

# 시스템 다이내믹스를 활용한 토공장비의 조합 모형 연구

## A Combination Model of Earthwork equipment using System Dynamics

원 서 경\* · 김 선 국\*\* · 한 충 회\*\*\*

Won, Seo-kyung · Kim, Sun-Kuk · Han, Choong-Hee

### 요 약

건설공사의 초기 단계인 토공사의 경우 현장 토공계획에 부합하는 다양한 건설장비를 활용하여 수행된다. 이 경우 짧은 시간에 다종의 건설기계장비가 투입되며 많은 공사가 소요되는 만큼 어느 공종보다도 토공관리자의 합리적인 계획 수립이 요구된다. 그러나 대부분의 경우 경험과 직관을 바탕으로 토공장비계획이 수립되어 공정관리 및 원가절감 차원에서 적절한 지 검증이 어려우며, 계획수립에 요구되는 고려조건이 변경될 때마다 시간과 인력을 투입해야하는 실정이다.

이에 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 기계화 토공장비의 굴삭과 적재 및 운반단계를 대상으로 토공장비의 적정 조합모형을 구축한다. 연구의 결과로 도출되는 토공장비의 적정 조합모형은 토공계획을 담당하는 관리자가 토공장비계획을 함에 있어 짧은 시간에 합리적인 판단을 하도록 지원해줄 것으로 기대된다.

키워드 : 토공사, 건설기계, 장비조합, 토공장비, 시스템 다이내믹스

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설공사에 있어 토공사는 가장 기본적이며 공기단축과 원가절감 효과가 큰 공종이라 할 수 있다. 더구나 토공사 시 장비의 존도가 커짐에 따라 현장 여건에 적합한 토공장비조합계획이 공정 및 원가관리에 미치는 영향도 증가하고 있다. 그러나 대부분 현장에서는 아직도 경험과 직관에 의존하고 있는 실정이며 체계적인 토공장비조합계획이 원가 및 공정관리에 미치는 효과에 대한 인식도 낮은 실정으로 관련 분야에 대한 연구가 필요한 실정이다.

또한 토공작업에서 장비의 선정 및 조합은 공기단축 및 원가절감 뿐 아니라 품질향상 면에서도 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 공사에 투입될 장비의 성능 및 특성, 공사종류, 규모 및 주위 여건 등을 사전에 철저히 파악해야 하며, 사용조건에 맞는 규격의 장비를 선정하여 최적조합을 계획해야 한다.

합리적이고 효율적인 토공계획을 위해서는 토공작업에서 중요한 요소인 굴삭, 적재 및 운반의 세 단계에서 토공 작업량, 토사운반 거리, 공사 소요일수 등의 조건에 따라 건설장비의 조합을 고려하여야 하며, 주어진 토공작업 조건에 따라 최적화하여 장비의 생산성을 최대한 향상시켜야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 주어진 공사 조건에 따라 토공장비를 빠르고 쉽게 조합하는 모형을 구축하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 토공작업의 여러 단계 중 기계화 토공장비의 굴삭, 적재 및 운반단계를 대상으로 하였다. 그리고 토공작업의 각 단계에서 주로 사용하는 대표적 장비를 선정하여 진행하였다. 굴삭장비는 백호(back hoe), 적재장비는 로더(loader), 운반장비는 덤프트럭(dump truck)을 중심으로 하여 장비별 조합을 검토하였다.

합리적인 토공계획을 위해서는 토공의 기본적 내용을 충분히 인식하고, 공사자료 및 공사내용을 파악·검토하여 실시해야 한다. 토공작업에 착수하기 전 토공 작업량 및 토사운반 작업거리, 소요되는 공사일수를 사전에 고려하게 되며 이에 적합한 최적시공을 위한 토공장비의 선정 및 조합은 매우 중요하다. 본 연구에서 시스템 다이내믹스를 이용한 토공장비조합모형을 구축하기 위한 방법은 다음과 같다.

\* 일반회원, 경희대학교 대학원 건축공학과 박사과정, kcem@khu.ac.kr

\*\* 종신회원, 경희대학교 토목건축대학 교수, 교신저자, kimsuk@khu.ac.kr

\*\*\* 종신회원, 경희대학교 토목건축대학 교수, 공학박사, chhan@khu.ac.kr

본 연구는 BK 사업 연구비 지원에 의한 연구의 일부임.

첫째, 지금까지 국내에서 수행된 토공 및 토공장비 계획, 그리고 건설장비 조합에 관한 연구에 대하여 고찰하고 시스템 다이내믹스 기법(system dynamics)에 대한 문헌고찰을 하였다.

둘째, 이러한 이론적인 고찰을 토대로 각 장비별 특징과 작업 능력을 토대로 한 조합검토를 하였다.

셋째, 굴삭, 적재 및 운반 장비들의 성능을 토대로 하여 인과지도(causal loop diagram)를 작성한다. 그리고 작성된 인과지도를 활용하여 항목별 요인들이 장비별 조합과 이에 연계된 요인에 미치는 관계에 대하여 파악한 후에 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 모델을 구축한다.

