

시뮬레이션 기반의 타워크레인 설치 생산성 분석

A Productivity Analysis of Tower Crane Installation Progress Based on Simulation Technique

김윤식* 조재경* 김민지* 조규만** 현창택***
 Kim, Yun-Sik Cho, Jae-Kyong Kim, Min-ji Cho, Kyu-Man Hyun, Chang-Taek

Abstract

Recently, the scale of construction work has been growing, and buildings are becoming higher. To enable greater efficiency of construction work, the use of vertical transportation equipment has been radically increasing. In this context, many studies have been conducted on tower cranes. While these studies have discussed issues such as the selection of tower cranes, the optimization of locations, and the hoisting time of tower cranes, there has been no research on the installation of tower cranes. As such, the installation of tower cranes on construction sites has been accomplished based on subjective judgment and technical assistance, and the experience of workers in equipment companies.

Therefore, this study analyzes the productivity of tower cranes using simulation methodology, and proposes a generalized model of the installation process of tower cranes in order to offer a basic resource that site managers can directly utilize.

Keywords : T/C, Simulation, Productivity Analysis

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

근래에 들어 건축생산의 동향을 보면 건축자재와 공법의 발전으로 인해 건축공사의 규모가 점차 대형화·고층화 되어 가고 있다. 또한 건설 작업의 효율성을 증진시키기 위해 양중장비의 사용이 급진적으로 증가하고 있는 실정이다.

건설공사현장에서 양중계획은 공사의 성패를 좌우하는 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 양중계획은 프로젝트의 가설계획, 야적장계획, 동선계획 등 시공계획 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치며, 시공과정의 여러 공정 중에서 가장 기본이 되는 골조공사에도 큰 영향을 미친다.

또한 고층건물의 건축공사에는 일반 저층건물의 건축공사보다 작업량과 작업자 및 자재량이 현저히 많아 양중장비의 사용이 지배적이다. 따라서 국내외 많은 연구자들이 건축공사의 주요 양중

장비인 타워크레인(이하 T/C)에 관해 연구를 진행하였다.

하지만 이들의 연구는 주로 T/C의 선정, 위치 최적화, 양중시간 등에 집중되어 있으며, T/C의 설치에 관한 연구문헌이 부재하여 이를 직접 활용할 수 있는 객관적인 기준이나 도구가 미흡한 실정이다. 따라서 건설현장에서는 주로 장비업체 작업자의 경험에 의한 주관적인 판단과 기술보조에 의해 수행되어 왔다.

따라서 본 연구는 시뮬레이션 기법을 이용하여 T/C 설치 프로세스의 생산성을 분석하고, 이에 대한 일반화 모델을 제시함으로써 현장 관리자들이 직접 활용할 수 있도록 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 국내 건설현장에서 주로 사용하고 있는 T자형 고정식 T/C를 연구대상으로 하였다. 전체 설치 프로세스 중 기초앵커 설치 후 양생과정까지는 작업이 연속적이지 않고, 또한 계절에 따라 양생기간이 차이 나기 때문에 본 연구의 CYCLONE 모델구축에서는 제외하였다. 따라서 지상부분의 부재설치 프로세스에 대해 모델을 구축하며, 설치 높이는 기초 베이직 마스트 위에 8개의 일반 마스트를 설치하는 것으로 한정하였다.

본 연구는 다음과 같은 방법으로 진행된다.

- 1) 기존 T/C관련 연구문헌을 고찰하여 현황 및 문제점을 파악한다.

* 서울시립대학교 건축공학과 석사과정
 ** 서울시립대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사, 교신저자 (chokm76@nate.com)
 *** 서울시립대학교 건축공학과 교수, 공학박사
 본 연구는 국토해양부 건설교통 R&D정책인프라 사업의 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 06기반구축A03

- 2) 현장 방문 및 전문가 면담을 통해 T/C의 설치프로세스를 정리하고 실적데이터를 수집한다.
- 3) 널리 알려진 시뮬레이션기법인 CYCLONE기법을 활용하여, T/C 설치 CYCLONE 모델을 구축한다.
- 4) 민감도분석기법을 활용하여 T/C 설치 프로세스의 시뮬레이션 결과를 세부적으로 분석한다.
- 5) 사례적용을 통해 모델의 유효성을 검증한다.

또한, T/C의 안전성에 관한 기존의 연구들을 살펴보면, 이병구(2002)는 크레인의 타입별로 공사초기의 계획방법을 제시하였고, 김홍현(2007)은 크레인 관련 중대재해 사례를 통해 재해 유형 및 원인을 분석 하였다. 이외에 호종관 외(2008), 김선국 외(2008)의 연구에서도 크레인의 안전성에 대해 언급하였다. 이를 정리하면 표 3과 같다.

2. 이론적 고찰

2.1 선행연구 고찰

건설공사에서 양중계획의 중요성이 인지된 이래, T/C에 관련된 연구들이 많이 진행되어 왔다. T/C관련 연구들은 연구의 특성에 따라 여러 가지로 구분된다.

