

Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV System 설계에 관한 연구

정병도¹ · 김경섭^{2*}

¹아이에스테크 / ²연세대학교 컴퓨터산업공학부

A Study on Design of a Tandem AGV System with Multi-Load AGVs

Byung Do Chung¹ · Kyung Sup Kim²

¹ISTech Co., Ltd., Seoul, 143-200

²School of Computer Science and Industrial Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749

Tandem AGV system is obtained by partitioning all workstations into multiple zones assigning a single vehicle to each zone. In this paper, we propose an analytical model to design a tandem AGV system with multi-load AGVs. Using simulation, the performance of the proposed model is shown by comparing a conventional multi-load AGV system.

Keywords: tandem AGV system, multi-load AGV, markov chain

1. 서론

고객의 다양한 요구에 신속하게 대응하기 위해서 기업의 생산 시스템은 자동화, 지능화 되어가고 있으며, 이는 유연 생산 시스템, 컴퓨터 통합 생산 시스템 등의 형태로 나타나고 있다. 이에 더불어 공정 간의 재공, 재고를 운반해 주기 위한 물류 시스템도 자동화되어, 생산 시스템의 한 부분으로서 그 역할을 충실히 수행하고 있다. 특히, 무인 운반 차량 시스템(AGVS: Automated Guided Vehicle System)은 생산 현장뿐만 아니라 병원, 사무실 등에서도 많이 사용되고 있으며, 사용 범위는 점차 확대되어 가고 있다.

AGV 시스템을 효과적으로 사용하기 위한 연구는 크게 시스템의 설계에 관한 연구와 운영에 관한 연구로 구분할 수 있다. 시스템의 설계에 관한 연구는 사용되는 차량의 수와 종류의 결정, 차량이 이동할 수 있는 유도 경로의 설계 등이 있으며, 시스템의 운영에 관한 연구로는 차량의 운영을 위한 발주법의 개발 및 평가, 차량의 충돌 및 혼잡 방지를 위한 연구 등이 포함

된다.

시스템의 새로운 설계 방식을 통해 차량의 충돌 및 혼잡 등의 운영의 어려움을 제거한 대표적인 시스템은 Tandem AGV 시스템이다(Bozer *et al.*, 1989). Tandem AGV 시스템은 전체 시스템을 몇 개의 지역으로 구분하고, 각 지역에 한 대의 차량을 할당하는 방법을 통해 차량의 혼잡 및 충돌 등의 운영상의 어려움을 해결한 시스템으로 그 성능 또한 입증되어지고 있다. 하지만 Tandem AGV 시스템에 관련된 기존의 연구는 모두 Unit-load AGV 시스템에만 국한되어 연구가 진행되어져 왔다. Multi-load AGV 시스템은 성능의 우수성에도 불구하고, 연구의 복잡성 때문에 별다른 연구가 진행되지 못했었다. 특히, Traditional AGV 시스템의 연구에 있어서도 Multi-load AGV 시스템에 관한 연구는 차량의 선적 능력 분석, 발주법 개발 등의 극히 일부분에만 치중되어 있는게 현실이었다.

본 연구의 목적은 Tandem AGV 시스템에 관한 연구들을 정리하고, Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV 시스템을 설계하기 위한 작업장 분할 알고리즘을 제시하는 것이다. 본 논문의 전반적인 설계 방법은 Bozer and Srinivasan(1992)이 Unit-load

* 연락저자: 김경섭 교수, 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 컴퓨터산업공학부, Fax: 02-364-7807, e-mail: kyungkim@yonsei.ac.kr

2001년 1월 접수, 3회 수정 후 2001년 11월 게재 확정.

AGV를 사용하는 Tandem AGV 시스템을 설계하기 위해 제시한 방법론을 따르고 있으며, Multi-load 상황에 따른 작업장 집합별 차량의 활용도 계산을 제시하였다. Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV 시스템의 설계 알고리즘의 제시는 재공(WIP : Work In Process)의 감소를 위해 Lot의 크기를 감소시키는 JIT(Just In Time) 환경의 생산 시스템에 특히 많은 효과가 있을 것으로 기대된다(Occena *et al.*, 1993).

본 연구의 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서는 본 연구의 대상 시스템인 Tandem AGV 관련 연구들을 정리하고, 3장에서는 Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV 시스템의 설계를 위한 방법론을 제시한다. 4장에서는 대상 시스템에 대한 수치 예제와 시뮬레이션 결과를 보여주며, 마지막으로 5장에서 결론 및 추후 연구 과제에 대해 논의한다.

2. 기존 관련 연구

Tandem AGV 시스템은 Bozer and Srinivasan(1989)이 처음으로 제안한 시스템이다. 그들은 기존에 사용되던 AGV 시스템을 Traditional AGV 시스템이라 정의하고, 이와는 달리 'Devide and Conquer'의 이론을 적용하여 만든 시스템을 Tandem Configuration이라 정의하였다. Traditional AGV 시스템은 <그림 1>과 같은 형태로 일반적으로 많이 사용되고 있는 경로 설계 방식이다. 전체 시스템은 한 대 이상의 차량으로 운영되며, 각 차량은 어떠한 작업장이라도 도달할 수 있는 시스템이다. 반면 Tandem AGV 시스템은 <그림 2>와 같이 전체 시스템을 몇 개의 지역으로 구분한 뒤, 각 지역에 한 대의 차량만을 할당하는 방식으로 차량 혼잡 및 충돌 등에 관련된 문제를 해결한 시스템이다.

Bozer and Srinivasan(1992)은 수학적 모델을 이용하여 Tandem AGV 시스템을 설계하기 위한 작업장 분할 휴리스틱을 제시하였다. 이들은 외판원 문제(TSP)를 통해 유효 지역을 선정하고, 각 지역에서 운영되는 차량 활용도의 값을 낮춤으로써 병목 지역이 발생되지 않도록 하고 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 그들의 알고리즘으로 얻어진 Tandem AGV 시스템이 Traditional AGV 시스템과 비교하여 경쟁력이 있음을 보여주었다.