넷째, 본 연구에서 제안한 토공장비조합의 적정성 및 시스템 다이내믹스를 활용한 조합방법의 유효성을 검토한다. 이를 위해 기존 토공장비 선정방식과 대비하여 실효성을 검증한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 기존 연구 현황

토공장비의 적정조합 분석을 연구함에 있어 국내에서도 많은 연구가 진행되어 왔다. 기계화 토공장비 조합시공의 최적단가 산출방안에 관한 연구(진병훈 박태순 1988), 건설장비의 선정 및 조합(한국건설기술연구원 1998), 토공장비계획과 기계시공 관리요령(한국건설기술연구원 2005) 등은 있었지만 토공 및 장비 계획 수립 시 입력변수 값의 변경에 따른 시스템 다이내믹스를 활용한 장비조합 모형구축에 관한 연구는 구체적으로 진행되지 못한 실정이다. 또한 연구논문에서도 운반작업의 영향요소분석을 통한 덤프트럭의 운반속도 산정방법(박현용 외 2인 2007)과 트럭과 로더를 중심으로 프로세스 시뮬레이션을 연계한 건설공정 시각화(서종원 외 2인 2006)에 관한 유사내용은 있으나 토공 장비조합에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

### 2.2 시스템 다이내믹스의 개념

시스템 다이내믹스는 1961년 제이 포레스터(Jay Forrester) 교수가 산업체 재고량과 노동력의 불안정한 변화, 시장점유율의 감소 문제를 다룬 산업동태학을 발표한 이후 기업경영, 공공정책, 공학, 그리고 인간의 의사결정행위에 대한 이해와 문제해결을 위한 독특한 시각과 방법으로 광범위하게 응용되어 왔다. (김도훈 외 2인 1999) 즉, 현상을 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해 나가는지를 컴퓨터상에서 실험해 보는 방법론이자 현상을 바라보는 시각이며 준거를

(framework)이다.

본 연구에서 시스템 다이내믹스를 이용하는 이유는 현장에서 토공계획 및 장비계획 수립 시 주어진 입력 변수들의 값이 변화되는 상황에서도 기존의 인과지도를 바탕으로 하여 단시간에 결과치를 얻을 수 있으며, 인지가 손쉬운 도식화된 방식으로 산출되기 때문이다.

시스템 다이내믹스는 다음 그림 1과 같은 연구절차에 의해 이루어진다.

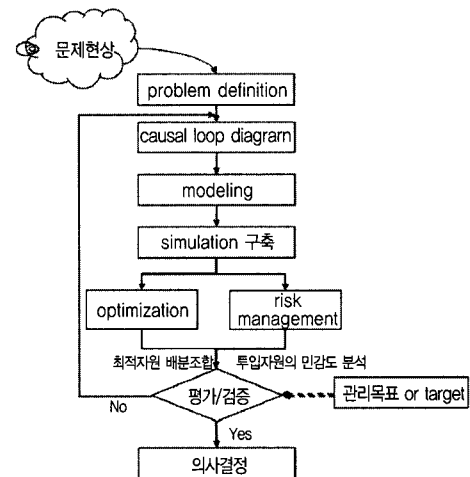


그림 1. 시스템 다이내믹스의 연구절차

참고로 DES, Stella, Slam II, ARENA를 업그레이드 한 Awesim 등의 다양한 범용 시뮬레이션 소프트웨어가 있으나, 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 효율적으로 적용할 수 있는 Expert Powersim Studio 5.0을 이용하여 모형을 구축하였다. 이는 인과지도 작성과 시뮬레이션 진행상황을 다양한 그래픽과 도표 형태로 표현하여 현장 실무자들이 인식하기에 용이한 점이 있기 때문이다.

## 3. 토공장비의 작업능력 및 조합

토공작업의 여러 가지 장비조합 중에서 백호의 굴삭작업, 로더의 적재작업과 덤프트럭에 의한 운반작업과의 조합은 가장 많이 사용되고 있는 굴삭운반 조합공법이다.

굴삭장비는 굴삭용 버킷을 조작하여 토사 등을 굴삭하는 것으로서, 셔블(shovel)계 굴삭기는 부착하였다가 떼어 놓는 부대장치에 따라 셔블, 드래그 라인, 크랩셀, 크레인 등으로 구분된다.

적재장비는 주로 토사류를 운반장비 등에 적재하는 기능을 가지며 취급재료를 버킷에 담고 담긴 재료를 운반하여 목적하는

1) 노르웨이의 Powersim사에서 개발한 시뮬레이션 패키지

장소에 내리는 동작 등을 반복하게 된다. 참고로 적재장비의 동작은 서블게 굴삭기와 유사하며 부분적으로 굴삭기능을 가지고 있다.

토공장비용 운반장비는 운반거리, 작업종류, 운반재료의 종류, 운반량 등에 의하여 장비를 선택할 수 있다. (남기천 외 2005)

**3.1 작업능력의 기본산정법**

토공장비의 작업능력은 일반적으로 시간당 작업량으로 표시되고 있다. 기종에 따라서는 일당으로 표시되기도 하지만 시간당으로 표시되는 것이 기본으로 되어 있다. (한국건설기술연구원 2005)

토공장비의 작업능력 산정을 위해 본 연구와 관련하여 토공사의 현장실무에 관한 장비사용의 내용을 요약하면 다음과 같다. (남기천 외 2005)

(1) 기본식

토공장비의 작업능력 산정은 작업이 반복되어 시행되므로 일반적으로 다음 식 1에 의하여 시간당 작업량을 산출하고 있다.

$$Q = n \cdot q \cdot f \cdot E \quad (\text{식. 1})$$

- 단,  $Q$  : 시간당 작업량( $m^3/hr$  또는  $ton/hr$ )
- $n$  : 시간당 작업 사이클 수
- $q$  : 1회 작업 사이클당 표준 작업량 ( $m^3$  또는  $ton$ )
- $f$  : 토량환산계수
- $E$  : 작업효율

(2) 장비의 작업시간

장비의 시간당 작업량은 장비의 운전 시간당 작업량으로 하고, 이 운전시간은 장비의 주기관이 회전하거나 주작동부가 가동하는 시간을 말하며, 주 목적의 작업을 하는 실작업시간 외에 작업 중의 장비이동, 기관 또는 주작동부의 예비가동, 운전시간 중의 점검 또는 조정, 주류, 조합장비인 경우의 대기 등이 포함된다.

