

건설 산업용 판유리 운반을 위한 랙 설계

권경진 · 홍순도 · 김갑환[†]

부산대학교 산업공학과

Designing Racks for Transporting Flat Glass Products in a Construction Industry

Kyung Jin Kwon · Soondo Hong · Kap Hwan Kim

Department of Industrial Engineering Pusan National University

A glass product manufacturing company transports a large number of flat glass products from a manufacturing firm to a building construction site. The products are transported using specially designed racks, which assure fewer glass breakages during the deliveries. This study determines the sizes of the racks which minimize the total logistics cost including costs for rack purchasing, handling, transportation, and inventory costs. The determination of the rack size should consider tradeoff relationships between the amount of glasses piled in a rack and the number of racks loaded on a truck, and affects the required number of racks and the truck operational cost. A truck loading algorithm is proposed to maximize a high truck utilization, and an enumeration method is proposed to determine the optimal combination of rack sizes considering the total logistics cost. The numerical example is solved by using a real data.

Keywords: Rack Design, Glass-Product Manufacturing industry, Truck Loading Algorithm, Total Logistics Cost

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

노후한 건물의 재건축, 아파트 신축, 해외 건축시장의 활성화로 국내 건축업계는 호황을 맞고 있다. 이러한 상황에서 건축에 필요한 다양한 자재는 적재적소에 운송되어야 공사계획에 차질을 빚지 않는다. 따라서 지속적으로 증가하는 공사 자재의 물동량을 효율적으로 처리하기 위한 운송시스템의 설계 및 개선은 매우 중요한 사안이다. 특히 건물에 들어가는 유리의 경우 다양한 크기와 종류(복층유리, 단층유리 등)의 제품이 건축 자재로 사용된다. 이러한 유리제품의 특성상 매우 깨지기 쉽고 운송 환경변화에 민감하다. 그러므로 보호기능을 가진 랙을 이용하여 운송해야 하며, 트럭에 적재될 때도 트럭의 운행방향 등을 고려하여 적재해야 한다.

판유리 제조업체(Laminated & Tempered glass manufacturing company(L&T company))에서는 제조공정에서 납품까지 다양한 프로세스가 수행된다. 먼저 표면처리, 합판, 열처리 등의 재가공 공정을 완료한 후 완성된 제품을 건설 현장으로 운송한다. 이러한 프로세스 중 본 연구에서는 완성된 제품을 건설현장까지 운송할 때 발생하는 물류프로세스에 대하여 다루고자 하며 상세 프로세스는 <Figure 1>과 같다. 먼저 완성된 제품을 랙에 적재할 때는 노동자에 의해 직접 수행되며 유리를 옮길 때는 손잡이가 달린 진공 압착기를 유리에 부착하여 한 명 또는 두 명의 작업자가 유리를 적재하게 된다. 랙에 모두 적재가 된 후, 적재된 유리를 고정시키기 위해 비닐랩핑 과정을 거친 후 지게차를 이용하여 랙을 트럭에 적재한다. 적재된 랙은 시공을 위해 고객이 있는 건설 현장으로 운송되어 지게차의 하역 작업을 거친 후 시공 완료 시까지 건설 현장에 보관되게 된다.

이 연구는 현재 국토교통부 재원으로 국토교통과학기술진흥원(KIA)의 지원을 받아 수행하고 있는 “적재효율 및 하역편의 향상을 위한 운송장비용 모바일랙(Mobile-Rack) 기술개발” R&D 과제의 연구성과물이다.

[†] 연락저자 : 김갑환, 46241 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2 부산대학교 10공학관 10619, Tel : 051-510-2419, Fax : 051-512-7603,

E-mail : kapkim@pusan.ac.kr

2015년 11월 4일 접수; 2016년 2월 19일 수정본; 2016년 4월 12일 게재 확정

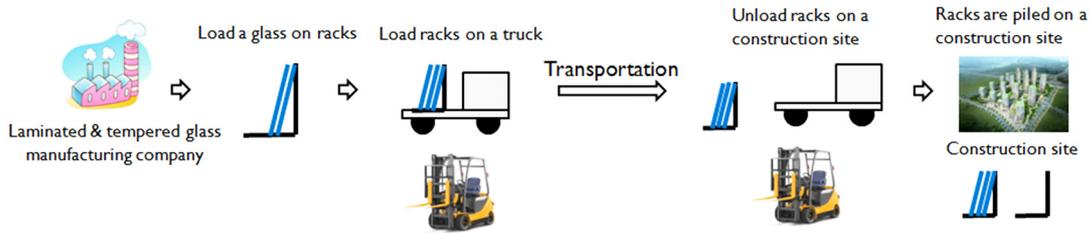


Figure 1. Delivery Process in the 'Laminated & tempered' Glass Manufacturing Company

그런데 우리나라의 건축물에 사용되는 시공용 판유리는 규격이 매우 다양하고 깨지기 쉬우며 충격에 민감하기 때문에 다양한 규격의 유리를 적재할 수 있고 외부의 충격으로부터 제품의 손상을 최소화할 수 있는 랙을 사용해야 한다. 이러한 특징을 감안하기 위해서 현재 시공용 유리 제작 회사에서는 다양한 유리를 적재할 수 있고 손상 방지를 위한 기울임 기능을 가진 L-frame과 A-frame의 랙을 사용하고 있다. 그러나 이러한 랙의 이용은 몇 가지 단점을 가진다. 특히 제품의 적재 및 분리 작업, 랙의 이송작업이 용이하지 않으며, 제품의 고정을 위해 비닐랩핑 작업이 수행되어 작업자들로 하여금 비효율을 초래한다. 건설현장에서의 분리 작업 또한 유사한 비효율적인 작업을 동반한다. 뿐만 아니라 랙 내에 제품을 적재할 때도 유리 보존을 위한 유리의 기울임으로 빈 공간이 생겨 적재 효율이 떨어질 수밖에 없다.

따라서 비효율적인 작업이 많이 발생하고 랙과 트럭의 적재 효율이 좋지 못한 물류 시스템을 개선하기 위하여 <Figure 2>, <Figure 3>과 같은 박스 모양의 랙이 제안되고 있다. 그림과 같이 랙의 길이보다 긴 유리는 적재될 수 없고 적재하는 입구와

유리를 랙으로부터 분리하는 출구방향을 정하고 컨베이어를 이용한 구동장치를 설치함으로써 비효율적인 작업을 개선하고자 하였다. 그리고 유리를 세 방향에서 고정하여 파손을 방지하도록 하였다. 좌, 우를 고정하는 고정 장치는 유리의 길이에 맞게 조절이 가능하며 모든 세 방향의 고정 장치는 다양한 폭을 가지는 유리를 적재할 수 있다. 그러므로 서로 다른 타입의 유리를 적재할 수 있되, 랙의 폭보다 긴 유리는 적재가 불가능하다.

