

건축물 마감공사 자재 배치 최적화 모델

A Layout Planning Optimization Model for Finishing Work

박문서* 양영준** 이현수*** 한상원**** 지세현*****
Park, Moonseo Yang, Youngjun Lee, Hyun-soo Han, Sang-won Ji, Sae-hyun

요약

불필요한 자원 이동 및 운반은 건설 현장 작업 생산성에 부정적인 영향을 미치는 주요 원인 중 하나이다. 이에 따라 레이아웃 관련 연구들은 사이트 수준에서 이뤄지는 자원의 이동 및 운반을 최소화하기 위한 관리 기술과 기법들을 개발하기 위해서 노력하였다. 더불어 건축물이 대형화되고 평면이 복잡해지면서 작업층 내 레이아웃 연구의 필요성도 제기되었으나, 현재 건물 내부 자재 이동 및 운반에 대한 최적화 연구는 활발히 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용하여 작업층 내 마감 자재의 위치를 최적화할 수 있는 모델을 개발하였다. 구축된 모델은 복잡한 건축 평면 위에서 다양한 자재들의 배치를 계획할 수 있으며, 이때 모델로부터 도출된 최적화된 자재 배치 계획은 작업 당일 작업자에 의한 총 자재 운반 시간을 최소화할 수 있다. 또한 작업과 자재 간 운반거리를 현실적으로 산정하기 위해서 실제 운반 거리 개념을 적용하였다. 개발된 모델의 적용성을 확인하고 기존 방법론과의 비교/분석을 위해서 실제 고층 주상복합 아파트를 대상으로 모델을 적용하였다.

키워드 : 자재 배치, 공간 관리, 유전 알고리즘, 마감공사

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

최근 건설 공사는 발주자의 요구, 민원 등과 같은 이유로 공사 기간 단축이 요구되며, 이를 해결하기 위해 자원 투입을 늘리거나 동시 수행 작업수를 증가하는 방법을 사용한다. 그러나 이 방법은 작업 필수 자원의 소요 공간(Space demand)과 단위 시간 당 자원 이동 및 운반의 규모를 증가시키는 문제가 있다(Akinci 외 2002). 이처럼 건설 공사는 제한된 공간에서 많은 작업이 동시에 이루어지기 때문에, 공간 관리가 미흡한 경우 단위 시간 당 자원 이동 및 운반 규모의 증가를 일으켜 시간과 비용의 비효율을 초래할 수 있다. 결국 이는 프로젝트 전체의 생산성과 안전에 부정적인 영향을 주게 된다(Alarcón 1993, Serpell 외 1995,

Akinci 외 2002).

린 개념(Lean thinking)에서 자원의 이동 및 운반은 최소화 또는 제거되어야 할 비생산적인 작업(Non-Productive work; NPW)으로 규정한다(Alarcón 1993). 이런 관점에서 기존 레이아웃계획(Layout Planning) 연구들은 주로 사이트 수준(Site-level)의 자원 이동과 운반을 최적화하는 알고리즘과 모델 개발에 초점이 맞추어져 있다(Guo 2002, Jang 2003). 그러나 최근 건축물이 대형화, 고층화, 고급화되면서 마감공사 비중이 증가하였고, 이는 사이트 수준에서 한층 더 내려가 작업층 내 레이아웃계획 최적화 연구의 필요성을 부각시킨다(Jang 2007).

작업층 레이아웃계획의 현황 파악을 위해 국내 12 개소 건설 현장을 조사한 결과, 대부분의 현장이 생산성을 고려한 계획없이 해당 층 수직 운반장비(리프트카) 출입구 근처에 자재를 보관하고 있었다. 또한 일부 현장의 몇몇 자재는 특정 층에 수개 층

* 종신회원, 서울대학교 건축학과 부교수(교신저자), 공학박사, mspark@snu.ac.kr

** 일반회원, 서울대학교 대학원, 석사과정, june1002@snu.ac.kr

*** 종신회원, 서울대학교 건축학과 정교수, 공학박사, hyunslee@snu.ac.kr

**** 일반회원, UNSW 토목환경공학과 전임강사, 공학박사, s.han@unsw.edu.au

***** 일반회원, 서울대학교 대학원, 박사과정, oldclock@snu.ac.kr

혹은 수일 분량의 자재를 미리 보관한 후 필요 시 작업 위치로 운반되고 있었다. 즉 그림 1과 같이 자재가 야적장(Stockyard)에서 양중 대기 장소(Staging area)를 거쳐 작업층 내 부적절한 위치로 운반되어 보관되기 때문에 총 작업 시간에서 자재 이동 및 운반 소요 시간의 비중이 증가하고 있다. 요컨대 부적절한 자재 배치 계획은 비생산적인 작업(NPW)의 비중을 증가시키는 생산성 저해요소인 것이다(Serpell 외 1995). 이와 같은 문제를 해결하고자 본 연구는 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하여 작업층 자재 배치 최적화 모델(Floor-Level Layout Planning Model)을 개발한다. 이 모델은 작업 계획을 고려한 최적의 자재배치 계획을 제공하여 작업자 자재 운반 시간의 최소화를 통한 생산성 최대화를 목적으로 한다.

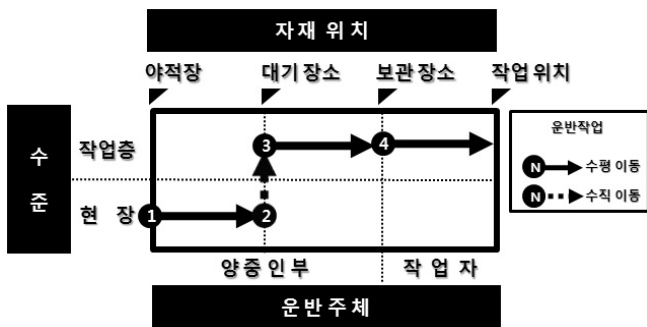


그림 1. 현장 내 마감 자재 운반 흐름도

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 국내 고층 주상복합 건축공종의 마감공사를 대상으로 자재 배치 최적화 모델을 개발하고 적용성을 확인하기 위해서 다음과 같은 절차와 방법으로 진행한다.