(3) 시간당 작업량

토공에서의 작업능력은 일반적으로  $m^3/hr$ 로 표시되고, 자연상태의 토량, 흐트러진 상태의 토량, 다져진 후의 토량의 세 가지 표시방법이 있으며 장비종류에 따라서  $ton/hr$ ,  $m^3/hr$  등으로 작업량을 표시할 때도 있다.

(4) 1회 작업 사이클당 표준 작업량

장비는 일련의 동작을 되풀이 하는 작업을 하게 되고, 이 때의

1회 사이클의 동작으로 이루어지는 표준적인 작업조건과 작업관리 상태에 있어서의 작업량을 1회 작업 사이클당 표준 작업량이라고 한다. 토량의 경우 일반적으로 흐트러진 상태에서의 작업량을 말하며  $m^3$ 나  $ton$ 으로 표시한다.

(5) 시간당 작업 사이클 수

$$n = \frac{60}{C_m(\text{min})} \text{ or } \frac{3,600}{C_m(\text{sec})} \quad (\text{식. 2})$$

시간당 작업 사이클 수는 위와 같이 산정하고,  $C_m$ 은 사이클 시간으로서 장비의 작업속도나 주행속도에 따라 분(min) 또는 초(sec)로 표시한다.

(6) 작업효율

장비의 시간당 작업량은 작업현장의 제반 조건에 따라 변화하는 것이므로 표준적인 작업능력에 작업현장의 여러 가지 여건에 알맞은 효율을 고려하여 산정하여야 하며, 이 작업효율은 일반적으로 능력적 요소와 시간적 요소로 구분된다.

$$\text{작업효율}(E) = \text{현장작업능력계수} \times \text{실작업시간율} \quad (\text{식. 3})$$

(7) 현장 작업능력 계수

장비의 표준적인 작업능력에 영향을 미치는 기상, 지형, 토질, 공사규모, 시공방법, 장비의 종류, 장비 조종원의 기능도 등 작업현장 여건을 말한다. 해상작업의 경우 파도 및 풍향 등의 작업현장 여건을 고려한 계수이다.

(8) 실 작업시간율

실 작업시간은 장비의 상태, 공사규모, 시공방법 등에 의하여 변화하므로 이를 고려하여야 한다.

$$\text{실 작업시간율} = \frac{\text{실 작업시간}}{\text{운전시간}} \quad (\text{식. 4})$$

일반적인 실 작업시간율은 0.91~0.75이다. (1시간의 경우 55분~45분임)

본 연구에서는 이와 같은 식을 활용하여 각 장비별 시간당 작업량을 중심으로 조합관계를 파악하여 토공장비조합모형 구축에 적용하였다.

**3.2 토공장비의 특징 및 작업능력**

(1) 백호 (back hoe)

토공 굴삭작업에서 대표적인 장비인 백호는 불도저와 함께 토

목공사의 기본 장비로서 파워셔블과 그 기능이 유사하나 백호는 주로 지면 하부를 굴삭하여 적재하는 작업에 있어서는 다른 어느 기종 보다 우수한 기능을 지니고 있고, 강성이 크기 때문에 좁은 공간에서 작업하여 트럭에 적재하는 작업을 하는 경우에는 타 적재장비보다 유리하며 디퍼를 직접적으로 당기기 때문에 파워셔블보다 더 큰 선단력을 발휘할 수 있다. (진병훈 1988)

백호의 작업사이클은 불도저와 같이 이동이 없으므로, 굴삭과 적입, 90도 회전, 배토회전으로 이루어질 때 주로 고정시로 구성된다. 백호의 크기가 커지면 사이클이 길어지지만 일반적으로 장비는 유사한 성능을 갖고 있어, 각 동작에 필요한 시간은 비슷하다. 굴삭에서는 이동이 필요하며, 평균 20회 정도의 굴삭에 한 번의 위치변경이 있어야 한다. 그리고 이동에 따른 변동시 시간을 추가해야 한다.

백호가 덤프트럭에 적재하는 경우에는 덤프트럭의 위치를 잡는 동안 기다려야 하며, 경우에 따라서는 백호의 굴삭과 적입, 90도 회전 등의 동작에 따라 시간이 추가되어야 한다.

굴삭장비인 백호의 작업량 및 사이클 타임 산정은 다음 표 1과 같다. (남기천 외 2005)

표 1. 백호의 작업량 및 사이클 타임 산정

구분	작업량 산정(m <sup>3</sup> /hr)	사이클 타임(sec)
	$Q = \frac{3600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E}{C_m}$	$C_m = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$
산정 방법	Q : 시간당 작업량(m <sup>3</sup> /hr) q : 버킷 용량(m <sup>3</sup> ) k : 버킷 계수 f : 토량환산계수 E : 작업효율 C <sub>m</sub> : 사이클 타임(sec) (고정시 + 변동시 = 23 + 변동시)	C <sub>m</sub> : 사이클 타임(sec) t <sub>1</sub> : 굴삭 및 적입하는 시간 t <sub>2</sub> : 90도 회전하는 시간 t <sub>3</sub> : 배토회전하는 시간 t <sub>4</sub> : 90도 반전하는 시간 t <sub>5</sub> : 위치를 변경하는 시간

(2) 로더(loader)

로더는 무한궤도식과 타이어식이 있으며 무한 궤도식 로더는 불도저에서 파생되어 불도저의 배토판 대신에 유압조작에 의한 버킷장치를 한 것으로 차체의 안전성을 향상시키기 위하여 접지 길이를 길게 한 것이 불도저와 다른 점이고 타이어식은 주행 속도가 빠르고 기동성이 좋은 장점을 가지고 있으며 작업 행동의 범위가 넓다. (남기천 외 2005)

적재장비인 로더는 주행장치에 따라 휠로더(wheel loader)와 크롤러로더(crawler loader)로 구분한다. 로더의 작업 사이클은 그림 2와 같이 d1을 전진할 때 토사를 버킷에 적입해서 d1을 후진하고, 방향을 전환해서 d2를 전진하여 배토했고, d2를 후진하는 것으로 이루어진다.

