

유전 알고리즘을 이용한 Tandem AGVS에서의 운반물 경로 설정 문제

김종화¹ · 박제승²

¹건국대학교 산업공학과 / ²백산정보통신

A Load Routing Problem in a Tandem AGVS using Genetic Algorithm

Jong Hwa Kim · Je Seung Park

A tandem AGV system is based on partitioning all the stations into non-overlapping single vehicle closed loops with additional stations provided as an interface between adjacent loops. For an efficient use of this configuration, it is required to solve the load routing problem(LRP), which is primarily based on the fact that a load may be handled by several vehicles and moved through several loops before it reaches its destination. In this paper, a heuristic based on genetic algorithm(GA) is first developed to solve LRP. The first model obtains the optimal route of each job and the optimal direction of each loop when the vehicle in each loop travels unidirectionally. The second GA model obtains the optimal polling sequence of the empty vehicle in each loop, when the vehicle can move bidirectionally.

1. 서론

무인운반차량 시스템(AGVS)은 경로설정에 상당한 유연성을 갖고 있으며 다른 컴퓨터화된 시스템과 통합이 용이하다는 점 때문에 유연생산시스템(FMS)이 널리 보급됨에 따라 그 수요가 증가하고 있다. 그러나 <그림 1>과 같은 전통적인 무인운반차량 시스템에서는 급송규칙(dispatching rule)의 선정, 차량의 경로설정문제(routing problem), 교차로나 인접 구역에서 충돌방지를 위해 교통제어 문제(traffic control problem) 등을 결정해야 한다. 이에 따라 운영통제가 복잡해져서 통제시스템에 대한 비용이 많이 드는데, 이러한 문제들을 제거하거나 쉽게 하기 위해 Bozer과 Srinivasan (1989)은 Tandem AGVS를 제안하였다.

Tandem AGVS는 <그림 2>와 같이 시스템 내의 스테이션들을 서로 겹치지 않는 루프(loop)로 분할하고, 각 루프에는 한 대의 차량만을 할당하여 각 루프 내에서는 교통제어문제를 제거해 준다. 또한 각 루프에서 유희 AGV의 급송규칙(dispatching rule)은 FEFS(first encountered first served)규칙(Bartoldi and Platzman, 1989)을 사용하는데 FEFS 규칙은 운반물의 하역을 마친 유희 AGV가 미리 결정되어 있는 검사방문순서(polling sequence)에 따라 이동하면서 각 스테이션의 출력 버퍼(output

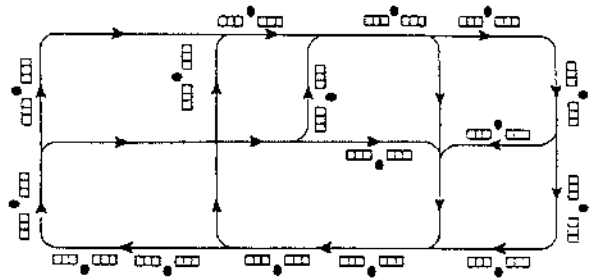


그림 1. 전통적인 무인운반차량 시스템.

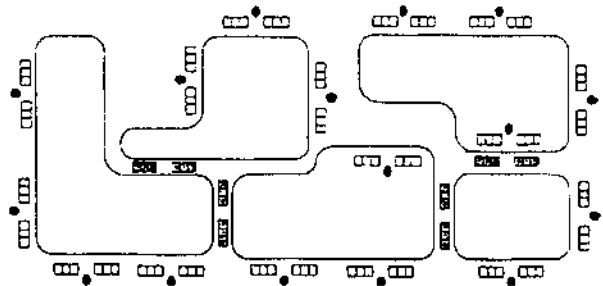


그림 2. Tandem AGVS.

buffer)를 검사하고, 운반물이 있으면 목적지까지 이송하고 그렇지 않으면 다음 스테이션으로 이동하여 출력버퍼를 검사하

는 방식이다. 이 규칙은 단순하지만 단일 루프에서는 수행도가 뛰어나고 차량에 대한 통제업무를 단순화함으로써 통제 시스템에 대한 비용을 대폭 줄일 수 있다는 장점이 있다(Bartholdi and Platzman, 1989).

일반적으로 Tandem AGVS에는 세 종류의 스테이션이 존재한다. 입·출력 스테이션(input/output station)은 시스템 안팎으로 운반물의 입·출력을 담당하는 스테이션으로서 어떤 가공도 이루어지지 않는다. 가공 스테이션(processor station)은 실제로 가공이 이루어지는 스테이션이며, 환승 스테이션(transit station)은 운반물이 한 루프에서 다른 루프로 이동할 수 있도록 설치된 스테이션으로, 인접한 환승 스테이션 간의 운반은 컨베이어 등의 독립된 장비나 사람이 담당한다. 한 루프 내에 환승 스테이션이 두 개 이상 존재하면 각 하물이 어느 스테이션을 통해 이동하느냐에 따라 작업부하가 영향을 받게 되는데 이 때 루프 간을 이동하는 각 작업에 대해 최적 경로를 설정해주는 문제를 하물경로 설정문제(LRP: load routing problem)라 한다(Lin, Chang and Liu, 1994).

하물 경로설정문제(LRP)는 Lin, Chang과 Liu(1994)에 의해 최초로 제기되었는데 이들은 각 루프의 방향을 고정시키고 선형 계획법을 이용하여 전체 적재 이동시간(loaded travel time)을 최소화하도록 각 작업의 경로를 구하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 선형계획법 모델은 각 루프의 방향을 고정시키고 있으므로 시스템 설계시에 각 작업의 최적 경로와 루프방향(적재상태 또는 유휴상태에서 AGV의 이동방향)을 결정하려면, 루프수가 K 개이면 2^K 개의 선형계획법 문제를 각각 작성해서 풀 후 그 중 가장 좋은 해를 최적해로 정하게 된다. 또한 각각의 선형계획법 문제에 필요한 입력 자료의 계산에도 많은 시간과 노력이 필요하며 최적해를 구하려면 입력 자료도 2^K 번을 계산해야 한다.

