

초고층 건축공사의 리프트 수직 환승운영 최적화 방안 연구

문주용¹ · 박문서* · 이현수¹ · 정민혁¹

¹서울대학교 건축학과

Study on Optimization for Construction Vertical Lifting with Transfer Operation for Super High-rise Buildings

Moon, Jooyong¹, Park, Moonseo*, Lee, Hyunsoo¹, Jung, Minhyuk¹

¹Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract : Recently, the number of super high-rise building projects have been increased after recovering from international financial crisis. In super high-rise building project, vertical lifting is critical to overall project productivity, due to its limited lifting equipments. Also for projects which buildings' height are higher than 400m, transfer operation in lifting is inevitable because of lifts' maximum lifting height. In transfer operation, setting a transfer floor is essential for saving lifting time of resources. In this research, using discrete event simulation modeling with AnyLogic 7.0 software and metaheuristic optimization with OptQuest software, the method of optimizing a transfer floor for workers during the morning peak time is proposed. Comparing to the result of the case which transfer floor is designated to the middle floor, setting optimized transfer floor significantly decrease the total lifting time of workers. By using proposed simulation and optimization tool, saving budget and time through increasing available working hour is expected.

Keywords : Construction Lift, Transfer Operation, Efficiency, Super High-rise Buildings, Transfer Floor, Optimization, Simulation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 국내외에서 다수의 초고층 건물 프로젝트가 진행되고 있다. CTBUH(Council on Tall Buildings and Urban Habitat)에 따르면 2013년 한 해동안 전 세계에서 높이 200m가 넘는 초고층 빌딩이 73개가 완공되었으며, 그 수는 지속적으로 증가하는 추세이다(CTBUH 2014).

이러한 초고층 빌딩 공사는 중저층 건물에 비해 공사에 소요되는 자원들의 수직이동거리가 길어지는 특징을 갖고 있다. 다수의 인원과 대량의 자재를 한정된 양중장비로 고층부의 작업장에 이동시켜야 하기 때문에 공정관리에서 양중계획은 매우 중요하다(안병주 2004).

기존 리프트 양중 관련 연구는 주로 전층운행방식에 대한 연구가 진행되었다(정용찬 2004, 김선국 2006, 신윤석 2010,

한충희 2012). 그러나 초고층 현장의 경우 리프트 최대 운행구간의 제한으로 인해 중저층 현장과 같이 리프트를 전층운행방식으로만 운행할 수 없다. 실제 현장에서는 리프트의 최대 운행구간을 증가시키려는 노력이 지속되고 있다. 하지만 그러한 노력에도 불구하고 늘어난 수직이동구간으로 인해 잦은 전원 케이블 손상 및 전압 강하 등의 요인이 빈번히 발생하여 공기에 많은 영향을 주고 있다. 실제로 두바이에서 진행된 버즈 칼리파 공사에서는 최대 운행구간 400m의 리프트를 사용하였으나, 전원 케이블의 잦은 손상으로 인해 많은 공기 지연을 가져왔다(조훈희 2010).

국내 제조 리프트의 최대 운행높이가 400m인 것을 감안하면¹⁾, 100층 이상의 초고층 건축공사에서 환승 운영방식 리프트 양중은 필수적이다. 환승 운영방식 리프트 양중을 통해서 개별 리프트의 운행 구간 길이를 줄이고 운영 효율을 증대시킬 수 있다.

환승운영방식 리프트 양중에서 최적의 양중 수행을 위한 환승층 지정은 양중계획 수립 단계에서 반드시 필요하다. 하지만 환승운영방식 리프트 양중 사례가 많지 않고 개별 현장

* Corresponding author: Park, Moonseo, Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
E-mail: mspark@snu.ac.kr

Received July 9, 2014; revised September 29, 2014

accepted October 29, 2014

1) 출처 : LiftTec Webpage(<http://www.liftec.co.kr>)

마다 수직 양증해야 할 자원의 양이 다른 상황에서 개별 현장에 맞는 최적 환승층 설정에는 어려움이 있다. 건설 현장의 리프트와 유사점이 많은 건물 승강기 계획에서는 최적의 변수들을 분석하기 위해 시뮬레이션 기법을 통한 연구가 다수 이뤄지고 있다(loanou and Martinez 2006). 따라서 여러 변수들을 포함하고 있는 환승 운영방식 리프트 양증에서도 환승층의 최적화를 위한 시뮬레이션 기법 사용이 좋은 대안이 될 수 있다.

본 연구는 초고층 건축공사에서 작업원에 대한 환승운영방식 리프트 양증 시뮬레이션 모델을 구축하고 환승층 설정 최적화를 목적으로 한다. 이를 통해 시뮬레이션 구동 및 최적해 탐색을 통해 층별 최적 환승층 및 환승층 변화에 따른 작업원 평균이동시간 변화추이를 도출하고자 한다. 본 연구의 결과는 초고층 건축공사에서 환승운영방식 리프트 양증계획 수립 시 환승층 선정 등의 의사결정을 위한 자료로서 활용될 수 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 리프트 1대의 최대 수직이동거리를 감안하여 환승이 필수적인 100층 이상, 200층 미만의 초고층 건축물을 대상으로 연구를 한정하였다. 수직 이동이 필요한 자원 중 작업원만을 대상으로 연구를 진행하였으며, 작업원 양증 부하가 가장 많이 집중되는 출근시간대의 양증 작업만을 대상으로 하였다. 아울러 본설 엘리베이터에 대한 고려 및 작업원의 수평이동은 포함하지 않았다. 운영시기의 경우 작업원 투입이 가장 많은 마감 공사 기간으로 한정하였다.

환승운영방식 리프트 양증을 모델화하기 위해 이산사건 시뮬레이션 방법을 사용하였으며, 환승층 최적화에는 분산탐색 방식의 메타휴리스틱 방법론을 활용하였다.