Furusaka(1984)는 목적함수를 사용하여 T/C의 최적의 조합을 찾고자 하였고, 남시대(1996)는 T/C의 설치위치 및 선정의 합리화 방안을 제시하였다. 이 외에 T/C의 선정에 관한 연구로 김훈(2000), 호종관(2006)등이 있으며, 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. T/C 선정 관련 주요 연구

연구자	연구내용
Furusaka (1984)	임대비용 + 설치비용 + 해체비용을 최소로 하는 목적함수를 사용하여 최적의 조합을 찾음
남시대 (1996)	T/C 설치위치 및 선정의 합리화 방안 제시
김훈 (2000)	양중장비 산정을 위한 의사결정 모델 제시
호종관 (2006)	현장개발 및 시공계획시 T/C 선정과 T/C의 기초판 결정방안 제시

T/C의 양중시간에 관한 연구는 표 2에서 정리한 바와 같다. 허담(1994)은 직종별 양중 시간을 조사하여 양중시간의 단축방안을 제시하였다. Leung(1999)은 시뮬레이션을 통한 예측모델을 제시하였고, 이종렬(2004)은 양중시간 예측 모델을 구축하였다.

표 2. T/C 양중시간에 관한 주요 연구

연구자	연구내용
허담 (1994)	직종별 양중시간에 따라 양중시간 단축방안을 제시
Leung (1999)	양중시간을 시뮬레이션을 통하여 합리적으로 예측하는 모델을 제시
이종렬 (2004)	시간 예측에 고려되는 요인을 도출하여 T/C의 양중작업시 요구되는 양중시간에 대한 예측모델 구축

표 3. T/C 안전성 관련 주요 연구

연구자	연구내용
이병구 외 (2002)	크레인 타입별로 공사초기 T/C의 계획방법 제시
김홍현 (2007)	크레인 관련 중대재해 사례를 통해 재해 유형 및 원인을 분석
호종관 외 (2008)	시뮬레이션을 통한 T/C 기초의 안전성 분석
김선국 외 (2008)	이동식 크레인의 안전성 확보를 위한 슬링 및 리그의 선정과 안전성 검토

이현수(2002)의 연구에서는 T/C의 위치 최적화에 관한 연구를 표 4)와 같이 정리하였다. 해외의 경우Warszawski(1972), Rodriguez(1980), Zhang(1999) 등 연구가 있었으며, 국내에는 주진호(1994), 이열(1998) 등이 위치최적화에 관한 연구를 수행하였다.

표 4. T/C 위치 최적화 관련 주요 연구

연구자	연구내용
Warszawski (1972)	야적장과 부재설치위치 사이의 크레인 양중 시간을 산출하여 시간의 총합이 최소인 점을 크레인의 위치로 결정
Rodriguez (1980)	각각의 부재양중에 소요되는 시간에 소요비용을 곱하여 산정된 전체비용을 최소로 하는 위치를 T/C의 최적 위치로 구함
주진호 외 (1994)	정량적인 방법을 통한 한 대의 타워 크레인의 최적위치 선정 모델 제시
이열 (1998)	현장 조사를 통해 T/C 배치의 문제점 파악
Zhang (1999)	여러 대의 타워 크레인의 위치를 최적화 시키는 모델을 제시

위의 연구에서 살펴볼 수 있듯이, T/C에 관련된 문헌은 주로 T/C의 선정, 양중시간, 위치최적화, 안전성 등에 집중되어 있었

1) 이현수 외 2, 고층건축공사의 타워크레인 계획 프로세스 개발, 대한건축학회논문집(계획계), 제18권 제6호, pp.119~120, 2002.6

으며, 실질적으로 타워크레인의 설치프로세스에 관련된 연구는 부재하다.

따라서 본 연구에서는 T/C 설치에 초점을 맞추어 연구를 진행하며, 설치과정에서의 생산성을 분석하고 설치프로세스의 일반화 모델을 제시하여, 현장관리자들이 직접 활용할 수 있도록 기초자료를 제시하고자 한다.

2.2 T/C의 구성

건설기계관리법시행령(2007.11 개정)에 의하면, T/C이란 “수직타워의 상부에 위치한 지브를 선회시켜 중량물을 상하, 전후 또는 좌우로 이동시킬 수 있는 정격하중 3톤 이상의 것으로서 원동기 또는 전동기를 가진 것”으로 정의하고 있다. 건축공사현장에서 T/C의 주요 작업내용은 양중물을 들어 올리거나 내리는 동작, 후크에 매달린 양중물을 전·후로 움직이는 동작 그리고 크레인 상부 전체를 회전시켜 이동시키는 동작 등으로 제한되어 있다.

2.2.1 T/C의 분류

T/C의 크게 설치방법에 따른 분류와 기능에 따른 분류로 구분할 수 있다.

