

이산형 이벤트 시뮬레이션 기반 최적의 건설장비 조합 도출 방법 제시 - 표준품셈 건설기계 시공능력 산식을 기반으로 -

고용호¹ · 키양² · 노재윤³ · 김유진⁴ · 한승우^{5*}

¹인하대학교 건축공학과 박사과정 · ²인하대학교 건축공학과 석사과정 · ³인하대학교 건축공학과 석사과정 ·
⁴인하대학교 건축공학과 석사과정 · ⁵인하대학교 건축공학과 교수

Discrete Event Simulation based Equipment Combination Optimization Method - based on construction equipment performance estimation of the Construction Standard Production Rate -

Ko, Yongho¹, Ngov, Kheang², Noh, Jaeyun³, Kim, Yujin⁴, Han, Seungwoo^{5*}

¹PhD Candidate, Department of Architectural Engineering, Inha University
²Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University
³Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University
⁴Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University
⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University

Abstract : Productivity estimation of construction operations is crucial to successful project delivery. Especially in the pre-construction phase, the adequacy and effectiveness of plans directly affect the actual performance of operations. Currently, productivity estimation is conducted by referring to existing references such as the Construction Standard Production Rate. However, it is difficult to promptly apply changing conditions of operations when using such references. Moreover, it is difficult to deduce the optimal combination of construction machinery for the given condition. This paper presents a simple simulation model that can be used to generate productivity data that considers site conditions and construction equipment combination. The suggested method is expected to be used as a decision making assisting tool for practitioners who rely on estimations using the Construction Standard Production Rate when establishing construction plans using heavy machinery such as backhoes, loaders and dumptrucks.

Keywords : Productivity, Construction Standard Production Rate, Discrete Event Simulation, Equipment Combination

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설 프로젝트의 성공적인 수행을 위해서는 다양한 현장 조건과 환경을 고려한 데이터 기반의 공정계획이 필수적으로 수립되어야 한다(Han et al., 2014). 특히, 도로공사와 같은 대규모 건설공사의 경우, 현장 조건을 고려한 최적의 장비 조합 정보를 도출하는 것은 공사 기간과 비용에 큰 영향을 주는 요소다(Han et al., 2006). 국내의 경우, 표준품셈과

현장관리자의 경험에 의한 공정계획 수립 방법이 주로 수행되고 있다(Oh et al., 2020). 표준품셈은 다양한 조건에 대한 생산성을 고려할 수 있는 정보를 제공하지만, 여러 장비의 조합으로 수행되는 공정의 최적의 장비 조합을 도출하는 데는 한계가 있는 방법이다. 또한, 변화하는 현장 조건을 즉각적으로 반영하기 어렵다. 국내외에서, 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 현장 조건을 반영할 수 있는 시뮬레이션 기법 기반의 생산성 도출 방법이 제시되었다(Martinez, 2010; Lu, 2003; Lee, 2010; Kim, 2012). 특히, Han et al. (2014)는 커튼월 공사를 대상으로 생산성 및 비용 최적의 장비 조합 정보를 현장관리자에게 민감도 분석 형태로 제공하는 데이터베이스를 제공한 바 있다. 그러나, 이러한 시뮬레이션 기법 기반의 생산성 추출 방법의 우수한 성능에도 불구하고 국내 현장 적용에 있어 큰 한계가 있는 것으로 분석되었다. 시뮬레이션 기술 도입을 위해 공정프로세스 파악, 데이터 수

* **Corresponding author:** Han, Seungwoo, Department of Architectural Engineering, Inha University, 2S420D, Inha-ro 100, Michuhol-gu, Incheon, Korea
E-mail: shan@inha.ac.kr
Received September 15, 2022; **revised** -
accepted October 11, 2022

집, 시뮬레이션 모델링과 같은 시간 소모적이며 전문 지식이 요구된다(AbouRizk, 2010). 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 기법의 장점인 다양한 현장 조건을 고려한 생산성 정보를 도출하여 이를 데이터베이스로 구축하는 방법을 제시하고자 한다. 데이터베이스가 구축됨에 따라 현장관리자는 다양한 장비 및 현장 조건에 대한 비교 분석을 실시할 수 있으며 현장 상황에 적합한 최적의 장비 조합을 고려한 시공 계획을 수립할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구 수행의 범위 및 방법은 다음과 같다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 Kim (2009)가 제시한 대표 공종 중 도로 공사의 비교적 반복작업이 많고 건설기계 기반의 작업이 주로 수행되는 토사 운반 작업을 대상으로 실시되었다. 본 연구에서 제시하는 장비 조합에 따른 생산성 데이터베이스 구축 절차는 <Fig. 1>을 따라 수행되었다.

