

외판원 문제(TSP)를 이용한 FMC 반송 로봇의 작업순서 설계

김우균*, 이홍철**

***고려대학교 정보경영공학부

e-mail:lonelyodium@korea.ac.kr

hcleee@korea.ac.kr

Task-Sequencing Design for the FMC Transfer Robot Using Traveling Salesman Problem

Woo-Kyun Kim*, Hong-Chul Lee**

***Dept of Information Management, Korea University

요 약

본 논문은 외판원 문제(TSP: Traveling Salesman Problem)를 이용하여 로봇중심의 FMC(Flexible Manufacturing Cell)에서 반송 로봇의 작업순서를 설계하는 방법을 제시하였다. 이를 위해, 먼저 다수의 설비와 반송 로봇으로 구성된 대표적인 로봇 중심의 FMC를 가상으로 설계한 후, 실험계획법을 이용하여 다양한 조건에서의 주요 반응변수들의 인과관계를 규명하였다. 실험결과, 처리량, 반송로봇의 가동률, 그리고 Buffer의 평균 대기 작업물의 수가 주요 반응변수들로 선정되었으며, 이를 기반으로 순서기반 조합최적화 문제인 TSP로 로봇 작업순서를 설계하였다. 제안한 방법과 기존의 방법을 비교하기 위해서 시뮬레이션을 수행 한 결과 제안된 TSP 방법이 기존의 방법 보다 반송 로봇의 교착(Deadlock) 상태를 방지하여 처리량 등 주요 반응변수들 모두를 향상 시키는 결과를 가져왔다. 더불어, 이 방법은 본 연구에서 제시한 FMC 뿐 아니라 반도체나 LCD(Liquid Crystal Display) 생산 공정과 같이 반송 로봇에 의해 구성되어 있는 장치 산업분야에 적용가능하다는 측면에서 큰 효과가 기대된다.

1. 서론

초기 제조환경은 다양한 소비자의 요구, 제품의 짧은 수명주기 그리고 치열한 국내외 경쟁 등으로 특징 지워지는데 이러한 제조환경에 적응하기 위하여 효율성과 유연성을 동시에 갖추고 있는 유연제조 시스템(FMS: Flexible Manufacturing System)의 도입이 급격히 늘어나고 있는 추세이다[2]. FMS는 구성요소 중 설비(Machine)의 대수와 배치에 따라서 여러 가지 형식으로 분류될 수 있는데, 그 중 유연제조셀(FMC: Flexible Manufacturing Cell)은 다수의 설비(Machine)와 반송용 로봇, 무인 반송차(AGV: Automation Guided Vehicle)로 구성된 소규모 작업센터 형식으로 정의된다[3]. 셀의 중앙에 고정 위치한 로봇을 중심으로 여러 설비들이 배치되어 있는 FMC를 로봇 중심 FMC라 부른다[1].

본 연구에서는 이러한 로봇 중심 FMC에서의 반송로봇의 작업순서 설계를 다루고자 한다. 기존 연구에서는 다목적을 고려한 FMS의 작업할당 문제(Jang and Cho, 1996)나 공정계획 문제(Kim et al,

2004) 그리고 스케줄링 문제(Felix T.S. Chan, 1998; S. Saravana Sanker et al, 2006; Indira Molina Restrepo et al, 2008)에 대하여 다양하게 다루고 있다. 그러나 FMC 반송 로봇의 작업순서 설계문제에 대해서는 미약한 연구가 이루어 졌다. 또한 본 연구에서 활용하는 외판원 문제(TSP)는 순서에 의한 조합 최적화문제로 그 응용분야가 다양하다. 이러한 이유 때문에 TSP에 관한 이론 연구와 전통적 탐색 최적화기법을 이용하여 해결하려는 시도가 많았다 [4]. 따라서 본 연구에서는 순서기반 조합최적화 문제인 TSP로 로봇 작업순서 문제를 설계하였다. 이후 본 연구의 구성은 제 2장에서는 작업순서 결정 알고리즘에 대하여 알아보고, 제 3장에서는 연구대상 FMC의 구성과 주요반응변수 선정방법을 정의한다. 제 4장에서는 기존의 방법과 제안한 방법을 시뮬레이션 실험을 통해 비교분석을 수행한다. 제 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제안하여 논문을 마무리 하고자 한다.