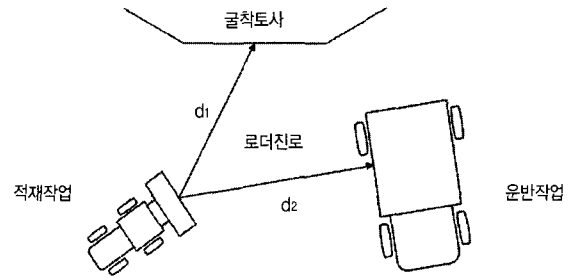


그림 2. 로더의 적재작업

그러므로 표준작업 사이클은 d1, d2에 해당하는 전진과 후진에 필요한 변동시(variable time)와, 굴삭 · 회전 · 기어변환 · 가속 · 감속에 필요한 고정시(fixed time)로 구성된다.

그러나 운반차량의 위치선정과 로더의 후속 사이클이 중복되므로, 위치선정에는 추가시간을 계상한다. 또한 고속 작업 시 가속과 감속에 각각 여유시간을 추가해야 한다.

적재장비인 로더의 작업량 및 사이클 타임 산정은 다음 표 2와 같다. (이송 외 2인 2004)

표 2. 로더의 작업량 및 사이클 타임 산정

구분	작업량 산정(m <sup>3</sup> /hr)	사이클 타임(sec)
	$Q = \frac{3600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E}{C_m}$	$C_m = m \cdot l + t_1 + t_2$
산정 방법	Q : 시간당 작업량(m <sup>3</sup> /hr) q : 버킷 용량(m <sup>3</sup> ) k : 버킷 계수 f : 토량환산계수 E : 작업효율 C <sub>m</sub> : 사이클 타임(sec) (고정시 + 변동시 = 30 + 변동시)	C <sub>m</sub> : 사이클 타임(sec) m : 주행장치에 따른 계수(s/m) 무한궤도식 : 20 차륜식 : 18 l : 운반거리(m) t <sub>1</sub> : 버킷에 흙을 적재하는 시간(5~45초) t <sub>2</sub> : 변속 및 대기시간(1초)

(3) 덤프트럭(dump truck)

덤프트럭은 가장 많이 사용되는 운반장비로서 장거리 운반, 공사현장 간의 용이한 이동, 공사 진척에 따른 투입대수 증감에 의한 운반량의 조정 등의 장점을 가지고 있다.

덤프트럭의 표준사이클은 상차(loading), 운반(hauling), 배토했(dumping), 복귀(return), 상차를 위한 위치조정(spottling)으로 구성된다. (권기태 1999)

운반장비인 덤프트럭의 작업량 및 사이클 타임 산정은 다음 표 3과 같다. (이송 외 2인 2004)

3.3 토공장비의 선정 및 조합

건설현장에서 토공사 시 토공계획, 토사반출량, 현장 주변의

표 3. 덤프트럭의 작업량 및 사이클 타임 산정

구분	작업량 산정(m <sup>3</sup> /hr)	사이클 타임(min)
산 정 방 법	$Q = \frac{60 \cdot q_t \cdot f \cdot E}{C_m}$	$C_m = \frac{C_{ms} \cdot n}{60 \cdot E_s} + (t_1 + t_2 + t_3)$
	$q_t = \frac{T \cdot L}{r_t}$	$n = \frac{q_t}{q \cdot K}$
	Q: 작업량 산정(m <sup>3</sup> /hr)	C <sub>m</sub> : 사이클 타임(min)
	q <sub>t</sub> : 호트러진 상태의 1회 적재량(m <sup>3</sup> )	E <sub>s</sub> : 적재기계의 작업효율
	r <sub>t</sub> : 자연상태의 토석의단위중량(tf/m <sup>3</sup> )	C <sub>ms</sub> : 적재기계의 사이클 타임(min)
	T: 덤프트럭의 적재량(tf)	n: 덤프트럭의 만차에 필요한 횟수
	L: 토량변화율	q: 적재기계의 디퍼 및 버킷용량(m <sup>3</sup> )
	f: 토량 환산계수	K: 디퍼 또는 버킷계수
	E: 작업효율	t <sub>1</sub> : 왕복시간
	C <sub>m</sub> : 사이클 타임(min)	t <sub>2</sub> : 적하시간(0.5~1.5min)
	t <sub>3</sub> : 대기시간(0.15~0.7min)	

여건, 사토장과의 거리 및 왕복 시간, 토공사 금액 및 기간 등 제반 상황을 고려하여 적합한 장비 대수와 장비 조합을 계획하게 된다.

그러나 대부분의 경우 경험과 직관에 따라 결정하는 경우가 많으며 이는 공정·원가 관리적 측면에서 효율적이지 못한 실정이다. 또한 상기 조건들이 수시로 변하는 상황에서 매년 계산을 반복하여 계획을 수정해야 하는 인력손실도 뒤따르고 있다.

