

# 프로세스 시뮬레이션을 연계한 건설공정 시각화

## Visualizing Construction Process Linking Process Simulation

서 증 원\* · 김 영 환\*\* · 정 평 기\*\*\*

Seo, Jong-Won · Kim, Yeong-Hwan · Jung, Pyung-Ki

### 요 약

그래픽 시뮬레이션은 건설공사의 시공계획을 위해서 매우 유용하게 쓰일 수 있으나, 토공과 같이 비정형의 물체를 다루는 경우에는 그래픽 시뮬레이션의 적용에 한계를 갖게 된다. 이러한 경우에는 사용 장비의 작업시간, 대기시간, 작업용량 등의 수치적 데이터에 근거하여 공정전체의 생산성에 대한 분석을 수행하게 되는 수학/통계적 시뮬레이션이 그 장점을 보이지만, 프로세스 모델 구축의 어려움, 수치적 시뮬레이션 결과의 신뢰성 확보 문제 등으로 건설 분야에서의 활용이 매우 제한되어 있는 실정이다. 본 연구에서는 비정형 물체를 다루는 공사인 토공작업에 대한 시각화를 건설공사에 주로 사용되는 수학/통계적 시뮬레이션인 불연속사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation) 프로그램들의 출력을 분석하여 작업시간, 대기시간, 운반물량 등에 대한 수치적 결과를 건설작업의 그래픽 시각화로 표현하였다. 이를 통하여 건설공사의 시공계획 시에 시뮬레이션을 활용하면 사전에 시공과정을 수행하여 봄으로써 최적의 건설장비 및 공법을 선택하여 효율적으로 운용하게 할 수 있는 가능성을 입증하고자 하였다.

키워드: 건설 그래픽 시뮬레이션, 시각화, 가상현실, 불연속사건 시뮬레이션

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

3차원 그래픽 시뮬레이션은 건설공사의 시공계획을 위해서 매우 유용하게 쓰일 수 있으나(Alciatore 1991, OpdenBosch 1995), 장비 및 작업의 종류에 따라 적용상의 한계를 가지고 있는 실정이다. 크레인과 같이 고정된 위치에서 기하의 형태가 분명한 정형의 물체를 인양하여 새로운 곳에 위치시키는 방식(Pick-and-Place)의 시공과정의 경우 3차원 모델을 이용한 그래픽 시뮬레이션이 매우 강력한 도구가 된다. 이는 크레인의 위치 선정, 크레인 방식 선정, 크레인의 대수 선정 등에 대한 의사결정시 가장 중요한 것이 기하적인 분석이기 때문이다. 또한 플랜트시설물의 배관공사와 같이 협소한 공간에서 다수의 부재를

시공하게 되는 경우에는 건설 매니플레이터와 같은 장비를 이용해서 어느 부위를 먼저 공사를 하느냐를 결정하는 문제와 이에 따른 장비의 위치선정 등의 기하적인 운용계획의 수립의 문제로 귀결되어지기 때문이다.

하지만 토공과 같이 비정형의 물체를 다루는 경우에는 그래픽 시뮬레이션의 적용에 한계를 갖게 된다. 예로서 토공의 경우 장비의 조합인 도저, 굴삭기 등의 운용에 대한 시뮬레이션을 위해서 원 지반에 대한 그래픽 모델을 수정하여 작업 후 변화된 지반의 형태에 대한 대략적 시각화 등은 가능하나 변화가 심한 토질 조건과 토사와 장비와의 복잡한 상호작용 등을 고려해 볼 때 굴삭 되는 토사의 양을 그래픽 모델을 이용하여 정확히 산정하는 방식의 분석에는 큰 의미를 두기 힘들기 때문이다. 이와 같은 경우에는 사용되는 장비의 작업시간, 대기시간, 작업용량 등의 수치적 데이터에 근거하여 공정전체의 생산성에 대한 분석을 하게 되는 수학/통계적 시뮬레이션이 그 장점을 보인다.

수학/통계적 시뮬레이션은 프로세스 모델 구축의 어려움 등으로 건설 분야에서의 활용이 매우 제한되어 있는 실정이다. 따라서 모델링을 용이하게 할 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Oloufa 1993, Huang and Halpin 1993, Sawhney and AbouRizk 1996). 또한 수치적으로 표현되는 컴퓨터 시뮬

\* 종신회원, 한양대학교 토목공학과 조교수, 공학박사(교신저자), jseo@hanyang.ac.kr

\*\* 일반회원, (주)화인씨이엠테크 과장, yhkim8603@hwaincem.com

\*\*\* 일반회원, (주)화인씨이엠테크 대표이사, 한양대학교 토목공학과 박사과정, gopkjung@hwaincem.com

본 연구는 한국학술진흥재단 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 2003-041-000569