한편 Lin, Chang, Liu가 제시한 선형계획법을 이용한 방법에서는 동일한 작업에 대해 두 개 이상의 경로가 할당되는 경우가 발생하고 각 경로별로 할당되는 비율이 정해진다. 따라서 특정시점에 배달을 요구하는 작업물을 할당된 여러 경로들 중에서 어떤 경로로 배달해야 할 지를 실시간으로 결정해야 하는 문제가 발생한다. 이를 위해 Lin과 Dgen(1994)은 Lin, Chang, Liu의 방법을 이용하여 시스템을 설계한 후 온라인 실시간 환경하에서 하물의 이송명령이 발생하자마자, 현재 운행중인 AGV를 방해하지 않고 출발지점(source)에서 목적지점(destination)까지 도달하는 경로를 발견하는 알고리즘을 제시하였다. 이 경우 작업물이 배달을 요구할 때마다 그 작업에 할당된 경로들 중에서 적합한 경로를 선택하는 알고리즘이 추가로 필요하며, 이를 계산하고 각 경로에 정해진 비율에 따라 할당하는 중앙통제 시스템이 필요하다. 이렇게 되면 Tandem AGVS의 장점인 운영통제의 단순성과 분산 통제 방식을 구현할 수 없을 뿐만 아니라 통제시스템의 가격 상승을 초래한다.

따라서 본 연구에서는 분산통제 방식과 운영통제의 단순성을 보장하기 위해 단일 작업에는 단일 경로를 할당한다고 가

정하고 한 번의 계산으로 각 루프의 최적 방향과 최적 루프 간 운반경로를 동시에 결정할 수 있는 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 발견적 기법을 제시하고, 이를 이용하여 루프방향이 양방향인 경우에는 검사방문 순서까지 결정해주는 모델을 제시하고자 한다.

2. 수학적 모델

하물 경로설정문제에서는 모든 작업의 주어진 생산율을 만족시키면서 각 루프에 한 대씩 할당된 AGV의 작업 부하, 즉 단위 시간당 처리해야 할 운반요구량이 각 AGV의 처리용량보다 적도록 하물의 루프 간 이동 경로를 설정해주어야 한다. 각 루프(Loop)의 AGV가 루프 내의 모든 운반요구량을 만족시키는지를 평가하기 위해 먼저 운반요구량을 추정해야 하는데 운반요구량을 추정하는 모델은 Bozer와 Srinivasan(1991)이 제시한 모델을 사용한다. 본 절에서는 이러한 제약 조건을 만족시키는 최적 경로를 구하기 위한 수학적 모형을 제시한다. 먼저 모형에 사용되는 기호와 기호들을 살펴보면 다음과 같다.

[가정]

1. 스테이션의 위치와 루프들의 배치는 알려져 있다.
2. 각 작업(job)의 공정 순서와 생산율은 알려져 있다.
3. 유휴 AGV의 급송규칙은 FEFS규칙을 사용한다.
4. AGV의 가·감속의 영향은 무시한다.
5. 각 스테이션의 버퍼 크기는 무한하다.
6. 정상상태(steady state)에서 가공 스테이션의 유입률과 유출률은 같다.
7. AGV와 스테이션의 고장은 없다

[기호]

K : Tandem AGVS 내의 루프의 수

M_k : 루프 1에서 루프 k 까지의 스테이션의 누적수

(스테이션 번호는 루프 1의 임의의 스테이션부터 시작하여 시계방향으로 번호를 매기고, 연이어 루프 2의 스테이션에 번호를 매긴다. 즉, M_1 은 루프 1의 마지막 스테이션의 번호이고 M_k 는 루프 k 의 마지막 스테이션의 번호이다.)

Ψ_k : 루프 k 의 스테이션의 집합, 즉 $\{M_{k-1}+1, M_{k-1}+2, \dots, M_k\}$

θ : 가공 스테이션의 집합

Ω_k : 루프 k 내의 입·출력 스테이션과 환승 스테이션의 집합

Ω : 시스템 내의 입·출력 스테이션과 환승 스테이션의 집합

f_{ij} : 스테이션 i 에서 스테이션 j 까지 하물의 단위시간당 운반횟수[하물수/시간]

λ_i : $\sum_{j \in \Psi_k} f_{ij}$, 스테이션 i 의 출력버퍼에 하물이 난위시간

- 당 도착하는 횟수(이하 유출률) [하물수/시간]
- A_i : $\sum_{j \in \Omega_k} f_{ij}$, AGV가 하물을 스테이션 i 의 입력버퍼에 단위시간당 배달하는 횟수(이하 유입률) [하물수/시간]
- v_c : 유티 AGV의 평균속도
- v_l : 적재된 AGV의 평균속도
- d_{ij} : 스테이션 i 에서 스테이션 j 까지의 거리
- μ : 하나의 하물을 선적하거나 하역하는 데 걸리는 시간
- σ_{ij} : $\frac{d_{ij}}{v_c}$, 유티 AGV가 스테이션 i 에서 j 까지 이동하는 데 걸리는 시간
- τ_{ij} : $\frac{d_{ij}}{v_l}$, AGV가 하물을 스테이션 i 에서 j 까지 운반하는 데 걸리는 시간
- z_k : 유티 AGV가 루프 k 를 한바퀴 도는 데 걸리는 시간
- α_k : 루프 k 내의 모든 하물들을 배달하는 데 걸리는 단위 시간당 총 적재 이동시간 비율
- Q_k : 루프 k 내의 총 배달량
- A_k : 루프 k 내의 모든 하물들을 배달하는 데 걸리는 단위 시간당 선적·하역시간 비율을 포함한 총 적재 이송 시간 비율 (= $\alpha_k + 2\mu Q_k$)

