

# 혼합모델 조립라인의 작업할당과 투입순서 결정을 위한 효율적인 기법

## - An Efficient Algorithm for Balancing and Sequencing of Mixed Model Assembly Lines -

김 동 목 \*

Kim Dong Mook

김 용 주 \*

Kim Yong Ju

이 건 창 \*\*

Lee keon Shang

이 남 석 \*\*

Lee Nam Seok

### Abstract

This paper is concerned with the integrated problem of line balancing and model sequencing in mixed model assembly lines(MMALBS), which is important to efficient utilization of the lines. In the problem, we deal with the objective of minimizing the overall line length To apply the GAs to MMALBS problems, we suggest a GA representation which suitable for its problems, an efficient decoding technique for the objective, and genetic operators which produce feasible offsprings.

Extensive experiments are carried out to analyze the performance of the proposed algorithm. The computational results show that our algorithm is promising in solution quality.

**Keyword: MMALBS, MMAL, Genetic Algorithm, Line Balancing**

### 1. 서 론

본 연구에서는 혼합모델 조립라인(Mixed Model Assembly Line: MMAL)에서의 작업할당과 투입순서 문제를 다룬다.

† 이 연구는 한국산업 기술재단의 지역혁신 인력 양성사업에 의해 연구되었음.

\* 동신대학교 e-비즈니스학과

\*\* 동신대학교 컴퓨터학과

2005년 5월 접수; 2005년 6월 수정본 접수; 2005년 6월 게재 확정

혼합모델 조립라인에서 작업할당(balancing)과 투입순서(sequencing)를 동시에 결정하는 문제(Mixed Model Assembly Line Balancing and sequencing: MMALBS)를 위한 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 개발하여 MMAL의 효율적인 이용을 위해서는 작업자 또는 작업장의 작업량을 균등히 조절하고 제품 모델의 투입 순서를 적절히 결정하여 작업의 혼잡이나 컨베이어의 정지 위험을 줄이는 것이 중요하다

MMAL에서 작업할당과 투입순서는 밀접한 관련성을 갖는다. 그럼에도 불구하고 기존 연구들은 대부분 두 문제를 독립적으로 다루거나, 전통적인 MMAL에 관한 연구이다[2,3,4].

작업할당 문제와 투입순서 문제를 동시에 다룬 연구는 극히 적은 실정이다.

특히 MMAL에서의 작업할당과 투입순서에 관한 유전알고리즘의 연구는 많지 않다. 두 문제를 동시에 해결하기 위한 연구는 현재까지 극히 미미한 실정이다. 이에 관한 연구로는 공생(symbiotic) 진화알고리즘을 이용한 Kim, et al.[3]의 연구와 내공생(endosymbiotic) 진화알고리즘을 이용한 김재윤[11]의 연구가 있다. 이들 연구에서는 작업장에 할당된 작업량 편차를 최소로 하는 즉 작업장간 작업량 평활화를 위한 문제를 다루었다.

본 연구에서는 MMAL에서 작업장 길이를 최소로 하는 작업할당과 투입순서를 동시에 구하는 기법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 유전알고리즘을 사용하였으며, 주어진 문제의 해를 나타내는 개체의 표현방법과 유전연산자를 제안한다. 특히, 효율적인 개체의 해석방법을 새롭게 개발한다. 마지막으로 컴퓨터 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 보인다.

