

# 기후요소를 고려한 초고층 건설공사의 타워크레인 양중시간 예측 시뮬레이션 모델

## A Study of the Tower Crane Hoisting Time Estimation Simulation Model with Climate Element for the High-Rise Building Construction

양강혁\*                      이현수\*\*                      박문서\*\*\*                      정민혁\*\*\*\*                      황성주\*\*\*\*\*  
Yang, Kanghyeok                      Lee, Hyun-Soo                      Park, Moonseo                      Jung, Minhyeok                      Hwang, Sungjoo

### Abstract

Tower crane hoisting plan is one of the key element for the success of entire High-Rise Building construction. Hoisting time is the basic factor to appropriate hoisting plan which need to the hoisting load estimate and tower crane selection. With this reason, accurate hoisting time is needed to the proper hoisting plan. The current hoisting time estimation for High-Rise Building focus on the hoisting cycle time estimation with historical data. However, this method underestimated the external influences like environmental factor. Thus, this paper aims to develop the hoisting time estimation model with discrete event simulation which include the wind influences with certain height. According to the simulation result, the hoisting time which applied wind influence is increasing with height growth. Because of the high speed wind, the upper area of building has more operation delay time than the mechanical operation time. Seoul, the research area, has the most fastest wind speed on April and the least on October. Due to these differences of wind speed, the hoisting time is estimated with significant differences between April and October. This hoisting time estimation model would be used for estimating the influence of wind. Moreover, this could apply to make the realistic hoisting plan.

**Keywords :** *Tower Crane, Hoisting Time, High-Rise Building, Discrete Event Simulation*

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 도시의 산업화와 집중화로 인해 토지의 효율적인 활용 요구가 증가하면서 도시지역에 건설되는 초고층 건물 또한 증가하고 있다(이광렬 2009). 초고층 건물 공사는 대부분 타워크레인과 호이스트 같은 양중장비에 의존하여 공사가 수행되고(Al-Hussein 2006) 이로 인해 양중계획의 중요성 또한 증가하

고 있는 실정이다(김진호 2008). 특히 타워크레인은 공정의 가장 기본이 되는 골조공사의 양중장비로 초고층 공사 수행에 미치는 영향이 매우 커서 타워크레인 양중계획은 공사의 성패를 좌우하는 중요한 요소라고 할 수 있다.(김윤식 2010)

타워크레인의 양중계획에서 양중시간은 양중계획시 가장 기본적인 요소로 이를 이용하여 양중부하 및 타워크레인 대수를 산정하게 된다. 현재 양중시간의 산정은 기존 건물의 실적자료나 양중계획 담당자의 경험을 바탕으로 한 계산식을 통해 예측하고 있

\* 일반회원, 서울대학교 건축학과 석사과정 heak1211@snu.ac.kr

\*\* 중신회원, 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사, hyunslee@snu.ac.kr

\*\*\* 중신회원, 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사(교신저자), mspark@snu.ac.kr

\*\*\*\* 일반회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정, minstr1@gmail.com

\*\*\*\*\* 일반회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정, nkkt14@snu.ac.kr

다. 하지만 초고층 건물의 경우 건물높이가 높아 공사가 진행될 수록 양중거리가 증가하여 양중시간이 증가하게 되는데 현재의 양중시간 산정 방법으로는 이러한 양중 거리의 증가를 반영하기 어렵게 된다(조지훈과 조흥구 2009). 또한 타워크레인 양중이 필요한 자재가 많아져서 타워크레인 양중부하가 커지게 되는데 이로 인해 부정확한 양중시간 예측에 따른 양중계획과 실제 양중작업간의 차이가 기존의 건물보다 크게 발생하게 된다. 이를 보완하기 위해 초고층 건물의 양중거리 증가를 반영하여 양중시간을 예측하는 연구(조창연 2012)가 수행되었으나 이는 양중 사이클 타임을 예측하는데 한정되었으며, 타워크레인의 양중작업에 영향을 미치는 요인들은 고려하지 못했다는 한계가 있다.

초고층 건물 공사는 공사가 진행되어 작업 높이가 높아질수록 공사를 수행하는 환경의 변화 또한 크게 발생하게 된다. 이로 인해 양중이 지연되거나 양중 작업이 정지하여 자재를 양중하는데 걸리는 시간이 증가하게 되는데 현재 이러한 환경적인 영향은 장비가 작업할 수 없는 시간을 제외하는 방식으로 장비의 가동률을 산정하면서 반영하고 있다. 하지만 양중시간과 마찬가지로 기존의 실적자료 및 경험을 바탕으로 고려하고 있으며, 모든 작업 높이에서 동일한 기준으로 적용하고 있기 때문에 높이의 차이가 큰 초고층 건물에 적용하기에는 한계가 있다고 할 수 있다.

환경요인들 중 특히 바람의 경우 높이가 높아질수록 지표면과의 마찰력이 줄어 속도가 빨라지는 특성을 지니고 있으며, 산업안전보건기준에서 타워크레인의 안전한 작업을 위해 일정풍속 이하에서만 작업하도록 규제하고 있어 초고층 건물에서는 바람에 의해 양중이 정지되는 상황이 기존의 중고층 건물보다 많이 발생하게 되어 타워크레인의 총 양중 작업시간이 증가하게 된다.

따라서 초고층 건물의 양중계획을 위한 양중시간 예측을 위해서는 양중거리의 증가를 반영하는 것 이외에도 높이에 따라 변하는 바람의 영향 또한 양중시간 예측에 반영하여 양중계획을 세워야 한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 초고층 건설공사의 타워크레인 양중작업에 영향을 미치는 바람의 높이별 연직분포와 월별 차이, 강풍 발생 확률에 대하여 조사하고, 높이에 따라 증가하는 바람의 특성을 반영한 타워크레인 양중시간 예측 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 연구는 초고층 건축 공사의 양중계획 수립시 양중시간 예측 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건축법에 명시되어 있는 높이 50층 이상 또는 높이 200m 이상의 초고층 건물을 대상으로 하였으며, 바람에 의한 고층부의 양중작업 영향정도를 알아보기 위해 600m 높이의 가

상 건물 데이터를 생성한 후 이를 이용하여 분석하였다. 연구지역으로는 국내에서 초고층 건물 공사가 가장 많이 수행되고 있는 서울에 한정하여 연구를 진행하였다.

바람 데이터의 경우 과거의 기후 관측 자료를 사용하였고 이를 바탕으로 서울지역의 풍속의 분포 및 월별 차이 조사하였으며, 연직분포에 따라 높이별 풍속을 예측하고 이를 시뮬레이션에 반영하여 높이별 양중시간의 증가 및 월별 양중시간 및 양중지역의 차이를 분석하였다.

본 연구의 진행방법은 다음과 같다.

