

☒ 응용논문

혼합작업장을 고려한 혼합모델 조립라인의
투입순서결정에 관한 탐색적기법***
Heuristics Method for Sequencing Mixed Model
Assembly Lines with Hybridworkstation

김 정자*
Kim, Jung Ja
김 상천**
Kim, Sang Cheon
공 명달**
Kong, Myung Dal

Abstract

Actually mixed assembly line is mixed with open and close type workstation. This workstation is called hybridworkstation. The propose of this paper is to determine the sequencing of model that minimize line length for actual(hybridworkstation) mixed model assembly line.

we developed three mathematical formulation of the problem to minimize the overall length of a line with hybrid station. Mathematical formulation classified model by operato schedule.

Mixed model assembly line is combination program and NP-hard program. Thus computation time is often a critical factor in choosing a method of determining the sequence. This study suggests a tabu search technique which can provide a near optimal solution in real time and use the hill climbing heuristic method for selecting initial solution. Modified tabu search method is compared with MIP(Mixed Integer Program). Numerical results are reported to demonstrate the efficiency of the method.

I. 서 론

오늘날 소비자의 다양한 요구에 적응하기 위해 생산형태가 다품종 소량생산체제로 바뀌어가고, 이에 따라 혼합모델조립라인의 연구도 활발히 진행되고 있다[1][2][3]. 혼합모델 조립라인(assembly line)은 하나의 생산라인에서 유사한 여러 가지 제품을 생산하는 것이며 생산제품의 특성과 크기에 따라 각각의 라인에서 여러 종류의 제품들을 생산하는 자동차조립라인이 그 대표적인 예이다. 조립라인은 재고비용을 줄이고 수요를 적시에 만족시키기 위하여 모델의 종류

* 동아대학교 산업공학과 교수

** 동아대학교 산업공학과 대학원

*** 이논문은 1997년 동아대학교 학술연구 조성비(일반과제)에 의하여 연구 되었음

와 양을 균형 있게 생산하는 사이클 생산방식을 택하는 경우가 많다[4]. 사이클 생산 방식은 모델별로 생산량과, 작업내용, 작업방법 및 작업시간 등이 각각 상이할 뿐 아니라 모델의 제품 생산의 순서에 따라 준비시간 등이 서로 다르기 때문에 생산계획과 통제가 복잡할 수 있다. 이러한 복잡성 때문에 작업자를 과잉 투입하거나 설비 및 공구의 낭비를 초래하고 작업장의 길이를 필요이상으로 길게 할 수 있다.[5] 이런 문제점을 해결하고 라인을 효율적으로 이용하기 위해 제품의 생산순서(Sequencing)결정 문제는 중요하게 다루어져야 한다. 또한 혼합모델 조립라인의 제품순서문제는 조합 최적화 문제로 NP-hard 문제이다. NP-hard 문제에 대한 최적의 생산순서를 얻기 위해서는 많은 시간과 비용이 들기 때문에 실제 현장에서는 수요의 변화, 결품으로 인한 생산순서 재결정시에는 실시간 처리 맞는 제품생산 순서를 결정해야한다. 따라서 본 연구는 실제 현장의 작업장 구성과 같이 작업장이 혼합(Hybrid)된 경우 라인의 길이를 최소화하는 수리적 모형을 제시하고 Tabu search 기법을 이용하여 실시간 처리에 맞는 제품생산 순서를 구하고자 한다.

혼합모델 조립라인의 제품투입순서에 관한 연구는 Kilbridge와 Wester[6]에 의해 1963년 처음으로 발표된 이후 라인의 길이(Line length)의 최소화, 완성시간(Throughput time)의 최소화, 컨베이어 정지위험의 최소화, 총 가외작업(Utility work)의 최소화 등 다양한 목적에 대해 여러 가지 연구가 이루어 졌다. Okamura와 Yamashita[7]는 컨베이어의 정지위험을 최소로 하는 투입순서에 관한 연구로 모델의 순서를 서로 교환하거나 삽입하는 방법을 제시하였고 Dar-el과 Cloth[8]는 전체의 라인의 길이를 최소로 하는 투입순서를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. Dar-el과 Nadivi[6]는 전화교환기 조립라인에서 제품 투입순서 결정문제와 라인밸런싱 대하여 연구하였고 Boalt et al[10]은 준비 비용(setup cost)과 가외 작업비용(utility work cost)을 최소화하는 수리적 모형과 발견적 기법을 제시하였고 Belarmino[11]는 flow shop문제에 Tabu search를 적용하여 이웃해의 집합을 줄이는 방법을 제시하였고 Bertly[12]는 일정계획 문제를 대상으로 Tabu search기법을 타기법들과 비교분석하였다. Tabu search의 이론적 연구로는 이웃해의 생성방법, 해의 순환을 막는 방법, Tabu목록 관리방법, 종료조건 선정의 연구가 이루어졌다. 따라서 본 연구는 실제 현장의 작업장 구성과 같이 작업장이 혼합(Hybrid)된 경우 라인의 길이를 최소화하는 수리적 모형을 제시하여 라인의 길이를 최소화하는 최적의 제품생산 순서를 구하고 작업장이 확장된 경우 Tabu search 기법을 이용하여 실시간 처리에 맞는 제품 생산 순서를 구하고자 한다.