2.1 루프방향이 단방향인 경우

FEFS규칙하에서는 루프 k 내의 모든 이송 요구량을 만족시키기 위하여 적재·하역시간을 포함한 총 적재 이송시간을 제외하고도 환승 스테이션과 입·출력 스테이션사이를 유티 AGV가 반드시 이동해야 하는데, 이때 걸리는 시간 비율을 유티 AGV의 최대 의무적인 이동시간 비율이라고 한다. 이것은 환승 스테이션을 포함한 입·출력 스테이션들의 λ_i 와 λ_j 가 같지 않기 때문에 발생한다. 즉, 각 루프 내의 AGV는 적재와 하역하는 시간을 제외하면 항상 적재 또는 유티 상태로 이동 중이므로 적재 이동시간 비율(A_k)와 최대 의무적인 이동시간 비율(Φ_k)의 합이 AGV의 작업부하(W_k)가 된다(Bozer and Srinivasan, 1991). 따라서 시스템의 비용과 성능을 최적화하려면 AGV의 작업부하(W_k)가 최소가 되도록 루프방향과 루프 간 운반경로를 결정해야 한다.

AGV가 유티상태일 때는 FEFS규칙에 따라 AGV는 미리 정해진 순서에 따라 각 스테이션을 방문하여 운반할 물품이 있는지 검사를 하는데, 이 때 검사 방문 순서에 따라 AGV의 최대 의무적인 이동시간 비율(Φ_k)가 영향을 받고 이는 AGV의 작업부하($W_k = A_k + \Phi_k$)에도 영향을 미친다(Bozer and Srinivasan, 1991). 그러나 유티 상태의 최적 검사 방문 순서를 결정하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나므로 본 연구에서는 루프방향이 단방향일 경우에는 AGV는 루프방향에 따라 인접한 스테이션을 검사하는 검사방문 순서를 따르는 것으로 가정한다. 따라서 루프방향이 단방향일 경우에는 AGV의 작업부하를 경감시키고 AGV가 병목이 되는 것을 방지하기 위하여 각 루프 내

AGV의 적재 이동시간 비율의 합을 최소화하는 것은 목적함수로 정한다. 적재 이동시간 비율의 합을 최소화하는 루프방향과 루프 간 운반경로를 결정하기 위한 수학적 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K A_k \tag{1}$$

$$\text{s.t. } W_k = A_k + \Phi_k < 1 \text{ for all } k \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \text{단. } A_k &= \alpha_k + 2\mu Q_k \\ &= \sum_{i=M_{k-1}+1}^{M_k} \sum_{j=M_{k-1}+1}^{M_k} f_{ij} \tau_{ij} + \sum_{i=M_{k-1}+1}^{M_k} \sum_{j=M_{k-1}-1}^{M_k} 2 \cdot \mu \cdot f_{ij} \\ \Phi_k &= \text{Max}_{i \in \Omega_k} \left[\sum_{j=1}^i (\lambda_j - \lambda_i) \sigma_{ji} \right], j \in \Omega_k \end{aligned} \tag{3}$$

제약식으로 사용되는 식 (2)는 각 루프에서 AGV의 작업부하, 즉 적재 이동시간 비율과 유티 이동시간 비율이 처리용량을 넘지 않도록 해주는 제약식이다. 식 (2)에서 AGV의 작업부하에 영향을 미치는 요인은 두 가지인데 먼저 루프방향에 따라 루프 내의 각 스테이션 간의 적재 이동거리(τ_{ij})와 유티 이동거리(σ_{ij})의 값이 달라지고 두 번째로 루프 간 운반경로에 따라 각 루프 내의 입출력 스테이션들과 환승 스테이션들에 대한 λ_i 와 λ_j 값이 달라지게 되며 이에 따라 AGV의 작업부하가 영향을 받게된다. 따라서, 루프방향과 루프 간 운반경로가 결정변수가 된다.

2.2 루프방향이 양방향인 경우

루프방향이 양방향인 경우에는 적재상태의 AGV는 항상 각 스테이션 간의 최단거리를 주는 방향으로 이동하므로, 최적 루프 간 운반경로가 정해지면 루프방향이 해당 AGV의 적재 이동시간 비율에 아무런 영향을 미치지 않는다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 AGV가 유티상태일 때는 검사방문순서에 따라 AGV의 작업부하가 영향을 받게 되고 이는 제약식에 영향을 주므로 검사방문을 위한 이동방향의 결정이 필요하다.

루프방향이 양방향인 경우에는 먼저 단계 1에서는 단방향인 경우와 마찬가지로 총 적재 이송시간을 최소화시키는 목적함수를 사용하여 최적 루프 간 운반경로를 구한다. 단계 2에서는 최대 의무적인 유티 AGV 이동시간 비율을 최소화시키는 목적함수를 사용하여 유티 AGV의 검사방문시 이동방향을 결정한다.

단계 2에서 최대 의무적인 유티 AGV 이동시간 비율을 최소화시키는 목적함수를 사용하는 이유는 다음과 같다. 루프 k 에서 AGV가 스테이션 i 를 유티 상태로 떠나는 비율은 스테이션 i 의 검사율(w_i)의 함수로 $w_i - \lambda_i$ 로 표시된다. 만약 이 비율이 다른 스테이션들에 비해서 낮다면, 스테이션 i 의 출력버퍼에 하물이 증가하여 스테이션 i 가 다른 스테이션보다 병목현상이 일어날 가능성이 크다. 그런데 λ_i 는 공정 순서와 생산물에 의해 정해지는 값이므로 병목현상이 발생할 확률을 줄이기 위

해서는 스테이션 i 의 검사율(w_i)을 가능한 증가시키는 것이 유리하다.