## 2. 혼합모델 조립라인에서 작업할당과 투입순서 문제

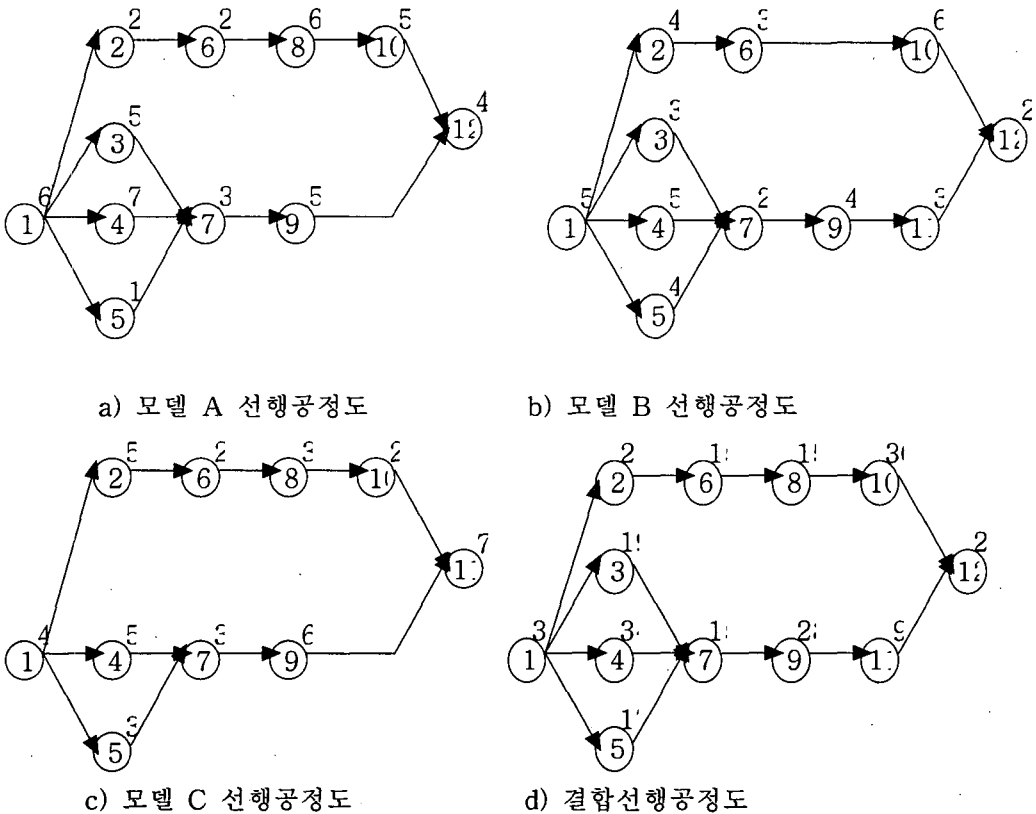
### 2.1 혼합모델 조립라인(MMAL)

MMAL은 일정한 속도로 이동하는 컨베이어 시스템으로 하나의 라인에서 유사한 여러 모델의 제품을 조립하는 생산라인이다. MMAL에서는 재고 비용을 줄이고 수요를 적시에 만족시키기 위하여, 모델의 종류와 양을 평준화하여 골고루 혼류로 생산하는 사이클 생산방식이 흔히 사용된다. MMAL에서는 전체 생산기간동안의 모델별 생산량으로부터 최소부품집합(minimum part set: MPS)을 구하고 이를 정해진 투입순서에 따라 반복 생산하는 사이클 생산을 흔히 사용한다[9]. 예를 들어 A, B, C 3개의 모델의 전체 계획생산량이 각각 100, 150, 50이라면 MPS는 최대공약수 50으로 각각을 나눈 (2,3,1)가 된다. MMAL에서는 이러한 MPS를 반복 생산하여 총 생산량을 만족한다. 사이클 생산 방식에서는 한 사이클에 대한 생산량의 투입순서를 결정하는 문제가 라인의 효율적인 이용을 위하여 중요하고, 이를 위해서는 적절한 작업할당이 선행되어 각 작업장에서의 모델별 작업량이 결정되어야 한다.

### 2.2 MMAL에서의 작업할당과 투입순서 문제

작업할당(task assignment) 문제는 라인밸런싱(line balancing) 문제로 널리 알려져 있으며, 제품 조립에 필요한 작업들을 작업 간의 선, 후행 제약을 어기지 않고 작업장에 균형적으로 할당하는 문제이다.

