318.70	237.87	197.19	166.95	146.61	130.82	<u>122.59</u>	122.59

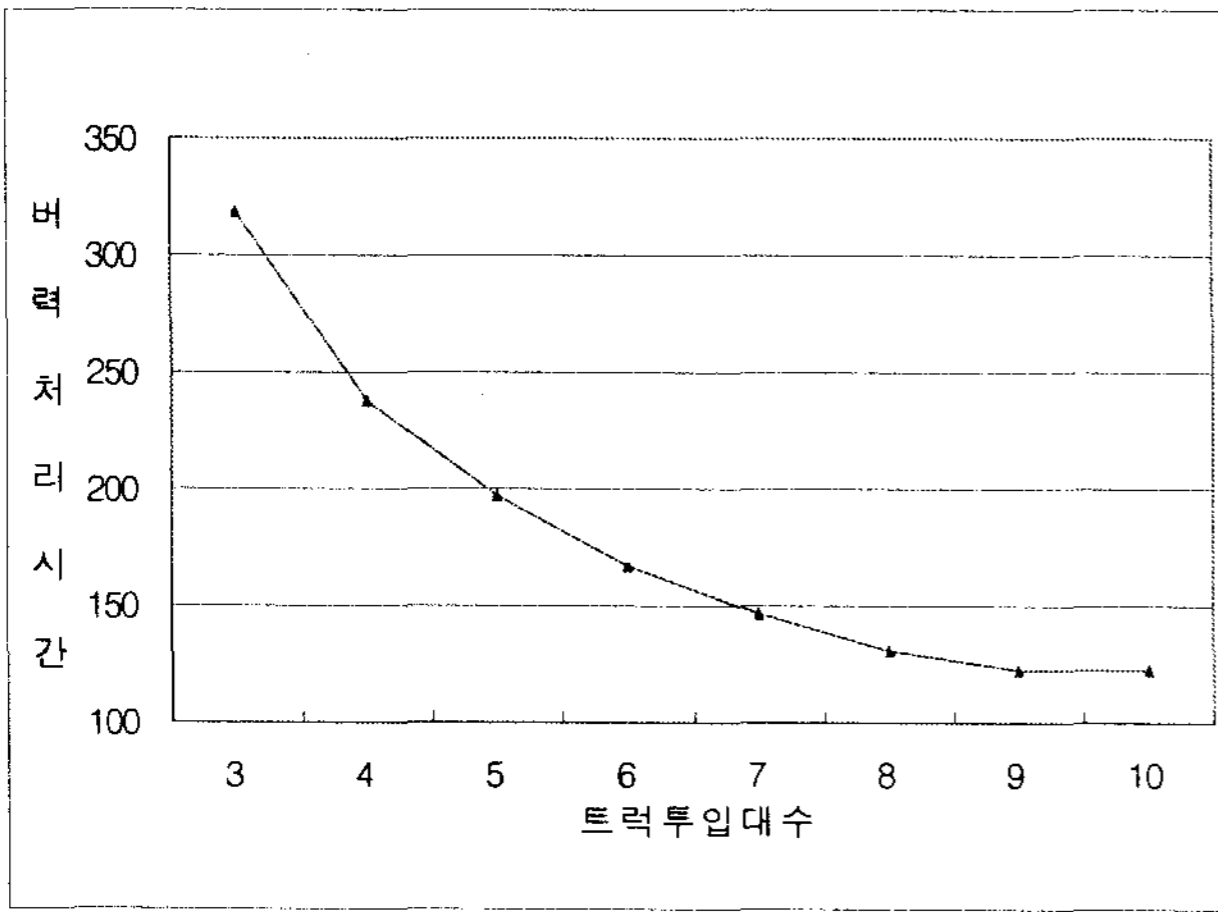


그림3. 트럭 투입대수별 작업시간

트럭의 투입대수에 대한 시뮬레이션 수행 결과는 표4와 그림3과 같이 나타났다. 굴진거리가 1,200m인 경우 트럭의 투입대수를 3대에서 4대로 변화시키면 작업시간의 단축효과가 가장 큰 것으로 나타났고 트럭을 9대 이상 투입하는 것은 작업 시간의 단축효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 트럭을 9대 이상 투입하게 되면, 적재 장소에서 작업대기 시간이 증가하여 결과적으로 전체 작업시간의 단축효과가 미미한 것으로 판단된다.

