

# 이산형 시뮬레이션을 사용한 초고층건물공사 작업원의 수직이동계획

## A Vertical Movement Plan for Labors in High-Rise Building Construction Using Discrete-Event Simulation

안 병 주\*  
Ahn, Byung-Ju

### 요 약

최근 수년 동안에 국내에서는 많은 초고층건물들이 완공되었다. 지금도 다수의 초고층건물들이 시공되고 있으며, 심지어 100층 이상 규모의 초고층건물까지도 기획 중에 있다. 이러한 초고층건물공사의 현장관리 측면에서 중요성이 강조되는 관리항목들 중 하나는 시공 과정 중에 발생하는 자원의 수직이동을 관리하는 것이다. 특히 짓고자 하는 건물의 높이가 높아질수록 작업원들이 각자의 작업층으로 이동하는데 걸리는 시간은 길어지며, 자칫하면 이것이 현장의 작업능률과 생산성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 초고층건물공사 수행 시 작업원의 수직이동을 체계적으로 관리하기 위한 한 가지 방안으로서 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원의 수직이동계획 프로세스를 제안하였으며, 계획 프로젝트인 MT 130 타워공사를 대상으로 이것의 적정성을 검토하였다.

키워드 : 이산형 시뮬레이션, 작업원의 수직이동계획, 초고층건물공사

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 수년 동안에 국내에서는 많은 초고층건물들이 완공되었다. 지금도 다수의 초고층건물들이 시공되고 있으며, 심지어 100층 이상 규모의 초고층건물까지도 기획 중에 있다[1].

이러한 초고층건물공사의 현장관리 측면에서 중요성이 강조되는 관리항목들 중 하나는 시공 과정 중에 발생하는 자원의 수직이동을 관리하는 것이다[2]. 이는 한정된 대수의 양중장비를 사용해서 대량으로 투입되는 자원을 고소의 작업장으로 수직이동 시켜야만 하는 초고층건물공사의 특수성에 기인한다.

초고층건물 시공 중에 수직이동되는 주요 자원들로는 자재류, 장비류, 작업원(인력) 등을 들 수 있다. 이중 자재류와 장비류의 수직이동은 이것들의 규격, 형상 등을 고려한 패킹 단위, 팔렛 단위 등을 개발하는 등의 노력을 기울인 결과, 지금은 대부분의 초고층건물 시공현장에서 이것들을 패키지 단위로 수직이동하고 있다[3].

이에 반하여 작업원의 수직이동에 대한 관리는 지금까지 안전관

리 측면의 대책 마련, 가설 리프트의 운행효율 향상을 위한 교육/홍보 등에 치중해 왔으며, 작업원의 수직이동을 체계적으로 관리하는 데에는 다소 소홀했다.

100층 이상규모의 초고층건물 시공을 목전에 둔 현 시점에서, 작업원의 수직이동을 체계적으로 관리할 수 있는 방안의 마련은 매우 시급하다. 왜냐하면 짓고자 하는 건물의 높이가 높아질수록 작업원들이 각자의 작업층으로 이동하는데 걸리는 시간은 길어지며, 자칫하면 이것이 현장의 작업능률과 생산성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있기 때문이다.

지금까지 완공된 수많은 초고층건물공사의 기록들에서는 대부분 작업원의 수직이동을 위한 양중장비계획 내용만을 소개하고 있을 뿐, 출역 인원별 수직이동의 소요 시간에 대해서는 언급하고 있지 않다. 작업원의 수직이동에 대한 거의 유일한 기록은 1980년대 후반에 지어진 한국무역회관(KOEX) 신축공사 사례이다. 이 기록에 따르면 가장 많은 작업원들이 출역한 '1,200명/일'의 상황에서 이들이 아침에 출근하여 각자의 작업층으로 이동하는데 130분(2시간 10분) 가량이 소요되었다고 한다[4].

그 외에 본 연구자가 국내 초고층건물공사 현장 관리자들에게 문의하여 확인한 바에 따르면, 69층 규모의 국내 한 초고층건물공사에서는 마감공사 수행기간 동안에 작업원들이 작업 개시를

\* 일반회원, 전주대 공학부 건축공학전공, 전임강사, 공학박사

위해 각자의 작업층으로 수직이동하는데 약 40분 정도가 소요된다고 한다<sup>1)</sup>. 그리고 골조공사와 일부 저층부에 대한 커튼월 공사만을 수행했던 말레이시아 페트로나스 타워 공사에서는 약 2시간 정도가 소요되었다고 한다.<sup>2)</sup>

100층이 넘는 초고층건물공사를 수행하는 동안에는 70층 미만의 건물을 시공할 때보다 작업원의 수직이동은 분명하게 더 많은 시간을 필요로 할 것이며, 이것을 어떻게 관리할 것인가는 중요한 현장 관리항목이 될 것이다.

이에 본 연구에서는 이러한 초고층건물공사 수행 시 작업원의 수직이동을 관리하기 위한 한 가지 방안으로서, 이산형 시물레이션을 사용한 작업원의 수직이동계획 프로세스를 제안하고자 한다.

1.2 연구 내용 및 방법

그림 1은 본 연구의 흐름을 보여주고 있는데, 이를 설명하면 다음과 같다. 먼저 기존 연구 고찰 및 자료 분석을 실시한 다음, 이산형 시물레이션<sup>3)</sup>을 사용한 작업원 수직이동계획 프로세스를 제안하였다.

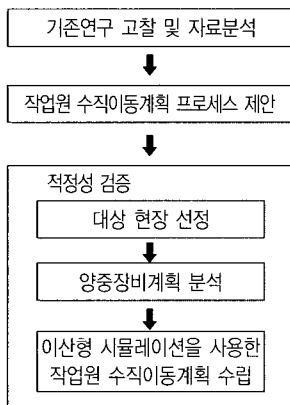


그림 1. 연구의 흐름

다음으로 이 프로세스의 적정성을 검증하였는데, 이 과정은 대상현장 선정, 대상 현장의 양중장비계획 분석, 이산형 시물레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 수립 등으로 구분된다.