첫째, 선행연구를 분석하여 레이아웃 계획을 정의하고 기존 연구의 시사점과 한계를 분석한다.

둘째, 마감자재 배치 최적화 모델을 위한 가용 공간, 작업 위치, 운반 거리 모델링 방법과 최적화 알고리즘을 제시한다.

셋째, 제시된 모델의 타당성 검증을 위해 실제 사례를 이용, 케이스 스터디를 실시한다.

넷째, 케이스 스터디 결과를 기존 연구 현실태와 비교 분석하여 유효성을 확인한다.

2. 예비적 고찰

2.1 레이아웃계획(Layout Planning)

2.1.1 레이아웃계획 정의

레이아웃계획은 필요한 자원을 적절히 배치하여 공사 기간 중 접근과 사용을 용이하게 하고, 자원이 제 기능을 발휘하도록 하는 공간 관리(Space management)의 한 분야이다(Zouein과 Tommelein 1999). 좋은 레이아웃계획은 공사 기간 중 이동 시간, 운반 비용, 작업 간 간섭 그리고 안전 사고를 최소화할 수 있으며, 무분별한 자재 배치로 인한 작업 지연을 사전에 예방할 수 있다(Tommelein 외 1992).

1.2.2 선행 연구 분석

표 1. 레이아웃 계획 최적화 연구 동향

규모	최적화 도구	최적함수	거리 모델링 개념	저자 (연도)
현장	휴리스틱	최소 지수	직선거리	Cheng과 O'Connor -1996
	유전 알고리즘	최소 거리		Li와 Love (1998, 2000)
	유전 알고리즘	최소 거리		Hegazy와 Elbeltagi -1999
	선형 프로그램	최소 비용		Zouein과 Tommelein -1999
	유전 알고리즘	최소 비용		Zouein 외 2인 -2002
	유전 알고리즘	최소 비용		Elbeltagi 외 2인 -2004
작업층	유전 알고리즘	최소 비용	실제거리	Jang 외 2인 -2007
현장	유전 알고리즘	최소 비용		Sanad 외 2명 -2008

레이아웃 계획 연구는 표 1과 같이 레이아웃 규모(Level), 최적화 도구(Method), 목적 함수(Objective) 그리고 운반거리 모델링 방법(Distance Modeling Method)으로 구분하여 분석될 수 있다. 대부분의 레이아웃 계획 연구들은 건물 내부 레이아웃에 대한 중요성을 간과하고, 가설 시설 및 설비(Temporary facility) 등의 위치를 최적화하여 건물 외부의 자원 이동 및 운반을 최소화할 수 있는 알고리즘과 모델 개발에 초점을 맞추어왔다(Cheng과 O'Connor 1996, Li와 Love 1998, Zouein과 Tommelein 1999, Li와 Love 2000, Zouein 외 2인 2002, Hegazy와 Elbeltagi 2009, El-Rayes와 Said 2009). 이는 많은 연구자들이 건물 내부의 자원 이동 및 운반거리가 건물 외부에 비해서 매우 짧고 작업 생산성에 미치는 영향력이 상대적으로 미비하다고 판단하였기 때문이다(Zouein과 Tommelein 2001). 한편 최근 건축물의 높이와 면적이 증가하고, 평면이 복잡해짐에 따라 건물 내부 자재 이동 및 운반 거리가 증가하고 있다. Jang외 2인(2007)의 연구 결과에 따르면 작업층 내 부적절한 자재 위치 선정이 불필요한 자재 이동 및 운반 거리를 상당히 증가시켰으며, 이는 작업 생산성에 매우 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다. 즉 작업층 내 자재 레이아웃 계획은 작업 생산성에 중요한영향을 미칠 수 있고, 이러한 영향력은 건축물이 고층화, 대형화, 첨단화될수록 증가된다는 것이

다(Zouein과 Tommelein 2001, Jang 외 2007). 따라서 본 연구에서는 건물 내부에서의 불필요한 자재 이동 및 운반 작업을 최소화할 수 있는 마감 자재 배치 최적화 모델을 개발한다.

레이아웃 계획 최적화와 관련된 기존 모델들은 두 지점 간 이동 경로를 직선으로 가정하고 운반 거리를 산정하였다(Cheng과 O'connor 1996, Li와 Love 1998, Zouein과 Tommelein 1999, Li와 Love 2000, Zouein 외 2인 2002, Hegazy와 Elbeltagi 2009, El-Rayes와 Said 2009). 하지만 실제 작업층 내부에는 엘리베이터 홀, 벽, 자재 등과 같은 다양한 장애물(Obstacle)들이 존재한다. 그림 2와 같이 출발점(I)과 도착점(F) 사이에 장애물이 있는 경우 자재 운반은 도식된 점선의 경로를 따라서 이동하게 된다. 그러나 기존 연구에서 제시한 모델들은 장애물을 무시한 직선 경로를 사용하였다. 이럴 경우 직선거리와 실제 운반거리의 차는 자재 운반 횟수, 평면의 복잡성 그리고 장애물 개수 등과 비례하여 증가하게 되므로, 배치모델 결과의 신뢰성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Sanad 외 2008). 이에 본 연구에서는 정확한 이동경로 모델링을 위해 실제 운반 거리 산정 방법(Actual travel distance method)을 적용한다.

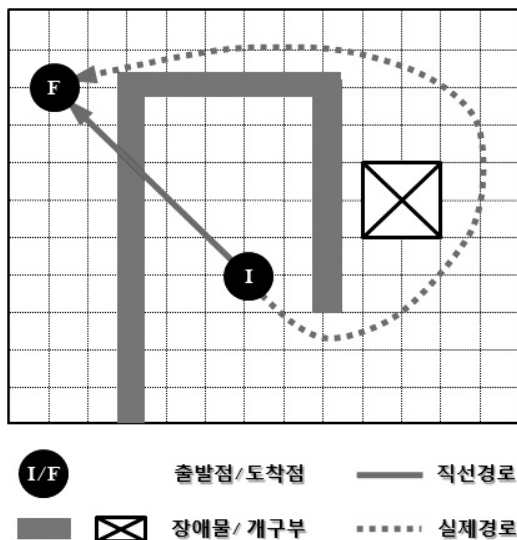


그림 2. 직선 경로와 실제 경로

2.2 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)

건축물 내부에서의 자재 배치 계획은 해당 평면에서 배치 가능 공간을 구별해 낸 후 각 자재 보관 위치를 할당하는 순서를 따르게 된다. 이때 각 자재별 공간 할당에는 자재 종류, 크기 및 규모에 따라 수많은 조합이 존재한다. 이러한 조합 중 생산성을 최대화할 수 있는 최적 배치조합 결정이 요구되는데, 이때 최적

화 알고리즘의 방법론인 유전 알고리즘을 사용한다.