본 연구에서 활용하는 시스템 다이내믹스는 이러한 계획에 입력되는 가능한 모든 입력변수들을 선정하여 그 값이 변화하더라도 이에 따른 장비 조합 및 공사소요 일수 등의 종속변수 값을 즉각 알 수 있는 장점이 있다.

토공장비의 선정 및 조합에 있어 2개 이상의 서로 다른 종류의 장비가 각각의 작업으로 동일 공종을 수행할 때 조합장비라고 한다. 조합장비의 효율적인 운영은 용량의 균형에 있다.

토사를 굴삭하여 적재와 운반을 할 때에 토사의 굴삭과 집적은 백호로 수행하고 집적된 토사를 로더로 덤프트럭에 상차하여 트럭이 운반할 때는 백호, 로더, 덤프트럭은 연계작업이 된다. 조합장비로 수행하는 작업은 그 작업의 능력을 좌우하는 장비의 효율이 최대가 되게 관리한다. 그러므로 로더가 작업능력을 좌우하게 되며, 로더가 한 대의 트럭에 상차하는 데는 짧은 시간이기 때문에 로더의 상차능력은 평균값이 아닌 최대값으로 한다. 적재장비의 버킷 용량과 운반장비의 적재량, 운반거리에 따라 운반장비 대수는 서로 균형을 이루어야 한다. (권기태 2002)

적재장비인 로더와 운반장비인 덤프트럭의 효율적인 조합의 경우, 로더의 버킷(bucket)으로 3~4회 적재가 critical이고 그 이상의 적재회수가 되면 정지시간(대기시간)이 너무 길어 효율이 떨어지기 때문에 적재회수가 3~4회 이상이 되지 않도록 조합해야 한다. (한국건설기술연구원 1998)

한 대의 로더(loader)와 대의 덤프트럭이 조합으로 토사를 운반할 때, 공종의 생산성을 좌우하는 작업은 로더이다. 따라서 주력장비인 적재장비(로더)의 대소에 따라서 운반장비(덤프트럭)의 크기도 변하고 가능한 한 동일 기종을 골라 각 장비의 작업능력이 균형을 유지하는 것이 필요하다.

로더의 시간당 최대능력을 q<sub>e</sub>, 덤프트럭의 시간당 최대능력을 q<sub>d</sub>라 하면,

$$N > \frac{q_e}{q_d} \quad (\text{식. 5})$$

의 관계로 덤프트럭의 대수를 결정한다. (권기태 2002)

본 연구의 토공장비의 최적조합 모형에서는 이와 같은 덤프트럭의 최적대수 산정으로 굴삭과 적재장비의 연계작업능력에 따라 토사운반 작업능력이 최대의 효율을 갖도록 조합한다.

### 4. 토공장비의 최적조합 모형 구축

본 절에서는 토공장비의 최적조합을 위하여 장비별로 영향을 주는 요인들을 조합하여 인과지도를 작성하고 이를 통해 굴삭과 적재 및 운반장비의 최적조합 모형을 구축하고자 한다.

#### 4.1 토공장비 최적조합의 검토

토공장비의 최적조합은 다음의 그림 3과 같이 백호-로더 조합의 시간당 총작업량과 덤프트럭의 시간당 총 운반 토량과의 관계에 의해 산정할 수 있다.

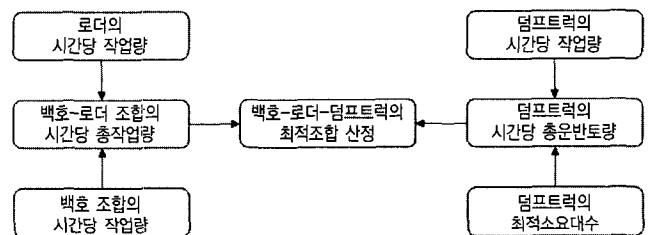


그림 3. 토공장비조합의 산정 개요

토공장비의 조합작업에서 작업능력을 좌우하는 적재장비인 로더를 중심으로 하여 굴삭과 적재 및 운반장비의 적정용량, 적정소요대수 산정으로 그림 4와 같이 토공장비 적정조합의 검토 인과지도를 작성하였다.

그림 4의 인과지도에서와 같이 토공의 굴삭과 적재 및 운반작업에 있어서 장비의 적정조합은 백호의 굴삭작업에 연계되는 로더의 시간당 작업량이 덤프트럭의 시간당 총운반토량과 서로 가

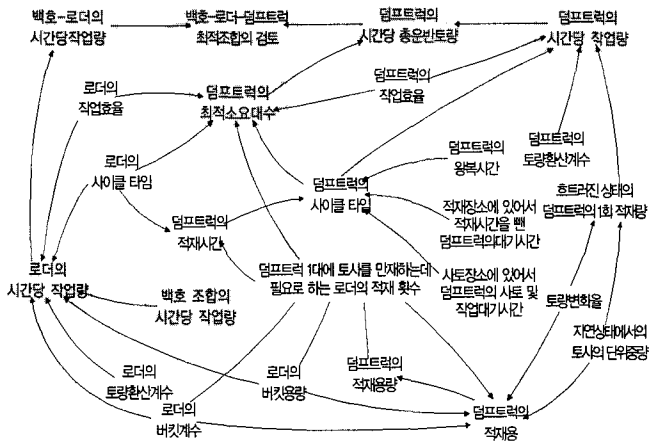


그림 4. 토공장비조합의 검토 인과지도

가워지는 값을 갖게 되는 관계가 될 때 이루어지게 된다.