2. 예비적 고찰

2.1 리프트 운영방식의 종류와 특성

Fig. 1은 세 가지 리프트 운영방식을 나타낸 개념도이다. 일반적으로 리프트 운영방식에는 전층운영방식, 조닝(Zoning) 운영방식, 환승 운영방식 총 세 가지로 구분할 수 있다. 전층 운영방식에서는 개별 리프트들이 1층에서 모든 층으로 운행하며 일반적인 건축공사에서 사용되는 방식이다. 조닝 운영방식은 수직 공간을 일정 단위로 분할하여 개별 리프트가 1층에서부터 각 구간으로만 운행하게 하는 방식이다. 환승운영방식은 개별 리프트의 수직 운행구간을 별도로 지정하여, 1층부터 환승층까지만 운행하는 리프트와 환승층부터 다음 환승층 또는 최상층까지 운행하는 방식이다.

2.2. 리프트 운영방식 별 선행연구

Table 1은 건설용 리프트 양증 관련 선행연구들에 관한 내용이다. 전층 운영방식에서는 리프트의 기종 및 적정 대수,

설치 기간 등에 관한 연구가 주로 이뤄졌다. 정용찬(2004)은 인과관계분석방법을 사용하여 리프트 양증계획 프로세스 및 물량분석체계를 제안하였다. 김선국(2006)은 비용 및 평균가동률 분석을 이용한 리프트 대수산정 절차를 제시하였다. 신윤석(2010)은 리프트의 대수, 기종 선정에 관한 적정성 평가를 위해 시뮬레이션을 사용한 시스템을 제시하였다. 한충희(2012)는 양증이 필요한 자원들의 수량을 리프트 양증부하로 변환하는 방식을 제시하고, 변환된 양증부하를 기반으로 구성된 양증부하 예측 모형을 통해 양증부하 및 양증사이클타임 산정 방안을 제안하였다. 조창연(2013)은 다수의 리프트 운영 시 총 소요시간을 산정하기 위해 B&B 알고리즘(Branch and Bound Algorithm)을 활용한 최적 알고리즘을 제시하였으며, 이를 통해 리프트들의 최적 운영 방안을 제안하였다.

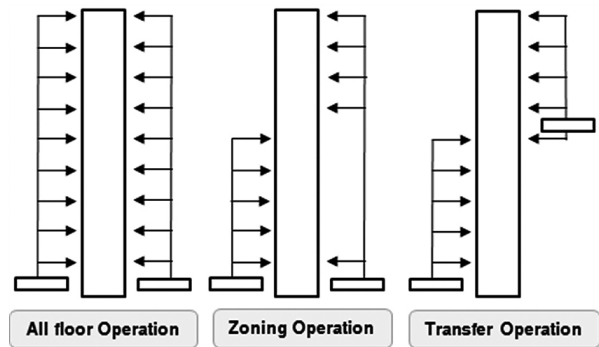


Fig. 1. Three Operation Types of Construction Lift System

조닝 운영방식의 경우 박문서(2011)는 작업원 양증부하가 최대대로 발생하는 출근시간의 양증 프로세스 분석을 바탕으로 작업조(Crew) 및 수직 공간분할 최적화를 통해 작업원 양증 운영 최적화 모델을 제안하였다. 하지만 공통적으로 위의 선행 연구들에서는 환승 운영방식은 반영되지 않았다.

Table 1. Researches on Construction Hoist Lifting

Authors	Points of Research	Contents
Cho, et al (2013)	Optimal Algorithm of the Multi-lifting operation Simulation	Suggestion of quantitative and systematic methods of lifting using an optimal algorithm with B&B algorithm
Kim/ et al. (2008)	Assesing the no. of lifts	Peak time load, Assesing optimum no. of lifts considering workers on sites
Park, et al (2011)	Genetic Algorithm, Discrete Event Simulation	Suggesting optimization model for workers lifting operation through zoning vertical section at peak time
Shin, (2010)	Lift Selecting System	Suggestion of analyzing system for determining no. of lifts, types and propriety through simulation
Jung, et al (2004)	Causal Relationship Analysis	Suggestion of lift planning process and quantity calculation process through causal relationship analysis
Han, et al (2012)	Model of Assising Lifting Load	Suggestion of lifting load assessment and process of lift planning process
Hwang (2009)	Survey and Expert Interview	Study on factors for researching decision making of lift planning for building construction

2.3. 이산사건 시뮬레이션

이산사건 시뮬레이션이란 시간상 구분이 가능한 지점에서 시스템 상태의 변화를 관찰하는 방식으로 시스템을 모델화하는 것으로, 동태적이고 이산적인 모델을 대상으로 한다(김선민 2002). 건설산업 분야에서는 ‘Cyclone’(Halpin, 1973), ‘Stroboscope’(Martinez 1996) 등 여러 프로그램들을 이용하여 이산사건 시뮬레이션을 통한 연구를 수행하였다.

본 연구의 대상인 작업원의 양층과 리프트의 운행은 리프트 내 탑승하고 있는 작업원들의 목적층 구성에 따라 리프트의 운행 구간이 달라지므로, 동태적이고 이산적인 모델이라고 할 수 있으며, 따라서 이산사건 시뮬레이션을 이용하여 효과적으로 분석할 수 있다.

2.4. 최적해 탐색을 통한 최적화 분석

시뮬레이션은 시스템 상태의 변화를 관찰하기 위한 좋은 도구이지만, 그 역할은 주어진 변수에 대한 평가에 그치게 된다. 따라서 최적의 변수를 찾아내는 것은 사람이 변수를 입력하여 시뮬레이션의 결과값을 보고 판단한 뒤 다시 변수를 변경하는 반복적인 과정을 통해 이뤄지게 된다.

본 연구에서는 최적화 방법론으로 분산탐색 기법을 사용하였다. 분산 탐색이란 조합 최적화 문제나 정수계획문제, 연속 변수에 대한 최적화 문제 등에 적용할 수 있는 기법으로서(Ebrahim 2009), 본 연구에서 최적화하고자 하는 환승층 변수도 정수이므로 분산탐색 방법론을 최적화 방법으로 선택하였다.