레이션의 결과를 건설사업 의사결정자들에게 확신을 주는데 상당한 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위하여 Huang등은 시물레이션 진행시 프로세스 모델의 각 노드(node) 색상을 시간의 변화와 작업 상태에 따라 바꾸어 줌으로써 이에 대한 시각적 입증을 시도하였다(Huang and Halpin 1993). 만일 수치적으로 표현되는 수학/통계적 시물레이션 결과를 3차원 그래픽 애니메이션을 이용하여 장비의 움직임과 자재의 흐름으로서 보여줄 수 있다면, 이는 그래픽 시물레이션의 기능을 확장시키는 것이며 수학/통계적 시물레이션이 갖는 치명적 약점을 보완해주는 것이다. Kamat과 Martinez는 이러한 주제로 연구하여 수학/통계적 시물레이션의 결과를 3차원 그래픽으로 시각화하는 시스템을 개발하였다(Kamat and Martinez 2001).

본 연구에서는 현재의 건설 그래픽 시물레이션의 한계를 극복하기 위한 일환으로 프로세스 시물레이션을 통하여 획득된 수치 결과를 그래픽 시물레이션과 연계시키기를 시도하였다. 이를 통하여 개선된 건설 그래픽 시물레이션 시스템을 구현함으로써 건설공사의 계획에 있어서 합리적 의사결정을 지원하고, 장비 등의 효율적 운영계획 수립에 활용하며, 시공성 검토 및 증진을 도모하고자 하는 바이다. 본 연구의 이와 같은 목적을 그림 1로 나타내었다.

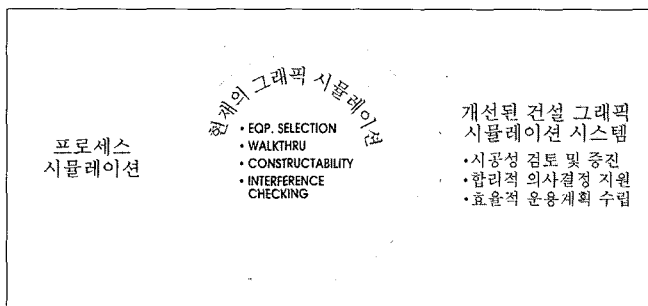


그림 1. 연구의 목적

타내었다.

1.2 연구의 절차 및 방법

본 연구는 프로세스 시물레이션과 그래픽 시물레이션의 연계를 통하여 발전된 건설 그래픽 시물레이션 시스템 개발을 위한 기초를 마련하고자 하는 연구이며, 다음의 그림 2와 같은 절차로 진행된다.

1.2.1 프로세스 시물레이션 단계

프로세스 시물레이션을 수행하기 위하여 우선적으로 그래픽 시물레이션의 직접적인 적용에는 한계를 가지는 비정형의 물체를 다루는 공정에 프로세스 시물레이션을 수행하기 위한 대상 작업을 선정한다. 그리고 선정된 대상 공정을 분석하여 프로세

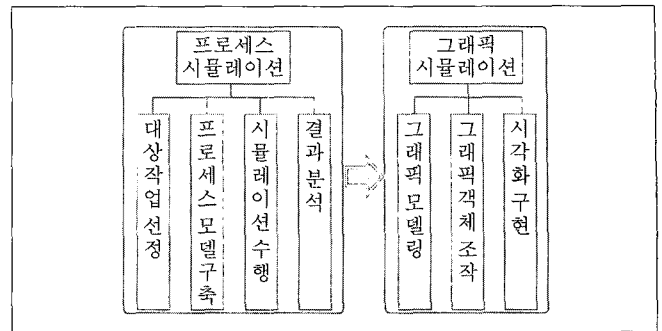


그림 2. 연구의 절차

스 모델을 구축하며 이 과정에는 불연속사건 시물레이션 프로그램인 SIGMA(Simulation Graphical Modeling and Analysis system)가 사용되었다. 상기와 같이 구축된 모델 프로세스 시물레이션 수행한다. 마지막으로 프로세스 시물레이션을 통하여 산출되는 각 작업의 시작 시간으로부터 작업소요시간, 장비의 유휴시간 등을 구하여 정리한다.