1) 2003년 8월, 타워팰리스 III차 현장사무실에서 실시한 현장관리자와의 인터뷰.  
 2) 시물레이션이란 현실 문제를 반영하는 모델을 만들어 구현함으로써, 문제를 이해하고 여러 가지 대안의 결과를 예측하는 기법이다.[6],[7]. 이것은 수리적 기법을 이용하여 그 해를 구하기 어려운 문제들의 최적 조건을 찾는 데 활용되는 기법이다. 그리고 이산형 시물레이션이란 통계적으로 의미를 가지고 있는 샘플 데이터를 사용한 컴퓨터 모의실험을 의미하며 [6],[7], 이것의 모델에서는 사건(event) 발생시간이 연속적이지 않고 구분이 가능하다.

본 연구에서 선정한 대상 현장은 MT 130(Millennium Tower 130) 프로젝트의 타워이다. 이것은 '97 건설교통기술 연구개발사업인 초대형 고층건물의 건축계획, 구조, 설비 및 시공 기술개발(과제번호 : R&D/97-0002)에서 연구한 계획 프로젝트이다[5].

양중장비계획 분석에서는 MT 130 타워공사를 위한 엘리베이터(이하 EV로 표기) 계획, 가설 리프트 계획 등을 요약/정리하였다. 그리고 이산형 시물레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 수립에서는 MT 130 타워공사의 양중장비계획을 제약조건으로 해서, 제안한 프로세스를 사용하여 작업원의 수직이동계획을 세웠다.

2. 기존 연구 고찰

D. W. Halpin은 CYCLONE을 개발하고, 이것을 사용한 건설 산업 분야에서의 시물레이션 연구를 수행했다[8]. 이후 CYCLONE보다 개선된 기능을 가진 시물레이션 시스템 개발 및 활용 등에 대한 연구들이 진행되어 왔다. 이것의 예로는 INSIGHT [9], RESQUE [10], STROBOSCOPE [11], HSM [12], KMOS [13] 등이 있다.

지금껏 시물레이션 기법을 사용하여 건물의 시공단계에서 작업원의 수직이동을 연구한 사례는 없다. 본 연구와 가장 유사한 사례로서는 STROBOSCOPE을 사용하여 50층 규모의 초고층 건물의 EV 운영을 시물레이션 한 연구가 있다[14]. 그러나 이 연구의 내용은 건축공사의 시공계획 수립에 초점이 맞추어진 것이 아니며, 저자들이 개발한 STROBOSCOPE의 기능을 소개하는데 초점이 맞추어져 있다.

3. 작업원 수직이동계획 프로세스의 제안

3.1 작업원 수직이동계획 수립을 위해 이산형 시물레이션을 사용한 이유

현업에서 초고층건물공사의 작업원 수직이동과 관련해서 수행되는 업무는 작업원의 수직이동에 소요되는 시간의 계산으로 국한되고 있으며, 구체적인 수직이동계획은 수립되고 있지 않다 [2]. 표 1은 KOEX 공사와 최근 국내에서 초고층건물공사를 수행한 A사의 작업원 수직이동 시간의 계산 과정을 정리한 것이다.

KOEX 공사의 경우에는[4] 일일최대 수직이동 작업원의 수, 수직이동의 1사이클 소요 시간, 1회 수송 인원, 수직이동 회수 등을 계산하여 작업원의 수직이동 소요 시간을 개략적으로 계산했다.

A사의 경우에는 계산식을 사용하여 작업원의 수직이동 시간

을 계산했는데, 이때 연면적당 작업원 수직이동 인원수와 같은 팩터는 일본 건설기업들의 실적 데이터를 사용하고 있었다[2]. 이때 사용되는 일본 건설기업들의 실적 데이터가 국내 초고층 건물공사에 적합한가에 대해서는 검증된 바 없다. 특히 초고층 건물공사별로 사용 가능한 양중장비의 성능이 다르고, 한국과 일본의 건설 산업 간의 환경에 차이가 존재하는 상황에서 검증되지 않은 일본의 실적 데이터를 그대로 적용하여 계산한 결과는 신뢰성이 매우 낮다고 할 수 있다. 따라서 계산식을 사용하여 작업원의 수직이동 시간을 구하는 방법은 적절하지 못하다.

이에 본 연구에서는 이산형 시뮬레이션을 사용하여 작업원의 수직이동계획을 수립하는 방법을 제안하게 되었다. 이는 시뮬레이션 기법이 수리적으로 정의하기 곤란한 문제를 해결하는데 매우 유익한 방법론이기 때문이다. 그리고 이것을 사용함으로써 얻을 수 있는 결과들 중에는 구체적인 작업원 수직이동계획을 작성할 수 있다는 장점이 있다. 특히 이것은 100층 이상의 초고층 건물 마감공사에서와 같이 일일 최대 출력 인원이 큰 공사일 수록 작업원의 수직이동을 체계적/과학적으로 관리할 수 있는 프레임웍(framework)이 될 수 있다.

