

# 화물터미널 집배송센터의 최적설계를 위한 분석모델

## A Performance Analysis Model for Optimal Design of Freight Terminal Layout and Operation Using AutoMod

황 흥 석\*, 조 규 성\*\*  
Hwang Heung-Suk, Cho Gyu-Sung

\* 동의대학교 기계산업시스템공학부 교수  
\*\* 동의대학교 대학원 산업공학과 박사과정

### Abstract

This paper focuses on a performance analysis model for optimizing the freight terminal design and layout using AutoMod simulator and numerical analysis. We developed a model to analyze the freight terminal performance per unit time and the material handling cost based on both throughput and waiting due to congestion. We developed computer program for this model and some sample results by both numerical method and AutoMod simulator are compared.

**Keyword** : Logistics Systems Design, Freight Terminal Design, Material Handling

### 1. 개 요

소화물터미널 집배송센터는 일반적으로 소화물(LTL: less-than-truckload) 처리시스템은 화물이 수집되고 분배되는 곳으로 효율적인 집배송을 위한 각 소화물의 운송시간에 따른 소화물터미널의 최적 설계 및 운영을 목적으로 한다. 최근에 급증하는 소화물의 효율적인 처리의 중요성이 증가되고 있으며 이와 관련된 연구들이 많이 늘어나고 있다. Daily [4]는 입력수요 예측 및 일일 운송 계획을 위한 의사결정시스템, "breakbulk operations"을 제시하였다. 또한 Simao & Powell [3]은 대량 도착 화물을 고려한 확률적 대기행렬 Network 방법으로 소화물시시스템을 제안하였다. 본 연구에서는 소화물터미널의 설계단계에서 경제적인 규모 설계 조건 산정을 위한 연구로서 소화물터미널에 집하되는 화물의 흐름을 분석하고 최적 터미널의 성능산정을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 수리적 모델을 개발하고 이를 전산화하였으며, 이를 이용하여 산출된 Sample 출력과 시뮬레이션 Tool인 AutoMod Simulator를 사용하여 구한 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에서 제시하는 소화물은 고정된 화물로서 트럭에 의한 개별 포장된 소화물 취급을 포함하고 있고, 소화물의 범위는 무게는 4500kg, 길이는 13m, 폭과 높이는 2.5m이하인 화물에 국한하였다.

### 2. 화물터미널의 배치설계

본 연구에서 고려한 화물터미널 집배송센터는

차량이 도착하여 대기 및 화물을 적하하는 위치와 배달을 위하여 대기 및 화물을 적재하는 차량출발 지역으로 구분되고 입구에 도착한 트럭내의 소화물은 운반장비에 의해서 화물터미널 내에서 운송되는 컨베이어에 적하되고 적하된 화물은 행선지에 따라 분류되고 특정 출구로 운반된 후 운반장비를 통해서 배달 지역으로 출발하는 화물트럭에 적재되어 배송된다. 그림 1은 본 연구에서 고려한 일반적인 소화물 터미널 시스템의 배치도를 나타내고 있다. 출구에서 혼잡도가 발생하거나, 적시에 화물을 트럭에 적재되지 못할 경우에는 임시저장장소인 중간 저장 지역(Buffer Floor Space) 또는 자동창고(AS/RS)에 저장이 되도록 시스템이 구성되었다. 그리고 본 연구에서 고려한 입·출구는 다음과 같이 정의한다.

- 1) 입구(Strip Door): 도착화물을 적하하기 위해 트럭이 화물을 싣고 도착한 지역
- 2) 출구(Stack Door): 특정지역으로 화물을 배송하기 대기중인 트럭이 존재하는 지역

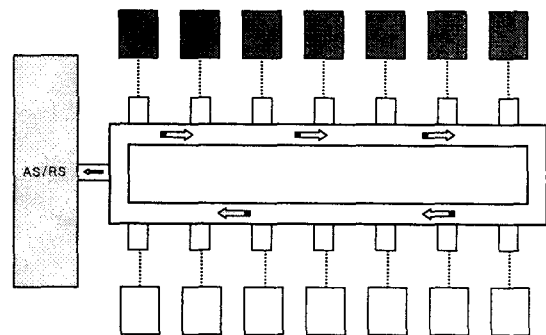


그림 1. 화물터미널배치도

### 3. 화물터미널의 수리적 모델

본 연구에서는 입구에서 출구로 운송되는 화물의 운송비용과 출구 내 중간 저장지역에서 임시 저장되는 시간에 따른 비용을 산정 하였고, 출구의 중간 저장지역의 크기에 영향을 미치는 화물의 밀집도에 관한 수리적 모델을 제시하였다. 총 소요비용의 최소화를 만족하는 최적화문제로 정식화 하였으며 목적함수는 출구  $j$ 까지의 운반비용과  $j$ 에서 발생하는 혼잡비용의 합이 최소가 되도록 하였다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} \quad & \text{Min} \quad TC_j + BC_j \\ \text{st} \quad & \sum_j x_j \\ & P_j \leq \max \{ F_j/A_j, \hat{P} \} \\ & x_j \geq 0, \quad P_j \geq 0 \end{aligned}$$