II. 수리모형화

실제 현장 작업장의 구성과 같이 개방작업장과 폐쇄 작업장이 혼합된 경우 라인의 길이를 최소화하는 수리적모형은 작업자의 작업 방식에 따라 세 종류로 구분되는데 첫 번째는 작업자의 작업계획이 이른 작업시작인 경우와 두 번째는 작업자의 작업계획이 늦은 작업계획일 때이고 세 번째로는 작업자의 작업계획이 혼합된 경우이다.

2.1 기호

지표(Index)

i = 투입제품의 순서의 위치 ; $i = 1, \dots, I$

j = 작업장 ; $j = 1, \dots, J$

m = 제품 모델의 종류 ; $m = 1, \dots, M$

입력자료(Input data)

v_c = 컨베이어의 속도 d_m = 모델 m 의 수요

t_{jm} = 작업장 j 에서 모델 m 의 조립시간

J = 작업장의 수 M = 모델의 수

w = 투입간격

$\beta_j = 1$, 작업장 j 와 $j+1$ 이 개방작업장인 경우

= 0, 그 외의 경우

I = 조립해야 할 제품의 수 ; $I = \sum_{m=1}^M d_m$

의사결정 변수(Decision variable)

$X_{im} = 1$, 제품모델이 투입순서 i 번째 위치에 있는 경우

= 0, 그 외의 경우

Y_j = 작업장 j 의 라인의 길이 Z_{ij} = 작업장 j 에 i 번째 제품의 작업시작위치

S_{ij} = 작업장 j 와 $j+1$ 가 개방작업장인 경우 i 번째 제품의 작업시작위치

E_{ij} = 이른 작업시작인 작업장 j 에 i 번째 제품의 작업시작위치

L_{ij} = 늦은 작업시작인 작업장 j 에 i 번째 제품의 작업시작위치

2. 2 수리모형¹³⁾

혼합작업장, 이른 작업시작(Hybrid station, Early start)

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J Y_j - \sum_{j=1}^{j-1} \beta_j Y_j \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{m=1}^M X_{im} = 1, \quad \text{for all } i \quad (2) \quad \sum_{i=1}^I X_{im} = d_m, \quad \text{for all } m \quad (3)$$

$$Z_{i+1,j} \geq Z_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm} - w \quad \text{for all } i, j \quad (4) \quad Y_j \geq Z_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \quad \text{for all } i, j \quad (5)$$

$$S_{i,j+1} \geq S_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \quad \text{for all } i, j \quad (6) \quad X_{im} \in \{0,1\}, Y_j \geq 0, Z_{ij} = 0, \quad \text{for all } i, j \quad (7)$$

먼저 작업장이 혼합된 경우중 작업시작이 이른 작업시작 (Early start)인 경우를 수식화 하였다. 식(1)은 혼합모델 조립라인의 라인길이를 최소화하는 것을 목적으로 하는 것으로 현재 작업장의 앞뒤 작업장이 폐쇄 작업장이면 개방작업장이 폐쇄작업장과 같이 취급되고 개방작업장이 연속적인 경우에는 연속되는 마지막 작업장의 라인길이만 구하면 된다. 식(2)는 한 위치에 투입되는 제품이 하나만 있어야 한다는 제약식이고 식(3)은 MPS 수요 제약식이며 식(4)는 작업자의 작업시작위치를 제약식으로서 w 는 작업자가 다음작업을 위해 이동하는 거리를 의미하는 것으로 만약 부등호를 기준으로 우변이 음수의 값을 가지면 작업자는 음수의 값만큼 유휴시간(Idle time)을 가진다. 하지만 위 모형은 이른 작업시작이기 때문에 유휴시간을 인정하지 않으므로 유휴시간이 발생하더라도 작업의 시작은 항상 작업장의 시작위치이다. 식(5)는 각 작업장의 길이는 모든 제품의 작업종료의 위치보다는 같거나 크다는 제약식을 의미하며 식(6)은 개방작업장이 연속적인 경우 작업장을 누적시킨다는 제약식으로 식(6) 때문에 연속된 개방작업장은 작업장 각각의 길이를 구하는 것이 아니고 개방작업장이 연속되는 마지막 작업장의 길이만 구하면 된다. 식(7)은 비음제약로서 본 모형은 이른 작업시작이므로 작업시작은 작업장이 시작하는 위치이다.