1) 설치방법에 따른 분류

T/C는 설치방법에 따라 고정식 T/C, 이동식 T/C, 상승식 T/C로 구분된다. 이를 정리하면 표 5와 같다.

표 5. 설치방법에 따른 T/C 종류

분류	내용 및 특징
고정식 T/C	건설현장에서 가장 많이 사용되는 타입으로, 콘크리트 기초에 고정된 앵커와 타워의 부분들을 직접 조립하는 형식
이동식 T/C	층고가 높지 않으며 길이가 긴 공장 건물이나 PC공장에 설치되며, 레일을 설치하여 T/C 자체가 레일을 타고 이동하며 작업하는 형식
상승식 T/C	주로 고층 건축 공사에 사용되며, 일정 높이만큼 층이 올라가면 건물의 구조체에 지지하여, 마스트를 포함한 T/C의 몸체가 건물과 같이 따라 올라가고, 그 하부의 타워 크레인 설치로 인해 비워 두었던 구멍을 메워 가는 형식

2) 기능에 따른 분류

T/C의 기능에 따른 분류방식으로는 T자형 T/C와 Luffing Jib형 T/C가 있다. 이를 정리하면 표 6과 같다.

표 6. 기능에 따른 T/C 분류

분류	내용 및 특징
T자형	<ul style="list-style-type: none"> •임대료가 비교적 저렴하고, 국내 T/C의 주종 •볼 회전 및 자체 인양 작업속도 확보, •지브(Jib)가 고정 •고공방해 및 민원소지가 없는 현장에 설치
Luffing Jib형	<ul style="list-style-type: none"> •고공권 침해 또는 타 건물에 간섭이 있는 현장에 설치 •T형 T/C에 비해 작업속도가 비교적 느림 •지브가 상하로 작동 •장비의 임대료가 고가임

2.2.2 T/C의 구조

T/C의 설치과정 및 주요부 부재의 명칭과 특징을 알아보기 위하여 T/C설치 전문업체 및 건설현장 방문하였으며, 관련문헌을 고찰하였다.

표 7²⁾과 그림 1은 본 연구에서 주로 다루고 있는 T자형 T/C의 기본구조와 주요부 명칭 및 특징을 나열한 것이다.

표 8. T/C의 주요부 명칭과 역할

부위	명칭	역할
①	기초	기초 앵커와 기초 앵커를 고정해주는 콘크리트 부분
②	베이직 마스트	T/C 제일 밑에 설치되는 마스트로 보통 일반 마스트보다 2~3배 이상 길며, 전체 중량이 실리는 부분
③	마스트	기둥역할을 하는 구조
④	텔레스코픽 케이지	마스트를 연장 또는 해체작업을 하기 위해 유압장치 및 실린더가 부착된 구조의 마스트
⑤	유압 상승장치	유압실린더와 유압모터를 이용한 유압구동 상승장치로서 마스트의 높이를 높일 때 사용
⑥	운전실	선회 장치의 상부, 메인지브 바로 하부에 작업위치 및 선회반경 표시판이 잘 보이는 위치에 설치
⑦	켓(타워) 헤드	메인 지브와 카운터 지브의 연결바를 상호 지탱해 주기 위한 목적으로 설치
⑧	메인 지브	선회축을 중심으로 한 외팔보 형태의 구조물로서, 선회반경에 따라 권상용량이 결정
⑨	권상 장치	권상모터, 감속기, 드럼으로 구성 권상모터에서 후크까지 권상작용유도
⑩	카운터 웨이트	T/C의 균형유지를 위해 카운터 지브 끝단에 설치된 철근콘크리트 블록
⑪	트롤리	메인지브를 오가며 권상 작업을 위한 선회 반경을 결정하는 횡행장치
⑫	훅 블록	트롤리 하부에서 권상 후크와 와이어로프에 의해 권상작업이 이루어지는 달기구
⑬	메인지브 타이바	메인 지브와 카운터 지브를 지지하면서 켓 헤드에 연결해주는 바(bar)
⑭	선회 장치	선회 장치와 점검용 난간대가 설치되어있고 그사이에 회전테이블이 위치

2) 김결희, 효율적인 양중작업을 위한 타워크레인의 배치에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, pp.21~25, 1998.8