목적함수는 입구에서 출구로 운송되는 화물의 운송비용과 출구 내의 중간저장지역에서 지체시간에 따른 비용을 산정 하였고, 출구의 중간저장지역의 크기에 미치는 화물의 밀도에 관한 수리적 모델을 제시하였다. 각 입출구의 위치가 주어지면 입출구 간의 거리를 산정 할 수 있고, 운반 장비의 속도가 주어질 경우, “운반 시간 = 거리/속도” 의한 각각의 화물의 운반시간당 비용을 산정할 수 있다. 본 연구에서 사용되는 변수는 다음과 같다 :

- $c_{ij}$  : 입구  $i$ 에서 출구  $j$ 로 화물 운반비용
- $s$  : 화물운반장비의 평균 운행 속도(m/min)
- $h$  : 화물운반장비에 의한 평균 화물 운반량.
- $d_{ij}$  : 입구  $i$ 에서 출구  $j$ 로의 운반거리.
- $f_{ij}$  : 입구  $i$ 에서 출구  $j$ 로의 화물 흐름량
- $TC_{ij}$  : 입구  $i$ 에서 출구  $j$ 로의 총 비용
- $\hat{P}$  : 단위 면적당 허용 최대 밀도
- $BC_j$  : 출구  $j$ 에서 혼잡 도에 의한 비용

입구  $i$ 에서 출구  $j$ 로의 물류 장비 단위 운행비용은 다음과 같다.  $c_{ij} = d_{ij}/(s \cdot h)$

그러므로 입구에서 출구로의 총 운반비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(TC_j) = \sum_{i,j} c_{ij} f_{ij} = \sum_{i,j} (d_{ij}/s)(f_{ij}/h) \quad 1)$$

## 2.1 설비간의 위치 거리 산정

총 운송거리에 따라서 운반장비의 운행비용에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 입구와 출구의 위치가 주어지는 경우에 각각의 입출구 간의 거리를 LP-Distance를 사용하여 산정 하였다. 화물터미널의 배치도에 따라서 본 연구에서 고려한 LP-Distance 식을 다음과 같다. 그림 1에서 보면 소화물이 입구에서 출구로 이동될 경우 운반거리는 각각의 직선거리와 직각거리를 고려하여 구할 수 있다. 따라서 LP-Distance의  $p$  값은 1 과 2를 동시에 고려한다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

LP-Distance' =

$$(|x-x_1|^{p_1} + |y-y_1|^{p_1})^{\frac{1}{p_1}} + (|x_1-x_2|^{p_2} + |y_1-y_2|^{p_2})^{\frac{1}{p_2}} \quad 2)$$

$(x, y)$ 와  $(x_2, y_2)$ 는 입구와 출구의 위치이고,  $(x_1, y_1)$ 는 입구와의 직각거리 계산을 위한 지점이 된다.

## 2.2 소화물 화물터미널의 혼잡도 비용 산정

화물터미널의 출구에 위치하는 중간 저장장소에 소화물을 적정한 운반장비의 운반량이 저장 가능한 물량보다 클 경우, 운반장비가 소화물을 싣고 대기해야 할 경우 혼잡도를 물류시스템의 “혼잡도”로 정의하였다. 혼잡도 정도에 따라서 터미널 시스템서 화물 운송의 지연에 큰 영향을 미칠

수 있다.

이러한 혼잡도로 인해서 발생하는 물류비용은 다음과 같다.

- 출구  $j$ 로 운반되는 물류량 :

$$g_j = \sum_{i,j} f_{ij} x_{ij}$$

- 출구  $j$ 에 도착하는 화물의 평균 도착률 :

$$\lambda_j = \frac{1}{h \cdot t} \sum_i f_{ij} x_{ij}$$

출구의 화물 운반장비의 화물 운송서비스는 시간이 평균  $1/\mu$ 인 지수분포 및 운반차량 도착은  $\lambda_j$ 인 포아손분포를 따를 경우, 출구  $j$ 에서 총 물류 흐름량은 다음과 같다.

$$\cdot \text{물류 흐름량, } g_j = \sum_i f_{ij}$$

$$\cdot \text{운반차량의 평균 도착률, } \lambda_j = \frac{g_j}{h} t$$

따라서 M/G/1 대기행렬시스템의 기대평균대기길이는 다음과 같이 구한다.