3. 환승운영방식 리프트 양층 시뮬레이션

환승운영방식 리프트 양층을 분석하기 위해서는 먼저 개별 리프트의 운행 나타내는 모델 구축이 필요하다. 이를 바탕으로 저층부와 고층부에 투입되는 리프트의 대수만큼 리프트 모델을 구성하여 건물 전체의 리프트 양층을 나타내는 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

리프트 시뮬레이션 모델은 The AnyLogic Company에서 제작한 AnyLogic 7.0 프로그램의 이산사건 시뮬레이션을 이용하여 구축되었다. AnyLogic 7.0 프로그램은 이산사건 시뮬레이션 모델을 구축할 수 있는 프로그램으로, 여러 이산사건 시뮬레이션 연구가 해당 프로그램을 이용하여 이뤄졌다(Chan 2010, Banerjee 2011).

3.1. 단일 리프트 모델 구축

단일 리프트 모델은 리프트 1대의 운행을 묘사한다. 여러 리프트가 사용되는 환승운영방식 리프트 시뮬레이션 모델에서는 단일 리프트 모델이 설정된 리프트 대수만큼 복제되어 사용된다. 즉, 현장에서 사용되는 총 리프트 대수가 10대일 경우 단일 리프트 모델이 10개로 복제되어 전체 시뮬레이션

모델 분석에 사용된다.

단일 리프트 모델 제작은 리프트 운행 프로세스 분석, 리프트 운행 양층시간 산정 알고리즘 반영, 모듈 구동 프로세스 구축으로 나누어 진행하였다.

3.1.1. 리프트 운행 프로세스

Fig. 2는 리프트 운행과 작업자 이동의 프로세스를 나타낸 개념도이다. 출근 시간대(피크타임)의 리프트 운행 프로세스는 작업원 이동 프로세스와 별도로 고려되어야 한다. 리프트의 경우는 하층부, 상층부 리프트 모두 탑승한 작업원들의 목적층에 이동시켜주는 프로세스이지만, 작업원의 경우 환승이 필요한 작업원과 환승이 필요하지 않은 작업원으로 프로세스가 나뉘게 된다.

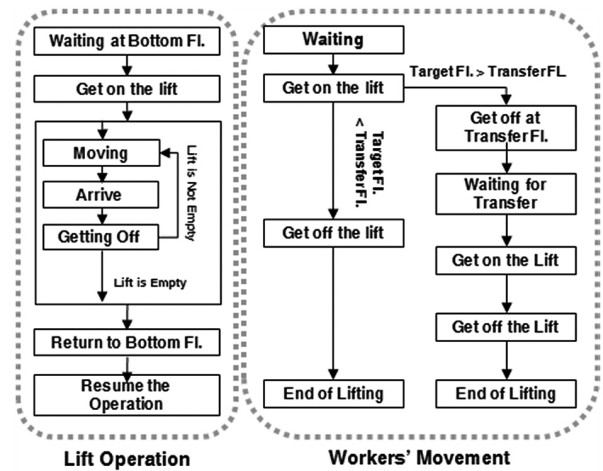


Fig. 2. Process of Lift Operation and Workers' Movement

3.1.2 리프트 운행 양층시간 산정 알고리즘

시뮬레이션 모델에서는 리프트가 각 목적층을 이동할 때마다 소요되는 이동시간을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 층별 리프트 운행 양층시간 산정을 위해 조창현(2011)이 제시한 리프트 가속, 감속 능력이 고려된 양층시간 산정 알고리즘을 적용하였다.

리프트의 운행시간(T_L)은 다음과 같이 정의된다.

$$T_L = T_m + L_t$$

T_m 은 리프트의 이동소요시간, L_t 는 리프트에 작업원이 상, 하차하는 시간이다. T_m 은 안전운행속도로 이동하는 시간(T_p)과 가속시간(S_1), 감속시간(S_2)의 합으로 구해진다.

$$T_m = T_p + S_1 + S_2$$

T_p 는 가속 시 가속거리를 제외한 나머지를 통과하는 시간(T_{v1})과 감속 시 감속거리를 제외한 나머지를 통과하는 시간(T_{v2}), 그리고 나머지 거리를 운행하는 시간의 합으로 계산할 수 있다.

$$T_p = T_v + S_{v1} + S_{m-1}$$

$$T_v = \frac{\sum_{i=2}^{n-2} H_i}{V}, T_{v1} = \frac{H_1 - h_1}{V}, T_{m-1} = \frac{H_{n-1} - h_2}{V}$$

(H = 기준층 층고, h1 = 운행속도 도달 소요거리, h2 = 정지속도 도달 소요거리, V = 리프트 안전운행 속도)

작업원 상하차 시간(L_i)은 리프트의 출입문을 여는 시간(D_v)과 닫는시간(D_c) 작업원의 승, 하차 시간(M_L)의 합이다.

$$L_i = (D_v + D_c + M_L) \times 2$$

3.1.3 모듈 구동 프로세스

본 연구에서는 ‘각 개체별 속성 식별’, ‘개체별 상태변수’, ‘상태 변수들이 변화하는 사건’을 거쳐 개별 리프트 양중에 대한 이산사건 시뮬레이션 모듈을 구축하였다. 각각의 세부내용은 아래와 같다.

(1) 각 개체별 속성 및 상태변수

본 시뮬레이션 모델에서 묘사하는 개체는 리프트와 작업원이며, 각 개체별 속성 및 상태변수는 Table 2와 같다.

(2) 상태 변수 변화 사건 및 사건 별 상태변수 변환

시뮬레이션 모델 내 작업원 개체가 이동을 하면서 사건들이 발생하며, 각 사건이 발생할 때 개체별로 상태변수가 변화한다. Fig. 3은 개별 리프트 모델에서의 사건별 상태변수 변화를 각 시뮬레이션 부분 별로 나누어 나타낸 개념도이다. 사건 별 세부내용은 다음과 같다.