1.2.2 그래픽 시물레이션 단계

그래픽 시물레이션을 수행하기 위하여 가상현실 프로그램 개발 환경인 WorldUP®을 활용하여 3차원 그래픽 모델을 생성한다. 다음 단계로 생성된 모델을 바탕으로 그래픽 객체의 조작을 위하여 WorldUP®프로그램을 사용하였으며 이 프로그램에서는 비주얼베이직 스크립트를 사용하여, 파일 입·출력, 데이터베이스 연동 등의 고급 기능을 포함한 풍부한 사용자 인터페이스를 제공하고 있으며, 이를 활용하여 그래픽 시물레이션을 위한 객체의 동작을 추가하였다. 또한, 이 단계에서 프로세스 시물레이션 결과가 그래픽 객체의 움직임에 반영되게 된다. 이는 프로그램이 제공하는 함수와 명령들을 적절히 선택하고 프로그래밍 하여 그래픽 객체와 연결함으로써 이루어질 수 있었다. 표 1에는 여러 함수 및 명령문 일부의 구문과 사용 예를 들어 의미를 설명

표 1. 사용 스크립트 함수 및 명령문 예시

구분	구문	적용예	의미
함수	Sin(number)	C#=Sin(Pi / 4)	C에 Sine값을 넣음
	SQLOpen(" ", ,1)	SQLOpen ("dsn=A",s\$,3)	A라는 데이터 소스와 연결함
	Vect3dDistance()	distance=Vect3dDistance(v1,v2)	두지점 사이의 거리를 나타냄
명령문	Open "filename" for(mode) as(file#)	Open "PSim.out" for input as #1	입력치로 PSim 파일을 읽어들임
	Set object_var = object_expression	Set page = Doc.ActivePage	페이지를 활성화된 페이지로함
	[Movavble].Rotate Axis, Angle	A.Rotate X_Axis, 30	주어진 값에 맞추어 대상을 회전시킴
	:	:	:

해 보았다.

마지막으로 상기의 단계를 거쳐 구축된 그래픽 시뮬레이션 모델을 실행하여 공정의 시각화를 구현하게 된다.

## 2. 토공작업의 프로세스 시뮬레이션

프로세스 시뮬레이션의 결과를 시각화하기 위한 대상을 토공 작업으로 한정하였다. 토공작업에 관한 건설 프로세스 시뮬레이션의 결과를 얻기 위하여 SIGMA를 사용하였으며, 이 프로그램은 불연속사건 시뮬레이션 모델을 만들어서 결과를 얻어내는데 있어 대화식의 접근 방법을 제공해 준다(Schruben 1992).

구성요소들과 속성의 식별, 상태변수들의 확정, 사건의 식별 그리고 사건들 사이의 관계 상세화의 네 과정을 거쳐서 토공 프로세스의 불연속사건 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 이러한 과정을 거쳐 구축된 토공작업에 관한 간략한 시뮬레이션 모델과 약간의 설명을 그림 3으로 표현하였으며, 모델링 과정을 아래에 기술하였다.

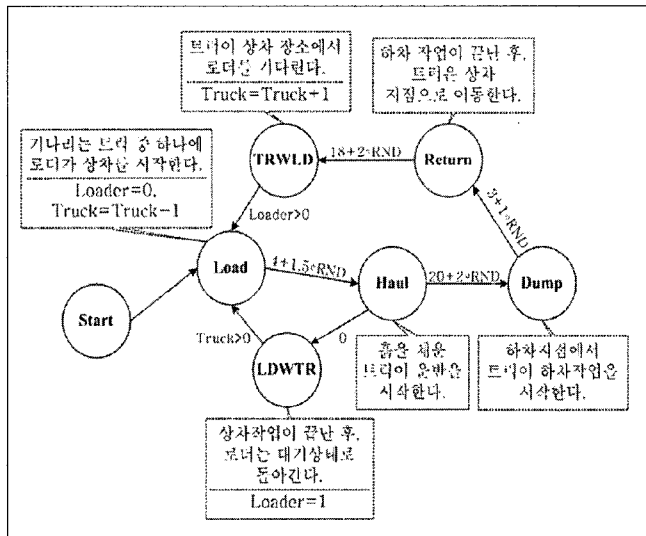


그림 3. SIGMA를 이용한 토공 모델

### 2.1 토공

토공은 다량의 비정형 물체를 한 곳에서 다른 곳으로 운반하는 전문화된 건설 분야이다. 토공 프로세스는 크게 상차(Load), 운반(Haul), 하차(Dump) 그리고 복귀(Return)의 4가지 작업으로 분류할 수 있다.

우선 토공 작업에 대한 간단한 시나리오를 만들었다. 작업에는 한 대의 로더와 여섯 대의 덤프트럭이 사용되며, 각 작업의 평균 소요시간은 장비의 작업속도와 이동거리 등을 고려하여 독립균등분포 형태에 따라 가정하였다. SIGMA에서는 표 2와 같

은 난수의 분포 형태를 정의할 수 있는 기능이 있으며, 본 토공 프로세스 시뮬레이션 연구에는 승법적 합동 난수 발생기(Multiplicative Congruential Random Number Generator)를 통하여 0에서 1사이의 독립균등분포 형태의 수를 발생시키는 방법을 적용하였다.