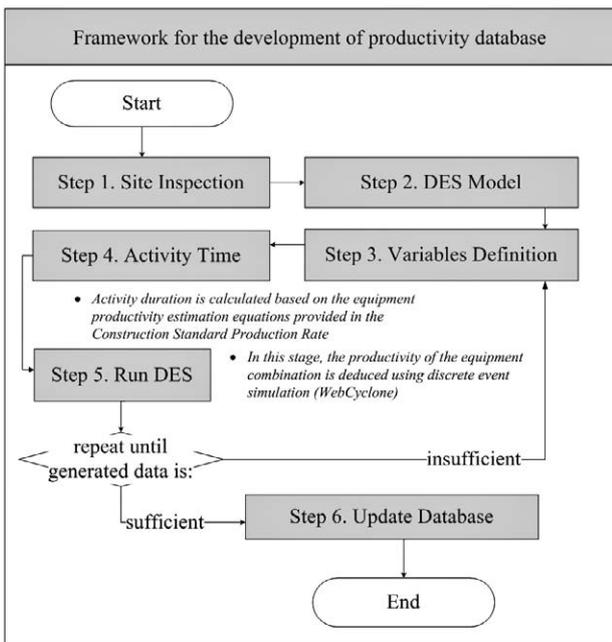


Fig. 1. Framework for the development of productivity database

최적의 장비 조합 도출을 위해 위 <Fig. 1>과 같이 다양한 조건에 대한 데이터베이스를 사전에 구축하였다. 데이터베이스 구축을 위해 건설 현장에서 수행되는 공정 프로세스를 비디오카메라 및 CCTV (closed-circuit television or surveillance camera)를 통해 데이터 수집하였고 이를 기반으로 DES 모델을 같은 프로세스로 모델링 하였다. 이후 공정 프로세스를 구성하는 각 세부작업의 소요시간 입력을 위해 표준품셈의 건설장비 시공능력 산식을 기반으로 투입되

는 장비의 변수를 설정하였다. 장비의 시공능력과 현장 조건 (운반거리, 체적환산계수, 작업효율 등)을 기반으로 프로세스를 구성하는 각 세부작업의 소요시간을 계산하였다. 작업의 소요시간은 DES 모델에 입력되어 장비 조합에 따른 생산성을 도출하였다. 이와 같은 과정을 다양한 장비와 현장 조건에 대하여 반복 수행하여 장비 조합에 따른 생산성 데이터베이스를 구축하였다. 위 과정을 통해 구축된 데이터베이스는 공사 수행 전에 투입 가능한 장비의 비교 분석을 통해 최적의 장비 조합 도출 방법을 제시하였다.

2. 기존 문헌조사

연구 수행에 앞서, 시뮬레이션 및 생산성 데이터베이스 구축 관련 문헌조사를 실시하였다. 시뮬레이션 기법, 특히 건설 시뮬레이션 기법은, Halpin and Riggs (1992)의 사이클론을 시작으로 다양하게 연구되었으며 주로 반복작업이 많은 공정을 대상으로 모델링 및 데이터 처리(Zankoul et al., 2015; Labban et al., 2013; Mohamed & AbouRizk, 2005); Watkins et al., 2009), 대안 비교(Kim et al., 2021; Han et al., 2006), 자원 최적화(Shin et al., 2011) 등의 주제로 수행되었으며, 본 연구에서 수행하는 데이터베이스 생성을 위한 연구는 Han et al. (2014)의 연구와 기존 문헌인 RS-Means (2022)가 있는 것으로 조사되었다. Zankoul et al. (2015)은 시뮬레이션 모델링의 대표적인 방법인 Discrete Event Simulation(이하 DES), Agent Based Modeling(이하 ABM)을 토공사를 대상으로 비교하여 각 방법의 장단점을 제시하였다. Zankoul et al. (2015)에서는 DES와 ABM 방법 비교를 통해 두 방법의 통합할 수 있는 방법에 대한 고찰을 실시하였다. Labban et al. (2013)은 복잡한 대형 건설 프로젝트는 기존 공정관리 기법으로 관리하는데 한계가 있으며 시뮬레이션 기법을 통해 이를 극복할 수 있음을 기술하였다. Labban et al. (2013)은 이에 따라 아스팔트 포장 공사를 대상으로 DES 모델 방법을 제시하였다. 연구의 한계점으로 시뮬레이션 기법의 장점에도 불구하고 시뮬레이션 모델링의 어려움과 시간 소모적인 데이터 수집의 한계를 지적하였다. Mohamed and AbouRizk (2005)는 시뮬레이션 모델링 전문가의 우수한 능력에도 불구하고 현장관리자의 경험을 고려할 수 있는 모델이 필요하다고 기술하였다. 이에 따라, 현장 관리자의 의사결정을 즉각적으로 반영할 수 있는 시뮬레이션 모델 방법을 제시하였다. Watkins et al. (2009)는 마감공사와 같이 작업 간섭이 빈번하게 발생하는 공정에 대해 DES의 한계를 지적하였고, 작업 간섭을 고려할 수 있는 ABM 모델을 제시하였다. Watkins et al. (2009)는 작업조, 작업자, 작업 순서와 자원 조달에 따른 제약조건을 ABM 기반으로

