

# 유전 알고리즘 기반 염색가공 생산 스케줄링 문제 해결 방안

김승현\*, 박상언\*, 윤영석\*, 오현우°

## A Study on the Scheduling of Dyeing Processing Production Based on Genetic Algorithm

Seung-hyeon Kim\*, Sang-eon Park\*, Young-seog Yoon\*, Hyun-woo Oh°

### 요 약

염색가공 산업은 선행 작업 조건에 따라 후행 작업의 작업준비 시간이 변하여 작업 순서에 따라 작업완료시간이 크게 변할 수 있다는 특징을 가진다. 또한, 염색가공 산업의 핵심 공정인 염색 공정은 서로 다른 용량을 가지는 병렬의 염색기로 구성되어 다양한 할당 방법이 존재한다. 그러나 실제 생산 현장에서는 복잡한 제약사항을 고려하지 않고, 각 공정에서 일하는 작업자들의 지식 및 경험을 토대로 개별 공정 단위로 생산계획을 수립하고 있는 것이 현실이다. 본 연구는 작업 순서에 따라 작업준비 시간이 변하는 공정의 스케줄링과 용량 제약이 있는 공정의 작업 할당 문제를 유전 알고리즘을 통해 해결하여 작업완료 시간을 최소화 하는 생산 스케줄링 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제안하는 방법론은 용량 제약이 있는 병렬 공정을 가지는 다양한 제조업에 확장 적용 가능하다.

**Key Words** : Dyeing Processing, Genetic Algorithm, Job Assignment, Scheduling

### ABSTRACT

The dyeing processing industry is characterized by changes in the preparation time of follow-up work depending on the preceding working conditions, which can greatly change the completion time according to the sequence of work. In addition, the dyeing process, which is a key process in the dyeing processing industry, consists of a parallel dyeing machine with different capacities and there are various work assignment methods. However, the production site does not take into account complex constraints and its production plan is divided by each process, which is established on the knowledge and experience of the workers working in each process. This study presented a production scheduling method that minimizes work completion time by solving the problem with scheduling the process with varying work preparation time according to work order and assigning work of the dyeing process with capacity constraints through genetic algorithm. The methodology proposed in this paper is expandable to various manufacturing industries with capacity-constrained parallel processes.

\* 본 논문은 2019년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (20006619, “섬유산업 생산 혁신을 위한 실시간 생산 최적화 운영이 가능한 염색가공 지능형 공장 시스템 개발”)

◆ First Author : Intelligence·Manufacturing Convergence Laboratory, ETRI, pickax32@gmail.com, 연구연수생, 학생회원

° Corresponding Author : Intelligence·Manufacturing Convergence Laboratory, ETRI, hyunwoo@etri.re.kr, 책임연구원, 정회원

\* Intelligence·Manufacturing Convergence Laboratory, ETRI, ppssyy97@gmail.com, 연구연수생; isay@etri.re.kr, 선임연구원, 종신회원  
논문번호 : 202008-215-D-RN, Received August 31, 2020; Revised October 6, 2020; Accepted October 6, 2020

## I. 서 론

4차 산업혁명으로 생산 공정에 자동화 시스템 도입이 가속화 되고 있다. IoT, 센서, 로봇 등의 가격이 하락하여 스마트 공장이 적극적으로 도입되고 있으며, 이에 따라 생산 스케줄의 최적화를 위한 방법론도 활발하게 연구되고 있다. 생산 스케줄의 최적화와 효율적인 작업 할당을 통한 생산성 향상은 제조업의 경쟁력을 좌우하는 부분으로써 이러한 연구의 필요성 역시 증대되고 있다.

염색가공 산업은 생산성 향상이 매우 필요한 상황이다. 중국, 인도 등 신흥국의 저임금 기반 높은 생산성으로 인해 제품 경쟁력을 잃어가고 있으며, 고령화로 인하여 숙련 인원이 은퇴하며 동시에 청년층의 제조업 기피 현상으로 고속숙련 제조 인력이 감소하는 상황이다. 따라서 최적화된 생산 스케줄과 작업 할당 방법의 도입을 통해 생산성 혁신 기반 차별화와 작업자의 도메인 지식에 의존하는 작업 수행 방식을 개선할 필요성이 있다.

공정 스케줄링에 관련하여 다양한 연구가 수행되었다. 유재민 등(2015)은 정적/동적 유연 개별공정에 대하여 의사결정 나무 기반의 스케줄링을 제시하였다<sup>[1]</sup>. 유우식 외 2인(2020)은 Gantt Chart 생성 과정을 세로로 세우면 일자형만 존재하는 테트리스 게임과 유사하다는 아이디어를 바탕으로 하여 실시간 스케줄링을 수립하였다<sup>[2]</sup>. 또한 Imran Ali Chaudhry(2012)는 주문 처리를 위한 Job의 할당과 각 Job에 할당하는 기계를 결정하는 유전 알고리즘을 통해 Job-Shop 공정의 스케줄링 방법을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 공정의 작업 할당과 관련한 연구로는 서정하 외 3인(2010)의 규칙기반의 휴리스틱 기법을 도입한 이중병렬기계에서의 재작업을 고려한 작업 할당이 있다<sup>[4]</sup>. 주철민, 김병수(2012)는 유전 알고리즘을 적용하여 작업 준비시간을 최소화 하며 동시에 작업 준비시간을 고려하는 방법론을 제시하였고<sup>[5]</sup>, 정수계획법을 사용하여 작업 용량이 상이한 병렬 기계의 최적 작업 할당 방법도 연구되었다<sup>[6]</sup>.