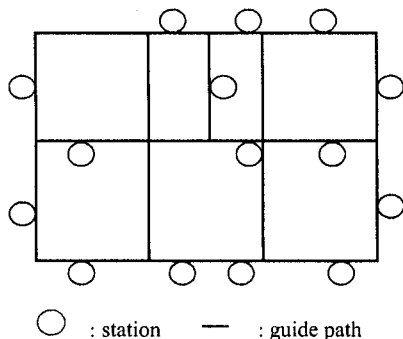


그림 1. Traditional AGV 시스템.

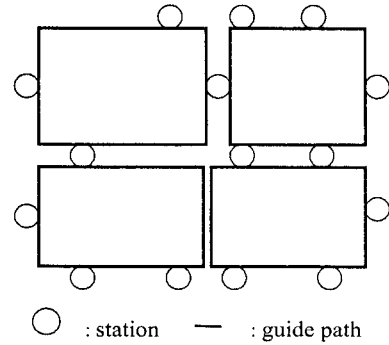


그림 2. Tandem AGV 시스템.

Huang(1997)은 Tandem AGV 시스템에서는 각 지역 간의 작업물의 운송을 담당할 추가적인 작업장이 필요한데, 이는 공간과 설치비용의 문제를 야기한다는 점을 지적하면서 이를 해결하기 위해 분할된 지역 간의 운반물(Transit load)을 담당할 운송 센터를 설치하는 수정된 Tandem AGV 시스템을 제안하였다.

이 밖에 Tandem AGV 시스템과 비슷한 개념의 시스템으로, Sinriech 등(1996)에 의해 제안된 SBSL(Segmented Bi-directional Single Loop) AGV 시스템은 Optimal Single Loop AGV 시스템을 몇 개의 지역으로 구분하고 각 지역에는 한 대의 차량을 할당하는 방식을 취하고 있다. Liu and Chen(1997)은 전체 시스템을 몇 개의 지역으로 구분하고, 각 지역은 한 대의 차량으로 서비스 받음과 동시에 차량 경로의 일부 교차를 허용하는 Divided AGV 시스템을 제시하였다. 박윤선과 박대희(1997)는 제시된 작업장 분할 알고리즘에 따라 작업장을 분할 한 후, Central Path를 추가적으로 설치하여 지역 간의 운반물을 처리하게 하는 Central Path Design을 제시하였다.

처음 Tandem AGV 시스템이 제안되었을 때에는 Bartholdi and Platzman(1989)이 제안한 FEFS(First Encountered First Served) 발주법이 사용되었다. 그들은 AGV가 간단한 루프 형태의 시스템에서 운영될 때, FEFS 발주법이 기존의 다른 발주법보다 좋은 성능을 나타내고 있음을 보여주었다. 이후, 많은 발주법이 제안되었지만 특별히 Tandem 형태의 AGV 시스템을 위한 발주법으로는 박윤선과 박대희(1997)가 제안한 MEVTT(Minimum Empty Vehicle Travel Time), 김경섭과 정병도(1998)가 제안한 MVED(Minimum Vehicle's Empty Distance) 발주법이 대표적이다.

한편, Lin(1994) 등은 Tandem AGV 시스템에 있어서 운송물의 이동 경로를 시스템의 상황에 맞춰 지정함으로써 분할된 지역 간의 운송 능력을 조절할 수 있는 작업 경로 문제를 수학적 모델과 시뮬레이션을 이용하는 두 단계의 방법을 이용하여 해결하였다.

Tandem AGV 시스템과 Traditional AGV 시스템 간의 수행도 평가를 위한 연구는 Choi 등과 Ross(1994) 등에 의해 이루어졌다. 그들은 각각 다양한 조건하에서 생산량, 차량 활용도, 평균 작업 시간 등의 시스템의 성능이 어떻게 변하는가를 평가하였다. 그들은 실험 결과를 통해 Tandem AGV 시스템이 Traditional

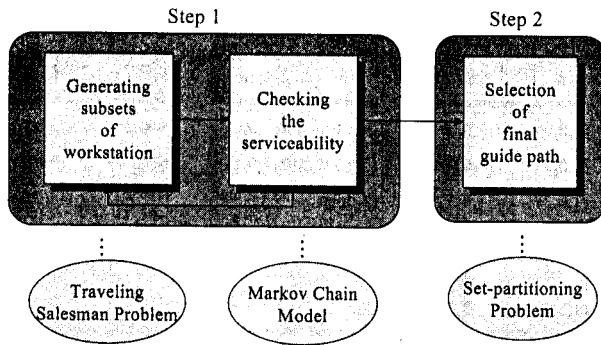


그림 3. 작업장 분할 알고리즘.

AGV 시스템에 비해 보다 많은 생산량을 보여주고 있으나 차량 활용도나 평균 작업 시간에 있어서는 Traditional AGV 시스템이 보다 좋은 결과를 보여준다고 정리하고 있다. 또한 차량의 속도가 시스템의 성능 변화에 가장 중요한 요소임을 보여주었다. Ross (1996) 등은 Tandem AGV 시스템은 보다 간단한 운영 시스템을 이용하면서 Traditional AGV 시스템과 비슷한 성능을 나타냄을 실험을 통해 보여주었다.

3. 작업장 분할 알고리즘

본 논문에서 제시하는 Multi-load를 사용하는 Tandem AGV 시스템의 설계 방법론은 <그림 3>과 같이 크게 두 단계로 구분된다.

제1단계에서는 외판원 문제를 이용하여 작업의 흐름이 많고 거리가 가까운 작업장들을 기준으로 최적의 작업장 순서를 결정한다. 이렇게 결정된 순서를 기준으로 작업장 집합을 형성하고, 이들을 대상으로 단일 루프 AGV 시스템을 설계한다. 마코브 체인 모델을 이용하여 단일 루프 AGV 시스템을 모델링하고, AGV 상태에 대한 극한 확률을 계산하여 최종적으로 차량의 활용도를 얻게 된다. 만일 설정된 작업장 집합이 한대의 차량으로 서비스가 가능하다면 그 집합은 유효 지역으로 저장되게 된다. Bozer and Srinivasan(1992)은 한 대의 차량으로 서비스 가능한 차량 활용도를 0.7~0.8로 제시하고 있다. 이와 같은 작업장 집합 형성과 서비스 가능성 조사는 외판원 문제를 통해 얻어진 결과가 완전히 검토될 때까지 반복하게 된다. 시스템의 규모가 작을 경우는 생성 가능한 모든 작업장 집합을 구성하여 서비스 가능성을 조사할 수도 있겠지만, 시스템의 규모가 커질 경우를 대비하여 작업장 생성 과정이 필요하다. 제2단계에서는 앞에서 구해진 유효 지역들을 대상으로 Set-partitioning Problem 형태의 문제로 최종 유도 경로를 선정하게 된다.