표 1. KOEX 공사와 A사의 작업원 수직이동 시간 계산 과정

| 구 분              | KOEX 공사 사례  | A사 사례  |
|------------------|---|--|
| 작업원의 인원 산정       | • 일일최대 수직이동 작업원의 수 : 1,000명   | • (연면적당 작업원 수직이동 인원수) × (건물의 연면적)<br>- 연면적당 작업원 수직이동 인원수는 랜드마크 타워공사 등과 같은 일본 건설기업의 실적 자료를 적용함                    |
| 수직이동 1사이클의 소요 시간 | 10분   | • $(H \times 2) / (V \times a) + (ML \times F)$<br>- H: 최고양중높이<br>- V: 양중장비의 운행 속도<br>- ML: 승하차 시간<br>- F: 정지 회수 |
| 1회 수송인원 계산       | • 총 74명<br>- step-up 리프트 : 17명/대 (2대 사용, 34명)<br>- 인승용 리프트 : 15명/대 (1대 사용)<br>- 화물용 리프트 : 25명/대 (1대 사용) | • 가설 리프트와 본설 EV의 탑승 비율을 결정<br>• 가설 리프트와 본설 EV로 구분하여 별도로 계산   |
| 수직이동 회수 계산       | • 13회<br>- (1,000명) ÷ (74명/회)   | • (양중장비별 전체 수송인원) ÷ (1회 수송인원)  |
| 수직이동 소요시간        | • 130분<br>- (10분) × (13회)   | • 총 수직이동 시간을 계산<br>• 사용 가능한 양중장비별 대수 계산<br>• (총 수직이동 시간) ÷ (사용 가능한 양중장비별 대수)                                     |

3.2 작업원 수직이동계획 프로세스의 제안

본 연구에서 제안하는 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 프로세스는 그림 2와 같으며, 이를 설명하면 다음과 같다.

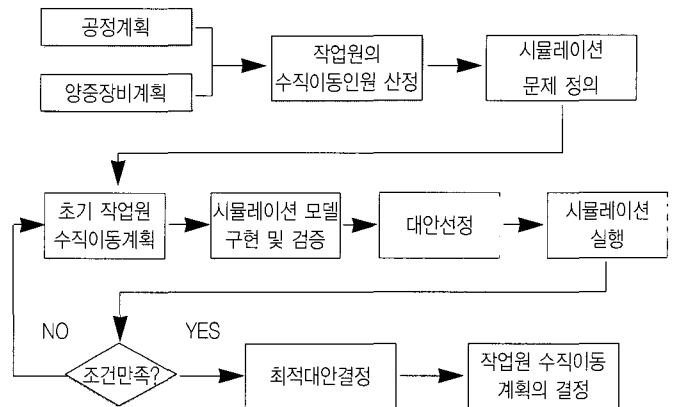


그림 2. 본 연구에서 제안하는 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 프로세스

먼저 공정계획과 양중장비계획을 참고하여 작업원의 수직이동인원을 산정한다. 다음으로 이산형 시뮬레이션 기법을 사용하여 검증하고자 하는 문제를 정의하는데, 이 문제는 수직이동하는 작업원의 수와 수직이동 하는데 소요되는 시간 등으로 표현한다.

다음으로 초기 작업원 이동계획을 작성한다. 이것의 주요 내용으로는 수직이동하는 작업원들에 대한 가설 리프트와 본설 EV의 수직이동 분담율 및 인원수, 양중장비의 정지층, 작업원의 도보 이동구간 등을 계획한다. 다음으로 이 계획을 토대로 시뮬레이션 모델을 구현한다. 본 연구에서는 범용 시뮬레이션 패키지인 Arena® V4.0의 모델링 기법을 사용하였다.

다음으로 구현한 시뮬레이션 모델의 적정성을 검토하고, 고려할 수 있는 대안을 선정한다. 이후, 대안별로 시뮬레이션을 실행하여 시뮬레이션 결과를 분석함으로써 초기 작업원 수직이동계획의 적정성을 검증한다. 그리고 이 결과를 토대로 최적 대안을 결정하고, 작업원 수직이동계획을 확정한다.

분석결과, 만약 초기 작업원 수직이동계획이 적정하지 못할 경우에는 이 계획을 수정한 후, 나머지 과정을 반복한다.

4. MT 130 타워와 양중장비계획

이 장은 본 연구의 사례현장인 MT 130 타워공사의 양중장비계획을 설명하고 있다. 이것은 이산형 시뮬레이션 실행을 위한 전제 조건들인데, 주요 내용으로는 EV의 대수/가동시기/운행층, 가설 리프트의 기중/대수/위치/ 사용계획 등이다. 그리고 이 계획은 자재의 수직이동만을 위한 것이며, 이 계획이 작업원의 수직이동에도 적합한가에 대해서는 아직 검토되지 않은 상태이다.

4.1 MT 130 타워의 설계 개요

MT 130 타워의 계획부지는 서울특별시 상암지구의 국내의 첨단 미디어 시티 중앙부에 위치하고 있다. 대지의 크기는 가로 180m, 세로 203m이고, 면적은 약 10,300여 평이다.

복합용으로 계획된 MT 130 타워는 사무실 66개 층, 호텔 22개 층, 아파트 17개 층, 쇼핑센터 6개 층 등으로 구성되어 있으며, 최상층에는 전망대가 있다. 이 타워의 연면적은 270,494m<sup>2</sup>이며, 주거공간의 최상층인 F124의 천장 높이는 지상으로부터 460m이다.

4.2 MT 130 타워공사의 양중장비계획의 개요

4.2.1 EV 계획의 개요

사무층을 운행하는 EV는 로비에서 출발하며, F47과 F48에 있는 스카이 로비층에서 EV 그룹은 두 그룹으로 나누어진다. 첫 번째 그룹은 각 구역별 EV가 11개 층씩 운행하는 4개 구역, 두 번째 그룹은 각 구역별 EV가 8개 층씩 운행하는 2개 구역 등으로 계획되어 있다.

아파트층과 호텔층은 사무층과의 동선분리를 위하여 지하 1층에서 EV가 출발한다. 최상부의 전망대와 스카이 레스토랑은 4대의 EV가, 주차장은 10대의 EV가 운행한다. 표 2는 MT 130 타워에 설치되는 EV들의 운행층, 가동시기, 설치기간, 대수 등을 정리한 것이다.