가. 탑승을 위해 작업원이 리프트 앞에 도착

- 작업원 도착시간 기록

나. 작업원 탑승

- 탑승 인원 기록
- 탑승 인원에 따른 탑승시간 계산
- 작업원 대기시간 계산

- 모두 탑승 후 대기 인원이 없으면 ‘(다) 목적층 파악’ 사건 발생, ‘작업원 탑승’ 종료 및 대기
- 리프트 탑승인원이 만원일 경우 ‘(다) 목적층 파악’ 사건 발생, ‘작업원 탑승’ 종료 및 대기

Table 2. Variables and Parameters of Entities

Entity	Parameter	Variable	
Lift	· Normal operation speed of lift	· Current Floor	
	· Acceleration Time	· Moving Direction	
	· Deceleration Time	· Target Floor	
	· Distance to reach operation speed	· Moving Time	
	· Distance to reach stop	· Number of workers in Lift	
	· Maximum capacity	· Time of Getting on	
	· Floor height of standard Floor	· Time of Getting off	
	· Door opening time	· Number of Workers Getting off Each Floor	
	· Door closing time	· Time of Returning to Bottom Floor	
	· Bottom Floor of Operation Section		
	· Top Floor of Operation Section		
	Worker		· Current Floor of Worker
			· Initial time of arrival
· Target Floor		· Waiting Time	
		· Moving Time	
		· Lift Waiting Order	

다. 목적층 파악

- 작업원들의 목적층을 낮은 층부터 파악 및 기록

라. 운행 시작

- 리프트 운행시간 기록
- 목적층까지의 운행시간 계산 및 적용

마. 목적층 도착 및 작업원 하차

- 하차인원에 따른 하차시간 적용
- 하차인원 발생 시 리프트 내 현재 탑승인원 차감
- 하차인원 개별로 이동시간 기록
- 리프트의 현재 층수 변경
- 리프트 내 현재 탑승인원이 없을 경우 ‘(바) 복귀 운행’

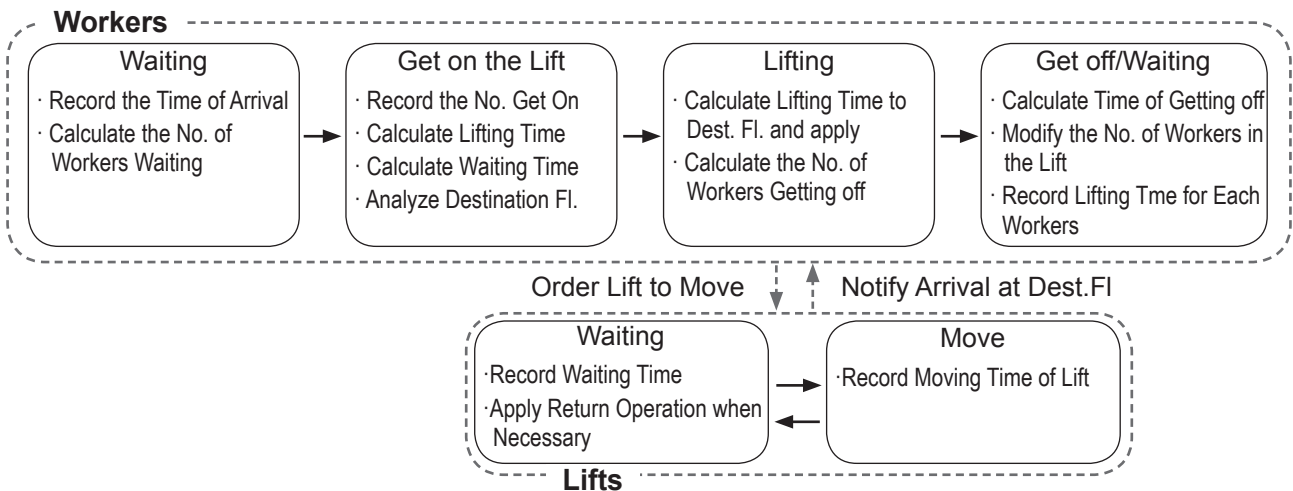


Fig. 3. Lift Module Simulation Model

사건 발생, 아닐 경우 ‘(라) 운행 시작’ 다시 발생

바. 복귀 운행

- 리프트의 운행방향 아래로 변경
- 리프트 현재 층과 운행구간 최하층을 파악하여 복귀운행시간 계산 및 적용
- 복귀운행 완료 시 ‘(나) 작업원 탑승’ 사건 발생

3.2. 환승운영방식 시뮬레이션 모델

앞에서 구축된 개별 리프트 모델을 바탕으로 환승운영방식 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 작업자의 실제 리프트 양중과정을 모델링하기 위해 시뮬레이션 모델에서 설정한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 출근시간대 작업자는 전원이 동시에 도착하여 양중 대기 상태로 시작한다.
- (2) 작업원들의 리프트 탑승 시 리프트의 선택은 동일한 확률로 랜덤하게 선택한다.
- (3) 층별 작업원수는 각각 동일한 인원수가 되도록 한다.
- (4) 작업원들의 탑승 시간은 모두 동일하다고 가정한다.
- (5) 리프트의 첫 번째 운행에서는 최대 탑승인원에 도달하였을 때 운행하도록 한다. 최초 운행 이후에는 리프트가 도착하였을 때 대기하고 있는 인원수만 탑승한 뒤 바로 운행을 시작한다.
- (6) 리프트 운행에 예상치 못한 지연이나 정차 오류 등이 없이 일반적으로 진행되는 것을 가정한다.
- (7) 출근 시간대이므로 작업원의 양중은 1층에서 상부 방향으로만 하는 것으로 가정한다.
- (8) 본설 엘리베이터 운영은 모델에서 제외하였다.
- (9) 리프트의 기종은 단일 기종으로 가정한다.

Fig. 4는 환승운영방식 리프트 시뮬레이션 모델의 개념도이다. 모델에서 각 부분 별 발생사건 및 사건에 대한 세부사항은 아래와 같다.

(1) 작업원 발생 / 목적층 지정

- 작업원 발생
- 작업원 별 목적층 층별로 동일하게 분배

(2) 저층부 리프트 선택

- 저층부 리프트 중 랜덤으로 1대 선택

(3) 저층부 리프트 모듈

- 개별 리프트 모듈 내에서 리프트 탑승 시뮬레이션 실행

(4) 환승여부 파악

- 작업원이 환승을 하는지 여부를 파악 후 환승을 할 경우 환승 리프트로 작업원을 보냄
- 환승하지 않는 작업원의 경우 총 양중에 소요된 시간 계산 및 기록

(5) 상층부 리프트 선택

- 상층부 리프트 중 랜덤으로 1대 선택

(6) 상층부 리프트 모듈

- 개별 리프트 모듈 내에서 리프트 탑승 시뮬레이션 실행

(7) 상층부 이동 작업자 작업 완료

- 작업원의 총 양중에 소요된 시간 계산 및 기록

4. 최적화 및 모의사레 실험

앞서 구축된 시뮬레이션 모델을 바탕으로 본 연구에서는 환승층 최적화 분석이 가능한 모델을 구축하였고, 이를 바탕으로 모의 사례에 대한 환승층 최적화 실험을 수행하였다. 또한 환승층의 위치 변화에 따른 소요이동시간 변화 추이에 대한 분석도 모의 사례를 이용하여 수행하였다.

