

# 통합자동생산시스템에서 최적운영방안 결정을 위한 유전자 알고리즘의 개발<sup>†</sup>

(A genetic algorithm for determining the  
optimal operating policies in an  
integrated-automated manufacturing system)

임 준 묵\*

(Joon-Mook Lim)

**요 약** 본 논문에서는 자동창고시스템과 자재취급시스템이 통합된 통합자동생산시스템의 하나인 DIO가공시스템을 고려한다. DIO가공시스템에서는 스택크레인이 가공물의 저장을 위한 운반은 물론 각 기계 사이의 가공물 운반역할을 담당하게 된다. 이러한 시스템에서 일어날 수 있는 문제로 크게 시스템 설계와 관련된 문제와 시스템운영과 관련된 문제로 구분하고 본 논문에서는 시스템의 운영정책에 관련된 문제만을 다룬다. 시스템의 운영과 관련된 문제로는 가공물투입순서, 가공물의 저장위치, 스택크레인의 작업배정, 가공물선택 등으로 크게 4가지로 나누어서 고려한다. 각각의 운영정책에 대해서 기존의 연구결과로부터 DIO가공시스템의 특성을 반영하는 몇 가지씩의 운영정책을 대안으로 제시하고 최적의 운영정책 결정을 위한 방법론으로 컴퓨터시뮬레이션과 유전자알고리즘을 통합한 방법론을 제시한다. 또한 실험을 통해서 기존의 연구결과와 비교 검토함으로써 제시된 알고리즘의 우수성을 검증한다.

**Abstract** We consider a Direct Input Output Manufacturing System(DIOMS) which has a number of machine centers placed along a built-in Automated Storage/Retrieval System(AS/RS). The Storage/Retrieval (S/R) machine handles parts placed on pallets for the machine centers located at either one or both sides of the AS/RS. This paper deals with the operational aspect of DIOMS and determines the optimal operating policy by combining computer simulation and genetic algorithm. The operational problem includes: input sequencing control, dispatching rule of the S/R machine, machine center-based part type selection rule, and storage assignment policy. For each operating policy, several different policies are considered based on the known research results. In this paper, using the computer simulation and genetic algorithm we suggest a method which gives the optimal configuration of operating policies within reasonable computation time.

## 1. 서 론

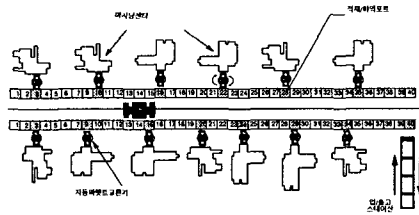
최근 들어, 가공시스템의 내부에 소형의 자동창고 시스템을 설치하고 그 양쪽(때로는 한쪽)에 나란히 머시닝센터(machining center)들을 배치시켜서, 자동창고가 원재료

(raw material)와 재공품(WIP:work-in-process)을 저장하는 역할을 맡게 하고, 각 머시닝센터 바로 앞에 위치한 자동창고의 랙 오픈링(rack opening)은 머시닝센터 가공물의 적재/하역(P/D:pickup/deposit)을 위한 포트(port)로 사용되며, 스택크레인(stacker crane)은 자동창고 내부에서 물품의 불출과 저장은 물론 각 머시닝센터에 가공물의 적재/하역이 가능하도록 적재/하역 포트에 가공물을 운반해주는 역할을 맡게 하는 통합된 가공시스템이 도입되고 있다.

<sup>†</sup> 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

\* 대전산업대학교 산업공학과

이렇게 머시닝센터와 자재취급시스템(material handling system)을 통합하여 운영함으로써, 공간의 효율적 활용, 실시간 내의 재고 파악, 더 나은 생산조건의 컨트롤 및 다양한 공정의 변화에도 적절히 대응할 수 있는 유연성을 확보 할 수 있게 된다. <그림 1>은 이러한 시스템의 개략적인 상황을 보여주고 있다.



<그림 1> DIO가공시스템

이러한 시스템은 'DIO가공시스템(direct input output manufacturing system)'이라는 이름으로 일본, 스웨덴 등에서는 물론 우리나라에서도 D중공업, H정공등에서 설치하여 운영하고 있다[1,2,3].

이러한 가공시스템을 설치 운영하는데 일어날 수 있는 문제로는 크게 나누어서, 시스템의 설계와 관련된 문제(기계의 설비배치문제, 운반단위크기 결정문제, 자동창고의 크기결정문제 등)와 시스템의 운영과 관련된 문제(가공물 투입순서 결정 문제, 가공물 저장위치 결정문제, 스택크레인의 작업배정에 관한 문제, 자동창고로부터의 가공물선택에관한 문제 등)로 나눌 수 있다[4].

DIO가공시스템에서의 최적의 설계와 시스템운영 조건을 찾아내기 위해서는, 설계문제와 운영에 관련된문제가 서로 깊은 연관성을 가지므로 설계와 운영에 관한 문제들을 한꺼번에 다루어야 하겠지만, 이것을 동시에 고려하는 데는 문제의 복잡성이 매우 크므로 현실적으로 불가능하다. 지금까지 다루어진 많은 시스템의 문제들에서와 마찬가지로 DIO가공시스템의 문제도 단계적 절차를 따르게 되는데, 먼저 주어진 환경 하에서 시스템 설계문제(기계 배치, 운반단위크기 및 자동창고의 크기결정 등)를 해결하게 되고 최적의 설계에 의해서 얻어진 시스템의 조건하에서 최적의 운영 조건들을 찾아내게 된다.

시스템의 설계문제가 적절히 해결되고 나면 시스템의 효율은 운영정책들을 주어진 환경에 얼마나 알맞게 잘 결정하느냐에 따라 크게 의존하게 된다. 다시 말하면, 주어진 설계조건 하에서, 현 시스템이 최대의 운영효율을 발휘할 수 있도록 최적의 운영 정책을 결정하여 줌으로써 시스템의 생산성을 극대화 시킬 수 있는 것이다.