이러한 기능을 가진 박스 모양의 랙을 사용함으로써 랙 내 유리의 적재율을 높일 수 있다. 그리고 고정 장치를 이용한 고정 작업은 기존의 랙으로 유리를 고정하는 작업을 개선할 수 있으며 지게차를 이용한 작업 또한 용이하도록 만들었다. 하지만 컨베이어와 같은 세부적인 장치를 필요로 하기 때문에 추가 비용이 발생할 것이고, 기존의 장비보다 비싼 만큼 도난, 고장으로 부터의 관리를 해야 한다는 단점이 있다.

트럭 내 랙의 적재, 랙 내 유리 적재 및 분리가 용이한 박스 모양의 랙을 개발함에 있어서, 랙의 크기 결정에 랙 내 유리 적재, 랙의 트럭 적재 등 물류시스템에서 발생하는 다양한 프로세스를 감안하여야 한다. 특히 랙의 크기는 전체 운영비용에 큰 영향을 미친다. 예시를 들어보면 폭이 짧은 랙을 사용하여 물류 시스템을 운영하는 경우에는 한 랙에 비교적 적은 수의 제품을 적재할 수 있고, 따라서 운영되는 랙의 수가 많아진다. 그러므로 필요 랙 수량은 증가하게 되고 랙 제작비용 또한 증가하게 된다. 하지만 운송비용 측면에서는 작은 랙을 이용하는 경우 트럭 내 적재효율이 올라가게 되므로 총 운송비용은 감소하게 된다. 이와 같이 운영비용간의 'Trade-off' 관계가 존재한다. 이때 전체 운영비용을 최소화하는 복수의 랙의 폭과 길이를 결정하고자 한다.

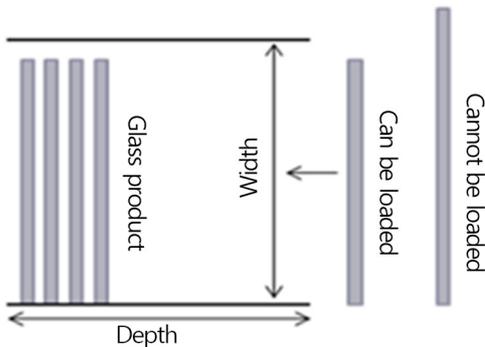


Figure 2. A Conceptual Layout of the New Rack

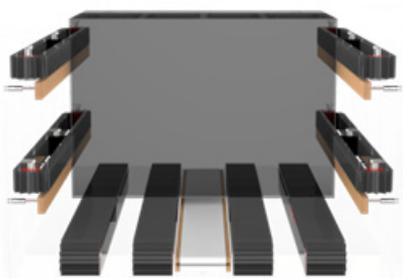


Figure 3. Detail Function of the New Rack

1.2 관련 연구

Mays(1980)에서는 유리운송을 위한 교체 가능한 유리랙을 설계하였다. 이 특허에서는 분리와 조립이 가능하여 휴대가 쉬운 유리전용 랙을 제시하였다. Automated storage and retrieval systems(AS/RS)에서의 랙 크기 결정연구는 다음과 같다. 먼저 Lee *et al.*(2005)에서는 AS/RS 창고 시스템에서 다양한 크기의 화물을 처리하기 위한 Modular cell을 제시하고 그 크기를 결정하는 연구를 다루었다. Yang *et al.*(2014)에서는 AS/RS 에서의 최적 적재를 위한 보관용기를 설계하였다.

적재알고리즘에 대한 기존연구는 다음과 같다. Xavier *et al.* (2004)에서는 적재 효율을 높이기 위한 적재 패턴을 제시하는 Greedy Randomized Adaptative Search Procedure(GRASP) 알고리즘에 대해 연구하였다. Parreno *et al.*(2008)에서는 공간의 모형을 고려하여 적재할 제품을 결정하는 휴리스틱 알고리즘을 제시하고 GRASP 알고리즘을 사용하여 직육면체 공간 안에 직육면체 제품을 적재하는 3차원 적재 패턴을 만드는 연구를 했다. Li *et al.*(2014)에서는 적재 되어야 할 제품 간의 관계를 고려한 2차원 적재 패턴을 제시하였다.

그리고 물류 시스템을 분석한 기존연구는 다음과 같다. Kim *et al.*(2014)에서는 물류센터에서 발생하는 입출고 프로세스를 분석하고, 이에 대한 시스템을 효율화하기 위하여 프로세스 마이닝 기법을 이용하였다. Nam *et al.*(2014)에서는 물류비용이 공급사슬 유연성 구조 결정 문제에 어떤 영향을 미치는지를 시뮬레이션 방법론을 통하여 분석하였다. 이를 통하여 공정 유연성과 물류비용의 연관성을 제시하고, 유연성 수준과 물류효율의 관계에 대하여 연구하였다.

기존 연구들에서는 적재 및 운송 작업을 할 때 작업의 편의성을 위한 랙의 기능을 설계하였다. Mays(1980)의 연구에서는 옮기기 쉬운 랙을 설계하였지만 직관적인 경험에 의존한 설계에 그쳤다. 그리고 Lee *et al.*(2005)과 Yang *et al.*(2014)에서는 AS/RS 창고 시스템 안에 보관하기 위한 랙의 크기를 결정하는 연구를 하였다.

그러나 기존 연구에서는 운영 시스템에서 랙 사이즈와 필요 랙의 수를 따로 다루어 왔다. 그리고 사이즈 결정을 통하여 창고의 적재 효율이나 재고 비용 등을 별개로 고려해 왔다. 즉 기존의 연구에서는 작업의 편리성이나 다양한 크기의 제품을 다루기 위한 랙의 기능들에 초점을 맞추어 왔고 실제 데이터를 이용하여 전체 비용을 고려하지는 못했다. 하지만 본 연구에서는 물류 시스템을 개선시키기 위하여 전체 비용을 최소화 하는 랙의 크기를 결정하는 문제를 다루었다는 점에서 차별화 될 수 있다. 또한 정확한 문제 정의를 위하여 문제에 대한 수리모형을 제시하였고, 운송비용 계산을 위하여 트럭 내 적재 알고리즘을 제시하였으며, Enumeration method를 기반으로 한 탐색을 통하여 실제 데이터에 기반한 합리적인 의사결정을 하는 방법을 제시해 준다는 점에서 차별화 될 수 있다고 생각된다.

본 논문에서는 제 2장에서 문제 정의를 하였고, 제 3장에서 비용을 최소화하기 위한 랙의 크기를 결정하기 위해 비용 최소화 랙 조합 탐색 알고리즘을 제시하고 트럭 내 랙의 적재 패턴을 제시해주는 이차원 랙 적재 알고리즘과 개선된 해를 찾기 위한 Pairwise neighborhood search 알고리즘의 자세한 절차를 설명하였다. 제 4장에서는 3장에서 제시한 알고리즘의 시뮬레이션 실험 결과를 제시하였다. 그리고 제 5장에서 결론을 맺었다.