- 1) 타워크레인의 양중작업에 대한 현황과 문제점을 조사하고 이산사건 시뮬레이션 모델링에 대해 고찰한다.
- 2) 풍속 연구대상 지역의 과거 기후 데이터를 조사하며, 기후 요소와 타워크레인 작업과의 관계를 파악한다.
- 3) 양중작업 프로세스와 풍속 영향요소를 반영하여 양중시간 예측 시뮬레이션 모델을 개발한다.
- 4) 초고층부의 분석을 위해 가상의 건물 데이터를 생성하고 이를 이용해 바람이 미치는 영향의 정도를 분석한다.
- 5) 모델의 적합성 판단을 위해 실제 건설되었던 초고층 공사 양중시간 데이터와 비교하여 모델을 검증한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 타워크레인 관련 기존 연구

타워크레인의 양중작업은 골조공사의 선행 작업으로 양중작업 지연시 후속작업도 지연되어 전체 공사기간이 늘어나게 된다. 또한 공사 중간에 문제가 발생하더라도 사전에 결정되었던 설치 위치나 운영 대수를 추후에 바꾸기 힘들기 때문에 양중계획 단계에서 해당 공사에 적합하게 계획하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

하지만 현재 타워크레인 양중계획은 기존의 공동주택 공사 실적자료를 바탕으로 세워지기 때문에 동일한 형태와 높이, 동일한 지역에 건설되는 경우가 거의 없는 초고층 공사의 양중시간을 예측하고, 초고층에 맞는 양중계획을 세우기는 매우 힘들게 된다. 그렇기 때문에 현장에서는 부정확한 양중계획으로 인한 리스크를 줄이기 위해 과대한 양중 계획을 세우게 되고(이종렬 2004) 이는 공기와 자원에 있어 손실을 일으키게 된다.

이러한 배경에 의해서 현재까지 공사 환경에 적합한 타워크레인 양중계획을 수립하기 위한 연구가 많이 수행되었으며, 이중 본 연구와 관련된 양중시간 관련 연구는 표1과 같다.

표 1. 타워크레인 양중시간과 시뮬레이션에 관한 선행연구

주제	연구자 (연도)	연구내용	대상
양중 시간	Zhang (1999)	후크의 움직임을 계산하여 양중시간을 계산하고, 시간이 최소가 되는 점을 도출하여 타워크레인 설치위치로 제한함	가상 데이터
	Leung (1999)	인공신경망과 회귀분석 방법을 이용하여 타워크레인 양중시간 예측 모델을 개발함	공공주택 건물
	Tam (2002)	비선형 신경망과 선형 회귀분석을 통해 타워크레인 양중시간 모델을 개발함	공공주택 건물
	Li (2012)	이동식 크레인의 움직임을 4D 모델과 가상 프로토타이핑을 이용하여 실제로 발생할 수 있는 충돌을 방지함	저층 건물
	이종렬 (2004)	양중시간 영향요인을 분류하고 회귀분석을 통해 양중시간을 예측함	주택 건물
	조창연 (2012)	시뮬레이션을 이용하여 초고층 건물의 높이 증가를 반영한 양중 시간 예측 모델을 제안함	초고층 건물

관련 연구를 보면 양중 실적자료를 바탕으로 회귀분석, 인공신경망의 방법을 적용해서 양중시간을 예측하고 있으며, 대부분이 이상적인 상황에서의 양중 사이클 타임을 예측하는 것을 목적으로 하고 있다. 초고층 건물이 대상인 연구의 경우 기존의 실적자료가 없기 때문에 시뮬레이션 방법을 통해 양중시간을 예측하고 있다.

Zhang(1999)은 가상데이터를 생성하여 자재 야적장과 설치위치간의 거리를 바탕으로 타워크레인의 전체 양중시간을 계산하는 식을 제시하고, 이를 바탕으로 설치위치를 결정하는 연구를 수행하였지만 가상 데이터를 사용하였으며, 계산한 양중시간의 정확도를 검증하지 않았다는 한계가 있다. Leung(1997)과 Tam(2002)는 다중회귀분석과 신경망을 이용하여 양중시간을 예측하는 모델을 개발하고 각 방법에 따른 정확도를 비교하였으나 두 연구 모두 연구에 사용된 실적 데이터가 공동주택 건물에 한정되었다는 한계가 있다.

Li(2012)는 4D 모델과 가상 프로토타이핑을 이용하여 이동식 크레인의 실제 양중작업을 예행연습 하여 발생할 수 있는 충돌을 미리 예측하고 실제 건설관리에 적용하는 연구를 수행하였지만 연구대상이 저층의 건물이며 특정 케이스에 한정하였다는 한계가 있다.

이종렬(2004)의 경우 양중에 영향을 미치는 요인을 반영하여 회귀분석한 후 이를 바탕으로 양중시간을 예측하는 모델을 개발하였지만, 주택건물에 한정하였다는 단점이 있으며, 조창연(2012)은 초고층 건물의 양중작업을 모델링하여 이동거리를 계산하고, 양중시간을 예측하는 연구를 수행하였으나 양중높이의 증가만을 반영하여 양중시간을 예측하였다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 자재의 양중거리를 계산하여 양중시간을 예측하고 양중 영향요인들 중 영향을 크게 미치는 바람을 반영하여 양중시간을 예측하는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이

를 통해 건물높이별 양중시간을 예측하고 바람이 양중에 미치는 영향을 분석하였으며, 실제 수행된 실적자료와 모델의 결과 값과의 비교를 통해 결과 값의 타당성을 분석하였다.

## 2.2 바람에 대한 고려 현황과 풍속 제한기준

현재 초고층 공사의 타워크레인 양중계획시 바람에 의한 영향은 장비의 작업 가동률을 산정하는 부분에서 고려하고 있다. 가동률 산정 방법을 보면 기상청의 과거 자료를 바탕으로 최대풍속 10m/s 이상인 일수를 연간 작업시간에서 제외하여 계획을 세우는 방법을 쓰고 있으며, 바람으로 인해 연간 총 9일간 양중작업을 수행하지 못한다고 예상하고 해당기간을 양중 소요시간에 제외하고 있다.<sup>1)</sup> 하지만 기상청 풍속 데이터의 경우 풍속 측정 기준높이인 지상 10m 높이에서 측정한 자료로서 실제 공사 건물의 맨 위에 설치되어 있는 타워크레인에 영향을 미치는 풍속과는 속도의 차이가 발생하게 되어 기존의 타워크레인 양중계획시 고려한 영향보다 더 큰 영향을 받게 된다. 따라서 정확한 양중계획을 세우기 위해서는 작업높이의 증가에 따른 풍속의 변화를 반영하여 양중시간 예측을 수행해야 한다고 할 수 있다.

타워크레인은 풍속의 영향을 크게 받기 때문에 고용노동부에서는 건설현장의 안전한 작업을 위해 일정풍속 이상일 때 타워크레인의 양중작업을 금지하고 있다. 산업안전기준에 관한 규칙을 보면, 순간풍속 20m/s 이상일 경우 타워크레인의 작업을 중지하도록 하고 있다(제37조 2항). 여기서 순간풍속은 순간적으로 가장 크게 부는 바람을 말하며, 일반적으로 10분 동안의 평균값을 나타내는 최대풍속의 1.5배 정도가 된다(김용국 2004).

김창덕(2006)에 따르면 건설현장의 타워크레인 풍속제한 기준은 현장마다 차이가 있으며, 일부 현장에서는 최대풍속이 10m/s 이상일 시 타워크레인 작업을 중지하도록 하고 있다. Shapiro(2000)의 Cranes and Derricks에서는 풍속이 13.4m/s를 넘어갈 경우 모든 양중 작업을 중지하는 것을 권고하고 있다.