### 4.2 토공장비 적정조합 모형 구축

토공장비의 적정조합 모형 구축은 토공작업 착수 전 계획 시 예상되는 항목별 요인들을 미리 선정하고, 그에 따른 토공장비 조합으로 향후 공사의 진행을 예상하고 합리적인 의사결정을 할 수 있도록 하는 데에 목적이 있다. 이를 위해 상기의 인과지도를 활용하여 토공계획에서 예상되는 여러 요인들이 각 장비별 조합

과 토공작업에 미치는 관계에 대하여 파악하였다.

토공작업 시 사전에 고려해야 할 변수로는 총 토공 작업량, 예정 공사소요일수, 예정 일일 작업시간, 덤프트럭의 운반거리, 현장 여건에 따른 장비들의 작업효율 등을 들 수 있다.

이에 본 절에서는 3.2 절의 내용과 앞서 작성한 인과지도를 토대로 시스템 다이내믹스 모델링 도구인 Powersim을 활용하여 그림 5와 같은 토공장비의 적정조합 모형을 구축하고 입력값인 독립변수에 따라 결과값인 종속변수의 분석을 실시하여 토공장비의 적정조합 모형을 구축하였다. 그리고 이에 따른 장비조합의 고려사항을 그림 6과 같이 독립변수, 종속변수로 설정하였다.

토공장비 적정조합 모형에서는 그림 6과 같이 작업하게 될 총 토공량과 예상 공사소요일수, 1일당 예상 작업시간, 토취장으로 부터 토사장까지의 덤프트럭의 운반거리, 장비별 작업효율이 초기 입력값이 된다. 이를 독립변수로 설정하고 값을 변동하여 입력값이 변동될 때의 종속변수값이 산정되도록 구축하였다.

초기 입력값에 대해 토공장비조합 모형으로 시뮬레이션 하여, 이에 따른 결과값으로는 백호의 최적 사용용량과 대수, 로더의 최적 사용용량과 덤프트럭의 최적 사용톤수 및 불필요한 지연시간이 없는 최적 소요대수가 산정되어 굴삭·적재·운반작업 장비의 적정조합을 알 수 있게 된다. 그리고 작업에 따른 실제 소요 공사일수 및 조합장비의 시간당 작업량이 산정된다. 이와 같은 결과값에 따라 장비별 시간당 소요 비용을 적용하면 토공작업의 소요예상비용 등이 산출가능해짐에 따라 합리적인 토공계획을 할 수 있을 것이다.

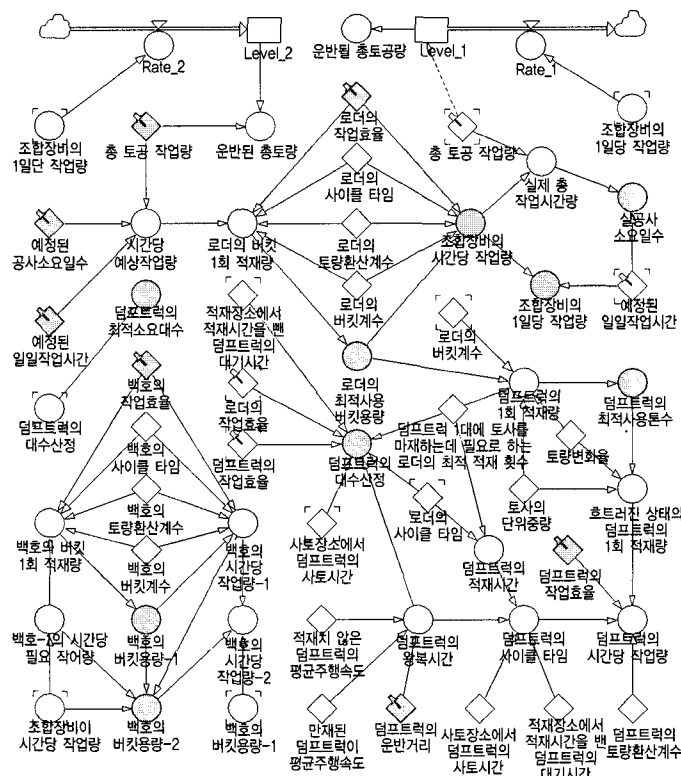


그림 5. 토공장비의 적정조합 모형

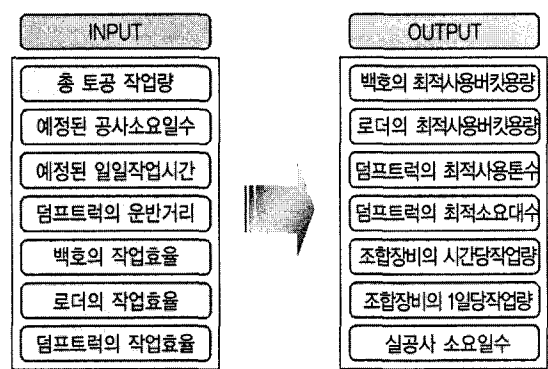


그림 6. 토공계획의 독립변수 및 종속변수

즉, 그림 6과 같이 주어진 입력변수들의 값이 변화하더라도 토공장비조합 모형을 적용하여 결과 값을 그래프 및 표로 알기 쉽게 시뮬레이션할 수 있다.

### 4.3 사례 프로젝트 연구

본 연구에서 구축한 토공장비의 적정조합 모형의 검증에 위해

사례 프로젝트를 선정하여 토공장비조합을 산정하도록 하였다. 이를 위해 2006년 6월에 착공한 경기도의 ○○ 아파트형 공장 신축공사를 대상으로 선정하여 분석을 실시하였다. 참고로 사례 프로젝트의 개요는 다음 표 4와 같다.