2. 문제 정의

본 연구에서는 랙에 적재될 수 있는 유리의 종류에 영향을 미

치는 랙의 길이와 얼마만큼의 유리를 적재할 수 있는가에 영향을 미치는 폭을 결정하고자 하였다. 이와 같은 의사결정을 하기 위하여 아래에 제시된 비용함수의 값을 최소화 하는 랙의 길이와 폭을 결정하고자 한다.

본 연구의 가정 사항은 다음과 같다. (1) 본 연구에서는 실제 L&T company의 데이터를 바탕으로 사용률이 가장 높은 단일 종류의 트럭을 고려하였다. (2) 랙의 높이는 랙의 윗부분이 뚫려있는 오픈 탑 형태의 랙을 사용하기 때문에 적재 가능한 랙 선정에 영향을 주지 않는다. (3) 비어있는 랙은 접어서 이송이 가능하다. 따라서 랙의 선택이 랙 회수에 관련된 비용에 영향을 미치지 않으므로 회수비용은 고려하지 않는다. (4) 계산 시간을 줄이기 위해서 동일한 길이를 가지는 랙 중에서는 한 가지 길이의 랙만 후보로 선택하였다.

제약사항으로는 첫 번째, 유리의 적재 방향이다. 모든 유리는 차량의 주행방향과 나란한 방향으로 적재해야 한다. 왜냐하면 운송 시 발생할 수 있는 충격에 대비하기 위함이다. 비포장도로를 지나거나, 고속 방지턱 등을 지날 때 적재 방향이 직각인 경우보다 물리적으로 적재 방향이 수평인 경우가 제품의 손상 위험이 적다. 둘째, 유리의 가로길이와 세로길이 중 긴 부분을 유리의 길이로 정의한다. 유리의 가로와 세로길이 중 긴 부분을 랙의 아랫면에 접하게 하면서 적재해야 손상 위험이 줄어들기 때문이다.

2.1 문제의 수식화

다음에 문제를 수식화하여 제시한다. 사용한 시호를 먼저 아래에 소개한다.

입력상수

i	특정한 폭과 길이를 가진 랙을 나타내는 인덱스. 폭이 넓어지는 순서로 랙의 인덱스가 붙여져 있다고 가정.
j	특정한 폭과 두께를 가진 유리를 나타내는 인덱스. 폭이 넓어지는 순서로 유리의 인덱스가 붙여져 있다고 가정.
n	계획기간중의 일자를 나타내는 인덱스
t_j	유리 j 의 1매당 두께(mm)
a_i	랙 i 의 적재공간의 폭(mm)
b_j	유리 j 의 폭(mm)
l_i	랙 i 의 적재공간의 길이(mm)
q_{nj}	유리 j 의 n 번째날의 운반요구 매수
f	트럭의 1회 사용에 대한 고정비(won)
v	트럭의 단위거리 당 운행비용(won/km)
d	평균 1회 운행거리(km)
s	트럭 적재 공간의 크기(mm ²)
h	시간 당 랙 취급 포크리프트의 사용비용(won/hour)
c	시간 당 포크리프트의 랙 취급 능력(racks/hour)
r_f	랙 비용의 고정비(won/rack)

- r_v 랙 비용의 변동비 부분(랙의 면적에 비례)(won/mm²)
- t 랙의 최대 사용횟수(수명). 실무에서 보통 최대 사용 횟수를 추정하여 랙 비용계산에 사용하고 있음.
- p 랙 운영 업체의 수익률(%)

집합(입력값)

- F_{truck} 대상 트럭에 적재가능한 모든 적재 패턴의 집합
- R 모든 랙의 집합
- G 모든 유리의 집합
- T 계획 기간에 포함되는 일자들의 집합

의사결정변수

- S 선택된 랙의 집합

의사결정변수로부터 결정되는 관련 변수

- $Y_{ni}^k(S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 k번째 트럭에 적재되는 랙 i의 갯수
- $Y_{ni}(S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i의 갯수
- $X_{ni}^k(S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 k번째 트럭에 적재되는 랙 i의 총 바닥면적(mm²)
- $X_{ni}(S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i의 총 바닥면적(mm²)
- K_n n번째 날에 사용할 트럭의 갯수
- $P(Y_{ni}^k(S), i \in S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 k번째 트럭에 적재되는 $Y_{ni}^k(S)$ 개의 랙 i들로 만들어지는 트럭적재 패턴
- $R_n(X_{ni}(S), Y_{ni}(S))$ S가 선택되었을 때, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i로부터 발생하는 랙 임대비용
- $H_n(Y_{ni}(S))$ S가 선택되었을 때, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i로부터 발생하는 랙 상하역비용
- $T_n(X_{ni}(S))$ S가 선택되었을 때, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i로부터 발생하는 랙 운반비용
- $U_n(S)$ S가 선택되었을 경우, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 트럭의 평균 랙 적재율(%). $\sum_{i \in S} X_{ni}(S) / (sK_n)$ 를 나타냄.
- $L_n(X_{ni}(S), Y_{ni}(S))$ S가 선택되었을 때, n번째 날의 유리운반을 위하여 사용되는 랙 i로부터 발생하는 총 물류비용
- $TC(S)$ S를 선택할 경우, 계획기간 동안의 총 비용

다음과 같이 문제를 수식화 할 수 있다 :

$$\begin{aligned} \text{Min}_S TC(S) &= \sum_{n \in T} \sum_{i \in S} L_n(X_{ni}(S), Y_{ni}(S)) \\ &= \sum_{n \in T} \sum_{i \in S} \{ R_n(X_{ni}(S), Y_{ni}(S)) \\ &\quad + H_n(Y_{ni}(S)) + T_n(X_{ni}(S)) \} \end{aligned} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_k^{K_n} Y_{ni}^k(S) = Y_{ni}(S) \text{ for all } n \in T \text{ and } i \in S \quad (2)$$

$$X_{ni}(S) = a_i l_i Y_{ni}(S) \text{ for all } n \in T \text{ and } i \in S \quad (3)$$

$$P(Y_{ni}^k(S), i \in S) \in F_{truck} \text{ for all } n \in T \text{ and } k = 1, \dots, K_n \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \{S | a_k \geq b_j\}} (Y_{nk}(S) \cdot l_k) &\geq \sum_{k \geq j} (q_{nk} \cdot t_k) \\ \text{for all } n \in T \text{ and } j \in G \end{aligned} \quad (5)$$

$$Y_{ni}^k(S), Y_{ni}(S) : \text{non-negative integer} \quad (6)$$

$$X_{ni}(S) : \text{non-negative real value} \quad (7)$$

$$S : \text{a set of racks} \quad (8)$$

목적함수 (1)은 계획기간중의 랙 임대비용, 랙 상하역비용, 운송비용의 합을 나타낸다. 제약조건 (2)는 $Y_{ni}^k(S)$ 와 $Y_{ni}(S)$ 의 관계를 나타내고 제약조건 (3)은 $X_{ni}(S)$ 와 $Y_{ni}(S)$ 의 관계를 나타낸다. 제약조건 (4)는 하나의 트럭에 같이 실리는 랙 개수의 조합은 트럭의 제한된 공간에 적재될 수 있는 패턴 중의 하나여야 한다는 것을 말한다. 제약조건 (5)는 특정한 날 선택되는 랙의 조합은 그 폭을 고려하여, 그날 운반할 유리를 충분히 운반 가능해야 한다는 뜻이다. 위 식에서 의사결정 변수는 S이다. 기본적으로 S는 enumeration 방식으로 탐색을 할 것이다. 남은 문제는 주어진 S로부터 (a) 제약조건 (2)~제약조건 (7)을 만족하는 $Y_{ni}^k(S), Y_{ni}(S), X_{ni}(S)$ 의 값들을 어떻게 결정할 것이고 (b) 이들 값들이 주어졌을 때, 목적함수를 어떻게 계산할 것인가이다.