표 2. EV들의 가동 시기와 운행층

| 구분    | 운행 층수    | 가동 시점 | 대수 |
|-------|----------|-------|----|
| EV2   | F1~F11   | S+18  | 8  |
| EV2-2 | F49~F57  | S+25  | 7  |
| EV3   | F1~F25   | S+22  | 8  |
| EV3-2 | F49~F66  | S+31  | 7  |
| EV4   | F1~F36   | S+26  | 7  |
| EV5   | F1~F44   | S+28  | 7  |
| EV6   | F1~F48   | S+29  | 4  |
| EV7   | B6~F66   | S+35  | 3  |
| EV9   | B1~F71   | S+36  | 2  |
| EV10  | F70~F87  | S+36  | 4  |
| EV11  | B6~F92   | S+41  | 1  |
| EV12  | B1~F92   | S+43  | 1  |
| EV13  | B6~F94   | S+43  | 1  |
| EV14  | B1~F94   | S+43  | 3  |
| EV15  | F90~F116 | S+42  | 5  |
| EV16  | F90~F116 | S+42  | 2  |
| EV17  | B1~F120  | S+48  | 2  |
| EV18  | B6~F122  | S+49  | 2  |
| EV19  | B1~F122  | S+49  | 3  |

- \* S: 공사 착수 시점을 의미함.
- \* S+18: 공사 착수 후 18개월 된 시점을 의미함.
- \* EV: 엘리베이터를 의미함.
- \* F1: 지상 1층을 의미함.
- \* B1: 지하 1층을 의미함.

4.2.2 가설리프트 계획의 개요

(1) 가설 리프트의 기종, 대수, 위치

MT 130 타워 공사를 위해 계획된 가설리프트의 기종은 ALIMAK Super SCANDO II 32/40C이며, 설치 대수는 총 8개 이다.

가설 리프트의 설치 위치는 MT 130타워의 남측 면이다. 이곳에 8m×8m의 컴먼 타워를 설치하고, 이것의 동측 면에는 저층 구역(F1~F44)을 운행하는 가설 리프트 T1과 T2를 설치한다. 다음으로 컴먼 타워의 남측 면에 중층 구역(F45~F87)을 운행하는 가설 리프트 T3, T4, T5를 설치한다. 컴먼 타워의 서측면에는 최상층 구역(F88~F124)을 운행하는 가설 리프트 T6, T7, T8을 설치한다.

(2) 단계별 사용계획과 일일 사용계획

공사가 진행됨에 따라 본설 EV가 가동되고 가설 리프트는 해체되기 시작하는데, 본 연구에서는 이 과정을 총 11단계로 구분하였다. 이는 공정계획, 가설 리프트의 설치/해체 시점, 본설 EV의 가동 시점 등을 고려한 것이다. 표 3은 각 단계별 양중장비 사용계획을 정리한 것이다.

가설 리프트의 일일 사용계획은 크게 다섯 단계의 사용 시간 대별로 구분된다. 이를 설명하면 다음과 같다.

(가) 06:30~08:00 : 작업 개시를 위한 작업원들의 수직이동 시간대

표 3. 단계별 양중장비 사용 계획

| 구분    | 공사 기간     | 사용 가능한 양중 장비  |
|-------|-----------|---|
| 단계 1  | S+0~S+12  | 가설 리프트 사용 안 함   |
| 단계 2  | S+12~S+18 | T1, T2  |
| 단계 3  | S+18~S+20 | T1, T2, EV2   |
| 단계 4  | S+20~S+29 | T1, T2, T3, T4, T5, EV2, EV3, EV4, EV5  |
| 단계 5  | S+29~S+31 | T1, T2, T3, T4, T5, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2  |
| 단계 6  | S+31~S+32 | T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2, EV3-2   |
| 단계 7  | S+32~S+39 | T3, T4, T5, T6, T7, T8, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2, EV3-2, EV7, EV9, EV10   |
| 단계 8  | S+39~S+42 | T3, T4, T5, T6, T7, T8, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2, EV3-2, EV7, EV9, EV10, EV11                                     |
| 단계 9  | S+42~S+45 | T6, T7, T8, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2, EV3-2, EV7, EV9, EV10, EV11, EV12, EV13, EV14, EV15, EV16                   |
| 단계 10 | S+45~S+50 | T6, T7, T8, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV2-2, EV3-2, EV7, EV9, EV10, EV11, EV12, EV13, EV14, EV15, EV16, EV17, EV18, EV19 |
| 단계 11 | S+50~     | 가설 리프트 해체, 본설 EV만 사용  |

\* T: 가설리프트를 의미함.

표 4. 초기 작업원 수직이동계획

| 목적층         | 가설 리프트 정지층       |                        | 가설 리프트 사용자 (50%)               |      | 본설 EV 사용자 (50%)  |      | 인원수   |        | 비고                                  |
|-------------|------------------|------------------------|--------------------------------|------|--|------|-------|--------|-------------------------------------|
|             | 리프트              | 정지층                    | 이동 방법                          | 인원   | 이동 방법  | 인원   | 층별 총계 | 총계     |                                     |
| F95 ~ F97   | -                | -                      | -                              | -    | •EV9를 탑승 후 F70에서 하차<br>•EV10으로 환승 후 F87에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동               | 165명 | 165명  | 1,623명 | •가설 리프트 탑승은 지상층<br>•본설 EV 탑승은 지하 1층 |
| F98 ~ F99   | -                | -                      | -                              | -    | •EV11을 탑승 후 F92에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동                                       | 108명 | 108명  |        |                                     |
| F100 ~ F104 | T6,<br>T7,<br>T8 | F100,<br>F110,<br>F120 | •F100에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동 | 135명 | •EV12, EV13을 탑승 후 F92에서 하차<br>•EV15, EV16으로 환승 후 F108에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동 | 135명 | 270명  |        |                                     |
| F105 ~ F109 |                  |                        |                                | 135명 |  | 135명 | 270명  |        |                                     |
| F110 ~ F116 |                  |                        | •F110에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동 | 189명 | 189명   | 378명 |       |        |                                     |
| F117 ~ F124 |                  |                        | •F120에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동 | 216명 | •EV12, EV13을 탑승 후 F92에서 하차<br>•EV15, EV16으로 환승 후 F116에서 하차<br>•각자의 작업층으로 도보 이동 | 216명 | 432명  |        |                                     |