본 연구에서는 다음과 같이 조사한 양중정지 기준 중에서 현재 서울 잠실의 B 건설현장에서 적용하고 있는 최대풍속 10m/s 이상에서 타워크레인의 양중작업이 정지하는 것으로 설정하고, 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2.3 높이에 따른 풍속 연직분포

풍속은 지표면에서 멀어질수록 지표면 마찰의 영향을 적게 받기 때문에 고층부로 갈수록 빨라지게 되는데 이런 높이에 따른

1) D 건설사 내부자료

풍속의 변화를 풍속의 연직분포라고 한다. 풍속의 연직분포에 대한 정확한 예측은 매우 어려우며, 현재 세계 각국의 실측결과를 토대로 대수법칙과 지수법칙을 따른다고 해석하고 있다(하영철 1998). 대수법칙은 일정한 지표면을 갖는 초원 및 해면에서의 관측 값과 유사하게 나타나며, 도심 시가지와 같이 다양한 지표면을 갖는 지역의 경우 지수법칙과 비슷하게 나타난다. 우리나라와 일본 및 세계 여러 국가에서는 풍속 연직분포 기준으로 지수법칙을 많이 사용하고 있는 실정이다(홍인표 2012).

본 연구에서는 연구지역으로 도심 시가지인 서울을 선정하였기 때문에 지수법칙을 바탕으로 타워크레인 높이에 따른 바람의 증가를 계산하였으며, 사용된 지수법칙의 식(Dyrbye 1997)은 다음과 같다.

$$V=V_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^p \quad \text{----- 식 (1)}$$

- V=해당높이 (H)에서의 풍속
- V<sub>0</sub>=기준높이 (H<sub>0</sub>)에서의 풍속
- H=지상으로부터의 풍속예측
- H<sub>0</sub>=기준높이 (10m)
- P=지표면에 따른 분포지수

이때 지표면에 따른 분포지수는 Dyrbye (1997)가 제시한 지수법칙 식에서 적용하고 있는 값을 바탕으로 하여 적용하였으며, 시골 및 해안지역의 경우 1/7, 도시 교외의 경우 1/4.5, 도심 중심지는 1/3 값으로 하였다.

### 2.4 이산사건 시뮬레이션

복잡한 건설작업의 경우 기존의 사용하던 수학적인 방법으로는 분석 및 최적화가 매우 힘들다. 이런 복잡한 작업을 분석하기 위한 대안 중 하나로 시뮬레이션 방법이 사용되고 있다.(Martinez 1996).

시뮬레이션은 현실과 비슷한 모형을 만들어 실험하여 특성을 파악하는 일로서 상태의 변화가 시간에 따라 변화되는 동적 시스템, 특정시간에서 이루어지는 정적시스템으로 나뉘며, 동적 시스템 중 상태변수의 변화가 어떤 특정한 점에서 순간적으로 변하는 것을 이산사건 시스템(Discrete Time System) 연속적으로 변하는 시스템을 연속 시스템(Continuous System)이라고 한다(Banks 2001). 이중 이산사건 시뮬레이션의 경우 상태변화가 구분 가능한 시점에서 일어나는 시스템을 모델링할 때 사용하고 있다.(김영실 1995)

건설 분야에서는 CYCLONE (Halpin 1973), INSIGHT (Paulson 1978), RESQUE (Chang 1987), STROBOSCOPE

(Martinez 1996), KMOS (Kim&Gibson 2003) 등 여러 가지 이산사건 시뮬레이션을 적용할 수 있는 프로그램을 개발해서 연구에 사용하고 있다(신운석 2010).

이중 Martinez(1996)가 개발한 STROBOSCOPE(State and Resource Based Simulation of Construction Processes)는 다른 시뮬레이션 툴과 달리 복수의 자원 및 각각의 속성 입력이 가능해 자원의 특성을 반영한 모델링을 할 수 있으며, 작업의 시작시간, 종료시간, 작업의 수행횟수, 시뮬레이션 수행 시간과 같이 시뮬레이션의 상태에 대한 조정이 가능한 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 이런 특성을 가진 STROBOSCOPE를 이용하여 높이별로 다른 강풍 확률을 갖는 바람 요소를 시뮬레이션에 반영하였으며, 이를 바탕으로 총 양중시간을 예측하는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 연구에서 초고층 건설공사 양중시간 예측 시뮬레이션 모델의 개발에 사용된 STROBOSCOPE의 모델링 요소는 표.5와 같다.

표 2. STROBOSCOPE 모델링 요소

기호	이름	설명
NormalAct	Normal Activity	연결된 이전 작업이 끝남과 동시에 시작하는 특징이 있는 작업 요소
Queue	Queue	대기 상태로 남아있는 자원을 의미하는 요소로 각각의 큐는 특정한 자원종류와 연관
Condi	Conditional Activity	특정 조건이 만족할 때에만 작업을 시작하는 특징을 가지고 있는 작업 요소
Fork	Fork	확률적으로 연결된 곳 중 하나로 자원의 이동을 결정하는 요소
Link	Link	특정 자원의 흐름을 나타내는 요소

## 3. 풍속 데이터 분석

### 3.1 서울 지역의 풍속 분석

본 연구에서는 1982년부터 2011년까지 30년 동안 시간 단위로 측정된 기상청의 풍속 데이터를 바탕으로 서울지역의 풍속 분포 및 월별 추이를 분석하였다. 기상청의 데이터는 기준 측정 높이인 10m에서 측정된 값으로 이를 바탕으로 현장 양중정지 기준인 10m/s가 넘는 바람이 부는 시간을 월별로 분석해보면 그림.6과 같다. 풍속 10m/s 이상 바람이 부는 시간은 연간 3.8 시간으로 나타났으며, 이는 전체 시간 대비 0.04%로 매우 적은 것으로 나타났다. 10m/s 이상 바람을 월별로 비교해보면 4월과 11월에 각각 1.3시간, 0.6시간으로 가장 길었으며 6월과 7월에는 10m/s 이상의 바람은 거의 불지 않는 것으로 나타났다.

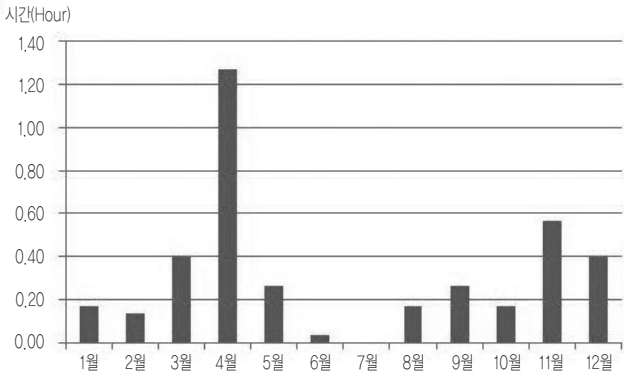


그림 1. 월별 10m/s 이상의 바람이 부는 시간

10m/s 이하 범위의 풍속을 분석해보면 앞서 나타낸 10m/s 이상의 분포와 차이가 있는 것을 알 수 있다. 3월과 4월의 경우 이전과 동일하게 1년 중 바람이 가장 세게 불었지만, 앞의 분포와는 다르게 9월과 10월에 가장 약한 바람이 부는 것으로 나타났다. 10m/s 이상의 바람이 부는 시간이 큰 것부터 나타내면 4월과 11월, 12월 순이었지만 5m/s 이상의 바람이 부는 시간의 경우 4월(88.5시간), 3월(79.1시간)이 가장 높았지만, 10m/s 이상의 바람이 강하게 불었던 11월(39.8시간)과 12월(45.2시간)의 경우 1월(47.2시간), 2월(58.2시간)보다 높지 않은 것을 알 수 있다. 이는 현재 10m/s 이상의 바람을 바탕으로 계획된 양중계획이 상부로 올라가면 분포가 달라진다는 것을 나타내며, 정확한 양중계획을 위해서는 작업 높이에 따라 풍속의 분포가 다르게 적용되어야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 높이 별로 다른 풍속 값을 적용하기 위해 30년간의 시간별 풍속 데이터를 바탕으로 월별로 발생하는 바람의 빈도를 도출하여 시물레이션에 적용하였으며, 적용한 풍속 데이터는 표.3과 같다.