2. 작업순서 결정 알고리즘

본 연구는 조합최적화 문제인 TSP를 이용하여 반송 로봇의 작업순서 문제를 보다 효율적으로 설계하는 것이다.

2.1. 기존 로봇 작업순서 결정 알고리즘

기존연구에서 Shu-Chu Liu는 Petri nets을 이용한 FMC 로봇의 동적 작업순서문제를 소개하였으며[7], 로봇의 총 작업수행시간을 감소시키는 방법에 대하여 제시하였다. 또한 O. Maimon은 신경망모델(Neural network)를 이용하여 반송 로봇의 작업순서 문제를 표현하였다[5]. Park은 로봇 중심 FMC 최적 로봇 서비스 이동정책에서 모두 5가지 로봇 서비스 이동규칙을 비교분석 하였는데 내용은 아래와 같다[1].

(1) 선입선출(FIFO)규칙

가장 먼저 로봇의 서비스를 필요로 한(즉, 가장 오래 기다린) 작업물을 우선 서비스 한다.

(2) 최소이동시간우선(MITT)규칙

로봇 팔이 현 위치로부터 작업물 탈착을 위한 기계 또는 입력 컨베이어를 거쳐 다음 공정의 기계 또는 출력 컨베이어까지 이동하는데 소요되는 총 시간이 가장 짧은 작업물을 우선 서비스한다. 로봇의 총 이동시간(RTT)은 다음 식에 의해 계산된다.

$$RTT = \frac{|L-i|}{s} + \frac{|i-j|}{s}$$

여기서 L=로봇 팔의 현 위치

i=탈착될 작업물이 놓여 있는 기계 또는 입력 컨베이어의 위치

j=다음 공정의 기계 또는 출력 컨베이어의 위치

s=로봇의 이동속도

(3) 최대잔여가공시간우선(MXRP)규칙

잔여공정에서 소요되는 가공시간의 합이 가장 긴 작업물을 우선 서비스 한다.

(4) 최소공정순서우선(MIRN)규칙

다음 공정의 순서가 가장 작은 번호로써 표현되는 작업물을 우선 서비스한다. 예를 들어, 작업물 A와 B의 다음 공정이 각각 2번째와 5번째 순서의 작업이면 작업물 A를 우선 서비스 한다.

(5) 최대공정순서우선(MXRN)규칙

MIRN규칙의 반대로서, 다음 공정의 순서가 가장 큰 번호로써 표현되는 작업물을 우선 서비스한다.

기존연구에서 Park이 위에 제시한 5가지 로봇 이동규칙에 대하여 비교분석 결과 최대공정순서우선(MXRN)규칙이 평균 체류시간과 총 처리시간 등의 평가척도에서 수행도가 가장 뛰어난 것으로 나타났다[1]. 따라서 제 4장 시뮬레이션 실험 및 결과분석에서 최대공정순서우선(MXRN)규칙을 제안하는 작업순서 알고리즘의 평가척도로 활용한다.

2.2. TSP를 이용한 작업순서 결정 알고리즘

TSP(Traveling Salesman Problem)는 복잡한 문제임에도 불구하고 오늘날 전화망이나 집적회로의 설계로부터 차량의 경로 배정, 작업순서 결정, 산업용 로봇프로그래밍에 이르기까지 매우 다양한 분야에서 직접적으로 응용되고 있다. TSP는 2차원 평면에 분산되어 있는 n개의 도시를 모두 연결하는 최소 비용의 경로 즉, 최단 경로를 찾는 순서 조합의 최적화 문제이다. 이 문제는 정의하기는 쉬운 반면 해를 구하기가 어려운데, 일반적으로 해를 구하기 위해 (n!)만큼의 계산 시간이 필요하다[4].