그러나 염색가공 산업의 스케줄링 문제를 해결하기 위해 선행 연구 결과를 활용하기는 난해하다. 염색가공 산업은 선행 공정의 작업 조건에 따라 후행 공정의 작업 준비시간이 변화하며, 염색 공정의 경우 서로 다른 작업 용량을 가지고 병렬로 기계가 배치되어 있다는 특징을 갖는다. 기존 연구의 문제점은 1) 선행 작업의 조건에 따른 후행 공정의 작업 준비시간 변화를 고려하지 않았고, 2) 서로 다른 용량을 가지며 작업이 최대한 비슷한 시간에 종료되어야 하는 병렬 기기의

작업 할당을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 국내 대표 기업인 S사 염색가공 공정의 밀착 조사 및 분석을 통해 공정에 대한 정보와 제약 사항을 수집 및 정리하였다. 이를 바탕으로 선행 작업의 조건에 따른 후행 공정의 작업 준비시간 변화를 반영하고 용량이 서로 다른 병렬 공정의 최적 작업 할당을 통해 작업 완료시간을 최소화 할 수 있는 유전 알고리즘 기반 생산 스케줄링 방법을 제안하였다. 유전 알고리즘은 상용화된 라이브러리가 많아 구현의 효율성이 높고, 많은 가능해 영역을 탐사하여 최적의 해를 찾는 특성<sup>[7]</sup>을 가짐으로 스케줄링과 작업 할당 문제 해결에 적합한 알고리즘이다.

## II. 염색가공 산업의 스케줄링 문제

염색가공 산업의 스케줄링은 Hybrid Flow Shop Scheduling Problem에 병렬 공정 용량 제약이 추가된 문제로 정의할 수 있다. 염색가공 공정의 스케줄링은 주문을 처리하기 위한 공정들의 순서가 작업 시작 이전에 결정되는 있는 특징을 가진다. 배색, 염색 공정 등 필요로 수행하는 공정도 존재하지만, 쇼핑, 워싱덱블 등 주문에 따라 수행 여부가 결정되는 공정이 있다. 특히 S사의 경우, 염색 공정은 작업 용량이 상이하고 병렬로 구성된 염색기들로 구성되어 작업 할당이 매우 복잡하다. 따라서 작업 현장에서는 작업자의 경험 및 지식 기반으로 작업 할당을 수행하고 있으며 이로 인해 염색 공정에서 병목 현상이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

염색가공 산업의 스케줄링은 용량이 상이한 병렬 공정의 작업 할당과 전체 공정의 작업 스케줄링으로 분류해서 생각할 수 있다. 그러나 전체 공정의 작업 스케줄링에 따라 병렬 공정의 작업 할당 순서가 변할 수 있으므로 두 가지를 분리하여 스케줄링을 수행할 수는 없다. 또한 염색가공 산업은 선행 작업 조건에 따라 후행 작업의 작업준비 시간이 달라지는 특성을 가짐으로 작업 할당과 전체 공정 스케줄링을 한 번에 수행할 수 있는 스케줄링 알고리즘의 도입이 필요하다.

## III. 염색가공 산업의 특성

염색가공 산업의 공정은 다른 산업과 구분되는 몇 가지 특성을 가지기에 기존에 사용되고 있는 범용적인 스케줄링 알고리즘을 도입하기 난해하다. 염색가공 산업의 전체 스케줄링은 작업 할당을 동시에 수행할 뿐만 아니라, 주문 용량과 조건에 따라 공정에서 소요

되는 시간이 변한다는 특성을 가진다. 공정에서 소요되는 시간은 작업 시간과 작업대기 시간으로 정의할 수 있다.

염색가공의 각 공정에서 소요되는 시간은 주문 용량에 비례한다는 특성을 가진다. 즉, 작업 시간은 처리하는 원단의 양에 비례함으로써 스케줄링에서는 변동하는 작업 시간을 고려해야 한다. 또한, 선행 작업의 조건에 따라 후행 작업의 작업준비 시간이 달라지는 특성을 가진다. 작업준비 시간의 대부분은 세척시간이며 유연제 등의 약품 사용 유무에 따라서 시간이 추가되는 형태다. 특히 S사 현장 조사를 통해 여러 공정 중, 용량이 서로 다른 병렬 기기로 구성된 염색 공정에서는 선행 작업의 색상 조건에 따라 작업준비 시간이 2시간에서 4시간 까지 차이가 남을 확인할 수 있었다. S사 염색공정의 작업준비시간은 색 계열, 색 농도, 색 조합의 세 가지 색상 조건에 따라 결정되는데 이는 수식 (1)<sup>6)</sup>과 같다.