표 3. 서울지역 풍속의 월별 발생 확률(기상청 기준높이 측정값)

단위(%)

풍속	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
0m/s 이상	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1m/s 이상	86.4	88.3	90.3	88.7	85.5	82.7	82.3	80.7	77.5	78.1	83.9	85.9
2m/s 이상	56.1	60.7	65.7	63.6	58.6	53.9	54	50.2	43.5	43.0	49.3	53.1
3m/s 이상	31.8	36.9	42.2	41.2	36.1	28.9	28.7	24.6	19.6	21.8	27.0	28.9
4m/s 이상	15.1	18.9	23	23.5	18.4	12.3	12.4	9.8	7.4	9.0	12.9	13.9
5m/s 이상	6.3	8.6	10.6	11.9	7.5	4.2	4.8	3.6	2.6	3.3	5.5	6.1
6m/s 이상	2.3	3.5	4.0	5.2	2.6	1.4	1.9	1.3	0.8	1.1	2.1	2.4

표 3. 서울지역 월별 풍속 발생 확률(기상청 기준높이 측정값) (계속)

단위(%)

풍속	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
7m/s 이상	0.7	1.4	1.5	2.1	0.9	0.5	0.7	0.5	0.3	0.4	0.7	0.9
8m/s 이상	0.2	0.5	0.4	0.9	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3
9m/s 이상	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2
10m/s 이상	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1

### 3.2 높이 상승에 따른 풍속 변화

본 연구의 연구 대상지역인 서울은 도심지역으로 분포지수는 도심지의 해당 분포지수인 1/3로 설정하였다. 그림.7은 도심지역의 높이별 풍속의 증가를 나타낸 것으로 기상청 측정 기준높이 10m에서 측정된 풍속 값을 기준으로 표현하였다.

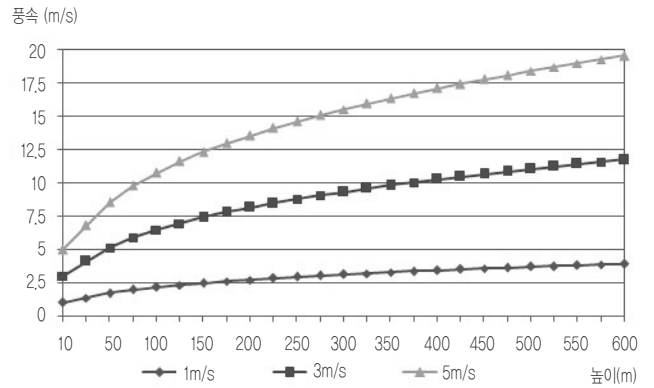


그림 2. 측정높이 증가에 따른 풍속의 변화

풍속 연직분포 식을 통해 변환한 결과 기상청 기준 높이에서 측정된 3m/s의 경우 높이 375m에서 양중정지 풍속인 10m/s에 도달하는 것으로 나타나며, 5m/s 바람의 경우 높이 80m에서 10m/s로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 375m 높이에서는 기준높이의 3m/s 바람에 타워크레인이 작업할 수 없는 것을 의미하고, 높이가 80m인 경우에는 기준높이의 5m/s 바람에 양중작업이 정지해야 한다는 것을 의미한다.

이를 해당 풍속이 부는 연평균 시간으로 비교해보면 기존의 10m/s 이상의 바람이 부는 시간은 3.8시간이지만 3m/s, 5m/s 이상의 바람이 부는 시간은 각각 2685시간, 547시간으로 나타났다. 이는 10m/s에서 양중작업이 정지될 시 높이별로 작업이 불가능한 시간의 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 초고층 건물공사 양중계획시 바람의 영향을 반영하기 위해서는 높이의 변화에 따른 바람의 증가를 반영하여 양중시간을 예측해야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.



### 4. 타워크레인 양중 시뮬레이션 모델

본 장은 타워크레인의 양중 시뮬레이션 모델링에 필요한 양중 시간 예측 식과 개발한 시뮬레이션 모델, 가상 데이터를 이용한 시뮬레이션 결과로 이루어져 있다.

#### 4.1 타워크레인 양중작업 및 양중시간

건설현장에서 타워크레인의 양중작업과 관련된 움직임은 크게 후크의 수직이동, 트롤리의 수평이동, 붐의 회전으로 나눌 수 있으며, 타워크레인의 양중시간의 경우 자재 결속시간, 자재 이동시간, 자재 설치 및 풀기 시간, 야적장 복귀시간의 합으로 측정할 수 있다. 이때 자재 결속시간과 자재설치 및 풀기 시간의 경우 각 양중 자재별 특성으로 인해 다른 값을 가지고 있다. 자재 이동시간과 야적장 복귀시간은 야적장 위치와 자재 설치위치, 타워크레인의 위치를 바탕으로 한 이동거리와 타워크레인의 움직임별 이동속도를 통해서 계산할 수 있다.

본 연구에서는 결속시간과 및 설치 및 풀기시간은 양중계획시 자재별로 적용하는 시간을 사용하였으며, 자재이동과 복귀시간 계산의 경우 Zhang(1999)의 후크 이동시간을 계산하는 방법을 바탕으로 하였다.

$$T_v = \frac{|ZS_i - ZD_i|}{V_h} \quad \text{----- 식 (2)}$$

$$p(D_i) = \sqrt{(X D_i - X C_{T_i})^2 + (Y D_i - Y C_{T_i})^2} \quad \text{----- 식 (3)}$$

$$p(S_i) = \sqrt{(X S_i - X C_{T_i})^2 + (Y S_i - Y C_{T_i})^2} \quad \text{----- 식 (4)}$$

$$l_i = \sqrt{(X D_i - X S_i)^2 + (Y D_i - Y S_i)^2} \quad \text{----- 식 (5)}$$

$$T_a = \frac{|p(D_i) - p(S_i)|}{V_a} \quad \text{----- 식 (6)}$$

$$T_w = \frac{1}{V_w} \cdot \arccos \left( \frac{l_i^2 - p(D_i)^2 - p(S_i)^2}{2 \cdot p(D_i) \cdot p(S_i)} \right) \quad \text{----- 식 (7)}$$

$(0 \leq \arccos(\theta) \leq \pi)$

- $V_a$ =트롤리 라디얼 속도
- $V_w$ =붐 회전 속도
- $V_h$ =후크의 상승/하강 속도
- $X D_i, Y D_i, Z D_i$ =자재설치 위치
- $X S_i, Y S_i, Z S_i$ =야적장 위치
- $X C_{T_i}, Y C_{T_i}, Z C_{T_i}$ =타워크레인 위치