작업장 분할 알고리즘을 적용하기 위해서 다음과 같은 몇 가지 가정이 필요하다.

- 각 작업장의 위치는 결정되어져 있다.
- 각 작업의 도착 간격은 지수 분포를 따르며, 작업 경로는

결정되어져 있다.

- 차량의 이동 속도는 알려져 있다.
- 차량과 기계의 고장에 의한 지연은 고려하지 않는다.
- 선적/하역시간은 서비스 시간에 포함하며, 따로 고려하지 않는다.
- 차량 발주법으로 FERS 발주법을 사용한다.

3.1 단계 1: 유효지역 선정

3.1.1 작업장의 상관도 계산

서로 연관이 많은, 즉 가깝고 운송물이 많은 작업장들을 하나의 작업장 집합으로 형성하기 위해서 상관도를 계산하게 된다. 작업장 i 와 작업장 j 사이의 상관도(R_{ij})는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$R_{ij} = (f_{ij} + f_{ji})/d_{ij}$$

where, f_{ij} : i 에서 j 로 이동되는 작업량
 d_{ij} : i 에서 j 까지의 거리

3.1.2 작업장 집합의 형성

전체 작업장을 대상으로 Euclidean TSP를 풀어 최적의 작업장 순서를 구성한다. 3.1.1절에서 계산된 상관도가 운송의 비용으로 사용되며, 이는 상관 관계가 많은 작업장을 하나의 집합으로 형성하면서, 제2단계에서 최종 해를 쉽게 구하기 위해서이다. 단, 인근 작업장만을 고려함으로써 작업장의 고립을 방지한다.

이와 같이 TSP가 형성되면 첫 번째 작업장부터 하나의 작업장을 추가해 가면서 작업장 집합을 형성한다. 예를 들어 3-1-4-2-5라는 해가 도출되었다면, 우선 작업장 3을 기준으로 {3, 1}이라는 작업장 집합이 형성된다. 만약 형성된 작업장 집합이 한 대의 차량으로 서비스가 가능하다면 {3, 1, 4}가 새로운 집합으로 형성되며 다시 한 대의 차량으로 서비스 가능 여부를 검사 받게 된다. 만약 {3, 1, 4}가 한 대의 차량으로 서비스 받을 수 있다면 {3, 1, 4, 2}가 다음 작업장 집합으로 형성되지만, 한 대의 차량으로 서비스를 받을 수 없다면 작업장 1을 기준으로 {1, 4}가 새로운 작업장 집합으로 형성된다. 이와 같은 방식으로 각 작업장 집합들이 형성되며, 다음에 이어지는 단계들을 통하여 한 대의 차량으로 서비스가 가능한지 검사 받게 된다.

3.1.3 작업장 집합의 단일 루프 시스템 구성

우선 다른 작업장 집합으로 운송되어지고, 다른 작업장 집합으로부터 운송 받을 작업물을 담당하기 위한 추가적인 Transit 작업장을 설치해야 한다. Transit 작업장의 위치를 결정하는 것은 최종적인 작업장 분할이 이루어진 후에 다시 이루어져야 하는 문제이지만, 각 작업장 집합에서 운영되는 차량의 활용도를 계산하기 위해서 각 작업장의 좌표상의 중간 지

점에 설치하는 것으로 가정하고 시스템을 모델링하게 된다.

예를 들어 작업장 집합은 {1, 2, 3}으로 형성되었고, TSP의 결과가 1-2-3-1로 계산되었다면, Transit 작업장을 포함한 작업장의 순서는 1-T1-2-T2-3-T3-1로 설정될 수 있다.

차량의 경로는 앞서 계산된 작업장들의 상관도값을 바탕으로 Rectilinear TSP를 통해 작업장 집합 내의 작업장의 순서를 결정할 수 있게 되며, 이들을 대상으로 작업장 집합의 외부에서 들어오는 작업물과 내부에서 이동하는 작업물을 고려하여 작업장 집합 내의 작업장만의 From-to Chart와 Distance Matrix를 작성한다.

이를 바탕으로 차량이 시계방향으로 순회할 경우와 반시계 방향으로 순회할 경우 두 가지 경우에 대해 다음 식의 계산을 통하여 최소값을 갖는 경우를 차량의 이동 방향으로 선정한다.

$$\sum_i \sum_j f_{ij} * d_{ij}$$

where i, j : 해당 작업장 집합의 구성 작업장

3.1.4 전환 확률 행렬의 형성

이와 같이 한 대의 차량으로 서비스 받을 작업장 집합이 구성이 되고, 이를 대상으로 단일 루프 AGV 시스템이 설계가 되면 다음의 과정을 통해서 차량의 활용도가 계산이 된다. 우선 단일 루프 AGV 시스템은 마코브 체인 모델로 표현이 되며, 극한 확률값의 계산을 통해 시스템의 상태에 따른 확률 분포를 계산하게 된다. 그리고 이와 같이 얻어진 확률값들을 기준으로 3.1.5절에서 차량의 활용도를 계산하게 된다.

Multi-load AGV를 사용하는 단일 루프 AGV 시스템의 차량 활용도를 계산하기 위해 마코브 체인의 상태를 (V, L_1, L_2) 로 정의한다. V 는 현재 차량이 위치한 작업장의 번호이며, L_1 과 L_2 는 현재 AGV에 선적되어 있는 작업물들의 목적 작업장을 나타낸다. 만일 이동될 작업물이 없으면 0으로 표기한다. 만약 AGV가 운송할 수 있는 작업물의 수가 증가한다면 상태를 $(V, L_1, L_2, L_3, \dots)$ 등으로 확장하여 정의할 수 있을 것이다.