모델링 하여 최적의 작업 이동 경로를 도출하였다. Kim et al. (2021)은 코로나 대응 지침을 따른 공정수행 방법과 기존 수행 방법을 DES 기반으로 비교 분석하여 코로나 대응 지침의 적합성을 검토하였다. Kim et al. (2021)은 DES 방법을 이용하여 대안 비교 분석을 한 사례로서, DES 기술을 이용하여 효과적으로 다양한 대안의 생산성 및 비용 분석을 수행할 수 있음을 보여주었다. Han et al. (2006)은 DES 기반의 GPS 기술을 도입한 방법과 기존 공법의 비교를 실시하였다. 이 또한 대안 비교 분석의 사례로서, DES 기술을 통해 다양한 대안을 비교하는데 DES 기술이 활용될 수 있음을 보여주는 사례다. Shin et al. (2011)은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 DES 기술과 연계하여 초고층 공사의 최적 타워크레인 배치를 위한 연구를 수행하였다. Shin et al. (2011)은 자원 최적화의 사례로서 DES 기술을 통해 설정된 시나리오 상의 최적의 투입 자원을 공사 수행 전에 효과적으로 도출할 수 있음을 보여주는 사례다.

위 기술된 바와 같이, 시뮬레이션은 모델링, 대안 비교, 자원 최적화 등에 효과적인 기법인 것으로 인식되어 왔으나, 현장 적용에 있어 모델링의 어려움 및 데이터 수집의 시간 소모적인 작업의 한계에 노출되어 있다. 또한, 다양한 조건을 기반으로 시뮬레이션을 반복적으로 구동하여 이를 데이터베이스 한 연구는 미비한 것으로 분석되었다. 이에 따라 본 연구에서는 DES 기술의 장점인 시나리오 기반의 대안 비교와 최적 자원 투입 계획 수립을 위한 데이터베이스를 구축하고 이를 기반으로 최적의 장비 조합 도출 방법 제시를 연구의 목적으로 설정하였다.

3. 생산성 데이터베이스 구축

3.1 현장 관찰 및 공정 프로세스 분석

본 연구 수행을 위해 DES 모델링 및 코딩이 필수적으로 요구되며 이를 위한 공정 프로세스 분석은 현장 실사를 통해 수행되었다. <Table 1>의 현장 전문가 인터뷰 및 비디오 촬영을 통해 공정 프로세스를 분석하였다.

<Fig. 2>와 같이 비디오 촬영을 통해 작업이 반복되는 사이클과 각 사이클에 수행되는 작업을 분류하였다.

3.2 DES 기반 공정 프로세스 모델링 및 코딩

위 2.1절에서 분석된 공정 프로세스를 가상의 환경에서 구동하기 위해 DES 모델링 및 코딩이 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 Halpin and Riggs (1992)의 사이클론을 이용하여 모델링 및 코딩을 실시하였다. 사이클론은 DES 기법 기반의 건설 최적의 시뮬레이션 방법론이다.

Table 1. Site description

Description	Site A
length	21.65km
lanes (width)	4(20.0m)
duration	2014 ~ 2021
Description	Site B
length	9.7km
lanes (width)	4(20.0m)
duration	2015 ~ 2022
Description	Site C
length	45.17km
lanes (width)	4(23.4m)
duration	2014 ~ 2021



Fig. 2. Process analysis for earthmoving operation (example)

사이클론에는 반복작업을 사이클 단위로 모델링 하여 사이클을 구성하는 작업들의 소요시간을 통계분포 형태로 입력받아 장비조합에 따른 생산성 정보를 추출해주는 알고리즘이 탑재되어 있다. 사이클론 기반의 모델링 및 코딩은 미국 퍼듀 대학(Purdue University)이 제공하는 모델링 매뉴얼 및 기존 문헌을 벤치마킹하여 수행되었다(Widia, 2022; Zayed & Halpin, 1992; Han et al., 2006; Kim et al., 2021; Martinez, 2010; Lee et al., 2013).