표 4. 사례 프로젝트 개요

공 사 명	○○ 아파트형 공장 신축공사
대지위치	경기도 ○○시 ○○구
대지면적	30,177 m <sup>2</sup>
공사규모	총17층(지하2층 지상15층)
연면적	142,519 m <sup>2</sup>
주요용도	아파트형 공장
공사기간	착공 후 24개월

선정된 사례 프로젝트의 토사반출량은 24,500m<sup>3</sup>이며, 예정 공사소요일수는 14일, 예정 일일작업시간은 8시간, 덤프트럭의 토사운반거리는 7.5km이다.

또한 각 장비별 작업효율은 최적의 조건이라 했을 때, 본 모형에 의한 결과 값은 표 5와 같다. 토공장비별 조합은 백호 2대(1.0 m<sup>3</sup>, 1.2m<sup>3</sup>)와 로더 1대(3.3m<sup>3</sup>), 덤프트럭 17대(23ton)로 최적조합이 되었다. 또한 조합장비의 시간당 작업량은 228.1m<sup>3</sup>, 1일당 작업량은 1,824.77m<sup>3</sup>, 실제 소요되는 공사일수는 14일로 산정되었다.

표 5. 사례 프로젝트의 토공장비 최적조합

INPUT		OUTPUT	
토사반출량	24,500 m <sup>3</sup>	백호의 최적 사용버킷용량	1.0 m <sup>3</sup> (1 대) 1.2 m <sup>3</sup> (1 대)
예정된 공사소요일수	14 일	로더의 최적 사용버킷용량	3.3 m <sup>3</sup> (1 대)
예정된 일일작업시간	8 시간	덤프트럭의 최적사용톤수	23 ton
덤프트럭의 운반거리	7.5 km	덤프트럭의 최적사용대수	17 대
백호의 작업효율	양호 (0.85)	조합장비의 시간당 작업량	228.1 m <sup>3</sup>
로더의 작업효율	양호 (0.7)	조합장비의 1일당 작업량	1,824.77 m <sup>3</sup>
덤프트럭의 작업효율	양호 (0.9)	실공사 소요일수	14 일

### 4.4 민감도 분석

시스템 다이내믹스 모델링 도구인 Powersim을 이용하여 구축한 토공장비조합 모형의 각 독립변수 변화를 통한 종속변수의 민감도를 분석하였다.

#### (1) 총 토공량의 변화에 따른 민감도

토공작업 시 예정 공사소요일수, 예정 일일작업시간, 덤프트

럭의 운반거리 값을 고정하고, 작업할 총 토공량을 0~30,000 m<sup>3</sup>의 구간으로 변화시켰을 때의 종속변수들의 민감도 그래프는 그림 7과 같다.

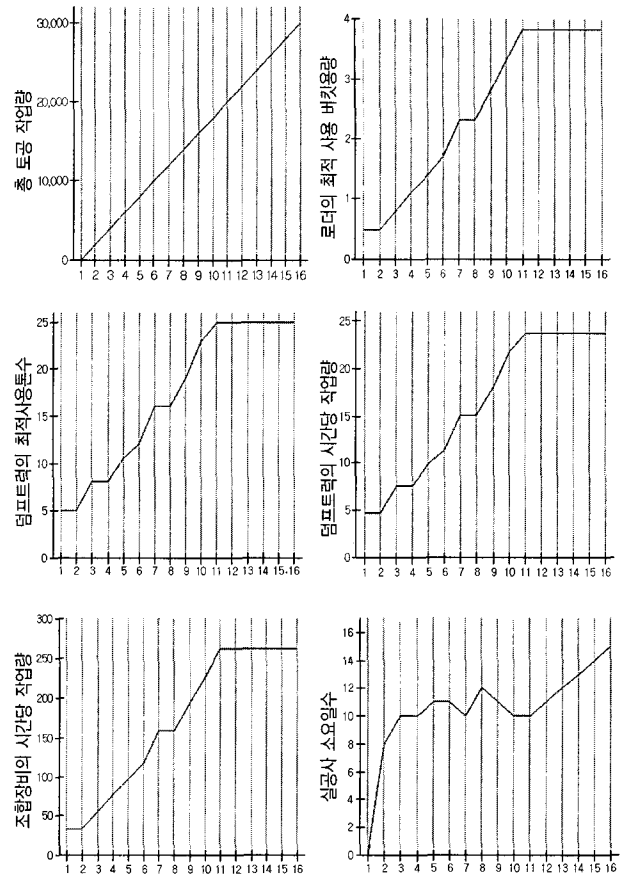


그림 7. 총 토공량의 변화에 따른 민감도

X축은 각 입력변수값의 환산계수이며, 표5의 사례 프로젝트 항목의 데이터 값을 이용한 분석 결과를 보면, 작업할 총 토공량의 변화에 대해 로더의 버킷용량, 덤프트럭의 최적사용톤수, 덤프트럭의 시간당 작업량, 조합장비의 시간당 작업량은 증가하다가 로더의 최적버킷용량이 최대규격으로 설정됨에 따라 더 이상의 변화가 없음이 나타나며, 실공사 소요일수는 버킷용량의 설정에 따른 증감 변화 후에 계속적인 증가를 보인다.

#### (2) 굴삭과 적재의 작업효율 변화에 따른 민감도

다른 입력변수값을 고정하고 굴삭과 적재의 작업 효율을 0.8~0.3까지 감소시켜 변화시켰을 때의 민감도 그래프는 그림 8과 같다.

