

## 작업관련성을 고려한 U라인 밸런싱+

김 우 열\*

김 용 주\*

김 동 목\*

### Abstract

본 연구는 U자형 생산라인(U라인)에서의 라인밸런싱 문제를 해결하기 위한 유전알고리즘을 제시한다. U라인에서는 사이클 타임 내에 제품이 들어가는 방향과 나오는 방향의 작업을 한 작업자가 수행 할 수 있어서, 재공품 수량을 일정하게 유지한다거나 작업부하를 평활화 하는 등의 라인관리가 기존 직선라인에 비해 용이하다. U라인은 JIT(Just-In-Time)생산 시스템에서 흔히 볼 수 있다. 본 연구는 U라인에서 사이클 타임이 고정되었을 때 작업장 또는 작업자의 수를 최소로 하면서 동시에 작업장에 할당된 작업들 간의 관련성을 최대화하는 라인밸런싱 문제를 다루었다. 라인밸런싱에 관한 기존 연구는 대부분 직선라인에 관한 것으로 U라인의 장점을 충분히 활용하지 못한다. 특히, 라인의 작업장의 수를 최소화하는 문제는 많은 대안해가 있음에도 불구하고, 작업관련성을 고려하여 해를 구하는 기법에 관한 연구는 아직 미미한 실정이다. 실제 조립라인에서는 가능한 한 관련된 작업들을 동일한 작업자에 할당하는 것이 바람직하며, 이러한 작업편성은 작업자의 작업능률을 향상시킬 수 있다.

유전알고리즘은 자연계의 적자생존과 생물학적 진화과정을 모방한 탐색기법으로 조합최적화 문제에 효과적인 기법으로 널리 알려져 있다. 본 연구는 유전알고리즘을 이용하여 U라인에서 작업관련성을 고려한 라인밸런싱 문제를 해결하기 위한 기법을 개발하였다. 문제의 목적에 적합한 개체의 평가함수가 제시되었으며, 개체의 형질을 효과적으로 자손에 유전할 수 있고 유전 연산이 용이한 개체의 표현방법과 개체의 해석방법이 제시되었다. 컴퓨터 실험을 통하여 개발한 알고리즘의 성능을 보였다.

### 1. 서 론

U자형 생산라인(U라인)은 그림 1과 같이 생산라인이 U자 형태로 구부러져서 제품이 들어가는 부분과 나오는 부분이 만나도록 설계된다. 이러한 형태의 생산라인에서는 가장 숙련된 작업자가 라인의 입·출구의 작업을 수행하면서 라인을 관리한다. U라인은 JIT(Just-In-Time)생산 시스템에서 자주 사용되고 있는데, 이는 U라인이 재공품 수량을 일정하게 유지할 수 있다는 장점과 작업자가 서로 근접하여 작업을 함으로 가시성이 높아 작업자 간의 작업 불균형을 쉽게 파악할 수 있어서 라인관리가 용이하다는 장점을 갖고 있기 때문이다[11].

+ 이 연구는 동신대학교 교내학술연구비(98-0200-09-01-3) 지원으로 수행되었음

\* 동신대학교 산업공학과

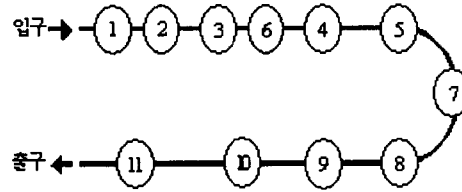


그림 1. U라인의 예

본 연구에서는 U라인의 작업부하 평활화 즉 라인밸런싱(U-line balancing: ULB) 문제를 다룬다. 라인밸런싱 문제는 라인에 부과된 여러 제약들을 어기지 않고 하나 또는 그 이상의 목적들이 최적이 되도록 작업들을 작업장(작업자)에 할당하는 문제이다. 본 연구에서 사이클 타임이 주어질 때 최소의 작업장의 수를 결정하면서 동시에 작업장에 할당된 작업들 간의 관련성을 최대화 하는 U라인 밸런싱 문제를 다루었다.