혼합 작업장, 늦은 작업시작(Hybrid station, Late start)

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J Y_j - \sum_{j=1}^{J-1} \beta_j Y_j \tag{8}$$

subject to

$$\sum_{m=1}^M X_{im} = 1, \text{ for all } i \tag{9} \quad \sum_{i=1}^I X_{im} = d_m, \text{ for all } m \tag{10}$$

$$Z_{i+1,j} = Z_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm} - w, \text{ for all } i, j \tag{11} \quad Y_j \geq Z_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \text{ for all } i, j \tag{12}$$

$$S_{i,j+1} \geq S_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \text{ for all } i, j \tag{13} \quad X_{im} \in \{0,1\}, Y_j \geq 0, Z_{ij} \geq 0, \text{ for all } i, j \tag{14}$$

두 번째로는 작업장이 혼합된 경우 중 작업시작이 늦은 작업시작(Late start)인 경우를 수식화 하였다. 늦은 작업시작(LC)과 이른 작업장의 차이점은 앞서도 언급한 바와 같이 유희시간의 문제이다. 늦은 작업시작은 이른 작업시작과 달리 유희시간을 인정함으로써 작업시작이 유희시간 발생된 만큼 작업장에서 떨어져 작업을 시작하다 즉 만약 첫 번째 작업장에서 유희시간이 5 단위 만큼 발생하면 첫 번째 작업의 시작은 5 단위 일 것이다. 늦은 작업시작의 경우에 식(8) (9) (10) (13)은 앞의 이른 작업시작과 같고 식(4)는 작업자의 유희시간이 발생하지 않으므로 작업자는 쉬지 않고 계속해서 작업을 해야하므로 식(11)로 변환되었다. 그리고 늦은 작업의 시작인 경우에는 작업장의 시작위치가 작업장의 시작점이 아니기 때문에 식(7)은 식(14)로 변환되었다.

혼합 작업장, 혼합된 작업시작(Hybrid station, Hybrid start)

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J Y_j - \sum_{j=1}^{J-1} \beta_j Y_j \tag{15}$$

subject to

$$\sum_{i=1}^I X_{im} = d_m, \text{ for all } m \tag{16} \quad E_{i+1,j} \geq E_{i,j} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm} - w, \text{ for all } i, j \tag{17}$$

$$L_{i+1,j} = L_{i,j} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm} - w, \text{ for all } i, j \tag{18} \quad Y_j \geq Z_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \text{ for all } i, j \tag{19}$$

$$S_{i,j+1} \geq S_{ij} + \sum_{m=1}^M X_{im} \cdot t_{jm}, \text{ for all } i, j \tag{20} \quad X_{im} \in \{0,1\}, Y_j \geq 0, \text{ for all } i, j \tag{21}$$

세 번째로는 작업장과 작업계획이 동시에 혼합된 경우를 수식화 하였다. 이 수리적 모형은 앞의 모형과 달리 작업자의 시작위치를 이른 작업시작과 늦은 작업시작으로 구분하여 이른 작업시작 일때는 식(17)을 따르고 늦은 작업시작일 경우에는 식(18)을 따르며 나머지 식들은 모형2와 동일하다.

2. 3 수치예

이 장에서는 본 연구에서 제시한 수리적 모형과 작업장이 혼합된 경우에 범례모형(Prototype)¹³⁾을 수치 예로 비교 분석하여 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성을 검증하고 범례모형에서 라인의 길이를 구할 수 없는 경우의 수치 예를 들어서 라인의 길이를 최소화하는 최적의 투입순서를 구하고자 한다. 먼저 두 가지 모형을 비교 분석하기 위해 예를 이용하기로 한다.