MMAL에서는 여러 모델을 생산하고 하나의 작업이 모델마다 다를 수 있으므로 흔히 모든 모델의 선행공정도를 결합하여 하나의 공정도로 나타낸 결합선행공정도(combined precedence diagram)를 사용한다. 결합선행공정도에서 한 작업의 작업시간은 MPS 기간 동안 해당 작업의 총 작업시간을 합한 작업시간을 나타낸다. < 그림 1 > 는 모델 A, B, C의 선행공정도와 각 모델의 MPS가 2, 3, 1일 때의 결합선행공정도를 나타낸다.



< 그림 1 > 결합선행공정도

결합 선행공정도는 각 모델에서 수행되는 모든 작업에 대해 동일 작업이 중복되어 나타나지 않도록 하면서 하나의 선행공정도로 나타낸 것이다. 즉, 결합선행공정도상에서

각 노드는 모든 모델 또는 몇 개의 모델에서 공통적으로 수행되는 작업을 나타내거나 또는 어느 특정 모델에서만 수행되는 작업을 나타내기도 한다.

MMAL에서의 투입순서 문제는 MPS 기간 동안 모델들의 투입 순서를 결정하는 문제이다[1]. 투입순서 문제의 목적은 라인길이의 최소화(minimizing the overall line length), 완성시간의 최소화(minimizing the throughput time), 컨베이어의 정지 위험 최소화(minimizing the risk of stopping the conveyor) 등이 있다[6, ..., 10]. 본 연구에서는 라인길이의 최소화를 위한 투입순서 문제를 다룬다. 라인 길이의 최소화는 제품의 투입 간격을 줄여 생산량을 증가시킬 뿐만 아니라 작업자의 여유 시간을 크게 하여 애로 작업으로 인한 작업 지연의 위험을 줄일 수 있다.

MMAL에서는 유사한 여러 모델의 제품들이 일정시간 간격으로 투입(fixed rate launching)되고 있으며 컨베이어의 이동에 따라 작업자가 제품과 함께 이동하면서 작업한다. 라인 길이는 컨베이어의 속도와 제품의 생산순서에 의해 결정되는데, 라인상의 제품간의 거리를 제품투입 시간 간격으로 나누면 컨베이어의 속도가 된다. 본 연구에서는 작업장의 라인길이 계산의 편의를 위해 컨베이어의 속도를 단위시간당 단위거리로 가정하고, 작업자가 다음 제품의 작업을 하기 위하여 돌아오는 시간은 무시하기로 한다.

혼합모델 조립라인에서 사이클 생산에 따른 투입순서를 결정하는 문제는 일종의 순서문제(sequencing problem)이지만 한 사이클 내에서 같은 모델의 제품이 생산될 수 있다. 예를 들면 한 사이클 동안의 생산제품이 모델 A, B, C가 각각 2, 3, 4개일 때 투입순서가 A, C, B, C, B, A, C, C, B인 경우 한 사이클 내에서 같은 모델이 다시 나타나므로, 대표적인 순서문제인 외판원문제와 특성이 다르게 나타난다.

## 2.3 MMAL에서 작업할당과 투입순서를 동시에 다루는 문제

본 연구에서는 MMAL에서 작업장 길이를 최소로 하는 작업할당과 투입순서를 동시에 구하는 기법을 제안하고자 한다. MMAL에서 작업할당과 투입순서는 밀접한 관련성을 갖는다. 투입순서를 결정하기 위해서는 작업할당이 선행되어 각 작업장에서의 모델별 작업량이 결정되어야 한다. 또한 투입순서가 정해져 있을 때, 작업할당을 변경하여 투입순서에 따른 라인 길이를 개선할 수 있다.