유휴 AGV가 스테이션 i 를 검사하는 비율, 즉 검사율(w_i)는 다음과 같이 구해진다(Bozer and Srinivasan, 1991).

$$w_i = \frac{1}{\chi_k} [1 - \alpha_k - 2\mu Q_k - \sum_{j \neq i} (\Lambda_j - \lambda_j) \sigma_{ji}] + \lambda_i \quad (4)$$

$$M_{k-1} + 1 \leq i, j \leq M_k \quad k=1, \dots, K$$

$$\text{단, } \chi_k = \sum_{j=M_{k-1}+1}^{M_k} \sigma_{ji-1}$$

식 (13)에서 α_k , $2\mu Q_k$, λ_i , 그리고 Λ_i 는 루프 간 운반경로가 정해지면 상수가 된다. 그러나 검사방문순서에 따라 유휴 AGV의 이동시간(σ_{ji})이 달라지므로 스테이션 i 의 검사율(w_i)은 유휴 AGV의 검사방문순서에 따라 달라지며 ϕ_k 가 최소가 될 때 w_i 가 최대가 된다.

따라서 단계 2에서는 유휴 AGV의 최대 의무적인 이동시간 비율(ϕ_k)을 최소화하기 위해

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K \phi_k \quad (5)$$

를 목적함수로 사용한다.

3. 유전 알고리즘의 적용

유전 알고리즘을 적용하기 위해서는 먼저 해를 하나의 스트링으로 표현하고, 목적함수를 최대화 문제로 변형하고 제약식에 대한 처리 방법, 유전 연산자의 적용 방법, 종료조건 등을 설정해야 하는데 본 연구에서 설정한 방법들을 살펴보면 다음과 같다.

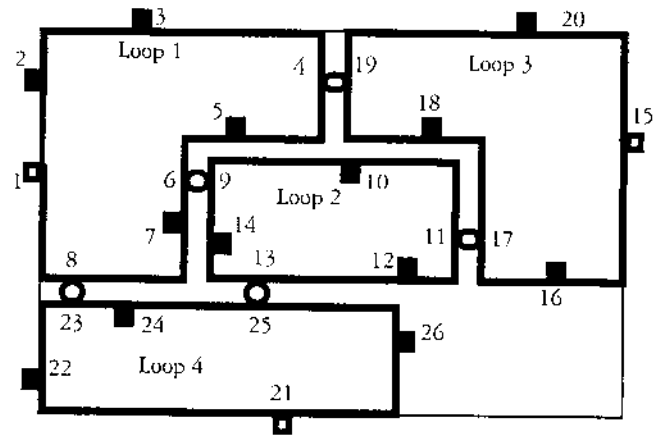
3.1 스트링 표현

먼저 각 루프의 방향과 루프 간을 이동하는 하물의 경로를 동시에 포함할 수 있도록 p 번째 스트링, S_p 를

$$S_p = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_k \ \dots \ l_K \ | \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i \ \dots] \quad (6)$$

로 표시한다.

여기서 l_k 는 루프 k 의 방향을 나타내는 변수로 루프 k 의 방향이 시계방향인 경우에는 1의 값을 갖고 반시계방향인 경우에는 0의 값을 갖는다. 루프 간을 이동하는 하물의 가능 경로를 나타내는 a_i 는 다음과 같이 정의한다. 먼저 각 작업의 경로에서 루프 간을 이동하는 부분만 분리하여 차례로 나열하고 번호를 부여하여 i 번째 부분 경로에 대응하는 변수를 a_i 로 표시한다. 그 다음에 각 부분 경로 a_i 가 사용할 수 있는 환승스테이션들의 쌍을 찾아서 차례로 색인을 부여하고 색인들 중



■ 가공 스테이션 □ 입·출력 스테이션
○ 두 개의 환승 스테이션을 갖고 있는 환승 지역 (양방향 이동 가능)

그림 3. Tandem AGVS 예제.

표 1. 예제의 공정순서와 생산율

작업 (Job)	공정 순서	생산율 (loads/hr)
A	1 → 2 → 3 → 7 → 3 → 5 → 1	a=2.5
B	1 → 3 → 10 → 14 → 10 → 12 → 24 → 21	b=1.0
C	15 → 20 → 16 → 18 → 16 → 15	c=2.1
D	15 → 20 → 5 → 10 → 12 → 22 → 21	d=0.8
E	21 → 24 → 22 → 21	e=2.0
F	21 → 26 → 16 → 20 → 7 → 1	f=1.1

하나를 a_i 에 임의로 부여한다. 즉, a_i 는 i 번째 부분 경로가 택하는 가능 경로에 대한 색인이 된다. 예를 들어 <그림 3>과 같은 Tandem AGV 시스템에서 <표 1>에 주어진 경로대로 6가지의 작업을 처리한다고 가정하자(Lin, Chang and Liu, 1994). 그러면 각 작업의 경로에서 루프 간을 이동하는 부분 경로는 작업 B의 3 → 10, 12 → 24, 작업 D의 20 → 5, 5 → 10, 12 → 22, 작업 F의 26 → 16, 20 → 7으로 전부 7개가 있다. 각 부분 경로에 대해서 택할 수 있는 가능 경로들에 색인을 부여하면 <표 2>와 같다.