작업장의 수 : $J = 4$ 모델의 수 : $M = 3$
 모델의 수요 : $d = (5 , 3 , 2)$ 컨베이어 속도 : $v_c = 1$
 제품 투입의 개수 : $I = 10$ 제품 투입간격 : $w = 6$
 각 모델의 각 작업장에서의 작업시간 :
 $t_{1m} = (4 , 8 , 7)$, $t_{2m} = (6 , 9 , 4)$,
 $t_{3m} = (8 , 6 , 6)$, $t_{4m} = (4 , 7 , 5)$

작업장의 구성

- 작업장 1 : 개방 작업장 (Open station)
- 작업장 2 : 폐쇄 작업장 (Closed station)
- 작업장 3 : 개방 작업장 (Open station)
- 작업장 4 : 개방 작업장 (Open station)

2. 3. 1 결 과

작업장이 혼합 되었을때 최적의 투입순서를 얻기 위해 사용된 소프트웨어는 Lindo를 사용하였으며 사용된 컴퓨터는 Pentium 166MHZ 였다. 모든 결과의 실행시간은 5초를 넘지 않았다.

<Table 1>은 범례모형(Prototype)과 본 연구에서 제시한 작업장이 혼합된 경우에 라인의 길이를 최소화시키는 일반화된 수리 모형을 서로 비교하고 있다. Table 1결과를 살펴보면 범례 모형은 작업장이 혼합된 경우에 작업계획이 이른 작업시작일 때 40의 라인의 길이를 얻었고 늦은 작업계획 경우에 48의 라인의 길이를 얻었다. 그리고 일반화된 수식에서도 이른 작업시작 경우는 40의 라인의 길이를 얻었고 늦은 작업시작일 경우는 48의 라인의 길이를 얻었다. 그리고 제품 투입순서를 보면 이른 작업시작인 경우에는 범례모형과 일반화된 모형은 똑같은 결과를 얻지만 늦은 작업시작일 때는 제품투입순서가 서로 다름을 알 수 있다. 이는 늦은 작업시작인 경우의 라인의 길이를 최소화하는 최적투입순서의 최적해는 한가지가 아니라 다중 최적해를 알 수 있다. 또한 작업장이 혼합된 경우에 본 연구에서 제시한 모형과 범례모형은 최적의 라인의 길이가 같으므로 본 연구에서 제시한 수리적 모형은 최적의 투입순서를 구할 수 있다는 것이 확인되었다.

Table 1. 범례모형과의 비교

Position	Prototype Model		Generate Model	
	Early start	Late start	Early start	Late start
1	2	1	2	1
2	3	2	3	2
3	1	1	1	1
4	2	3	2	2
5	1	3	1	1
6	1	1	1	3
7	3	2	3	3
8	2	1	2	1
9	1	2	1	2
10	1	1	1	1
Line lenght	40	48	40	48

2. 3 .2 혼성작업장에서의 투입순서 결정

마지막 작업장이 개방 작업장인 경우에는 범례모형을 적용할 수 있지만 연속적인 두 개 이상의 개방작업장 뒤에 또는 마지막 작업장이 폐쇄 작업장인 경우에는 범례모형을 적용할 수 없다. 그러므로 범례모형에서 작업장의 길이를 구할 수 없던 작업장이 혼합된 경우에 대하여 본 연구에서 제시한 수리적 모형으로 최적의 라인의 길이를 구하고자 한다.

수치예는 아래와 같다.

- 작업장의 수 : $J = 5$ 모델의 수 : $M = 3$
- 모델의 수요 : $d = (4 , 4 , 2)$
- 컨베이어 속도 : $v_c = 1$ 제품 투입의 개수 : $I = 10$
- 제품 투입간격 : $w = 6$
- 각 모델의 각 작업장에서의 작업시간 :
 - $t_{1m} = (5 , 8 , 7) , t_{2m} = (6 , 9 , 5) ,$
 - $t_{3m} = (9 , 5 , 6) , t_{4m} = (5 , 8 , 4)$
 - $t_{5m} = (4 , 6 , 8)$

작업장의 구성 (Early start , Late start)

- 작업장 1 : 폐쇄 작업장 (Closed station) 작업장 2 : 개방 작업장 (Open station)
- 작업장 3 : 개방 작업장 (Open station) 작업장 4 : 개방 작업장 (Open station)
- 작업장 5 : 폐쇄 작업장 (Closed station)

작업장의 구성 (Hybrid start)