예를 들어 단일 루프 AGV 시스템의 차량 이동 순서가 1-2-3-1이고, 빈 상태의 AGV가 1번 작업장에서 2번 작업장에 하역할 짐을 하나만 선적하고 출발한다면 현재의 상태는 $(1, 2, 0)$ 또는 $(1, 0, 2)$ 로 표현할 수 있으며, 상태 표현의 통일을 위해 L_1 과 L_2 에 해당되는 값은 오름차순으로 정리한다. Tandem AGV 시스템은 FEFS 발주법이 사용된다고 가정하고 있기 때문에, 다음 작업장은 2번 작업장이 된다. AGV는 2번 작업장에서 신고 온 짐을 하역하게 되고 시스템의 상태는 확률 1의 값으로 $(2, 0, 0)$ 으로 바뀌게 된다. 그리고 AGV가 작업장 2에서 선적하는 짐에 따라, 즉 작업장 2에 도착되는 작업물의 확률에 따라 다음 상태는 $(2, L_1, L_2)$ 이 되며, L_1 과 L_2 는 0, 1, 3 중의 하나의 값을 갖게 된다. 결론적으로 현 작업장의 선적 장소에서 다음 작업장의 하역 장소까지의 이동은 확률 1의 상태로 나타나기 때문에 시스템의 상태를 작업장의 하역 장소를 기준으로 파악할 수 있으며, 마코브 체인의 전환 확률 행렬도 이를 바탕으로

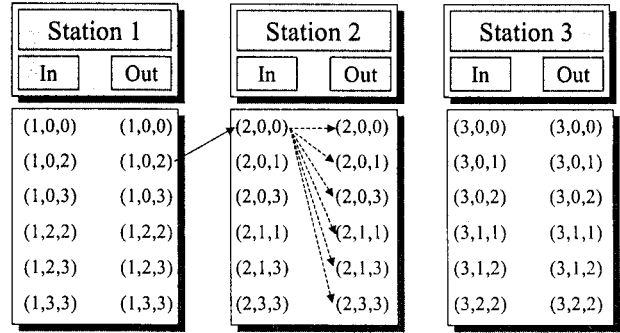


그림 4. 작업장 상태의 표시.

작성할 수 있다. 이 예에 관한 시스템 상태의 변화는 <그림 4>를 통해 쉽게 파악할 수 있을 것이다. <그림 4>에서 실선 화살표는 확률 1의 상태 변이를 표현하고 있으며, 점선 화살표는 경우에 따라 발생 가능한 상태 변이를 표현하고 있다.

본 연구에서는 시스템으로 유입되는 작업물의 도착 간격은 지수분포를 따른다고 가정하였기 때문에, 작업물의 도착 확률은 지수 분포의 확률 분포 함수로부터 쉽게 계산할 수 있다. 단, 이들 확률은 AGV가 현 작업장에서 신고 갈 수 있는 짐의 수에 따라 구분되어 계산되어 진다. 만일 AGV가 빈 상태이고, 짐을 2개까지 선적할 수 있다면, 다음의 식을 이용하여 전환 확률값을 계산할 수 있다. 현재 차량이 있는 작업장을 V 로 표시하고, 다음 이동 작업장을 V' 로 표시할 경우, $P[L_1 = m, L_2 = n]$ 는 $(V, 0, 0)$ 에서 (V', m, n) 으로의 전환 확률을 나타내며, L_1 또는 L_2 가 0의 값을 갖는 것은 앞서 설명한 바와 같이 선적할 짐이 없음을 나타낸다.

$$P[L_1 = 0, L_2 = 0] = e^{(-\lambda T)}$$

$$P[L_1 = m, L_2 = 0] = e^{(-\lambda T)} \lambda T p_{V', m}$$

$$P[L_1 = m, L_2 = n] = \{1 - (1 + \lambda T) e^{(-\lambda T)} \lambda T\} p_{V', m} p_{V', n}$$

where, T : AGV가 시스템을 한 바퀴 순회하는 데 소요되는 시간

λ : V' 작업장의 작업물의 시간당 평균 도착률

p_{ij} : i 작업장에서 선적되는 작업물 중에서 j 작업장이 목적 작업장일 확률

한편, 차량이 한 개의 작업물(예: 목적 작업장이 n 일 경우)을 선적하고 있는 상태로 선적장에 도착하였을 경우, 다음의 식을 통해 확률이 계산되어 진다.

$$P[L_1 = 0, L_2 = 0] = 0$$

$$P[L_1 = n, L_2 = 0] = e^{(-\lambda T)}$$

$$P[L_1 = n, L_2 = m] = \{1 - e^{(-\lambda T)}\} p_{V', m}$$

또한 두 개의 작업물(예: 목적 작업장이 각각 m, n 일 경우)을 신고 있어서 추가적으로 작업물을 선적할 수 없는 경우의 확률은 각각 다음의 식으로 정리될 수 있다.

$$P[L_1 = 0, L_2 = 0] = 0$$

$$P[L_1 = n, L_2 = 0] = 0$$

$$P[L_1 = n, L_2 = m] = 1$$

3.1.5 차량 활용도의 계산

3.1.4절을 통해서 전환 확률 행렬을 구할 수 있으며, 이를 통해 각 상태에 대한 극한 확률을 계산할 수 있으며, 극한 확률은 각 작업장에서 차량이 평균적으로 신고 이동하는 작업물의 개수에 대한 확률값을 나타낸다. 차량 활용도(ω)는 각 상태가 발생될 수 있는 극한 확률, 이동량, 이동 거리 등을 통해 계산할 수 있다. 여기서 계산된 차량 활용도는 3.2의 최종 경로 선정 단계의 비용 계수로 사용된다.

$$\omega = \frac{\sum_i \frac{\pi_i}{\sum_j \pi_j} F_i D_i}{l * D}$$

where $i \in S, j \in S'$

S : Markov 체인에서 정의된 모든 상태들의 집합

S' : i 상태와 현재 차량의 위치(V)가 같은 상태들의 집합

π_i : i 상태에 대한 극한 확률값

F_i : i 상태에서의 이동할 작업물의 수

D_i : i 상태에서 이동할 거리

D : 단일 루프의 총 길이

l : AGV의 최대 선적량

차량의 활용도 계산식에 있어서 분모는 차량이 신고 다닐 수 있는 최대 짐의 개수와 단일 루프의 길이와의 곱으로 차량의 최대 작업량을 나타낸다. 계산식의 분자는 차량이 현재 i 작업장에 있을 확률 중에서 ($\sum \pi_i$) 현 작업장에서 발생 가능한 상태에 대한 확률(π_i)에 대한 비율과 차량이 실제로 짐을 신고 이동하는 물량(F_i)과 이동 거리(D_i)의 곱으로 실제 작업량을 나타낸다.