2.2 비용 함수

본 장에서는 L&T Company의 물류 환경에서 발생할 수 있는 비용함수를 공식화 하였다. 즉 비용함수의 값이 최소가 되는 랙의 길이와 폭을 결정하고자 한다. 비용은 랙 운영회사에서 랙을 임대하여 사용하는 경우를 가정하였다. 이때 발생할 수 있는 비용은 랙 임대비용, 랙 운송비용, 랙 상하역비용 등이 있고 이를 공식화 하였다.

2.2.1 랙 임대비용

새로운 개념의 랙을 사용하기 위해서는 랙의 제작비용이 발생한다. 제작비용은 고정비용과 변동비용으로 구성된다. 고정비용은 사용하는 랙의 수에 비례하는 비용이고 변동비용은 사용하는 랙의 면적에 비례하는 비용이다. 고정비는 사용해야 하는 랙의 면적과 관계없이 1개를 사용할 때 마다 발생하는 고정비를 곱하여 총 고정비용을 구했다. 변동비도 마찬가지로 단위 면적당 늘어나는 변동비용과 사용하는 총 랙의 면적을 곱하여 계산할 수 있다. 이렇게 구해진 고정비와 변동비를 랙의 최대 사용 횟수로 나누어 1회 사용할 때 드는 비용을 계산하였다.

그리고 L&T company에서 랙을 직접 소유하지 않고 운영 업체로부터 빌려서 쓰는 경우에 제작비용에 추가적으로 운영 업

체의 수익률이 반영되어야 한다. 따라서 랙 임대비용은 랙 제작비용에 운영 업체의 수익률의 곱으로 나타내었으며 다음과 같이 공식화 하였다.

$$R_n(X_{ni}(S), Y_{ni}(S)) = (1+p)\{r_f Y_{ni}(S) + r_v X_{ni}(S)\}/t$$

2.2.2 랙 상하역비용

유리가 적재된 랙은 운송을 위하여 트럭에 상차되어야 하고 건설 현장에서 하역되어야 한다. 적재된 랙은 무겁기 때문에 지게차에 의해서 상하역작업이 이루어지는데 이때 지게차로 인한 랙의 상하역비용이 발생한다. 지게차를 사용하는데 발생하는 비용은 랙 당 무게와 관계가 없으며 상하차되는 랙의 수에 비례한다. 즉, 길이가 작은 랙을 여러 개 만들었을 때 랙 상하역비용은 증가한다. 따라서 랙 상하역비용은 지게차를 한 시간 동안 빌려서 작업하는데 드는 비용에 한 시간 동안 지게차가 수행할 수 있는 작업의 수로 나누어 상하역작업을 1회 수행했을 때 드는 비용을 계산하였다. 1회 작업 시 발생하는 비용에 총 작업 횟수를 곱하여 랙 상하역비용을 계산할 수 있었다. 따라서 $H_n(Y_{ni}(S))$ 는 다음과 같다.

$$H_n(Y_{ni}(S)) = (h/c) Y_{ni}(S)$$

2.2.3 랙 운송비용

트럭에 랙을 적재 하였다면, 랙은 건설 현장까지 운송되어야 한다. 이때 트럭을 사용함으로써 발생하는 비용이 랙의 운송비용이다. 운송비용은 사용하고 있는 랙의 넓이가 감소할수록 비용도 감소한다. 그러므로 길이와 폭이 작은 랙을 여러 개 사용하여 랙 내 적재율과 트럭 내 적재율을 증가시킨다면 운송비용은 줄어들 것이다. 랙의 운송비용은 고정비와 변동비로 구성된다. 고정비는 트럭을 하나 사용하면 무조건 발생하는 비용이고, 변동비는 이동 거리에 비례하는 비용을 의미한다. 변동비와 고정비의 합을 트럭의 총넓이로 나누어서 사용하는 면적 당 비용을 계산한 후 사용 면적을 곱하여 운송비용을 구하였다. 이 값에 적재율을 나누어서 최종적인 랙 운송비용을 도출할 수 있었다. $T_n(X_{ni}(S))$ 는 다음과 같이 나타내었다.

$$T_n(X_{ni}(S)) = X_{ni}(S) \frac{(f+vd)}{sU_n(S)}$$

3. 총 비용을 고려한 랙의 크기 결정

본 연구의 랙 크기 결정 문제는 비용을 최소로 하는 랙 조합을 탐색하는 문제다. 정해진 후보에서 가능한 모든 조합을 생성하고 생성된 조합 중에서 가장 좋은 해를 선택하는 ‘비용 최소화 랙 조합 탐색 알고리즘’을 제시하였다. 각각의 후보에 대한 비용은 앞에서 제시한 비용함수를 이용하여 계산하였고, 비용 함수 내부의 파라미터 중 하나인 적재율을 구하기 위해서 이

차원 랙 적재 알고리즘과 해의 개선을 위한 Pairwise neighborhood search 알고리즘을 제시하였다.

3.1 전체 물류 비용을 고려한 랙 조합 선택(Rack Selection based on Total Logistics Cost(RSTLC))

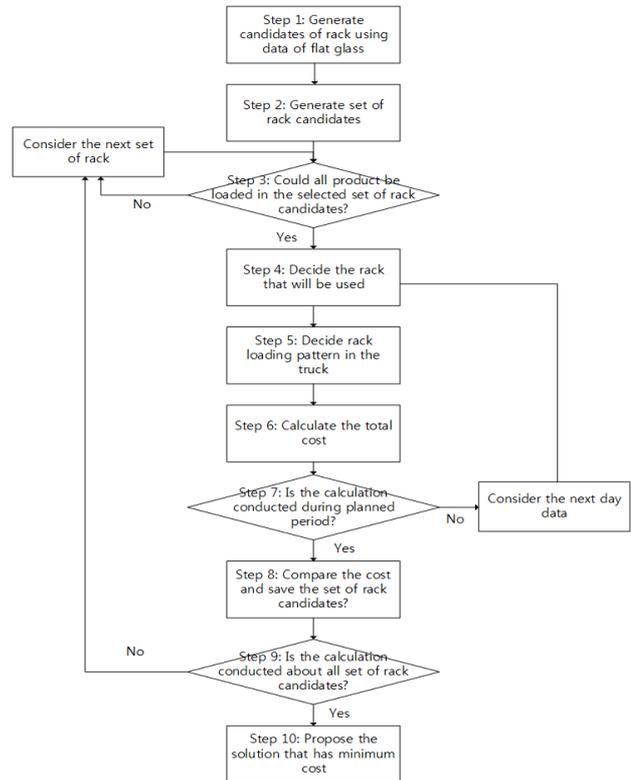


Figure 4. RSTLC Algorithm

<Figure 4>는 RSTLC 알고리즘의 자세한 절차를 나타낸 그림이다. 단계별 설명은 다음과 같다.