기대평균 길이

$$L_j = \frac{(\lambda_j)E[S^2]}{2(1 - (\lambda_j + \bar{\lambda}_j))E(S)} = \frac{\lambda_j(\lambda_j)}{\mu(\mu - \lambda_j)} \quad 3)$$

여기서,  $L_j$ 는 출구  $j$ 의 중간저장장소로의 시간당 대기량을 나타낸다. 또한 혼잡도로 인하여 발생하는 대기시간을 고려한 비용은 다음과 같다.

$$BC_j = \sum_j \frac{\lambda_j^2}{\mu(\mu - \lambda_j)} \quad 4)$$

따라서 총 비용은 운반비용과 혼잡도에 따른 설비의 정체비용의 합으로 다음과 같다.

$$\text{총 비용} = tc_j + BC_j$$

$$= \sum_{i,j} f_{ij} d_{ij} x_{ij} / v + \sum_j \lambda_j^2 / \mu(\mu - \lambda_j) \quad 5)$$

## 2.3 중간저장장소(Buffer Floor Space)크기 산정

출구차량에 물건을 바로 운반하지 못할 경우, 운반장비는 출구에 위치한 중간저장장소에 화물을 저장한다. 화물터미널의 집배송센터에서 설비 배치가 적절하게 될수록 물류 흐름의 정체가 줄어들어 각 중간저장장소에서 발생하는 화물 밀집도, 즉 화물의 용적량을 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 적절한 중간 저장장소의 배치는 화물터미널의 효율적인 운영에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서는 초기 설계 단계에서부터 효율적인 화물터미널의 운영을 위하여 각 중간저장장소의 화물밀집도를 최소로 할 수 있는 크기를 다음과 같이 산정 하였다. 여기서 중간저장장소와 화물용적량의 관계는 다음과 같다.

$$P = F/A$$

여기서,

- $P$  = 혼잡도(밀집도)
- $F$  = 화물 물류량
- $A$  = 중간저장지역

중간저장장소  $A_j$ 에 도착하는 화물이 포화상태일 경우, 운반장비는 중간저장장소,  $A_j$  이외의 다른 중간저장장소 지역에 화물을 저장한다. 출구  $j$ 에 미치는 밀집도는 전체 출구지역을 지나는 화물량의 밀집도에 영향을 받으며 이를 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_j = \frac{F_j + \sum_{k \in N(j)} \frac{1}{n_k} (F_k - \hat{P}A_k)^+}{A_j} \quad (6)$$

여기서,

- $(exp)^+$ 는  $\max\{0, exp\}$
  - $F_j$  = 출구  $j$ 로 향하는 화물 물류량
  - $A_j$  = 출구  $j$ 의 중간저장장소 크기
  - $N(j)$  = 용량초과로 인한 출구  $j$  중간저장 장소 이외의 다른 중간 저장장소의 집합
- 중간저장장소  $A_j$ 는 출구  $j$ 로 운반되는 화물의 임시저장장소이며 이는 실제적으로  $A_j$ 의 좌우 출구 중간저장장소,  $A_{j-1}$ 와  $A_{j+1}$ 에 영향을 미친다. 두 인근 지역의 밀집도를 고려한 혼잡도는 다음과 같다

$$P_j = \frac{F_j + \frac{1}{2}(F_{j-1} - \hat{P}A_{j-1})^+ + \frac{1}{2}(F_{j+1} - \hat{P}A_{j+1})}{A_j}$$

$A_{j-1} = A_j = A_{j+1}$ 이라고 가정을 하면, 즉 모든 출구의 중간저장장소 크기가 동일하다는 가정 하에  $F_j \leq 2\hat{P}A_j$ 을 구할 수 있고,

$$P_j = \frac{F_j + \frac{1}{2}(F_{j-1} - \hat{P}A_{j-1})^+ + \frac{1}{2}(F_{j+1} - \hat{P}A_{j+1})^+}{A_j} \quad (7)$$

$P_j$ 값이 최소가 되기 위한  $\hat{P}A_j$ 는 다음과 같다.

$$\therefore \hat{P}A_j = \frac{1}{2} F_j \quad (8)$$

식 8을 만족할 경우, 각 지역의 밀집도가 최소가 되므로 식 8을 식 7에 대입하면

$$P_j = \frac{4F_j + F_{j-1}^+ + F_{j+1}^+}{4A_j} \quad (9)$$

여기서 식 9를 이용하여 각 출구  $j$ 의 중간저장장소의 최소 화물밀도를 구할 수 있다. 그리고 모든 출구의 총 화물밀도는  $\sum P_{ij}$ 의 최소 값으로 산정할 수 있다.