또한, 토공에 동원되는 덤프트럭은 작업을 함에 있어 FIFO(First-In-First-Out) 규칙을 따라서 운행하여, 덤프트럭간의 순서는 바뀌지 않는 것으로 가정하였다.

표 2. SIGMA의 난수분포형태

구분	분포형태	모수
NOR(M:S)	정규분포	M:평균값, S:표준편차
TRI(X)	삼각형분포	X:0에서 1 사이의 값
BET(X:Y)	베타분포	
ERL(X)	Erlang분포	
GAM(X)	감마분포	
RND	독립균등분포	

### 2.2 프로세스 모델 구축

토공작업에 대한 프로세스 시뮬레이션 모델의 구축은 다음의 표 3과 같은 절차로 이루어졌다.

표 3. 시뮬레이션 모델 구축 절차

구분	적용	의미
구성요소	로더	· 작업시간, 상태변수, 용량
	트럭	· 단계별 작업시간, 상태변수, 작업용량
상태변수	Loader	· 로더의 상태(Loader: 0/1=busy/idle)
	Truck	· 적재를 위해 기다리는 트럭의 수(Truck)
사건	상차	· 시작 단계에서 트럭들은 상차작업을 위해 대기하며, 로더는 대기중인 트럭 중 한대에 토사를 상차시키기 시작
	운반	· 토사가 적재된 트럭은 운반을 시작
	로더대기	· 상차 후, 로더는 대기상태로 전환
	하차	· 트럭이 사토지점에 토사를 하차 시작
	복귀	· 하차 후, 트럭은 상차지점으로 복귀
	트럭대기	· 상차지점으로 복귀한 트럭은 로더와 다른 트럭이 상차 작업 중이면 대기
사건관계	상차	· 상차 작업중 로더 상태 Loader=0(busy), 로더를 기다리는 트럭 수 Truck=Truck-1, 상차에 이어서 "운반"이 계획
	운반	· 운반에 이어서 "하차"가 계획
	로더대기	· 상차 후 로더의 상태 Loader=1(idle), 만일 Truck>0이면 "상차"가 즉시 진행
	하차	· 하차에 이어서 "복귀"가 계획
	복귀	· 복귀에 이어서 "트럭대기"가 계획
	트럭대기	· 복귀하여 상차 작업을 위해 대기하는 트럭의 수 Truck=Truck+1, 만일 Loader=0이면 "상차"가 진행

여기서, 시스템의 구성요소의 속성은 상태변수 Loader와

Truck으로 나타내어지는데 이러한 구성요소들의 상태가 변화 되는 사건이 발생하며, 이로 인한 상태변수의 변화가 초래된다.

2.3 토공 작업의 프로세스 시뮬레이션 결과

SIGMA 프로그램 상에서 위의 과정을 거쳐 만들어진 토공작업 모델을 시뮬레이션 수행하여 얻을 수 있는 결과 중, 그림 4와 5는 시간에 따른 상태변수 Loader와 Truck의 변화를 보여주고 있다.

그래프를 통하여 로더나 트럭이 어느 시간에 대기상태로 돌아가는지를 알 수 있다. 로더의 상태변수를 나타내는 그림 4에서 화살표로 표시된 부분 사이의 로더 상태변수가 1이라는 것은 로더가 대기상태에 있음을 의미하는 것으로, 덤프 트럭의 상태변수를 나타내는 그림 5의 같은 시간에서 결과를 보면 상태변수가