- 단계 1 : 후보 랙을 생성한다. 후보 랙을 생성할 때는 트럭 내 랙의 적재효율을 높이기 위해서 대상 트럭의 길이와 폭을 등분하여 랙의 크기 후보를 생성하고 단계 2로 간다.
- 단계 2 : 생성된 후보 랙 중에 s가지 종류의 랙을 뽑아서 모든 종류의 후보 랙 집합을 생성한다. 만약 후보 랙의 종류가 총 6가지이고 2가지 종류의 랙으로 시스템을 운영한다면 총 6C2가지의 랙 후보 집합이 존재하게 되는 것이다. 그리고 생성된 후보 랙 집합 중 첫 번째 집합에 대한 정보를 단계 3으로 보낸다.
- 단계 3 : 해당 후보 랙 집합을 사용하여 유리를 랙에 적재해보기 전에 해당 랙 후보 집합을 이용하여 현재 유리를 모두 적재할 수 있는지 확인한다. 랙 집합의 구성요소 중에서 길이가 가장 긴 랙보다 길이가 긴 유리가 존재한다면 해당 랙 집합으로 시스템을 운영할 수 없다. 이러한 경우에는 다음 랙 후보 집합으로 넘어가고 다시 단계 3을 수행한다. 하지만 모든 유리를 적재할 수

있는 경우에는 유리 주문 데이터의 첫 번째 날에 대한 데이터를 단계 4로 보낸다.

단계 4 : 해당 랙 후보에 유리를 적재하고 단계 4-1로 간다. 적재 되어야할 유리에 대한 데이터는 앞서 저장된 유리 주문 데이터를 기반으로 한다.

단계 4-1 : 적재 대상 유리를 적재 가능한 랙 중 폭이 가장 작은 랙에 할당하고 단계 4-2로 간다.

단계 4-2 : 폭이 큰 랙부터 시작하여 남은 공간을 할당된 유리가 있는 그 다음 크기의 랙에서 옮겨서 채운다. 이 과정을 옮길 수 있는 유리가 없을 때 까지 반복한다. 이는 유리의 길이별로 랙에 적재했을 때 불필요하게 많은 랙을 사용하는 경우를 방지하기 위함이다. 이와 같은 절차를 통하여 어떤 크기의 랙을 몇 개씩 사용해야 하는지를 결정한다. 그리고 단계 5로 간다.

단계 5 : 앞에서 계산된 랙의 사용 갯수를 이용하여 직접 트럭에 적재해 본다. 이차원 랙 적재 알고리즘(Two dimensional Rack Loading Algorithm(TRLA))을 이용하여 트럭 내 랙의 적재패턴을 제시하고 단계 6으로 간다. TRLA의 자세한 절차는 제 3.2장에서 다루어진다.

단계 6 : 비용함수를 이용하여 총비용을 계산한다. 제 2.2장에서 제시한 비용함수를 이용하여 비용을 계산한 후 단계 7로 간다.

단계 7 : 계획기간 n일에 대한 모든 계산이 완료되었다면 단계 8로 가고 아니면 그 다음날 유리 주문 데이터를 저장하고 단계 4로 가서 계산을 시작한다.

단계 8 : 계산 된 비용을 비교하여 현재까지 최소 비용을 가지는 랙 조합을 저장하고 단계 9로 간다.

단계 9 : 모든 랙의 후보 집합에 대한 비용이 계산 되었는지 확인한다. 만약 계산 되었다면 알고리즘을 종료한다.

그렇지 않으면 다음 후보 랙 집합으로 넘어간 후 단계 3으로 간다.

3.2 이차원 랙 적재 알고리즘(Two-dimensional Rack Loading Algorithm(TRLA))

본 장에서는 트럭 내 랙의 적재 패턴을 제시해 주는 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. 먼저 적재 패턴을 구하기 위하여 Parreno *et al.*(2008)의 알고리즘을 본 연구 상황에 맞게 수정하여 TRLA를 제시하였다. TRLA의 자세한 절차는 다음과 같다. 그리고 아래의 절차에 제시된 적재가능조건은 랙의 길이가 공간의 가로길이보다 짧고 폭이 공간의 세로길이보다 짧아야 만족한다.

단계 1 : 이차원 공간 후보 생성

랙의 모양은 모두 직사각형이므로 빈 공간 중에 직사각형이면서 면적이 가장 큰 이차원 공간의 후보를 생성하고 단계 2로 간다.

단계 2 : 공간 선택

공간의 후보 중 가장 큰 공간을 선택하고 단계 3으로 간다. 만약 면적이 같은 가장 큰 공간이 두 개 이상 있다면 랜덤으로 선택한다.

단계 3 : 랙 선택

먼저 후보 공간에 대하여 적재가능 조건에 부합하는 랙이 존재하지 않는다면 새로운 트럭으로 초기화 한 후 단계 1로 간다. 적재가능 조건에 부합하는 랙이 존재 한다면 조건에 부합하는 랙들 중 면적이 가장 큰 랙을 선택하여 공간의 (0, 0)에 적재하고 단계 4로 간다. 만약 면적이 같은 가장 큰 랙이 두 개 이상 존재한다면 랜덤으로 선택한다.