제안된 기법에서는 작업장 수가 고정된 라인에서 전체 라인 길이의 최소화를 작업할당과 투입순서 문제의 공통된 목적으로 두었다. 단일 모델만을 생산하는 단일모델조립라인에서는 흔히 사이클 타임의 제약 하에 작업장의 수를 최소화하거나 작업장 수를 고정하고 사이클 타임의 최소화를 하는 것을 작업할당의 목적으로 사용한다. 반면, MMAL에서는 사이클 타임이 작업할당의 기준은 되지만 강한 제약으로 작용하지 않는다. 즉, 작업자가 특정 모델의 작업을 사이클 타임(투입 간격) 이내에 반드시 끝내야 되는 것은 아니다. 또한, 라인 길이의 최소화는 각 작업자의 작업 시간을 줄이는 효과가 있어서 작업장의 작업량을 균형화 하는 효과가 있다.

### 3. MMALBS를 위한 유전 알고리즘

#### 3.1 표현과 초기 모집단

본 연구에서는 랜덤키(random key) 표현을 사용하여 해를 표현하였다. 랜덤키 표현은 개체의 요소를 임의의 수로 두는 방법으로 순열(permutation) 표현과 함께 순서를 표현하는데 사용되는 방법이다. 순열 표현에 비해 전통적인 1점 교차(one point crossover)나 2점 교차(two point crossover) 등의 유전연산자의 적용이 용이하다.

제안된 표현에서 개체는 작업할당의 해를 나타내는 부분과 투입순서를 나타내는 두 부분으로 나누어진다. 작업 활동은 1부터 M까지의 요소로 표현되며, 투입순서는 M+1부터 M+K까지의 요소로 표현된다. 첫 번째 부분의 i번째 요소는 작업 i의 작업할당 우선순위를 나타내며, 두 번째 부분의 k 번째 요소는 MPS기간 동안 k 번째 투입모델의 투입 우선순위를 나타낸다. 개체의 모든 요소는 0부터 1까지의 실수로 표현한다. < 그림 2 >는 3개의 모델에 대한 MPS가 (2,3,1) 이고, 각 모델의 작업 내용이 < 그림 1 >와 같을 때, 제안된 표현으로 나타낸 개체의 예이다. 앞부분의 12개 요소는 작업할당을 나타내며, 뒤 부분의 6개 요소는 투입순서를 나타낸다.

0.1	0.3	0.4	0.7	0.6	0.5	0.3	0.9	0.8	0.1	0.3	0.2	0.2	0.9	0.4	0.1	0.7	0.3
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

< 그림 2 > 표현의 예

제안된 표현으로 생성된 개체를 평가하기 위해서는 이를 문제의 해로 해석해야 한다. 다음은 본 연구에서 개체를 해석하기 위하여 사용된 기호이다.

$N$  : 작업장의 수.

$M$  : 총 작업 수.

$K$  : 모델의 수.

$I$  : 작업의 집합.

$J$  : 작업장 집합.

$t_{ki}$  : 모델 k의 작업 i의 총 작업시간.

$\hat{t}_i$  : MPS기간 동안 작업 i의 총 작업시간.

$T_j$  : MPS기간 동안 작업장 j에 할당된 총 작업시간.

$\bar{T}$  : MPS기간 동안 작업장에 할당된 작업시간의 평균,  $\sum_{j=1}^N T_j / N$

$P_i$  : 작업 i의 미할당 선행 작업들의 집합.

$R$  : 할당 가능 작업 집합.

먼저, 작업할당 부분을 해석한다. 이를 위한 절차는 다음과 같다.

단계 1 : 작업장의 작업량의 상한(BT)을  $BT = \overline{T}$ 로 두고, 작업장  $j=1$ 을 생성한다.

단계 2 : 모든 작업을 할당할 때까지 단계 3과 4를 반복한다.

단계 3 :  $j < N$ 이면,  $R = \{ i \in I \mid P_i = \phi \text{ and } \hat{t}_i \leq BT - T_j \}$

$j = N$ 이면,  $R = \{ i \in I \mid P_i = \phi \}$  구한다.