유전 알고리즘은 다윈의 적자 생존 원리와 자연 도태의 법칙을 적용한 통계학적 검색 방법으로 주로 최적화 문제를 해결하기 위해 사용되어 왔다(Goldberg 1989). 유전 알고리즘을 구현하는 기본 구조는 염색체(Chromosome)이며, 최소 단위인 유전자(Gene)들의 조합으로 표현된다. 유전 알고리즘은 초기에 여러 개의 해를 생성하고 교차(Crossover)와 변이(Mutation)를 통해 세대를 거치면서 환경에 적응하기 유리한 정도에 따라 선택적으로 번성하여 전역적 최적해를 찾는다(문병로 2008).

유전 알고리즘은 그림 3과 같이 초기화(Initialization), 변이(Mutation), 교배(Crossing), 재생산(Reproduction) 단계를 통해 해의 적합도(Fitness)를 평가(Evaluation)하고 최적해를 구한다. 초기화 단계에서는 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들의 해 집단을 형성하고, 이때 초기 해 집단은 해 공간 내에 무작위로 분포되도록 선택되거나 경험적인 방법으로 선택된다. 변이는 선택된 개체의 하나 이상의 유전 정보를 임의로 변경하여 집단에 새로운 정보를 도입하는 단계이다. 그러나 이러한 변화는 매우 낮은 확률을 가지고 이행된다. 교배는 선택된 개체들이 재결합하는 단계이다. 적용된 교배확률에 따라 무작위로 두 개체를 선택하여 개체의 일정부분을 서로 교환함으로써 새로운 두 개의 개체를 생성하여 개체군에 새롭게 삽입한다. 재생산 단계는 최적개체의 유전적 특성이 다음 세대에 전달되는 자연 선택과 유사한 과정이다. 이 단계에서는 개체들의 강점과 약점이 적합도 항목으로 평가되며, 이들의 적합도 값에 따라 현재 집단 내의 개체들이 재생산을 위해 선택된다. 성능이 좋은 개체들은 더 많이 선택되어 복제되고, 반면에 성능이 나쁜 개체들은 집단으로부터 소멸된다. 이와 같은 과정을 반복함에 따라 해 집단의 적합도를 향상시킨다.

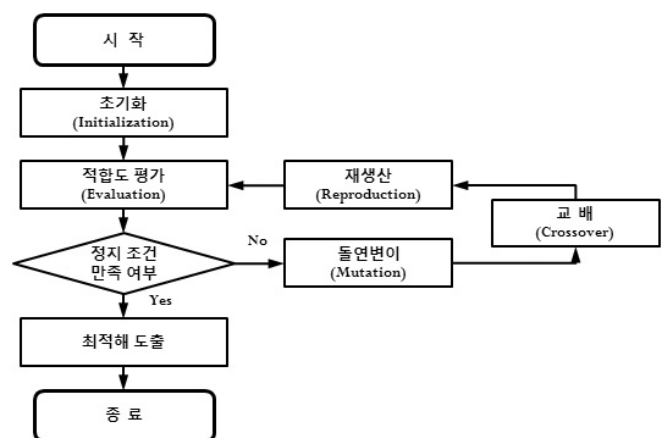


그림 3. 유전 알고리즘 프로세스

3. 자재 배치 최적화 모델 개발

본 연구에서 제안하는 자재 배치 최적화 모델 프로세스는 그림 4와 같다. 첫째, 건물의 평면도를 좌표화한 뒤 가용 공간(Available space)을 좌표 정보로 전환한다. 둘째, 자재 및 작업 운반 관련 정보를 활용하여 설치 작업을 유닛화한다. 셋째, 자재 운반 거리를 산정하기 위해 자재 운반 경로를 모델링한다. 마지막으로 유전 알고리즘을 이용하여 자재 이동 및 운반 시간을 최소화할 수 있는 최적 자재 배치계획을 도출한다.

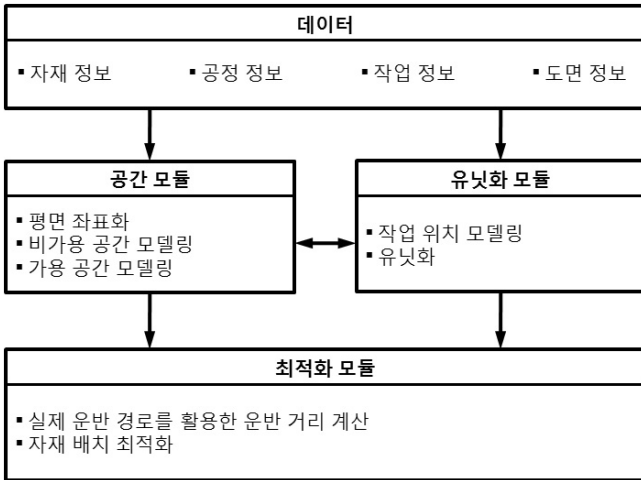


그림 4. 자재 배치 최적화 모델

3.1 작업층 평면 및 가용 공간 모델링

우선 건축물의 작업층 평면을 2차원 그리드로 모델링한다. 그림 5와 같이 해당층 평면에 지정한 단위길이(Unit length)를 사용한 격자형 좌표를 생성하면 각 교차점이 X-Y 좌표로 표현된다. 공간은 한 개의 교차점 또는 교차점의 집합으로 이루어지며, 가용 공간(Available space)과 비가용 공간(Non-Available space)으로 구분한다. 비가용 공간은 보호, 보양, 작업 공간 확보 등의 이유로 자재 배치 및 운반이 허용되지 않는 공간과 개구부, 벽체 등과 같이 자재 배치 및 운반이 불가능한 공간을 의미하며 가용 공간은 비가용 공간을 제외한 공간이다. 이때, 비가용 공간은 특성에 따라 세 가지로 구분되며, 설정 방법은 다음과 같다. 첫째, 구조 벽체, 엘리베이터 홀, 계단실, 개구부 등과 같이 위치가 변하지 않는 장애물로 도면 정보를 기반으로 설정한다. 둘째, 건식 벽체, 주방 설비, 냉/난방 설비 등과 같이 작업이 진행됨에 따라서 자재 배치 및 운반이 불가능한 공간으로 해당 작업의 진도에 따라 도면 정보를 기반으로 설정한다. 셋째, 작업층 내 동시에 진행되는 작업들의 작업 공간과 이동 공간으로 관리자가 작업의 특성을 고려하여 직접 설정한다.