- 작업장 1 : LC (Late start , Closed station) 작업장 2 : EO (Early start , Open station)
- 작업장 3 : LO (Late start, Open station) 작업장 4 : EO (Early start , Open station)
- 작업장 5 : EC (Early start, Closed station)

Table 2. 혼합작업장의 최적투입순서

Sequencing	Early start (Model 1)	Late start (Model 2)	Hybrid-start (Model 3)
1	1	1	3
2	2	1	1
3	3	2	2
4	1	3	1
5	1	2	1
6	2	1	2
7	1	3	3
8	2	2	2
9	3	1	1
10	2	2	2
Line length	50	51	50

Table 2의 결과에서는 범례모형으로 처리할 수 없는 작업장의 구성에서 작업장이 혼합되고 이른 작업시작, 늦은 작업시작, 혼합작업시작(Hybrid start)에 대하여 작업장의 라인의 길이를 최소화하는 투입순서를 구하였다. 작업장의 길이를 살펴보면 작업시작 이른 작업일 때가 늦은 작업시작 일 때 보다 작업장의 길이가 짧아질 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 이른 작업시작일 때는 유희시간을 인정하기 때문에 작업장의 길이가 짧아지기 때문이고 늦은 작업시작인 경우는 유희시간이 인정되지 않기 때문에 작업장의 길이는 이른 작업장 보다 길 수 있지만 작업장의 작업자가 쉬지 않고 작업을 하기 때문에 작업효율을 상승시킬 수 있다.

III Tabu search을 이용한 혼합모델 조립라인의 설계

조합최적화 문제 해결하기 위한 기법 중 Tabu search는 인간의 기억과정을 이용한 탐색기법으로 해의 탐색과정을 일정기간 기억함으로써 해의 순환을 막고, 이웃해 중 가장 좋은 해로 이동함으로써 부분 최적해를 벗어나 최적해 또는 근사 최적해를 구할 수 있는 탐색적 방법으로 Glover에 의해 연구되기 시작하였다.[8] Tabu search는 처리하기 어려운 영역을 처리하기 위하여 탐색 프로세스를 이끌어 주는 제약을 부과하고 있으며 이 제약의 기본적인 요소는 유연기억(Flexible memory)을 들 수 있다. Tabu search를 수행하기 위한 구성요소는 Tabu목록, 열망수준, Tabu 속성, 종료조건 등을 들 수 있다.

3. 1 Tabu 목록 및 속성

Tabu목록은 해의 이동속성을 일정기간 기억하는 목록으로 해의 이동으로서 새로운 해가 발생하면 Tabu목록에 첨가하고 목록이 모두 채워지면 가장 먼저 기록된 목록을 지우고 새로운 해를 목록에 삽입하는 방식으로 관리되어진다.

Tabu목록을 만들기 위해서는 해의 이동속성을 나타내는 Tabu속성이 정의되어야 하는데 Table 4는 Tabu속성과 속성에 따르는 해의 제약을 나타내고 있다. 여러 가지 속성 중 $(\Pi(i) \wedge \Pi(j), i, j)$ 을 설명하자면 해의 이동으로 인하여 i 위치에 있는 원소 $\Pi(i)$ 와 j 위치에 $\Pi(j)$ 가 변함으로서 새로운 이웃해가 생성된다는 것을 의미한다.

Tabu 속성을 정의하면 속성에 따라 Tabu 제약이 뒤따르는데 $(\Pi(i) \wedge \Pi(j), i, j)$ 가 Tabu 속성으로 정의되면 첫 번째 Tabu 목록에 저장된 속성이 $(B \wedge A, 1, 2)$ 이면 다음 Tabu 속성이 위와 같다면 이 해는 고려하지 않으므로 해의 반복을 막아준다.

3. 2 열망수준과 종료조건

열망수준은 목적함수를 말하며 최소의 라인길이가 열망수준이다. 그리고 종료조건은 탐색한 이웃해의 수, 최선해를 개선하지 못한 횟수 등이 있다

3. 3 이웃해의 생성

이웃해 생성방법은 문제의 특성에 맞게 해를 이동함으로써 좋은해를 효율적으로 탐색할 수 있도록 개발되어야 하는데 일반적으로 투입순서 결정문제에서는 두 원소의 위치를 바꾸는 교환이동과 하나의 원소를 다른 곳으로 이동하여 삽입시키는 삽입이동이 있다. 교환 이동과 삽입이동을 서로 비교해 보면 교환 이동은 삽입이동에 비하여 순서의 변화가 작기 때문에 더 많은 해를 탐색하기가 어렵다는 문제점이 있는 반면에 삽입이동의 해의 변화가 너무 크기 때문에 해의 탐색 기능을 저하시킬 수 있다.

