

공정별 여유시간과 야적장 규모를 고려한 건설자재의 현장 재고관리 방안 연구

김용환* · 윤형석** · 이재희*** · 강인석****

Kim, Yong Hwan*, Yoon, Hyeong Seok**, Lee, Jae Hee***, Kang, Leen Seok****

On-site Inventory Management Plan for Construction Materials Considering Activity Float Time and Size of a Stock Yard

ABSTRACT

The inventory of many materials requires a large storage space, and the longer the storage period, the higher the potential maintenance cost. When materials are stored on a construction site, there are also concerns about safety due to the reduction of room for movement and working. On the other hand, construction sites that do not store materials have insufficient inventory, making it difficult to respond to demands such as sudden design changes. Ordering materials is then subject to delays and extra costs. Although securing an appropriate amount of inventory is important, in many cases, material management on a construction site depends on the experience of the site manager, so a reasonable material inventory management plan that reflects the construction conditions of a site is required. This study proposes an economical material management method by reflecting variables such as the status of the preceding and following activities, site size, material delivery cost, timing of an order, and quantity of orders. To this end, we set the appropriate inventory amount while adjusting related activities in the activity network, using float time for each activity, the size of the yard, and the order quantity as the main variables, and applied a genetic algorithm to this process to suggest the optimal order timing and order quantity. The material delivery cost derived from the results is set as a fitness index and the efficiency of inventory management was verified through a case application.

Key words : Material management, Genetic algorithm, Material transportation cost, Activity float time

초 록

많은 자재의 재고를 위해서는 넓은 야적공간이 요구되며, 보관기간이 길어짐에 따라 유지비용이 증가하고, 자재를 건설 현장에 적치할 경우 이동 불편과 작업공간 부족으로 안전사고가 우려된다. 반면 자재를 확보하지 못한 건설 현장은 재고가 부족하여 설계변동 등의 예상치 못한 수요 발생 시 대응이 어렵고 공기 지연 발생과 잦은 주문으로 인해 주문 비용이 증가할 수 있다. 이렇듯 적정재고량의 확보는 중요한 요소임에도 불구하고 건설 현장의 자재관리는 많은 경우에 현장관리자의 경험에 의존해 운영되는 사례가 많으므로 현장의 공정 조건이 반영된 합리적인 자재 재고관리 방안이 필요하다. 본 연구는 선행행 공정 현황, 야적장 크기, 자재 운반비, 주문 시기, 주문량 등과 같은 현장 조건을 반영하여 경제성 있는 자재관리 방법론을 제안한다. 이를 위해 공정별 여유시간, 야적장의 크기, 주문량을 주요 변수로 하여 공정표에서 부속공정을 조정하면서 적정재고량을 설정하고, 이 과정에 유전알고리즘을 적용하여 최적화된 주문 시점 및 주문량을 제시한다. 결과를 통해 도출된 운반비는 적합도 지표로 설정하고 사례적용을 통한 재고관리의 효율성을 검증한다.

검색어 : 자재관리, 유전알고리즘, 자재 운반비, 여유시간

* 경상국립대학교 토목공학과 대학원 석사졸업 (Gyeongsang National University · eastyong@nate.com)

** 경상국립대학교 토목공학과 대학원 석사졸업 (Gyeongsang National University · yhsuk1994@naver.com)

*** 정회원 · 경상국립대학교 토목공학과 대학원 박사과정 (Gyeongsang National University · akfn1614@gmail.com)

**** 종신회원 · 교신저자 · 경상국립대학교 토목공학과, 공학연구원 교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · Lskang@gnu.ac.kr)

Received March 14, 2022/ revised May 11, 2022/ accepted September 28, 2022

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설프로젝트에서 자재와 관련된 비용은 원가 구성비 측면에서 전체 공사원가의 40 % 내외를 차지하고 있어 효과적인 건설 프로젝트 관리와 직결된다(Lee, 2004). 자재의 효율적 재고관리는 자재 비용을 절감할 수 있는 요소가 되고, 현장에서 자재의 효율적 관리를 위한 자재 재고관리는 주문 시기와 주문량을 대상으로 관련 비용합수들을 최적화시키는 의사결정의 한 범주로 이해할 수 있다(Jung et al., 2006). 현장에서 자재 주문량이 많을 때는 물량 조달이 어렵고 재고유지비가 증가하며 많은 야적 공간이 요구된다. 또한 자재 보관기간의 증가로 인해 유지비용이 증가되고 현장 내의 많은 자재 적재는 작업공간 부족, 현장 안전사고 등의 원인이 될 수 있다. 반면에 도심지와 같은 야적공간이 협소하여 충분한 자재의 재고량을 확보하지 못할 경우에는 설계변경으로 예상치 못한 수요가 발생할 때 대응이 어려워 공기 지연이 발생할 수 있다. 자재 주문시점도 시기가 적절치 않은 주문과 잦은 주문은 부가적 비용이 증가할 수 있다.

이와 같은 건설 현장의 특성으로 유동적인 주문 방법과 적정재고수준을 결정하고 관리하는 것은 용이하지 않은 사안이다. 실무적으로 시행하는 통상적인 자재 조달업무는 공사 일정 정보가 충분히 고려되지 않고 소요 수량 정보중심으로 업무가 수행되는 사례가 많으며, 필요 자재의 주문 시기 선정은 주로 실무자의 직관 및 경험에 의존하여 이루어지고 있다.

따라서 자재의 적정 주문 시점과 경제적 주문량을 결정해 주는 알고리즘을 제시하여 경험이 부족한 실무자에게 합리적인 주문 방법을 제시하는 의사결정 지원 모델이 요구된다. 본 연구는 합리적인 자재의 재고관리를 위해 현장 야적공간을 고려한 적정 주문량과 주문 시점을 제공하는 방법론을 제시하고 있다. 이를 위해 유전알고리즘을 적용하여 일정 조정을 통한 필요 자재량 조절과 한정된 야적공간 및 운반비를 고려하여 보다 경제적인 자재의 재고관리 방법을 제공하고자 한다. 연구에서 적용한 자재는 단일자재를 대상으로 하였으며, 연구 결과는 비교적 경험이 부족한 관리자에게 현장 여건을 고려한 자재 재고관리에 유용한 도구가 될 수 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 한정된 야적공간에서 건설프로젝트의 일정을 고려한 자재주문량과 주문시점을 제안하고 있다. 적정재고를 관리하는 방법에 대한 이론과 유전알고리즘에 대한 이론을 고찰하고, 여유공정의 일정을 조정하여 필요한 자재량을 조절하여 운반비를 고려한 주문량과 주문시점을 도출하는 방법을 제시한다. 이를 통하여 현장 여건과 유사한 사례를 생성하여 경제적인 주문량과 주문시점을 도출하고 결과를 도출하여 향후 과제와 한계점을 제시한다.