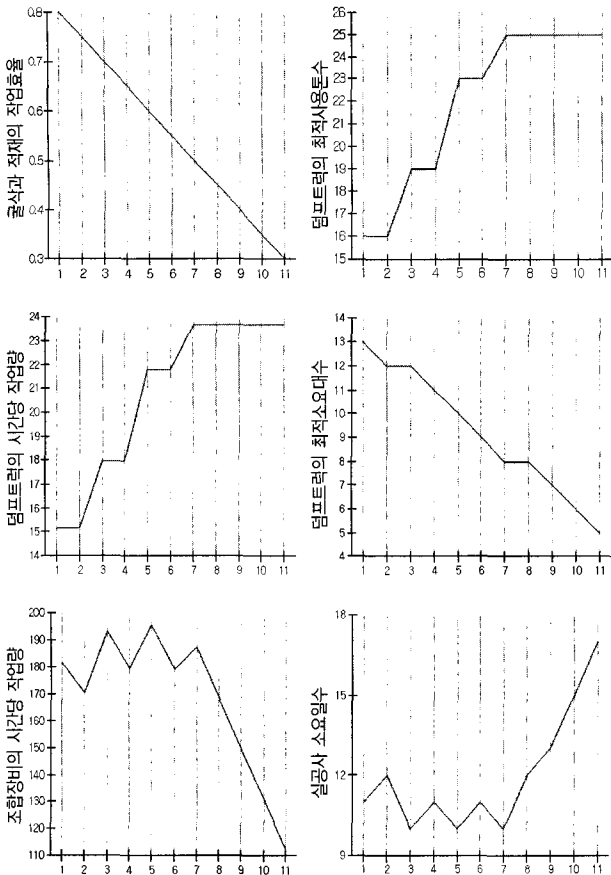


그림 8. 굴삭과 적재 작업효율 변화에 따른 민감도 (X 축은 입력변수의 환산계수)

그래프를 분석해 보면 굴삭과 적재의 작업효율이 감소함에 따라 덤프트럭의 최적사용톤수 및 시간당 작업량이 증가하게 되며, 덤프트럭의 용량증가에 따라 최적소요대수가 감소함을 알 수 있다. 또한 로더의 사용규격변화에 따라 조합장비의 시간당 작업량은 증감변화 후 감소하며, 실공사 소요일수 또한 증감변화 후 계속적으로 증가함을 보여준다.

### 5. 결론

본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 토공작업 중 기계화 토공장비의 굴삭·적재 및 운반단계를 대상으로 인과 지도를 작성하여 적정조합모형을 구축하였다.

토공장비조합 모형구축은 현장의 토공계획 담당자가 수시로 변하는 여러 변수들의 값에 따라 번거로운 수작업 대신 그래픽과 도표를 통해 손쉽게 원하는 결과값을 도출할 수 있게 하는데

목적이 있다.

즉 본 연구에서 도출된 결과값에서 보는 바와 같이 토공계획 관리자가 토공장비 선정 시 적정조합을 찾아 단시간에 합리적 판단을 내리는 지표로 활용함에 있는 것이다.

본 연구는 토공작업의 여러 단계 중 기계화 토공장비의 굴삭과 적재 및 운반단계까지를 대상으로 하여 범위가 국한된 한계가 있었다. 또한 실사례 프로젝트를 다양한 형태의 프로젝트에 적용하여 보지 못한 점도 아쉬운 점이다. 향후 연구로는 공정 및 원가 관리적 측면에서 요구되는 다양한 요인들을 입력변수에 추가하고, 현장 관리 측면에서의 효용성을 검증하는 연구가 요구된다고 하겠다.

### 참고문헌

1. 권기태 (2002). 건설기계와 시공, 동명사, 서울, pp. 36-114
2. 권기태 (1999). 토목시공학, 동명사, 서울, pp. 14-28
3. 김도훈 외 2인 (1999). 시스템 다이내믹스, 대영문화사
4. 남기천 외 5인 (2005). 현장 실무를 위한 토목시공학, 한솔아카데미, 서울, pp. 167-197
5. 박현용, 태용호, 우성권 (2007). "운반작업의 영향요소 분석을 통한 덤프트럭의 운반속도 산정방법에 관한 연구", 한국건설관리학회논문집, 제8권 제3호, 한국건설관리학회, pp.97-105
6. 서종원, 김영환, 정평기 (2006). "프로세스 시뮬레이션을 연계한 건설공정 시각화", 한국건설관리학회논문집, 제7권 제1호, 한국건설관리학회, pp.73-79
7. 이송, 채점식, 김홍철 (2004). 새로운 토목시공학, 기문당, 서울, pp. 47-75
8. 이승언 (2005). 살아있는 토목시공학, 구미서관, 서울, pp. 171-198
9. 진병훈, 박태순 (1988). "기계화 토공장비 조합시공의 최적단가 산출방안." 대한주택공사
10. 한국건설기술연구원 (1998). "건설장비의 선정 및 조합."
11. 한국건설기술연구원 (2005). "토공작업계획과 기계시공 관리요령."

논문제출일: 2007.02.02

심사완료일: 2007.07.26



---

### Abstract

The earth work has been improved with the utilization of capital intensive equipments. However, work performance is not satisfactory yet due to its experience-oriented characteristics in selecting the combination of earth work equipments. Therefore, it is required to study on appropriate and systematic methods in selecting a set of equipments for earth work in order to optimize the cost and time as well as to improve the productivity.

The objectives of this paper are as followed : (1) developing an optimum combination model of earth work equipments by using a system dynamics technique. (2) testing and evaluating the model by the sample application to a case study. The research is limited to the work of excavating, loading and hauling. The suggested model is proved in practice, so it will assist engineers to make the proper decision for equipment planning of earth work.

**Keywords** : Earth Work, Construction Equipment, Equipment Combination, System Dynamics

---