그러나 DIO가공시스템의 운영을 맡은 관리자가 시스템

의 설계 조건만 주어진 상황 하에서, 시스템을 직접 가동시켜보지도 않고 그 시스템에 알맞은 운영 정책을 결정하기란 그리 쉬운일이 아니다. 예를들어, 스택크레인의 작업배정규칙으로서 사용될 수 있는 것들로 지금까지 여러 문헌에서 제시된 방법들을 살펴보면, 선입선출법(FCFS), 최단거리우선법(STT), 최단납기법(EDD)등 수십여 가지에 이르게 된다. 이 룰들 중 어떤 규칙이 DIO가공시스템에 가장 효과적인가를 알아내기 위해서는 모든 경우에 대하여 실험을 해보아야 한다. 그뿐만 아니라 시스템에 영향을 줄 수 있는 운영정책은 스택크레인의 작업배정 이외에, 여러가지의 저장방식 및 DIO가공시스템에의 가공물 투입 순서등의 정책요소가 있고 그들 상호간에 어떤 연관성이 있을지도 모르기 때문에 작업배정 규칙만을 고려한 최적운영방법이 실제로 DIO가공시스템을 운영하는데 최적의 효과를 줄 수 있다고 보기 어렵다. 결국 최적의 운영정책 조합을 찾아내기 위해서는 운영정책들 간의 모든 조합에 대하여 실험을 수행해야 하는 데, 이는 엄청난 실험횟수와 시간을 요구하게 마련이다.

게다가, 각 운영정책의 성능은 시스템 환경의 변화에 영향을 받을 수 있으므로 현실적으로 보다 의미있는 결과를 얻기 위해서는 DIO가공시스템의 환경(예를 들어, 가공물의 종류, 수, 가공시간 등등의 요소)을 변화시켜 가면서 운영정책이 시스템에 미치는 효과들을 측정하는 것이 바람직하다.

한 예로, 우리가 고려하고자 하는 운영정책이 4가지이고 각 운영정책마다 10가지의 룰들이 적용이 가능하다고 하자. 또한 시스템의 수행도에 영향을 미칠 수 있는 시스템 환경요소가 6가지이고 그 각각이 취할 수 있는 값이 두가지라고 하자. 운영정책, 시스템의 환경요소 및 이들간의 조합이 시스템에 미치는 영향을 모두 고려한 최적의 운영정책 조합을 찾아내기 위해서는 일반적인 실험에 의한 방법론(full factorial design)을 채택하면  $10^4 \times 2^6 = 640,000$ 회의 실험이 요구된다. 실로 엄청난 시간과 비용이 요구된다고 할 수 있다.

이와 같은 문제점을 고려하여 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 여기서 얻어지는 결과를 바탕으로 최적의 운영정책 조합을 찾아내기 위한 방법론으로 유전자알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하고자 한다.

유전자알고리즘은 이러한 조합적 특성을 가지는 최적화 탐색문제에도 적용이 가능하며 만족할 만한 효과를 보이고 있음이 여러 연구논문에서 발표되고 있다[5]. 특히 GA는 복잡한 실험계획이나 세밀한 탐색 및 분석 절차를 거치지 않고도, 문제의 특성을 적절히 고려한 유전자에 대한 알맞은 코딩(coding)과 유전연산자(Genetic Operator)의 선택 또는 개발을 통해서 스스로 '최적해'를 찾아가는 경향을 많은 사례에서 보여주고 있다. 따라서 본 연구에

서도 시뮬레이션과 유전자알고리즘의 결합을 통해서 통합된 자동생산시스템의 최적운영 정책을 손쉽게 결정할 수 있는 방법론을 개발하고자 한다.

## 2. 연구의 범위 및 국내·외 연구동향

### 2.1 연구의 범위

자재취급시스템(Material Handling System)과 수치제어가공시스템(Numerical Control Machining System)을 결합시킴으로써 우리가 목표로 하는 '자동화'를 이룰 수 있고, 이러한 통합된 자동화 생산 시스템의 한 방안으로 'DIO가공시스템'이 도입될 수 있다. 그러나 이러한 DIO가공시스템의 도입은 개별적인 시스템에서와는 다른 복잡한 설계와 운영상의 문제를 야기시킨다. 이에 관련된 문제들을 나열해 보면 <표 1>과 같다.

<표 1> DIO가공시스템과 관련된 문제

관련 항목	시스템의 설계와 관련된 문제	시스템의 운영과 관련된 문제
문제	(1) 기계의 설비배치 (2) 운반단위크기 (unit load size) 결정 (3) 자동창고의 크기 결정	(1) DIO가공시스템으로의 가공물 투입순서 결정 (2) 자동창고내의 가공물 저장위치 결정 (3) 스택커크레인의 디스패칭 (4) 자동창고로 부터의 가공물 선택

DIO가공시스템에서 시스템 설계문제와 운영문제는 모두 중요한 문제이지만 설계문제는 보통, 시스템의 도입 초기에 한번만 고려되는 문제이고 시스템을 운영하는 운영자의 입장보다는 고위 경영진의 정책결정과 관련된 사항이 많으므로 시스템 관리자의 재량권보다는 자료로서 주어지는 경우가 많다[3]. 따라서 본 연구에서는 시스템의 설계조건이 주어졌다는 상황에서 시스템의 운영에 관한 문제를 다루고자 한다. 다시말하면, DIO가공시스템의 도입, 운영시 어떠한 운영정책들이 사용될 수 있는가를 조사하여 유전자알고리즘과 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 최적의 운영정책을 결정할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다.

### 2.2 국내·외 연구동향

근래들어 우리나라에서는 인력부족, 고임금등의 경영난의 극복책으로 자동화의 필요성이 대두됨에 따라 많은 산업체에서 자동화설비의 도입을 서두르고 있다. 더 나아가서 컴퓨터통합생산시스템(CIMS: Computer Integrated Manufacturing System)을 목표로 개별적인 자동화시스템

의 도입 뿐만 아니라 수치제어가공시스템과 자재취급시스템을 하나로 통합시킴으로서 원가절감 및 생산성의 극대화를 추구하고 있다. 이러한 통합된시스템으로서 기능을 수행 할 수 있도록 한 가공시스템이 'DIO가공시스템'인데 이미 오래전부터 여러나라에서 도입 운영하고 있으며 우리나라에서도 몇몇 공장에서 시험 가동 및 실제 생산작업이 행해지고 있다[1,2,3].

이러한 통합된 가공시스템에서는 무엇보다도 시스템의 운영정책의 중요성이 강조된다. 그러나 현재까지 국내외의 연구에서는 개별적인 시스템에 대한 최적의 정책결정에 관해서는 다루어져 왔으나 통합된 시스템에서 시스템의 특성을 종합적으로 고려한 운영정책의 개발은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 DIO가공시스템을 대상으로 어떠한 운영정책들이 사용될 수 있는가를 기존의 연구결과들을 대상으로 조사, 분석하여 DIO가공시스템의 특성에 맞는 정책을 수립하고 개별적인 정책으로서가 아닌 통합된 시스템 전체에서의 최적의 운영정책의 조합을 제시하고자 한다.