2. 이론적 고찰

2.1 국·내외 연구 동향

자재관리 시 적정 주문량, 주문 시기 산정은 경제적인 주문을 위해 중요한 사항이다. Tommelein and Weissenberger(1999)는 플랜트 건설과 도심지 공사의 철골 공중에 대해 분석하고 도심지 공사의 적시 생산을 적용하여 생산성을 향상시킨 바 있다. Kim (2014)은 여러 가지 자재 주문량을 결정하는 모델들을 비교분석하여 가장 적합한 방식을 찾고 이에 의해 적정 주문량을 결정하고 재고 비용을 분석하는 방법에 관한 연구를 진행하였다. Kim et al.(2004)은 락 sizing(lot sizing)결정 기법을 활용 재고관리 프로그램을 제안하였다. Jacobs et al.(2005)은 철근 공중에서 자재 재고수준과 노동 생산성의 비교를 통해 두 관계를 분석하고 적정 자재 재고수준을 제시하였으며, Jung et al.(2006)은 건설 현장의 철근 공중의 적정 자재 재고관리 방안에 관한 연구를 진행하였다. Im et al.(2008)은 원자재 조립 가공과정을 갖는 건설공사 공중의 적정 재고관리 방안 제시하고 이를 통해 평균 재고량과 재고유지비용을 절감하는 연구를 진행하였다. Lee et al.(2007)은 철을 대상으로 야적장의 크기를 고려하여 고정간격 주문 시스템하에 경제적 주문량을 산정하였다. 그 결과 철근의 적재량과 리드타임 동인의 수요율과 관계를 확인하였다. 또한 Lee et al.(2008)은 자재 내역서 및 설계도면을 이용하여, 작업 위치정보가 포함된 자재를 구분하고 각 단위 작업별 물량을 산출하여 자재 주문시점을 시스템화해 정확한 수량을 계산할 수 있음을 보였다. Yun et al.(2011)은 일일 수요량의 변동성을 고려한 주문시점재고량 산정 및 최대 가용 야적장을 고려한 목표수준재고량을 산출하여 경제적인 주문량을 산정하는 프로세스를 제안하였다. Lee(2012)은 철근 공중에 대해 적정 재고관리 방안을 제시하고, 사례적용을 통해 현장에 발생할 수 있는 수요량 및 리드타임의 변화를 고려한 월별 적정재고 수준 및 적정 주문량을 제시하였다. Alanjari et al.(2015)는 유전알고리즘을 적용하여 건설장치의 복합자재에 대한 배치 최적화 프로그램을 개발하였으며, 자재에 태그를 부여하여 관리자의 적재과정을 효율적으로 하고, 자재관리의 편의를 개선했다.

건설 현장의 경우 주로 철골이나 철근 공중 등 단일자재를 대상으로 연구가 진행되었으며, 월별 적정 재고 수준과 주문량을 산정하고 야적장의 여유 공간을 고려한 연구들이 진행되었다. 하지만 대부분 제조업의 이론을 기반으로 건축공사의 반복적인 작업에 관한 사례 연구가 많고, 자재 수요량의 변동성을 고려한 적정 자재 주문 시점의 파악 등에 관한 연구는 다소 부족했다. 즉, 이러한 연구는 초기 공정계획과 사전 물량산출이 정확하다는 전제조건이 필요하나, 실제 현장의 변화되는 공정 일정을 만족시키기에는 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 초기공정계획과 그에 따른 자재 물량을 기초로, 현장의 실제 공정 일정과 연계된 적정 자재 재고관리 방법을 제시한

다. 수시로 변화되는 공정 변화조건에서 최적화된 자재 공급계획을 파악하기 위해 유전알고리즘을 적용하였다. 이 과정에서 여유시간 내에서 부속공정을 조정하면서 그에 따른 자재 주문량의 운반비를 적합도로 활용하여 적정 주문량과 주문 시점 등을 탐색하는 방안을 제시하고 있다.

2.2 자재 재고관리 개요

재고관리란 생산을 쉽게 하거나 수요를 신속하고 경제적으로 대응할 수 있도록 재고를 최적의 상태로 관리하는 절차를 의미한다. 재고관리를 위해서는 경제적 발주량(EOQ: Economic Order Quantity)과 재발주 시점(ROP: Reorder Point) 등을 결정해야 한다(Hyun et al., 2003). 자재 조달의 대표적인 방법은 MRP (Material Requirement Planning: 자재소요계획)과 JIT (Just IN Time: 적시생산) 기법이 있다. 자재소요계획은 제품의 생산 수량 및 일정을 토대로 생산에 필요한 자재의 소요량 및 소요시기를 역산하여 조달계획을 수립하고 일정 관리를 효율적으로 할 수 있는 방법이다. 자재소요계획의 장점은 필요 자재량 및 발주시기를 파악하여 일정을 조정하기 편리하고 변동에 따른 주문변경이 가능하다. 적시생산은 필요 자재를 필요한 시간과 양에 맞게 지정된 장소로 자재를 조달하는 방법으로 후속 공정이 인수해 간 수량만큼 선행공정에서 생산하여 보충해주는 방식이다. 공정표를 통해 일정에 계획된 자재를 소모하고, 비반복적인 작업과 계획의 변경이 잦은 건설공사의 특성에서는 자재소요계획 방법이 적절한 방법이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 자재소요계획에 맞는 자재주문 체계를 제시한다.

현장에 사용된 자재는 종류가 다양하며 수량이 많아 자재관리는

시공 시 공정과 품질확보에도 영향을 주어 중요한 관리 요소이다. 자재관리계획은 크게 자재 수급계획, 조달단계, 구매단계로 구분된다. 자재 수급계획은 시공계획과 시방서에 따라 자재의 품목, 품질, 규격, 운반 등 경제적으로 수급이 되도록 계획한다. 조달단계에서는 자재의 종류에 따라 자재의 파손이나 변질을 유의해야 하며, 경제적인 조달을 위해 운반 거리 및 적재 방법 등을 고려한다. 구매단계에서는 사용 목적에 맞는 품질의 자재를 필요 수량만큼 적정 시기에 최소한의 가격으로 매입하는 것으로 시공 시 예정되지 않은 긴급상황에 자재를 구매할 경우 높은 비용이 발생하므로 이를 고려해야 한다. 본 연구에서는 유전알고리즘을 이용하여 부속 공정의 필요량을 분산시키는 조절 기능과 한정된 야적공간에서 주문할 수 있는 최적의 시점 및 주문량을 선정하는 모델을 제시한다.

3. 자재 주문 시점과 주문량 산정

3.1 야적공간을 고려한 자재관리 방법

건설 현장은 자재 주문시스템의 불확실한 수요에 대해 공기 지연 방지, 소량 반입의 어려움과 원자재 가격 상승에 따른 비용증가를 대비하여 고정주문 간격 시스템을 사용하고 있다. 현장에서는 자재 종류와 규모에 따라 차이가 있으나 일반적으로 주문 간격을 1개월로 하여 필요물량을 조달하고 있다.

합리적인 자재의 재고관리를 위해서는 자재 소요량 외에 공정표의 연관 일정이 동시에 고려되어야 하므로, 본 연구는 야적장 규모를 고려한 공정을 구성하여 최적의 주문 시기 및 주문량을 제시한다. 적정 주문량과 경제적 주문 시점을 결정하는 프로세스는 Fig. 1과 같다.