4.1. 최적화 분석 모델

본 연구에서는 최적화의 목적으로 작업원들의 평균 이동소요시간 최소화를 설정하였다. 작업원의 수직 이동시간이 줄어들수록 작업층에서의 작업 가능시간이 증가하게 되며, 이는 비용 절감 및 작업 가능시간 향상을 통한 공기 단축도

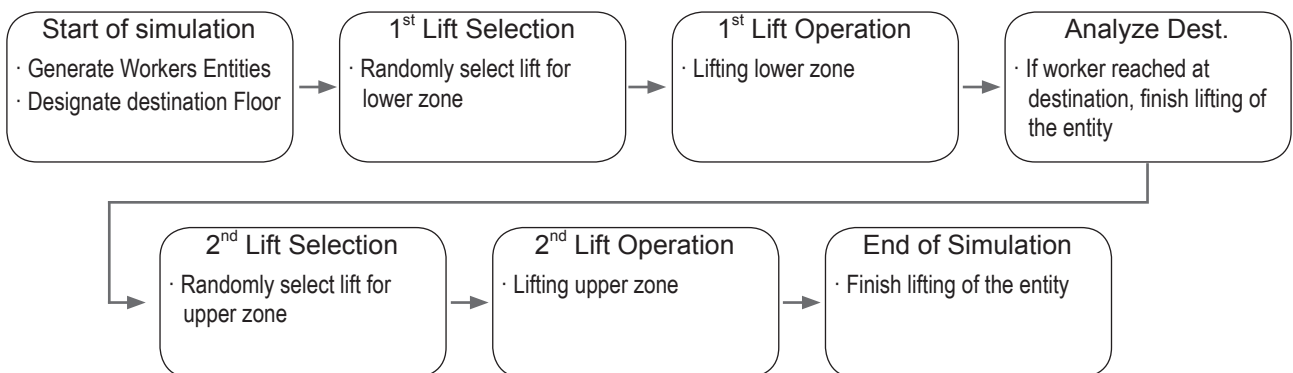


Fig. 4. Lifting Simulation Model with Transfer Operation

기대할 수 있기 때문이다. 따라서 본 최적화 모델에서는 최적의 환승층 위치를 작업원들의 평균 이동시간, 또는 총 이동시간을 최소화할 수 있는 위치로 정의하였다.

작업원의 이동시간(T_{wt}) 및 전체 작업원 총 이동소요시간(T_{Hwt}), 평균 이동소요시간(T_{Awt})은 다음과 같이 정의된다.

$$T_{wt} = T_{w1} + L_{i1} + T_{L1} + L_{i2} + T_{w2} + L_{i3} + T_{L2} + L_{i4}$$

$$T_{Hwt} = \sum_{i=1}^n T_{wt} \quad T_{Awt} = \frac{T_{Hwt}}{n}$$

- T_{w1} : 1층에서의 리프트 탑승 전 대기시간
- L_{i1} : 저층부 리프트 탑승시간
- T_{L1} : 저층부 리프트 운행시간
- L_{i2} : 저층부/환승층에서의 하차시간
- T_{w2} : 환승층에서의 대기시간
- L_{i3} : 환승층에서의 리프트 탑승시간
- T_{L2} : 상층부 리프트 운행시간
- L_{i4} : 상층부에서의 하차시간
- n : 총 작업원 수

본 연구에서의 최적화 분석은 메타 휴리스틱 알고리즘을 사용하는 OptTek System 사의 OptQuest를 사용하였다. OptQuest는 타부 탐색(Tabu Search), 신경망 분석(Neural Networks), Scatter Search의 3가지 방법이 조합된 메타 휴리스틱(Metaheuristic) 방식으로 구동된다(Rogers, 2002). OptQuest를 사용하여 최적해를 찾는 연구는 다수가 있으며 이들 연구에서는 최적해를 찾는 신뢰성과 효율성 측면에서 OptQuest를 활용할 수 있다고 제시하였다(Laguna 1997, Rogers 2002, Jie 2008). OptQuest는 AnyLogic 7.0 프로그램과 연계되어, AnyLogic에서 제작한 이산사건 시뮬레이션 모델과 연동되어 최적화를 수행하게 된다.

Fig. 5는 최적화 분석 프로세스를 나타낸 것이며, 각 프로세스별 세부 내용은 다음과 같다.

- (1) 최고 층수 입력
- (2) 최적화 대상인 환승층 변수 설정
 - 환승층 가능 범위를 최저 가능층과 최고 가능층으로 각각 입력한다. 본 최적화 분석에서는 최저가능층을 1층으로, 최고 가능층을 최고층수로 입력하였다.
 - 최적해 단위를 설정한다. 본 최적화 분석에서는 최적화 대상인 환승층이 자연수이므로 1씩 변화하는 것으로 설정한다.
 - 최적화 작업의 속도 향상을 위해 예상 최적해를 입력한다. 예상 최적해를 입력할 경우 최적화 분석 시 제안된 최적해의 주변 범위를 우선적으로 분석하여 작업의 속도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 최고 층수의 1/2 지점을 예상 최적해로 입력하였다(100층일 경우 50층으로 입력).
- (3) 최적화 목적 설정

- 본 최적화 분석에서의 최적화 목적인 작업원 총 이동소요시간 최소화를 설정한다.
- (4) 최적해 탐색 반복횟수 설정
 - 최적해를 찾는데 많은 연산이 소요될 경우를 대비하여 최대 최적해 탐색 반복횟수를 지정한다. 본 연구에서는 1,000회로 지정하였다.
- (5) 최적해 탐색 실행
- (6) 최적해 분석 결과 확인