3.3 표준품셈 건설 기계 시공능력 산식 기반 작업 소요 시간 계산

본 연구는 <Fig. 2>와 같이 수행되는 토사 운반 작업을 대상으로 실시되었다. 토사 운반 작업은 표준품셈에 따라 다음과 같은 조건으로 수행되며, 본 연구에서는 로더와 덤프트럭을 대상으로 방법론을 적용하였다.

<Table 2>에 제시된 바와 같이 토운반 작업은 짧은 거리에 불도저가 사용되며, 100m 이상 거리에서 모터스크레이퍼가 사용된다. 이와 같이, 장비 하나의 종류에 의해 수행되는 작업은 표준품셈의 장비 시공능력 산식에 따라 쉽게 생

Table 2. Equipment combination definition of earthmoving operation by the Construction Standard Production Rate

Haul distance	Standard
under 60m	Buldozer
60~100m	Buldozer
	Loader+Dumptruck
	Excavator+Dumptruck
above 100m	Loader+Dumptruck
	Excavator+Dumptruck
	Motorscraper

산성 측정을 할 수 있다. 그러나 로더와 덤프트럭 조합과 굴삭기와 덤프트럭의 조합에서는 두 장비의 생산성을 고려한 최적의 장비 조합을 추출하여야 한다. 여기에서 다양한 조건을 고려하기 위해 현장관리자는 다양한 현장 조건과 다양한 장비 조건에 따른 계산을 반복해야 하며 실제 공사에서 발생하는 변형효과(장비의 주기적인 대기로 발생하는 지연)를 고려할 수 없다(Smith, 1999). 본 연구에서는 DES 기술을 이용하여 단순 산식으로 적용할 수 없는 변형효과가 고려된 최적의 생산성 정보를 도출하였다.

위 기술된 바와 같이, 본 논문에서는 방법론 적용을 로더와 덤프트럭 조합을 대상으로 실시하였다. 이와 관련된 건설 기계 시공능력 산식을 다음과 같이 추출하였다(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2021).

$$\text{로더 시공능력} = \frac{3600qkfE}{cm}, \quad cm = ml + t_1 + t_2 \quad (1)$$

로더 시공능력 : ($m^3/hour$)
 q : 버킷용량 (m^3)
 k : 버킷계수
 f : 체적환산계수
 E : 작업효율
 cm : 1회 싸이클 시간(초)

m : 장비계수 (초/ m : 무한레도, 타이어식)
 l : 편도주행거리(m)
 t_1 : 버킷에 토량을 담는데 소요되는 시간(초)
 t_2 : 기어변화 등 기본 시간과 다음 운반기계가 도착할 때까지의 시간(초)

$$\text{덤프트럭 적재용량} = \frac{T}{y_t} L \quad (2)$$

덤프트럭 적재용량 : (m^3)
 T : 덤프트럭 적재용량(ton)
 y_t : 자연상태의 토석의 단위 중량(ton/m^3)
 L : 체적변화율

위 제시된 <Equation 1, 2>를 기반으로 로더가 덤프트럭에 토사를 적재하는데 걸리는 시간을 다음과 같이 계산할 수 있다. 덤프트럭의 운반시간은 다음 <Equation 4>에 의해 계산된다.

$$\text{적재시간} = \frac{\text{덤프트럭 적재용량} * 60}{\text{로더 시공능력}} \quad (3)$$

적재시간 : ($minute$)

$$\text{운반시간} = \frac{\text{이동거리}}{\text{이동속도}} * 60 \quad (4)$$

운반시간 : ($minute$)

DES 모델의 입력값은 정의된 작업의 소요시간이다. 공사 수행도중 수집된 다양한 작업 소요시간의 통계분포를 입력하는 것이 건설 시뮬레이션에 가장 많이 사용된 방법이다(Martinez, 2010). 이러한 데이터는 공사 수행 전단계인 공정계획 수립 단계에서 수집할 수 없기 때문에 본 연구에서는 표준품셈의 장비 시공능력 산식을 기반으로 <Equation 3, 4>를 통해 도출하였다. <Equation 3, 4>를 통해 계산된 다양한 작업 소요시간에 대하여 공정계획 수립 시 사용할 수 있는 장비에 따른 생산성 및 비용 정보를 쉽게 도출할 수 있다.

3.4 DES 구동을 통한 장비 조합 및 생산성 데이터 생성

위 3.1절의 공정 프로세스 분석을 통해 토사 운반 작업의 사이클을 구성하는 세부작업을 다음과 같이 도출하였다.