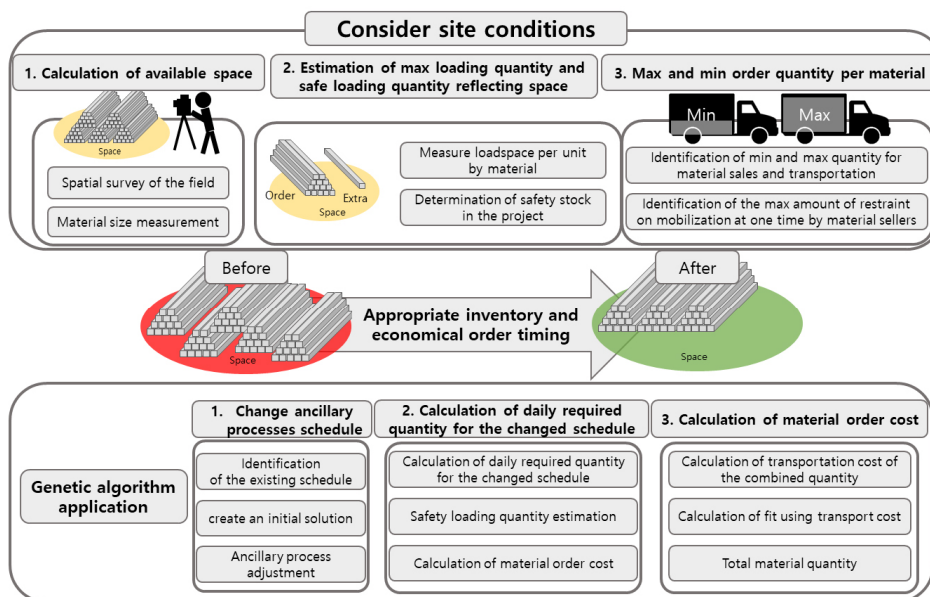


Fig. 1. Process for Optimal Material Order Point and Economic Order

공정표에 맞춰 일정을 진행하기 위해서는 야적장의 한정된 적재량보다 더 많은 자재를 적재할 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 부속 공정을 조정하여 야적공간 내에서 적재가 가능한 자재 물량을 주문하는 방법을 찾고 경제적인 방법을 찾는 과정이 필요하다. Fig. 1과 같이 적정재고 및 경제적 주문량을 산정하는 방법으로 크게 현장 조건을 고려하는 단계와 현장 정보를 기반으로 유전알고리즘을 수행하는 단계로 나누어 기술할 수 있다.

현장 조건 반영을 위해 우선 야적장의 크기를 측정하고, 자재별 크기를 측정하여 야적장 크기에 적재할 수 있는 최대량을 계산한다. 적재 가능량이 결정된 후 공사에 필요한 자재 필요량을 고려하여 실무자가 안전재고량을 결정한다. 마지막으로 자재 1회 최대, 최소 주문량을 파악하고 1회 주문 시 현장에 동원할 수 있는 자재 최대 동원량을 파악한 후, 현장 정보를 기반으로 유전알고리즘을 수행한다. 기존공정표를 분석하고 초기 해를 생성하면 생성된 해에 따른 부속 공정의 일정을 조정한다. 부속 공정의 변경된 일정에서 1일당 자재 물량을 계산하고 관리자가 지정한 안전재고량을 통해 주문하게 될 자재 물량이 합산된다. 마지막으로 합산된 물량에 따라 운반비가 계산되고 운반비는 적합도를 판별하는 자료로 사용된다.

3.2 최적화 주문 시점의 고려 요소 및 방법

연구에서는 한정된 범위 내에 관리할 수 있는 적정 자재량과 경제적인 운반비를 고려하여 이 두 가지를 충족하였을 때 최적화 주문 시점이라 정의하며, Fig. 2와 같은 방법으로 주문 시점을 결정하게 된다.

Fig. 2는 야적공간을 고려한 자재의 주문 시점 및 주문량을 결정하기 위한 과정을 나타내고 있다.

초기공정표에 따라 공중에 필요한 물량을 계산한다. 이후 실무자의 공정별 물량의 투입 시기를 결정하고, 투입 시기에 적합한 자재를 종류별로 나누어 계산한다. 또한 공중별 모든 물량을 합하여 하루 필요물량을 계산한다. 야적공간의 규모를 초과하는 자재 주문량에 대해서는 공기에 영향을 미치지 않는 부속 공중의 일정을 조정하여

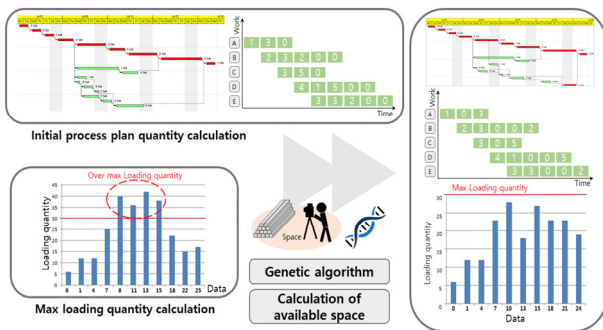


Fig. 2. Optimal Order Point and Economic Order Considering Stock Yard Size

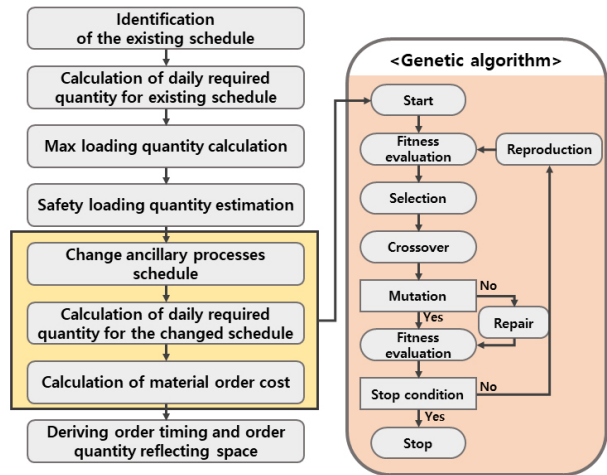


Fig. 3. Application of Genetic Algorithm Method for Optimal Order Point and Economic Order

1일 필요 자재량을 조절한다. 그리고 측정된 현장 야적장의 적재 가능 물량을 계산하며, 주문 자재량에 따른 운반비 또한 계산하여 야적공간을 고려한 주문 시점과 주문량을 결정한다.

작업에 필요한 물량과 현장의 야적조건을 고려한 자재 주문 시점 및 주문량 결정을 위해 부속 공정의 변경된 일정의 필요물량 계산 및 자재 주문 비용 계산을 위해 유전알고리즘을 사용한다. 연구에서는 안전재고 물량을 앞으로 진행될 공중에 대한 1일 필요물량으로 정의한다.