3.2 제약식의 처리

유전 알고리즘에서는 대개의 경우 제약식을 목적함수에 별점함수로 포함시키는 방법을 사용하는데 별점함수를 적절히 정해지지 않으면 좋은 결과를 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 별점함수를 사용하지 않고 제약식을 만족하는 스트링만 생성하는 방법을 사용한다. 즉, 초기 개체집단을 생성할 때는 생성된 스트링이 제약식을 만족하지 못하면 그 스트링을 버리고 새로운 스트링을 생성하여 제약식을 만족하는 스트링들만 개체집단에 포함시킨다. 또한 교차나 돌연변이로 생성된 스트링에 대해서도 제약식을 만족하지 않으면 버리고 새로 생성하는

표 2. 예제의 루프 간 운반물들의 가능 경로

i	부분 경로	색인	가능 경로	배달률
a ₁	3→10	1	3→4→19→17→11→10	1.0
		2	3→6→9→10	
		3	3→8→23→25→13→10	
a ₂	12→24	1	12→9→6→8→23→24	1.0
		2	12→11→17→19→4→8→23→24	
		3	12→13→25→24	
a ₃	20→5	1	20→17→11→9→6→5	0.8
		2	20→17→11→13→25→23→8→5	
		3	20→19→4→5	
a ₄	5→10	1	5→4→19→17→11→10	0.8
		2	5→6→9→10	
		3	5→8→23→25→13→10	
a ₅	12→22	1	12→9→6→8→23→22	0.8
		2	12→11→17→19→4→8→23→22	
		3	12→13→25→22	
a ₆	26→16	1	26→23→8→4→19→16	1.1
		2	26→23→8→6→9→11→17→16	
		3	26→25→13→9→6→4→19→16	
		4	26→25→13→11→17→16	
a ₇	20→7	1	20→17→11→9→6→7	1.1
		2	20→17→11→13→25→23→8→7	
		3	20→19→4→7	

방법을 사용하였다. 이 방법은 이전 세대의 유전자 정보를 다음 세대에 전달하는 양은 줄어들지만 다양한 가능해를 도입할 수 있으므로 해의 탐색공간을 확장시켜 주고 최종해가 국부적 최적해가 될 확률을 줄여준다. 또한 자식 세대의 개체 생성시 이전 세대의 우수 스트링 중 일정 비율만큼을 다음 세대로 복제하는 이주를 사용하여 우수한 스트링에 대한 유전자 정보는 소실되지 않고 다음 세대로 전달되도록 하였다.

이와 같은 방법을 적용한 결과 4절의 수치예에 나타난 예제와 추가로 살펴본 두 개의 예제에서 초기 모집단 생성시에는 버리는 개체가 각각 32%, 20%, 25% 정도였으나 반복이 진행될수록 줄어들어 세번째 이후의 반복과정에서는 생존율이 98% 이상으로 나타났다. 이는 알고리즘이 진행될수록 이전 세대에서 이주하는 개체의 생존율이 커지면서 용량을 초과하게 만드는 경로는 빠르게 도태되기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 목적함수의 변형

루프방향이 단방향인 모델에서는 아래와 같이 총 적재 이송 시간을 최소화시키는 것이므로 최대화 문제로 바꾸어 주기 위해 목적함수를 다음과 같이 변형한다.

$$\text{Max } Z_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^K A_k} \cdot 100 \quad (7)$$

식 (1)에서 $\sum_{k=1}^K A_k$ 는 양수이므로 역수를 취하면 최대화 문제를 최소화 문제로 바꿀 수 있으며 목적함수 값의 변별력을 크게 하기 위해 100을 곱해 주었다.

루프방향이 양방향인 모델은 2단계로 구성되어 있는데, 단계 1에서는 식 (7)과 같은 목적함수를 사용하고, 단계 2에서는 식 (5)를 위와 같은 방법으로 변형하여 사용한다.

3.4 종료조건

프로그램을 종료시키는 조건으로는 두 가지를 사용하는데, 하나는 최대 세대(반복) 수를 제한하는 것이고 다른 하나는 우수 개체집단을 이용하는 것이다. 우수 개체집단이란 현재까지 적합도가 가장 큰 개체들의 목록을 만들어 이 목록이 일정 세대동안 변하지 않으면, 즉 해의 개선이 없으면 알고리즘을 종료하는 방법이다. 본 연구에서는 이 두 가지 종료 조건 중에서 먼저 발생하는 것에 의하여 프로그램을 종료한다.

4. 수치 예

제시된 발전적 기법을 Lin, Chang, 그리고 Liu (1994)가 제시한 선형계획법 모델과 비교하기 위하여 배치는 3.2절의 <그림 3>, 생산율과 공정은 <표 1>을 이용하여 해를 구하였다. <그림 3>의 각 스테이션 간의 거리는 <그림 4>와 같다. 유전알고리즘에 사용된 매개변수들은 <표 3>과 같으며 프로그램은 FORTRAN으로 작성하여 Enterprise 5000 워크스테이션에서 실행하였다.

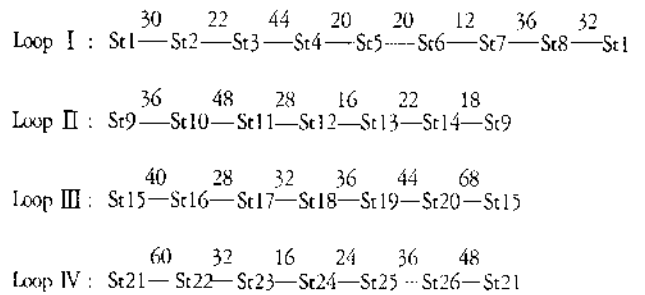


그림 4. 예제의 스테이션 간의 거리.