$$SetupTime_i = \begin{cases} 0 & \text{if } Af_n, Cb_n, Cb_n \text{ is equal } Af_w, Cb_w, Cb_w \\ 2 & \text{if } Af_n, Cb_n \text{ is equal } Af_w, Cb_w \\ 3 & \text{if } Af_n < Af_w \\ 4 & \text{if } Af_n \geq Af_w \end{cases}$$

*i*: 염색기의 인덱스, *n*: 할당되는 작업, *w*: 염색기에 할당된 작업  
*Af*: 색 계열, *Cb*: 색 농도, *Cb*: 색 조합

(1)

색 계열은 Yellow, Red, Blue, Black 네 가지가 있으며 감산혼합에 따라 Yellow<Red=Blue<Black으로 짙음 정도를 정의한다. 색 농도는 다섯 가지가 있으며 이는 WT/LT/M/MD/DK로 정의한다. 색 조합은 S사에서 평균적으로 사용되는 6가지를 가정하여 정수형으로 정의하였다.

또한, 염색기의 작업준비 시간은 염색기의 세척 시간과 동일하며, 염색기 세척 과정에서는 대량의 물과 약품을 사용함으로써 세척 횟수를 줄이는 작업 할당이 필요하다. 그리고 염색가공 산업의 염색 공정에서는 균일 염색 품질 달성을 위해 최소의 염색기를 사용하여 염색을 수행해야 하는 제약사항과 모든 작업이 끝나야 다음 공정을 수행할 수 있다는 병렬 공정의 특성을 고려해야 한다. 즉, 균일 염색 품질 달성을 위해 염색 공정에서 가능한 최소의 염색기를 사용하며, 작업준비 시간을 최소화 하는 작업 할당이 필요한 실정이다.

그리고 염색 방법은 원단의 종류와 특성에 따라 다양한 방식이 존재한다. S사의 경우 상압 염색과 고압 염색 두 가지 방법으로 수행되며 각 방법에 따라 사용

할 수 있는 염색기가 상이한 특성이 있다. 따라서 본 논문에서는 S사의 상압 염색과 고압 염색 공정에 작업 할당을 수행하는 알고리즘을 각각 제시한다.

#### IV. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 존 홀랜드(John Holland)가 제시한 최적화 기법으로 다양한 실행 가능한 영역을 탐색하고 점차 가장 좋은 해를 찾아 진화하는 알고리즘이다<sup>7)</sup>. 그림 1은 유전 알고리즘이 작동하는 순서도를 나타낸다. 유전자는 해를 구성하는 하나의 값에 해당하며 유전자들이 모여서 염색체를 구성한다. 유전 알고리즘은 실행 가능한 해들의 집합을 대상으로 Crossover 연산을 통해 최적해의 탐색을, Mutation 연산을 통해 지역 최적 해를 벗어나는 해를 생성하고 적합도 계산을 통해 해를 평가한다.

염색 가공 산업의 스케줄링과 작업 할당을 유전 알고리즘으로 해결하기 위해서는 작업준비 시간의 변화, 상이한 용량의 병렬 기계 구성 등의 제약사항들을 유전 알고리즘의 염색체로 표현해야 한다. 그림 2는 유전 알고리즘을 사용한 염색 가공 공정의 전체 스케줄링에 적용되는 염색체의 형태로, 세 개의 주문에 대한 스케줄링이 구성되었다.

그림 2의  $O_i (i = 1 \dots 3)$ 은 주문 번호를 의미한다. 주문 번호는 주문을 처리하기 위해 수행해야 하는 공정의 수만큼 존재한다. 유전 알고리즘의 유전자가 공정의 순서 정보를 가진다면 Crossover와 Mutation

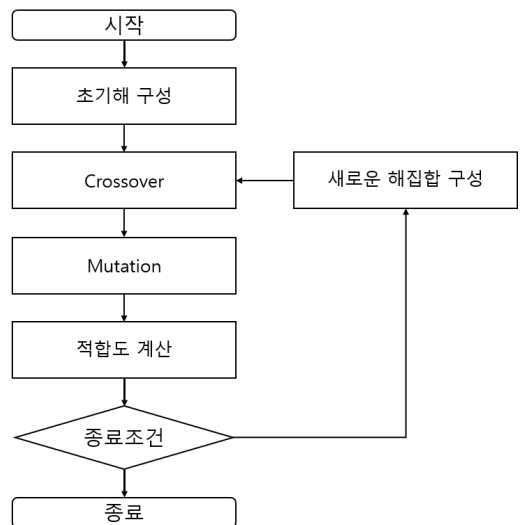


그림 1. 유전 알고리즘의 흐름도  
 Fig. 1. Flow Chart of Genetic Algorithm

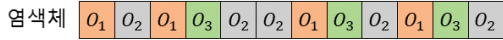


그림 2. 전체 공정 스케줄링의 염색체  
Fig. 2. Chromosome of Total Process Scheduling

수행 후, 유전자의 배열이 바뀌어 후행 공정을 선행 공정보다 먼저 수행하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 유전자는 공정 순서 정보를 포함하지 않는다. 그러나 작업완료 시간을 계산하는 적합도 계산 단계에서는 각 유전자에 대하여 공정 순서 정보가 필요하다. 따라서 알고리즘 구동을 위해 주문 순서와 같은 정보를 호출해서 사용할 수 있는 자료구조가 필요하다. 그림 3은 Linked List 형태로 자료구조를 정의한 형태이다. 각 Node는 주문을 의미한다.