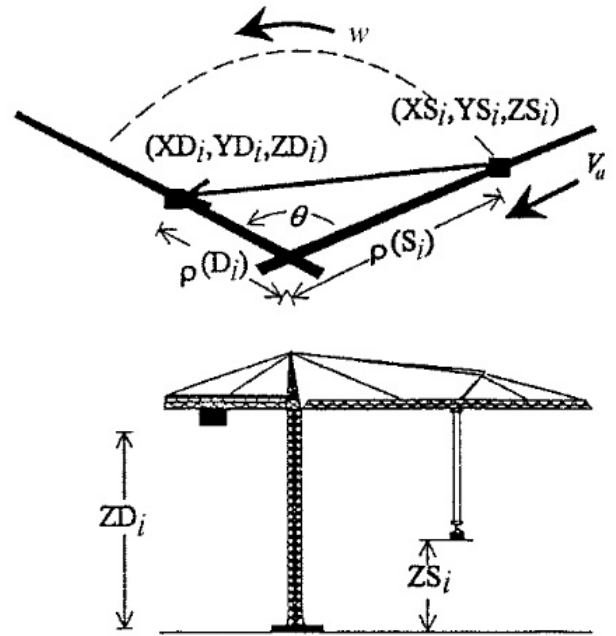


그림 3. 타워크레인 후크의 이동시간 (Zhang 1999)

Zhang(1999)은 각각 트롤리, 붐, 후크의 이동거리와 크레인의 해당 이동속도를 가지고 시간을 계산하였으며, 붐의 회전의 경우 코사인 2법칙과 역코사인 법칙을 이용해 이동각도를 계산하고 이동시간을 도출하였다. 또한 식에서 타워크레인의 후크와 트롤리, 붐의 동시적 움직임을 고려하고 있었으나 본 연구에서는 타워크레인이 한번에 한가지 움직임만을 수행한다고 가정하고 양중시간을 계산하였다. 그리고 양중작업 중 후크의 상승과 하강은 연속적으로 이뤄지지 않기 때문에 이를 반영하여 모델링 하였다. 타워크레인의 전체양중시간( $T_T$ ), 묶기시간( $T_H$ ), 풀기시간( $T_b$ ), 크레인의 이동시간( $T_v + T_a + T_w$ ), 복귀시간( $T_v + T_a + T_w$ )의 합과 같게 된다(조창연 2012).

$$T_T = T_H + 2 \times (T_v + T_a + T_w) + T_b \quad \text{----- 식 (8)}$$

#### 4.2 양중 시뮬레이션 모델링

##### 4.2.1 시뮬레이션 조건 설정

시뮬레이션을 통해 타워크레인의 높이에 따른 바람의 영향 및 양중시간 파악을 위해 연구 문헌과 실적 자료를 통해 다음의 시뮬레이션 조건을 설정하였다.

표 4. 시뮬레이션 조건

번호	조건
1	자재는 모두 동일한 야적장 위치에서 출발하도록 한다.
2	타워크레인의 설치 위치는 건물내부의 중심으로 한다.
3	타워크레인의 높이는 자재 설치위치보다 20m 높게 유지한다.
4	붐 회전거리는 최대회전의 절반인 90°(1.58 rad)로 한다.
5	트롤리의 수평이동 거리는 20m로 한다.
7	후크 수직이동은 설치 높이보다 10m 더 상승한 후 하강하여 설치한다.
8	양중은 절 단위로 수행하며, 자재는 절의 중간높이로 이동하도록 한다.
9	강풍 발생에 의한 양중정지는 한 시간으로 한다.

앞서 나타낸 양중시간 계산식의 경우 부재의 좌표를 통해 정확한 양중거리 및 시간을 계산할 수 있으나 본 연구는 가상 데이터를 이용해 양중높이의 증가에 따른 바람의 영향 정도를 분석하는 것임으로 높이와 바람의 영향을 제외하고 표4의 조건을 통해 모델을 단순화하였다.

#### 4.2.2 시뮬레이션 모델 개발

바람의 영향을 반영한 양중시간 예측 모델 개발을 위해 서울 지역의 높이 600m, 160층의 가상 건물 데이터를 생성하였다. 1개 층의 층고는 3.75m로 하였으며, 절 단위로 시공하는 초고층 공사의 특성을 반영하여 4개 층을 1절로 하며, 1절의 높이는 15m이고, 전체 40절의 자재의 양중을 수행하도록 설정하였다. 양중자재는 철골 기둥 부재로 선정하였으며, 1절당 30개의 철골 기둥을 갖고 있다고 설정하였다. 모델에서 양중작업을 수행하는 타워크레인은 1대로 하였으며, 크레인이 복귀 후 대기상태에 있을 때 다음 자재를 묶는 작업이 시작되도록 하였다. 양중작업이 시작되면 자재 결속, 트롤리 상승, 트롤리 수평이동, 붐 회전, 트롤리 하강, 자재 풀기를 하여 자재 이동을 완료하고, 크레인은 앞선 순서의 반대로 야적장 위치로 다시 복귀한 후 다음 양중을 대기하도록 하였다.

강풍에 따른 양중정지의 경우 앞서 도출한 자료를 바탕으로 각각의 절의 타워크레인 작업시의 높이에 따른 풍속 증가를 감안하여 강풍 확률을 도출하였고, 10m/s 미만일 경우에 허가를 받아 양중이 시작되도록 하였다. 만일 풍속이 10m/s 이상일 경우 1시간 동안 정지 후에 다시 작업여부를 결정하도록 하였으며, 자재와 타워크레인은 묶인 상태로 대기하도록 하였다.

모델에 사용된 액티비티와 구성요소들에 대한 설명은 표 5와 같으며, 시뮬레이션의 양중시간 계산에 적용한 타워크레인의 사양은 표 6과 같다.

표 5. 타워크레인 권장 사양 (김경주 2009)

분류	값
후크 수직 속도( $v_v$ )	60 (m/min)
트롤리 라디언 속도( $v_a$ )	53.5 (m/min)
붐 회전 속도( $v_w$ )	7.57 (rad/min)

표 6. 양중시간 예측 모델 요소

요소	이름	관련자원	설명
Queue	MatToLift	자재	타워크레인을 통해 양중하는 자재를 나타내는 요소
	MatLiftQ	자재	양중 정지 시 자재가 대기하도록 설정한 요소
	LiftedMat	자재	타워크레인을 통해 양중작업이 완료된 요소
	Operation	작업	바람에 따른 작업 허가를 나타내기 위해 설정한 요소
	Permit	작업	작업 허가를 나타내는 요소
	Crane	크레인	타워크레인을 의미하는 요소
	TCLiftQ	크레인	양중 정지 시 타워크레인이 대기하도록 설정한 요소
Combi	Holding	자재, 크레인	자재를 크레인에 묶는 시간을 나타내는 요소
	OperCombi	작업	Holding 작업 시작과 함께 시작되도록 설정한 요소
	LiftingStart	작업, 자재, 크레인	바람에 따른 작업허가와 자재, 크레인이 갖춰져야 시작하도록 하기 위해 설정한 요소
Normal	ToLift	자재, 카레인	양중정지 시 자원이 대기하는 큐를 만들기위해 설정한 요소
	Verti	자재, 크레인	후크의 수직상승 작업을 나타내고 계산하기 위한 요소
	Horiz	자재, 크레인	트롤리의 수평이동 작업을 나타내고 계산하기 위한 요소
	BoomTurning	자재, 크레인	붐의 회전을 나타내고 작업시간을 계산하는 요소
	Verti2	자재, 크레인	후크의 수직하강 작업을 나타내고 작업시간을 계산하는 요소
	Dismantle	자재, 크레인	자재의 해체작업을 나타내는 요소
	Verti2Return	크레인	크레인 복귀과정 중 후크의 상승을 나타내는 요소
	BoomReturn	크레인	크레인 복귀과정 중 붐의 회전을 나타내는 요소
	HorizReturn	크레인	크레인 복귀과정 중 트롤리 이동을 나타내는 요소
	VertiReturn	크레인	크레인 복귀과정 중 후크의 하강을 나타내는 요소
	LiftingPermit	작업	작업허가를 나타내는 요소
	LiftingStop	작업	작업이 중지하도록 하는 요소
	OperNormal	작업	다음 양중 작업의 허가를 결정하기 위해 설정한 요소
	Fork	Wind	작업

#### 4.3 양중 시뮬레이션 결과

가상데이터의 모델 적용을 통해 지상에서 600m 높이까지 양중작업을 절 단위로 실행하도록 하였으며, 강풍확률의 경우 연평균 값을 적용하여 수행하였다. 시뮬레이션 결과의 분석은 절별로 시뮬레이션을 100번 반복 수행하여 나온 값들의 평균값을 바탕으로 하였으며, 각 절별로 예측한 양중시간 결과 값은 표 7과 같다.