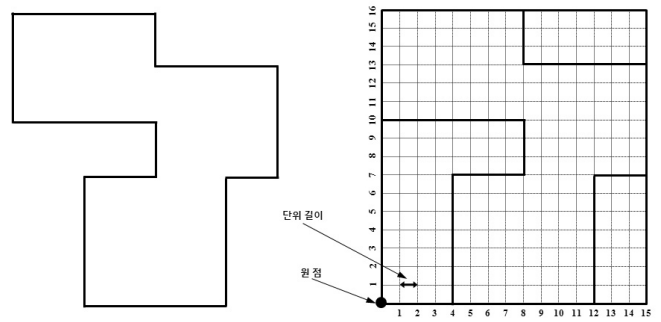


그림 5. 건축 평면 좌표화

3.2 자재와 작업 위치 및 운반 정보 모델링

적절한 시점에 적정량의 자재를 적절한 장소로 제공하는 것은 원활한 작업 수행을 위한 필수조건 중 하나이다(Thomas 외 2002). 현장 내 대부분의 자재들은 운반의 편의를 위해서 패킷(Packet)단위로 야적장소(Stockyard)에서 작업층 내 보관 장소(Storage area)로 이동한다. 따라서 자재 배치를 위한 가용 공간은 패킷 단위로 할당한다. 패킷의 모양은 사각형으로 모델링하며, 패킷의 도심(Centroid)은 해당 자재의 위치를 의미한다. 각 자재들은 배치 및 운반 작업을 모델링하기 위해서 패킷 면적(장변, 단변), 도심위치 그리고 물량 정보를 그림 6과 같이 데이터화한다. 자재 패킷에 가용 공간이 할당된 경우 패킷의 도심은 자재 이동의 출발지점(Initial point)으로 설정된다. 이때 자재는 가용 공간 위에만 놓일 수 있으며, 하나의 자재가 배치된 공간은 다른 자재가 놓일 수 없다.

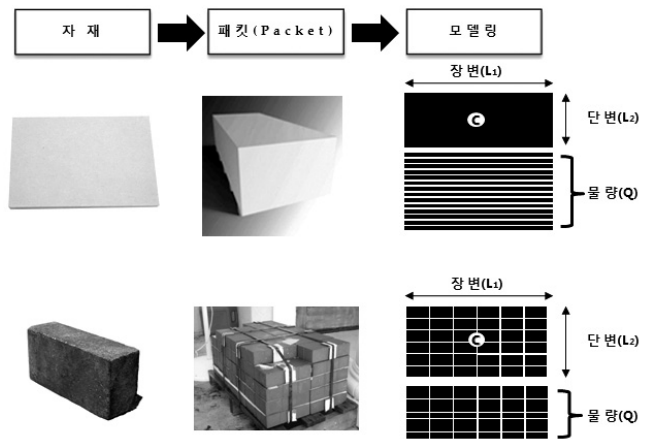


그림 6. 자재 패킷(packet) 모델링

작업 위치는 해당 자재가 최종적으로 운반되는 지점(Final point)을 의미한다. 대부분 작업은 도면 상 해당 자재가 설치될 위치에서 이루어진다. 따라서 작업 위치는 관련 자재가 설치되는 지점으로 모델링할 수 있다.

자재 배치 최적화 모델에서는 다음과 같은 과정을 통해서 작업 위치 및 운반 물량을 모델링한다. 첫째, 우선 각 자재별 설치 위치를 2차원 그리드 좌표 위에 기하학의 기초 도형인 선과 면의 형태로 표현한다. 둘째, 각 자재별로 자재 특성 및 설치 형태를 고려하여 단위 길이 혹은 단위 면적 당 물량을 산출한다. 셋째, 전체 도형을 해당 자재의 패키지 물량을 기준으로 유니트화(Unitization)한다. 이때, 작업 위치는 분할된 도형의 도심으로 설정하고, 운반(작업) 물량은 분할 도형의 크기(길이 혹은 넓이)를 활용하여 산출한다. 예를 들어, 건식벽체 공사 중 석고보드 설치 작업의 경우 그림 7과 같은 과정을 통해서 작업 위치 및 운반 물량을 모델링한다.