- (나) 08:00~12:00 : 오전 양중작업 시간대(자재 양중)
- (다) 12:00~13:00 : 점심 식사 시간대
- (라) 13:00~17:00 : 오후 양중작업 시간대(자재 양중)
- (마) 17:00~18:30 : 작업 종료 후 퇴근을 위한 작업원들의 이동 시간대

### 5. 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 수립

#### 5.1 수직이동하는 작업원의 수와 이산형 시뮬레이션의 문제 정의

수직이동하는 작업원의 수는 공정계획을 토대로 산정되는데, 본 고에서는 MT 130 타워공사의 공정계획에서 가장 많은 작업원이 출역하는 시기만을 대상으로 본 연구에서 제한하는 작업원의 수직이동계획 프로세스의 적정성을 검증하였다.

MT 130 타워공사에서 가장 많은 작업원이 출역하는 시기는 공사 착공 후 43개월째로서 총 1,623명이며, 이 때의 작업층은 F95에서 F124까지 분포되어 있다. 이 시기는 양중장비 사용단계들 중 단계 9에 해당된다(표 3 참조).

이산형 시뮬레이션을 사용하여 해결하고자 하는 문제는 '공사 착공 후 43개월 시점에서, 이용 가능한 양중장비들을 사용하여, 1,623명의 작업원들을, 1시간 30분 이내(06:30~08:00)에, F95에서 F124로 수직이동 시킬 수 있는가?' 이다. 문제정의에서 오전 6시 30분부터 8시까지의 시간대를 선택한 근거는 다음과 같다.

작업원의 수직이동이 가장 집중적으로 발생하는 시기는 오전 6시 30분부터 8시(작업 개시를 위한 작업원들의 수직이동 시간대), 12시부터 13시(점심 식사 시간대), 17시부터 18시 30분(작업 종료 후 퇴근을 위한 작업원들의 이동 시간대) 등

이다. 이 중 점심 식사 시간대에는 작업원들의 수직이동 인원 수가 상대적으로 다른 두 시간대보다 적다. 왜냐하면 MT 130 타워 중간층에 가설 식당이 설치되어 있는 관계로, 지상층으로 이동하는 작업원의 수가 상대적으로 적기 때문이다[5]. 그리고 17시부터 18시 30분까지는 주로 퇴근을 목적으로 작업원들이 지상층으로 이동하기 때문에, 이 시간대는 오전 6시 30분부터 8시까지의 시간대보다 상대적으로 여유가 있는 시기라고 할 수 있다. 이에 문제를 정의할 때 오전 6시 30분부터 8시까지의 시간대를 선택했다.

#### 5.2 초기 작업원 수직이동계획과 시뮬레이션 조건들

##### 5.2.1 초기 작업원 수직이동계획

초기 작업원 수직이동계획에서는 가설 리프트와 본설 EV의 정지층을 10층 단위로 정의했다. 그리고 가설 리프트와 본설 EV를 이용하여 수직이동 할 작업원의 비율을 각 50%로 계획한 결과, 812명의 작업원은 가설 리프트를, 811명은 본설 EV를 이용하여 수직이동 한다. 이때 가설 리프트의 탑승 위치는 지상층이고 본설 EV의 탑승 위치는 지하 1층이다. 표 4는 초기 작업원 수직이동계획을 정리한 것이다.

##### 5.2.2 양중장비들의 운행 조건과 각 층에서의 작업원들의 이동방법

표 5는 시뮬레이션 모델링을 위한 가설 리프트와 본설 EV 관련 조건들을 정리한 것이다. 이 표에는 가설 리프트와 본설 EV의 운행 층수, 운행 속도, 탑승인원, 운행 효율, 대수 등이 정리되어 있다. 그리고 작업원들이 도보로 1개 층을 이동하는데 걸리는 시간은 '0.5분/인'이며, 표 6은 작업원이 이동하게 될 층들의 높이와 각 층에서의 이동 방법을 정리한 것이다.

표 5. 가설리프트와 본설 EV의 운행 조건

| 구분   | 운행층수       | 운행 속도(m/분) | 탑승인원 | 운행효율 | 대 수  |       |
|------|------------|------------|------|------|------|-------|
| T6   | F1~F124    | 90         | 45명  | 0.8  | 1케이지 | 3 케이지 |
| T7   |            | 90         | 45명  | 0.8  | 1케이지 |       |
| T8   |            | 90         | 45명  | 0.8  | 1케이지 |       |
| EV9  | B1 ~ F71   | 180        | 25명  | 0.8  | 2대   | 19대   |
| EV10 | F70 ~ F87  | 180        | 25명  | 0.8  | 4대   |       |
| EV11 | B6 ~ F92   | 180        | 25명  | 0.8  | 1대   |       |
| EV12 | B1~ F92    | 180        | 25명  | 0.8  | 1대   |       |
| EV13 | B6 ~ F94   | 180        | 25명  | 0.8  | 1대   |       |
| EV14 | B1 ~ F94   | 180        | 25명  | 0.8  | 3대   |       |
| EV15 | F90 ~ F116 | 180        | 25명  | 0.8  | 5대   |       |
| EV16 | F90 ~ F116 | 180        | 25명  | 0.8  | 2대   |       |