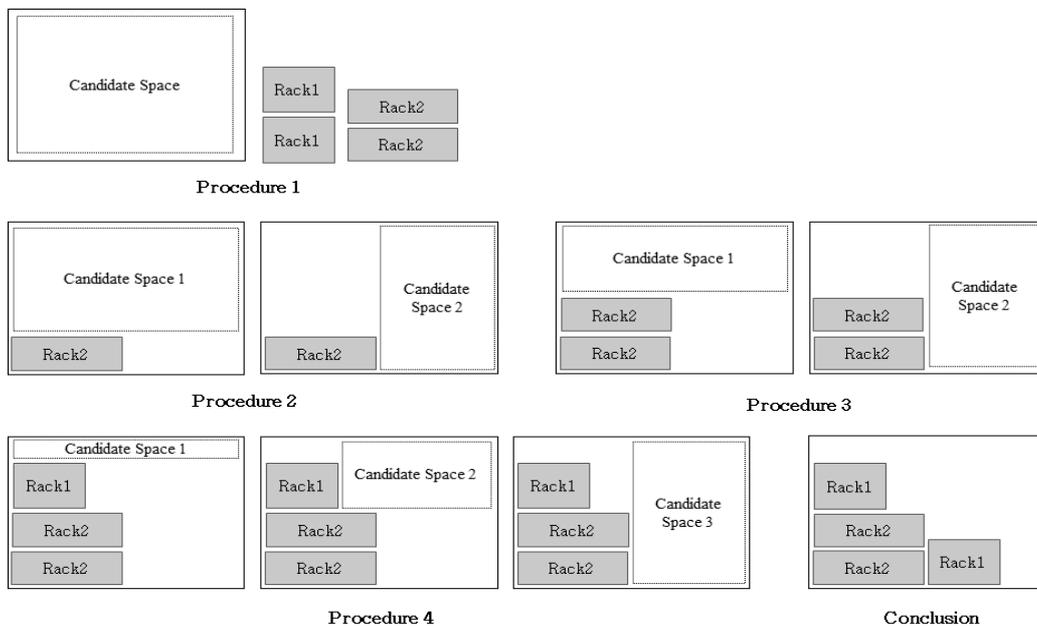


Figure 5. An Example of the Loading Procedure

단계 4 : 랙 적재 및 변수 갱신

적재해야 할 랙이 남아 있다면 단계 1로 간다. 그렇지 않으면 알고리즘을 끝낸다.

<Figure 5>는 적재 알고리즘의 한 예시를 나타낸 그림이다. 본 예시는 이해를 돕기 위하여 TRLA에서 제시한 절차를 상세히 나타내었다. 절차 1의 왼쪽 부분은 트럭의 적재 공간을 나타내고 오른쪽에는 트럭에 적재해야 할 4개의 랙을 나타내고 있다. 먼저 최대 직사각형 후보 공간을 생성한 후 면적이 큰 2번 랙을 적재한다. 절차 2에서도 마찬가지로 최대 직사각형 후보 공간을 생성한다. 절차 2의 경우 2개의 후보 공간이 생성되며 면적이 큰 후보 공간 1이 선택된다. 선택된 공간에는 면적이 큰 2번 랙이 적재된다. 이와 같은 절차를 거쳐 모든 랙은 앞에서 제시된 알고리즘에 의해 적재되며 그 결과 절차 5에 제시된 적재패턴이 생성된다.

3.3 Pairwise Neighborhood Search Algorithm

TRLA에서 제시된 초기해를 개선시키기 위하여 Pairwise neighborhood search algorithm을 제시하였다. 휴리스틱 알고리즘에서 제시한 적재 패턴의 적재순서를 이용하여 다양한 적재 패턴을 생성하였다. 자세한 절차는 아래와 같은 수도코드로 나타내었다.

```

Algorithm Pairwise neighborhood search(S)
Input : Array S of initial loading pattern's sequence
Output : Loading rate of truck
n = length of Array S
BestSolution = Loading rate of initial loading pattern
BestSequence = S
z = 0
for i = 0 to n do
    for j = i+1 to n do
        if S[i] = S[j] then
            continue
        else
            temp = S[i]
            S[i] = S[j]
            S[j] = temp
            Tempsolution = Loading(S)
            if BestSolution < Tempsolution then
                BestSolution = Tempsolution
                BestSequence = S
            z++
    if z > 0 then
        Pairwise neighborhood search(S)
    else
        return BestSolution

```

Pairwise neighborhood search를 통하여 다양한 적재순서를 생성한 다음 변형된 적재 알고리즘을 이용하여 적재패턴을 찾고 적재율을 계산하였다. 위의 수도코드에서 Loading(s)라는 함수는 변형된 TRLA를 의미한다. TRLA에서는 랙을 적재할 공간을 먼저 선택하고 그 공간에 맞는 랙을 선택한다. 하지만 변형된 적재 알고리즘에서는 적재되어야 할 랙의 순서가 주어지기 때문에 공간만 선택하는 절차이다. 변형된 적재 알고리즘의 자세한 절차는 다음과 같다.

단계 1 : 이차원 공간 후보 생성

랙의 모양은 모두 직사각형의 형태이므로 빈 공간 중에 직사각형이면서 면적이 가장 큰 이차원 공간의 후보를 생성하고 단계 2로 간다.

단계 2 : 이차원 공간 선택

공간의 후보 중 가장 큰 공간을 선택하고 단계 3으로 간다. 만약 면적이 같은 가장 큰 공간이 두 개 이상 있다면 랜덤으로 선택한다.

단계 3 : 랙 적재(적재되어야 할 랙은 적재 순서로 미리 정해져 있다).

먼저 후보 공간에 대하여 해당 순서에 할당된 랙이 적재가능 조건에 부합하지 않는다면 새로운 트럭으로 초기화 한 후 단계 1로 간다. 선정된 랙이 적재가능 조건에 부합 한다면 선택된 공간의 (0, 0)에 적재하고 단계 4로 간다.

단계 4 : 변수 갱신

적재해야 할 랙이 남아 있다면 단계 1로 간다. 그렇지 않으면 알고리즘을 끝낸다.

4. 시뮬레이션 실험

본 실험에서는 L&T company의 과거 데이터를 이용하여 각각의 후보 랙을 사용하여 한 달간 운영했을 때 발생하는 비용을 산출하여 비용을 최소화 하는 랙의 폭과 길이를 결정하였다. 실험은 Java 프로그램 언어를 이용하여 수행되었다.

4.1 실험 환경

본 연구에서는 L&T company의 한 달간 데이터를 적용하여 수치 실험을 진행하였다. <Figure 6>는 한 달 동안 대상 회사의 수요를 보여주는 그래프이다. 7일 단위로 수요가 0이 되어있는 것은 주말에는 대체로 공사작업을 진행하지 않기 때문에 주문이 없어서 생기는 현상이다. <Figure 7>은 대상 회사에서 주문 받은 유리의 가로 길이에 대한 분포이다. 258mm부터 2,482mm까지 총 651가지의 서로 다른 크기를 가진 판 유리제품을 다루고 있었다.

<Table 1>에는 실험에서 적용된 파라미터 값을 제시하였다. 트럭의 고정비와 변동비는 대상 유리 가공업체의 외주운송 비

용을 적용하였다. 11t 트럭을 대상으로, 트럭의 평균 운행 거리는 회사의 실제 운행거리를 기반으로 한 가정 사항이다. 랙의 최대사용 가능 횟수는 기존의 랙에 대한 정보를 이용하여 계산하였다. 기존의 랙은 평균적으로 5년에 한번 씩 교체를 해주어야 한다. 그리고 평균 랙 회수 기간이 3일이기 때문에 이를 나눈 값을 랙의 최대사용 횟수로 가정하였다. 지게차에 대한 비용은 유리 가공업체에서 외주를 준 회사의 비용에 대한 정보와 지게차의 처리능력을 이용하여 구하였다. 새로운 랙의 비용은 판단하기가 힘들었기 때문에 컨테이너의 고정비와 변동비를 사용하여 책정하였다.