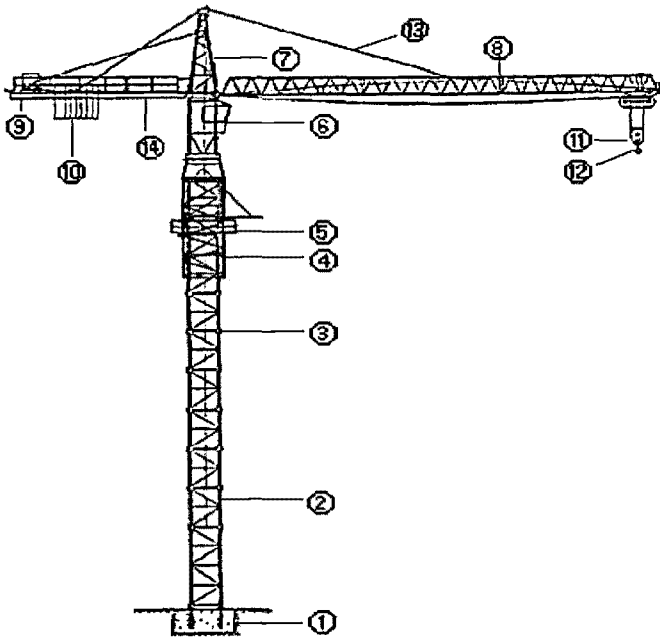


그림 1 T형 T/C의 구조

3. T/C 설치 시뮬레이션 모델

3.1 CYCLONE 모델링 개요

시뮬레이션기법 중 하나인 사이클론(CYCLic Operation Network, 이하 CYCLONE)은 1970년대에 개발되었으며, 1982년에 Lluch와 Halpin(1992)에 의해 발전되었다.³⁾ CYCLONE은 실제적인 프로젝트를 반영하기 위하여 개발된 것이며, 모델링에 필요한 기본적인 구성요소는 표 8에 정리한 바와 같다.

표 9. 기본적인 모델링 요소

기호	이름	설명
	NORMAL	시작 논리에 있어 구속받지 않고 자원 본질의 액티브 공정을 나타내는 일반적인 작업단위 모델링 요소
	COMBI	시작 논리에 있어서 논리적으로 강제적인 것과 달리 일반적인 단위작업 모델링 요소인 강제적인 단위작업 모델링 요소
	QUEUE	자원의 휴지 중인 상태에서 사용에 대해 줄지어 있거나 기다리는 것을 기호로 나타내는 자원 본질의 유휴 상태
	COUNTER	네트워크 모델 내 주요 유닛 흐름에 대한 시간을 계산
	ARROW	자원 본질 방향성의 흐름 모델링 요소

3) Han, S. W. and Halpin, D. W., "The Use of Simulation for Productivity Estimations based Multiple Regression Analysis", Winter Simulation Conference, pp.1492~1493, 2005

CYCLONE 시뮬레이션 기법을 사용할 경우, 대상 공종의 프로세스 모델링을 통해 건설관리자는 프로세스 내에 발생되고 있는 문제점을 쉽게 분석 및 평가할 수 있으며, 개선방안을 도출하여 보다 효율적인 작업 프로세스를 제안할 수 있다.⁴⁾

3.2 T/C 설치 프로세스

본 연구에서는 실제 T/C가 설치되는 현장 2곳을 방문한 후 현업에 10년 이상 근무한 전문가 2명과 면담을 실시하여 T/C 설치 프로세스와 투입 자원을 알아보았다. 그 결과, 자재양증을 위한 하이드로크레인, T/C 구성부재, 노무자 등이 조사되었다. 또한, 노무자는 작업 프로세스별로 상부작업조와 하부작업조로 구성되었다. 전체 T/C 설치 프로세스를 정리하면 표 9와 같다.

표 10. T/C 설치 프로세스

작업 순서	작업내용	세부내용
1	터파기	T/C 설치 준비작업으로 현장 작업 (본연구에서생략)
2	지반다지기	
3	버림콘크리트 타설	
4	양생	
5	기초앵커 설치	철근배근 및 콘크리트타설
6	T/C 부재 하역	트럭 9~10대
7	베이스 마스트 설치	볼트 16개 체결
8	텔레스코픽 케이지 설치	핸드레일 7개 발판 설치
9	운전실 설치	핀 4개 설치
10	타워헤드 설치	핀 4개 설치
11	카운터지브 설치 (타이바 설치, 권상장치 설치)	타이바 4~6개 핀 2개 설치
12	메인지브 조립	지상조립 1시간 상부조립 1시간
13	카운터 웨이트 설치	카운터 웨이트 9~10개 설치
14	와이어로프 설치	트롤리 주행용
15	마스트 인양 및 텔레스코픽 케이지 가이드레일에 안착	텔레스코핑 과정으로 마스트 수만큼 작업 반복
16	메인지브와 카운터지브 균형 맞추기	
17	텔레스코픽 유압상승	
18	마스트 밀어넣기	
19	상부하강 하부볼트 및 상부볼트 체결	
20	점검	점검표

* T/C 설치시, 자립고보다 높이 세울 경우, 건물이나 바닥에 지지대 설치가 추가될 수도 있음

4) 박동근 외 4, 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월 적층공법의 생산성 분석방안, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp.263~268, 2008.11

3.3 모델 구축을 위한 데이터 수집

T/C 설치 프로세스 일반화 모델의 개발을 위한 데이터 수집과 정은 우선적으로 현장별로 각기 다른 환경적/물리적 조건을 제약해야 한다. 본 연구에서는 연구의 범위에서 언급하였듯이, 설치방법에 따른 분류로 기초바닥에 지지하는 고정식 T/C와 기능에 따른 분류로 고공방해가 없는 현장을 선택하여 자료 수집을 실시하기로 계획하였다. 최종적으로 본 연구에서는 T/C 장비업체 2곳과 실제 T/C 설치 공사 중인 현장 2곳을 방문하여 면담조사 및 실측을 하여 데이터를 수집하였다. 데이터 측정을 위한 방문조사는 2009년 4월 28일에서 2009년 6월 15일까지 4차례에 걸쳐 실시하였다.