이렇게 통합된 시스템 전체에서의 최적의 운영정책을 결정하는 방법으로 기존에는 일반적인 실험계획(full factorial design)을 사용해 왔으나 너무나 많은 실험 횟수와 비용으로 인해 실패를 거둘 수 없었다.

최근들어, Lim등[4]은 다구치방법을 사용하여 실험의 횟수를 획기적으로 줄임은 물론 상황변화에 대해서도 로버스트(robust)한 결과를 줄 수 있는 새로운 방법 시도하였다. 그러나 다구치방법의 사용또한 실험계획 및 다구치방법의 이론에 대한 이해가 필요하며 여전히 많은 시간을 필요로 함은 물론 자동화된 분석도구로서는 사용하기가 힘든 점이 있다.

근래들어 이러한 조합적인 문제를 해결하는데 유전자알고리즘의 탐색방법론이 활용될 수 있음이 알려져왔다[5]. 그러나 구체적인 통합된 생산시스템에서의 운영정책 결정 문제의 적용에 관해서는 다루어지지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 DIO가공시스템에서의 운영정책들을 특성에 따라 세분하고 컴퓨터 시뮬레이션과 유전자알고리즘의 최적해 탐색 능력을 활용하여 최적운영정책을 보다 효율적으로 결정 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 3. DIO가공시스템 운영정책 결정을 위한 유전자 알고리즘

### 3.1 유전자알고리즘의 요소

유전자알고리즘은 문제의 잠재해를 표현한 개체들로 이루어진 모집단을 가지고 시작한다. 모집단은 매 세대마다

일정수의 개체를 유지하고 매 세대에서 각 개체의 적합도 (fitness)를 평가하여 이에 따라 다음 세대에 생존할 개체들을 확률적으로 선별한다. 선별된 개체들 중 일부의 개체들이 임의로 짝을 지어 교배하여 자손을 생성한다. 이때 교배(crossover)에 의해 부모의 유전자가 자손에게 상속되고 돌연변이가 일어날 수 있다. 자손은 부모로부터 좋은 유전형질을 상속받는다 가정함으로써 다음 세대의 잠재해들은 평균적으로 전 세대 보다 더 좋아진다고 본다. 이러한 진화과정은 종료조건을 만족할 때 까지 반복한다. 이 과정을 정리하면 <그림 2>와 같다. 여기서 P(t)는 세대 t에서의 모집단을 나타낸다.

```

begin
t←0
P(t)의 초기화(초기모집단 생성)
P(t)의 적합도 평가
while(종료조건이 만족되지 않으면) do
begin
t←t+1
P(t-1)로부터 P(t)를 선별
P(t)의 유전연산(교배와 돌연변이)
P(t)의 적합도 평가
end
end

```

<그림 2> 유전자알고리즘의 구조

유전자알고리즘에서는 생물학의 용어가 자주 사용된다. 문제의 잠재해를 표현하는 개체는 스트링(string) 또는 염색체(chromosome)라 부르며, 각 개체를 이루는 단위를 유전자라 부른다. 어떤 형질을 갖는 유전자가 놓이는 위치를 염색체 座(locus)라 하고, 각 유전자는 형질을 특정 지우는 여러 상태를 가질 수 있는데 이를 대립유전자(allele)라 부른다. 유전자로 이루어진 염색체의 표현을 유전자형(genotype)이라 하고, 눈과 머리 색깔 등 보이는 생물의 체질(즉 염색체가 의미하는 것)을 표현형(phenotype)이라 부른다[6].

유전자알고리즘의 요소로는 ①개체의 표현, ②적합도의 계산 및 선택, ③유전연산자, 및 ④유전파라미터 등이 있다. 다음절에서 이들 요소의 설명과 DIO가공시스템의 운영정책결정을 위한 유전자알고리즘의 개발 시 어떻게 적용되는지 살펴보도록 한다.

### 3.2 운영정책 결정을 위한 유전자 알고리즘

유전자알고리즘이 컴퓨터 시뮬레이션과 조합적인 문제가 결합된 문제에서 어떻게 적용 가능한지를 살펴보고 DIO가공시스템의 최적인운영정책 결정을 위한 유전자알고리즘을 제시하고자 한다.

#### (1) 개체의 표현

유전자알고리즘을 구성하는 첫 번째 단계는 유한개의 기호들로 표현된 집합체로서 개체를 구성하여 탐색하고자 하는 유한 해집합의 각 구성원들과 일대일 대응이 되도록 하는 것이다. 어떠한 방법론을 사용하여 개체를 부호화하여 나타내는가 하는 것이 나머지 모든 단계에 결정적인 영향을 미치게 된다.

본 연구에서 개체는 각 운영정책의 조합으로 구성되며 적용된 운영정책의 수와 물의 가지 수에 따라서 개체가 차지하는 비트수가 달라 질 수 있으나 통상적으로 0,1 이진 스트링을 사용하면 운영정책의 조합을 표현할 수 있다. 다음은 4가지 운영정책이 주어지고 각각에 따른 물들이 4개, 4개, 8개 및 2개로 구성되어있다면 <그림 3>과 같이 개체를 표현 할 수 있다.

운영 정책:	운영 정책 1	운영 정책 2	운영 정책 3	운영 정책 4
개체의 표현:	1 0	1 1	0 0	1 1
설명:	4가지의 물 중에서 3번째	4가지의 물 중에서 4번째	8가지의 물 중에서 2번째	2가지의 물 중에서 2번째

<그림 3> 운영정책 조합에 따른 개체의 표현

#### (2) 적합도 계산 및 선택

한 세대의 집단 내에 들어있는 각 개체들에 대해서 우리가 추구하는 목표에 대한 근접정도를 가지고 각 개체의 우열을 판가름하게 된다. 일반적으로 추구하는 목표라는 것은 우리가 해결하고자하는 문제의 목적함수 또는 적합도 함수(fitness function)의 최적값을 의미하며, 이 값은 각 개체를 적합함수에 적용시켜 얻어내게 된다. 각 개체의 적합도는 그 개체의 상대적 우열정도에 대한 정보를 지니고 있다. 이 값들은 차세대에서 후손들을 차별적으로 생성시키는데 사용된다.