표 6. 작업원이 이동하게 될 층들의 높이와 이동 방법

| 구 분    | 지상으로부터의 높이(m) | 작업원의 이동 방법  |
|--------|---------------|-------------|
| B1바닥   | -6.0          | 본설 EV에 승차   |
| F70바닥  | 295.0         | 본설 EV에서 하차  |
| F87바닥  | 346.0         | 본설 EV에서 하차  |
| F92바닥  | 361.0         | 본설 EV에서 하차  |
| F95바닥  | 370.0         | 도보 이동       |
| F96바닥  | 373.0         | 도보 이동       |
| F97바닥  | 376.0         | 도보 이동       |
| F98바닥  | 379.0         | 도보 이동       |
| F99바닥  | 382.0         | 도보 이동       |
| F100바닥 | 385.0         | 가설 리프트에서 하차 |
| F101바닥 | 388.0         | 도보 이동       |
| F102바닥 | 391.0         | 도보 이동       |
| F103바닥 | 394.0         | 도보 이동       |
| F104바닥 | 397.0         | 도보 이동       |
| F105바닥 | 400.0         | 도보 이동       |
| F106바닥 | 403.0         | 도보 이동       |
| F107바닥 | 406.0         | 도보 이동       |
| F108바닥 | 409.0         | 본설 EV에서 하차  |
| F109바닥 | 412.0         | 도보 이동       |
| F110바닥 | 415.0         | 가설 리프트에서 하차 |
| F111바닥 | 418.0         | 도보 이동       |
| F112바닥 | 421.0         | 도보 이동       |
| F113바닥 | 424.0         | 도보 이동       |
| F114바닥 | 427.0         | 도보 이동       |
| F115바닥 | 430.0         | 도보 이동       |
| F116바닥 | 433.0         | 본설 EV에서 하차  |
| F117바닥 | 436.0         | 도보 이동       |
| F118바닥 | 439.0         | 도보 이동       |
| F119바닥 | 442.0         | 도보 이동       |
| F120바닥 | 445.0         | 가설 리프트에서 하차 |
| F121바닥 | 448.0         | 도보 이동       |
| F122바닥 | 451.0         | 도보 이동       |
| F123바닥 | 454.0         | 도보 이동       |
| F124바닥 | 457.0         | 도보 이동       |

5.3 시뮬레이션 실행 및 결과 분석

5.3.1 시뮬레이션 모델의 로직 플로우

그림 3은 본 연구에서 작성한 시뮬레이션 모델의 로직 플로우이다. 이것은 Arena<sup>®</sup> V4.0에서 지원하는 아이콘들을 사용하여 초기 작업원 수직이동계획을 구현한 것이다.

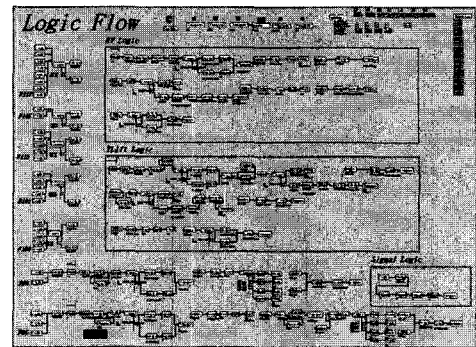


그림 3. 시뮬레이션 모델의 로직 플로우

이 플로우의 중앙에 있는 두개의 박스는 본설 EV와 가설 리프트의 운행에 대한 로직이며, 좌측은 작업원들의 인원수 생성, 이들의 본설 EV와 가설 리프트에로의 승/하차 방법, 복도와 계단을 통해서 작업원들이 각 층에서 이동하는 방법 등을 정의한 로직이다.

이 그림의 상단 중앙부에는 가설 리프트와 본설 EV의 속성들을(6개의 네모 상자 아이콘), 시뮬레이션 실행 조건(사람 모양의 아이콘) 등이 정의되어 있다. 이것들의 우측에는 표 6에서 밝힌 작업원이 이동하게 될 층들의 높이, 본설 EV와 가설 리프트의 수직이동 거리 등이 정의되어 있다. 그리고 이 플로우의 우상단에는 시뮬레이션 모델에서 사용되는 각종 변수들이 정의되어 있다.

5.3.2 시뮬레이션 모델의 검증

Arena<sup>®</sup> V4.0은 범용 시뮬레이션 패키지로서 자동 코드 생성 기능이 있기 때문에, 사용자는 아이콘을 사용하여 모델을 구현함과 동시에 자동으로 컴퓨터 모델을 생성시킬 수 있다[15]. 그리고 사용자는 Arena<sup>®</sup> V4.0에 내장되어 있는 애니메이션 기능을 사용하여 구현된 모델을 애니메이션 함으로서, 이 모델을 검증할 수 있다. 즉, 사용자는 별도로 밸리데이션(validation)<sup>3)</sup> 과 베리피케이션(verification)<sup>4)</sup>을 수행할 필요가 없다.

그림 4는 초기 작업원 수직이동계획에 대한 시뮬레이션 모델의 애니메이션 광경이다. 이것의 중앙에는 MT 130 타워가 있으며, 타워 내부의 노란색점(MT 130 타워 내부의 밝은 점)들은 이동 중인 EV를, 청색점(MT 130 타워 내부에 있으나 흑백 그림에서는 잘 보이지 않음)들은 아이들링(idling) 상태의 EV를 보여주고 있다. MT 130 타워 우측에는 3대의 가설 리프트들이 있는데,

3) 밸리데이션은 풀고자 하는 문제를 모형과 선 등으로 표현한 그래픽 모델로 구현한 다음, 이 모델이 풀고자 하는 문제를 정확하게 구현한 것인가를 검토하는 것이다[6].  
 4) 베리피케이션은 디버깅(debugging)이라고도 하는데, 그래픽 모델을 컴퓨터가 인식할 수 있는 컴퓨터 모델로 구현한 다음, 그래픽 모델이 컴퓨터 모델로 정확하게 구현되었는가를 검증하는 것이다[6].