각 Node에는 주문 처리를 위한 공정 순서와 각 공정의 작업준비 시간 및 작업 시간을 계산하기 위한 정보가 포함된다. 즉, 적합도 계산을 통해 스케줄에 대한 작업완료 시간을 계산하는 과정에서 각 Node에 저장된 정보를 호출하여 공정에서 소요되는 시간을 계산한다. 적합도 계산을 위해서 각 기계의약품 사용 유무와 할당된 작업 시간 등의 기계 정보가 저장되어야 한다. 표 1은 기계 정보의 일부이다.

표 1의 #1\_C는 1번 공정 기계의약품 사용 여부이다(1 or 0). 선행 작업의약품 사용 유무에 따라 작업을 수행하기 위해 30분의 세척 시간이 작업준비 시간으로 추가될 수 있다. #1\_W는 각 기계에 할당된 작업을 마치는데 소요되는 시간이다. 각 주문의 개별 공정들에 대한약품 사용 유무는 자료구조 Linked List에 저장되어 있으므로 간트 차트를 통해 작업완료 시간을 계산할 때 호출하여 사용한다. 표 2는 Linked List에 저장된 각 주문에 대한약품과 작업 용량 정보를

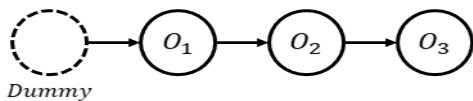


그림 3. 주문 정보를 포함하는 연결 리스트 자료구조  
Fig. 3. Linked List which Contain Order Information

표 1. 작업완료 시간 계산을 위한 기계 정보  
Table 1. Machine Information to Calculate Makespan.

#1_C	#2_C	#3_C	#4_C	#5_C
1	1	0	1	1
#1_W	#2_W	#3_W	#4_W	#5_W
7	3	2	4	6

표 2. 연결 리스트에 저장된 각 주문의 주문 정보  
Table 2. Order Information in Linked List

Order	Process	#1_L	#2_L	#3_L	#4_L	#5_L	Size
1	1-2-3-4	1	1	0	1		300
2	1-3-4-5-2	0	1	1	1	0	1000
3	2-5-3		1	1		1	700

나타낸다.

표 2의 Process는 염색체에 포함된 각 유전자들의 공정 순서를 의미한다. 염색체에 배치된 순서대로 각 공정 순서를 부여받는다. #1\_L은 1번 공정에 대하여 각 주문의약품 사용 여부이다. 표 1의 #1\_C와 비교하여 작업준비 시간이 계산된다. Size 열은 각 주문에서 처리해야 하는 원단의 크기(kg)이며 이와 비례하여 작업시간이 결정된다. 스케줄의 작업완료 시간은 작업준비시간과 작업시간을 계산하고 그림 4의 간트 차트와 같이 표현된다. 단, 간트 차트에 할당된 작업 조건은 유전자를 모두 할당할 때 까지 표 1에 지속적으로 갱신되며, 새로운 염색체를 할당할 때 초기화된다.

염색체에 기록된 작업 순서에 따라 작업완료 시간을 간트 차트로 계산한다. 그러나 S사의 염색가공 공정의 경우 병렬 기계로 구성된 병렬 공정과 용량이 상이한 병렬 기계로 구성된 염색 공정이 있다. 이 두 가지의 경우 간트 차트를 통한 작업완료 시간 계산은 상이한 형태를 가진다. 병렬 공정의 경우 작업준비 시간과 작업 시간을 고려하여 가장 빠르게 작업을 마칠 수 있는 하나의 기계에 작업을 할당한다. 그러나 염색 공정의 경우 작업을 할당하기 위해 한 개 이상의 염색기를 사용함으로써 병렬 공정과 같은 방식을 적용할 수 없다. 따라서 각 주문에 포함된 하나의 염색 공정 유전자에 대하여 염색 공정의 최적 작업 할당을 통한 염색 공정 작업종료 시간을 계산하기 위한 유전 알고리즘이 필요하다. 염색 공정의 특이한 상이한 용량의 병렬 기기를 표현하기 위해 그림 5와 같은 염색체가 구성

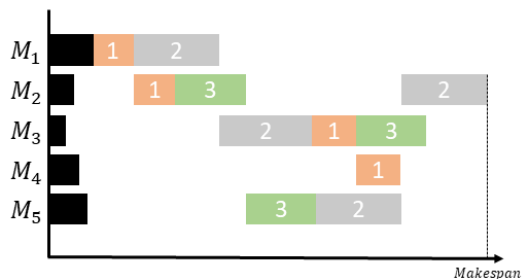


그림 4. 작업완료 시간을 계산하기 위한 간트 차트  
Fig. 4. Gantt Chart to Calculate each Makespan

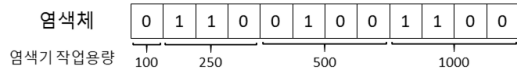


그림 5. 염색 공정 작업 할당을 위한 염색체  
Fig. 5. Chromosome of Job Assign for Dyeing Process

된다.