기초앵커가 설치된 이후, 현장으로 반입된 T/C의 구성부재는 하이드로크레인에 의해 설치되기 이전에 대기 상태를 유지한다. 건설현장 관리자 및 장비업체 전문가들에 의하면 T/C 구성부재의 대기시간을 단축시켜 전체 작업시간을 줄일 수 있는 방법은 존재한다고 하였다. 바로 하이드로크레인의 대수를 늘리는 것이다. 하지만 하이드로크레인의 임대비용이 워낙 고가이므로 대부분 건설 현장에서는 하이드로크레인 한 대로 거의 모든 기초 작업을 수행하는 현실이다.

결과적으로, 장비하역과 베이직 마스트 설치로부터 카운터 웨이트 설치까지의 1일 평균 작업시간은 약 12시간 소요되는 것으로 조사되었다.

사실상 전체 작업자가 베이직 마스트를 설치한 이후부터는 상부작업과 하부작업으로 나누어진다. 상부 작업은 T/C 운전기사를 제외한 3인1조, 하부 작업은 2인1조로 작업이 수행된다. 전체 설치과정 또한 비순환작업과 순환작업으로 이루어지는데, 표 9의 작업 6번부터 작업 14번까지는 비순환작업인 T자형 T/C를 형성하는 과정이며, 작업 15번부터 19번 작업까지는 순환작업인 마스트 개수만큼 마스트를 설치하는 단계이다. 최종적인 점검을 마친

면 T/C 설치작업은 완성된다. CYCLONE 모델의 시뮬레이션을 실행하기 위해 각 작업에 대한 작업시간 설정이 필요하다. 따라서 앞서 면담조사 및 현장방문을 통해 수집한 Data를 기반으로 결정론적인(deterministic)방법과 확률론적인(Stochastic)방법으로 CYCLONE 모델에 적용하였다. 이를 정리하면 표 10과 같다.

표 11. T/C 설치 CYCLONE 모델의 작업시간

작업내용	작업시간 (분)		
	최소	평균	최대
하역	90	120	150
베이직 마스트 설치	40	60	60
텔레스코픽 케이지 설치	90	120	150
운전실 설치	20	30	40
타워헤드 설치	20	30	40
카운터지브 설치	50	60	70
메인지브 조립	90	120	150
와이어로프 설치	90	120	150
카운터웨이트 설치	50	60	70
마스트 인양 및 텔레스코픽 케이지 안착	3*		
지브 균형 맞추기	3*		
텔레스코핑 유압상승	6*		
마스트 밀어넣기	3*		
상부하강 하부볼트 및 상부볼트 체결	20	30	40
점검	10	15	20

* 현장면담을 통해 결정된 작업시간

3.4 T/C 설치 CYCLONE 모델

CYCLONE 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선 T/C 설치 CYCLONE 모델이 구축되어야 한다. 따라서 앞서 표 9에서 제시한 프로세스와 표 8의 CYCLONE 기본구성요소를 활용하여 T/C 설치 CYCLONE 모델을 구축하였다. 특히, 본 모델의 프로세스 중에는 마스트를 설치하는 반복적인 작업이 수행된다. 이러한 반복적인 작업을 단순화하는 방법으로 CYCLONE 모델에서는