#### 4. 응용예제

본 응용예제에서는 수리모델로 산정된 값과 수리모델에서 사용한 파라미터들을 이용하여 AutoMod 시뮬레이터 Tool를 이용하여 동일예제의 결과를 비교 분석하였다.

##### 4.1 수리적 모델

본 예제에서는 소화물터미널의 입·출구의 수를 각각 5곳으로 가정하여, 화물터미널의 성능 및 최소 물류비용을 산정 하였다. 주어진 파라미터는 다음과 같다.

- 물류 운반장비가 수송하는 평균량 = 5 unit
- 평균 서비스 율 = 0.95
- 중간저장지역 = 4  $m^2$
- 물류 장비 운행속도 = 10 m/min
- 물류 장비 Loading/Unloading time = 25sec

표 1과 같이 화물터미널 입·출구의 위치가 주어질 경우 직선거리에 따른 값이 표 2와 같다.

표 1. 화물터미널의 입구 및 출구위치

입구 번호	x 축		출구 번호	y 축	
	x 축	y 축		x 축	y 축
1	0	10	1	0	0
2	10	10	2	10	0
3	20	10	3	20	0
4	30	10	4	30	0
5	40	10	5	40	0

표 2. 화물터미널의 입·출구간의 거리

출구 \ 입구	1	2	3	4	5
1	90	80	70	60	50
2	80	70	60	50	40
3	70	60	50	40	30
4	60	50	40	30	20
5	50	40	30	20	10

그리고 화물터미널의 입·출구간의 화물운반량이 표 3과 같이 제시될 경우 본 연구에서 도출된 식을 응용하여 주어진 소화물터미널의 최소 혼잡도의 산정 및 이 경우의 물류비용을 표 4와 같이 요약하였다.

표 3. 입·출구간의 화물운반량

출구 \ 입구	1	2	3	4	5
1	20	19	14	25	10
2	12	20	22	5	14
3	20	12	13	2	19
4	15	10	20	9	1
5	1	21	18	2	2

표 4. 운반되는 물류량, 밀도, 비용의 Sample 출력

Door 번호	1	2	3	4	5	총계
입구물류량	68	82	87	43	46	326
출구 물류량	88	73	66	55	44	326
총 물류량	156	155	153	98	90	652
중간저장장소의 밀집도	26 (650%)	25 (625%)	24 (600%)	20 (500%)	14 (350%)	109
화물운반비용	630	449	342	249	149	1,819
혼잡도 비용	18.73	15.57	14.1	11.78	9.47	67
총 비용	648	464	356	260	158	1,886

주어진 입·출구간의 거리는 최소 10에서 최대 90이며, 이는 LP-Distance내  $b_1=1$  및  $b_2=2$ 로 설정하여 산정된 값이다. 입출구간의 화물운반량이 주어질 경우, 각 출구의 운반량은 표 4와 같고, 최대 운반량은 출구1로 88이 된다. 출구의 임시저장장소에서 발생하는 밀도는 출구1이 26으로 가장 높고, 화물운반에 소요되는 총 비용은 출구1이 648로 가장 높고, 출구5가 158로 가장 적다. 그 이유 중의 하나는 출구1이 출구5보다 운반거리가 더 길고 운반되는 운반량이 더 많기 때문이다.

#### 4.2 AutoMod를 이용한 화물터미널 성능산정

수리모델에서 제시된 Parameter들을 사용하여 소화물 화물터미널을 시뮬레이션 하였다. 그림 2는 AutoMod로 시뮬레이션 한 화면을 나타내고 있다.

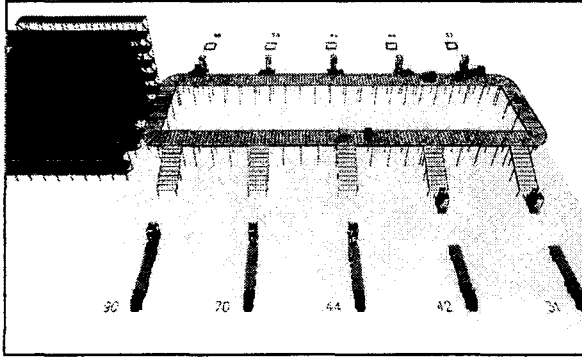


그림 2. AutoMod 시뮬레이션에 의한 터미널 배치도

AutoMod를 이용한 시뮬레이션 출력값이 표 5와 같다.