또한 이 문제는 순서를 다루는 문제라서 각 도시의 방문 순서를 일부만 바꾸어도 탐색 경로가 달라지기 때문에 지역 최적해(local Optimum)를 많이 갖게 되는 NP-Complete(Non-deterministic Polynomial time Complete)문제로 구분되고 있다[4]. 본 연구에서 고려하는 TSP 작업순서 문제를 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

$$Minimize Z = \sum_{k=1}^l \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ijk} \right)$$

$$C_{ijk} = F_{ijk} \times D_{ijk}$$

F_{ijk} : Material Flow form i to j in cell k

D_{ijk} : Distance form i to j in cell k

i, j : Any Machine for $i \in [1, m], j \in [1, n]$

k : Number of the cell for $k \in [1, l]$

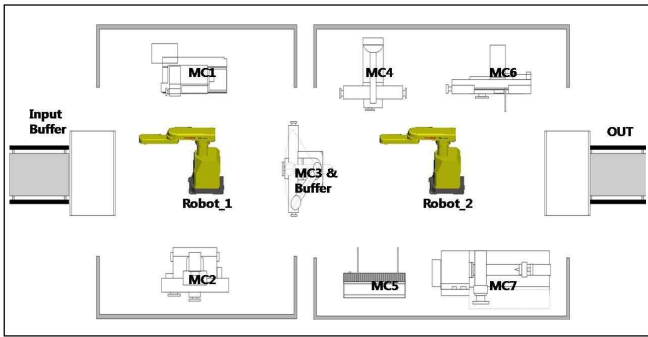
여기서 D_{ijk} 는 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 기반으로 계산하게 된다. 이때, 설비 I와 설비 j간의 이동거리를 D_{ij} 라고 한다면 두 설비 $D_i(X, Y)$ 와 $D_j(X, Y)$ 간의 거리는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{ij} = \sqrt{(D_i(X) - D_j(X))^2 + (D_i(Y) - D_j(Y))^2}$$

3. 연구대상 FMC

3.1. 연구대상 FMC 구성

본 연구에서 구성한 모델의 배치(Layout)는 두 개의 구역(Zone)으로 구분하여 각 구역의 중심에 한 대의 로봇을 배치시킨 FMC를 구성하였다. 로봇의 반경을 고려하여 하나의 구역에는 2대의 설비(Machine)를 다른 하나의 구역에는 4대의 설비를 배치하였고 구역과 구역을 연결시켜 주는 가운데 부분에 한 대의 대기공간(Buffer) 기능을 갖는 설비를 배치하였다. 작업물이 컨베이어를 통해 FMC로 투입되어 MC1과 MC2의 작업 상태에 따라 대기할 수 있는 Input buffer를 FMC의 맨 좌측에 배치하였다. 각 설비들은 특정 작업시간을 가지고 작업물들이 해당 공정에 도착 하였을 때 공정이 시작되도록 설계하였다. 본 연구에서 구성한 모델은 [그림1]과 같다.



[그림 1] AutoModII을 이용한 FMC 모델

본 연구에서는 제안한 알고리즘의 유효성을 검토하기 위하여 시뮬레이션 분석을 실시한다. 따라서 시뮬레이션 분석을 위한 모델을 구성함에 있어 전제조건이 필요하며 이는 다음과 같다.

- (1) 시뮬레이션 모델의 각 설비는 한 번에 한 작업만을 수행한다.
- (2) 작업가능공정 및 그 표준시간은 주어져 있다고 가정한다.
- (3) 로봇이나 기계의 고장은 고려하지 않는다.
- (4) 작업물의 종류는 5종류로 구성한다.
- (5) 작업물 투입간격 : Exponential 5 min
- (6) Input Buffer Capacity : Infinite
- (7) MC3 Buffer Capacity : 10 EA

시뮬레이션 모델의 작업물의 종류별 공정 순서는 다음 [표1]과 같다.