3. 4 Tabu search 절차

본 장에서는 Tabu search 수행절차를 살펴보기로 하겠다. Tabu search의 수행절차는 크게 5 단계로 나뉘는데 수행 단계는 아래와 같다.

단 계 1 : 초기화

: Tabu 속성, Tabu 목록의 크기, 열망수준, 종료조건을 결정하고, 초기해를 구해서 현재해와 최선해로 두고 Tabu 목록을 비워둔다.

단계 2 : 이웃해의 생성

: 현재해에서 정해진 이동 방법에 의하여 이웃해를 생성한다.

단계 3 : 현재해의 선정 및 최선해의 수정

: 발생한 이웃해 중 Tabu상태의 해가 아니거나 Tabu상태의 해라도 Tabu목록의 해보다 더욱 더 열망수준에 근사하다면 이 해를 현재해로 두고 선정된 현재해와 최선해를 비교하여 현재해가 최선해보다 더욱 더 열망수준을 만족하면 현재해를 최선해로 둔다.

단계 4 : Tabu 목록의 수정

: 새로 발생한 이동속성을 Tabu 목록에 기록하고 현재해의 개수가 Tabu목록보다 크면 가장 먼저 저장된 Tabu목록의 해가 삭제된다.

단계 5 : 종료 및 반복

: 종료 조건에 만족하면 Tabu search를 종료하고 종료 조건에 맞지 않으면 2단계부터 다시 반복한다.

IV. 실험 및 분석

본 장은 실험을 통하여 효율적인 초기해를 선정하고 Tabu search와 혼합정수계획법을 시간과 해의 효율측면에서 비교 분석한다. 그리고 작업장이 확장된 경우, 모델의 종류가 확장된 경우, 부품의 개수가 확장된 경우에 Tabu search를 사용하여 실시간의 최적의 투입순서를 구하고자 한다. 본 연구의 실험에 사용된 Tabu search, Hill climbing heuristic, 라인의 길이를 구하는 프로그램은 C++ 언어로 프로그램 하였고 혼합정수계획법을 이용한 최적의 투입순서를 구하는 것은 Lindo package를 이용하였으며 실험에 사용된 Computer는 Pentium 166MHz이다.

4. 1 초기해의 비교분석

본 장에서는 Hill climbing heuristic의 해와 혼합정수계획법 해를 해의 효율성의 측면과 수행시간의 측면에서 비교 분석하고자 한다. 그리고 본 실험에 사용된 예는 Bard의⁴⁾ 예를 사용하기로 한다. Hill climbing heuristic해는 각 작업장에 초기해를 달리하여 20회 실험한 결과중 최선해를 사용하고 이웃해의 발생개수는 500, 1000번 발생하고 이동방법은 교환이동을 하기로 한다. Table 3는 각 작업장의 혼합정수계획법의 해와 Hill climbing heuristic해를 비교하고 있다. Table 3의 결과와 같이 최적해와 Hill climbing heuristic 해를 (최선해/최적해)×100 방법으로 효율성의 측면에서 비교해보면 EC경우에는 이웃해를 500번 발생시는 97.6% 1000번 발생시는 97.6%의 효율성을 얻을 수 있고 나머지 작업장도 모두 95%이상의 효율성을 얻을 수

있다. 시간적인 측면에서 Hill climbing heuristic해와 혼합정수계획법의 해를 비교해보면 혼합정수계획법의 수행시간은 10초 내외인데 반해 Hill climbing heuristic해의 수행시간은 1초 내이므로 수행시간 면에도 Hill climbing heuristic이 뛰어나다. 그러므로 본 연구는 기존의 연구와 달리 초기해 선정을 무작위로 하지 않고 Hill climbing heuristic 사용하여 일정수준 최적해에 근사한 초기해를 얻어 최선해를 탐색하고자 한다.