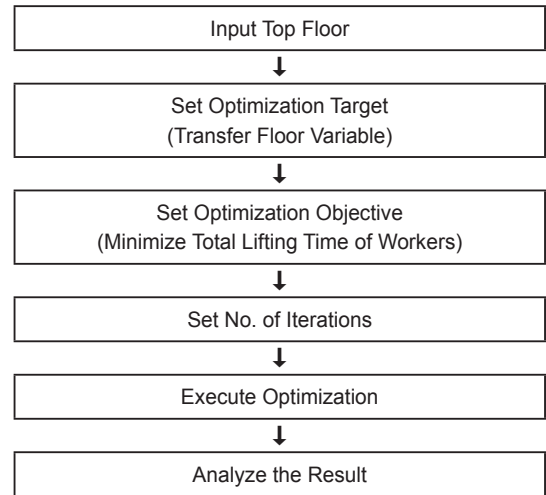


Fig. 5. Process of Optimization Analysis

4.2. 모의사례 적용 환승층 최적화 실험

본 연구에서는 가상의 현장 상황을 설정하여 시뮬레이션 모델에 대한 최적화를 수행하였다. 설정한 현장 개요는 표 3과 같다. 표 4는 리프트의 기종 별 평균적인 가속속 데이터를 나타낸 것이다(조창연 2011).

Table 3. Details of Experimental Case Project

Parameter	Value
Top Floor	From 100 to 200, Each 10 floors
Lift Type	Mid Speed (Details are in Table 4)
No. of Workers	1,000
No. of Lifts	3 in Lower Fl., 2 in Upper Fl.
Time of Workers Getting On/Off	0.5sec/person
Time of Opening Door	5 Sec
Time of Closing Door	1 Sec
Standard Floor Height	4m
Max. Capacity of Lift	20 People

Table 4. Average Acceleration and Deceleration of Various Lift Types (Cho, C. 2011)

Type	Normal Operation Speed (m/sec)	Acceleration Time (Sec)	Deceleration Time (Sec)	Acceleration (m/sec ²)	Distance to Reach Normal Speed (m)	Deceleration (m/sec ²)	Distance to Reach Stop (m)
High	1.67	2.80	2.90	0.60	2.33	0.57	2.42
Mid	1.00	5.00	2.90	0.20	2.50	0.34	1.45
Low	0.63	1.00	1.00	0.63	0.32	0.63	0.32

최적화 분석에서 최적해 탐색을 통해 분석된 층별 최적 환승 결과는 Table 5와 같다. 단순하게 최고 층수의 절반 위치를 환승층으로 지정했을 때와 비교해보면, 개별 인원별 환승시간 차이는 최고 층수에 따라 1분에서 6분까지 차이가 난다. 이를 작업원 전체로 보았을 때 총 단축시간은 26시간에서 100시간에도 이르는 것으로 분석되었다. 본 분석결과는 1일 출근 시간대만 고려한 결과로, 프로젝트에서 골조 공사 완료 후 마감공사 기간만을 고려한다 하더라도 환승층 지정에 따른 이동 시간 단축 효과가 매우 클 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.3. 환승층 변화에 따른 소요시간 변화 분석 실험

앞에서는 최고 층수의 변화에 따른 최적 환승층 도출 및 최고 층수 대비 1/2층과의 소요시간 차이를 분석하였다. 본 연구에서는 추가적으로 최고 층수가 지정되어 있는 상태에서, 환승층이 1개층씩 변화할 경우 평균 이동소요시간의 변화에 대한 분석을 실시하였다. 가상 현장의 개요는 앞서 실험에 사용하였던 표 3과 같으며, 최고 층수를 100, 125, 150, 175, 200층으로 지정하여 시뮬레이션을 하였다. 환승층은 각 최고층 별로 50개층 범위를 지정하여 1층 간격으로 시뮬레이션 하였다.

분석 결과는 Fig. 6부터 Fig. 10과 같다. 각 그래프를 살펴보면 최적 환승층을 변곡점으로 환승층이 1개 층씩 바뀔 때마다 소요시간이 일정하게 늘어나는 것을 관찰할 수 있다. 소요시간의 변화 정도는 최고층수에 따라서 약간씩 다르기는 하지만, 같은 최고층수 아래에서는 비교적 일정한 것을 볼 수 있다.

5. 결론

전 세계적으로 건축물들이 점차 고층화되면서 건축공사에서 수직 양중효율의 중요성이 증가하고 있다. 높은 수직 양중효율은 작업원의 순수 작업 가능시간을 연장시키며, 이를 통해 프로젝트의 공기 단축 및 비용을 절감할 수 있다. 또한 100층 이상의 초고층 건축공사에서는 현재 일반적인 리프트 최대 운행높이가 제한적인 상황에서 리프트 운영의 신뢰성 확보 및 공기지연 리스크 최소화를 위해 환승운영방식 리프트 운영은 필수적이다.

Table 5. Optimization Result of Transfer Floors

Top Floor	Optimized Transfer Fl.	Average Lifting Time (Hour)	1/2 Fl.	Aver. Lifting Time when 1/2 Fl. (Hour)	Difference of Aver. Time to Optimized Transfer Fl.(Hour)	Total Shortend Time by Optimized Transfer Fl. (Hour)
100	45	1.268	50	1.295	0.026	26.620
110	47	1.358	55	1.409	0.051	51.415
120	54	1.446	60	1.514	0.067	67.650
130	61	1.544	65	1.589	0.045	45.357
140	64	1.608	70	1.656	0.048	48.292
150	67	1.668	75	1.712	0.044	43.650
160	71	1.756	80	1.811	0.055	55.054
170	77	1.851	85	1.921	0.100	100.020
180	78	1.871	90	1.973	0.101	101.604
190	80	1.964	95	2.042	0.077	77.821
200	90	2.060	100	2.121	0.061	61.102

환승운영방식 리프트 양중의 시뮬레이션 모델 및 최적 환승층 분석을 위해 본 연구에서는 다음의 방법들을 사용하였다.