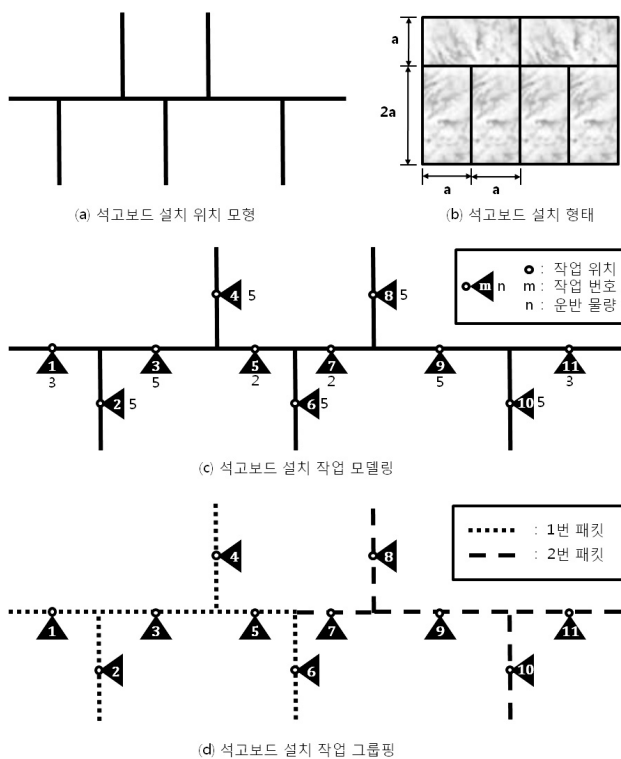


그림 7. 석고보드 작업 위치 및 운반 물량 모델링 과정

3.3 실제 운반 거리 모델링

본 연구에서 제시한 자재 배치 최적화 모델은 자재 이동 및 운반 작업을 현실적으로 모델링하기 위해서 실제 운반 거리 개념(Actual Travel Distance)을 도입한다(Sanad 외 2008). 작업자는 출발점(I)에서 도착점(F)으로 자재 이동 및 운반 시 육체적인 노동을 최소화하기 위해 그림 8의 좌측에서 보는 바와 같이 최단 경로를 따라 이동한다(Rilett와 Park 2006). 따라서 실제 운반 경로는 자재 운반 출발 지점(Initial point)에서 도착 지점(Final point)까지 가용 공간만을 통과하는 최단 경로로 그림 8

의 우측과 같이 모델링할 수 있다. 이때 실제 운반 거리는 최단 경로의 거리와 운반 횟수를 활용하여 산출한다.

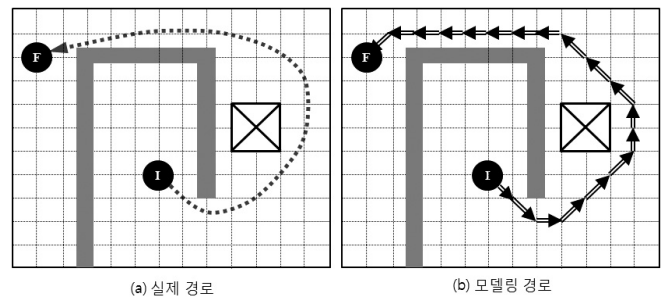


그림 8. 실제 운반 경로 모델링

3.4 최적화 알고리즘

최적화 문제를 해결하기 위해서 유전 알고리즘을 적용하려면 먼저 염색체 구조를 정의해야 한다. 염색체는 최적화 문제에 대한 해를 의미하며, 본 연구에서는 자재 배치 최적화를 위해서 염색체 구조를 그림 8과 같이 구성했다. 예를 들어 x일에 동일 작업층에서 진행되는 모든 작업들에 필요한 자재들의 물량을 각 자재의 패키지 수로 전환했을 때, 총 N개의 패키지가 필요하다면 염색체의 길이는 N과 같다. 그리고 해당 염색체의 유전자는 유니트화된 작업들에 해당되는 자재 패키지가 배치될 위치를 의미한다. 이때 위치 번호는 1번부터 자재 배치가 가능한 공간의 수만큼 설정되며, 각 위치 번호마다 해당 공간의 좌표 정보가 할당된다.

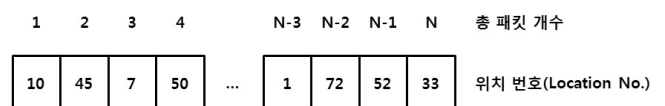


그림 9. 염색체 구조

염색체 즉, 자재 배치 계획의 적합도(Fitness)를 평가하기 위해서 식 (1)과 같은 적합도 함수(Fitness function)를 사용한다. 식 (1)에서 i는 자재의 종류를 나타내며, j는 분할 작업을 의미한다. f_j 는 i 자재의 패키지를 작업층 내에서 날개 단위로 운반할 경우 총 운반 횟수와 같고, V_i 는 해당 자재의 운반 속도이며, $D_{i \cdot j}$ 는 j 작업과 해당 자재 패키지 사이의 거리이다. 이때 $D_{i \cdot j}$ 계산 시 실제 운반 거리 산정 방법을 활용하며, i와 j가 무관한 경우 거리는 산정되지 않는다.

$$Min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m f_j \cdot \frac{2D_{i \cdot j}}{V_i} \dots \text{식 (1)}$$

이렇게 개발된 최적화 알고리즘은 동일 작업일에 설치될 모든 자재의 작업층 내 운반 소요 시간이 최소가 되는 각 자재 패키지들

의 위치를 도출한다.

4. 최적화 모델 적용 및 사례 분석

본 연구에서 제시한 자재 배치 최적화 모델의 유효성 검증을 위해 A사에 의해 시공 중인 서울 소재 고층 주상복합 아파트를 적용사례로 선정하였다. 해당 건축물은 높이 119.7m, 지상 37층(지하 6층) 그리고 건축면적 2,592m²이며, 주거동의 경우 총 136세대로 구성되어있다. 본 연구에서는 공동 주택 구성 세대 중 중간 크기 세대(190.86m²) 내 석고보드 자재 배치를 최적화 하였다. 이는 석고보드가 마감공사 자재 중 상대적으로 작업 물량이 많고 작업자에 의한 자재 이동 및 운반이 빈번하기 때문이다. 최적화 알고리즘 프로그램은 Evolver 4.0을 사용하였으며, 초기 개체집단 100 · 변이율 0.1로 설정하였다. 이때 교배는 균등 교차(uniform crossover) 연산을 적용하였으며, 임계 확률은 0.5로 설정하였다.

4.1 작업 분할 및 배치 가능 공간 모델링

사례 현장에서 사용되는 석고보드의 종류는 표 2와 같다. 석고보드의 경우 같은 종류라도 두께가 다른 경우 서로 다른 패킷으로 운반되며, 패킷 단위 물량도 상이하기 때문에 자재 패킷을 기준으로 작업을 유니트화해야 한다.