3.2 단계 2: 최종 경로 선정

AGV 시스템의 경로 설계를 위한 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 선택된 유효 지역들을 이용하여 최종 경로를 선택하는 단계이다. 최종 경로 선택을 위한 문제는 잘 알려진 Set-partitioning Problem의 변형된 문제로 접근할 수 있으며, Bozer와 Srinivasan (1992)이 제시한 IP(Integer Programming)가 큰 문제점 없이 본 문제에도 적용될 수 있다고 판단되기 때문에 이를 이용하도록 하였다.

유효 지역 선정 단계에서 선정된 각 유효 지역은 p 열 (p -th Column)로 정의될 수 있으며, L 은 설계자가 요구하는 유효 지역의 개수, 즉 필요 차량의 대수를 나타낸다. 변수로는 x_p 가 사용되며, 만일 p 열이 최종 경로에 포함되면 1, 포함되지 않으면 0의 값을 갖게 된다. a_{ip} 는 작업장 i 가 p 열에 포함될 경우 1의

값을 갖게 되며, 그렇지 않을 경우는 0의 값을 갖게 된다. 비용 계수로는 ω_p 가 사용되었으며, 이는 p 열이 나타내는 유효 지역을 서비스하는 AGV의 활용도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && z \\ & \text{Subject to} && \\ & && z - \omega_p x_p \geq 0 \quad \text{for all } p \\ & && \sum_p a_{ip} x_p = 1 \quad \text{for all } i \\ & && \sum_p x_p = L \\ & && x_p = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for all } p \end{aligned}$$

제시된 목적함수는 최종 경로에 포함되는 유효 지역을 서비스하는 AGV의 활용도의 최소화이다. 첫 번째 제약식은 최종적으로 선택된 유효 지역을 서비스하는 차량의 최대 활용도는 z 를 넘지 못함을 나타낸다. 두 번째 제약식은 각 작업장이 단 하나의 유효 지역에만 포함되어야 함을 나타내고 있으며, 세 번째 제약식은 전체 시스템이 지정된 L 개의 유효 지역으로 구분되어야 함을 나타내고 있다. 또한 마지막으로 제시된 제약식은 목적 변수가 0 또는 1의 값만을 나타낼 수 있음을 의미한다.

4. 수치 예제 및 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 작업장 분할 알고리즘의 이해를 돕고, 수행도를 평가하기 위해서 Bozer and Srinivasan(1992)이 이용한 시스템을 바탕으로 대상 시스템을 설정하였다. 작업장의 위치는 <표 1>에 나타나 있다. 전체 시스템은 총 8개의 작업장으로 구성되어져 있으며, 작업장의 위치는 좌표 평면상의 x, y 좌표로 표시되어진다.

한편, 대상 시스템에서 가공되는 작업물은 4 종류이며, 작업물은 각각의 유입 비율 및 가공 경로가 정해져 있다. 이와 같은 작업물의 종류 및 작업 경로는 <표 2>에 정리되어 있으며, 차량의 속도는 분당 15 단위 길이로 가정한다.

표 1. 작업장의 위치

작업장	1	2	3	4	5	6	7	8
위치: (x,y)	(1,4)	(35,21)	(1,21)	(9,25)	(25,15)	(15,4)	(35,9)	(9,1)

표 2. 작업물과 경로

Job type	Jobs / hr	Production Routing
1	3	1 - 4 - 5 - 7 - 1
2	3	3 - 4 - 6 - 1
3	6	1 - 7 - 5 - 4 - 2
4	6	3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 1

표 3. 대상 시스템에 대한 작업장 간의 상관도

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	—	0	0	0.13	0	0.21	0.26	0.71
2	0	—	0	0.23	0	0	0	0
3	0	0	—	1.01	0	0	0	0
4	0.13	0.23	1.01	—	0.79	0.14	0	0
5	0	0	0	0.79	—	0.4	0.77	0
6	0.21	0	0	0.14	0.4	—	0	0.9
7	0.26	0	0	0	0.77	0	—	0
8	0.71	0	0	0	0	0.9	0	—

4.1 수치 예제

대상 시스템에 제시된 자료를 바탕으로 작업장 간의 상관도를 계산하면 <표 3>과 같이 정리될 수 있다. 행렬에서의 0값은 두 작업장 간의 작업물의 흐름이 없음을 나타낸다.

이를 통해 인근 작업장을 고려하는 TSP 문제를 풀면 1-3-4-2-7-5-6-8-1의 최적의 루프를 형성할 수 있다. TSP의 결과에 의해 첫 번째 작업장 집합은 {1, 3}으로 선정이 되며 이들 작업장을 기준으로 단일 루프 AGV 시스템을 설계하게 된다.

{1, 3} 작업장 집합은 두 개의 작업장만으로 구성이 되어 있기 때문에 작업장의 순서 결정을 위한 TSP 문제를 계산할 필요가 없다. 하지만 세 개 이상의 작업장으로 단일 루프 AGV 시스템이 구성이 될 경우는 작업장 순서 결정을 위한 TSP 문제를 풀어야 한다.

한편, 다른 작업장 집합과의 운송물을 담당하는 Transit 작업장의 위치는 작업장 1과 작업장 3의 중간 위치, 즉 좌표 공간상의 (1, 4)와 (1, 21)의 중간 지점인 (1, 12.5)에 설치하게 되며, 이들 세 개의 작업장들을 대상으로 <표 4>와 같은 작업장 집합만의 From-to Chart 와 <표 5>, <표 6>과 같은 Distance Matrix를 작성한다.