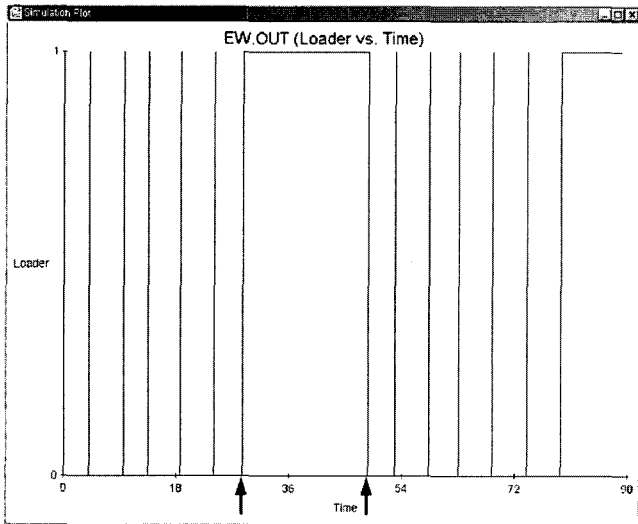


그림 4. 시간-LOADER

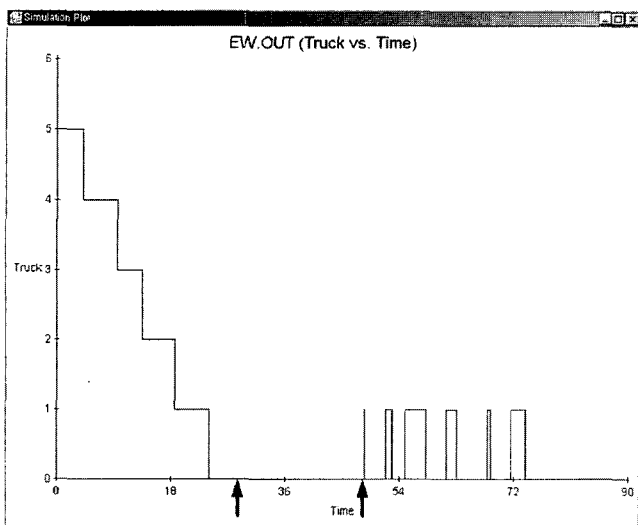


그림 5. 시간-TRUCK

0이므로 상차 지점에 한대의 트럭도 없음을 알 수 있다.

그림 6은 토공 작업의 프로세스 시뮬레이션 모델을 작성하여 실행시켜 얻은 텍스트 파일의 일부이다. 이 텍스트 파일에는 상태변수 및 초기조건을 포함하는 프로세스 시뮬레이션 모델의 정보부터 각 사건의 시작 시간과 시간에 따른 상태 변수의 상태를 보여주는 결과가 나타나 있다.

MODEL DEFAULTS

```

Model Name:          T511.MOD
Model Description:   EW
Output File:         EW.OUT
Output Plot Style:   NOAUTO_FIT
Run Mode:           GRAPHICS
Trace Vars:          TRUCK,LOADE
Random Number Seed: 12345
Initial Values:      6,1
Ending Condition:    STOP_ON_EVENT
Event:               DUMP (10 iterations)
Trace Events:        ALL_EVENTS_TRACED
Hide Edges:
    
```

Time	Event	Count	TRUCK	LOADER
0.000	START	1	6	1
0.000	LOAD	1	5	0
4.144	HAUL	1	5	0
4.144	LDWTR	1	5	1
4.144	LOAD	2	4	0
9.566	HAUL	2	4	0
9.566	LDWTR	2	4	1
9.566	LOAD	3	3	0
13.583	HAUL	3	3	0
13.583	LDWTR	3	3	1
13.583	LOAD	4	2	0
18.732	HAUL	4	2	0
18.732	LDWTR	4	2	1
18.732	LOAD	5	1	0
24.103	HAUL	5	1	0
24.103	LDWTR	5	1	1
24.103	LOAD	6	0	0
25.812	DUMP	1	0	0
28.603	HAUL	6	0	0
28.603	LDWTR	6	0	1
29.008	RETURN	1	0	1
29.638	DUMP	2	0	1
33.622	RETURN	2	0	1
33.686	DUMP	3	0	1
37.025	RETURN	3	0	1
39.902	DUMP	4	0	1
43.168	RETURN	4	0	1
45.671	DUMP	5	0	1
48.593	TRWLD	1	1	1
48.593	LOAD	7	0	0
49.137	DUMP	6	0	0
49.535	RETURN	5	0	0
51.919	TRWLD	2	1	0
52.907	HAUL	7	1	0
52.907	LDWTR	7	1	1
52.907	LOAD	8	0	0
53.054	RETURN	6	0	0
55.093	TRWLD	3	1	0
58.310	HAUL	8	1	0
58.310	LDWTR	8	1	1
58.310	LOAD	9	0	0
61.503	TRWLD	4	1	0
63.078	HAUL	9	1	0
63.078	LDWTR	9	1	1
63.078	LOAD	10	0	0
68.012	TRWLD	5	1	0
68.444	HAUL	10	1	0
68.444	LDWTR	10	1	1
68.444	LOAD	11	0	0

그림 6. 토공 작업의 프로세스 시뮬레이션 결과

여기서 연계되는 각 사건, 즉 토공작업에서의 상차, 운반, 하차 그리고 복귀 작업의 시작 시간들과 그들의 관계로부터 각 작업의 소요 시간을 구해 낼 수 있다. 예를 들어, 한 대의 트럭은 상차작업 후에는 운반작업을 하게 되므로, 상차에 소요되는 시간은 운반이 시작되는 시간에서 상차가 시작되는 시간을 빼주면

상차작업 소요시간을 얻을 수 있다.

다음 표 4는 작업의 시작 시간으로부터 소요시간을 구하는 과정을 표로 나타낸 것이다.