[표 1] 작업물별 공정 순서

작업물 순서	Part A	Part B	Part C	Part D	Part E
1	MC1	MC1	MC1	MC2	MC2
2	MC2	MC2	MC2	MC1	MC1
3	MC3	MC3	MC3	MC3	MC3
4	MC4	MC4	MC5	MC4	MC5
5	MC5	MC5	MC4	MC7	MC6
6	MC6	MC7	MC7	MC5	MC4
7	MC7	MC6	MC6	MC6	MC7

반송 로봇을 통하여 FMC에 들어온 작업물들은 각각 설비에서 특정 작업시간을 거치게 되는데 해당 설비의 작업시간은 작업물의 종류와 관계없이 분포로 설정하여 작업의 유동성을 고려하였다. 모든 작업물은 설비와 설비 사이를 이동할 때 해당 구역(Zone)의 중앙에 위치하고 있는 반송 로봇을 통해서만 운반이 가능하다. 반송로봇은 한번에 하나의 작업물만 운반 할 수 있도록 하였고 작업의 상차(Loading), 하차(Unloading)시간은 모두 5초로 가정하였다. 모든 공정을 거쳐 작업이 완료 된 작업물은 OUT 컨베이어를 통하여 FMC에서 떠나게 된다.

3.2. 주요 반응 변수 선정

다양한 조건에서의 FMC의 성능에 큰 영향을 주는 주요 반응변수들을 분석하기 위해서 2^k 요인실험(2^k factorial design)을 도입하였다. 요인실험에서는 모든 요인효과(인자의 효과와 교호작용)를 추정할 수 있다는 특징이 있다[8]. 본 연구에서는 작업물 종류, 작업물의 개수, 평균 작업물의 작업시간, 처리량, 로봇이동시간, 로봇 대기시간, Buffer에 평균 대기 작업물의 수, 반송로봇 가동률 등을 실험 요인으로 결정하였다. 실험 결과 처리량, 반송로봇의 가동률, 그리고 Buffer의 평균 대기 작업물의 수 순으로 주요 반응변수가 나타났다. 따라서 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 비교분석 시 이를 평가 척도로 이용하기로 한다.

4. 시뮬레이션 실험 및 결과분석

본 실험은 로봇 중심 FMC에서 반송 로봇의 이동 규칙과 대기정책에 따른 수행도를 비교 평가하여 제시한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 것이다. 본 연구의 유효성을 검증하기 위해서 제2장에서 설명한 Park의 실험에서 가장 우수한 성능을 보인 최대공정순서우선(MXRN)규칙과 비교하였다.

시뮬레이션 분석은 1회 총 10시간 동안 시뮬레이션을 수행하고 30회 반복 실험을 통하여 평균값을 사

용하였으며, FMC 내에 존재하는 모든 설비의 가동률을 기반으로 Warm-up 분석 시 약 2시간의 Warm-up시간을 통하여 시스템이 안정화 되는 것을 확인할 수 있었기 때문에 Warm-up 시간은 2시간으로 설정하였다.

시뮬레이션 실험 결과 작업물의 총 처리량은 MXRN의 경우 97개, 제안된 TSP 알고리즘의 경우 104개로 총 처리량이 약 7% 증가하였으며, 반송 로봇의 가동률은 로봇1의 경우 17.4%에서 18.3%로 증가하였으며 로봇2의 경우 24.3%에서 27.1%로 증가하였다. 이는 선 작업 수행 후 작업 완료가 발생한 다음 작업물 선택 시 앞서 정의한 비용함수가 최소화되는 위치로 이동하기 때문에 상대적으로 적은 이동거리와 이동시간으로 작업을 수행하게 함으로써 총 처리량과 가동률 측면에서 상대적으로 높은 결과를 보이는 것이라 사료된다. 또한 Input buffer의 대기하는 평균 작업물의 개수 또한 11.2개에서 8.4개로 Buffer 기능을 하는 MC3의 경우에 5.3개에서 3.5개로 대기하는 작업물의 수가 줄어든 것을 알 수 있다. MXRN과 제안된 알고리즘과의 비교분석 데이터는 다음의 [표2]와 같다.