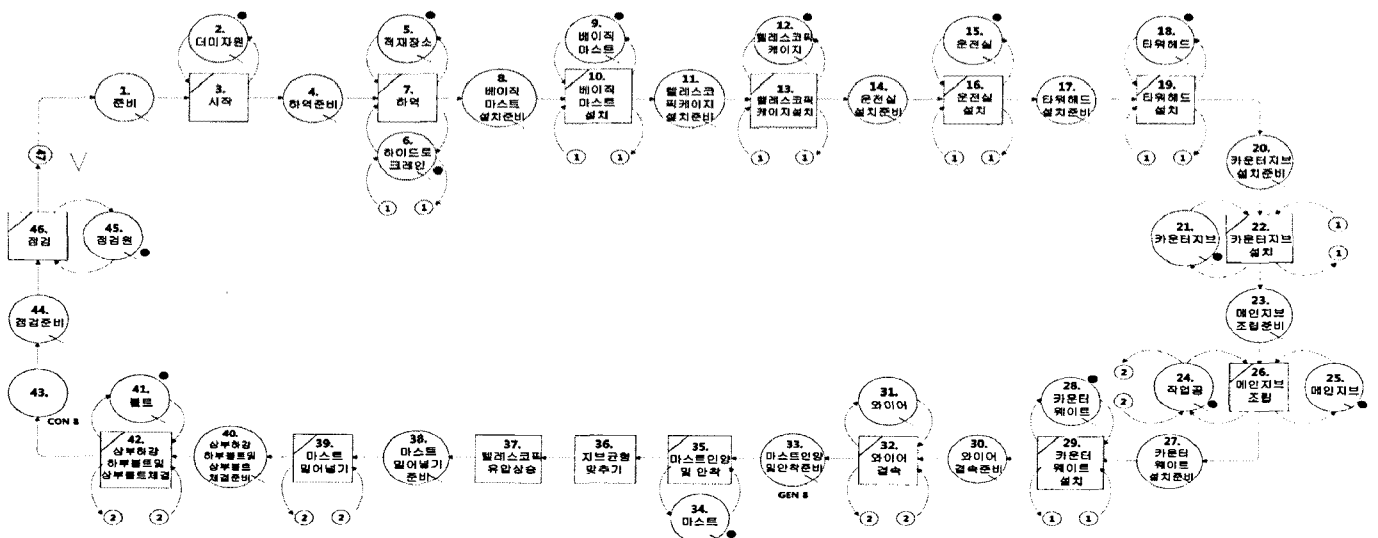


그림 2. T/C 설치 프로세스 CYCLONE 모델

GENERATE(GEN)와 CONSOL(CON) 명령을 사용하여 반복회수를 반영한다. GENERATE와 CONSOL 명령에 대한 자세한 설명은 Halpin, D. W and Riggs, L. S(1992)⁵⁾의 내용을 참조하기 바란다.

또한, T/C 설치 프로세스 CYCLONE 모델을 구축하기 위해서는 모델을 구성하기 위한 입력요소가 필요하다. 이러한 입력요소로는 전체 작업 프로세스를 바탕으로 하며 장비, 노동력, 자재 그리고 각 작업에 소요되는 시간 등이 있다. 작업에 필요한 장비로는 트럭과 하이드로크레인이고, 자재는 기본적으로 T/C의 구성부재로 이루어지며, 작업조는 상부 3인1조, 지상 2인1조로 구성되었다. 각 작업에 소요되는 시간은 표 10의 내용을 바탕으로 CYCLONE 모델에 적용하였다. 구체적인 T/C 설치 프로세스 CYCLONE 모델은 그림 2에 제시한 바와 같다.

4. T/C 설치 프로세스 생산성 분석

4.1 시뮬레이션 결과

4.1.1 생산성 분석

앞서 연구의 범위에서 설명하였듯이, 본 연구에서 분석된 사례의 T/C는 기초 베이직 마스트 위에 8개의 일반 마스트가 설치되는 것으로 한정하였다. 따라서 이에 대한 생산성 분석하기 위해, 3장에서 제시한 입력요소를 기반으로 CYCLONE 모델을 Web-CYCLONE에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 반복 횟수는 100회로 설정하였으며, 도출된 결과는 표 11과 같다.

표 12. CYCLONE 시뮬레이션 결과

타워 크레인			
생산성 정보			
Total Sim. Time Unit	Cycle No.	단위시간당 생산성 (Per time unit)	Cycle time (mean)
100211.6	100	0.00099788	1002.11

시뮬레이션 결과를 살펴보면, 총 100회의 시뮬레이션을 수행하는데 소요되는 시간은 100211.6분이고, 1분당 생산성은 0.00099788(Cycles per time unit) 임을 알 수 있다. 하역작업에서 베이직 마스트 설치, 텔레스코핑 작업까지 T/C 한 대를 설치하는데 소요되는 작업시간은 1002.11분으로 나타났다.

5) Halpin, D. W. and Riggs, L. S., Planning and analysis of construction operations, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.314~315, 1992

T/C 설치 프로세스의 생산성 차트

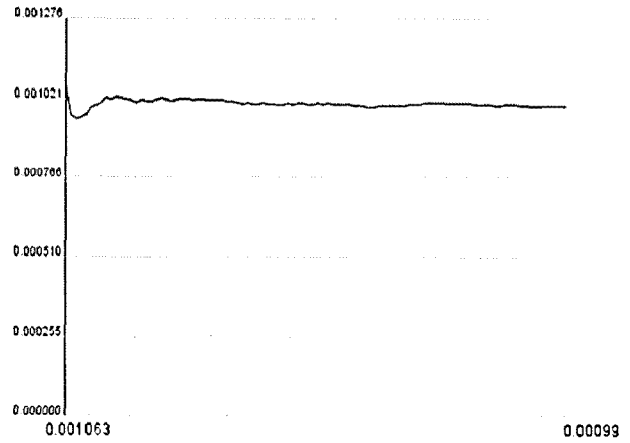


그림 3. T/C 설치 프로세스의 작업 생산성

그림 3은 T/C 설치 프로세스의 생산성을 표현한 그래프이다. 생산성 그래프는 사이클이 반복됨에 따라 일정한 값에 수렴한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 일정한 수렴되는 결과 값은 100회의 사이클을 시뮬레이션 상에서 입력하여 0.00099의 생산성 값을 도출하였다.