표5. 원효터널 고정비용

장비명	수량	인원	단가 (/월)	유류비 (/일)	월비용 (원)	일비용 (원)
페이로더	1	2	12,700,000	290	25,690,000	1,027,600
백호우(0.6)	1	2	9,300,000	130	15,570,000	622,800
백호우(1.0)	1	1	5,200,000	230	15,265,000	610,600
덤프트럭 (15ton)	3	3	6,300,000	40	21,795,000	871,800
	4	4			28,500,000	1,140,000
	5	5			35,205,000	1,408,200
	6	6			41,910,000	1,676,400
	7	7			48,615,000	1,944,600
	8	8			55,320,000	2,212,800
	9	9			62,025,000	2,481,000
10	10	68,730,000	2,749,200			
살수차	1	1	3,000,000	50	3,475,000	139,000
작업대차	1	-	6,000,000	35	6,049,000	241,960
컴프레샤	1	-	1,800,000	전기	1,800,000	72,000
전기사용료	1	-	17,000,000	-	17,000,000	680,000

원효터널에 투입되는 장비와 인원에 대해서 한 달을 25일 기준으로 노무비 405,000원과 유류비 1,400원/L을 반영하여 1일 고정비용을 산정하였다(표5). 버력처리 공정의 트럭의 투입대수 증감에 대한 공정 시간의 변화를 비용으로

환산하여 굴진거리 1,200m에 대한 월비용을 산출하였다. 선행공정대기시간은 선행공정 완료를 위한 트럭의 대기시간으로 전체 공정의 소요 시간에서 트럭의 대기시간을 산출하고 1일 총 작업 시간과 비례하여 1일 선행공정대기시간을 계산하였다. 월고정비용은 트럭 투입비용을 제외한 나머지 비용을 고정시키고 트럭 5대를 기준으로 트럭투입의 증감에 따른 비용과 선행공정 대기비용, 전체공정시간의 증감으로 인한 시간비용을 산출하여 월간 총비용을 산출하였다(표6, 표7).

표6. 트럭 투입대수에 따른 버력처리 단축 시간 및 트럭의 대기시간

트럭 대수	버력처리작업시간(분)			단축시간(분)			일비용 (원)	대기 시간 (분)
	전체	하반	상반	전체	하반	상반		
3	318.70	80.49	238.21	-121.50	-32.20	-89.31	4,265,760	90
4	237.87	54.49	183.38	-40.68	-6.19	-34.48	4,533,960	90
5	197.19	48.29	148.90	0.00	0.00	0.00	4,802,160	90
6	166.95	38.39	128.56	30.24	9.90	20.34	5,070,360	110
7	146.61	34.26	112.35	50.58	14.03	36.55	5,338,560	130
8	130.82	30.55	100.27	66.37	17.75	48.63	5,606,760	140
9	122.59	28.48	94.10	74.61	19.81	54.80	5,874,960	145
10	122.59	26.42	96.17	74.61	21.87	52.73	6,143,160	140

표7. 트럭 투입대수에 따른 월간 총 비용

트럭 대수	Cycle Time (분)	증감 시간 (분)	소요 일수 (일)	선행 공정 대기 (분)	소요 비용 (원)	트럭대기로 인한 손실비용 (원)	총 비용 (원)
3	840	+160	30.43	4695	129,827,478	2,842,826	130,670,304
4	750	+70	27.17	4695	123,205,435	3,717,391	126,922,826
5	690	0	25.00	4695	120,054,000	4,591,956	124,645,957
6	680	-10	24.64	5739	124,921,913	6,681,304	131,603,217
7	660	-20	23.91	6782	127,661,217	9,159,347	136,820,565
8	650	-30	23.55	7304	132,043,261	11,224,347	143,267,609
9	646	-34	23.41	7565	137,508,122	13,034,239	150,542,361
10	642	-38	23.26	7304	142,895,243	13,945,217	156,840,461