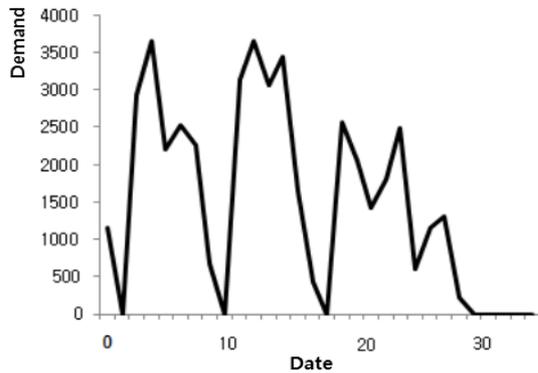


Figure 6. Demand Trend During One Month

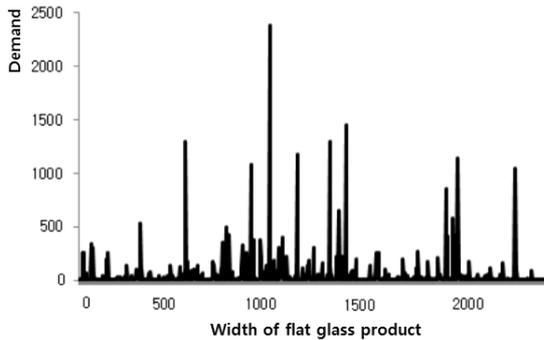


Figure 7. Distribution of Glass widths

Table 1. Parameters and their Values

Parameters	Values	measure
p	0.1	ratio
r_f	209,302	won/rack
r_v	0.15	won/mm ²
t	521(365×5×6/7×1/3)	unit
h	60,000	won/hour
c	20	racks/hour
f	60,000	won
v	700	won/km
d	100	km
s	21,060,000	mm ²

4.2 실험 결과

실험은 후보 랙들 중 한 가지 종류의 랙을 사용하여 물류시스템을 운영하는 방안부터 두 가지, 세 가지, 네 가지, 다섯 가지 종류의 랙을 사용하여 물류시스템을 운영하는 방안에 대한 비용을 계산하였다. 본 실험에서는 Pairwise neighborhood search 알고리즘을 적용하지 않고 TRLA에서 제시된 초기 적재 패턴을 이용하여 해를 구하였다. 이누는 TRLA의 결과 값이 충분히 최적 적재패턴에 가까웠기 때문이다. TRLA에 대한 성능평가 는 제 4.3절에서 자세히 다루었다.

Table 2. Set of Available Rack Types

Rack type	Length(mm)	Depth(mm)
1	1,286	780
2	1,286	1,170
3	1,286	2,340
4	1,500	780
5	1,500	1,170
6	1,500	2,340
7	1,800	780
8	1,800	1,170
9	1,800	2,340
10	2,250	780
11	2,250	1,170
12	2,250	2,340
13	3,300	780
14	3,300	1,170
15	3,300	2,340

<Table 2>에 제시된 후보 랙들은 11t 트럭을 기준으로 실제 데이터를 고려하여 생성한 랙의 후보이다. 적재할 수 있는 유리의 크기를 판단하는 길이는 5가지이며 적재 가능한 유리의 양을 조절하는 폭은 3가지다. 그리하여 총 15가지의 후보 랙을 생성하였다.

1가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는 길이와 폭이 각각 3,300mm, 2,340mm의 랙으로 한 달간 운영해야 한다는 결과가 나왔다. 2가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는(1,500, 2,340), (3,300, 2,340)의 랙들로, 3가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는(1,286, 2,340), (2,250, 2,340), (3,300, 2,340)의 랙들로, 4가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는 (1,286, 2,340), (1,500, 2,340), (2,250, 2,340), (3,300, 2,340)의 랙들로, 5가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는 (1,286, 2,340), (1,500, 2,340), (1,800, 2,340), (2,250, 2,340), (3,300, 2,340)의 랙들로 운영할 때 비용이 최소가 되었다. 계산 시간은 1가지부터 5가지 종류의 랙을 사용하는 경우 각각 1.2초, 9.4초, 45.6초, 91.9초, 67.7초가 소요되었다. <Table 3>에서는 각각의 경우에 대한 솔루션을 제시하고 각 경우의 랙 내 유리의 적재율과 비용들을 나타내었다. 본 실

Table 3. Summary of the experimental results

Number of rack types	Optimum rack combination	Number of used racks per type	Glass loading rate inside the rack	Rack rental cost	Rack handling costs	Rack transportation cost	Total costs
1	[15]	[298]	35.21%	877,918	1,788,000	1.989×10^7	2.256×10^7
2	[6, 15]	[198, 97]	56.10%	598,634	1,770,000	1.079×10^7	1.316×10^7
3	[3, 12, 15]	[142, 135, 19]	63.06%	547,448	1,776,000	0.929×10^7	1.161×10^7
4	[3, 6, 12, 15]	[142, 49, 85, 19]	67.88%	517,411	1,770,000	0.886×10^7	1.115×10^7
5	[3, 6, 9, 12, 15]	[142, 48, 13, 53, 19]	75.27%	470,555	1,650,000	0.833×10^7	1.045×10^7

협은 한 가지 길이를 사용할 때 한 종류의 폭만 사용한다는 가정 때문에 11t 트럭을 대상으로 하였을 때 길이가 총 5종류가 존재하므로 최대 5가지 랙으로 시스템을 운영할 수 있다.

수치 실험 결과는 모두 길이가 긴 랙이 선택되었다. 길이가 긴 랙이 선택될수록 랙의 개수는 감소하게 되고 트럭 내 랙의 적재율은 떨어지게 된다. 하지만 후보 랙 크기를 결정할 때 트럭 내 랙 적재율을 감안하여 후보를 생성했기 때문에 길이가 긴 랙을 사용하여도 트럭 내 랙의 적재율은 충분히 높았기 때문에 이러한 결과가 나왔다고 해석할 수 있다.

4.3 적재 알고리즘 성능 평가

본 연구에서 제시한 적재패턴을 찾는 휴리스틱 알고리즘의 성능평가를 위하여 트럭 내 랙의 적재율에 대한 데이터를 분석하였다. 다음의 <Table 4>는 5가지 종류의 랙을 사용하여 물류 시스템을 운영할 때 사용하고 있는 트럭의 총면적과 사용되고 있는 면적, 비어있는 면적을 나타내었다. 숫자를 간편하게 하기 위하여 10cm단위로 나타내었고 그 아래 단위는 버림하였다.

<Table 4>에서 보면 더 이상 개선될 수 없는 경우를 찾아낼 수 있다. 다시 말하면 비어있는 면적이 트럭 한 대의 면적보다 작으면 더 이상 개선될 수 없다. 왜냐하면 적재율을 높이기 위해서는 사용하는 트럭 대수를 줄여야 하기 때문이다. 따라서 비어있는 면적이 트럭 한 대의 면적보다 커야 개선이 가능하다. 최적이지 아닌 5일, 8일, 9일에 대하여서는 Pairwise neighborhood search 알고리즘을 적용하여 개선된 적재 패턴을 찾자 하였다.