전통적인 직선 라인 밸런싱 기법에서는 선행 작업이 모두 할당된 작업들 중 하나의 작업을 선택하여 작업장에 할당하는 과정을 반복한다. 반면, U라인에서는 모든 선행 작업들이 할당된 작업뿐만 아니라 모든 후행 작업들이 할당된 작업까지를 할당 가능 작업으로 둔다. 따라서 U라인은 직선라인에 비해 작업할당에 대한 유연성이 높고, 이로 인해 좋은 작업할당이 가능하며, 요구되는 작업장의 수는 직선라인의 그것보다 크지 않다[10]. 또한, 작업장 수를 최소화하는 라인밸런싱 문제는 많은 대안해가 있음에도 불구하고, 작업관련성을 고려하여 해를 구하는 기법에 관한 연구는 아직 미미한 실정이다. 실제 조립라인에서는 가능한 한 관련된 작업들을 동일한 작업자에 할당하는 것이 바람직하며, 이러한 작업편성은 작업자의 작업능률을 향상시킬 수 있다.

ULB문제에 관한 연구는 1994년에 Miltenburg와 Wijngaard[10]에 의해 처음 시작되었다. 그들은 동적계획 모형과 발견적 기법을 제시하였으며, Hwang *et al.*[6]은 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)을 이용하여 라인밸런싱 하였다. 또한 Urban[12]은 정수계획모형을, 김여근 외의 연구[2]에서는 수리 모형과 분지한계법을 제시하였다. 이들 연구에서 라인 밸런싱의 목적은 작업장 수의 최소화로 두었다.

유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 라인밸런싱에 관한 연구로는, Anderson and Ferris[5], Leu *et al.*[9], Kim *et al.*[7,8], 김여근 외의 연구[1] 등이 있다. 그러나 이들 연구는 직선라인의 라인밸런싱 문제를 다루고 있다. 유전알고리즘을 이용한 U라인의 밸런싱에 관한 연구는 김동목[3]의 연구가 있으며, 작업장 수가 주어질 때 작업장간 작업량의 평활성(smoothness)을 최대화하는 문제와 복수 개의 U라인에서의 라인밸런싱 문제를 다루었다.

작업관련성을 고려한 라인밸런싱에 관한 연구로는 Agrawal[4]의 연구가 있는데, 미할당 후행작업이 없는 작업들을 고려해야 하는 U라인에는 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

본 연구의 목적은 U라인에서 사이클타임이 주어질 때 작업관련성을 고려하면서 작업장 수를 최소화 하는 라인밸런싱 문제를 해결하기 위한 유전알고리즘을 개발하는데 있다. U라인에서의 작업관련성을 고려한 개체의 평가함수가 제시되었으며, 개체의 형질을 효과적으로 자손에 유전

할 수 있고 유전 연산이 용이한 개체의 표현방법과 개체의 해석방법이 제시되었다. 컴퓨터 실험을 통하여 개발한 알고리즘의 성능을 보였다.

## 2. 작업관련성을 고려한 U라인 밸런싱

라인에 편성될 작업들 간에는 기술적인 제약으로 인하여 선후행 관계(precedence relationship)가 존재하고, 이는 그림 2와 같은 선행공정도(precedence diagram)로 표현된다. 라인밸런싱은 선후행 관계를 만족하면서 작업장에 작업을 할당하는 것으로, 한 작업장에 할당된 작업시간이 사이클타임을 넘지 않도록 해야 한다.

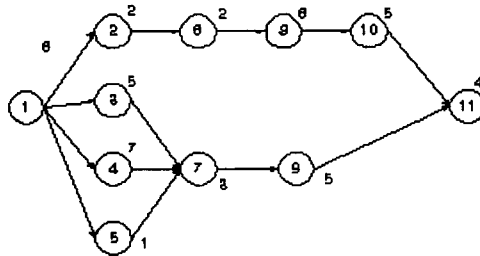


그림 2. 선행공정도

기존 직선라인을 위한 발견적 기법에서는 작업장을 순차적으로 하나씩 추가하면서 작업을 하나씩 할당한다. 선후행 관계를 만족시키기 위하여, 미할당 선행 작업이 없고 작업시간이 작업장의 여유시간(사이클타임 - 할당된 총 작업시간) 보다 크지 않은 작업들을 할당 가능 작업으로 두고, 이들 중 하나를 선택하여 작업장에 할당한다. 다음은 본 연구에서 ULB 설명에 사용된 기호와 직선라인에 적용되는 발견적 기법의 절차이다.