그림 5는 주문 용량 3000의 상압 염색을 수행하기 위한 염색기 작업 할당을 의미한다. 유전자는 염색기의 크기 별로 배치되어 염색체를 구성하며 염색체는 100, 250과 같은 각 크기별 염색기에 해당하는 유전자 집합을 가진다. 그림 5의 경우 250 크기를 가지는 염색기에 두 개, 500 크기를 가지는 염색기에 한 개, 1000 크기를 가지는 염색기에 두 개의 작업이 할당된 형태다.

염색체가 제약 사항을 고려한 최적 작업 할당을 찾았다면 간트 차트를 사용하여 작업종료 시간을 계산한다. 스케줄링과 동일하게 개별 주문에 대한 정보와 각 염색기의 정보를 비교하여 작업준비 시간과 작업 완료 시간이 결정된다. 표 3은 작업준비 시간을 결정하는 염색기 정보들을 정리한 표이며, 할당 시간은 이미 염색기에 할당되어 있는 작업을 수행하기 위한 시간을 의미한다.

각 염색기에 대하여 할당했을 경우에 대한 작업준비 시간을 계산하기 위해서 위와 같은 기계 정보가 필요하다. 기계 정보와 비교해 작업준비 시간을 계산하고 작업시간을 계산하기 위해서 Linked List에 저장된 해당 염색 공정의 정보를 호출하여 사용한다. 해당 정보는 표 4에 정리되어 있다.

표 3. 작업완료 시간 계산을 위한 염색기 정보  
Table 3. Dyeing Machine Information

염색기	색 계열	색 농도	색 조합	할당 시간
100_1	Red	WT	1	7
250_1	Black	DK	6	3
250_2	Blue	WT	3	5
250_3	Blue	MD	4	2
500_1	Yellow	M	2	1
500_2	Red	LT	5	11
500_3	Black	WT	1	3
500_4	Red	M	6	4
1000_1	Blue	WT	3	3
1000_2	Yellow	LT	2	2
1000_3	Black	DK	5	1
1000_4	Black	WT	1	7

표 4. 연결 리스트에 저장된 해당 염색 공정의 주문 정보  
Table 4. Information of Dyeing Process in Linked List

Order	색 계열	색 농도	색 조합	쇼핑 유무	Size
1	Red	M	5	1	3000

하나의 염색 공정에 대한 작업 할당임으로 모두 동일한 조건을 가진다. 주문 용량에 따라 염색기 작업 할당이 결정되며 이에 따라 다양한 염색체를 구성할 수 있다. 쇼핑 유무(0 or 1)는 작업 시간의 변화를 가져온다. 만약 쇼핑 공정이 들어가는 주문의 경우 염색기의 작업시간에 3시간을 추가한다. 상압 염색의 경우 작업 시간이 7시간, 고압 주문의 경우에는 4시간으로, 쇼핑 유무에 따라 작업 시간은 크게 변할 수 있다.

그림 5의 염색체에 따라 작업을 할당하면, 그림 6과 같은 간트 차트를 작성하여 작업완료시간을 계산할 수 있다. 그림 6에서 계산된 작업완료시간을 전체 스케줄링에서의 작업완료 시간 계산을 위한 그림 4에서 사용하게 된다. 작업완료 시간은 사용한 염색기만을 사용하여 계산한다.

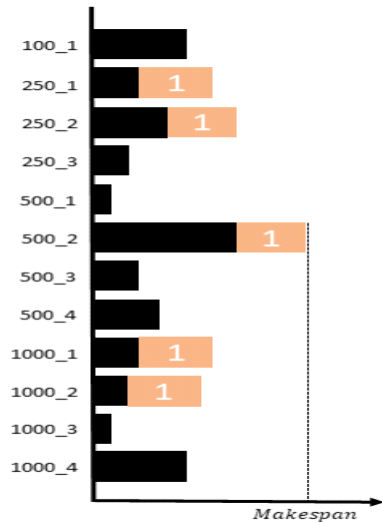


그림 6. 염색 공정의 작업완료시간을 계산하는 간트 차트  
Fig. 6. Gantt Chart for Calculate Dyeing Process Makespan

### V. 유전 알고리즘을 사용한 전체 공정 스케줄링

염색 가공 산업의 전체 공정은 유연제 등의 약품 사용 유무에 따라 작업 준비시간이 달라지는 제약사항과 주문에 따라 수행하는 공정이 이미 결정된 특성

을 가진다. 따라서 유전자는 주문 번호 정보를 가지고 공정 순서 정보 가지지는 않는다. 따라서 유전자의 배치가 바뀌어도 공정 순서가 섞이지 않음으로 다양한 방법의 Crossover와 Mutation 방법을 적용 수 있다. 그림 7은 두 염색체에 대하여 순서 교차의 Crossover를 수행한 결과를 나타낸다.