표 7. 양중시간 예측 시뮬레이션 결과

절	양중 높이(m)	강풍발생 확률(%)	양중정지 시간(분)	총 양중 시간(분)	양중정지 비율(%)	바람을 고려한 단위자재별 양중시간
1	7.5	0.7	8	520.2	1.5	17' 20"
2	22.5	1.9	35	562.8	6.3	18' 46"
3	37.5	3.3	61	603	10.0	20' 06"
4	52.5	4.9	88	645.6	13.7	21' 31"
5	67.5	6.4	123	695.4	17.7	23' 11"
6	82.5	8.5	169	756	22.3	25' 12"
7	97.5	9.6	199	801.6	24.9	26' 43"
8	112.5	12.2	265	882.6	30.0	29' 25"
9	127.5	12.6	275	907.8	30.3	30' 16"
10	142.5	15.2	344	991.2	34.7	33' 02"
11	157.5	16.5	434	1096.8	39.6	36' 34"
12	172.5	18.7	434	1111.8	39.1	37' 04"
13	187.5	19.3	456	1148.4	39.7	38' 17"
14	202.5	19.3	456	1163.4	39.2	38' 47"
15	217.5	21	498	1217.4	40.7	40' 35"
16	232.5	21.7	512	1249.8	41.0	41' 40"
17	247.5	24.6	614	1366.2	44.9	45' 54"
18	262.5	24.6	614	1381.2	44.4	46' 02"
19	277.5	26.5	671	1453.8	46.2	48' 28"
20	292.5	26.5	671	1468.8	45.7	48' 58"
21	307.5	27.3	695	1507.8	46.1	50' 16"
22	322.5	27.3	695	1522.8	45.7	50' 46"
23	337.5	30.6	808	1650.6	49.0	55' 01"
24	352.5	30.6	808	1665.6	48.5	55' 31"
25	367.5	30.6	808	1680.6	48.1	56' 01"
26	382.5	31.5	840	1727.4	48.6	57' 35"
27	397.5	31.5	840	1742.4	48.2	58' 05"
28	412.5	33.7	929	1846.2	50.3	61' 54"
29	427.5	33.7	929	1861.2	49.9	62' 04"
30	442.5	33.7	929	1876.2	49.5	62' 32"
31	457.5	33.7	929	1891.2	49.1	63' 02"
32	472.5	37.0	1100	2077.2	52.9	69' 14"
33	487.5	37.0	1100	2092.2	52.6	69' 44"
34	502.5	37.0	1100	2107.2	52.2	70' 14"
35	517.5	38.0	1152	2174.4	53.0	72' 29"
36	532.5	38.0	1152	2189.4	52.6	72' 57"
37	547.5	38.0	1152	2204.4	52.3	73' 29"
38	562.5	38.0	1152	2219.4	51.9	73' 57"
39	577.5	38.0	1152	2234.4	51.6	74' 48"
40	592.5	40.8	1292	2389.4	54.1	79' 65"

기둥을 97.5m의 높이로 양중할 때 바람의 영향을 고려하지 않았을 경우 양중시간은 18.58분으로 나타났다. 이때 10m/s 이상의 강풍이 불 확률은 9.6%이고 이에 따른 총 양중 정지시간은 199분, 기둥 한 개당 6.5분의 양중 정지가 발생하였다.

시뮬레이션 데이터 중 가장 높은 높이인 592.5m의 경우 바람을 고려한 단위자재 양중시간은 79.65분이며, 이때 기계적인 순수 양중시간은 36.58분, 바람에 의한 정지시간은 43.07분으로 자재를 운반하는 시간보다 오히려 바람의 영향에 의한 양중정지 시간이 더 큰 것을 알 수 있다.

절별로 비교해 보면 최상부인 40절에서 바람의 영향을 반영하지 않았을 때와 바람의 영향을 고려한 양중시간은 약 2배 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 또한 가장 바람이 강한 4월과 제일 약한 10월의 강풍확률을 적용하여 비교하면 4월의 경우 40절의 단위 자재 양중시간은 연평균보다 19분이 더 소요되는 것으로 나타났으며, 10월의 단위 자재 양중시간은 연평균보다 16분 적게 것으로 나타났다.

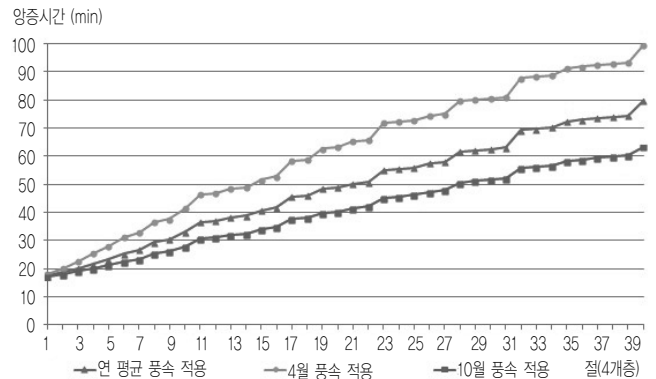


그림 4. 시기별 양중시간 증가 비교

본 결과에 따르면 600m 높이의 양중작업은 작업 시기에 따라서 양중시간이 최대 1.6배 차이가 나타날 수 있는 것으로 보이며 상층부의 공사시기를 조절함에 따라 양중작업 효율의 증대를 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 사례적용 및 논의

본 장에서는 실제 수행된 초고층 공사의 양중 실적자료와 모델을 통해 예측한 결과를 비교하였으며, 모델의 활용방안에 대해 서술하였다.

### 5.1 실제 양중 데이터와의 비교

개발된 시뮬레이션 모델의 경우 이론적인 결과를 바탕으로 만들어진 모델이기 때문에 실제로 수행된 초고층 공사의 양중 정지시간과의 비교를 통해 시뮬레이션 모델의 적합성을 판단해야 한다. 하지만 바람에 의한 양중정지의 경우 현장의 다양한 상황들로 인해 정확하게 측정하기 어렵고, 바람에 대한 영향은 장비의 가동률에서 다른 요소들과 합쳐서 측정하기 때문에 절별로 단위의 정확한 결과를 산출하기는 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 절별 평균 양중시간 데이터를 가지고 바람을 고려하지 않은 기계적인 양중시간 측정값과 비교를 하였다. 비교 대상 건물은 서울지역에 건설된 높이 264m의 초고층 주상복합 APT로