표 3. 유전 알고리즘 매개변수

개체집단 크기	50
개체의 길이	11
최대 세대(반복)수	1000
이주(Immigration)되는 개체의 수	2 (모집단 크기의 4%)
교차변이 확률	0.70
돌연변이 확률	0.02

4.1 루프방향이 단방향인 경우

<표 3>에 주어진 매개변수들을 이용하여 프로그램 실행 결과 45세대만에 종료하였으며 걸린 시간은 1초 미만이었다. 프로그램 종료시의 상위 10개의 개체와 우수 개체집단의 상위 10개의 개체는 표 4와 같은데 <표 4>에서 우수 개체집단의 개체들 중 적응도가 가장 큰 개체가 최적해가 된다.

본 예제는 4개의 루프로 구성되어 있으므로 각 개체의 1열부터 4열까지는 루프방향을 나타내고 나머지는 각 루프 간 하물의 운반경로를 나타내는데 적응도가 가장 큰 개체는 11002332343으로 나타나 있다. 따라서 루프 1, 2는 시계방향, 루프 3, 4는 반시계방향이고 루프 간 운반경로는 각각 작업 B의 루프 간 운반경로 3→10은 3→6→9→10, 12→24는 12→13→35→24, 작업 D의 20→5는 20→19→4→5, 5→10은 5→6→9→10, 12→22는 12→13→25→22, 작업 F의 26→16은 26→25→13→11→17→16, 20→7은 20→19→4→7로 이동하는 것이 최적해가 되며 구해진 최적 경로를 표로 나타내면 <표 5>와 같다. 이 때 전체 적재 이동시간에 대한 비율은 (1/53.711)×

표 4. 종개체집단의 일부분 (단방향인 경우)

세대 45					
종료시 개체집단(처음 10개)			최고 개체집단		
번호	String	적합도값	번호	String	적합도값
1	11002332343	53.711	1	11002332343	53.711
2	11002332343	53.711	2	11002332343	53.711
3	11002332323	51.676	3	11002332343	53.711
4	11002332243	50.686	4	11002332343	53.711
5	10002322343	47.628	5	11002332343	53.711
6	10002322343	47.628	6	11002332343	53.711
7	11002332323	51.676	7	11002332343	53.711
8	11002322343	51.205	8	11002332343	53.711
9	11013132141	42.692	9	11002332343	53.711
10	11002332343	53.711	10	11002332343	53.711

표 5. 최적 경로와 최적 루프방향 (단방향인 경우)

작업	배달률 (loads/hr)	최적해
A	2.50	1 1 0 0 1 2 3 7 3 5 1
B	1.00	1 1 0 0 1 3 6 9 10 14 10 12 13 25 24 21
C	2.10	1 1 0 0 15 20 16 18 16 15
D	0.80	1 1 0 0 15 20 19 4 5 6 9 10 12 13 25 22 21
E	2.00	1 1 0 0 21 24 22 21
F	1.10	1 1 0 0 21 26 25 13 11 17 16 20 19 4 7 1

목적함수값(선적·하역시간을 포함한 총 적재 이동시간비율)=1.8618, 즉 111.708분

표 6. 각 루프의 작업부하(단방향인 경우)

루프 번호	선적·하역시간을 포함한 적재 이동시간 비율(A_k)	유휴 AGV의 최대 의무적인 이동시간 비율(ϕ_k)	작업부하 (W_k)
1	0.653	0.091	0.743
2	0.257	0.033	0.290
3	0.590	0.051	0.641
4	0.363	0.016	0.379
합	1.862	0.191	2.053

표 7. 최적 경로, 최적 루프방향 및 목적함수값

(작업 A의 생산율: 2.5loads/hr → 4.0loads/hr ; 단방향인 경우)

작업	배달률 (loads/hr)	최적해
A	4.00	1 1 1 1 1 2 3 7 3 5 1
B	1.00	1 1 1 1 1 3 6 9 10 14 10 12 13 25 24 21
C	2.10	1 1 1 1 15 20 16 18 16 15
D	0.80	1 1 1 1 15 20 19 4 5 6 9 10 12 13 25 22 21
E	2.00	1 1 1 1 21 24 22 21
F	1.10	1 1 1 1 21 26 25 13 11 17 16 20 17 11 9 6 7 1

목적함수값(선적·하역시간을 포함한 총 적재이동시간비율)=2.9207, 즉 175.242분

100, 즉 1.8618시간이 된다. 이것은 Lin, Chang, 그리고 Liu의 선형계획법 모델을 2⁴번 수행하여 최적해를 구한 결과와도 일치하는데 제시된 방법에서는 최적 경로와 루프방향을 한 번만에 동시에 구하였다.

또한 구해진 해가 제약식을 만족시키려면 모든 루프에서 작업부하가 1 미만이어야 하므로 구해진 해를 이용하여 각 루프의 작업부하를 구해보면, <표 6>에 주어진 바와 같고 모든 루프에서 이 조건을 만족시킨다는 것을 보여주고 있다.

한편 작업 A의 생산율을 2.5loads/hr에서 4.0loads/hr로 증가시키면, <표 7>과 같이 최적 경로와 루프방향이 구해진다. 이때 목적함수는 2.9207, 즉 175.242분으로 Lin, Chang과 Liu(1994)의 선형계획법으로 구한 목적함수값(171.284분)보다 약간 증가하였는데 그 이유는 운영통제의 단순성과 분산 통제 방식을 위해 단일 작업에 대해서는 단일 경로를 할당했기 때문이다.