Fig. 3은 유전알고리즘을 사용하는 절차로서 필요 물량 및 자재 주문 비용을 최적화하기 위해 적용되었다. 부속 공정의 정보를 통해 해를 생성하고, 선택, 교배, 변이 및 수선회 과정을 수행한다. 수선회 과정은 교배 및 변이에서 발생하는 총 여유시간을 초과하는 오류를 수정하는 과정에 사용된다. 적합도 산정의 경우 공정표에서 자재의 총운반비와 비교하여 가장 경제적인 경우를 찾도록 한다. 이러한 반복 수행 결과를 통해 적합도가 가장 높은 경우를 찾고 적정 주문 시점과 경제적 주문량으로 채택된다.

3.3 한정된 야적공간에서의 주문시점과 주문량 산정

현장의 야적조건을 고려하여 주문 시점과 주문량을 결정하기 위해 연구에서는 부속 공중의 일정 조정 방법과 사용자가 지정한 안전재고량을 유지하는 주문량 및 주문 시점을 결정하는 방법으로 분리하였다. 부속 공중의 일정을 조정하기 위해 공중의 이름, 기간, 공중별 선·후행 관계 정보를 가지는 공정표 작성이 필요하다. 공정표 작성 후 전진 계산법을 통한 주 공정 및 부속 공정의 총 여유시간을 계산하고 공중에 필요한 물량과 투입 시기를 결정하여 1일 필요물량을 함께 계산한다.

Fig. 4는 기존공정표에 대한 필요물량과 부속 공중을 조정한

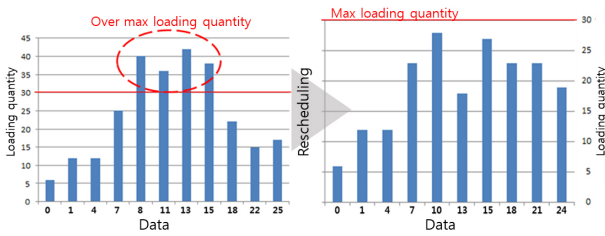


Fig. 4. Comparison of Total Material Amount between Initial Plan and Revised Plan

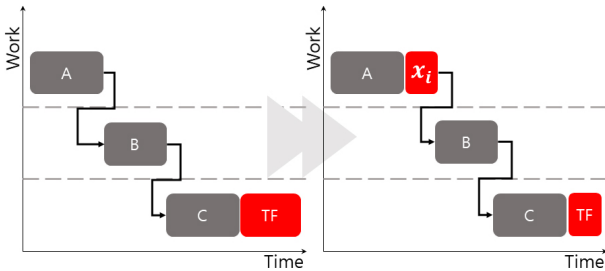


Fig. 5. Float Relationship of Predecessor and Successor

후의 필요물량을 비교한 그래프로 야적장의 최대 적재 가능량을 기준으로 분석한 것이다. 가로축은 날짜 변화를 나타내고 세로축은 현장의 자재 누적량을 나타낸다. 한정된 야적공간에 대해 공정표에서 필요물량을 분석하였을 때, 특정 부분 야적공간을 초과하면 부속 공정의 조정을 통해 야적공간 범위 내 자재의 필요량을 조절할 수 있다. 부속 공정의 조정은 전체 공기에 영향을 주지 않는 범위 내에서 이동하여야 하며 선·후행 관계에 따른 여유시간의 변화를 고려해야 하므로 다음의 식을 이용한다.

$$Sdate_i + x_i = S' date_i \quad (1)$$

$$0 \leq (x_i \sim Random) \leq TF_i - P_i \quad (2)$$

$$P_{i+1} = x_i + P_i^* \quad (3)$$

여기서, $Sdate_i$: i 공종의 시작일자
 $S' date_i$: i 공종의 새로운 시작일자
 x_i : 범위 내 무작위로 생성된 값 (= 정수)
 TF_i : i 공종의 총여유시간
 P_i : i 공종의 선행관계 값
 P_i^* : i 공종에 대한 선행공종의 선행관계 값

Eq. (1)은 선행 공종에서 여유시간 사용 시 후속 공종의 시작 시간이 선행 공종의 여유시간만큼 변화하는 것을 나타내는 식이며, Fig. 5와 같이 선행 공종의 여유시간 x_i 만큼 후속 공종의 시작 시간은 지연되는 것을 나타낸다.

Date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	[1] ∴ Date 1-3 : 5 ≤ 14 (4+2+8) ≤ 15 (○)
A Task	4	2	5	5	4	2	1	1	2	[2] Date 4-6 : 15 ≤ 19 (8+9+2) (×) Date 4-5 : 15 ≤ 17 (8+9) (×) ∴ Date 4-5 : 5 ≤ 15 (8+7) ≤ 15 (○)
B Task			3	3	5					
Total	4	2	8	8	9	2	1	1	2	[3] Date 6-8 : 4 (2+1+1) ≤ 5 (×) ∴ Date 6-9 : 5 ≤ 8 (2+1+1+2) ≤ 15 (○)

① ② ③

Conditions
 Safety stock : 3 days
 Min order quantity : 5, Max order quantity : 15

Fig. 6. 3 Details of Each Order Method Considering the Amount of Safety Stock

Eq. (2)는 i 공종의 여유시간 사용 범위를 나타내며 i 공종의 여유시간은 총 여유시간 TF에서 i 공종의 선행 관계 값을 고려하여 여유시간 범위를 산정한다. Eq. (3)은 선행 공종이 다수일 경우, 선행 공종들의 일정 이동 날수를 고려하고 선행 공종들의 선행관계 값 P_i 값 중 종료일이 가장 늦은 선행 공종을 고려하게 된다.

자재 주문 시 고려사항은 1회 최대, 최소 주문량자료를 이용한다. 이는 자재업체의 1회 운반에 대한 최대, 최소량을 고려하기 위해 최대 주문량과 최소 주문량이 요구된다. 또한 원활한 공사 진행을 위해 현장에 미리 확보할 안전재고량을 고려한다. 안전재고량은 재고관리의 목적으로 일정이 지연 없이 원활하게 진행되기 위해 적절한 물량을 미리 확보하는 것이다. 따라서 안전재고량과 현장의 야적장 조건을 고려한 최대물량과 최대, 최소 주문량을 고려한다. 안전재고량을 고려한 주문 방법을 설명하기 위해 안전재고 기준량을 3일로 설정하고, 최소 주문량 5, 최대 주문량 15로 가정하여 3가지의 주문 방법으로 구분하여 Fig. 6과 같이 제시한다.

3.3.1 주문방법 1; 최소 주문량 ≤ 1회 주문량 ≤ 최대 주문량

초기 주문 시 3일에 대한 물량을 주문하게 되며 3일에 필요한 총량은 14(4+2+8)이고, 최대, 최소 주문량 범위 내의 값으로 14의 양만큼 주문한다.

3.3.2 주문방법 2; 1회 주문량 > 최대주문량

1회 주문량이 최대 주문량을 초과할 경우 최대 주문량 만큼을 주문한다. 이후 다음 자재 주문 시 부족한 물량과 안전재고량을 더한 값을 주문한다. 4-6일에 대한 자재 주문 시 주문량은 19(8+9+2)이며 최대 주문량은 초과한다. 이 경우 주문량을 모두 주문할 수 없고, 2일 작업에 필요 자재량 또한 17(8+9)로 최대 주문량을 초과한다. 이 경우 최대 주문량 15를 주문하며 나머지 부족한 자재의 경우 다음 주문에 포함하여 주문하는 것으로 한다.