Table 3. 혼합정수계획법과 hill climbing heuristic의 비교분석

Integer program			Hill climbing heuristic		
			Neighborhood sol number		
Model	Position	Line length	Model	500	1000
EC	1213121132	42	EC	43	43
LC	1123121321	49	LC	51	51
EO	1112132321	34	EO	35	35
LO	1121213321	41	LO	42	42

4. 2 혼합정수계획법과 Tabu search의 비교분석

본 장은 Tabu search해와 혼합정수계획법의 해를 해의 효율적 측면과 수행시간의 측면에서 비교분석 하고자 한다.Tabu search 초기해는 해를 무작위로 발생시켜 Hill climbing heuristic 수행된 값을 초기해로 두었고 종료조건은 이웃해의 발생개수로 두었으며 Tabu목록의 크기는 5로 두었으며 이웃해의 발생개수는 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000번 발생하기로 하기로 한다. 위와 같은 방법으로 Tabu search를 20번 수행하여 얻어진 최선값을 Tabu search의 값으로 선정한다. 본 장의 실험은 Bard[11]의 예를 확장하여 사용하기로 하며 모델의 수는 3개 투입되는 부품의 수는 15개로 하며 작업장의 갯수는 4개 투입간격은 6단위로 한다. 결과는 Table 4에 나타내고 있는데 문제 2는 문제 1의 상황에서 부품의 개수를 확장한 경우인데 해의 효율적인 측면은 모든 작업장에서 100%의 효율을 얻었고 수행시간의 측면에서는 혼합정수계획법의 해보다 더 좋은 결과를 얻었는데 EC의 경우에는 혼합정수계획법인 경우 1740.6초가 소요된 반면 Tabu search의 해는 이웃해를 10000번 발생시켰을 때에도 3초 내외였다.

4. 3 실시간의 투입순서 결정

본 장은 작업장이 확장된 경우의 라인의 길이를 최소화하는 실시간의 투입순서를 구하여 시간적인 측면에서 해의 효율을 알아보려고 한다.

본 실험의 예제로는 Dar-el와 Nadivi[5]가 제시한 전회교환기 투입순서 문제를 사용하는데 작업장은 27개로 구성되어 있고 조립되는 모델의 종류는 8가지이고 생산되는 제품의 수는 $d = \{1, 4, 2, 4, 1, 2, 2, 1\}$ 로 한 사이클 동안에 생산되는 제품의 수는 17가지이고 모델에 따른 각각의 작업시간은 Dar-el와 Nadivi¹⁰의 표 4를 수정하여 사용하기로 하겠다.

그리고 제품투입간격은 예제에서 제시한 바와 같이 28.8분(Min)으로 두며 컨베이어 속도는 계산의 편의를 위하여 1로 두기로 한다. 그리고 Tabu search의 초기값, 종료조건, Tabu목록의 크기는 Tabu search와 혼합정수계획법의 비교분석 실험과 같이 두기로 한다.

Table 4. 혼합정수계획법과 Tabu search의 비교분석 (unit / sec)

Model	Branch and Bound			Tabu search											
	Position	Line length	Time	Neighborhood solution number / Time											
				1000	Time	2000	Time	4000	Time	6000	Time	8000	Time	10000	Time
EC	213213311213123	57	1740.60	57	0.21	57	0.44	57	0.88	57	1.32	57	1.82	57	2.25
LC	132311213231213	68	1016.23	68	0.25	68	0.56	68	0.92	68	1.86	68	2.45	68	3.12
EO	313131231213221	40	420.26	40	0.16	40	0.38	40	0.62	40	0.92	40	2.88	40	3.21
LO	111213231312233	60	320.36	60	0.26	60	0.48	60	0.97	60	1.75	60	2.86	60	4.97

Table 5. Tabu search 수행시간 (unit / sec)

Model	Tabu search				
	Neighborhood solution number				
	5000	1000	15000	20000	30000
EC	3.30	6.53	9.58	13.02	19.54
LC	3.42	7.02	10.21	13.00	20.01
EO	3.26	6.58	9.49	13.34	20.12
LO	3.55	6.44	10.33	14.01	19.58

Table 5는 작업장이 확장된 경우에 Tabu search해의 수행시간을 나타내고 있다. 기존의 최적해를 구하는 혼합정수계획법은 작업장이 8개이고 부품의 개수가 15개이고 모델의 수가 6가지인 경우에 수행시간이 10시간 정도 걸렸다. 하지만 Tabu search의 해는 Table 5와 같이 이웃해를 30000번 발생 하였을때 각 작업장의 수행시간의 20초 내외였다.

그러므로 실제의 작업장에서 수요의 변화, 결품으로 인한 투입순서를 재결정할 경우 최적의 투입순서 결정문제는 NP-hard 문제이므로 최적의 값을 얻기 어렵기 때문에 본 연구에서는 제시한 Tabu search 기법을 이용하여 실시간의 투입순서를 구할 수 있다.