표 4. 작업장 집합 {1, 3}에 대한 From-to Chart

	Station 1	Station 3	T_Station
Station 1	—	0	9
Station 3	0	—	9
T_Station	12	0	—

표 5. 작업장 집합 {1, 3}에 대한 Distance Matrix(시계방향)

	Station 1	Station 3	T_Station
Station 1	—	17	25.5
Station 3	17	—	8.5
T_Station	8.5	25.5	—

표 6. 작업장 집합 {1, 3}에 대한 Distance Matrix(반시계방향)

	Station 1	Station 3	T_Station
Station 1	—	17	8.5
Station 3	17	—	25.5
T_Station	25.5	8.5	—

이와 같은 작업장 간의 작업량과 거리를 바탕으로 차량의 이동 방향에 따른 비용을 계산하면, 차량이 시계방향으로 이동하는 경우 408, 반시계 방향으로 이동하는 경우 612의 비용이 발생하게 된다. 따라서 차량은 시계 방향으로 이동하게 되며, 현재 고려중인 작업장 집합의 단일 루프 AGV 시스템에 대한 설계가 끝난다. 이와 같이 설계된 단일 루프 AGV 시스템을 대상으로 전환 확률 행렬을 작성하게 되며, <표 7>은 작업장 집합 {1, 3}에 대한 전환 확률 행렬 중에서 현재 작업장(V)이 3인 상태에 해당된다. 차량이 이동하게 되는 다음 작업장은 1 작업장이므로 V의 값이 3, T인 상태로의 전이 확률은 모두 0이 되며, V의 값이 1인 상태로의 전이 확률은 1번 작업장에서는 작업물을 선적할 수 있는 확률($P[L_1, L_2]$)에 따라서 계산된다. 구체적으로 T 작업장에서 빈 상태로 1번 작업장으로 출발하는 경우는 (T, 0, 0)이며, 1번 작업장에서의 $\lambda = 9$ (Type1 3개, Type3 6개), $T = 2.267 \text{ unit/min} = 0.038 \text{ unit/hr}$, $\rho_{1,3} = 0$, $\rho_{1,T} = 1$ 이므로 각 전이 확률은 3.1.4절에서 제시된 식을 통해 다음과 같이 계산된다.

이를 이용해 계산된 각 상태에 대한 극한 확률값은 <표 8>과 같이 정리할 수 있다. 또한 (1, L_1, L_2)의 확률을 모두 더하면 1/3의 값이 계산되며 이는 차량이 작업장 1에 존재할 확률이다. FEFS 발주법이 사용되기 때문에 각 작업장에 AGV가 존재할 확률은 모두 같음을 확인할 수 있다.

계산된 확률값을 이용하여 차량의 활용도를 계산하기 위해 3.1.5절에서 제시한 수식을 사용한다. 예를 들어 현재의 상태 i가 (1, 0, 0)일 경우 π_i 의 값은 0.185이며, i와 차량의 위치(V)가 같은 상태 j의 극한 확률의 합($\sum_j \pi_j$)의 값은 1/3이 된다. 또한 현재 상태에서는 차량은 빈 상태로 이동하며, 다음 작업장까

표 7. 작업장 집합 {1, 3}에 대한 전환 확률 행렬

	(1,0,0)	(1,0,3)	(1,0,T)	(1,3,3)	(1,3,T)	(1,T,T)	...
...
(T,0,0)	0.71	0	0.24	0	0	0.05	...
(T,0,1)	0.71	0	0.24	0	0	0.05	...
(T,0,3)	0	0.71	0	0	0.29	0	...
(T,1,1)	0.71	0	0.24	0	0	0.05	...
(T,1,3)	0	0.71	0	0	0.29	0	...
(T,3,3)	0	0	0	1	0	0	...

표 8. 작업장 집합 {1, 3}에 대한 극한 확률

상태	(1,0,0)	(1,0,3)	(1,0,T)	(1,3,3)	(1,3,T)	(1,T,T)	작업장1
확률	0.185	0.045	0.063	0.009	0.019	0.013	1/3
상태	(3,0,0)	(3,0,1)	(3,0,T)	(3,1,1)	(3,1,T)	(3,T,T)	작업장3
확률	0.17	0	0.116	0	0	0.047	1/3
상태	(T,0,0)	(T,0,1)	(T,0,3)	(T,1,1)	(T,1,3)	(T,3,3)	작업장T
확률	0.168	0.057	0.028	0.036	0.036	0.009	1/3

지의 거리는 17이기 때문에 F_i 의 값은 0이며, D_i 의 값은 17이 된다. 결과적으로 i 가 (1, 0, 0)일 경우, 수식의 분자의 값은 0이 된다. 이와 같은 방법으로 모든 상태에 대해 이들 값을 계산하면 {1,3} 작업장에서 운영되는 차량의 활용도는 0.3118이 얻어지며, {1, 3} 작업장 집합은 한 대의 차량으로 운영 가능하다고 판단되기 때문에 다음 작업장 집합인 {1, 3, 4}를 바탕으로 단일 루프 AGV 시스템을 설계하고 차량의 활용도를 계산하게 된다. 이와 같은 과정을 반복하면 <표 9>와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그리고 최종 작업장의 분할 단계인 3.3절에 제시된 IP를 이용하여 {6,8,1}, {3,4}, {2,7,5}로 얻어질 수 있다.

표 9. 작업장 Set과 차량 활용도

작업장 집합	{1,3}	{1,3,4}	{1,3,4,2}	{3,4}	{3,4,2}
차량 활용도	0.3118	0.5266	0.7544	0.2067	0.5988
{3,4,2,7}	{4,2}	{4,2,7}	{2,7}	{2,7,5}	{2,7,5,6}
0.7498	0.3371	0.7282	0.139	0.4297	0.7575
작업장 집합	{7,5}	{7,5,6}	{5,6}	{5,6,8}	{5,6,8,1}
차량 활용도	0.2792	0.6092	0.4064	0.5235	0.6565
{6,8}	{6,8,1}	{6,8,1,3}	{8,1}	{8,1,3}	{8,1,3,4}
0.0895	0.2743	0.4445	0.136	0.3578	0.5564

4.2 시뮬레이션 결과

제시된 Multi-load AGV로 운영되는 Tandem AGV 시스템의 설계 알고리즘을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 실행하였으며, 시뮬레이션 언어로는 Siman (Arena 3.5)이 사용되었다.

4.1장에서 보여진 수치 예제를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 Tandem AGV 시스템의 차량 경로를 설치하면 <그림 5>와 같은 Layout을 얻을 수 있다.