표 4. 작업 소요시간 구하기

작업명	소요시간 표현	계산과정
LOAD1	LD1	LD1 = HAUL1-LOAD1
HAUL1	HD1	HD1 = DUMP1-HAUL1
DUMP1	DD1	DD1 = RETURN1-DUMP1
RETURN1	RD1	RD1 = TRWLD2-RETURN1
TOTAL1	TD1	TD1 = LD1+HD1+DD1+RD1+TD1

### 3. 프로세스 시뮬레이션 결과의 시각화

로더와 트럭의 조합으로 토사를 운반하는 과정을 가상현실 프로그램 개발 환경인 WorldUP®의 연계를 통하여 시각화를 구현하였다. 프로세스 시뮬레이션(SIGMA)을 통해 얻은 각 작업의 시작 시간에 근거하여 작업 소요시간을 구하고, 이를 텍스트 파일로 저장한 후 스크립트를 이용해 불러들여 시뮬레이션 시간과의 비교를 통해서 해당 시간에 그래픽 객체들이 하여야 할 동작을 정의하게 되며, 그래픽 시뮬레이션의 실행으로 시각화가 이루어진다. 그림 7은 이러한 시스템의 전체적인 구조와 관계를 보여주고 있으며, 3.1~3.3 절에 설명을 추가하였다.

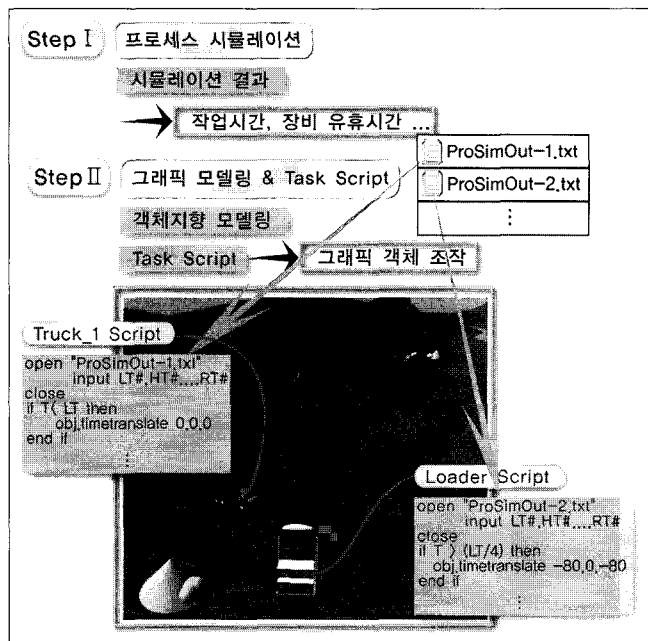


그림 7. 프로세스 시뮬레이션 결과의 시각화

그림 7에서 보는바와 같이, 프로세스 시뮬레이션 결과는 작업 시간, 장비의 유휴시간 등으로 정리되어 'ProSimOut.txt' 파일

에 저장되어 로더, 트럭 등의 그래픽 객체들의 동작을 지시하는 스크립트에서 불러들여진다. 또한, 지형 모델은 CAD를 이용해 실제 지형과 유사한 모형을 만든 뒤 프로그램 상에 불러 들였으며, 이동되는 토사의 시각화를 위하여 로더와 덤프 지점에 흙더미의 개략적 모형을 만들고 이들의 Scale을 조정하여 표현하는 방법을 사용하였다.

#### 3.1 프로세스 시뮬레이션과의 연계

프로세스 시뮬레이션에서 얻어진 상차, 운반, 하차, 복귀 각각의 시작시간 등의 결과로부터 작업시간이 산정되었으며, 산정된 작업시간은 텍스트 파일로 저장되어져 각각의 그래픽 객체들의 움직임을 정의하기 위한 스크립트의 입력값으로 활용된다.

#### 3.2 객체지향 모델

토공 작업에서 작업시간, 대기시간 등의 수치로 나타나는 수학/통계적 시뮬레이션의 결과를 효과적으로 시각화하기 위해서 장비, 재료 등의 작업환경에 관한 객체지향 모델을 고안하였다. 장비에 의해 다루어지는 재료들과 더불어 장비의 움직임에 영향을 받는 그 하부 요소들을 고려하여 각 부분이 상호작용하게 모델을 고안하였다. 예를 들어 장비 로더의 하위요소인 로더의 팔(Arm)이 상차작업을 위해 들어 올려 진다면, 로더 팔의 끝에 있는 버킷(Bucket)도 올려짐과 동시에 버킷에 담겨 있는 토사(Material)도 동일하게 움직여야 한다. 그림 8은 이러한 객체지향 모델의 구성의 예를 나타낸 것이다.