- 
- $n$  : 작업장 수
  - $M$  : 작업 수
  - $CT$  : 사이클 타임
  - $I$  : 작업의 집합  $I=1, \dots, i, \dots, M$ .
  - $J$  : 작업장의 집합  $J=1, \dots, j, \dots, n$ .
  - $t_i$  : 작업  $i$ 의 작업시간.
  - $T_j$  : 작업장  $j$ 의 작업량, 즉 작업장  $j$ 에 할당된 총 작업시간.
  - $ST_j$  : 작업장  $j$ 의 여유시간  $ST_j=CT-T_j$ .
  - $P_i$  : 작업  $i$ 의 미할당 선행 작업들의 집합.
  - $S_i$  : 작업  $i$ 의 미할당 후행 작업들의 집합.
  - $R$  : 할당가능 작업 집합.
  - $L_j$  : 작업장  $j$ 에 포함된 선행공정도에서 연결된 작업 집합의 수.
- 

단계 1:  $j=1$ ;

- 단계 2: 새로운 작업장  $j$ 를 생성하고, 작업장  $j$ 의 여유시간  $ST_j$ 를  $CT$ 로 둔다.
- 단계 3: 할당 가능 작업 집합  $R=\{i \in I \mid P_i=\emptyset \text{ and } t_i \leq ST_j\}$ 을 구한다.
- 단계 4:  $R=\emptyset$ 이면,  $j=j+1$ 로 두고 단계 2로 간다.
- 단계 5:  $R$ 에서 임의 혹은 특정 기준에 따라 작업  $i^* \in R$ 을 선택하여 작업장  $j$ 에 할당하고,  $ST_j=ST_j-t_{i^*}$ 로 둔다.
- 단계 6: 모든 작업이 할당되었으면, 작업장의 수  $n$ 을  $j$ 로 두고 종료한다. 그렇지 않으면, 단계 3으로 간다.

U라인은 그림 1에 나타난 바와 같이 라인이 구부러져 있어서, 입구 쪽에서 들어가는 방향(순방향)의 작업과 출구 쪽으로 나오는 방향(역방향)의 작업을 한 작업장에서 모두 수행할 수 있다. 그림 3은 그림 2의 선후행관계를 갖는 ULB 문제의 해이다. 순방향의 작업 1, 2와 역방향의 작업 11이 모두 작업장 1에 할당되어 있다.

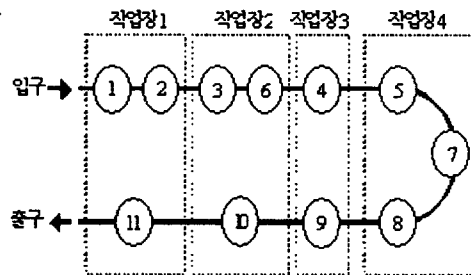


그림 3. U라인의 작업할당 예

U라인에서는 직선라인과는 달리, 작업장에 할당 가능한 작업들의 집합에는 미할당 선행 작업이 없는 작업과 미할당 후행 작업이 없는 작업이 모두 포함되어야 한다. 예를 들면 첫 번째 작업장을 생성하는 시점에서 할당가능 집합에는 선행 작업이 없는 작업 1과 후행작업이 없는 작업 11이 모두 포함된다. 직선 라인에 적용된 발견적 기법은 약간의 수정만으로 U라인에 적용될 수 있는데, 단계 3에서 할당가능 집합을 생성하는 과정에서 미할당 후행작업이 없는 작업들에 포함하면 된다. 단계 3을 ULB에 적합하도록 바꾸면 다음과 같다.

단계 3: 할당가능 작업 집합  $R=\{i \in I \mid (P_i=\emptyset \text{ or } S_i=\emptyset) \text{ and } t_i \leq ST_j\}$ 을 구한다.

발견적 기법 단계 5에서는 할당 가능 작업 집합  $R$ 의 작업 중 하나를 선택하게 되는데, 이 과정에서 어떤 작업을 선택하는가에 따라 라인밸런싱의 해가 결정된다. 직선 라인의 경우 MAXDUR(Maximum Duration), RPW(Maximum Ranked Positional Weight) 등의 할당 규칙들이 개발되었다. 본 연구에서는 유전알고리즘을 이용하여 단계 5에서 적용되는 다양한 형태의 할당 순서를 생성하여 최적해를 탐색하는 방법을 제시하고자 한다.