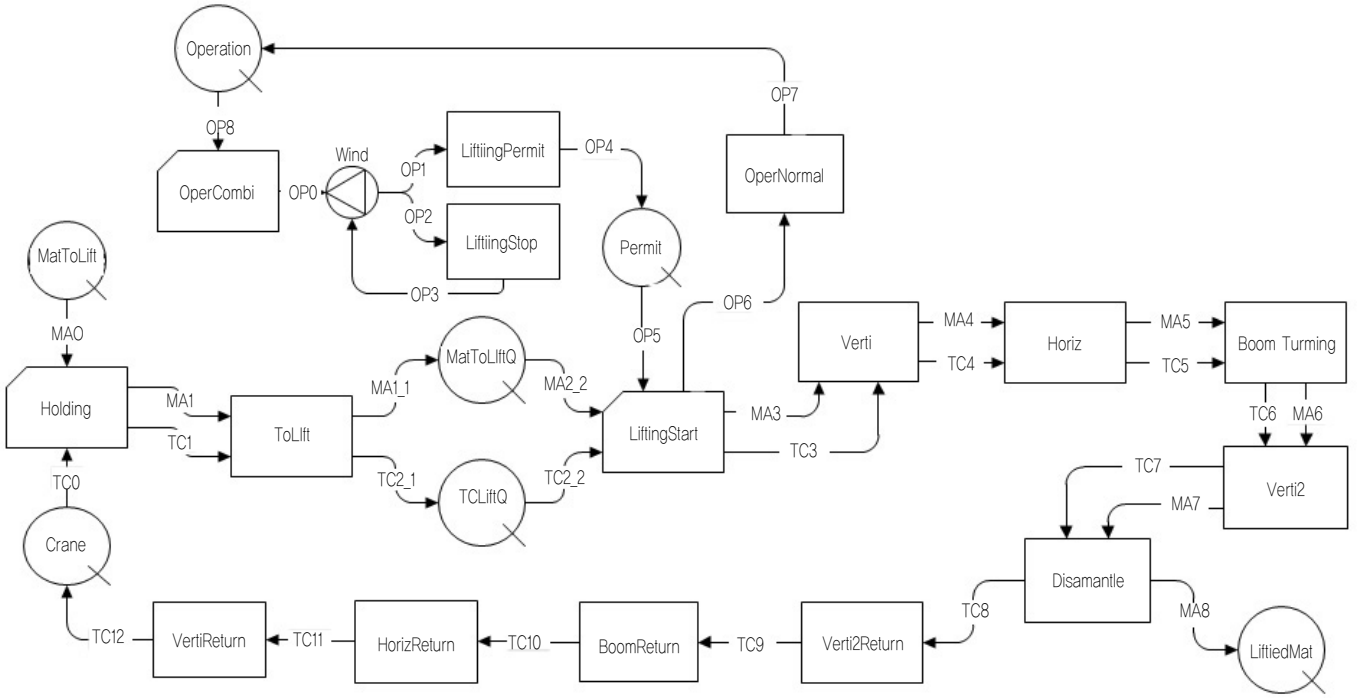


그림 5. 타워크레인 양중시간 예측 시뮬레이션 모델

서 전체 69층으로 이루어져 있으며 3개 층이 한절로 총 25절로 되어있다. 이중 1절과 2절의 경우 지하층이기 때문에 3절부터 최상부인 25절까지 자재별 평균양중시간을 가지고 비교하였다.

알 수 있었다. 하지만 양중 높이별 바람에 의한 양중정지 시간 데이터가 부족하여 연구에서 도출한 바람을 고려한 양중시간에 대한 정확한 검증을 수행하지 못한 한계가 있다.

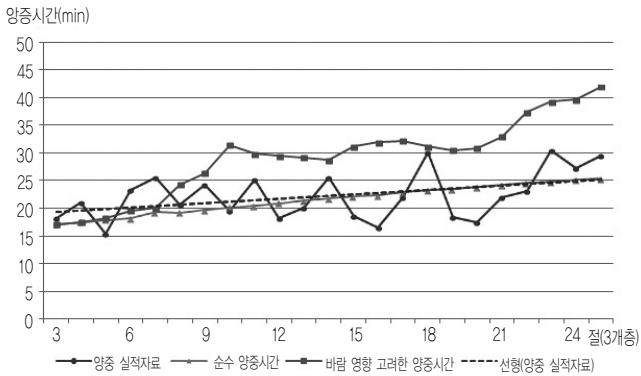


그림 6. 양중시간 실적자료와의 비교

시뮬레이션 결과 바람의 영향을 고려하지 않고 작업높이 증가에 따른 양중거리의 증가만을 반영한 순수 양중시간의 경우 실적 데이터와 매우 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 바람에 대한 영향을 고려할 경우에는 최상부에서는 10분 정도 차이가 났으며, 7절까지는 추세가 동일하지만 이후로 양중시간 차이가 발생하고, 절별로 다른 공사시기로 인해 증감이 발생하는 것을

### 5.2 연구의 의의 및 활용방안

초고층 건물에 적합한 양중계획을 세우기 위해서는 양중시간을 정확하게 예측하고 이를 바탕으로 양중부하와 타워크레인의 대수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 기존의 다른 양중시간 예측 연구에서 포함하고 있지 않던 작업 높이에 따른 바람의 연직 변화를 고려하였으며, 이를 통해서 양중 높이별로 바람에 의해 양중이 정지하는 시간 및 높이별 순수 양중시간을 예측하였다. 본 모델을 통해 월별 풍속 차이에 따른 양중시간의 차이를 파악할 수 있으며, 다른 지역의 바람 데이터를 적용할 경우 해당지역에서의 양중시간 또한 예측할 수 있다. 또한 기존의 연구가 단위 양중시간만을 예측하는데 그쳤지만 본 모델은 양중자재의 종류와 각 자재별 특성, 양중물량을 사용자가 설정하여 수행할 수 있어 건물의 특성에 맞는 양중시간의 예측이 가능하기 때문에 모델의 적용 범위가 기존의 다른 예측 시뮬레이션 모델보다 크다고 할 수 있다.

## 6. 결론

현재 건설되는 초고층 건물의 수가 증가하면서 골조공사 양중 장비인 타워크레인의 양중계획에 대한 중요성이 증가하고 있다. 타워크레인 양중계획 중 특히 양중시간의 경우 타워크레인 선정 및 양중부하 산정과 같은 양중계획을 세우기 위해 기본 조건이 되는 부분으로 정확한 양중시간의 예측이 필요하다고 할 수 있다. 하지만 현재 양중시간에 관련된 연구는 양중 사이클 타임 예측에 한정되고, 양중작업에 영향을 미치는 영향요인들에 대한 고려는 거의 되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 양중시간에 영향을 미치는 영향요인들 중 영향이 큰 풍속을 반영하여 양중시간을 예측하고자 하였으며, 이를 위해 풍속의 연직분포와 월별 강풍이 불 확률을 분석하였고, 이를 시뮬레이션에 적용하여 바람의 영향을 고려한 초고층 공사의 타워크레인 양중시간 예측 모델을 개발하였다. 이는 단순히 자재 1개의 양중 사이클 타임 예측에 머물던 기존의 연구에서 발전하여 다수의 자재를 양중할 수 있고, 높이에 따라 다른 바람의 영향을 양중시간에 양중 높이별로 반영할 수 있으며, 작업하는 시기의 월별 풍속 차이 또한 고려할 수 있어 실제 초고층 건설현장의 양중작업에 가까운 양중시간 예측 모델을 개발하였다는 점에서 기존의 연구와 차별성을 찾을 수 있다.