V. 결론

최근 소비자의 욕구가 다양화됨에 따라 다품종 소량생산의 필요성이 강조되고 있다. 이와 같은 다품종 소량생산을 효율적으로 수행하기 위해 많은 제조 회사들은 하나의 라인을 이용하여 여러 개의 모델을 생산하는 혼합모델 조립라인 방식을 채택하고 있다. 하지만 혼합모델 조립라인은 생산계획과 통제가 복잡하여 작업자를 과잉 투입하거나 작업장을 필요이상으로 늘리는 경향이 있다. 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 최소의 라인의 길이를 결정하는 문제는 중요하다. 기존의 라인의 길이를 최소화하는 연구는 각각의 작업장에 대해 라인의 길이를 최소화하는 수리적 모형을 제시하고 있을 뿐 실제 작업장과 같이 작업장이 혼합된 경우는 수리적 모형을 제시하고 있지 않다. 그러므로 본 연구는 혼합모델 조립라인에서 작업장이 혼합된 경우에 전체의 라인의 길이를 최소화하는 투입순서를 구하는 수리적 모형을 제시하였다.

실시간의 투입순서를 구할 수 있는 Tabu search기법을 사용하였고 Tabu search가 더욱더

효율적인 해를 탐색하기 위해 초기해의 생성방법을 기존의 연구와 달리 Hill climbing heuristic 기법을 이용하여 초기해를 얻음으로서 탐색의 시작을 최적해와 근사한 값에서 수행할 수 있도록 하였다.

Tabu search를 혼합모델 조립라인에 적용시킨 결과 해의 효율이 100%에 근사한 값을 얻었고 특히 수행시간의 측면에서는 3초 이내의 빠른 수행시간 내에 최적의 투입순서를 구할 수 있었다. 하지만 위의 Tabu search의 해가 항상 최적해를 구해 줄 수 있는 것이 아니므로 추후 연구방향으로는 Tabu search의 초기해 선정문제, 더 넓은 해의 영역을 탐구할 수 있는 이동방법에 관한 연구가 필요하고 혼합모델 조립라인의 효율에 영향을 미치는 가외작업, 준비시간 라인의 길이 등을 동시에 최적화 하는 발견적 기법 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Gunther, R. E., and Peterson, R. S., "Currently practiced formulations for the assembly line balancing problem", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, pp.209~221,(1983)
2. Burns, L. D., andDaganzo, C. F., "Assembly line sequencing principles", Research publication GMR-5127, general motors research laboratories, Warren, MI, (1985).
3. Yano, C. A. and Rachamadugu, R., "Sequencing to minimize work overload in assembly line with product option", *Mgmt. Sci.*, Vol. 37-5, pp.572~58,(1991)
4. 김여근, 꺾재승, "관련작업을 고려한 혼합모델 조립라인 밸런싱" 「대한산업공학회지」 제 18권 , 제 2호 (1993), pp. 1-22.
5. 김여근, 현철주, "혼합모델 조립라인의 생산순서결정을 위한 유전 알고리즘" 「대한산업공학회지」 제 20권 , 제 3호 (1994), pp. 15-34.
6. Kilbridge, M. and Wester, L., "The assembly line model-mix sequencing problem", *Proc. of the Third Int. Conf. Op. Res.*, Oslo, Paris : English Universities Press, pp. 247~260, (1963).
7. 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.*, Vol. 17, pp. 233~247, (1979).
8. Dar-EL, E. M. and Cother, R. F., "Assembly line sequencing for model-mix", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 13, pp. 463~477, (1975).
9. Dar-EL, E. M. and Nadivi, A., "A mixed-model sequencing application", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 19, (1981), pp. 69~84.
10. Bolat, A. S, M. and AL-Fawzan, M. A., "Algorithms for real-time scheduling of jobs

- on mixed model assembly lines", *Computers Ops. Res.*, Vol. 21, pp. 487~498, (1994).
11. Belarmino, A.D., "Restricted Neighborhood in the Tabu Search for the Flowshop Problem", *European Journal of operational Research*, Vol. 62, (1992), pp. 27~37.
 12. Berty, S.J., "Genetic algorithm versus Tabu search for instruction scheduling", *Proceedings of the fifth International Conference on Genetic Algorithms*, (1993), PP. 496-501.
 13. 남상진, "혼합모델 조립라인의 투입순서 결정에 관한 연구", 동아대학교 박사학위논문, 1997.