단계 4 :  $R = \phi$ 이면, 새로운 작업장  $j=j+1$ 을 생성하고 단계 3으로 간다. 그렇지 않으면,  $R$ 에 속한 작업 중 개체의 요소 값이 가장 작은 작업을 작업장에 할당한다.

단계 5 :  $BT = \min_{j=1, \dots, n} T_j^+$  구한다.

$T_j^+$ 는 작업장  $j$ 에 할당된 총 작업시간에  $j+1$ 번째 작업장에 할당된 첫 번째 작업의 작업 시간을 더한 값이다.  $T_N \leq BT$ 이면 종료하고, 그렇지 않으면, 단계 2로 간다.

MMAL에서 모델별 선행제약이 < 그림 1 >과 같고 MPS가 (2, 3, 1)일 때 작업장이 4개이면, < 그림 2 >에 나타난 개체의 작업할당은 다음과 같이 해석된다.

단계 1:  $BT = 255/4 = 63.8$ 로 두고,  $j = 1$ .

단계 2:

$j$	$BT - T_j$	$R$	요소값	$i^*$	할당	$T_j$
1	63.8	{1}	{0.1}	1	{1}	31
1	32.8	{2, 3, 5}	{0.3, 0.4, 0.6}	2	{1,2}	52
2	63.8	{3, 4, 5, 6}	{0.4, 0.7, 0.6, 0.5}	3	{3}	19
2	44.8	{4, 5, 6}	{0.7, 0.6, 0.5}	6	{3, 6}	34
2	29.8	{5, 8}	{0.6, 0.9}	5	{3, 6, 5}	51
3	63.8	{4, 8}	{0.7, 0.9}	4	{4}	34
3	29.8	{7, 8}	{0.3, 0.9}	7	{4, 7}	49
4	63.8	{8, 9}	{0.9, 0.8}	9	{9}	28
4		{8, 11}	{0.9, 0.3}	11	{9, 11}	37
4		{8}	{0.9}	8	{9, 11, 8}	52
4		{10}	{0.1}	10	{9, 11, 8, 10}	82
4		{12}	{0.9}	12	{9, 11, 8, 10, 12}	103

단계 5:  $T_4 = 103$ ,  $T_j^+ = \{71=52+19, 85=51+34, 77=49+28\}$ 이므로,  $BT=71$ .

단계 2:

$j$	$BT-T_j$	$R$	요소값	$i^*$	할당	$T_j$
1	71	{1}	{0.1}	1	{1}	31
1	40	{2, 3, 4, 5}	{0.3, 0.4, 0.7, 0.6}	2	{1, 2}	52
1	19	{3, 5, 6}	{0.4, 0.6, 0.5}	3	{1, 2, 3}	71
2	71	{4, 5, 6}	{0.7, 0.6, 0.5}	6	{6}	15
2	56	{4, 5, 8}	{0.7, 0.6, 0.9}	5	{6, 5}	32
2	39	{4, 8}	{0.7, 0.9}	4	{6, 5, 4}	66
3	71	{7, 8}	{0.3, 0.9}	7	{7}	15
3	56	{8, 9}	{0.9, 0.8}	9	{7, 9}	43
3	28	{8, 11}	{0.9, 0.3}	11	{7, 9, 11}	52
3	19	{8}	{0.9}	8	{7, 9, 11, 8}	67
4		{10}	{0.1}	10	{10}	30
4		{12}	{0.9}	12	{10, 12}	51

단계 5:  $T_4 = 51$ ,  $T_j^+ = \{86=71+15, 81=66+15, 97=67+30\}$ ,  $BT=81$ 이다.  $T_4 < BT$ 이므로, 개체의 작업할당 부분의 해석을 마친다. 그 결과, 각 작업장에는 {1, 2, 3}, {6, 5, 4}, {7, 9, 11, 8}, {10, 12}의 작업이 할당된다.