관련된 작업들을 가능한 한 동일한 작업장에 할당하는 것은 서로 연관된 작업들이 여러 작업장에 분산된 것보다 훨씬 바람직하다. 이것은 작업자들의 작업 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니

라, 조립라인의 설계자에게 설비와 작업장을 배치하는데 있어서 보다 큰 유연성을 제공할 수 있다. 한 작업장에 할당된 작업들 간의 관련성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 척도를 사용하였다.

$$\text{Index of Work Relationship(IWR)} = n/\sum(L_j - u_j),$$

$u_j$  :  $L_j > 1$ 이고 작업장  $j$ 에 순방향 작업과 역방향 작업이 공존하면 1, 그렇지 않으면 0.

제시된 IWR은 각 작업장에 포함된 연결된 작업 집합의 수가 적을수록, 또한 양방향의 작업을 모두 한 작업장에서 수행하면 높은 값을 갖도록 제안되었다. 이는 양방향의 작업을 모두 수행한 경우, 작업관련성이 손상됨을 보상해 주는 역할을 한다.

### 3. U라인 라인밸런싱을 위한 유전알고리즘

#### 3.1 표현

라인밸런싱 문제의 해는 작업들을 작업장에 할당하는 순서에 의해 결정될 수 있고, 특히 작업들 간의 상대적인 할당 순서(relative order)는 문제의 중요한 정보이다. 본 연구에서는 랜덤키 표현을 사용하여 ULB문제의 해를 개체로 표현하였다. 랜덤키 표현에서는 개체의 인자 위치가 작업번호에 해당되며, 인자 값은 0부터 1사이의 실수로서 개체의 할당 순서를 결정하는 값으로 사용된다. 랜덤키 표현은 유전연산자의 개발이 용이하고, 특히 ULB문제의 유전 정보인 작업들 간의 상대적 할당 순서를 크게 파괴시키지 않고 자손에 유전하기 쉽다. 또한, 개체의 해석에 소요되는 계산시간 면에서도 유리하다. 다음은 그림2의 선행공정도를 갖는 ULB 문제의 해를 랜덤키 표현으로 나타낸 예이다.

( 0.31, 0.27, 0.14, 0.95, 0.78, 0.62, 0.44, 0.73, 0.90, 0.48, 0.53 )

랜덤키 형태로 표현된 개체를 ULB 해로 해석하는 방법은 앞에서 제시한 발견적 기법을 조금 수정하면 쉽게 만들어진다. 발견적 기법의 단계 5에서 작업을 선택하는 기준으로 개체의 인자 값을 사용하면 된다. 할당 가능 작업 집합에서 가장 큰 값을 갖는 인자에 해당되는 작업을 작업장에 할당한다. 따라서 개체 해석 방법 단계 5는 다음과 같이 수정되었다.

단계 5:  $R$ 에서 개체의 인자 값이 가장 큰 작업  $i^* \in R$ 을 선택하여 작업장  $j$ 에 할당하고,  $ST_j = ST_j - t_i$ 로 둔다.

위의 예에서 작업 1이 이미 작업장에 할당되어 있고 사이클 타임이 15로 주어진다면, 할당 가능 작업 집합은 2, 3, 4, 5, 11 이다. 이들 중 작업할당 우선순위가 가장 높은 것은 인자 값 0.95를 갖는 작업 4이다.

### 3.2 평가함수와 선별

ULB 문제에서는 작업장 수와 작업관련성이 모두 개체를 평가하는데 반영되어야 한다. 따라서, 작업장 수를 기본 척도로 두고, 작업관련성을 부가적 척도로 두는 평가함수를 본 연구에서 새롭게 개발하였다. 개체  $G$ 에 대한 평가함수  $E(G)$ 는 다음과 같다.

$$E(G)=n+(1-IWR)$$

ULB문제는 최소화 문제이므로  $E(G)$  값이 적을수록 좋은 개체로 평가된다. 평가함수의 두 번째 항은 작업관련성을 나타내는 IWR이 0부터 1사이의 실수이고 클수록 좋은 해로 평가되어야 하므로, 1에 IWR을 뺀 값으로 두었다.

선별(selection)은 개체의 적응도(fitness)에 기초하여 다음 세대에 생존할 개체들을 선택하는 과정이다. 본 연구에서 사용한 선별은 확률바퀴 선별(roulette wheel selection)을 사용하였다.