그림 4에서 MT 130 타워 우측외부의 밝은 점들이 이것들이다. 그리고 MT 130 타워를 중심으로 좌우에 배치되어 있는 10개의 박스들은 작업원들이 가설 리프트나 EV에서 하차하는 층들의 평면도인데, 이 박스에서는 애니메이션 동안에 각 층에서의 작업원들의 이동광경이 나타난다.

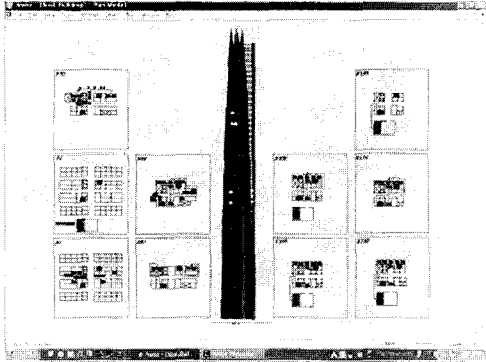


그림 4. 시뮬레이션 모델의 애니메이션 광경

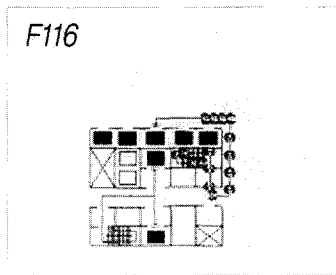


그림 5. F116에서의 작업원 이동에 대한 애니메이션 광경

그림 5는 F116에서의 작업원 이동에 대한 애니메이션 광경인데, 작업원들이 EV를 하차한 후 F116의 우측 상단부분에 있는 계단실과 복도를 통해서 이동하고 있는 모습을 보여주고 있다.

5.3.3 대안 선정

다음으로 고려할 수 있는 대안들을 선정하였는데, 대안들은 가설 리프트의 운행효율(0.6, 0.7, 0.8)과 가설 리프트 및 본설 EV의 승하차 시간(각 0.5분, 1.0분)을 서로 달리하는 것들이다. 본 연구에서 고려한 대안은 총 36가지이다.

5.3.4 시뮬레이션 실행 결과

표 7은 시뮬레이션 실행결과를 정리한 것이다. 시뮬레이션 아웃풋(output)을 분석한 결과, 작업원 1,623명을 수직이동 시키는데 소요되는 최단 시간은 85.9분(약 1시간 26분)이다(표 7 참조). 이 때 본설 EV의 운행효율은 0.8, 가설 리프트 및 본설 EV의 승/하차 시간은 각각 0.5분이 요구된다. 작업원의 수직이동 시간에 가장 많은 영향을 미치는 변수는 본설 EV의 운행 효율과 가설 리프트 및 본설 EV의 승/하차 시간이다.

그리고 본설 EV의 운행 효율이 높을수록, 본설 EV의 승하차 시간이 짧을수록 작업원의 수송 시간이 단축됨을 알 수 있었고, 가설 리프트의 운행 효율은 0.6 이상이라면 작업원의 수직이동 시간에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

표 7. 시뮬레이션 실행 결과

(단위 : 분)

| 구 분               | 가설 리프트와 본설 EV의 승하차 시간 |       | 작업원의 수직이동 소요시간 |       |       |
|-------------------|-----------------------|-------|----------------|-------|-------|
|                   | 승차시간                  | 하차시간  | 0.6            | 0.7   | 0.8   |
| 가설 리프트 운행효율 : 0.6 | 1.0 분                 | 1.0 분 | 124.2          | 110.6 | 100.4 |
|                   | 1.0 분                 | 0.5 분 | 117.2          | 103.6 | 93.4  |
|                   | 0.5 분                 | 1.0 분 | 116.7          | 103.1 | 92.9  |
|                   | 0.5 분                 | 0.5 분 | 109.7          | 96.1  | 85.9  |
| 가설 리프트 운행효율 : 0.7 | 1.0 분                 | 1.0 분 | 124.2          | 110.6 | 100.4 |
|                   | 1.0 분                 | 0.5 분 | 117.2          | 103.6 | 93.4  |
|                   | 0.5 분                 | 1.0 분 | 116.7          | 103.1 | 92.9  |
|                   | 0.5 분                 | 0.5 분 | 109.7          | 96.1  | 85.9  |
| 가설 리프트 운행효율 : 0.8 | 1.0 분                 | 1.0 분 | 124.2          | 110.6 | 100.4 |
|                   | 1.0 분                 | 0.5 분 | 117.2          | 103.6 | 93.4  |
|                   | 0.5 분                 | 1.0 분 | 116.7          | 103.1 | 92.9  |
|                   | 0.5 분                 | 0.5 분 | 109.7          | 96.1  | 85.9  |

이상과 같은 결과를 토대로 본설 EV의 운행효율은 0.8, 가설 리프트의 운행효율은 0.6 이상, 가설 리프트 및 본설 EV의 승/하차 시간은 각 0.5분이 소요된다면, 공사 착공 후 43 개월째에, 작업원 1,623명을, F95부터 F124까지, 초기 작업원 수직이동계획을 사용하여 1시간 30분 이내에 수직이동 시킬 수 있다는 결론을 내렸다. 그리고 이러한 일련의 과정을 통해서 본 연구에서 제안한 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원 수직이동계획 프로세스의 적정함을 보였다.