석고보드 자재 배치 가능 공간을 모델링하기 위해서 사례 평면 도면을 단위 길이가 0.5m인 2차원 그리드로 표현한다. 평면 내 위치가 변하지 않는 구조 벽체, 계단실, 개구부 등을 비가용 공간으로 설정한다. 위치가 변화하는 비가용 공간을 설정하기 위해서 자재 설치 위치와 작업 공간을 모델링한다. 먼저 세부 자재별 설치 작업을 선의 형태로 표현하고 해당 현장의 석고보드 설치 작업 공간 기준(설치 위치면에서 1m 이내)을 반영하여 석고보드 배치 가능 공간을 모델링한다.

석고보드 이동 및 운반 작업을 모델링하기 위해서 작업 위치와 운반 물량을 산출한다. 선의 형태로 표현된 설치 작업을 단일 직선 단위로 분할한다. 각 분할 작업들의 위치를 해당 직선의 중심으로 선정하며, 운반 물량은 직선 길이와 시공 유형을 고려하여 산출한다. 사례 평면에서 사용된 석고보드의 규격은 모두 0.9 x 1.8(m)이다. 따라서, 천정 높이 2.7m를 고려하여 석고보드를 1점으로 시공할 경우 분할 작업의 길이가 0.0 ~ 0.9m인 경우 2장, 0.9 ~ 1.8m인 경우 3장, 1.8 ~ 2.7m는 5장, 2.7 ~ 3.6m인 경우 6장을 기준으로 운반 물량을 산출한다. 이상의 석고보드 설치 작업을 모델링한 결과는 표 2와 3과 같다. 이때 표4의 분할별호별 위치는 그림 10에서 확인할 수 있다.

표 2. 석고보드 자재별 패킷 관련 정보

자재명	세부 자재명	두께 (mm)	패킷(Packet) 정보				
			물량 (장)	1/V (s/m)	운반인원	운반횟수	
석고보드	일반 석고보드	12.5	120	1.5	1	120	
	방수 석고보드	12.5	120	1.5	1	120	
	방화 석고보드		15	100	1.5	1	100
			19	90	1.6	1	90
			25	80	1.8	1	80
	차음 석고보드	12.5	120	1.5	1	120	
	방화/방수	15	100	1.5	1	100	
석고보드	19	90	1.6	1	90		

표 3. 석고보드 자재별 작업분할 결과

구분	자재명	두께 (mm)	분할 작업수	작업물량 (장)	패킷수량
M1	일반 석고보드	12.5	45	554	5
M2	방수 석고보드	12.5	13	92	1
M3	방화	15	20	44	1
M4	석고보드	25	20	132	2
M5	차음 석고보드	12.5	3	38	1
M6	방화/방수 석고보드	15	6	45	1
합계			107	905	11

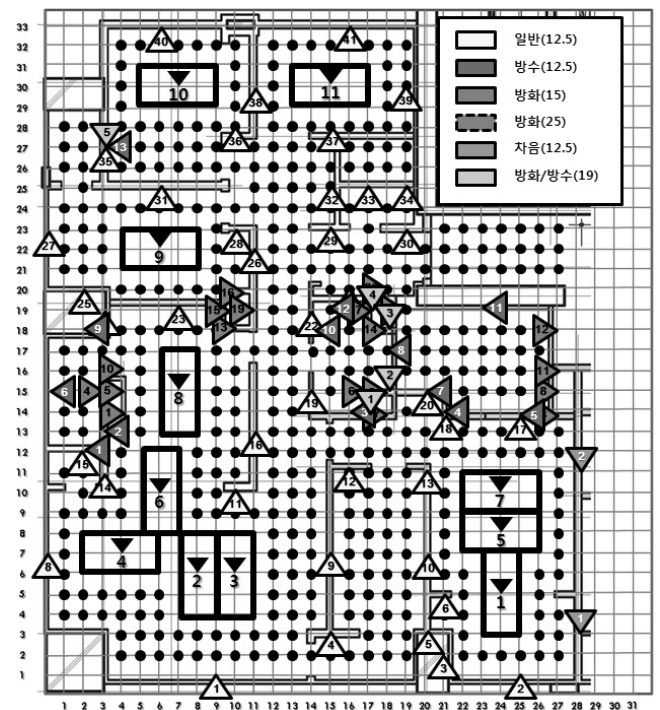


그림 10. 석고보드 설치작업 모델링 결과

4.2 최적화 결과 및 비교/분석

이상과 같이 본 연구에서 제시한 자재배치 최적화 모델에 실제 사례를 적용, 작업을 분할하고 배치 가능 공간을 모델링하였다. 이어서, 최적화 알고리즘을 실행하여 모델이 제시한 결과와 실제 배치계획을 비교하였다. 또한 기존 연구에서 제시했던 직