3.3.3 주문방법 3; 1회 주문량 < 최소 주문량

1회 주문량의 값이 최소 주문량일 경우 안전재고량 이상을 주문한다. 이는 최소 주문량의 의미가 1회 주문에 필요한 최소한의 양을 의미하기 때문이다. 6-8일에 대한 주문의 경우 4(2+1+1)이며

최소 주문량 미만으로 주문이 불가하다. 따라서 예외적으로 안전재고량의 3일을 초과한 4일에 대한 $6(2+1+1+2)$ 만큼 주문한다.

만약 최소 주문량이 4라 가정하고 9일이 완공일이라 가정 시, 6~8일에 대한 물량뿐만 아니라 9일에 대한 물량 2를 포함한 값 $6(2+1+1+2)$ 을 주문하는 것으로 한다. 이는 최대 야적공간을 넘지 않는 기준을 충족하며 이후 남은 일정이 없기 때문이다.

3.4 한정된 야적공간에서 주문 시점과 주문량의 최적화

3.4.1 제약조건 및 공정의 분산

한정된 야적공간을 고려하기 위한 기본적인 제약조건으로 야적장 크기에 적합한 최대 적재가능량을 고려한다. 주문 시에 1회 최대, 최소 주문량을 제한하며 주문량에 따른 운반비 또한 다르다고 가정한다. 마지막으로 관련 공정의 일정 변동 시에 여유시간을 활용하여 연속해서 사용할 수 있는 점을 제약조건으로 하여 유전알고리즘을 사용하기 위한 사용자 입력값으로 설정한다.

3.4.2 부속 공정을 이용한 일정의 분산

한정된 야적공간을 고려한 자재 주문을 위해서는 공사에 필요한 자재의 양을 분산시켜 주문 및 보관을 최소화할 필요성이 있다. 따라서 여유시간을 갖는 부속 공정의 일정을 조정하여 진행하였다. 작업이 분산되는 다양한 경우를 고려하기 위해 유전알고리즘에서 해를 생성하였으며 Eq. (4)와 같이 생성한다.

$$[x_i, N_i, C] \tag{4}$$

여기서, x_i : i 해가 가지는 여유시간

$$0 \leq x_i \leq TF_i - P_i^*$$

$$P_i = x_i + P_i^*$$

TF_i : i 공종의 여유시간 값

P_i : i 공종의 선행관계 값

P_i^* : i 공종의 선행공정 선행관계 값

N_i : 여유시간을 사용할 공정일

$$1 \leq N_i \leq D_i$$

D_i : i 공종의 공기

C : N_i 로 부터 연속될 여유시간의 길이

$$1 \leq C \leq x_i$$

x_i 는 i 해가 가지는 여유시간으로 선-후행 관계를 고려한 총 여유시간에 선행 공정에서 사용한 여유시간의 차이 값과 0 사이의 값으로 계산될 수 있다. i 공종의 선행관계 값은 공정의 여유시간과 선행공정의 선행관계 값을 합산하여 구할 수 있다. N_i 는 여유시간을 사용할 공정일로 공정 일정 중 몇 번째 공정일 앞에 여유시간을 사용할지를 나타내는 값이다. C 값은 N_i 로 부터 연속될 여유시간의 길이를 나타내는 값으로 부속 공정을 좀 더 다양하게 조정할 수 있다. C 값은 1과 i 해가 가지는 여유시간 사이의 값을 가질 수 있다.

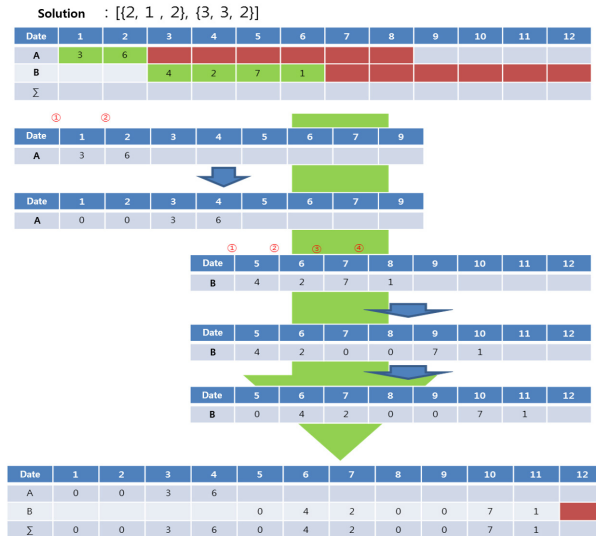


Fig. 7. Creation of Solution Using Genetic Algorithm

해의 의미와 해 생성 방법은 Fig. 7과 같으며 공정은 총 3개, 총 6일의 여유시간을 가지고 있다.

첫 번째 개체의 생성 원리로 $0 \leq x_i \leq 6$ 의 범위에서 무작위로 A 공정에서 사용될 여유시간을 생성한 후 $1 \leq N_i \leq 2$ 의 범위에서 무작위로 여유시간을 사용할 날짜를 생성한다. 마지막으로 $1 \leq C \leq 2$ 범위에서 무작위로 연속될 일수를 생성한다.

생성된 해는 $[\{2, 1, 2\}, \{3, 3, 2\}]$ 이며, $\{2, 1, 2\}$ 가 가지는 의미는 A 공정에 대해 총 2일의 여유시간을 사용하고 첫째 날 앞에 2일을 부여한다는 의미이다. 따라서 기존 1일에 시작하는 A 공정이 부여된 여유시간이 지난 3일에 작업을 시작하게 된다.

$\{3, 3, 2\}$ 의 경우 B 공정에 대한 총 3일의 여유시간을 사용하며 세 번째 날 3일의 여유시간 중 2일 부여하며 나머지 여유시간 1일의 경우 B 공정 시작 전에 사용하는 것을 기본 원칙으로 한다.

3.4.3 경제적인 운반비 계산

한정된 야적공간을 고려한 주문 시점과 주문량을 결정한 후, 변경된 일정 중 어떤 경우의 일정 변동이 가장 적합한지에 대한 문제를 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 운반비를 적합도로 선택하였다. 운반비는 운반할 자재 물량에 따라 비용이 달라진다. 예로 5 t, 10 t, 15 t 트럭에 대하여 1회 운반에 필요한 운반비는 다른 값을 갖는다. 기존 공정에 대한 운반비와 조정된 공정에 대한 총 운반비를 비교하여 적합도를 판단하기 위해 Eq. (5)를 생성하였으며, 결과값이 1보다 작으면 경제적인 해로 적합하며 1보다 크면 비경제적으로 부적합한 것으로 볼 수 있다.

$$Fitness = \frac{\text{변경된 일정의 총 운반비}}{\text{기존 일정의 총 운반비}} \tag{5}$$

3.4.4 새로운 일정 도출

주문 시점 및 주문량을 결정하였다면, 주문 방법 중 가장 적합한 경우를 찾기 위해 여러 경우의 일정 조정을 고려할 필요가 있다. 여러 경우의 수를 생성하기 위해 유전알고리즘을 이용한다. 유전알고리즘의 여러 교배 방법 중 다점 교배를 선택하였으며, 사용자가 1점 교배 또는 다점 교배를 사용할 수 있게 정의하였다. 1주일 또는 1달 이내 범위의 공정 시공 또한 가능하기 때문에 1점 교배도 사용 가능하다고 판단된다.