4.2 루프방향이 양방향인 경우

루프방향이 양방향인 경우 먼저 루프 간 운반경로를 구하기 위하여 단계1을 실행시킨 결과, 32세대만에 단계 1이 종료하였으며, 최적 경로와 목적함수값은 <표 8>에 주어져 있다. 루프방향이 단방향인 모델과 비교하여 보면 목적함수값, 즉 총 적

표 8. 최적 경로, 최적 루프방향과 목적함수값 (양방향인 경우: 단계1)

작업	배달률 (loads/hr)	최적해
A	2.50	1 1 1 0 1 2 3 7 3 5 1
B	1.00	1 1 1 0 1 3 6 9 10 14 10 12 13 25 24 21
C	2.10	1 1 1 0 15 20 16 18 16 15
D	0.80	1 1 1 0 15 20 19 4 5 6 9 10 12 13 25 22 21
E	2.00	1 1 1 0 21 24 22 21
F	1.10	1 1 1 0 21 26 25 13 11 17 16 20 19 4 7 1

목적함수값(선적·하역시간을 포함한 총 적재 이송시간 비율)=1.6729 (100.375분)

새 이송시간이 1.6729로 감소한 것을 알 수 있다. 이는 루프방향이 양방향일 때는 적재 상태의 AGV는 항상 최단 경로로 이동하기 때문이다.

각 루프의 작업부하를 살펴보면 <표 9>와 같은데 모든 루프에서 작업부하가 1 미만이라는 것을 알 수 있다. 또한 적재 상태의 AGV가 최단 경로를 따라 이동하므로 루프 2와 3에서는 단방향인 경우보다 작업부하가 감소하였다는 점도 알 수 있다.

<표 10>은 각 루프의 환송 스테이션과 입·출력 스테이션에 대해 유휴 상태의 AGV가 각 스테이션을 검사하는 비율과 유출률 및 AGV가 스테이션 i 를 빈 채로 떠나는 비율을 보여 주는데 암영된 스테이션이 각 루프에서 AGV가 스테이션 i 를 빈 채로 떠나는 비율이 가장 낮은 스테이션, 즉 유휴 AGV의 의무적인 이동시간 비율이 최대가 되는 스테이션들이다. 가공 스테이션들에 대해서는 정상상태에서 유입률(λ_i)과 유출률(λ_i)이 같아서, 병목현상이 발생하지 않으므로 표시하지 않았다. <표 10>에서 AGV가 스테이션 i 를 빈 채로 떠나는 비율이 모두 0보다 크므로 병목현상은 발생하지 않지만, 암영된 스테이션이 같은 루프 내의 스테이션들보다 빈 채로 떠나는 AGV율이 작으므로 암영된 스테이션이 병목지점이 될 가능성이 크다. 따라서 단계 2에서는 암영된 스테이션의 검사율을 증가시키기 위해 검사 방문시의 최적 루프방향을 결정한다.

표 9. 각 루프의 작업부하(양방향인 경우: 단계1)

루프 번호	선적·하역시간을 포함한 적재 이송시간 비율(A_k)	최대 의무적인 유휴 AGV 이동시간 비율(ϕ_k)	작업부하(W_k)
1	0.632	0.091	0.743
2	0.205	0.033	0.239
3	0.473	0.080	0.553
4	0.363	0.016	0.379
합	1.673	0.220	1.893

표 10. 스테이션 $i(i \in \Omega)$ 의 검사율(양방향인 경우: 단계1)

루프 번호	스테이션 번호(i)	검사율 (w_i)	유출률 (λ_i)	AGV가 스테이션 i 를 빈 채로 떠나는 비율($w_i - \lambda_i$)
1	1	10.028	3.500	6.528
	4	6.528	1.900	4.628
	6	6.428	0.000	6.428
	8	6.428	0.000	6.428
2	9	18.116	1.800	16.316
	11	17.416	0.000	17.416
	13	19.216	1.100	18.116
3	15	10.487	2.900	7.587
	17	7.587	1.100	6.487
	19	8.387	0.000	8.387
4	21	14.146	3.100	11.046
	23	10.346	0.000	10.346
	25	12.146	1.800	10.346

단계 2에서 유휴 AGV의 검사방문순서를 결정할 때, 단계 1에서 구한 최적 경로는 그대로 유지하면서 유휴 AGV의 검사 방문순서를 결정하기 위하여 유전 알고리즘을 다시 한번 적용한다. 루프의 가능한 조합수가 작으므로 개체집단의 크기를 20으로 하였고, 최고 개체집단이 연속적으로 10세대동안 개선이 이루어지지 않으면, 프로그램을 종료하였다. 나머지 유전 알고리즘 매개변수는 <표 3>과 같다.

단계 2에서는 15세대만에 알고리즘이 종료하였으며, 최적해는 <표 11>과 같고 최적 검사 방문 순서는 루프 1, 3, 4는 반시계방향이고, 루프 2는 시계방향이다. <표 11>에서 최적 경로는 단계 1에서 구한 최적 경로와 동일하다.

각 루프의 작업부하는 <표 12>와 같은데 단계 1에서 구한 <표 9>에 나타난 작업부하보다 감소하였다. 이는 작업부하에 여유분이 많아서 추가로 필요한 작업이 발생하거나 AGV의 총

표 11. 최적 경로, 최적 루프방향과 목적함수값(양방향인 경우: 단계2)

작업	배달률 (loads/hr)	최적해
A	2.50	0 1 0 0 1 2 3 7 3 5 1
B	1.00	0 1 0 0 1 3 6 9 10 14 10 12 13 25 24 21
C	2.10	0 1 0 0 15 20 16 18 16 15
D	0.80	0 1 0 0 15 20 19 4 5 6 9 10 12 13 25 22 21
E	2.00	0 1 0 0 21 24 22 21
F	1.10	0 1 0 0 21 26 25 13 11 17 16 20 19 4 7 1

목적함수값(최대 의무적인 유휴AGV의 총 이동시간비율) = 0.1240, 즉 7.440분

표 12. 각 루프의 작업부하(양방향인 경우: 단계2)

루프 번호	선적·하역시간을 포함한 적재 이송시간 비율(A_k)	최대 의무적인 유티 AGV 이동시간 비율(ϕ_k)	작업부하 (W_k)
1	0.632	0.023	0.655
2	0.205	0.033	0.239
3	0.473	0.051	0.524
4	0.363	0.016	0.379
합	1.673	0.124	1.797

전 등으로 인해 AGV의 가용 시간이 떨어질 경우 더 유연하게 대처할 수 있다는 것을 의미한다.