### 3.3 유전연산자

유전알고리즘에서 유전연산자(genetic operator)는 개체 내에 포함된 해의 결정적인 형질(정보)를 추출하고 다음 세대의 자손에 전파하는 역할을 한다. 또한, 다양한 형질을 생산하는 역할을 한다. 본 연구에서는 교차 유전연산자로 일점교차(one-point crossover)를 사용하였다. 본 연구에서 도입한 랜던키 표현방법에서는 개체의 인자 값이 작업 할당 순서를 결정하기 위한 기준으로 사용되므로, 일점교차에 의해 생산된 자손 개체는 항상 가능해로 해석될 수 있다. 그림 4의 (a)는 두 부모개체 P1과 P2를 일점교차 하여 새로운 자손 개체를 만드는 예이다. 그리고, 돌연변이 방법으로는 돌연변이율에 따라 임의의 개체 인자를 선택하고 0부터 1사이의 임의의 실수로 바꾸는 방법을 사용하였다. 돌연변이 된 인자는 작업 할당의 우선 순위에 변화를 주어 새로운 형질을 생산하게 된다. 이 방법 또한 생산된 개체를 항상 가능해로 유지한다. 그림 4의 (b)는 제안된 돌연변이의 예이다.

P1=	0.31	0.27	0.14	0.95	0.78		0.62	0.44	0.73	0.90	0.48	0.53
P2=	0.53	0.36	0.51	0.13	0.22		0.15	0.92	0.65	0.21	0.16	0.88
O1=	0.31	0.27	0.14	0.95	0.78		0.15	0.92	0.65	0.21	0.16	0.88
O2=	0.53	0.36	0.51	0.13	0.22		0.62	0.44	0.73	0.90	0.48	0.53

(a) 교차(crossover)

P1=	0.31	0.27	0.14	0.95	0.78	0.62	0.44	0.73	0.90	0.48	0.53
O1=	0.31	0.27	0.14	0.95	0.78	0.15	0.44	0.73	0.09	0.48	0.53

(b) 돌연변이(mutation)

그림 4. 유전연산자의 예

#### 4. 실험 및 분석

제안한 유전알고리즘의 성능 분석을 위하여 컴퓨터 실험을 실시하였다. 라인밸런싱의 벤치마크 문제로 널리 알려진 30, 45, 70, 83, 111, 148 개의 작업으로 된 문제에 대해 실험을 실시하였다. 각 실험 문제에 대해 다양한 사이클타임을 설정하여 실험하였다. 실험 결과는 알고리즘을 20회 반복 수행하여 얻은 값을 평균하여 나타냈다.

유전알고리즘을 수행하기 위해서는 모집단의 크기, 교차율, 돌연변이율 등의 유전 파라미터를 결정해야 한다. 유전 파라미터는 알고리즘의 성능에 상당한 영향을 미치지만, 본 연구에서는 기존 연구에서 많이 사용된 범위의 값으로 고정하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 유전파라미터 값으로는 모집단 크기 30, 교차변이율 90%, 돌연변이율 1%이다. 실험결과는 표 1과 같다.

표1. 실험결과

PROB.	C.T.	BEST	WORST	MEAN	S.D.	CPU (sec)
S30	25	14.300	14.3333	14.3067	0.0141	6
S30	27	13.315	13.3810	13.3583	0.0309	6
S30	30	12.200	12.2500	12.2150	0.0242	5
S30	36	10.166	10.1667	10.1667	0.0000	5
S30	41	8.200	8.4667	8.3566	0.0797	6
S30	54	7.125	7.2222	7.1833	0.0502	6
S30	75	5.166	5.2857	5.2143	0.0615	6
K45	57	10.375	10.4444	10.4212	0.0230	6
K45	79	7.500	7.6111	7.5627	0.0350	6
K45	92	6.571	6.6667	6.6176	0.0338	7
K45	110	6.333	6.4545	6.4152	0.0395	6
K45	138	4.333	4.5000	4.4690	0.0562	7
K45	184	3.400	3.5000	3.4900	0.0316	7
T70	176	21.533	21.5714	21.5567	0.0112	9
T70	364	10.642	10.6774	10.6607	0.0113	9
T70	410	9.625	9.6897	9.6668	0.0207	9
T70	468	8.680	8.7037	8.6909	0.0088	8
T70	527	7.666	7.7083	7.6911	0.0130	9
A83	5048	16.200	16.2727	16.2409	0.0267	9
A83	5853	14.176	14.2222	14.1810	0.0145	8
A83	6842	12.200	12.2500	12.2300	0.0258	9
A83	7571	11.153	11.2143	11.1720	0.0292	9
A83	8412	10.090	10.1667	10.1364	0.0391	7
A83	8898	9.100	9.1818	9.1082	0.0259	7
A83	10816	8.111	8.2000	8.1378	0.0429	7
A111	5755	27.625	27.6400	27.6326	0.0042	10
A111	7969	19.786	20.6970	20.5072	0.3799	10
A111	8847	18.700	18.7097	18.7082	0.0033	10
A111	9018	17.673	17.7213	17.7073	0.0140	10
A111	10027	16.709	16.7193	16.7173	0.0036	10
A111	10743	15.666	15.7000	15.6911	0.0095	10
A111	11378	14.641	14.6818	14.6631	0.0123	10
A111	17067	9.666	9.7273	9.6943	0.0233	9
B148	193	27.630	27.6625	27.6509	0.0100	11
B148	238	22.620	22.6615	22.6419	0.0118	12
B148	272	19.716	19.7361	19.7229	0.0071	11
B148	289	18.660	18.6897	18.6812	0.0092	11
B148	306	17.685	17.6964	17.6897	0.0036	11
B148	323	16.709	16.7377	16.7234	0.0082	11
B148	525	10.729	10.7561	10.7466	0.0083	11