Fig. 8은 새로운 일정을 도출하기 위해 1점 교배를 나타낸 그림으로 A 공정과 B 공정에 대한 2개의 해를 교배하였다. 이때 교배의 방법은 0과 1 사이의 난수를 발생시켜 임계 확률을 설정하고 교배 점을 기준으로 선택하여 새 일정을 도출하는 것이다.

3.4.5 새로운 일정 도출을 위한 선택과 보존

새 일정을 생성하기 위해 기존 일정 중 임의의 일정을 무작위로 선택하고 생성한다. 일정 선택을 위한 방법으로 룰렛휠(Roulette wheel) 방법을 채택하였으며 Fig. 9와 같다.

선택연산을 위한 과정으로 생성된 해들의 적합도를 활용하여 새로운 적합도의 범위를 구한다. 이 과정을 위한 식은 Eq. (6)과 같이 각각의 적합도에 대한 역수를 계산하며 역수의 총합을 구한다. Eq. (7)에서 새로운 적합도 범위의 산정 기준을 정하기 위해 Eq. (8)을 사용하여 적합도의 범위를 구한다.

$$A' = \frac{1}{Fitness_A} \quad (6)$$

$$B' = \frac{1}{Fitness_B}$$

$$C' = \frac{1}{Fitness_c}$$

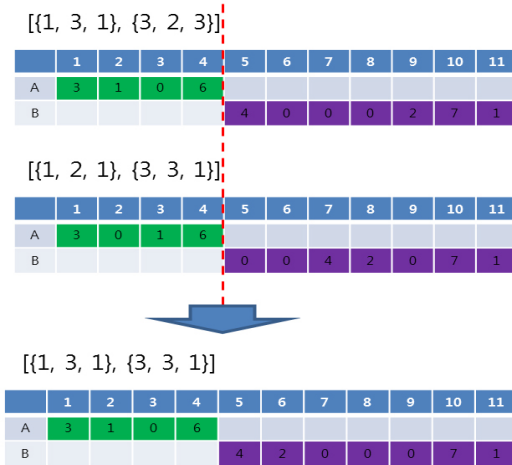


Fig. 8. Deduction of New Schedule Using Genetic Algorithm

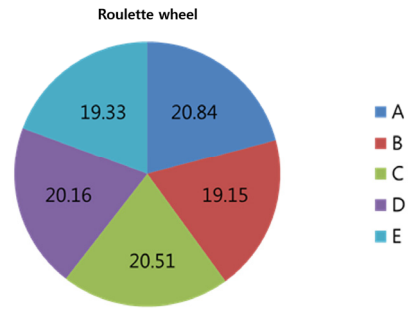


Fig. 9. Selection of Schedule for New Schedule Deduction

$$S = A' + B' + C' \quad (7)$$

$$A'' = \frac{A'}{S} \quad (8)$$

$$B'' = \frac{B'}{S}$$

$$C'' = \frac{C'}{S}$$

마지막으로 0과 1 사이의 난수를 발생시켜 선택된 값이 포함된 범위의 해를 선택하게 한다. 계산된 적합도 중 경제적인 주문 방법을 빠르게 도출하기 위해 유전알고리즘의 엘리티즘(Elitism) 방법을 채택하여 가장 경제적인 주문 방법이 도출될 일정을 보존하고 다음 세대에 새로운 해로 선택할 수 있게 하였다.

4. 사례적용 및 결과

4.1 사례적용개요

임의의 공정표를 선정하고, 현장의 여건과 제시된 방법론으로 도출된 결과에 의해 기존공정표 대비 주문 시점, 주문량의 변화 정도를 살펴보고 비용적인 측면에서의 효과를 검증한다. 공정표는 18개의 공종으로 구성하며 각 공종의 공사 시간, 여유시간, 선행 공종의 정보를 가지고 있다.

4.1.1 초기 공정계획정보

초기 공정계획에 대한 정보는 Table 1과 같으며 작성된 공정은 단일자재인 철근을 사용한다. 초기공정계획을 바탕으로 초기 일정표를 생성하면 Fig. 10과 같으며 주 공정이 표현되어있고 부속 공정을 파악할 수 있다.

4.1.2 현장 조건

자재를 보관할 수 있는 자재 최대 보관량은 40 t이며, 안전재고량은 3일, 자재의 1회 최소 주문량은 5 t, 최대 주문량은 20 t이다. 주문량에 따른 운반비의 경우 주문량 10 t 이하 \$500, 15 t

Table 1. Construction Schedule for Case Study

Activity	Duration	Float	Preceding	C.P	Start	Finish	Quantity (ton)	Daily material quantity (ton)
A	2	0	-	O	1	2	3	{2,1}
B	2	0	A	O	3	4	8	{3,5}
C	2	0	B	O	5	6	4	{2,2}
D	3	0	C	O	7	9	9	{4,2,3}
E	5	0	D	O	10	14	12	{1,3,2,1,5}
F	3	0	E	O	15	17	6	{1,3,2}
G	5	0	F	O	18	22	16	{4,2,6,1,3}
H	7	0	G, K	O	23	29	18	{2,4,1,3,2,5,1}
I	2	0	H	O	30	31	3	{2,1}
J	7	3	D	X	10	16	19	{3,2,4,1,3,2,4}
K	3	3	J	X	17	19	9	{3,2,4}
L	2	13	D	X	10	11	4	{3,1}
M	1	13	D	X	10	10	2	{2}
N	2	13	M	X	11	12	7	{4,3}
O	1	13	L, N	X	13	13	1	{1}
P	3	11	M	X	11	13	6	{2,2,2}
Q	2	11	P	X	14	15	4	{3,1}
R	3	11	O, Q	X	16	18	9	

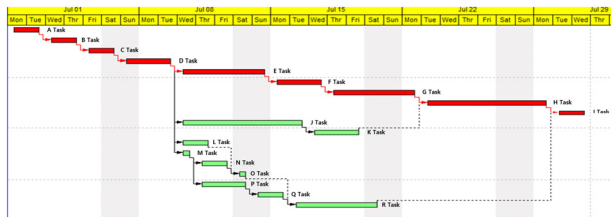


Fig. 10. Initial Schedule Plan

이하 \$700, 20 t 이하 \$1,000의 운반비가 소요되는 것으로 추정한다.

4.1.3 초기공정계획의 운반비

한정된 야적공간에서 1회 최대, 최소 주문량과 안전재고량을 유지하면서 주문할 때 운반비를 계산하였다. 결정된 일자별 자재 투입량을 도식화하면 Fig. 11과 같으며, 주문 시기와 주문량을 산정하면 다음 Table 2와 같다.