- (1) 이산사건 시뮬레이션을 이용한 환승운영방식 리프트 양중 시뮬레이션 모델 구축
- (2) 메타휴리스틱 알고리즘을 사용하는 최적해 탐색 프로그램으로 최적 환승층 분석 도구 구축
- (3) 작업원, 리프트 대수, 기종 등을 임의로 설정하여 최적화 분석을 시행하고, 최적 환승층과 중간층과의 소요시간 차이를 분석
- (4) 최고층수가 고정된 상태에서 환승층 위치의 변화에 따른 작업원 평균 이동소요시간 변화 분석

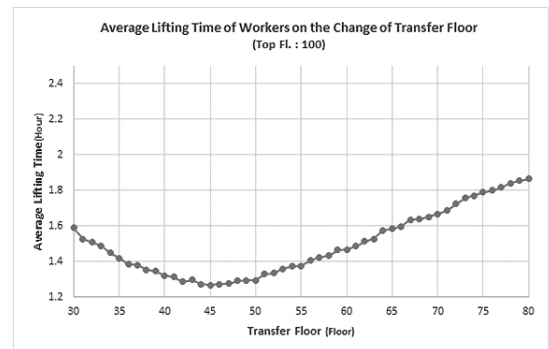


Fig. 6. Change of Average Lifting Time for Transfer Floor Variation (Top Floor : 100)

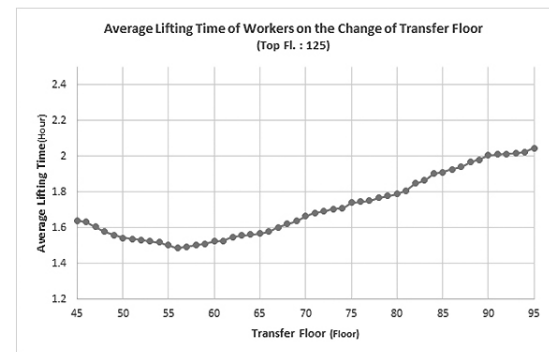


Fig. 7. Change of Average Lifting Time for Transfer Floor Variation (Top Floor : 125)

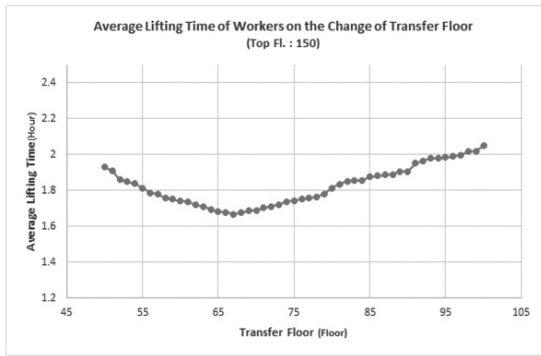


Fig. 8. Change of Average Lifting Time for Transfer Floor Variation (Top Floor : 150)

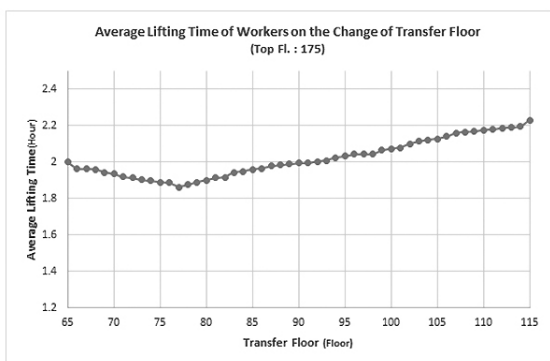


Fig. 9. Change of Average Lifting Time for Transfer Floor Variation (Top Floor : 175)

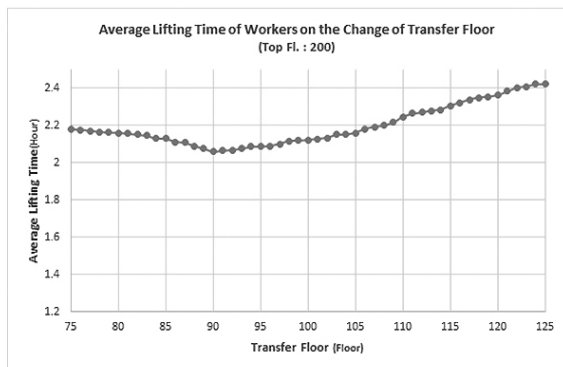


Fig. 10. Change of Average Lifting Time for Transfer Floor Variation (Top Floor : 200)

본 연구를 통해 최적의 환승층 지정에 따라 상당한 양의 작업원 이동시간 단축이 가능함을 제시하였다. 본 환승운영방식 리프트 양중 시뮬레이션 모델 및 최적 환승층 분석 도구를 사용할 경우, 현장의 상황에 따른 최적의 환승층 위치를 지정함으로써 피크 시간대인 출근 시간에 작업원들을 보다 더 신속하게 작업장으로 이동시킬 수 있을 것이다. 이를 통해 작업

원들의 일일 작업 가능시간을 증대시키고, 인건비 절감을 통한 비용 절약과 공기 단축을 기대할 수 있을 것이다. 최적 환승층을 지정하지 못하더라도 본 시뮬레이션 모델을 이용하여 지정된 환승층에 대한 평균 소요시간을 분석하고, 작업원들의 작업 가능시간에 대한 판단과 의사결정을 위한 자료 제공이 가능할 것이다.

연구 결과의 현장 적용성을 높이기 위해서는 다음의 후속 연구가 진행될 필요가 있다. (1) 실제 공정에 따른 층별 작업원 소요가 반영이 가능하도록 하여야 할 것이다. (2) 리프트로 양중하는 주요 대상인 마감 자재에 대한 반영이 필요하다. (3) 공정에 따른 작업원 및 마감 자재 양중 부하를 바탕으로 시뮬레이션 및 최적화를 통해 리프트 대수 산정 및 기중 최적화가 가능해야 한다. (4) 환승층 개수를 최적화할 수 있는 기능 추가가 필요하다. (5) 본설 엘리베이터 사용을 반영하는 분석이 필요하다. (6) 골조공사 진행에 따른 층수 변화도 최적화 과정에 반영하는 것에 대한 추가적인 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 도시건축연구사업(09첨단도시A01)에 의해 수행한 결과의 일부임.