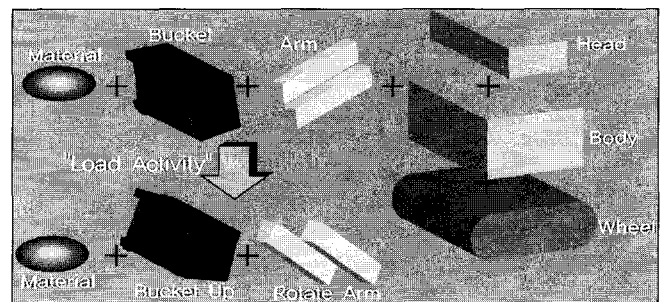
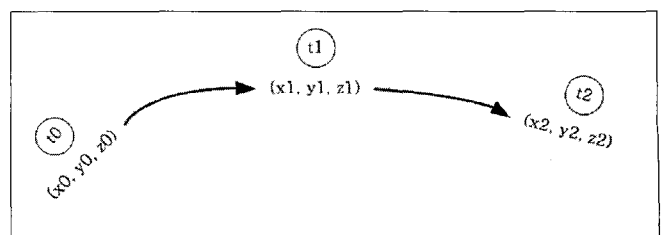


그림 8. 객체지향 모델 구성 예

#### 3.3 그래픽 객체의 조작

시뮬레이션 결과를 시각화하기 위한 그래픽 객체들의 움직임은 WorldUP®에서 베이직스크립트 언어를 사용해 정의하였다. 특정 작업시간 안에 하나의 객체를 이동시키기 위해서는 위치와



소요시간에 대한 정보가 정의되어야만 한다.

다음의 의사 코드는 위의 그림과 같이 한 객체를 t2의 시간동안 (x0, y0, z0)의 위치에서 (x2, y2, z2)의 위치로 이동시키는 예의 일부이다.

```

T= SimulationTime
set obj = Truck1
dim pos as vect3d
If T<=(t1-t0) then
    obj.gettranslation pos
    pos.x = x0+(x1-x0)/(t1-t0)×T
    pos.y = y0+(y1-y0)/(t1-t0)×T
    pos.z = z0+(z1-z0)/(t1-t0)×T
    obj.settranslation pos
End if
If (t1-t0)<T<=(t2-t0) then
    obj.gettranslation pos
    pos.x = x1+(x2-x1)/(t2-t1)×(T-t1)
    pos.y = y1+(y2-y1)/(t2-t1)×(T-t1)
    pos.z = z1+(z2-z1)/(t2-t1)×(T-t1)
    obj.settranslation pos
End if
    
```

여기서 T, t0, t2는 각각 시스템의 시간, 이동이 시작되는 시간, 이동이 끝나는 시간(연속되는 동작의 시작 시간)이며, t1은 출발지점과 도착지점의 중간점이라 할 수 있는 (x1,y1,z1)에 객체가 도달했을 시의 시간이다. 토공 시뮬레이션에서 장비들의 평면 좌표가 위와 같은 방법으로 연속적으로 갱신된다. 더불어 이동경로에 맞게 장비가 회전하여 진행 방향이 맞도록 하였다. 동적인 토공 프로세스를 프로세스 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과를 연계하여 트럭, 로더 그리고 토사의 흐름을 효과적으로 시각화 할 수 있도록 스크립트들이 작성되었다.

### 3.4 토공작업의 시각화 구현

토공 작업시 로더, 트럭 등의 작업 모습과 토사의 이동 모습을 WorldUP® 프로그램을 이용하여 시각화 하였다. 불연속 사건 시뮬레이션 프로그램인 SIGMA의 출력으로부터 얻어진 작업시간을 기준으로 그래픽 객체의 운동모습을 합리적으로 시각화 할 수 있었다. 다음의 그림 9는 토공작업의 전체적인 모습을 보여 주고, 그림 10과 그림 11은 각각 상차와 하차 작업 장면을 보여 주고 있다.