[표 2] 결과 비교분석 데이터

		MXRN	제안된 TSP	단위
작업물의 총 처리량		97	104	EA
반송 로봇의 가동률	R1	17.4	18.3	%
	R2	24.3	27.1	
Buffer의 평균 대기 작업물의 수	Input	11.2	8.4	EA
	MC3	5.3	3.6	EA

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 외관원 문제(TSP)를 통한 FMC 반송로봇의 작업순서 설계 방법을 제시하였다. 현재까지 연구된 로봇의 의사결정 방법은 간단한 시스템을 모델링하여 몇 개의 요소만을 고려한 수학적 기법이나 간단한 알고리즘을 통하여 이루어져 왔다. 하지만 본 연구에서는 TSP를 이용한 비용함수를 통하여 작업완료 신호가 다수의 MC에서 발생할 경우 제안한 비용함수가 최소화 되는 곳으로 이동하여 작업을 수행하며 자신의 영역에 있는 모든 MC의 정보들을 활용하여 다음 운반해야 할 작업물을 미리 선택하여 해당위치에 이동 후 대기함으로써 전체 생산량과 로봇 가동률을 증가시키는 방법을 제시하였

다.

본 연구에서 제시한 방법은 FMC 뿐만 아니라 반도체나 LCD 생산 공정과 같이 반송 로봇에 의해 구성되어 있는 장치 산업분야에 적용 가능하다는 측면에서 큰 효과가 기대된다.

향후 과제로는 로봇의 의사결정에 있어서 로봇의 동작방식에 따라 발생할 수 있는 교착상태(Deadlock)를 제어하는 보다 효율적인 FMC 반송로봇의 작업순서 설계 방법이 요구된다.

참고문헌

- [1] 박양병, “로보트 중심 FMC에서 최적 로봇 서비스 이동정책을 위한 연구”, 한국시뮬레이션학회지, 제1권, 제1호, pp. 55-63, 12월, 1992.
- [2] 이충수, “SSMS (Single-stage Multi-machine System)에서 동적 공구할당 전략하의 부품투입 방안 연구”, 고려대학교 산업공학과 박사 학위논문, 2월, 2000.
- [3] 윤정익, 엄인섭, 이홍철, “FMC반송용 로봇의 선전형 운영방법”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 제17권, 제4호, pp. 249-257, 12월, 2008.
- [4] Young-Tak Kwon, Chung-sei Rhee, “Traveling Salesman Problem using Genetic Algorithm”, Journal of the Research Institute for Computer and Information Communication, Vol.5, No. 1, August, 1997.
- [5] O. Maimon, D. Braha, V. Seth, “A neural network approach for a robot task sequencing problem” Artificial Intelligence in Engineering, Vol.14, pp. 175-189, 2000.
- [6] Aydin Sipahioglu, Ahmet Yazici, Osman Parlaktuna, Ugur Gurel, “Real-time tour construction for a mabile robot in a dynamic environment”, Robotics and Autonomous Systems, Vol.56, pp. 289-295, 2008.
- [7] Shu-Chu Liu, Li Lin, “Dynamic sequencing of robot moves in a manufacturing cell”, European Journal of Operational Research Vol.69, pp. 482-497, 1993.
- [8] 박성현, “현대실험계획법”, 민영사, 개정판 6쇄, pp. 305-338, 3월, 2006.