본 연구에서 적합도는 운영정책의 한 조합으로 표현된 개체에 대한 시뮬레이션 수행결과로 얻을 수 있다. 시뮬레이션의 수행도 평가 함수로는 ①'생산율', ②'1/평균체류 시간' 을 고려하였으며, 이 두 가지 함수가 상호 보완적인 점을 감안하여 두 항목을 곱한 ③'생산율/평균체류시간' 도 수행도 평가함수로 고려하였다. 따라서 최적인운영정책 결정을 위한 유전자알고리즘의 수행 시, ① 및 ②의 수행도 관점에서 각각 문제를 해결하고, ③의 수행도도 고려하여 봄으로써 결정된 최적인운영정책의 수행도의 변화에 따른 영향을 살펴보도록 한다.

물론 1회의 시뮬레이션 결과만을 가지고 적합도로 삼는 것은 적합도의 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 되므로 여러 가지 환경요소를 고려한 시뮬레이션 결과를 개

체에 대한 최종적인 적합도로 삼는다. 여기서 환경요소란, ①머시닝센터의 수, ②가공물의 종류, ③가공물의 수요량, ④머시닝센터의 가공시간, ⑤스태커크레인의 수평/수직 속도 및 ⑥입/출력버퍼의 수 등을 의미한다. 본 연구에서는 환경요소에 따른 100회의 랜덤 환경을 만들어 적합도 계산을 위한 시뮬레이션 수행시 적용하였다.

한 집단에서의 개체에 대한 적합도 계산이 이루어지면 이를 바탕으로 다음세대의 자손을 생성하기 위해서 개체가 선택되어질 확률로 환산한다. 그 확률에 비례해서 무작위적으로 선택되어져서 유전법칙(유전연산자)에 의해서 복제되어 다음세대의 후손을 생성하게 된다.

### (3) 유전연산자

유전연산자는 ①교배(crossover) ②돌연변이(mutation)로 나누어진다. 교배는 두 부모가 갖는 유전자를 조합하여 자손을 생산하는 과정이다. 교배는 좋은 해를 이용하는 역할을 한다. 이를 위해서 교배는 부모의 좋은 형질이 가능한 파괴되지 않고 자손에 상속될 수 있어야 한다. 돌연변이는 개체에 새로운 유전자가 생성되는 것으로, 한 개체에서 아주 작은 수의 유전자를 임의로 변화시키는 과정이다. 유전자알고리즘에서 돌연변이는 해공간을 다양하게 탐색하는 역할을 한다. 유전연산자는 개체의 표현과 문제의 특성에 따라 여러 방법이 있다.

본 연구에서는 DIO가공시스템의 최적운영정책결정문제의 특성과 개체의 표현방식을 고려하여 다음의 교배방법과 돌연변이 방법을 사용하였다.

#### ① 교배

본 연구의 대상인 DIO가공시스템의 최적운영정책의 결정문제는 개체가 0,1 스트링으로 표현되므로, 본 연구에서는 교배의 방법론으로 가장 단순하면서도 가장 많이 활용되고 있는 일점교배(one-point crossover)를 사용하였다.

일점교배는 가장 고전적인 교배방법으로 개체의 유전자 사이의 임의의 한 점(이를 절단점이라 부름)을 기준으로 절단하여 두 부모로부터 각각 절단된 한 부분의 스트링씩을 상속받아 자손을 생산하는 방법이다. 예로 두 부모가 P1 = (01011)과 P2=(10010)의 유전자를 가지고 있고, 절단점이 세 번째와 네 번째 원소 사이라면 두 자손 O1=(01010)과 O2=(10011)이 생산된다. <그림 4>는 일점교배의 예를 보여주고 있다.

```

P1: ( 0 1 0 | 1 1 )   P1: ( 0 1 0 | 1 1 )
      ↓↓↓             ↓↓
O1: ( 0 1 0   1 0 )   O1: ( 1 0 0   1 1 )
           ↑↑             ↑↑↑
P2: ( 1 0 0 | 1 0 )   P2: ( 1 0 0 | 1 0 )
  
```

<그림 4> 일점 교배의 예

#### ② 돌연변이

돌연변이는 완전히 새로운 유전자를 생성하기 때문에 이를 '진화의 연료'라 하기도 한다. 돌연변이는 대부분 해로운 것이다. 해로운 돌연변이는 자손들의 적응을 감퇴시켜 자연선택에서 제거된다. 그러나 때때로 유익한 돌연변이가 일어나며, 이런 돌연변이에 의한 개체는 환경에 잘 적응하여 유사한 자손을 번식시킨다.

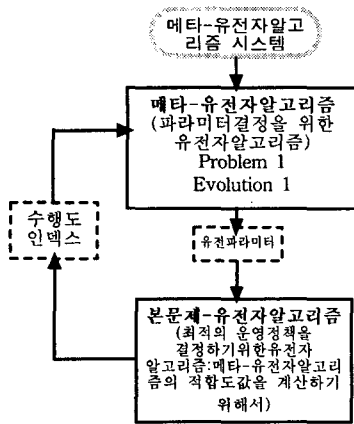
이진수로 표현된 개체에서 돌연변이는 원소값이 0이면 1로, 1이면 0으로 변화시킨다. 한 예로 개체 (01001)의 네 번째 원소에서 돌연변이가 발생하면 (01011)의 개체로 변이된다. 본 연구에서 대상으로 하는 개체의 표현도 0, 1로 표현되므로 위에서와 같은 단순한 돌연변이 방식을 사용하였다.

#### (4) 유전파라미터

유전자알고리즘에 사용되는 파라미터로는 모집단의 크기, 교배율, 돌연변이율, 종료조건 등이 있다. 모집단의 크기는 모집단을 이루는 개체의 수를 의미한다. 교배율은 각 개체가 교배될 확률을 나타낸다. 모집단이 100개의 개체로 이루어진 경우에 교배율 0.5는 평균적으로 50개의 개체가 교차된다는 것을 의미한다. 돌연변이율은 흔히 유전자 단위로 이루어진다. 돌연변이율은 각 유전자가 돌연변이될 확률을 나타낸다. 예로 100개의 개체가 있고 각 개체가 10개의 유전자로 구성되었다면, 돌연변이율 0.01은 1,000개의 유전자 중에서 평균적으로 10개의 유전자가 돌연변이 한다는 것을 의미한다. 알고리즘의 종료조건으로는 ①진행된 세대수 또는 생성된 개체수, ②해의 개선이 이루어지지 않고 진행된 세대수 또는 생성된 개체수, ③ 계산소요시간 등이 흔히 사용된다.