- 적재: 로더와 덤프트럭에 의해 수행되며 로더가 덤프트럭에 토사를 적재하는 작업으로 정의됨. 적재 작업의 소요시간은 <Equation 3>에 의해 계산됨.
- 적재운반: 덤프트럭에 의해 수행되며 적재 운반은 적재 작업이 완료된 후 사토 직전까지의 운반 작업으로 정의됨. 적재운반 작업의 소요시간은 <Equation 4>에 의해 계산됨.
- 공차운반: 덤프트럭에 의해 수행되며 공차 운반은 사토 직후 다시 적재 작업으로 복귀하는 작업으로 정의됨. 공차운반 작업의 소요시간은 <Equation 4>에 의해 계산됨.
- 사토: 덤프트럭에 의해 수행되며 사토 또는 흙쌓기 공정이 실시되는 부분에 토사를 사토하는 작업으로 정의됨. 사토 작업의 소요시간은 현장 관찰 결과 최대 2분으로 다른 작업에 비해 소요시간이 작기 때문에 DES 소요시간을 별도의 수식으로 계산하지 않고 최대 2분 소요되는 것으로 DES 모델에 정의하였다.

도출된 위 4개의 세부 작업(적재, 적재운반, 사토, 공차운반)을 기반으로 다음 <Fig. 3>과 같이 사이클론 모델링 및 코딩을 실시하였다. <Fig. 3>의 사이클론 모델에서 적재, 적재운반, 사토, 공차운반은 토사 운반 작업의 사이클을 구성하는 세부 액티비티를 의미하며 로더와 덤프트럭은 각 세부

액티비티에 투입되는 장비를 의미한다. <Fig. 3>에 보이는 바와 같이 로더는 적재 작업에는 투입되며, 덤프트럭의 경우 적재, 적재운반, 사토, 공차운반 작업에 투입된다.

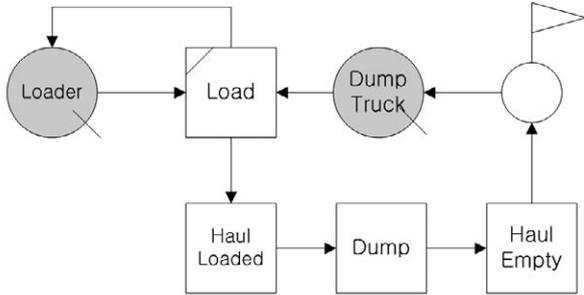


Fig. 3. Cyclone model of earthmoving operation

싸이클론 모델은 입력값으로 각 세부작업의 소요시간이 요구된다. 따라서, 작업 조건에 따른 소요시간의 데이터 추출을 위해 <Table 3, 4>와 같이 민감도 분석을 실시하였다.

Table 3. Sensitivity analysis table for activity time calculation (loader)

Units in <Equation 1>

q	k	f	E	m	l	t1	t2
0.5	1.2	0.91	0.25	1.8	8	5	14
0.7	1	0.77	0.4	2		14	
1	0.9	0.63	0.55			20	
1.72	0.7	0.50	0.6			36	
	0.55		0.75			41	

<Table 3>의 입력값은 표준품셈의 로더 시공능력 산식에 해당되는 입력값이며 <Equation 1>에 각 입력값에 대한 설명이 추가되어 있다. <Table 3>을 기반으로 추출할 수 있는 범위는 q(4개 조건)×(타 조건 200개)×t1(5개 조건)으로 총 4,000개의 작업 조건이다.

Table 4. Sensitivity analysis table for activity time calculation (dumptruck)

Units in <Equation 2>

T	u_t	L
8	1200	1.1
10	1500	1.3
15	1800	1.5
20	2100	1.7
25.5	2400	1.9

<Table 4>의 입력값은 표준품셈의 덤프트럭 시공능력 산식에 해당되는 입력값이며 <Equation 2>에 각 입력값에 대

한 설명이 추가되어 있다. <Table 4>를 기반으로 추출할 수 있는 범위는 총 125개의 작업 조건과 덤프트럭 적재용량이다.

<Table 3, 4>의 민감도 분석표를 기반으로 <Equation 3>에 의해 50만개(4,000×125)의 작업조건에 대한 생산성 정보를 싸이클론을 이용해 추출할 수 있다. <Equation 4>에 의해 운반 작업의 소요시간을 계산할 수 있으며, <Table 5>의 적재 및 공차 운반 속도와 100m부터 200km 사이의 거리가 사용되었다.

<Table 5>를 기반으로 추출할 수 있는 범위는 1,078개(7x7x22)의 작업 조건에 해당된다. 위 <Table 3, 4, 5>의 조건을 모두 고려하여 <Equation 3, 4>의 소요시간을 계산한 결과는 아래 <Fig. 4>와 같은 분포를 형성하고 있다.