Table 2에서 주문시점과 주문시점별 주문량 비용, 적재되어있는 적재량을 알 수 있으며, 초기 일정에서의 주문 횟수는 총 11회이고, 15일의 주문은 적재공간의 적재량이 최대이므로 안전재고량만큼의 추가 주문은 불가하였다. 비용 측면에서는 \$7,900의 총 운반비용이 도출되었으며, 총 운반비용은 유전알고리즘에서 생성되는 해들의 적합성 판단에 사용된다.

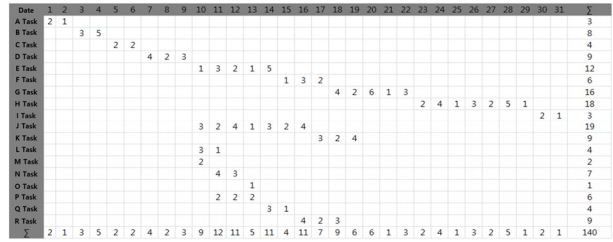


Fig. 11. Material Input Quantity of Initial Schedule

Table 2. Optimal Order Point and Economic Order Quantity of Initial Schedule

Order date	Order quantity (t)	Loading quantity in stock yard (t)	Delivery cost (\$)
0	6	6	500
1	9	13	500
4	9	13	500
7	20	26	1,000
8	16	40	1,000
11	20	36	1,000
13	20	40	1,000
15	15	40	700
18	6	19	500
21	8	14	500
24	11	16	700
Σ	140		7,900

4.2 유전알고리즘 연산

제시한 방법론을 이용하여 연관 공정의 일정을 고려한 초기해를 생성하고 경제적인 주문 시점과 주문량을 결정한다.

유전알고리즘 활용 시 여유시간을 가지는 공정 일정을 무작위로 변경하기 위해 돌연변이율 0.2 %, 교배 확률 100 %로 설정하여 경우의 수를 확장하였다. 이 과정을 통해 생성된 1개의 공정표를 인구수로 정의하고 총 6개의 공정표를 20번의 세대수로 거듭하여 최적의 해를 도출하도록 하였다. 이런 초기 매개변수의 경우 빠른 연산이 가능하도록 설정한 것이며, 이를 보완하기 위해 엘리트즘을 수행하여 우수한 해는 보존하도록 하였다.

생성된 초기세대 6개의 해들 중 좋은 결과값을 가지는 5번 해에 대해 결과를 분석하였다. Table 3은 유전알고리즘을 적용하여 생성된 초기세대 중 5번 해이며, Fig. 12는 이에 대한 일정표와 일자별 자재 투입량을 도식화 한 것이다.

연관 공정 중 일정이 길어진 해의 경우는 일정 사이에 여유시간이 포함된 일정이 작성되었기 때문이며, 일정조정 후 여유시간이 없어 R공정은 주 공정과 같이 적색으로 표시되었다. 또한 생성된 결과에 대한 주문시기와 주문량을 산정하면 Table 4와 같다. 이를 초기공정계획의 주문시점과 주문량으로 비교하였다.

Table 3. Creation of Initial Solution for No. 5 Solution

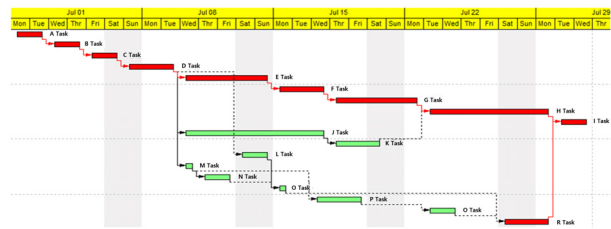
Activity	x_i	N_i	C
A	0	0	0
B	0	0	0
C	0	0	0
D	0	0	0
E	0	0	0
F	0	0	0
G	0	0	0
H	0	0	0
I	0	0	0
J	1	2	1
K	2	2	1
L	1	1	1
M	0	0	0
N	1	1	1
O	0	0	0
P	2	2	2
Q	3	1	2
R	5	2	2

Table 4. Order Timing and Order Quantity of Schedule for No. 5 Solution

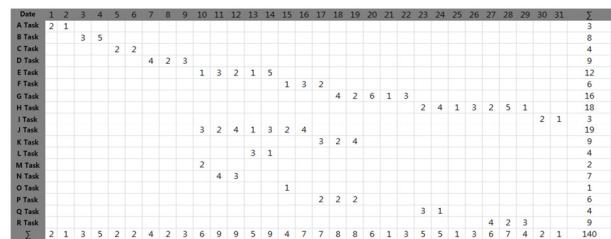
Order date	order quantity (t)	Warehouse loading quantity (t)	transport cost (\$)
0	6	6	500
1	9	13	500
4	9	13	500
7	20	25	1,000
9	20	40	1,000
12	20	36	1,000
15	19	37	1,000
19	13	20	700
22	10	20	500
25	14	23	700
Σ	140		7,400

Table 5. Transportation Costs, Fitness Index, and Selection Range of Case Study

Population	Total delivery cost	Fitness	1/Fitness	$q_{i-1}(k)$	$q_i(k)$
Solution 1	7,600	0.962	1.04	0.000	0.165
Solution 2	7,600	0.962	1.04	0.165	0.330
Solution 3	7,600	0.962	1.04	0.330	0.495
Solution 4	7,400	0.937	1.07	0.495	0.665
Solution 5	7,400	0.937	1.07	0.665	0.835
Solution 6	7,700	0.975	1.03	0.835	1.000
Σ			6.29		



(a) Schedule of No. 5 Solution



(b) Daily Material Input Plan of No.5 Solution

Fig. 12. Information of Input Material No. 5 Solution

주문 횟수의 경우 10회로 기존보다 1회 줄었으며, 총 \$7,400으로 \$500의 절감효과를 보였다. 또한 주문방법에 있어 최대 적재량을 초과하지 않아 적재 공간부족으로 인한 주문지연은 발생하지 않았다. 이와 같은 방법으로 생성된 해의 총 운반비와 적합도, 교배를 위한 룰렛휠 범위를 산정한 결과는 Table 5와 같다. 초기세대의 평균 적합도는 0.956이며 4번, 5번 해와 같이 부속공정에 대해

일정을 조정 시 총 운반비가 가장 저렴하였다.

초기세대에 생성된 해를 룰렛휠 방법을 통해 선택하고, 교배연산을 실시하여 새로운 해를 생성한다. 생성된 해는 초기해와 같은 과정을 거치며 초기 연산과정에 설정한 20개의 세대를 생성하기 위해 반복하여 최적의 해를 도출한다.

4.3 사례적용 결과

유전알고리즘을 반복 수행한 결과 총 20개 세대의 세대별 평균 적합도를 Table 6으로 나타냈으며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 13과 같이 0.924에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

0.924 값은 대상 사례에서 제시한 제어파라미터로 수행한 결과 생성된 해 중 가장 경제적인 해를 구할 수 있는 값을 의미한다. 사례를 대상으로 도출된 최적해는 Table 7과 같으며, 그 결과 Table 8과 같이 정리할 수 있다. 주문 횟수의 경우 10회, 총운반비 \$7,300으로 절감된 것을 확인할 수 있다. 따라서 한정된 공간에서 초기계획과 비교시 보다 효율적인 자재 재고관리가 가능한 것으로 판단된다.