순서 교차는 임의로 정한 두 개의 자름선 사이의 부분은 첫 번째 염색체의 값을 넣고, 자름 선의 오른쪽 방향으로 첫 번째와 중복되지 않는 두 번째 염색체의 값을 채워 넣는 방식이다. 순서 교차로 생성된 염색체는 동일한 종류의 유전자가 동일한 수로 보존됨으로 이전과 동일하게 스케줄이 주문 처리가 가능하도록 유지됨을 확인할 수 있다.

또한 스케줄링은 공정의 순서 변화에 따라 작업종료시간이 극단적으로 변할 수 있다. 따라서 지역 해를 벗어나기 위한 방법으로 염색체에서 무작위로 선택된 두 유전자의 위치를 바꾸는 Swap 연산을 수행한다. 그림 8은 Swap 연산을 수행하는 과정이다.

전체 공정 스케줄링은 생산성 제고를 위해 작업종료 시간이 가장 짧은 스케줄을 찾는 것을 목표로 한다. 따라서 적합도 계산은 그림 4와 같이 계산된 스케줄 중 마지막 작업이 끝나는 시간을 계산하여 적합도 함수 값으로 사용한다. 종료 조건인 반복 횟수를 충족시키지 못했다면 적합도가 가장 낮은 염색체 다섯 개를 뽑아 새로운 해집합을 생성한 후 Crossover와 Mutation 과정을 반복하면서 최적의 스케줄을 찾아간다.

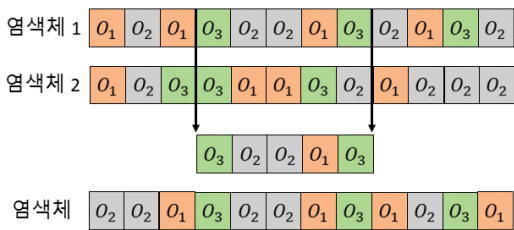


그림 7. 전체 공정 스케줄링을 위한 순서 교차 방법  
Fig. 7. Order Crossover for Total Process Scheduling

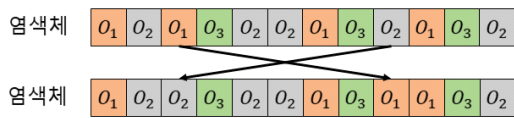


그림 8. 전체 공정 스케줄링을 위한 Mutation 방법  
Fig. 8. Swap Mutation for Total Process Scheduling

## VI. 유전 알고리즘을 사용한 염색 공정 작업 할당

염색 공정은 염색기의 작업 용량이 다양한 특징을 가진다. 또한 균일 염색 품질을 달성하기 위해 적은 수의 염색기를 사용해야 하며, 색상 조건에 따라서 작업 준비시간이 달라지는 제약사항도 존재한다. 따라서 염색 공정 작업 할당을 위한 유전 알고리즘의 유전자는 서로 다른 용량을 가지는 염색기에 할당한 작업의 수로 정의한다. 따라서 염색기의 용량 별로 배치된 유전자의 위치를 고려한 Crossover와 Mutation이 필요하다. Crossover 연산은 Merge, Split 중 한 가지를 선택하여 수행한다.

### 6.1 Merge 연산

염색체에서 각 크기별 염색기에 해당하는 유전자 집합을 무작위로 하나 선택한 후, 합쳐서 더 큰 염색기에 할당할 수 있다면 할당시킨다. 그림 9는 250 크기에 해당하는 유전자 집합 중에서 2개를 선택하여 500 크기에 해당하는 유전자 집합에 할당하는 것을 나타낸다.

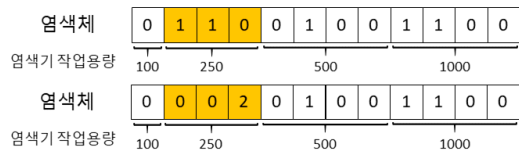


그림 9. Crossover 과정에서의 Merge 연산  
Fig. 9. Merge Computation in Crossover

### 6.2 Split 연산

염색체에서 각 크기별 염색기에 해당하는 유전자 집합을 무작위로 하나 선택한 후, 분할하여 더 작은 염색기에 할당할 수 있으면 할당시킨다. 그림 10은 1000 크기에 해당하는 유전자 집합에서 무작위로 하나를 선택하여 250 크기에 해당하는 유전자 집합에 4개의 작업을 할당하는 것을 나타낸다.