표 5. 입·출구간의 물류량 및 혼잡도

Door 번호	1	2	3	4	5	총계
입구 물류량	60.02	60.02	60.02	60.02	60.02	300.1
출구 물류량	131.26	66.24	43.3	33.04	26.10	299.94
총 물류량	191.28	126.26	103.32	93.06	86.12	600.04
혼잡도	28 (700%)	12 (300%)	8 (200%)	8 (200%)	6 (150%)	

각각의 입구에서는 화물이 동일하게(60.02unit) 처리되었으나, 출구 1의 시간당 물류량은 131.26unit, 시간당 총 출구 물류처리량은 299.98unit이다. 이를 바탕으로 터미널 시스템의 총 시간당 물류처리량은 600.04unit이다. 각 출구의 임시저장장소의 크기는 수리모델과 동일하게 4로 주어질 경우, 주어진 크기보다 초과하여 혼잡도가 발생하여 출구 1은 350%, 출구2는 150%가 되었고, 출구3, 4, 5는 주어진 지역 내에서 혼잡도가 발생하지 않았다. 시뮬레이션을 이용한 출력값과 수리적 모델을 적용한 출력의 주요 결과를 표6 및 표7과 같이 비교하였다. 각각의 Door에서 처리되는 물류량의 비교 시 수리모델은 Door 1의 156 units가 시뮬레이션 모델

표 6. 수리모델과 AutoMod간의 물류량 비교

Door 번호	1	2	3	4	5	총계
수리모델 총 물류량	156	155	153	98	90	652
시뮬레이션 모델 총 물류량	191.28	126.26	103.32	93.06	86.12	600.04

의 시간당 물류량, 191.28 units보다 적으나 그 이외의 모든 값은 크고, 혼잡도에서는 수리모델과 시뮬레이션 모델 모두가 주어진 중간저장지역에서

표 7. 수리모델과 AutoMod간의 출구 혼잡도

Door 번호	1	2	3	4	5	총계
수리모델 혼잡도	26	25	24	20	14	109
시뮬레이션 모델 혼잡도	28	12	8	8	6	62

혼잡도가 발생하였으나 수리모델(Door 1제외)의 결과가 보다 큰 결과를 보였다. 이것은 시뮬레이션 모델에서 보다 현실적 요소 등을 고려함으로써 차이가 발생하였다고 볼 수 있다. 한편 시간당 물류처리량 역시 수리모델이 약 52개 정도가 더 많았다. 현재의 대부분의 연구에서 일반적으로 수리모델의 개발 및 이상적 상황 속에서 출력 값을 산출하여 그 결과를 분석하고 있으나 이런 수리적 모델에서 많은 가정사항들을 포함하므로 시뮬레이션 모델로 구축후 출력 값을 구하여 비교함으로써 보다 현실적 분석이 이루어질 수 있을 것이다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 화물터미널의 설계단계에서 터미널의 경제적인 규모산정과 성능산정을 위한 연구로서 먼저 수리모델을 제시하고 및 이를 위한 전산 프로그램을 개발하였으며 화물터미널의 사용비용, 혼잡도, 및 물류처리량을 산출하였고, 다음으로 시뮬레이션 Tool인 AutoMod Simulator를 사용하여 구한 결과를 비교 분석하였다. 화물터미널 특히 소화물 터미널의 효과적인 운영에 관한 연구는 그 필요성이 매우 크며 터미널 내에서 수행되는 운반장비, 화물의 특성에 따른 취급 및 운반과 과 임시저장장소의 효율적인 크기 산정 등 고려 요소들이 다양하다. 자동창고와 관련하여 효율적인 화물의 재고정책 등을 수행하기 위한 연구와 Order Picking 문제와 관련하여 연구할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] *AutoMod User Manual*, Vol. 1-4, AutoSimulations Corp. 1998.
- [2] Ferreira, L, Sigut, J, "Modelling Intermodal Freight Terminal Operations", *Road and Transport Research*, v.4 no.4, p.4-16, 1995.
- [3] Hugo P. Simao and Warren P. Powell, "Numerical Methods for Simulating Transient Stochastic Queueing Networks-I.", *Transportation Science*, 26(4), 296-311, 1992.
- [4] Madison M. Daily, Chareles Dare, and Yildirm Omurtag, "Decision Support System for Trucking Break-Bulk Operations", *Transportation Research Record*, pp.64-72, 1985.
- [5] Martland, Carl D., "Improving Freight Terminal Operating Performance ", World Congress on Railway Research Conference 1996 : A Specialist Technical Conference, Exposition & Workshop; Colorado Springs, USA; 17-19, pp. 227-231, 1996.