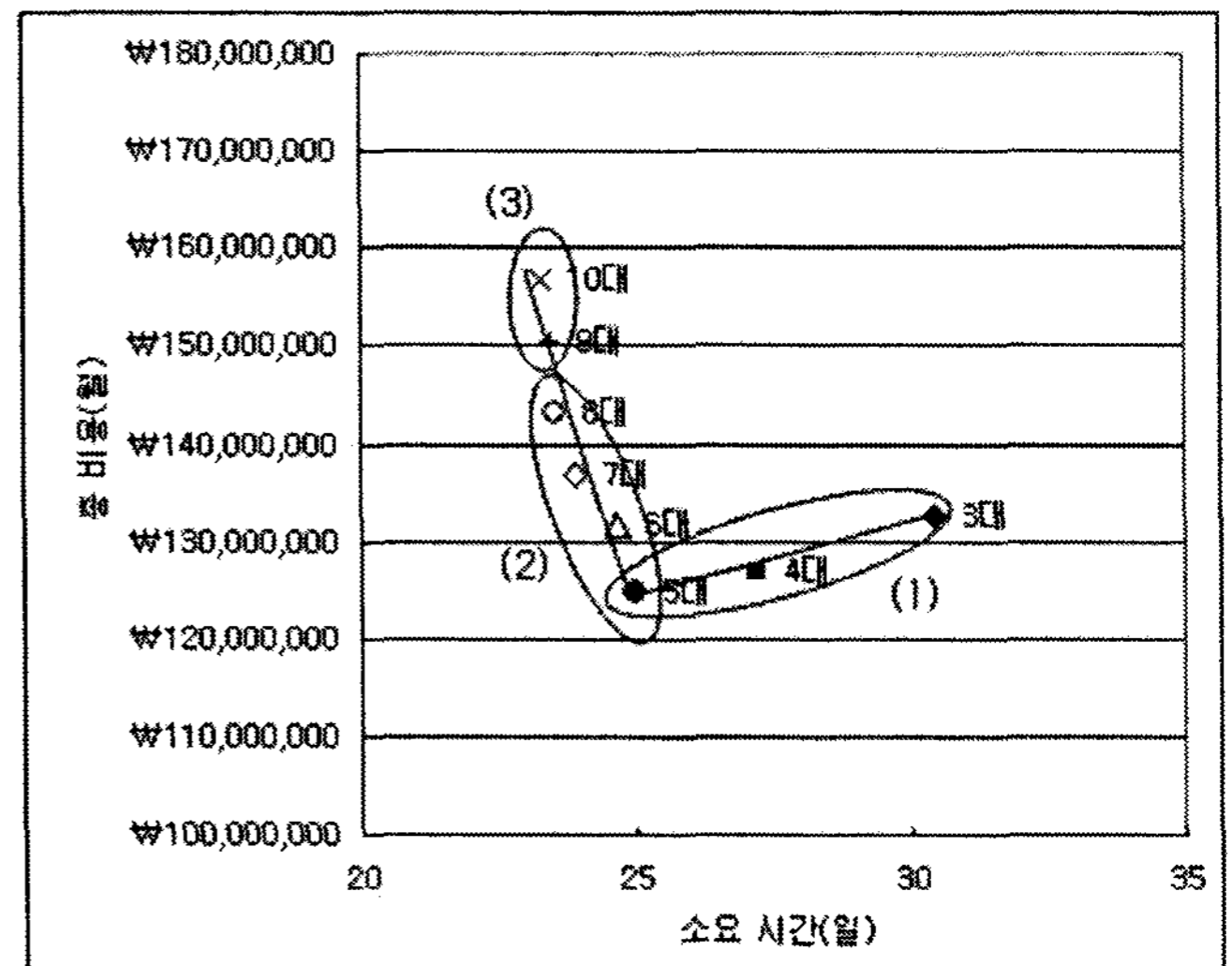


그림4. 트럭 투입대수에 따른 소요 시간과 소요 비용

트럭의 투입대수 변화에 대한 시뮬레이션 수행결과는 그림4와 같이 나타났다. 구간(1)의 경우, 트럭의 투입대수를 3대에서 5대까지 변화시키면 트럭이 증가함에 따라 소요 시간과 소요 비용이 동시에 줄어드는 구간이다. 구간(2)의 경우는 트럭을 5대에서 8대까지 변화시키면 소요 시간의 단축 효과는 있지만 트럭의 추가 투입에 따른 소요 비용이 증가하는 구간이다. 구간(3)은 트럭을 9대, 10대로 변화시키면 소요 시간의 단축 효과는 거의 나타나지 않으며 소요 비용만 증가하는 구간이다. 이러한 구간에 따른 소요 시간과 소요 비용의 변화를 고려하여 버력처리 공정의 전체 운행주기를 단축시키고 투입 장비를 효율적으로 운영할 수 있도록 장비 운영 계획을 수립해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 경부고속철도 제 13-4 공구의 원효터널 버력처리 공정을 대상으로 하여 사건 중심의 시뮬레이션 모델링을 지원하는 SIGMA로 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 현장 측정 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교·분석하여 시뮬레이션 모델링의 적정성을 검증하였고 검증된 시뮬레이션 모델을 활용하여 터널 버력처리 공정의 생산성을 분석하였다. 굴진거리 1,200m에 트럭 5대를 기준으로 트럭의 대기비용과 월간 총비용을 산출하고 트럭의 투입대수를 변화시켜 시뮬레이션을 수행하여 트럭의 투입에 따른 소요 시간과 소요 비용의 변화를 비교하였다. 트럭의 투입대수를 3대에서 5대까지 변화시키면 소요 비용과 소요 시간의 단축효과가 동시에 나타났고 5대에서 8대까지 변화시키면 소요 시간의 단축효과가 나타나지만 소요 비용이 증가하였다. 장비 투입에 따른 생산성 분석을 통하여 현장 상황에 맞게 소요 시간과 소요 비용을 고려해 트럭의 투입대수를 결정해야 할 것이다.