<Table 5>에는 <Table 4>에서 최적이지 아닌 날을 대상으로 Pairwise neighborhood search algorithm을 적용한 결과이다. 아래의 표에서 나타나 있듯이 더 이상 개선되지 않았다.

위와 같은 방법으로 2가지, 3가지, 4가지 종류의 랙을 사용하여 운영하는 경우에도 검증을 시행하였다. 3가지, 4가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는 모두 비어있는 면적이 트럭 한 대의 면적보다 작았으므로 22일 동안 모두 최적의 패턴을 제시하였다고 할 수 있다. 하지만 2가지 종류의 랙을 사용하는 경우에는 하루에 대해 비어있는 면적이 트럭 한 대의 면적보다 컸으므로 Pairwise neighborhood search 알고리즘에 적용시켜 보았으나 더 이상 개선되지 않았다.

Table 4. Summary of the TRLA's Result

Date	Truck's total area(10cm ²)	Used area (10cm ²)	Empty area (10cm ²)
1	2,070	506	1,564
2	10,350	9,821	529
3	6,210	4,899	1,311
4	6,210	5,037	1,173
5	8,280	6,141	2,139
6	10,350	8,648	1,702
7	4,140	2,208	1,932
8	10,350	8,142	2,208
9	8,280	6,141	2,139
10	4,140	2,645	1,495
11	6,210	5,796	414
12	6,210	4,761	1,449
13	2,070	1,840	230
14	8,280	6,578	1,702
15	6,210	4,945	1,265
16	4,140	3,381	759
17	4,140	3,036	1,104
18	10,350	8,487	1,863
19	2,070	1,932	138
20	4,140	3,588	552
21	2,070	2,070	0
22	2,070	1,771	229

Table 5. Summary of the Pairwise Neighborhood Search Algorithm Result

Date	Optimum rack combination	Number of used racks per type	Is better solution obtained? (Yes/No)
6	[3, 6, 9, 12, 15]	[10, 1, 0, 3, 2]	No
12	[3, 6, 9, 12, 15]	[8, 6, 2, 3, 2]	No
14	[3, 6, 9, 12, 15]	[9, 4, 0, 3, 1]	No

5. 결 론

판 유리 제품을 다루는 산업의 물류시스템에서 랙의 크기는 전체 비용에 큰 영향을 미친다. 특히 그 크기에 따라 사용해야 하는 랙의 총 면적과 개수는 달라지고 이에 따라 발생하는 비용도 달라진다. 따라서 전체 물류 시스템에서 발생하는 비용을 고려하여 랙의 크기를 결정해야 한다는 것을 본 연구를 통하여 살펴보았다.

제 2장에서는 본 연구에서 다룬 문제를 정확히 정의하기 위해 수리모델을 제시하고, 유리 제품의 이송을 위한 물류 프로세스에서 발생하는 비용을 공식화하였다.

제 3장에서는 문제를 해결하기 위하여 Enumeration method를 기반으로 한 RSTLC를 제시함으로써 한 달 동안 운영하였을 때 발생한 비용을 계산하고 비교하여 비용을 최소화 하는 랙 크기를 결정하는 방법에 대하여 다루었다. 그리고 본 연구에서 다루고 있는 랙 임대비용, 랙 상하역비용, 랙 운송비용 중 적재 패턴에 영향을 받는 운송비용을 객관적으로 계산하기 위하여 TRLA를 제시하였다.

제 4장에서는 제 3장에서 제시한 적재 알고리즘의 성능 평가와 실제 판 유리 산업의 주문 데이터를 기반으로 한 실험 결과를 제시하였다.

본 연구에서 제시한 방법론은 판상형 유리 제품 뿐만 아니라 디스플레이, 나무 판 등 다양한 판상형 제품을 다루는 산업에서 발생하는 물류시스템의 효율적인 운영을 위한 아이디어를 제공해 줄 수 있다. 그러므로 추후 각 제품이 가지는 특성을 고려하여 본 연구에서 제시한 방법론을 적용시킨다면 효율적인 랙 크기 결정에 도움을 줄 수 있다. 그리고 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 물류 시스템을 운영할 때 다양한 종류의 랙을 사용하는 것이 전체 운영비용에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 추후 랙의 종류와 관련된 비용을 추가한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 물류 전문 업체에서 랙을 소유하고 판 유리 업체에 빌려주는 방식인 임대에 대한 경우를 가정하였다. 하지만 판유리 업체에서 직접 랙을 소유하는 방식에 대하여서도 검토해볼 필요성이 있다. 랙을 소유하는 경우에는 랙을 몇 개씩 소유해야 하는지에 대한 의사결정이 추가로 필요하며 이에 따라 발생하는 재고비용과 랙 재고 부족으로 인하여 발생하는 주문 지연 비용 등을 고려한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- Brown, W. J. and Rowley, J. R. (1979), Flat glass shipping rack, patent.
- Carter, C. J. and Park, J. L. (1997), Apparatus with slanted rack on pallet for transporting glass, patent.
- Chookang, L. (2008), Laminated glass rack, and/or method of making and/or shipping laminated glass panels using the same, patent.
- Jackson, A. A. (1978), Glass carrying rack, patent.
- Koster, R.(M.) B. M. D., Duc, T. L., and Yugang, Y. (2008), Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS, *International Journal of Production Research*, **46**(6), 1498-1514.
- Kim, H. K. and Shin, K. S. (2014), Analysis and improvement of stocking and releasing processes in logistics warehouse using process mining approach, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **39**(4), 1-17.
- Li, K., Liu, G., Wu, Y., and Xu, X. (2014), A two-dimensional bin-packing problem with conflict penalties, *International Journal of Production Research*, **52**(24), 7223-7238.
- Lee, Y. H., Lee, M. H., and Hur, S. (2005), Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS, *International Journal of Production Economics*, **98**, 172-178.
- Mays, C. B. (1980), Interchangeable glass rack for pickup trucks, patent.
- Nam, J. M. and Park, K. S. (2014), Impact of logistics costs on supply-chain flexibility structure, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **39**(2), 21-35.
- Parreno, F., Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J. M., and Oliverira, J. F. (2008), Maximal-Space Algorithm for the Container Loading Problem, *INFORMS Journal on Computing*, **20**(3), 412-422.
- Pavel, S., Mikhail, B., and Petr, T. (2014), A dynamic programming heuristic for optimizing slot sizes in a warehouse, *Procedia Computer Science*, **31**, 773-777.
- Pius, J. E. (1993), Concurrent specification of unit load sizes and automated guided vehicle fleet size in manufacturing system, *International Journal of Production Economics*, **29**, 49-64.
- Soury, E., Behraves, A. H., Rouhani E. E., and Zolfaghari, A. (2009), Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet, *Materials and Design*, **30**, 4183-4191.
- Thomaswick, R. J. (1974), Flat glass shipping container, patent.
- Xavier, D., Xavier, G., and Joaquin, R. (2004), GRASP for set packing problems, *European Journal of Operational Research*, **153**, 564-580.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., and Qin, L. (2014), Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine, *International Journal of Production Research*, **53**(3), 929-943.