개체의 투입순서 부분의 해석은 투입될 모델의 제품을 차례로 나열하고, 개체의 요소 값이 작은 것부터 차례로 투입한다고 해석한다. < 그림 2 >에 나타난 개체의 투입순서 부분을 해석해 보자, MPS기간 동안 투입될 모델의 제품을 차례로 나열하면 AABBBBC이 된다. 개체의 투입순서 부분에서 가장 작은 값은 0.1로 4번째 제품이므로 B가 되고, 그 다음은 1번째 제품인 A가 된다. 이와 같은 방법으로 모두 나열하면, 투입순서는 BACBBA로 해석된다.

초기 모집단을 만드는 방법에는 경험적(heuristic) 탐색 절차를 사용하는 방법과 임의의 가능해를 사용하는 방법이 있으나, 본 연구에서는 임의의 해를 발생시켜 초기 모집단을 구성하였다. 경험적 탐색 절차를 이용할 경우 좋은 해의 탐색 속도가 향상되지만, 조기 수렴할 수 있기 때문이다.





본 연구에서는 유전알고리즘의 평가함수로 문제의 목적함수인 작업할당과 제품모델의 투입순서에 따른 모든 작업장의 길이 합한 라인길이를 사용하였다.

선별방법으로는 수레바퀴(roulette wheel) 방법, 토너먼트 방법 등 있는데, 본 연구에서는 수레바퀴방법을 사용하였다[5].

#### 4. 실험

제안된 알고리즘의 성능을 보이기 위하여, 컴퓨터 실험을 실시하였다. 실험 대상문제는 김재윤[11]의 연구에서 실험되었던 문제를 사용하였다. 작업이 19개인 문제(T19), 61개인 문제(K61), 111개인 문제(A111)에 MPS를 각각 ( 2, 3, 1 ), ( 3, 1, 4, 2 ), ( 3, 1, 4, 2, 3 )인 문제를 대상으로 실험하였다. 각 문제에 여러 작업장의 수에 대해 실험하였다.

실험에서 유전 파라미터는 예비 실험을 통하여, 각 문제에 대해 < 표 1 >과 같이 설정하였고, < 표 2 >은 각 문제에 대해 30회 반복 실험한 결과로서, 첫 번째 열은 문제 이름, 두 번째 열은 작업장의 수, 세 번째부터 마지막까지의 열은 구해진 해의 라인길이의 평균과 가장 좋은 해와 가장 나쁜 해, 그리고 표준편차를 보여준다. 평균에 비해 표준편차가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이로써 제안된 알고리즘이 안정적으로 좋은 해를 탐색하는 것으로 보인다. 본 연구에서 다루는 라인길이 최소화를 위한 작업할당과 투입순서를 동시에 고려한 기존 연구는 아직까지 없으므로, 다른 연구와의 비교 분석을 보일 수 없었다.

< 표 1 > 유전파라미터

문제	모집단 크기	교차율	돌연변이율
T19	10	0.9	0.10
K61	30	0.8	0.10
A111	50	0.8	0.15

&lt; 표 2 &gt; 제안된 알고리즘의 성능

problem	N	mean	best	worst	s.d.
T19	4	7.20	7.20	7.20	0.0046
T19	5	7.20	7.20	7.20	0.0046
K61	6	103.00	102.52	103.45	0.2961
K61	7	104.66	102.88	105.62	0.6978
K61	8	105.59	102.91	107.18	1.1583
A111	15	155449.83	153361.84	158065.56	1252.1982
A111	20	163595.67	161534.61	166760.78	1352.7463
A111	25	189929.42	184402.44	194484.61	3394.6634