시뮬레이션은 사전에 작업 계획을 분석함으로써 합리적인 공정계획을 수립할 수 있도록 지원 가능하지만 시뮬레이션 모델 구축을 위한 관련 데이터 수집의 어려움과 모델 구축의 어려움으로 인하여 건설 사업에서의 활용은 매우 제한적이었다. 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 모델과 활용 방안을 적용하여 유사한 공정에 최소한의 수정을 통해 적용할 수 있고 새로운 시뮬레이션 모델의 구축 또한 가능할

것이다.

참고문헌

1. 김경주, “여객기 터미널 포장공정의 생산성 향상을 위한 불연속 사건 시뮬레이션 적용연구”, 대한토목학회논문집, 제20권 제4D호 2000
2. 천진용, 소병각, 추장식, 우성권, “시뮬레이션 모델링을 통한 NATM 터널공정 생산성 분석”, 대한토목학회논문집, 제25권 제3D호 2005
3. Schruben. Lee W., “SIGMA(Graphical Simulation Modeling)”, 1992
4. Vanegas, J.A., Brovo, E.B., and Halpin, D.W., “Simulation technologies for planning heavy construction processes”, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 110 No 2, 1993
5. Smith, S.D., Osborne, J.R., and Forde, M.C., “Analysis of earth-moving system using discrete-event simulation”, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 121 No. 4, 1995
6. Ioannou, P.G., “Construction of a dam embankment with nonstationary queues”, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999

Abstract

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 and offers reasonable decision making data using the simulation based planning of construction equipment operation.

Keywords : Simulation, Scheduling, Construction Equipment, Productivity