Table 6. Average Fitness Index

Generation	Fitness	Generation	Fitness
1	0.956	11	0.952
2	0.966	12	0.95
3	0.964	13	0.935
4	0.964	14	0.933
5	0.962	15	0.93
6	0.962	16	0.928
7	0.962	17	0.926
8	0.96	18	0.924
9	0.958	19	0.924
10	0.956	20	0.924

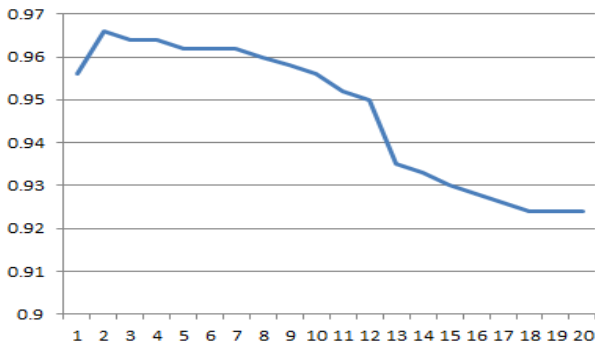


Fig. 13. Average Fitness Index Graph

Table 7. Optimal Solution by Each Activity

Activity	x_i	N_i	C
A	0	0	0
B	0	0	0
C	0	0	0
D	0	0	0
E	0	0	0
F	0	0	0
G	0	0	0
H	0	0	0
I	0	0	0
J	3	1	3
K	0	0	0
L	1	1	1
M	0	0	0
N	1	1	1
O	0	0	0
P	2	2	2
Q	3	1	2
R	5	2	2

Table 8. Results of Optimal Solution

Order date	Order quantity (t)	Warehouse loading quantity (t)	Transport cost (\$)
0	6	6	500
1	9	13	500
4	9	13	500
7	18	23	1,000
10	20	35	1,000
12	19	39	1,000
16	20	31	1,000
18	15	35	700
22	12	18	700
25	12	23	700
Σ	140		7,300

5. 결론

본 연구는 건설 현장에서 공정 연관관계와 한정된 야적공간을 고려하여 적절한 자재 주문 시기와 주문량을 결정하는 방법을 제시하였다. 적절한 주문 방법을 결정하기 위해 야적공간에 저장 가능한 최대량과 주문을 할 수 있는 최대, 최소량을 제한하였으며, 안전재고량을 고려하였다.

또한 공정계획과 일별 자재소요계획을 연동하고 공정별 필요 자재의 투입시기를 결정하여 유동적인 자재 주문이 가능하게 하였다. 다양한 연관 공정의 변동을 고려하기 위해 여유시간을 이용한 연관 공정의 조정과정에 유전알고리즘을 사용하였으며, 총운반비, 야적장 크기, 안전재고량 등을 주요 변수로 설정한 재고관리 최적화 절차를 제시하였다.

사례적용을 통해 운반비에 대한 적합도가 0.924 값을 가지는 경우 가장 경제적인 해가 도출되었으며, 기존의 재고관리 방식보다 주문 횟수가 1회 감소되었으며, 기존 총운반비 \$7,900에서 초기 세대는 \$7,400으로, 최종 해에 대한 총운반비는 \$7,300으로 분석되었다. 또한 세대를 거듭할수록 총운반비가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 설정한 다양한 공정별 여유시간과 야적장 규모 등의 현장 조건에 적합한 해를 도출할 수 있었다. 이로써 재고관리 절차에서 운반 횟수 및 총 운반비용이 절감되는 것을 확인하였으며, 경험이 부족한 관리자에게 현장 여건을 고려한 자재 재고관리 시 합리적이고 객관적인 주문 방법을 결정하는 데 적합한 방법론으로 활용성을 확보할 수 있었다. 연구에서는 단일 자재에 대하여 분석하였으므로, 복수 자재 적용과 야적장 크기에 따른 적재량을 정량화 시키는 방법에 대한 내용이 보다 합리적으로 분석될 필요가 있으며, 자재가 현장까지 도달하는 데 걸리는 시간, 리드타임을 고려한 분석방법론 등이 연계되면 보다 경제적인 자재 재고관리 방안이 될 수 있다.

References

- Alanjari, P., RazaviAlavi, S. R. and AbouRizk, S. (2015). "Hybrid genetic algorithm-simulation optimization method for proactively planning layout of material yard laydown." *Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, Vol. 141, No. 10.
- Hyun, B. E., Kim, C. E., Rho, J. P. and Lee, S. T. (2003). *New logistics management*, Yulgok Publishing House, Seoul, Korea (in Korean).
- Im, K. S., Han, S. H., Jung, D. Y., Ryu, C. K. and Choi, S. K. (2008). "Inventory management in construction operations involving on-site fabrication of raw materials." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, Vol. 9, No.1, pp. 187-198 (in Korean).
- Jacobs, F. R., Berry, W., Whybark, D. C. and Vollmann, T. (2005). *Manufacturing planning and control for supply chain management*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Jung, D. Y., Park, S. H., Kwak, S. N., Kim, H. K. and Han, S. H. (2006). "Optimal inventory management for rebar fabrication process in construction process." *Conference of the Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, pp. 702-707 (in Korean).
- Kim, S. H., Kim, G. H. and Kang, K. I. (2004). "A study on the effective inventory management by optimizing lot size in building construction." *Proceedings of the Korean Institute of Architectural Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 73-80 (in Korean).
- Kim, Y. H. (2014). *Economic inventory management methodology of construction project considering stock yard size*, Master's Thesis, Gyeongsang National University (in Korean).
- Lee, J. M., Yu, J. H. and Kim, C. D. (2007). "A economic order quantity (EOQ) determination method considering stock yard size." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, No. 9, pp. 549-552 (in Korean).
- Lee, J. M., Yu, J. H., Kim, C. D., Lee, K. J. and Lim, B. S. (2008). "Order point determination method considering materials demand variation of construction site." *Structure of the Proceedings of the Korean Institute of Architecture*, Vol. 24, No. 10, pp. 117-125 (in Korean).
- Lee, S. B. (2004). "A study on optimal lead time selection measures of the construction materials." *Proceedings of the Korean Institute of Architectural Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 105-110 (in Korean).
- Lee, S. H. (2012). *The research of optimal inventory management using simulation method*, Master's Thesis, Kwangwoon University, Seoul (in Korean).
- Tommelein, I. D. and Weissenberger, M. (1999). "More just-in-time: Location of buffers in structural steel supply and construction processes." *7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Berkeley, CA, USA, pp. 26-28.
- Yun, J. S., Yu, J. H. and Kim, C. D. (2011). "Economic order quantity (EOQ) determination process for construction material considering demand variation and stockyard availability." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, Vol. 12, No. 1, pp. 33-42 (in Korean).