분할된 각 지역 간의 작업물의 운송을 위해서 컨베이어를 사용하였다. 숫자는 작업장의 위치를 나타내며, 화살표는 차량의 이동 방향 및 컨베이어의 이동 방향을 나타내어 준다. AGV의 유도 경로와 컨베이어의 교차점은 Transit 작업장이 설치되어 이동되는 짐을 처리하게 된다. 각 작업장의 가공 시

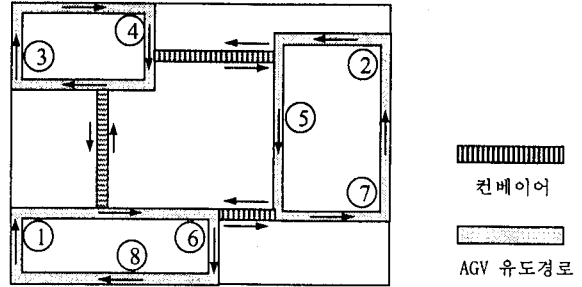


그림 5. Tandem AGV 시스템.

표 10. 대상 시스템의 시뮬레이션 결과

구분	평균	95% 신뢰구간
총 생산량	1255.1	± 25.403
선적장 재공 재고	{1, 8, 6}	0.7112 ± 0.0173
	{2, 5, 7}	1.5382 ± 0.0398
	{3, 4}	0.4889 ± 0.0084
차량 활용도	{1, 8, 6}	0.2058 ± 0.0047
	{2, 5, 7}	0.4997 ± 0.0093
	{3, 4}	0.1994 ± 0.0039

간은 작업장의 활용도가 70~80% 정도 되는 수준으로 설정하여, 물류의 흐름에 큰 영향을 미치지 않도록 설계하였다.

실험 초기화 시간 200, 한번의 시뮬레이션 실행 시간 4200, 반복 실행 10회의 시뮬레이션 결과는 <표 10>과 같다.

시뮬레이션 결과 총 생산량은 1255.1개로 이는 시간당 17.93개의 제품이 생산되고 있음을 보여준다. 이는 시간당 약 18개의 비율로 투입된 대부분의 작업물이 큰 무리 없이 가공되고, 운반되어 시스템을 빠져나오고 있음을 의미한다. 이는 재공, 재고의 양에서도 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 본 논문에서 제시하고 있는 Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV의 설계 알고리즘을 사용하여 작업장을 분할하고, 차량의 유도 경로 및 운행 방향 등을 설정할 수 있는 올바른 방향을 제시해 준다는 점을 보여주는 것이다.

보다 직접적인 비교를 위해 4.1절의 수치 예제에서 보여진 수식을 통해 계산된 차량활용도를 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과와 비교하여 <표 11>에 정리하였다.

표 11. 차량의 활용도 비교

구분	수학적 모델링	시뮬레이션 결과	
		단일 루프 AGVS	Tandem AGVS
{1, 8, 6}	0.2242	0.2296	0.2058
{2, 5, 7}	0.4297	0.4712	0.4997
{3, 4}	0.2067	0.2062	0.1994

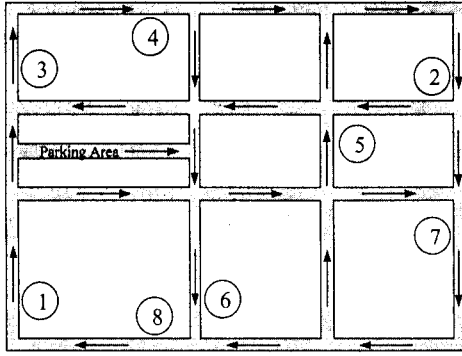


그림 6. Traditional AGV 시스템.

실험 결과 수학적 모델링에 의한 차량의 활용도와 시뮬레이션에 의한 차량의 활용도는 비슷한 패턴의 결과가 도출되었으며, Tandem AGV 시스템의 경우 보다 많은 결과 차이가 발생되었다. 이는 작업장 집합 간의 작업물의 이동 등의 Tandem AGV 시스템의 특성에 의한 것으로 파악된다.

Tandem AGV 시스템의 성능 평가를 위해 <그림 6>과 같은 Traditional AGV 시스템이 모델링 되었다. 차량 발주법으로는 STD(Shortest Travel Distance) 발주법이 사용되었으며, 기타 조건들은 Tandem AGV 시스템과 동일하게 설정하였다. 시스템의 성능은 경로 설계의 방식과 차량의 발주법 등의 시스템 내의 여러 요소에 따라 크게 변하기 때문에 Tandem AGV 시스템과의 직접적인 성능의 비교는 불가능하다. 하지만 시스템의 성능을 평가하는 데 있어 간접적인 비교의 기준은 될 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 세 가지 형태의 Layout을 바탕으로 컨베이어의 속도, 작업물의 도착 비율 등을 변경시키면서 시뮬레이션을 실행하였으며, 이를 정리하면 <표 12>와 같다.

앞서 언급한 바와 같이 Pilot 시뮬레이션을 통해 초기화 시간과 실행 시간을 측정하고 10회의 반복 실험을 실시하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하면 <표 13>과 같다.

표 12. 실험 계획

구 분	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4	실험 5
컨베이어 속도	15	10	10	10	5
작업물 도착 비율	18/hr	18/hr	22.5/hr	30/hr	18/hr

<표 13>에서 실험 1과 실험 5는 컨베이어의 속도 변화에 따른 실험이며, Traditional AGV 시스템에는 컨베이어가 설치되지 않기 때문에 실험의 결과가 없으며, Traditional AGV 시스템의 경우는 Tandem AGV 시스템과는 달리 사용되는 차량의 운행 지역이 구분되지 않기 때문에 3대의 차량의 활용도의 평균값을 각각 기록하였다.