4.1.2 민감도 분석

T/C의 설치과정에서 장비 또는 작업조의 변화에 따라 생산성이 변화할 수 있다. 따라서 투입량의 변화에 따른 생산성의 변화를 알아보기 위하여 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 실시하였다.

T/C 장비업체와 현장담당자와의 면담 결과에 따르면, T/C의 설치과정에서 발생하는 많은 대기시간은 안전 등 여러 가지 원인으로 인한 필연적인 작업이다. 또한 생산성에 직접적으로 영향을 미치는 것은 하이드로크레인의 대수 또는 작업자의 숙련도라고 하였다. 따라서 T/C의 설치과정에 대한 민감도 분석을 하이드로크레인의 수와 작업조의 수를 변화하는 시나리오로 구성하였다. 민감도 분석결과는 표 12와 같다.

표 13. 민감도 분석결과

시나리오	자원 정보		생산성 정보
	하이드로 크레인	작업조	생산성 (Per time unit)
1	1	1	0.0010
2	1	2	0.0010
3	2	1	0.0012
4	2	2	0.0012
5	3	1	0.0012
6	3	2	0.0012

표 12의 분석결과에서 살펴볼 수 있듯이, 크레인이 각각 1대, 2대, 3대일 경우 작업조의 변화에 따라 생산성은 변하지 않았다. 이는 T/C 설치과정에서 작업조의 변화는 생산성에 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다. 반면에 하이드로크레인의 대수가 1대에서 2대로 변화했을 때 생산성은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 하이드로크레인의 변화는 생산성에 직접적으로 영향을 미침을 의미한다. 하지만 일정개수 이상이 되면 생산성에 영향을 미치지 않음을 동시에 확인할 수 있다. 즉, 시나리오 3~6번에서 크레인 1대와 작업조 1팀이 더 투입되더라도 불구하고 생산성은 동일하였다. 따라서 본 민감도 분석을 통해 생산성과 하이드로크레인의 임대비용 및 작업조의 노무비를 동시에 고려했을 때 가장 적절한 결과는 시나리오 3번 (하이드로크레인 2대, 작업조 1팀)임을 알 수 있다.

4.2 사례적용

개발된 시뮬레이션 모델의 유효성을 검증하기 위하여, 추가적으로 2차례 현장방문을 실시하여 T/C 설치 각 프로세스상의 시간을 측정하였다. 그리고 측정된 결과를 바탕으로 앞서 구축한 모델(그림 2)에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 표 13과 같이 나타났다.

표 14. 사례적용

생산성 정보	
평균 건설시간	단위유닛 시간당 생산성
980.0	0.001020

시뮬레이션 분석결과를 살펴보면, T/C 설치에 소요되는 시간은 총 980.0분(16.33시간)이며, 단위유닛 시간당 생산성은 0.001020(cycles/hours)으로 나타났다.

한편, 실제 건설현장의 설치시간을 살펴보면, 타워크레인의 기본구조를 완성하는 첫째 날에 소요되는 시간(대략 12시간)과 둘째 날의 텔레스코핑 작업시간(대략 8시간)의 합계인 20시간과 시뮬레이션 결과는 약간의 차이가 있다. 이러한 차이는 T/C를 설치하는 20시간 안에는 이들 동안의 중간 휴식시간(대략 2시간)이 포함되어 있으며, 또한 텔레스코핑 작업 전에 소요되는 준비작업(대략 1시간)이 포함되었기 때문으로 분석되었다. 결과적으로, 순수 작업시간 및 불가피한 대기시간만으로 분석했을 때, 본 연구에서 제시한 시뮬레이션 모델은 일반적으로 실무에서 활용되고 있는 T/C 설치 프로세스를 설명할 수 있다고 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 T/C 설치 프로세스의 생산성을 측정하고, 일반

화모델을 제시하고자 시뮬레이션 기법을 활용하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 입력요소의 변화에 따른 생산성의 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) T/C 설치 프로세스의 시뮬레이션 모델을 제시하였으며, 시뮬레이션 결과로 단위유닛 시간당 생산성은 0.00099788이며, 8개의 마스트가 포함된 타워크레인을 설치하는데 소요되는 평균작업시간은 1002.11분으로 분석되었다.
- 2) 민감도 분석 결과에 따르면, 작업조의 변화는 생산성에 크게 영향을 미치지 않으며, 하이드로크레인의 대수의 변화는 생산성에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- 3) 실제사례 데이터를 적용해본 결과, 시뮬레이션 결과 값이 실측값과 거의 유사하여 모델이 유효함을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구는 건설현장 관리자들이 T/C의 설치를 위한 기초자료로 활용이 가능 할 것으로 기대되며, 또한 본 연구에서 제시하는 CYCLONE 모델을 현장조건에 맞게 적절히 활용한다면, 본 연구에서 분석된 T/C 사례와 규모 및 공법 등이 다를 경우에도 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