표 4. 석고보드 자재별 분할작업 위치 및 물량 정보

구분	분할 번호	작업 위치(mm)			운반 물량 (장)	구분	분할 번호	작업 위치(mm)			운반 물량 (장)	구분	분할 번호	작업 위치(mm)			운반 물량 (장)	
		길이	x	y				길이	x	y				길이	x	y		
M1	1	5500	4250	500	22	M1	35	2000	1500	13500	10	M3	15	1000	5000	9500	3	
	2	3500	12500	500	24		36	1000	5000	14000	12		16	1000	5500	9500	3	
	3	1000	10500	1000	6		37	1000	2500	14000	12		17	1000	8500	9500	3	
	4	1000	7500	1500	6		38	2500	5500	15000	20		18	1000	9500	9500	3	
	5	1000	10000	1500	6		39	2500	9500	15000	20		19	750	5000	10000	2	
	6	500	10500	2500	8		40	3000	3000	16500	24		20	750	9000	10000	2	
	7	500	13500	2500	8		41	4500	8000	16500	32		M4	1	500	2000	7000	6
	8	3500	0	3500	24	M2	1	1500	1000	6000	6	2		750	9000	7000	6	
	9	4000	7500	3500	16		2	1000	1500	6500	6	3		500	13500	7000	6	
	10	4000	10000	3500	16		3	1500	8000	7000	6	4		1000	1500	7500	9	
	11	750	5000	5000	8		4	750	10500	7000	4	5		1000	2000	7500	9	
	12	1000	8000	5500	6		5	1750	12500	7000	6	6		500	3000	7500	6	
	13	500	10000	5500	4		6	3000	0	7500	12	7		500	9000	7500	6	
	14	2000	1500	6000	20		7	1500	10000	7500	6	8		1000	13500	7500	9	
	15	1500	1000	6000	12		8	1500	9000	8500	6	9		750	9000	7500	6	
	16	3250	5500	6500	12		9	1500	1000	9000	6	10		500	2000	8000	6	
	17	1500	12500	7000	6		10	1000	7000	9000	6	11		500	13500	8000	6	
	18	500	10500	7000	4		11	4000	11500	9500	16	12		1500	13500	9000	9	
	19	1250	7000	7500	12		12	1500	7500	9500	6	13		750	5000	9000	6	
	20	1250	10000	7500	12		13	2000	1500	13500	10	14		750	9000	9000	6	
	21	1250	1500	9500	12	M3	1	500	2000	7000	2	15		1000	5000	9500	9	
	22	1500	7000	9500	12		2	750	9000	7000	2	16		1000	5500	9500	9	
	23	3250	3500	9500	24		3	500	13500	7000	2	17		1000	8500	9500	9	
	24	1500	8000	10000	12		4	1000	1500	7500	3	18		1000	9500	9500	9	
	25	1500	1000	10000	6		5	1000	2000	7500	3	19		750	5000	10000	6	
	26	1500	5500	11000	6		6	500	3000	7500	2	20		750	9000	10000	6	
	27	2500	0	11500	10		7	500	9000	7500	2	M5	1	2000	14000	1500	10	
	28	1000	5000	11500	6		8	1000	13500	7500	3		2	5000	14000	5500	18	
	29	1000	7500	11500	6		9	750	9000	7500	2		M6	1	500	8500	7000	6
	30	1000	9500	11500	6		10	500	2000	8000	2			2	750	9000	7500	6
	31	3500	3000	12500	12		11	500	13500	8000	2			3	750	9000	9000	6
	32	2000	7500	12500	20		12	1500	13500	9000	3	4		750	8500	9500	6	
	33	2000	8500	12500	10		13	750	5000	9000	2	5		1500	1500	13500	9	
	34	2000	9500	12500	10		14	750	9000	9000	2							

선 운반거리 산정 방법을 적용한 결과와도 비교하였다. 각 적용 방법에 따른 자재 운반 거리 및 시간은 표 5와 같이 정리할 수 있다.

적용 사례에 대해 최적화 알고리즘을 적용 시 도출된 석고보드 패킷 배치 최적안은 그림 11(c)와 같다. 최적안에 의한 작업층 내 석고보드의 총 운반거리는 4,537(m)로 소요시간은 226.85(min)이다. 반면, 실제 현장에서 적용되었던 배치안(그림 10(a) 참조)에 의한 자재 운반거리는 8,936(m)이며, 운반시간은 446.8(min)이다. 산출 결과를 토대로 현장에서는 약 4,300(m) 정도의 불필요한 자재 운반거리가 발생함을 확인할 수 있었다.

실제 현장에서는 해당 세대의 석고보드 설치를 완료하는데 1 일 동안 6명의 작업인원이 투입되었다. 해당 현장에서는 운반경로가 협소한 관계로 한 개의 석고보드를 2명이 한 팀으로 운반

함에 따라서 1일 작업 시간 중 자재 운반에 소요되는 시간이 약 2.5시간(31%)이며, 이 중 약 1.2시간(15%)이 불필요한 자재 운반 거리에 의해 발생하였음을 확인할 수 있다. 이는 작업층 내 자재 배치 문제가 작업 생산성에 큰 영향을 주고 있으며, 자재 배치 최적화 모델을 적용하면 사례 현장에서의 석고보드 운반거리 및 시간의 약 49%가 절감될 수 있음을 확인하였다.

직선 운반거리 개념을 적용한 자재 배치 최적안은 그림 10(b)와 같다. 하지만 해당 배치안을 본 연구에서 제시한 모델에 입력한 결과는 총 자재 운반거리는 5,359(m), 소요시간은 267.93(min)으로 실제 운반거리 개념을 적용한 최적안의 결과와 상당한 차이(18%)를 보인다. 이는 평면 내 장애물이 없다고 가정하고 운반거리를 산정하였기 때문이다. 하지만 실제 현장의 작업층 내에는 자재, 설비, 가설 및 구조 벽체 그리고 엘리베이



그림 11. 석고보드 자재 배치 최적안

터 홀과 같은 장애물들이 항상 존재한다. 따라서 평면이 복잡하고 자재 운반 횟수 그리고 장애물의 크기 혹은 수가 증가할수록 직선 운반거리 개념을 적용한 모델보다 실제 운반거리 개념을 적용한 모델의 최적화 결과가 더 신뢰성이 더 높다.

표 5. 자재 배치 계획 비교 결과

구분	현장 적용안	자재 배치 모델 최적안	
		직선 운반 거리	실제 운반 거리
운반 거리(m)	8,936	5,359	4,537
운반 시간(분)	446.8	267.93	226.85

5. 결론

최근 건축물의 크기와 면적이 증가하고, 기능과 설비가 다양하고 복잡해지면서 마감공사의 비중이 증가하고 있다. 이에 따라 건축 현장에서는 건물 내 자재 이동 및 운반 규모가 증가하여 작업 생산성에 부정적인 영향을 주고 있으나, 작업층 레이아웃 계획 연구에 대한 관심과 노력은 부족할 실정이다. 따라서 본 연구에서는 작업층 내 마감자재 배치 최적화 모델을 개발하였다. 그리고 케이스 스터디를 실시하여 최적화 모델과 프로세스의 적용성을 검토하고, 기존 방법론과의 비교/분석을 수행하였다.