Tandem AGV 시스템과 Traditional AGV 시스템의 실험 결과를 비교해 보면, 전체적으로 Tandem AGV 시스템이 동일한 작업을 보다 효과적으로 수행하고 있음을 보여주고 있다. 작업량이 적은 실험 2, 3의 경우 시간당 생산량은 약 18개로 비슷하지만 평균 가공시간 및 재공재고량, 차량 활용도면에서 Tandem AGV 시스템이 보다 좋은 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 실험 4의 경우는 Traditional AGV 시스템의 경우 완전히 통제가 불가능할 정도로 작업량을 처리하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 Traditional AGV 시스템에서 AGV에 의해 운반물이 원활하게 이동되지 않기 때문에 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

운영이 복잡해진 AGV 시스템을 보다 간단하게 운영하기 위해 Tandem AGV 시스템이 제안되었으며, 관련된 연구가 지속적으로 이뤄지고 있다. 하지만 Tandem AGV 시스템에 관련된 기존의 연구들은 하나의 짐을 운반하는 Unit-load AGV를 사용하는

표 13. 수정된 시스템의 시뮬레이션 결과

구 분	시간당 생산량	평균 가공 시간	선적장 재공 재고			차량 활용도			
			{1,8,6}	{2,5,7}	{3,4}	{1,8,6}	{2,5,7}	{3,4}	
Tandem AGV 시스템	실험1	17.93	51.9	0.709	1.5077	0.4879	0.2058	0.4997	0.1994
	실험2	17.93	53.5	0.7112	1.5382	0.4889	0.2058	0.4997	0.1994
	실험3	22.42	46.3	0.8123	1.9749	0.6038	0.2573	0.624	0.2492
	실험4	30	111	0.9885	38.659	0.5855	0.3439	0.8369	0.2228
	실험5	17.93	57.7	0.7055	1.4962	0.489	0.2058	0.4997	0.1994
Traditional AGV 시스템	실험2	17.93	59.6	4.2537			0.4633, 0.4622, 0.4648		
	실험3	22.39	69.2	8.1598			0.6037, 0.6054, 0.6036		
	실험4	24.2	45.40	2994.7			0.7305, 0.726, 0.7237		

시스템에 국한되어 진행되어 시스템의 장점을 효과적으로 살리지 못하고 있었다. 본 연구에서는 Multi-load AGV를 사용하는 Tandem AGV 시스템에 관한 연구를 처음으로 진행하였으며, 시뮬레이션을 통해 이를 평가하였다.

Multi-load AGV에 의해 운영되는 Tandem AGV 시스템을 설계하기 위하여 외관원 문제를 통해 작업장 집합을 구분하였고, 마코브 체인을 이용하여 이들 작업장 집합의 차량의 활용도를 계산하였다. 그리고 이를 바탕으로 최종 작업장 분할을 결정하였으며, 시뮬레이션을 통해 본 설계 방법론의 타당성을 보여주었다. 이는 본 연구의 가장 중요한 의의로 생각되며, Multi-load AGV를 사용하는 시스템의 연구에 있어서 중요한 기초가 될 것으로 기대된다. 하지만 Tandem AGV를 보다 정확하게 모델링하여 설계하고, 효율적으로 운영하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

우선 본 연구에서는 Tandem AGV 시스템을 마코브 체인을 이용하여 모델링함에 있어서 문제의 크기를 줄이기 위해서 차량의 위치와 선적된 작업물의 목적 작업장만을 고려하였다. 하지만 보다 정확한 시스템의 묘사를 위해서는 각 작업장의 버퍼의 상태까지 고려하여 모델링이 이뤄져야 한다.

Tandem AGV 시스템에서 운영되는 Multi-load AGV를 운영하기 위한 차량 발주법의 개발 또한 중요한 문제이다. Traditional AGV 시스템에서 Multi-load AGV를 운영하기 위해서는 상당히 복잡한 논리와 알고리즘이 필요하지만 Tandem AGV 시스템에서는 간단한 알고리즘으로도 상당히 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이외에 Unit-load Tandem AGV 시스템과 Multi-load Tandem AGV 시스템과의 비교, 분석에 관한 연구가 행해져서 Multi-load Tandem AGV 시스템에 대한 확실한 평가가 이뤄져야 할 것이다.



정병도

연세대학교 산업시스템공학과 학사
연세대학교 산업시스템공학과 석사
현재: 아이에스테크 기반기술연구소
관심분야: 시뮬레이션, 물류공학, 공급사슬경영

참고문헌

- Batholdi, J. J. and Platzman, L. K. (1989), Decentralized control of automated guided vehicles on a simple loop, *IIE Transactions*, 21(1), 76-81.
- Bozer, Y. A. and Srinivassan, M. M. (1989), Tandem configuration for AGV system offer simplicity and flexibility, *Industrial Engineering*, 21(2), 23-27.
- Bozer, Y. A. and Srinivassan, M. M. (1992), Tandem AGV systems: A partitioning algorithm and performance comparison with conventional AGV systems, *European Journal of Operational Research*, 63(2), 173-191.
- Choi, H. G., Kwon, H. J. and Lee, J. (1994), Traditional and tandem AGV system layouts: a simulation study, *Simulation*, 63(2), 85-93.
- Huang, C. (1997), Design of material transportation system for tandem automated guided vehicle systems, *International Journal of Production Research*, 35(4), 943-953.
- Kim, K. S. and Chung, B. D. (1998), A study on developing dispatching rule for efficient control of single loop-single vehicle AGV system, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 7(1), 39-52.
- Lin, T. J., Chang, C. C. K. and Liu, W. C. (1994), A load-routing problem in a tandem configuration automated guided vehicle system, *International Journal of Production Research*, 32(2), 411-427.
- Liu, F. H. and Chen, J. T. (1997), Analytical framework for designing the divided automated guided vehicles system, *International Journal of Industrial Engineering*, 4(2), 90-102.
- Occena, L. G. and Yokota, T. (1993), Analysis of the AGV loading capacity in a JIT environment, *Journal of Manufacturing Systems*, 12(1), 24-35.
- Park, D. H. and Park, Y. S. (1997), A Study on Multi-Stage Dispatching Rule for Efficient AGVS, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 6(1), 41-52.
- Park, Y. S. and Park, D. H. (1997), A Study on a Congestion-free Design of AGV System, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 23(3), 559-580.
- Ross, E. A., Mahmoodi, F. and Moasier, C. T. (1996), Tandem configuration automated guided vehicle system: A comparative study, *Decision Sciences*, 27(1), 81-102.
- Sinriech, D., Tanchoco, J. M. A. and Herer, Y. T. (1996), The segmented bi-directional single-loop topology for material flow systems, *IIE Transactions*, 28(1), 40-54.



김경섭

연세대학교 기계공학 학사
University of Nebraska-Lincoln 산업공학과 석사
North Carolina State University 산업공학과 박사
현재: 연세대학교 기계전자공학부 부교수
관심분야: 시뮬레이션, 물류공학, 공급사슬경영