한편, 본 연구에서 제시된 민감도분석 결과는 투입자원에 따른 시간당 생산성을 나타낸 결과이다. 그러나 보다 실용적인 연구를 위해서는 투입자원에 대한 비용측면도 고려해 주는 것이 필요하다고 생각된다. 따라서 향후 작업시간과 비용을 동시에 고려한 연구가 수행될 필요가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 건설기계관리법시행령, 별표 1, 2007.11
2. 김결희, 효율적인 양중작업을 위한 타워크레인의 배치에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 1998.8
3. 김훈, 고층건축공사의 리프트 선정 의사결정 모델에 대한 연구, 한양대학교 석사학위논문, 2000
4. 남시대, 양중작업의 효율화 방안에 관한 연구, 고려대학교 석사학위논문, 2006
5. 박동근 외 4, 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월 직공공법의 생산성 분석방안, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp.263~268, 2008.11
6. 이동훈 외, 타워크레인 텔레스코핑 작업의 안전리스크 대응방안 연구, 한국건축시공학회 학술논문발표회 논문집, 제9권 제1호, pp.9~13, 2009.5
7. 이병구 외, Tower Crane 설치계획 및 구조보강 방법 소개, 쌍용건설 기술연구소, 제23권, pp.33~37, 2002.6
8. 이열, 효율적인 양중작업을 위한 타워크레인의 배치에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문, 1998.
9. 이종렬 외, 고층건축공사 타워크레인 양중시간 예측모델, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 제5회, pp.472~475, 2004.11
10. 이현수 외, 고층건축공사의 타워크레인 계획 프로세스 개발, 대한건

- 축학회논문집(계획계), 제18권 제6호, pp.119~126, 2002.6
11. 주진호 외, 고층건축공사에 있어서 타워크레인의 최적위치선정 방법에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제14권 제1호, pp.491~494, 1994
 12. 허담 외, 고층 건축공사의 양중계획 최적화 방안에 관한 연구, 대한 건축학회 학술발표대회논문집, 제14권 제2호, pp.779~784, 1994, 10
 13. 호종관 외, 상층식 타워크레인 지지구조의 안정성 검토 모델, 한국건설관리학회 논문집, 제9권 제2호, pp.190~198, 2008.4
 14. 호종관, 타워크레인의 선정과 안정성검토 TOOL 개발, 대한건축학회지, 제50권 제5호, pp.112~116, 2006.5
 15. Furusaka, Shuzo & Gray, Colin, A Model for The Selection of The Optimum Crane for Construction Sites, Construction Management and Economics, Vol.2, No.2, pp.157~176, 1984
 16. Leung, Arthur W. T. & Tam, C. M., "Models for Assessing Hoisting Times of Tower Cranes", ASCE J. of Construction Engineering and Management, Vol.125, No.6, pp.385~391, 1999
 17. Han, S. W. and Halpin, D. W., The Use of Simulation for Productivity Estimations based Multiple Regression Analysis, Winter Simulation Conference, pp.1492~1493, 2005
 18. Halpin, D. W. and Riggs, L. S., Planning and analysis of construction operations, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992
 19. Rodriguez Ramos, W. E., Quantitative Techniques for Construction Site Layout Planning, Ph. D, The University of Florida, 1982
 20. Warszawski, A, Analysis of Transportation Methods in Construction, Journal of the Construction Division, ASCE, No.99, Vol.1, pp.191~202, 1973

(접수 2009.10.16, 심사 2009.12.03, 게재확정 2009.12.17)

요 약

근래에 들어 건축공사의 규모가 점차 대형화·고층화 되어 가고 있으며, 건설 작업의 효율성을 증진시키기 위하여 양중장비의 사용이 급진적으로 증가하고, 그 필요성이 높아져가고 있는 실정이다. 이에 많은 연구자들이 타워크레인 관련 연구들을 진행하였다. 하지만 이러한 연구들은 주로 타워크레인 선정, 위치 최적화, 양중시간 등에 집중되어 있으며, 실질적으로 타워크레인의 설치에 관한 연구문헌은 부재하다. 따라서 건설현장에서는 장비업체 작업자들의 경험에 의한 주관적인 판단과 기술보조에 의해 수행되어 왔다.

따라서 본 연구는 시뮬레이션 기법을 이용하여 타워크레인 설치 프로세스의 생산성을 분석하고, 이에 대한 일반화 모델을 제시함으로써 현장 관리자들이 직접 활용할 수 있도록 기초자료를 제공하고자 한다.

키워드 : 타워크레인, 시뮬레이션, 생산성 분석