염색 공정 최적 작업 할당을 위한 유전 알고리즘의

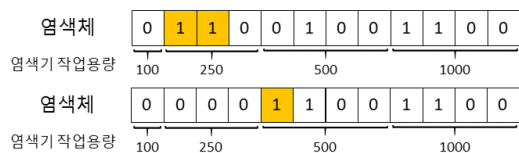


그림 10. Crossover 과정에서의 Split 연산  
Fig. 10. Split Computation in Crossover



Mutation 연산도 유전자의 서로 다른 작업 용량을 고려해야 한다. Mutation은 각 크기별 염색기에 해당하는 유전자의 집합을 무작위로 선택한 후 해당 집합에 속한 숫자를 무작위로 할당하는 연산을 수행한다. 그림 11은 250 크기의 염색기에 해당하는 유전자 집합에 할당된 숫자를 무작위로 다시 할당하는 연산을 수행한 결과다.

마지막으로 유전 알고리즘의 적합도 계산은 염색 공정의 특성을 고려해야 한다. 염색 공정은 병렬 공정임으로 염색 공정이 가급적 비슷한 시간에 마쳐야 다음 공정을 수행하기 위한 대기시간을 줄일 수 있다. 그리고 균일 염색 품질을 달성하기 위해서는 가급적 적은 수의 염색기를 사용해야 하며 염색기 세척 횟수를 최소화 할 수 있는 작업 할당이 이루어 져야 한다. 따라서 적합도 계산 함수는 수식 (2)과 같이 정의된다.

$$\text{Minimize } (1+k)^{\text{WashCount}-1} (1+p)^{n-1} (\sum(ET-MT_i)+1) \tag{2}$$

$k$ : 물 및 약품 사용으로 인한 페널티상수 ( $k > 0$ )  
 $\text{WashCount}$ : 세척횟수,  $p$ : 불량률 ( $0 < p < 1$ )  
 $n$ : 염색 공정에서 사용한 염색기의 수  
 $MT_i$ : 각 염색기의 작업완료 시간  
 $ET$ :  $MT_i$  중 가장 큰 값, 염색공정의 작업완료 시간

염색 공정 최적 작업 할당의 적합도 함수 계산은 염색 공정의 제약사항을 모두 반영한다.  $(1+k)^{\text{WashCount}-1}$ 은 염색기 세척으로 인한 적합도 함수의 변화를 표현한다. 페널티상수  $k$  값과 WashCount 값이 커짐에 따라 적합도 값도 커지게 된다.  $(1+p)^{n-1}$ 은 균일 염색 품질 달성을 위해 적은 수의 염색기를 사용할수록 작은 값을 가진다. 만약 염색기의 불량률이 0%라면 위 식은 항상 1의 값을 가져서 의미가 없다.  $(\sum(ET-MT_i)+1)$ 은 모든 작업이 동일한 시간에 끝날수록 작은 값을 가지게 된다. 만약 이 값이 0이 된다면, 적합도 함수의 값은 다른 식과 관계없이 0의 값을 가지므로, 1을 더한 형태를 가진다.

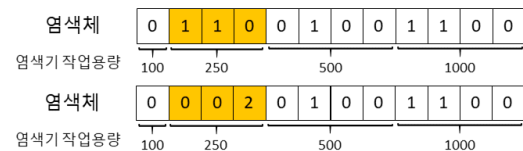


그림 11. Mutation 연산  
Fig. 11. Computation in Mutation

## VII. 구현 및 결론

프로그램의 전체 블록 다이어그램은 그림 12와 같다. 유전 알고리즘의 구현 용이성이라는 장점을 살리기 위해 오픈소스가 잘 구축되어 있는 Python으로 스케줄링 알고리즘을 구현하였다.

전체 스케줄링을 위한 유전 알고리즘의 해집합은 30개의 염색체를 가지고 50번의 세대를 거쳐서 최적 스케줄을 구했고, 염색 공정 작업 할당을 위한 유전 알고리즘은 해집합 30개의 염색체에 대하여 5번의 세대를 거쳐서 최적의 작업 할당을 수행하였다. CPU i7-6700K 4Ghz 1core 환경에서 전체 스케줄링의 1세대 계산에 약 10~15분, 50세대까지는 약 6시간의 시간이 소요되었다. 스케줄링 알고리즘의 효과성을 검증하기 위해 20개의 주문에 대하여 스케줄링 알고리즘의 효과성을 판정하였다. 그 결과 경험 및 지식 기반의 스케줄링은 작업완료까지 232.2 시간이 소요되며, 유전 알고리즘을 사용한 스케줄링 방법을 적용하면 193.33 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

제안한 스케줄링 알고리즘을 도입한 경우 제약사항들을 모두 고려하면서도, 작업완료시간이 약 17% 감소하여 효과적인 스케줄링이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 비교군인 S사의 경우 전체 공정 스케줄링을 작업자의 도메인 지식에 의존하여 수행하고 있는 실정임으로, 염색기공 산업의 복잡한 제약사항을 고려한 스케줄링이라는 부분도 고무적이다.