단계 2에서 유티 AGV의 검사방문순서, 즉 루프방향을 결정하는 또 다른 이유는 같은 루프 내의 다른 스테이션에 비하여 AGV가 빈 채로 떠나는 비율이 작은 스테이션의 검사율을 가능한 증가시켜서 병목현상의 발생 가능성을 감소시키기 위해서이다. 단계 1에서 구한 <표 10>과 아래에 주어진 <표 13>을 비교해 보면 AGV의 의무적인 검사이동 비율이 가장 큰 스테이션(암영된 스테이션)들에 대해 검사율이 증가하였다는 것을 알 수 있다. 반대로 검사율이 높았던 스테이션들은 검사율이 상대적으로 감소한 것을 알 수 있는데 이는 병목 현상이 발생할 가능성이 높은 스테이션들을 더 많이 검사방문 하게 되었기 때문이다. 즉, 단계 2에서는 총 적재 이동시간은 동일하게 유지하면서 각 루프의 AGV의 작업부하를 줄여주고 병목현상이 발생할 가능성이 높은 스테이션들의 검사율을 증가시켜 병목 현상 발생 가능성을 낮추어 주는 해를 구해준다.

표 13. 스테이션 $i(i \in \Omega)$ 의 검사율(양방향인 경우: 단계2)

루프 번호	스테이션 번호(i)	검사율 (w_i)	유출률 (λ_i)	AGV가 스테이션 i 를 빈 채로 떠나는 비율($w_i - \lambda_i$)
1	1	9.350	3.500	5.850
	4	7.650	1.900	5.750
	6	7.650	0.000	7.650
	8	5.850	0.000	5.850
2	9	18.116	1.800	16.316
	11	17.416	0.000	17.416
	13	19.216	1.100	18.116
3	15	9.807	2.900	6.907
	17	8.807	1.100	7.707
	19	8.807	0.000	8.807
4	21	14.146	3.100	11.046
	23	10.346	0.000	10.346
	25	12.146	1.800	10.346

5. 결론

LRP를 해결하기 위하여 Lin, Chang과 Liu는 선형계획법 모델을 최초로 제시하였으나, 이 방법은 Tandem AGVS의 주요 장점인 운영 통제의 단순성과 분산 운영 시스템의 장점을 감소시킬 수가 있으며 최적해를 결정하기 위해서는 K 를 루프수라고 할 때 2^K 개의 선형계획 문제를 풀어야 하고 한 개의 문제마다 입력 데이터를 다시 계산해야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 Tandem AGVS의 장점을 유지하기 위해 단일 작업에 단일 경로만을 할당한다는 가정 하에 유전 알고리즘을 이용해서 각 루프의 방향과 최적 운반 경로를 동시에 구해주는 발견적 기법을 제시하였다.

본 연구에서 구한 최적해는 Lin, Chang과 Liu가 제시한 선형 계획법에 의한 최적해보다 총 적재 이송시간이 다소 증가하는 경우가 있는데 이는 운영통제 시스템의 단순화를 위해 단일 작업에 단일 경로를 할당한다는 가정 때문이다. 그러나 단일 작업에 여러 경로를 할당하여 이를 실시간으로 선택하는 통제 시스템은 운영통제 시스템을 복잡하게 만들고 가격도 증가시키므로 운영통제 시스템의 단순화라는 Tandem AGVS의 취지에 비추어 볼 때 단일 작업에 단일 경로를 할당하는 것은 적절하다고 볼 수 있다.

한편 루프방향이 양방향인 경우에는 시스템의 작업부하를 감소시키고 병목 현상이 발생할 가능성이 높은 스테이션에 대해 그 가능성을 감소시킬 수 있는 최적 검사방문순서를 결정하는 모델을 제시하여 시스템에서 추가적인 작업을 받아들일 수 있는 여유 용량과 시스템의 유연성을 증가시킬 수 있는 해를 구하는 방법을 제시하였다.

참고문헌

Bartholdi, 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 Srinivasan, M. M. (1989), Tandem Configurations for AGV Systems Offer Simplicity and Flexibility, *Industrial Engineering*, 21(2), 23-27.

Bozer, Y. A. and Srinivasan, M. M. (1991), Tandem Configuration for Automated Guided Vehicle Systems and the Analysis of Single Vehicle Loops., *IIE Transactions*, 23(1), 72-82.

Goldberg, D. E. (1989), *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA.

Lin, J. T., C. C. K. Chang 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.

Lin, J. T. and Dgen, P. K. (1994), An Algorithm for Routing Control of a Tandem Automated Guided Vehicle System, *International Journal of Production Research*, 32(12), 2735-2750.

TanchocoJ., M. A. (1994), *Material Flow Systems in Manufacturing*, Chapman & Hall, London, England, 273-299.

Zbigniew Michalewicz (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.



김종화

서울대학교 산업공학과 학사

서울대학교 산업공학과 석사

University of Michigan Industrial and Operations
Engineering 박사

현재: 건국대학교 산업공학과 조교수

관심분야: Material Handling, 물류, 시뮬레이션



박제승

수원대학교 산업공학과 학사

건국대학교 산업공학과 석사

현재: 벽산정보통신(주) ASP사업본부

관심분야: FMS, AGVS, AS/RS, ERP