## 5. 결론

본 연구에서는 혼합모델 조립라인에서 작업할당과 투입순서 문제를 동시에 해결하기 위한 유전알고리즘이 제안되었다. 투입순서 문제뿐만 아니라 작업할당 문제의 목적으로 라인 길이의 최소화를 제안하였으며, 라인 길이의 최소화는 사이클 타임을 줄여 작업장의 작업량을 균등하게 하는 효과를 기대할 수 있다. 주어진 문제를 효과적으로 해결하기 위한 유전알고리즘이 제안되었다. 유전알고리즘의 표현 방법으로는 랜덤키 표현이 사용되었고, 이를 위한 효율적인 개체의 해석법이 새롭게 개발되었다. 제안된 알고리즘의 성능을 보이기 컴퓨터 실험을 실시하였으며, 실험 결과 제안된 알고리즘은 최적해에 근사한 좋은 해를 안정적으로 탐색함을 보였다. 본 연구에서 다루는 라인길이 최소화를 위한 작업할당과 투입순서를 동시에 고려한 기존 연구는 아직까지 없으므로, 다른 연구와의 해의 성능 비교 분석을 보일 수 없었다.

유전알고리즘의 한 장점은 최적화 문제에서 목적함수와 제약식의 변화에 유연하다는 것이다. 따라서 제안한 알고리즘은 특정제약이 추가된 혼합모델 조립라인의 밸런싱 문제에 쉽게 적용할 수 있다. 또한 본 연구에서 제안한 기법은 효율적이고 합리적인 작업편성으로 조립라인의 균형효율을 높여 생산율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] Bard, J. F., Dar-El, E. M., and Shtub, A, "An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines," *Int. J. Prod. Res.*, 30 (1992): 35-48
- [2] Kilbridge, M. D. and Wester, L., "The assembly line model-mix sequencing problem," *Proc. 3rd Int. Conf. Op. Res.*, Oslo, Paris: English Universities Press, (1963): 247-260 .
- [3] Kim, Y. K., Hyun, C. J., and Kim, Y. H., "Sequencing in mixed model assembly lines: A genetic algorithm approach," *Computer & O. R.*, 23, (1996): 1131-1145 .
- [4] Macaskill, J. L. C., "Production line balances for mixed model lines," *Management Science*, 19, (1972): 423-434 .
- [5] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, 2<sup>nd</sup> edn., Springer-Verlag, (1994).
- [6] Okamura, K. and Yamashina, H., "A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor," *Int. J. Prod. Res.*, 17,(1979): 233-247.
- [7] Talbot, F. B., Patterson, J. H., and Gehrlein, W. B., "A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques," *Management Science*, 32,(1986): 430-454 .
- [8] Thomopoulos, N. T., "Line balancing for mixed-model assembly," *Management Science*, 14, (1967): 59-75 .
- [9] Thomopoulos, N. T., "Mixed model line balancing with smoothed station assignments," *Management Science*, 16, (1970): 593-603 .
- [10] Tsai, L., "Mixed model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage," *Management Science*, 41,(1995): 485-495 .
- [11] 김재윤, 김여근, "진화알고리즘을 이용한 혼합모델 U라인의 작업할당과 투입순서결정", 대한산업공학회 / 한국경영과학회 춘계공동학술대회, 한국과학기술원 대덕캠퍼스 (2002).

## 저 자 소 개

김 동 목 : 현 동신대학교 e-비즈니스학과 교수, 동국대학교 공업경영학과 학사, 한국과학기술원 산업공학과 석사, 전남대학교 산업공학과 박사, 관심분야는 Genetic Algorithm의 응용 및 확장 조립라인의 설계 및 분석, 경제성공학, 연구개발관리

김 용 주 : 현 동신대학교 e-비즈니스학과 겸임교수, 전남대학교 학사, 석사, 박사. 관심분야는 생산공학 Genetic Algorithm의 응용 및 확장

이 헌 창 : 현 동신대학교 컴퓨터학과 교수, 동국대학교 수학과 박사. 관심분야는 함수 해석학, 퍼지이론

이 남 석 : 현 동신대학교 컴퓨터학과 박사과정, 동신대학교 산업공학과 석사. 관심분야는 경제성공학, Genetic Algorithm의 응용 및 확장