제시된 스케줄링 알고리즘은 Hybrid Flow Shop Scheduling Problem에 병렬 공정 용량 제약이 추가한 문제를 해결할 수 있다. 알고리즘을 적용하고자 하는 산업의 작업시간과 작업준비시간을 계산하는 방식, 병렬 공정의 용량을 조정한다면 다른 분야에도 해당 알고리즘을 적용할 수 있으리라 기대한다.

본 논문에서는 기존에 연구되지 않았던 용량 제약

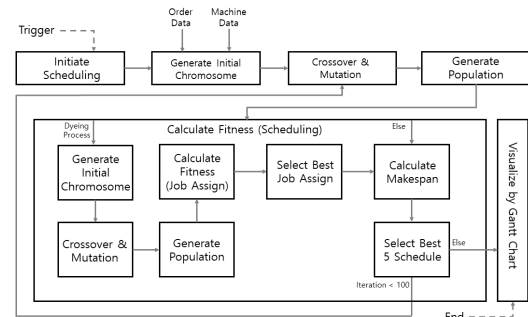


그림 12. 제안 프로그램의 블록 다이어그램  
Fig. 12. Block Diagram of Suggested Program

이 있는 작업 할당과 병렬 공정 스케줄링 문제를 동시에 해결하는 방안으로 두 개의 유전 알고리즘을 적용한 생산 스케줄링 방법을 제안하였다. 추가적으로 실시간 데이터를 연계하여 염색가공 공정의 재스케줄링을 반영하고, 많은 연산을 효과적으로 계산할 수 있는 방법론에 대한 후속 연구가 필요하다.

### References

- [1] J. M. Yu, et al., "Decision tree based scheduling for static and dynamic flexible job shops with multiple process plans," *The Korean Soc. Precision Eng.*, pp. 25-37, Gangwon-do, Korea, Jan. 2015.
- [2] W. S. Yoo, S. J. Kim, and K. H. Kim, "Real-time scheduling scheme based on reinforcement learning considering minimizing setup cost," *Soc. e-Business Stud.*, vol. 25, no. 2, pp. 15-27, May 2020.
- [3] I. A. Chaudhry, "A genetic algorithm approach for process planning and scheduling in job shop environment," *The World Congress on Eng.*, pp. 1433-1437, London, U.K., Jul. 2012.
- [4] S. J. Hwa, et al., "Dispatching for minimizing flow time in nonidentical parallel machines problem with rework," *KIIE*, pp. 492-499, Jung-gu, Korea, Nov. 2010.
- [5] C. M. Joo and B. S. Kim, "Genetic algorithm with an effective dispatching method for unrelated parallel machine scheduling with sequence dependent and machine dependent setup time," *IE Interface*, vol. 25, no. 3, pp. 357-364, Sep. 2012.
- [6] S. H. Kim, Y. S. Yoon, and H. W. Oh, "Job assignment for dyeing machines composed in parallel based on integer programming," *Soc. Computational Design and Eng.*, Aug. 2020.
- [7] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, McGraw Hill, 2015.

### 김 승 현 (Seung-hyeon Kim)



2020년 8월 : 숭실대학교 산업정보시스템공학과 졸업  
 2020년 8월 : 한국전자통신연구원 연구연수생 수료  
 <관심분야> 산업공학, 스케줄링, 최적화, 머신러닝, 스마트 팩토리.

[ORCID:0000-0002-3134-5023]

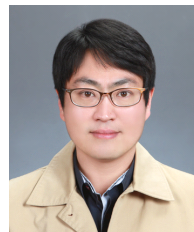
### 박 상 언 (Sang-eon Park)



2016년 3월~현재 : 전남대학교 대학교 전자정보통신공학과 학사과정  
 2020년 8월 : 한국전자통신연구원 연구연수생 수료  
 <관심분야> 전자공학, 머신러닝, 스마트팩토리, 전력공학

[ORCID:0000-0003-1714-5049]

### 윤 영 석 (Young-seog Yoon)



2003년 2월 : 부산대학교 산업공학 졸업(학사)  
 2005년 2월 : 한국과학기술원 IT 경영학 석사  
 2018년 2월 : 한국과학기술원 IT 경영학 박사  
 2015년~현재 : 한국전자통신연구원 지능·제조융합연구실 선임연구원

<관심분야> 빅데이터 분석, 소비자 행동론, 소비자 행동 예측, 토픽 분석

[ORCID:0000-0003-3796-8480]



오 현 우 (Hyun-woo Oh)



1999년 2월 : 아주대학교 정보  
통신공학부 학사

2001년 2월 : 아주대학교 정보  
통신대학원 컴퓨터공학과 석  
사

2011년 2월 : 충남대학교 컴퓨  
터공학과 박사

2001년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 지능화용합  
연구소 지능·제조융합연구실 책임연구원, Project  
Leader

<관심분야> 스마트제조, 웨어러블 디바이스, 소프트  
센서, 상황인지 플랫폼, 실감서비스 플랫폼, Giga  
Korea 서비스 플랫폼, 홈네트워크 시스템, 임베  
디드 시스템

[ORCID:0000-0002-4887-2356]