Table 5. Sensitivity analysis table for activity time calculation (hauling activity)

Haul loaded speed [km/hr]	Haul empty speed [km/hr]	Haul distance [km]
7	8	0.1
15	20	1
20	25	10
25	30	20
30	35	30
50	55	▼ (increment by 10)
60	60	200

<Fig. 4>에 도출된 분포에 표시된 바와 같이, 본 연구에서는 전체 데이터의 75%에 해당되는 3분위(3rd Quantile)까지의 데이터만 고려하였다. 추출된 분포에는 실제 공사 수행 시 발생하기 극히 드문 경우에 대한 데이터도 포함된다. 예를 들어 200km의 운반 거리는 고속도로 또는 시가지가 섞인 고속도로로 구성되어 있기 때문에 미포장 도로에 해당되는 7km/hr로 200km를 이동할 경우는 발생하지 않을 것이다. 이러한 현상은 발생할 수 있지만, 극히 드문 경우라 판단하여 데이터베이스 구축에서 제외하였다. 적재 작업의 소요

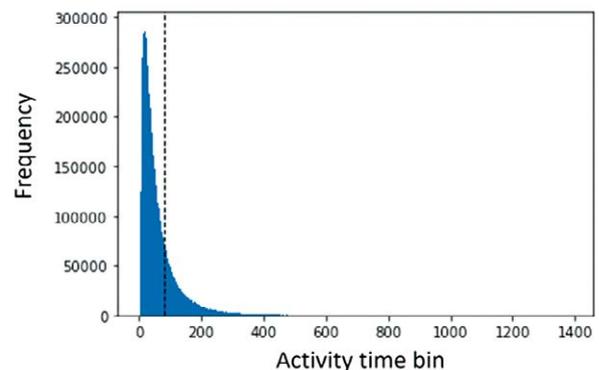


Fig. 4. Loading time distribution

시간의 경우, <Fig. 4>에 보이는 바와 같이 300분 이상에 해당되는 범위는 발생 빈도가 그 이전 범위에 비해 상당히 적은 것을 볼 수 있다.

3.5 방법론 적용 및 생산성 데이터베이스 구축 방법

위 조건들을 고려하여 다음과 같이 데이터베이스를 구축할 수 있다. <Table 6>은 데이터베이스 구축 방법 제시를 위한 작업 및 장비 조건의 예시를 표시한 표다. <Table 6>의 정보는 공정 프로세스 수집을 위해 방문된 현장의 작업 조건과 유사하게 묘사되었다. <Table 6>과 같은 작업 및 장비 조건을 기반으로 적재시간 및 운반시간을 도출하면 다음과 같다:

$$\text{적재 용량: } \frac{24}{1.2} \times 1.3 = 26 m^3$$

$$\text{로더 생산성: } \frac{3600 \times 0.95 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.7}{1.8 \times 8 + 14 + 14} = 40.653 \frac{m^3}{hr}$$

$$\text{적재 시간: } \frac{26}{40.653} \times 60 = 38.374 \text{ minutes}$$

$$\text{적재 운반 시간: } \frac{10}{15} \times 60 = 40 \text{ minutes}$$

$$\text{공차 운반 시간: } \frac{10}{20} \times 60 = 30 \text{ minutes}$$

위 계산된 작업 소요시간과 사토시간 1.4분을 적용하여 <Fig. 3>의 DES 구동 결과, 로더 1대와 덤프트럭 1대로 수행 가능한 최적의 생산성은 0.0091 cycle/minute이다. 여기서, 한 사이클(cycle)에 수행되는 작업의 양은 덤프트럭의 적재 용량이며 시간당 작업 생산성은 다음 <Equation 5>와 같이 계산될 수 있다:

$$\text{hourly productivity} \left[\frac{m^3}{hr} \right] = CP \left[\frac{\text{cycle}}{\text{min}} \right] \times DC \left[\frac{m^3}{\text{cycle}} \right] \times 60 \left[\frac{\text{min}}{\text{hr}} \right] \quad (5)$$

CP: cycle productivity
DC: Dumptruck Capacity

여기서, 위 계산된 조건을 반영하면 <Table 6>의 작업 및 장비 조건으로 수행 가능한 작업 생산성은 14.211/hour으로 계산된다. 로더 1대의 생산성이 40.653/hour로 계산되었으며 DES로 도출된 로더 1대와 덤프트럭 1대의 생산성은 14.211/hour가 도출되었다. 이에 따라, 덤프트럭 대수가 증가함에 따라 장비 조합의 생산성을 도출할 수 있다.

<Fig. 5>는 <Table 6>의 작업 및 장비 조건에 따른 생산성 비교 그래프다.