여기서, 유전자알고리즘은 알고리즘의 수행시 해당문제의 특성에 알맞는 파라미터들을 적절히 결정해 주어야만 비로소 알고리즘이 효과적으로 작용하게 된다. 그러나 이것을 적절히 결정하기 위해서는 시스템과 문제에 대한 많은 경험과 수많은 유전자알고리즘의 실험을 통한 결과를 바탕으로 결정 해주어야한다. 이렇게 되면 이 자체만으로도 너무 많은 시간을 요구하게 되어 실질적인 문제의 해결은 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 파라미터의 결정도 유전자알고리즘의 내부로 포함시켜서 짧은 시간 안에 목적을 달성할 수 있도록 하는 메타-유전자알고리즘(meta-genetic algorithm)의 방법론을 사용한 다[7,8].

유전파라미터의 값을 결정하기 위한 메타-유전자알고리즘의 구성은 다음 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 유전파라미터를 결정하기 위한 메타-유전자 알고리즘의 흐름도

따라서, 본 연구에서 제시한 유전자알고리즘은 크게 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는, 유전파라미터의 값을 결정하기 위한 메타-유전자알고리즘이 수행되고, 두 번째 단계에서는 앞 단계에서 결정된 유전파라미터 값을 가지고 본 문제에 대한 유전자알고리즘이 수행되어 최적의 유전파라미터값을 결정할 수 있도록 수행도값이 계산되어 피드백 된다.

본 문제-유전자알고리즘의 개체의 표현, 유전연산자 및 선택 등은 앞에서 언급한 바와 같다. 반면에, 메타-유전자알고리즘에서 사용되는 개체의 표현은 다음과 같이 구성된다.

실험대상의 DIO가공시스템에 대해서, 유전파라미터 값으로, 모집단의 크기, 교배율, 돌연변이율에 대해서 다음의 비율을 고려대상으로 생각한다.

<표 2> 메타-유전자알고리즘에서의 개체 표현

구분	집단의 크기	교배율	돌연변이율
고려대상 값 범위	4~24	0.2~0.8	0.01~0.10
개체의 표현구조	(□□□□) 4자리 0,1스트링	(□□□□) 4자리 0,1스트링	(□□□□) 4자리 0,1스트링

집단의크기, 교배율 및 돌연변이율 모두 네 자리수의 0,1 스트링을 이용하여 코딩한다. 따라서, 각 개체의 값은 16 단계로 구분될 수 있으며, 표현값에 비례해서 그 중의 한 값을 가지게 된다. 예를 들어, 다음과 같이 표현된 개체는 디코딩되어 실제 값으로 다음과 같은 값을 가지게 된다.

<표 3> 메타-유전자알고리즘에서의 개체표현과 디코딩 예

구분	집단의 크기	교배율	돌연변이율
개체표현	(1110)	(0010)	(1001)
개체의 값	20	0.28	0.064

또한, 메타-유전자알고리즘에서 사용된 유전파라미터 값으로는, 집단의 크기는 16, 교배율은 0.6, 돌연변이율은 0.02를 사용하였으며, 종료조건으로는 30세대가 진행되면 메타-유전자알고리즘을 마치는 것으로 하였다. 메타-유전자알고리즘에서 매 세대마다 집단을 구성하는 개체의 적합도 계산은 주어진 환경요소인 ①머시닝센터의 수, ②가공물의 종류, ③가공물의 수요량, ④머시닝센터의 가공시간, ⑤스태커크레인의 수평/수직 속도 및 ⑥입/출력버퍼의 수 등으로부터 임의의 20개의 랜덤환경을 만들어 각 문제에 대해서 본문제-유전자알고리즘에 의한 최적값을 찾은 후, 그 평균값으로 적합도를 삼는다.

유전자알고리즘은 종료조건에 따라 계산시간이 많은 영향을 받을 수 있다. 기존의 연구결과인 완전요인배치법 및 다구치방법[4]과 계산시간을 비교하기 위해서, 연속된 다섯 세대에 대해서 각 집단내의 개체들의 적합도 평균편차가 최종세대의 평균의 1%이내에 들거나 생성된 총 세대수가 100을 넘으면 유전자알고리즘의 진행을 끝내는 것으로 하였다. 이것을 알기쉽게 나타내면 다음과 같다.

종료조건: s세대가 진행되었을 때 다음조건을 만족하면 알고리즘의 진행을 끝낸다.

$$\frac{\sum_{i=1}^s |f_{i(s-i+1)}|}{5} < \frac{1}{100} \cdot fm, \text{ 또는 } s > 100.$$

여기서  $f_{i,s}$ 는 s세대에서의 집단내의 개체들의 적합도 최대편차(범위)값을 의미하며,  $fm_s$ 는 s세대에서의 집단내의 개체들의 적합도의 평균값을 의미한다. 유전자알고리즘이 종료되었을 때 집단내에 속해있는 개체들의 적합도를 점검하여 최대의 적합도 값을 가지는 개체를 찾아낸 것은 물론 유전자알고리즘이 종료할 때까지의 계산시간도 함께 기록하여 기존의 방법(완전요인배치법 및 다구치방법)과 계산시간을 비교할 수 있도록 하였다.