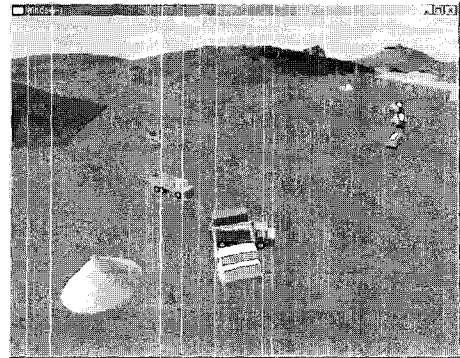


그림 9. 토공 전체 공정의 시각화

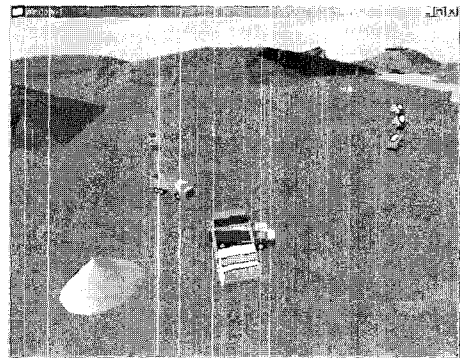


그림 10. 상차 작업 장면

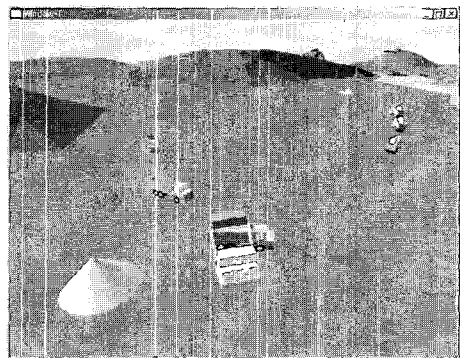


그림 11. 하차 작업 장면

## 4. 결론

본 연구에서는 현재의 건설 그래픽 시뮬레이션의 한계를 극복하기 위한 일환으로 프로세스 시뮬레이션을 통하여 획득된 수치 결과를 그래픽 시뮬레이션과 연계시키는 시도를 하였으며, 이를 통하여 토공 프로세스에 대하여 불연속사건 시뮬레이션을 통하여 산출된 작업별 소요시간을 그래픽 객체와 연결시켜 토공의 주요 작업들을 실제와 유사하게 시각화 하여서 불연속사건 시뮬레이션의 결과를 이해하는데 도움을 줌과 동시에 이의 신뢰성을 확보하는데 효과적임을 알 수 있었다. 결과적으로 장비조합에 따른 작업의 생산성 변화를 시각적으로 표현하여 확인할 수 있

도록 하여 기존에 단위 시간당 생산성을 수치적으로만 가늠할 수 있었던 건설 프로세스 시뮬레이션의 약점을 보완한 것이며, 비정형 물체를 다루는 공정에 대한 적용에 한계를 가지던 그래픽 시뮬레이션 시스템의 기능 개선을 이룰 수 있다.

향후에는 시공현장을 조사하여 현장여건을 고려한 프로세스 및 그래픽 모델의 보완 작업이 필요하며, 이는 토공 이외의 공정도 포함하여 연구가 계속될 것이다. 또한, 본 연구의 현장적용성 검증 후 프로세스 및 그래픽 시뮬레이션이 일체화된 시스템 개발로 결실을 맺을 수 있도록 노력할 것이다.

### 참고문헌

1. Alciatore, D., O'Connor, J., and Dharwadkar, P. (1991) "A Survey of Graphical Simulation in Construction: Software, Usage, and Applications," Report to the Advanced Technological Systems Task Force of The Construction Industry Institute.
2. OpendBosch, A. and Baker, N. (1995) "Simulation of Construction Operations in Virtual Interactive Environments," Proceedings of the Second Congress on Computing in Civil Engineering, Atlanta, Georgia.
3. Huang, R. and Halpin, D. W. (1993) "Dynamic Interface Simulation for Construction Operation (DISCO)," Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 503-510.
4. Oloufa, A. A. (1993) "Modeling of building construction activities using forms," Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 237-244.
5. Sawhney, A. and AbouRizk, S. M. (1996) "Computerized tool for hierarchical simulation modeling," ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 115-124.
6. Kamat, V. and Martinez J. (2001) "Visualizing Simulated Construction Operations in 3D," ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 329-337.
7. Hendrickson, C. and Rehak, D. (1993) "The Potential of a 'Virtual' Construction Site for Automation Planning and Analysis," Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 511-518.
8. Beliveau, Y. J. and Dal, T. (1994) "Dynamic-Behavior for Material Handling in Construction," Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 269-285.
9. Schruben, L. W. (1992) "SIGMA: A Graphical Simulation Modeling Program," The Scientific Press., South San Francisco, CA.

논문제출일: 2005.05.13

심사완료일: 2006.01.23

### Abstract

Even though graphical simulation is very useful for construction planning, the application of graphical simulation has a limitation in dealing with objects without fixed form like earthmoving process. In this case, the mathematical/statistical simulation about the productivity of the whole processes based on the numerical data of working time, waiting time and working capacity of using equipment becomes effective. The mathematical/statistical simulation is not fully utilized in the field of construction due to the difficulties of creating process models and securing trust the numerically expressed results of simulation. In this research, the output of discrete-event simulation programs which are the most common mathematical/statistical simulation tool for construction processes were analyzed for the purpose of earthmoving process visualization. The purpose of this research is to develop a graphical simulation system that can help the construction planner select most suitable equipment and construction methods through the visualize the numerical simulation results of the working time, the queuing time as well as the amount resources etc.

**Keywords :** Construction graphical simulation, Visualization, Virtual Reality, Discrete-event simulation