#### 4. 결 론

본 연구에서는 U라인에서 작업관련성을 고려한 작업 부하 평활화를 위한 유전알고리즘을 제시하였다. U라인의 특성에 맞는 효율적인 유전알고리즘의 개발을 위하여, 작업장에 할당된 작업 간의 관련성을 고려한 평가함수를 개발하였으며, 작업장에 할당할 작업들의 우선 순위를 개체로 표현하기 위하여 랜덤키 표현 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 실험을 실시하였다. 실험결과, 제안한 알고리즘은 작업장 수의 측면에서 지금까지 직선라인에서 알려진 최적해와 유사한 결과를 얻었으며, 작업관련성이 고려되었다. 제안된 알고리즘은 작업자의 이동시간을 고려한 경우나 특정제약이 추가된 U라인 밸런싱 문제에 쉽게 적용할 수 있을 것으로 보인다.

#### [ 참 고 문 헌 ]

- [1] 김여근, 김용주, 김준혁, 박재승, "양면 조립라인 밸런싱을 위한 유전알고리즘," IE Interfaces, Vol. 12, No. 1, (1999), pp. 132-142.
- [2] 김여근, 김재윤, 김동목, 송원섭, "U라인 라인밸런싱을 위한 분지한계법," 한국경영과학회지, 23권 12호, (1998), pp. 83-101
- [3] 김동목, "U형 생산 라인밸런싱을 위한 효율적인 기법", 전남대학교 박사학위 청구논문, (2000).
- [4] Agrawal, P. K., "The Related activity concept in assembly line balancing", Int. J Prod. Res., Vol 23, (1985), pp. 403-421
- [5] Anderson, E. J. and Ferris, M. C., "Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: the Assembly Line Balancing Problem," ORSAJ. Computing, Vol. 6, (1994), pp. 161-173.
- [6] Hwang, H., Sun, J. U. and Yoon, T. H., "U-line Line Balancing with Simulated Annealing," Proceedings of the First ASIA-PACIFIC Decision Sciences Institute Conference, Hong Kong, (1996), pp.101-108.
- [7] Kim, Y. K., Kim, Y. J. and Cho, Y. K., "A Heuristic-Based Genetic Algorithm for Workload Smoothing in Assembly Lines," Computers and Operations Research, Vol.25, No.2,(1998), pp. 99-111.
- [8] Kim, Y. K., Kim, Y. J. and Kim, Y. H., "Genetic Algorithms for Assembly Line Balancing with Various Objectives," Computers and Industrial Engineering," No.30,(1996), pp. 397-409.
- [9] Leu, Y. Y., Matheson, L. A. and Rees, L. P., "Assembly Line balancing Using genetic Algorithms with Heuristic-Generated Initial Populations and Multiple Evaluation Criteria," Decision Science, Vol. 25, (1994), pp. 581-606.
- [10] Miltenburg, G. J. and Wijngaard, J., "The U-line Line Balancing Problem," Management Science, Vol.40, (1994), pp.1378-1388.
- [11] Monden, Y., Toyota Production System (2nd Ed.), Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, GA, (1993).
- [12] Urban, T. L., "Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines", Management Science, Vol. 44, No. 5, (1998), pp. 738-741.