#### 4. DIO가공시스템에서의 운영정책

본 연구에서 대상으로 하고 있는 DIO가공시스템의 운영방법을 개략적으로 설명하면 다음과 같다(<그림 1> 참조). 이 시스템은 가공물을 장착한 팔렛(pallet)를 저장할 수 있는 랙(rack)과 한대의 스태커크레인으로 구성된 소형자동창고가 있고, 그 양쪽 또는 한쪽에 머시닝센터들

을 배치하여 운영되고 있다. 각 머시닝센터들은 자동창고의 가장 밑에 위치한 1층의 랙오프닝들 중 하나를 각각의 적재/하역 포트로 사용한다. 가공 원자재는 팔레트에 올려져서 외부 창고 또는 대형 자동창고로부터 DIO가공시스템의 입/출고 스테이션을 통해서 투입되게 되면 DIO가공시스템 내부에 있는 스택크레인에 의해서 해당 가공 머시닝센터의 적재/하역 포트로 옮겨지게 되고, 적재/하역 포트에 들어온 가공물을 얹은 팔레트는 자동팔레트교환기(APC:automatic pallet changer)에 의해서 머시닝센터에 투입되게 된다. 지정된 가공이 끝나고 나면 팔레트는 다시 자동팔레트교환기에 의해서 적재/하역 포트로 나오게 되고 다음 가공 머시닝센터로의 운반을 위해서 스택크레인을 기다리게 된다. 스택크레인이 도착하게 되면 팔레트는 다음 머시닝센터로의 운반이 가능하게 되는데, 만약 그 머시닝센터의 적재/하역 포트에 다른 팔레트가 놓여져 있을 경우에는 팔레트를 적재/하역 포트에 운반하지 못하고 자동창고의 빈 랙오프닝(rack opening)에 임시로 저장하게 되고, 다음에 적재/하역 포트가 빈 상태 되었을 때 운반되게 된다. 가공물이 주어진 일련의 가공을 모두 마치게 되면 DIO가공시스템의 입/출고 스테이션을 통해서 시스템 외부로 나가게 된다.

이러한 가공시스템을 설치 운영하는데 일어날 수 있는 문제는 앞에서 언급한 바와 같이 <표 1>과 같다.

DIO가공시스템의 설계가 완료되면, DIO가공시스템의 효율은 시스템의 효과적 운영정책에 의해 결정된다. 본 연구에서는 최적의 운영정책 조합을 결정하기 위해서, 시스템 운영정책을 <표 1>에서 제시된 것과 같이 네 가지로 분류한다. 그에 따른 각각의 문제에 대해서 기존의 연구결과로부터 적용이 가능한 규칙들을 간단히 설명하면 다음과 같다. 각 규칙에 대한 자세한 설명은 참고문헌[4]를 참조하기 바란다.

#### 4.1 DIO가공시스템으로의 가공물 투입순서 결정문제

- (1)생산평준화법(production smoothing method)[9]
- (2)부하균형법(load balancing method)[10]
- (3)임의순서법(random sequence method)

#### 4.2 자동창고내의 가공물 저장위치 결정문제[11]

- (1)최근위치저장방식(closest open location policy)
- (2)지정위치저장방식(dedicated location policy)
- (3)임의위치저장방식(random location policy)

#### 4.3 스택크레인의 작업배정(dispatching)에 관한 문제

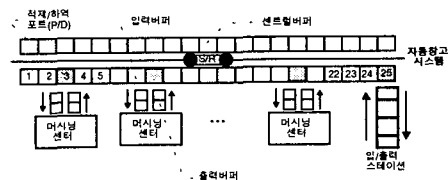
- (1)선입선출법(FCFS:first-come-first-served method)[12]
- (2)수정최단거리법(MSTT:modified-shortest-travel-time method)[13]
- (3)최대유의운반법(MSM:most-significant-move method)[14]

#### 4.4 자동창고로부터의 가공물선택에 관한 문제[15]

- (1)선입선출규칙(FCFS: first-come-first-served rule)
- (2)최소공정시간규칙(SPT:shortest-processing-time rule)
- (3)최단납기법(EDD: earliest-due-date rule)

### 5. 시물레이션을 위한 DIO가공시스템 모델링

본 연구에서 고려하고 있는 시스템의 모형을 개략적으로 나타내면 [그림 6]과 같다. 여러대의 머시닝센터들이 자동창고의 랙을 따라서 배치되어 있으며 한 대의 스택크레인이 양방향으로 움직이면서 운반 및 저장 작업을 수행한다. 각 머시닝센터는 유한개의 입력버퍼와 출력버퍼를 가진다. 각 머시닝센터에서 입력버퍼와 출력버퍼의 용량은 동일한 것으로 가정한다. 머시닝센터들이 자동창고 랙의 양면 또는 한면에 배치될 수 있지만 본 연구에서는 한면에 배치된 경우만을 다루었다. 주(main) 자동창고로부터 작업장(DIO가공시스템)으로 작업물의 투입은 정해진 순서(투입순서규칙(input sequencing rule)에 의해서 결정됨)에 의해서 결정되지만, 각 머시닝센터의 입력버퍼에서 작업물의 선택은 작업물이 도착한 순서대로 선택된다. 스택크레인은 역시 해당 머시닝센터에서 작업이 끝나서 다음 가공작업을 위해서 출력버퍼에서 기다리는 작업물 중에서 작업물이 출력버퍼에 들어온 순서에 따라서 먼저 들어온 작업물을 선택한다. DIO가공시스템 내에 존재하는 자동창고시스템은 유한개의 용량을 가지며 센트럴버퍼(central buffer)의 역할을 수행한다. 스택크레인이 연속되는 다음 공정의 작업을 위해서 팔레트를 운반하려고 할 때 다음공정의 해당 포트가 다른 작업물의 팔레트로 점유되어 있으면, 그 팔레트는 센트럴버퍼의 빈 랙오프닝에 임시로 저장되게 되며 후에 포트가 비게 되었을 때 꺼내어져 포트로 옮겨지게 된다.



<그림 6> 시물레이션을 위한 DIO가공시스템 모형

### 5.1 가정

형의 단순화를 위해서 다음과 같은 추가적인 가정을 한다.

- (1) 스택크레인의 가/감속은 고려하지 않는다. 즉, 모형의 현실성을 위반하지 않으면서 시물레이션 모스태크크레인의 속도는 등속인 것으로 한다.
- (2) 머시닝센터들은 자동창고의 한쪽 면에만 배치되며 일직선을 따라서 등간격으로 배열되어 있는 것으로 한다.
- (3) 스택크레인은 한번에 한 작업물만을 운반할 수 있다.
- (4) 스택크레인은 한대만 있는 것으로 한다.
- (5) 머시닝센터나 스택크레인의 고장은 고려하지 않는다.
- (6) 시물레이션의 모든 수행에서, DIO가공시스템에 포함된 자동창고의 크기는 25(폭) × 3(높이)로 고정되어 있는 것으로 한다.
- (7) 작업물은 재방문함이 없이 모든 머시닝센터를 한번씩 방문하며, 그 방문 순서는 랜덤(random)하게 결정된다.