References

Ahn, B. (2004). "A Vertical Movement Plan for Labors in High-Rise Building Construction Using Discrete-Event Simulation" *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 5(2) pp. 47-54.

Ahn, B. (2004). "Condition and Problem of Lift-up Plan for Finishing Material in High-Rise Building Construction" *Proceedings of the 4th International Symposium of KSTBF*, Seoul, South Korea.

Banerjee, D. (2011). "Simulation-Based Evaluation of Dispatching Policies in Service Systems" *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ, USA.

Chan, V. W. K. (2010). "Agent-Based Simulation Tutorial-Simulation of Emergent Behavior and Difference between Agent-Based Simulation and Discrete-Event Simulation" *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, Baltimore, MD, USA.

- Cho, C. (2010). "Simulation Method of Construction Hoist Operating Plan For High Rise Buildings Considering Lifting Heights and Loads" *Proceedings of the 27th ISARC*, Prague, Czech Republic, pp. 22–28.
- Cho, C. (2011). "An Algorithm for Hoisting Time Calculation in Super-Tall Building Construction" *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(6) pp. 120–129.
- Cho, C. (2013). "An optimal algorithm of the multi-lifting operating simulation for super-tall building construction" *Automation in Construction*, 35, pp. 595–607.
- Cho, H. (2010). "Trend of Lift planning and technology development in High-rise Building Construction" *Construction Engineering and Management*, KICEM, 11(1), pp. 15–18.
- CTBUH (2014). "Tall Buildings in Numbers", *International Journal on Tall Buildings and Urban Habitat*, CTBUH, 2014(1), pp. 38–39.
- Ebrahim R. M. (2009), "Scatter search algorithm for supplier selection and order lot sizing under multiple price discount environment", *Advanced in Engineering Software*, 40, pp. 766–776.
- Han, C. (2012). "A Computation Model for Resource-based Lifting loads of the lift-cars for super high-rise buildings" *Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(5) pp. 135–143.
- Halpin, D. W. (1973). "An Investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations." *Ph.D. Thesis*, The University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.
- Hwang, S. (2009). "Planning temporary hoists for building construction" *2009 Construction Research Congress*, ASCE, Seattle (April), pp. 1300–1307.
- Jie, W. (2008). "Simulation for Constrained Optimization of Inventory System by Using Arena and OptQuest" *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, Wuhan, China.
- Ioannou, P.G., and Martinez, J.C. (1996). "Scalable Simulation Models for Construction Operations." *Proceedings of 28th Conference on Winter Simulation*, IEEE Comp. Soc., December 8–11, 1996, Coronado, CA, USA, pp. 1329–1336.
- Jung, Y. (2004). "The Rationalization Method of Lift Car Planning in the High-rise Building Construction" *Proceedings of the 2004 Spring Annual Conference*, Architectural Institute of Korea, Seoul, South Korea.
- Kim, K. (2000). "A Study for the Implementation of Self-controlling Resource Model in the Simulation of Heavy Construction Operations", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 20(4D) pp. 389–402.
- Kim, S. (2002). *Management Simulation*, 1st ed, Hankyong-Sa, Seoul.
- Kim, S. (2008). "A Study on the Estimation of Proper Numbers of Construction Lifts", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 8(3) pp. 119–125.
- Laguna, M. (1997). "Optimization of Complex Systems with OptQuest", University of Colorado, Boulder, CO, USA.
- Lee, H. (2008). "Development of the Model Using Queueing Theory for Lift Planning in Tall Buildings" *Proceedings of 2008 KICEM Annual Conference*, Seoul, South Korea.
- Martinez, J. C. (1996). "STROBOSCOPE : State and Resource Based Simulation of Construction Process." *Ph.D. Thesis*, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA.
- Park, E. (2009). "A Study on the Influential Factors of Construction Lifting Planning for Super-High rise Building Projects" *M.S. Thesis*, Kyunghee University, Seoul, South Korea.
- Park, K. (2001). "An Analysis of the Optimal Planning of Material Lifting in the High-rise Building Construction" *Proceedings of the 2001 Annual Conference*, Architectural Institute of Korea, Asan, South Korea.
- Park, M. (2011). "An Optimization Model of Temporary Lift's Vertical Zoning for Worker Lifting Operation in the High-rise Building Construction" *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 27(11) pp. 193–202.
- Rogers, P. (2002). "Optimum-Seeking Simulation in the Design and Control of Manufacturing Systems: Experience with OptQuest for Arena" *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, USA.

Shin, Y. (2010). "Interactive lift operation planning system for finishing work in tall building construction" *Ph.D. Thesis*, Korea University, Seoul, South Korea.

요약 : 최근 세계 경제가 금융위기로부터 회복되기 시작하면서 전 세계적으로 초고층 건축공사 프로젝트가 증가하는 추세에 있다. 수직 리프트 양중은 리프트 양중 장비 대수의 제약으로 인해 초고층 건축공사 프로젝트에 있어서 전체 프로젝트의 생산성 측면에서 매우 중요한 요소이다. 특히 건물 높이가 400m 이상 되는 초고층 건축공사에서는, 리프트의 최대 운행높이로 인해 환승운영방식의 리프트 양중이 필수적이다. 환승운영방식 리프트 양중에서의 환승층 지정은 자원들의 양중 시간 단축에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 AnyLogic 프로그램을 통한 이산사건 시뮬레이션 모델 구축 및 OptQuest 최적화 프로그램을 통한 메타휴리스틱 방식의 최적해 탐색으로 오전 출근시간대의 작업원 양중 시 환승층 최적화를 위한 방법을 제안하였다. 중간층을 환승층으로 지정했을 때와 비교한 결과, 최적 환승층을 지정했을 때 작업자들의 전체 양중시간이 상당히 단축되는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제안하는 도구를 사용 시 초고층 건축공사 프로젝트에서 작업원들의 가용 작업시간 증가를 통한 비용 절감 및 프로젝트 공기 단축이 가능할 것으로 예상된다.

키워드 : 건설 리프트, 환승운영방식, 효율성, 초고층 건축공사, 환승층, 최적화, 시뮬레이션