본 시뮬레이션 모델을 통해 나온 높이별 양중시간을 보면 600m 높이로의 양중은 자재 당 평균 79분 정도 소요되며, 바람에 의해 41분의 대기시간이 발생하고 양중작업은 38분이 소요되는 것으로 나타났다. 또한 바람이 가장 세게 부는 4월과 가장 약한 10월의 양중시간을 보면 약 35분 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 초고층 양중계획 시 바람에 대한 고려가 필수적이며, 작업시기에 따라 양중시간의 차이가 크게 난다는 것을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 적절한 타워크레인의 양중계획을 세울 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 연구를 검증하는데 한계가 있었다. 따라서 향후 높이별 양중시간 및 양중정지 시간 데이터를 바탕으로 충분한 검증이 필요하다.

추후 연구에서는 타워크레인 CPB(Concrete Placing Boom)와 같은 다른 장비와의 간섭에 의해 양중이 정지되는 부분과 복수대의 타워크레인의 작업 상황을 반영하는 모델을 바탕으로 양중시간 및 일별 양중횟수를 예측하여 양중계획에 반영하는 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술교통평가원의 첨단도시개발사업(과제번호 : 09첨단도시A01) 연구과제의 일부이며, 서울대학교 공학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- 고용노동부 (2012). “산업안전보건기준에 관한 규칙.” 고용노동부령 제30호
- 김경주 · 김경민 · 이상규 (2009). “다중 양중장비와 자재 야적 위치의 최적 결정을 위한 모델 개발.” 한국건설관리학회 논문집, 제10권 제6호, pp.127~134
- 김영실 · 백두권 (1995). “이산사건 모델링과 시뮬레이션.” 정보과학회지, 제13권 제4호, pp.6~19
- 김용국 · 박대식 (2004). “타워크레인 안전작업을 위한 풍속 분석 및 평가.” 한국안전학회 2004년도 춘계 학술발표회
- 김윤식 · 조재경 · 김민지 · 조규만 · 현창택 (2010). “시뮬레이션 기반의 타워크레인 설치 생산성 분석.” 한국건축시공학회 논문집, 제10권 제2호, pp.33~40
- 김정진 (2002). “초고층 건축공사의 양중계획 시스템에 관한 연구.” 명지대학교 대학원 박사학위논문
- 김진호 (2008). “양중계획입안 프로세스의 구조화를 통한 프로젝트 정보관리 방안.” 한국건축시공학회 논문집, 제8권 제3호, pp.101~109
- 김창덕 · 이덕형 · 유정식 · 유재길 · 정재훈 · 정희경 · 유정호 (2006). “기후요소에 의한 철골공사 작업불가능일 산정에 관한 연구.” 한국건설관리학회 논문집, 제7권 제4호, 한국건설관리학회, pp.137~145
- 이광렬 (2009). “초고층 건축의 양중계획 합리화 방안에 대한 연구.” 울산대학교 대학원 석사학위논문
- 이종렬 · 전용석 · 박찬식 (2004). “고층건축공사 타워크레인 양중시간 예측모델.” 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 제5회
- 이현수 · 조성준 · 박문서 · 황성주 · 김현수 (2012). “지역별 기후에 따른 고소작업가능률 산정.” 한국건설관리학회 논문집, 제13권 제3호, 한국건설관리학회, pp.67~77
- 조창연 · 조문영 · 신윤석 (2012). “이산사건 시뮬레이션을 이용한 고층건축공사의 타워크레인 양중시간 예측모델.” 대한건축학회 논문집, 제28권 제1호, pp.151~158
- 조지훈 · 조홍구 · 조홍구 (2009). “프로젝트 공사기간과 연계된

- 극 초고층 타워크레인 최적화 선정에 관한 연구.” 한국건축  
사공학회 논문집, 제9권 제6호, pp.131~139
- 하영철 (1998). “지표면 변화에 따른 바람의 연직분포 특성.” 한  
국풍공학학회지, 제2권 제2호, pp.171~178
- 홍인표 · 기현승 · 정은영 · 송두삼 (2012). “도심지 풍환경 예측  
을 위한 CFD 시뮬레이션에서 풍속 프로파일 설정의 타당성  
검토.” 대한건축학회 논문집, 제28권 제1호, pp.311~318
- Al-Hussein, M. · Niaz, M. A. · Yu, H and Kim, H. (2006).  
“Integrating 3D visualization and simulation for tower  
crane operations on construction sites.” Automation in  
Construction, 15(5), pp.554~562
- Banks, J. · Carson II, J. S. · Nelson, B. L. and Nicol, D.  
M. (2000). Discrete-event System Simulation, 3rd Ed,  
McGraw-hill, pp.12
- Dyrbye, C. and Svend Ole, H. (1997). Wind Loads on  
Structures, John Willey & Sons,
- Leung, A. W. T. and Tam, C. M. (1999). “Prediction  
of hoisting time for tower cranes for public housing  
construction in Hong Kong”, Construction  
Management and Economics, 17(3), pp.305~314
- Leung, A. W. T. · Tam, C. M. and Liu, D. K. (2001).  
“Comparative study of artificial neural networks and  
multiple regression analysis for predicting times of  
tower crane.” Building and Environment, 36(4), pp.  
457~467
- Li, H. · Chan, Neo K. Y. and Skitmore, M. (2012). “The  
use of virtual prototyping to rehearse the sequence of  
construction work involving mobile cranes.”  
Construction Innovation: Information, Process,  
Management, 12(4), pp.429~446
- Martinez, J. C. (1996). “STROBOSCOPE : State and  
Resource Based Simulation of Construction Process.”  
Ph.D. Dissertation, The Univ. of Michigan.
- Shapiro, H. I. · Shapiro, J. P. and Shapiro, L. K. (2000).  
Cranes and Derricks, 3rd Ed, McGraw-hill, pp.147
- Tam, C. M. · Leung, A. W. T. and Liu, D. K. (2002).  
“Nonlinear models for predicting hoisting times of  
tower cranes.” Journal of Computing in Civil  
Engineering, 16(1), pp.76~81
- Zhang, P. · Harris, F. C. · Olomolaiye, P. O. and Holt, G.  
D. (1999). “Location optimization for a group of tower  
crane.” Journal of Construction Engineering and  
Management, 125(2), pp.115~122

논문제출일: 2012.10.18  
논문심사일: 2012.10.26  
심사완료일: 2012.12.31

---

## 요 약

초고층 건물공사에서 타워크레인의 양중계획은 전체 공사의 성패를 좌우할 수 있는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 타워크레인의 양중계획에 있어 양중시간은 기본적인 요소 중 하나로 이를 바탕으로 양중부하 및 타워크레인을 선정하기 때문에 양중계획을 위해서는 정확한 양중시간의 예측이 필요하다고 할 수 있다. 현재 초고층 공사의 양중시간 예측은 기존의 실적자료와 시뮬레이션을 이용하여 수행하고 있지만 양중작업에 영향을 미치는 환경적인 요인에 대해서는 충분히 고려되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 양중작업에 영향을 크게 미치는 바람을 시뮬레이션에 반영하여 초고층 공사의 타워크레인 양중시간을 예측하는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션 분석 결과 바람의 영향을 반영한 양중시간은 높이가 올라갈수록 증가하였으며, 초고층부의 경우 기계적 양중시간보다 바람의 영향에 의한 양중 지연시간이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 연구 대상지인 서울의 풍속은 4월이 강하고 10월이 약하게 나타났으며, 양중시간을 예측한 결과 둘 간의 큰 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이 같은 결과는 향후 초고층 타워크레인 양중계획 시 바람이 양중에 미치는 영향을 예측하고 이를 고려하여 실제 상황과 동일한 양중계획을 세우는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**키워드** : 타워크레인, 양중시간, 초고층 건물, 시뮬레이션

---