### 5.2 수행도 평가

각 운영정책에 따른 DIO가공시스템의 성능을 평가하기 위한 수행도로 평균체류시간(mean flow time)과 생산율(throughput)을 고려한다. 평균체류시간은 작업물이 투입된 시점부터 시작해서 모든 작업이 끝나서 DIO가공시스템을 떠날 때까지 작업물이 체류한 평균 시간을 의미한다. 생산율은 DIO가공시스템에 처음의 작업물이 투입된 시점부터 시작해서 마지막 작업물이 DIO가공시스템을 떠날 때까지 시간의 역수를 의미한다. 시스템의 성능을 평가하기 위해서 사용되는 평균체류시간은 생산자에게는 재공품 재고의 수준을, 서비스를 원하는 고객에게는 대기시간의 기대치를 의미하는 것으로 일반적으로 널리 사용된다. 평균체류시간과는 대조적으로 생산율은 시스템의 생산성을 나타내는 지표로 널리 사용되고 있다. 그러므로 생산율이 클수록 시스템의 생산성은 제고되고, 평균체류시간이 작을수록 효율은 높아지게 된다.

여기서 얻어진 수행도 값은 본문제-유전자알고리즘에서 각 개체의 적합도를 계산하는 기초자료가 된다.

### 5.3 시물레이션의 수행방법

시물레이션을 수행하는 방법으로는 ① 안정상태시물레이션(steady state simulation)과 ② 종료시물레이션(terminating simulation) 방식이 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 DIO가공시스템에서는 시물레이션의 초기

에 각 작업물의 종류와 수요(수량)가 주어지는 것으로 가정하고 있기 때문에 각 운영정책 대안들(유전자알고리즘에서의 개체들)의 비교 평가시 각 대안별로 합리적인 안정상태의 시점을 책정하기가 매우 어려우며 자료의 손실이 막대하다. 따라서 본 연구에서는 종료시물레이션 방식을 채택하였다. 즉, 첫 번째 작업물이 투입됨과 동시에 시물레이션이 시작되어 마지막 작업물이 DIO가공시스템을 떠나면서 끝나게 된다.

주어진 DIO가공시스템에 대해서 시물레이션 전용 언어인 SLAM III[16]와 FORTRAN 언어를 사용하여 프로그램을 구현하였으며 유전자알고리즘에서 각 개체의 적합도를 계산하는 서브-모듈로 포함되어 사용되었다.

참고로 유전자알고리즘의 전체적인 프로그램은 C언어를 사용하여 구현하였으며 펜티엄 II급의 개인용 컴퓨터에서 실험을 행하였다.

## 6. 실험 및 결과분석

### 6.1 결정변수와 환경요인의 설정

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 결정변수로 고려하는 DIO가공시스템의 운영정책 4가지에 대해서 각 수준의 값을 요약하면 <표 4>와 같다.

<표 4> 운영정책의 수준

운영정책	수준
가공물 투입순서(A)	생산평준화법(A1)
	부하균형법(A2)
	임의순서법(A3)
가공물 저장위치(B)	최근위치저장방식(B1)
	지정위치저장방식(B2)
	임의위치저장방식(B3)
스택크레인의 작업배정규칙(C)	선입선출법(C1)
	수정최단거리법(C2)
	최대유익운반법(C3)
가공물선택(D)	선입선출법(D1)
	최소공정시간법(D2)
	최단납기법(D3)

또한, 다양한 실험환경을 제공하기 위한 환경요인으로서는, 본 연구에서는 6가지를 고려하였으며, 그 밖의 요인들은 기존의 연구결과와 경험에 비추어 중요하지 않은 것으로 판단되어 포함시키지 않았다. 선택된 환경요인들과 각 수준을 열거하면 <표 5>와 같다.



<표 5> 환경요인과 수준

환경요인	수준	
	1	2
머시닝센터의 수	5	10
가공물의 종류	5	10
가공물의 수요	100~200	100~400
머시닝센터에서의 가공시간	10~20분	5~35분
스태커크레인의 수평/수직 속도	20/10 (미터/분)	40/20 (미터/분)
입/출력버퍼의 수	1	2

앞에서 제시된 유전자알고리즘에서 한 집단내의 개체의 적합도 계산시, 다양한 환경요인을 반영하기 위해서, 환경요인의 각각의 종류에 따라, 환경요인의 수준을 임의로 택하여 문제들을 구성한 후 각각의 환경요인에 따라서 시뮬레이션을 수행한 후 그 수행도 값으로 적합도를 계산하게 된다.

### 6.2 실험계획

DIO가공시스템의 최적 운영정책 결정시 유전자알고리즘의 적용과 기존의 연구결과와의 비교평가를 위해서 크게 세가지의 종류의 실험을 실시하였다. 첫째, 개발된 유전자알고리즘을 이용하여 최적의 운영정책을 찾는다. 둘째, 일부실시법을 활용한 다구치방법을 사용하여 최적의 운영정책조합을 찾는다. 셋째, 완전요인배치법(full factorial design)을 사용하여 최적의 운영정책조합을 찾는다.

#### (1) 유전자알고리즘

앞절에서 개발된 유전자알고리즘을 적용하였으며, 적합도 계산방식 - 생산율, 1/평균체류시간, 생산율/평균체류시간 - 에 따라서 세 종류의 실험을 행하였다.

#### (2) 일부실시법

참고문헌[4]에 주어진 바와 같이, 직교표에 의한 배치에 의한 실험을 실시하였으며, 다구치방법을 사용하여 최적의 운영정책조합을 찾았다.

#### (3) 완전요인배치법

운영정책의 모든 조합과 환경요인의 모든 요인에 대해서 실험하여 전체 최적의 운영정책조합을 얻었다([4]참조).

### 6.3 결과분석

실험시 사용된 유전자알고리즘의 적합도 함수로 ① '생산율', ② '1/평균체류시간' 및 ③ '생산율/평균체류시간'의 경우로 나누어 고려하였으며, 각각의 경우에 대해서 다구치방법과 완전요인배치법의 실험을 행하여 수행도 및 계산시간을 비교하였다. <표 6>, <표 7>, <표 8>에 각

경우에 대한 결과가 요약되어 있다. 여기서, 평균체류시간은 [4]에서 언급된 바와 같이 '상대적평균체류시간'을 사용하였다.