Table 6. Activity and equipment condition example

Conditions	value
T	24
ϕ	1300
L	1.3
Haul distance	10
Haul loaded speed	15
Haul empty speed	20
q	0.95
k	0.9
f	0.8
E	0.7
m	1.8
l	8
t1	14
t2	14

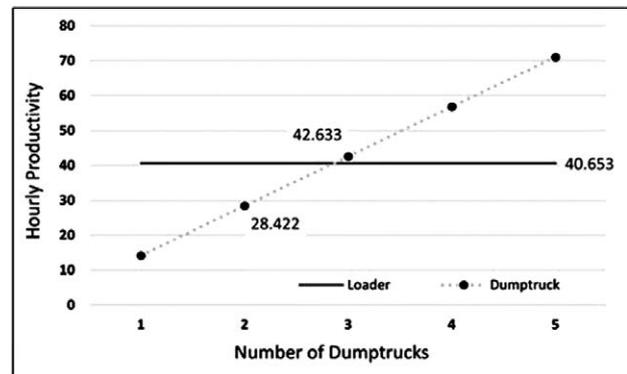


Fig. 5. Productivity comparison on equipment combination

<Fig. 5>에 보이는 바와 같이 로더 1대당 덤프트럭 3대가 투입되어야 최적의 생산성이 도출된다. 덤프트럭 4대의 경우 생산성이 로더의 생산성을 초과하기 때문에 1대의 로더로 도달할 수 없는 범위다. 따라서, 본 조건에 대해서는 로더 1대당 최대 3대의 덤프트럭에 대한 생산성 정보를 데이터베이스에 저장한다. 이와 같은 방법으로 다양한 작업 및 장비 조건에 대한 생산성 데이터베이스를 생성할 수 있다. 이와 같이, 다양한 조건에 대한 데이터베이스를 생성할 경우, 표준품셈 기반으로 작업 조건과 장비 조합에 따른 공기와 비용을 효과적으로 도출할 수 있다.

3.6 물가정보 적용을 통한 단위비용 산정

위 3.5장의 생산성 분석과 한국물가정보의 시간당 비용 정보를 기반으로 작업에 소요되는 단위비용을 다음과 같이 산출할 수 있다. <Table 6>에 사용된 로더의 규격은 버킷 크기 0.95이며, 덤프트럭의 규격은 24TON이다. 한국물가정보의 각 장비의 시간당 비용은 로더 80,353원/시간, 덤프트럭 135,875원/시간이다(한국물가정보, 2022). 이를 다음 과정을 통해 <Fig. 5>의 데이터에 적용할 수 있다.

비 조합을 도출한다. 이러한 방법은 시공 단계 초기에 공사비 상승 또는 공기 지연을 발생시키므로 본 연구 방법론을 기반으로 장비 투입 계획에 대한 시행착오를 줄일 수 있는 의사결정 지원을 할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 연구의 한계점 및 향후 연구 방안

본 연구에서는 기존 시뮬레이션, 특히 DES 기법 기반 연구와 다르게 표준품셈의 건설장비 시공능력 산식을 기반으로 작업 소요시간을 도출하였다. DES 기법의 장점은 번징 효과(Bunching Effect: 구조적으로 동작 시간이 유사한 환경에서 주기적으로 발생하는 지연에 의한 성과 감소)를 고려하는 점과 확률론적 방법인 작업 소요시간의 분포도를 이용한 RNG (Random Number Generation)을 이용하는데 있다. 그러나 본 연구에서는 번징 효과는 고려되었으나 표준품셈의 건설장비 시공능력 산식을 사용함에 따라 확률론적 방법의 장점을 활용하지 못한 한계가 있다. 따라서, 향후 연구를 통해, 현재 활발하게 수행되고 있는 이미지 인식 기반의 작업 소요시간 데이터 자동 수집 알고리즘 등과의 연계를 통해 표준품셈과 실 시공 단계의 작업 조건을 맞출 수 있는 방법의 연계가 필요하다.

또한, 본 연구에서는 토목 공사에 가장 빈번히 발생하는 토운반 작업을 대상으로 시나리오 분석을 실시하였다. 그러나, 고속도로 포장공사와 같이 표준품셈에 건설장비 시공능력 산식이 누락되어 있는 공정의 경우 본 연구에서 제시한 비교 분석을 수행할 수 없다. 아스팔트 포장공사의 경우, 건설 장비의 시공능력이 아닌 품에 의한 일당 생산성이 제시되기 때문에 이를 본 연구 방법에 적용하기 위한 방법이 제시되어야 한다.