본 연구에서 제안하는 자재 배치 최적화 모델의 프로세스는 다음과 같다. 첫째, 자재 배치가 가능한 공간을 구분하기 위해 가용 공간을 모델링한다. 둘째, 자재 이동 및 운반 시간을 산정하기 위해서 출발 지점과 도착 지점, 운반 물량, 운반 횟수 그리고 운반 경로 등을 모델링한다. 셋째, 유전 알고리즘을 활용하여 작업층 내 작업자에 의한 자재 이동 및 운반 시간을 최소화할 수 있는 최

적 자재배치 계획을 도출한다. 해당 최적화 모델을 고층 주상복합 아파트 마감공사에 적용하여 비교/분석한 결과는 다음과 같다. 첫째, 작업층 마감자재 배치 최적화 모델은 비생산적인 작업을 최소화함으로써 작업 생산성을 향상시킬 수 있다. 사례 평면 내 석고보드 이동 및 운반 소요 시간은 총 작업 시간의 31%에 해당하였으며, 이 중 49%가 자재 배치 최적화를 통해서 제거되었다. 둘째, 실제 운반 거리 산정 개념은 자재 배치 최적화 결과의 신뢰성을 높인다. 사례 평면의 경우 직선 거리 개념을 적용한 최적화 결과는 실제 최적안보다 불필요한 자재 이동 및 운반거리를 18%나 증가시켰다. 즉, 평면 내 장애물의 크기와 수가 증가할수록 실제 운반 거리 개념을 적용한 최적화 결과가 직선 운반 거리 개념을 적용한 결과보다 더 신뢰성이 높을 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같은 측면에서 기존 연구와의 차별성을 찾을 수 있다. 첫째, 자재 패킷을 기준으로 작업을 분할하였다. 그리고 이 방법을 마감공사 석고보드 설치 작업에 적용하여 모델의 효용성을 확인하였다. 둘째, 실제 운반거리 산정 방법을 모델에 활용하여 자재를 운반하는 경로를 좀 더 현실적으로 표현하였다. 이러한 측면에서 본 연구는 작업층 내 자재 배치를 최적화하기 위한 효율적인 방법을 제시하고 적용성을 확인하였다는데 큰 의미가 있다.

따라서 본 연구에서 개발한 최적화 모델은 고층 주상복합 주거세대 마감공사 석고보드 설치 작업에 적용하였다. 해당 모델을 일반화하기 위해서는 전체 마감공사 작업에 대한 사례 적용 및 비교분석이 필요하다. 즉, 다양한 건축 용도, 평면, 공중, 자재 등에 대한 추가적인 연구를 통해서 적용 범위를 확대할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설기술교통평가원에서 위탁 시행한 첨단도시개발사업(과제번호 : 09첨단도시A01)에 의해 수행한 결과의 일부임.

참고문헌

- 문병로 (2008). 쉽게 배우는 유전 알고리즘, 초판, 한빛미디어, 서울, pp.23~34
- Alarcon, L. (1993). Modeling waste and performance in construction. *Lean Construction*, A.A. Balkema, The Netherlands, pp. 51-66.
- Akinci, B., Fischer, M. and Kunz, J. (2002). "Automated Generation of Work Space Required by Construction Activities." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), pp.306-315.
- Cheng, M. Y., and O' Connor, J. T. (1996). "ArcSite: Enhanced GIS for construction site layout" *Journal of Construction Engineering & Management*, 122(4), pp. 329-336
- El-Rayes, K. and Said, H. (2009). "Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(2), pp. 119-127.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, U.S.A., pp. 1-24.
- Guo, S. (2002). "Identification and Resolution of Work SpaceConflicts in Building Construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), pp. 287-295.
- Hegazy, T., and Elbeltagi, E. (2009). "EVOSITE: Evolution-Based Model for Site Layout Planning." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(3), pp. 198-206.
- Jang, H. (2003) "Construction Materials Allocation with Genetic Algorithm." *Architectural Research*, 5(1), pp.77-83.
- Jang, H. Lee, S., and Choi, S. (2007). "Optimization of floor-level construction material layout using Genetic Algorithms." *Automation in Construction*, 16, pp.531-545.
- Li, H., and Love, P. E. D. (1998). "Site-level facilities using genetic algorithms." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(4), pp.227-231.
- Li, H., and Love, P. E. D. (2000). "Genetic search for solving construction site-level unequal area facility layout problems." *Automation in Construction*, 9, pp.217-226.
- Rilett, L. R. and Park, D. (2001). "Incorporating uncertainty and multiple objectives in real-time route selection." *Journal of Transportation and Engineering*. 127(6), pp.531-539.
- Sanad, H. M., Ammar, M. A., and E. Ibrahim, M. (2008). "Optimal Construction Site Layout Considering Safety and Environment Aspects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(7), pp.536-544.
- Serpell, A., Venturi, A., and Contreras, J. (1995). Characterization of waste in building construction projects. *Lean Construction*, A.A. Balkema, The Netherlands, pp.67-77.
- Thomas, H. R., Horman, M. D., de Souza, U., and Zavøski, I. (2002). "Reducing variability to improve performance as a lean construction principle." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(2), 144-154.
- Tommelein, I. D., Levitt, R. E., and Hayes-Roth, B. (1992). "Sight Plan model for site layout." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(3), pp. 220-231
- Zouein, P. P., and Tommelein, I. D. (1999). "Dynamic Layout Planning Using a Hybrid Incremental Solution Method." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(6), pp.400-408.
- Zouein, P. P., and Tommelein, I. D. (2001). "Improvement Algorithms for Limited Space Scheduling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), pp.116-124.
- Zouein, P. P., Harmanani, H., and Hajar, A. (2002). "Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), pp.143-151.

논문제출일: 2010.08.09
 논문심사일: 2010.08.13
 심사완료일: 2010.11.24

Abstract

Unnecessary transportation of resources are one of the major causes that adversely affect construction site work productivity. Therefore, layout related studies have been conducted with efforts to develop management technologies and techniques to minimize the resource transportation made at site-level. However, although the necessity for floor-level layout planning studies has been increasing as buildings have become larger and floors have become more complicated, studies to optimize the transportation of materials inside buildings are currently not being actively conducted. Therefore, in this study, a model was developed using genetic algorithms(GA) that will enable the optimization of the locations of finishing materials on the work-floor. With the established model, the arrangement of diverse materials on complicated floors can be planned and the optimized material layout planning derived from the model can minimize the total material transportation time spent by laborers during their working day. In addition, to calculate travel distances between work sites and materials realistically, the concept of actual travel distances was applied. To identify the applicability of the developed model and compare it with existing methodologies and analyze it, the model was applied to actual high-rise residential complexes.

Keywords : *Layout Planning, Space Management, Genetic algorithm, Finishing work*