6. 결론

연구자들에게 있어서나, 현장 관리자들에게 있어서나 작업원의 수직이동은 지금까지 심각하게 다루어지지 않은 주제이다. 그리고 초고층건물공사를 수행하면서 작업원들의 수직이동에 소요되는 시간을 과학적으로 측정할 사례 또한 없으며, 이 시간을 대략적이거나 기록으로 남긴 사례는 KOEX 신축공사가 유일하다.

이와 같이 작업원의 수직이동이 주목받지 못한 이유는 지금까지 초고층건물공사를 수행하면서 작업원의 수직이동이 공사 진행에 중대한 악영향을 미친 사례가 발생하지 않았다는 점에 기인한다고 할 수 있다. 한편 다른 시각으로 보았을 때, 국내 건설기업들이 시공한 가장 높은 초고층건물인, 69층 이하의 공사들에서는 작업원의 수직이동이 순조로 왔기 때문에 지금까지 이것이 주목받지 못한 것으로도 볼 수 있다.

마감공사가 아닌 골조공사와 저층부의 일부 커튼월 공사만을 수행한 페트로나스 타워공사에서는 작업원의 수직이동 시간이 2시간 정도 소요되었던 것으로 알려져 있다. 골조공사보다 더 많은 작업원이 투입되고 가설 리프트가 해체되어 더 소규모의 적재 중량을 가진 본설 엘리베이터만을 사용해야만 하는, 페트로나스 타워의 마감공사를 국내 건설기업이 수행했다면 작업원의 수직이동은 최소한 2시간 이상이 소요되었을 것이다. 이러한

상황에서는 작업원의 수직이동을 과학적/체계적으로 관리하는 것이 절실히 요구된다. 왜냐하면 이것은 작업원의 수면 및 기상 시간 등과 밀접한 관련이 있으며, 궁극적으로 이것이 공사의 생산성에 지대한 영향을 미치기 때문이다.

본 연구는 100층 이상규모의 초고층건물을 기획하고 있는 현실을 고려했을 때 시의성이 있으며, 작업원 수직이동에 대한 다양한 연구들이 앞으로 수행되어야 함을 시사하고 있다. 대표적인 향후 연구 과제는 다음과 같다.

- (1) 시뮬레이션 모델 구현을 위한 로우 데이터(작업원의 도보 이동 시간, 가설 리프트와 EV의 출입문 개폐 시간 및 작업원의 승하차 시간 등)를 초고층건물공사 현장에서 측정하고 분석함으로써 이것들을 정량화하는 연구
- (2) 이산형 시뮬레이션을 사용한 작업원의 수직이동계획 프로세스를 다양한 현장들(초고층 주상복합건물, 사무용, 주거용, 상업용, 숙박용 등의 시공 현장 등)에 적용하여 이것을 일반화하기 위한 연구
- (3) 짓고자 하는 건물의 규모에 따라 작업원 수직이동이 미치는 영향력을 분석함으로써, 건물의 규모와 작업원의 수직이동 간의 상관관계를 규명하는 연구

### 참고 문헌

1. 신성우 (2002), "세계적인 한국적 초고층 건축을 세워야 할 때다," 건축, 대한건축학회지, 제46권 제8호, pp. 57~59.
2. 안병주, "초고층건물공사 마감자재의 수직·수평이동계획이 통합된 의사결정모델," 박사학위논문, 한양대학교 대학원, 2001.
3. "마감공사의 TACT 공정계획 수립을 위한 생산성 조사 / 분석," 한양대학교, 2002.
4. "한국무역회관 공사보고서," 극동건설(주), 1988.
5. "초대형 고층 건물의 건축계획, 구조, 설비 및 시공기술 개발" 과제 중 "초대형 고층건물공사 현장 지원 시스템 개발

에 관한 연구 보고서", 건설교통부, 1999.

6. Averill M. Law and W. David Kelton, "Simulation Modeling & Analysis 2nd Ed.," Mc-Graw-Hill International Ed., 1991.
7. 김재련, "컴퓨터 시뮬레이션 개정판," 박영사, 1995.
8. D. W. Halpin, "An investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations," Ph. D. thesis, The Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, IL, 1973.
9. Paulson, B. C. Jr. (1978), "Interactive graphics for simulation construction operations," J. Constr. Div., ASCE, Vol. 104, No. 1, pp. 69~76.
10. Chang, D., "RESQUE," Ph. D. thesis, The Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1987.
11. Julio C. Martinez, "STROBOSCOPE State and Resource Based Simulation of Construction Processes," Ph. D. thesis, the Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1996.
12. Sawhney, A., and AbouRizk, S. M. (1995), "Simulation based planning method for construction project," Journal of C.E.M., ASCE, Vol. 121, No. 3, pp. 297~303.
13. K.J. Kim and G. Edward Gibson Jr. (2003), "Interactive simulation modeling for heavy construction operations," Automation in Construction, December, ELSEVIER, pp. 97~109.
14. Photios G. Ioannou and Julio C. Martinez, (1996), "Scalable simulation models for construction operations," Proceedings of the 28th conference on winter simulation conference, Coronado, CA., pp. 1329~1336.
15. W. David Kelton, Randall P. Sadowski, and Deborah A. Sadowski, "Simulation with Arena," Mc-Graw-Hill International Ed., 1998.

### Abstract

Recently, many high-rise buildings have been constructed, and are under construction. And a high-rise building with more than 100 floors is under planning. From site logistics management point of view, it is very important to manage vertical transportation of resource (e.g., material, equipment, and construction labors) in high-rise building construction. The higher the building is constructed, the more important it is to manage for vertical transportation of it. In case of labors, vertical movement needs longer time in high-rise building construction than in low-rise. This results in low productivity and work efficiency of the construction. Therefore, this study presents a process of a vertical movement plan for labors using discrete-event simulation. And then the process applies to MT 130 project, which is a virtual high-rise building construction project.

**Keywords** : Discrete-event simulation, A vertical movement plan for labors, High-rise building construction