<표 6> 적합도로 '생산율'고려시의 실험결과

방법	최적정책조합	평균 생산율	계산시간 (시간)
유전자알고리즘	(A2)(B1)(C2)(D1)	2.465	2.7
다구치방법	(A1)(B)(C2)(D)	2.464	2.1
완전요인배치법	(A2)(B2)(C2)(D2)	2.470	22.5

<표 7> 적합도로 '1/평균체류시간'고려시의 실험결과

방법	최적정책조합	상대적 평균체류시간	계산시간 (시간)
유전자알고리즘	(A2)(B1)(C2)(D1)	188.0	2.9
다구치방법	(A1)(B1)(C2)(D)	188.0	2.2
완전요인배치법	(A2)(B1)(C2)(D)	187.9	23.1

<표 8> 적합도로 '생산율/평균체류시간'고려시의 실험결과

방법	최적정책조합	평균 생산율/ (상대적평균체류시간)	계산시간 (시간)
유전자알고리즘	(A2)(B1)(C2)(D2)	0.01314529	3.1
다구치방법	(A1)(B1)(C2)(D)	0.013106382 978723	2.3
완전요인배치법	(A2)(B1)(C2)(D2)	0.01314529	23.5

실험결과로부터 우리는 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 본 연구에서 제시한 유전자알고리즘은 세 종류의 적합도 모두에서 완전요인배치법(최적)을 사용한 경우와 매우 근사한 해를 주었으며 적합도 함수로 '생산율/평균체류시간'을 사용한 경우는 완전요인배치법과 같은 해를 주었다.
- 계산시간 면에서 유전자알고리즘은 완전요인배치법에 비해서 약 1/8정도의 시간이 걸렸으며 수행도 측면에서도 매우 바람직한 결과를 주었다.
- 다구치방법을 사용한 경우보다 계산시간이 다소 많이 걸리는 경향이 있으나, 본 표에서 제시된 시간은 단지 실험에 소요된 시간만을 표기한 것이므로, 다구치방법에서는 일부실시법(fractional factorial design)의 실험을 거친 후 최적의 해를 도출하기 위해선 추후 분석(분산분석 등)을 위한 상당한 시간이 소요된다는 점을 감안하면 오히려 유전자알고리즘을 적용한 경우가 매우 효율적임을 알 수 있다.

- 유전자알고리즘을 사용하는 경우는 한번의 실행으로 최적의 해를 줄 수 있고 어려운 이론적인 배경을 요구하지 않으므로 실험계획이나 통계적인 분석 등에 대한 이론에 능숙하지 않은 사람들도 쉽게 사용할 수 있다.
- 본 연구에서 제시한 '메타-유전자알고리즘'은 유전파라미터의 결정을 알고리즘의 내부로 포함시켜, 유전파라미터의 결정조차 유전자알고리즘을 이용하여 구하여 줌으로써 유전파라미터의 민감성에서 오는 오차의 원인을 줄일 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 통합된 자동생산시스템의 최적의 운영정책을 결정하기 위한 유전자알고리즘을 제시하였다.

제시된 유전자알고리즘은 기존의 일반적인 실험계획에 의한 방법보다 시간적인 면에서 매우 우수하였으며, 수행도 측면에서도 거의 일치하는 성과를 거둘 수 있었다. 또한 최적화문제에 유전자알고리즘의 적용시 일반적으로 유전파라미터의 결정을 위한 사전 실험내지는 분석에 많은 노력이 요구되나, 본 연구에서는 이러한 유전파라미터의 결정을 유전자알고리즘의 내부로 흡수시키는 메타-유전자알고리즘을 적용하여 해결 할 수 있었다.

본 연구의 결과로부터 DIO가공시스템의 최적의 운영정책을 결정하기 위해 유전자알고리즘을 사용함으로써 DIO가공시스템을 도입, 운영하려는 시스템사용자에게 1) 일반적인 실험계획에 의한 방법보다 훨씬 짧은 시간 안에 최적의 운영방안을 제시하여 줄 수 있고, 2) 통계적 지식이나 분석에 대해 능숙하지 않은 현장 사용자들도 손쉽게 적용이 가능하며, 3) 본 연구에서 개발된 유전자알고리즘과 방법론은 DIO가공시스템과 유사한 특징을 갖는 시스템의 운영정책결정을 위한 최적화에 쉽게 활용될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] Chow, W. M., "An analysis of automated storage and retrieval systems in manufacturing assembly lines," IIE Transactions, June, 204-214, 1986.
- [2] Kusiak, A., "Material handling in flexible manufacturing system," Material Flow, 2, 79-95, 1985.
- [3] Lim, J. M., Design and operation problems in a flexible manufacturing system with built in automated storage/retrieval system, Ph.D Dissertation, KAIST, 1994.
- [4] Lim, J. M., K. S. Kim and K. S. Sung, "Determination of the optimal configuration of operating policies in an integrated-automated manufacturing system using the Taguchi method and simulation experiences," IE Interfaces, Vol.11, No.3, 23-40, 1998.
- [5] Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley, New York, 1989.
- [6] 김여근, 윤복식, 이상복, 메타휴리스틱., 영지문화사, 1997.
- [7] Grefenstette, J. J., "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE, 16(1), 122-128, 1986.
- [8] Hattori, M., J. Shirataki and T. Tomikawa, "A Study of Parameter Optimization in Meta-Genetic Algorithm," Proceedings of ICC&IE'96, Kyungju, Korea, Oct., 1996.
- [9] Monden, Y., Toyota production system, Institute of Industrial Engineering Press, Norcross, GA, 181-192, 1983.
- [10] Wittrock, R. J., "Scheduling algorithms for flexible flow lines," IBM Journal of Research Development, 29(4), 401-412, 1985.
- [11] Hausman, W. H., L. B. Schwarz and S. C. Graves, "Optimal storage assignment in automatic warehousing system," Management Science, 22(6), 629-638, 1976.
- [12] Egbelu, P. J. and J. M. A. Tanchoco, "Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules," International Journal of Production Research, 22(3), 359-374, 1984.
- [13] Han, S. D., A study on the development of dispatching rules for automated guided vehicles in automated manufacturing systems, M.S. thesis, Han

Yang University, 1989.

[14] Han, M. H. and L. F. McGinnis, "Control of material handling transporter in automated manufacturing," IIE Transactions, 21(2), 194-189, 1989.

[15] Parwalker, S. S. and W. Iskander, "A survey of scheduling rules," Operations Research, 25(1), 45-61, 1977.

[16] Pristker, A. ALAN B., Introduction to simulation and SLAM II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.