본 연구에서 제시한 방법론을 기반으로 방대한 양의 생산성 데이터를 추출할 수 있는데, 현장 적용을 위해 최근 활발히 건설 관리 분야에 적용되고 있는 머신러닝 기법을 이용한 생산성 예측 모델 개발을 할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 생산성 예측 모델의 예측 정확도가 준수할 경우, 시뮬레이션 모델링의 한계점 또한 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 지원(과제번호 2021R1A2C10-07467)과 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행, 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 21SMIP-A158708-02)”의 지원으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

References

- AbouRizk, S. (2010). “Role of simulation in construction engineering and management.” *Journal of construction engineering and management*, 136(10), pp. 1140-1153.
- Halpin, D.W., and Riggs, L.S. (1992). “Planning and analysis of construction operations.” John Wiley & Sons.
- Han, S.W., Lee, T.H., and Ko, Y.H. (2014). “Implementation of construction performance database prototype for curtain wall operation in high-rise building construction.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 13(1), pp. 149-156.
- Han, S.W., Lee, S.Y., Hong, T.H., and Chang, H. (2006). “Simulation analysis of productivity variation by global positioning system (GPS) implementation in earthmoving operations.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(9), pp. 1105-1114.
- Kim, H.M. (2012). “Fuzzy technique-based productivity estimation by means of construction delay factor analysis on curtain wall operations in high-rise building constructions.” MS thesis, Inha University, Incheon, South Korea.
- Kim, S.C., Kong, M.J., Choi, J.W., Han, S.W., Baek, H.Y., and Hong, T.H. (2021). “Feasibility analysis of COVID-19 response guidelines at construction sites in south korea using CYCLONE in terms of cost and time.” *Journal of Management in Engineering*, 37(5), p. 04021048.
- Korea Price Information. (2022). <https://www.kpi.or.kr> (accessed on 14. Sep. 2022).
- Labban, R., AbouRizk, S., Haddad, Z., and Elserisy, A. (2013). “A discrete event simulation model of asphalt paving operations.” *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*, pp. 3215-3224.
- Lee, J.H. (2010). “Construction performance evaluation of an advanced-technology based on construction simulation technique: Focused on steel staircase.” MS thesis, Inha University, Incheon, South Korea.
- Lee, D.E., Kim, Y.W., and Son, C.B. (2013). “Estimating Productivity of AI-Form operation using Web-CYCLONE system.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 14(3), pp. 115-122.
- Lu, M. (2003). “Simplified discrete-event simulation approach for construction simulation.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(5), pp. 537-546.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2021). Construction Standard Production Rate.
- Mohamed, Y., and AbouRizk, S.M. (2005). “Framework for building intelligent simulation models of construction

- operations.” *Journal of computing in civil engineering*, 19(3), pp. 277-291.
- Martinez, J.C. (2010). “Methodology for conducting discrete-event simulation studies in construction engineering and management.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), pp. 3-16.
- Oh, J.H., Song, T.S., and An, B.Y. (2020). “A Study on the Estimation of Proper Construction Cost for Road Pavement Maintenance Work.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(6), pp. 16-26.
- Shin, Y., Cho, H., and Kang, K.I. (2011). “Simulation model incorporating genetic algorithms for optimal temporary hoist planning in high-rise building construction.” *Automation in construction*, 20(5), pp. 550-558.
- Smith, S.D. (1999). “Earthmoving productivity estimation using linear regression techniques.” *Journal of construction engineering and management*, 125(3), pp. 133-141.
- Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N., and Mattila, K. (2009). “Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions.” *Journal of construction engineering and management*, 135(7), pp. 657-667.
- Widia, A. (2022). WebCYCLONE Users manual, available in: https://www.academia.edu/34614245/WebCYCLONE_Users_Manual
- Zankoul, E., Khoury, H., and Awwad, R., (2015). “Evaluation of agent-based and discrete-event simulation for modeling construction earthmoving operations.” *ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction 2015*, 32, pp. 1-9.
- Zayed, T.M., and Halpin, D.W. (2000). “Simulation as a tool for resource management.” *2000 Winter Simulation Conference Proceedings*, 2, pp. 1897-1906.

요약 : 건설 프로젝트의 성공적인 수행을 위해 공정 생산성 예측이 필수적으로 요구된다. 특히, 시공 단계 이전에 수행되는 계획의 정확도 및 실효성은 시공 단계의 성과에 큰 영향을 미친다. 기존의 생산성 예측은 표준품셈과 같은 기존 문헌 참고를 통해 수행된다. 그러나 이러한 방법은 변화하는 조건을 즉각적으로 반영하는 것과 공사 수행에 필요한 최적의 장비 조합을 도출하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 이산 이벤트 시뮬레이션 기술을 이용하여 장비 조합에 따른 생산성 데이터베이스 구축 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 통해 표준품셈 기반 공정 계획 수립을 하는 관리자에게 굴삭기, 로더, 덤프트럭 등으로 수행되는 작업에 대한 최적 시공 계획 수립을 할 수 있을 것이라 예상된다.

키워드 : 생산성, 표준품셈, 이산 이벤트 시뮬레이션, 장비조합
