

다목적 유전 알고리즘을 이용한 혼합모델 조립라인의 최적 생산순서계획

김연민 · 김영진

울산대학교 산업정보경영공학부

Mixed-Model Sequencing Using Genetic Algorithms with Multiple Evaluation Criteria

Yeom-Min Kim · Young-Jin Kim

This paper deals with the problem of mixed-model sequencing on an assembly line. In this sequencing problem we want to minimize the risk of the conveyor stoppage and the total utility work. This paper applies genetic algorithm to solve the mixed-model sequencing problem which is formulated as an integer programming. The solution we get from this algorithm is compared with the solution of Tsai(1995)'s.

1. 서론

혼합형 조립라인은 소품종 대량생산 체제에 적합했던 단일 모델 전용흐름라인을 다품종 소량시대에 대응할 수 있도록, 한 라인에서 유사한 여러 모델을 함께 생산하게 하는 조립라인이다. 이러한 라인의 대표적인 예로서 승용차 조립라인을 들 수 있는데, 고객의 요구(옵션사항)에 따라 여러가지 차종을 다양한 모델로 연속하여 생산하고 있다. 이러한 혼합형 라인의 가동률 향상을 위한 의사결정 문제로 라인밸런싱과 순서결정 문제가 있다. 라인밸런싱은 통합선행관계도에 나타난 선행조건을 만족하고 작업장의 작업부하가 균형을 이루면서 요구되는 작업장의 수가 최소가 되도록 각 작업장에 작업을 할당하는 절차이다. 반면에 순서결정문제는 라인밸런싱의 결과로서 각 작업장에 할당된 모델들의 작업부하를 최대한 각 작업자의 작업영역 안에서 행할 수 있도록 모델간의 투입순서를 결정하는 절차이다. 이 중에서 순서결정문제는 모델들의 투입간격, 즉 사이클타임을 각 모델마다 다르게 하지 않고 모든 모델에 동일하게 하는 고정 사이클타임(fixed cycle time) 방식을 적용할 경우에 발생한다. 작업장에 할당된 모델별 작업량과 모델들의 총 조립시간은 모델별로 다르기 때문에 순서결정을 잘 하지 않으면 작업장간 작업부하의 불균형을 초래하게 된다. 이 경우 작업시간이 고정 사이클타임보다 큰 모델이 연속적으로 투입되면 부가작업(utility work)이 많아져서 라인길이 및 사이클타임을 길게 해야 하는 등 라인 운영에 어려움을 초래하고, 급

기야는 컨베이어를 정지해야 하는 경우까지도 발생하게 된다. 이러한 순서결정문제는 작업장의 수와 모델의 수가 증가하면 최적해를 구하기 어려운 NP-hard 문제로 밝혀져 있다. 그러므로 이를 풀 수 있는 새로운 휴리스틱 해법들이 제안되고 있다.

기존의 혼합 모델에서 작업순서를 구하는 알고리즘은 Thomopoulos (1967), Macaskill (1972)이 부가작업, idleness, deficiency 및 congestion을 최소화하는 근사 알고리즘을 개발한 바 있고, 일본의 제조 상황에서 Okamura와 Yamashina(1991)는 컨베이어 중단 위험을 최소화하는 자기발견적 알고리즘을 개발하였다. 그들의 자기발견적 기법은 작업의 교환과 삽입을 통해 최대편차(maximum displacement)를 줄이고자 하였다.

Yano와 Rachamadugu(1991)는 총 부가작업을 최소화하는 문제에 대한 정식화를 하고 이를 두 가지 작업 시간만을 가지는 특별한 경우에 대하여 풀었다. Bolat과 Yano(1992)는 하나의 작업장에서 총부가작업을 $O(N)$ 계산시간 내에 최소화하는 몇 가지 알고리즘을 개발했다. 한편 Bolat과 Yano(1992)는 계산의 용이성을 위해 부가작업에 대한 surrogate objective를 제시하기도 했다.

한편, 여러 작업장을 고려한 문제는 한 작업장만 고려한 알고리즘을 이용할 수 있는데 Yano와 Rachamadugu(1991)의 K 작업장에 대한 greedy procedure는 $O(KN)$ 단일 작업장 부가작업 최소화 문제와 일치한다.

Tsai(1992)는 최대누적비용을 최소화하는 n 개의 작업순서 문제를 풀고, 두 가지 형태의 작업만을 고려한 알고리즘을 제시하였다. Tsai(1995)는 작업장의 길이를 고려하여 (1) 컨베이어

의 중단 위험과 (2) 총 부가작업(utility work)을 최소화하는 N 개의 제품 작업 순서(Product Sequencing)를 구하는 문제가 NP-hard임을 밝히고, 두 가지 형태의 작업만 고려할 경우 $O(\log M)$ 의 계산시간으로 풀 수 있는 최적해 알고리즘을 제시하였다. 그러나, 아직까지 M 개의 제품 형태와 작업시간을 고려하여 (1) 컨베이어의 중단 위험과 (2) 총 부가작업(utility work)을 최소화하는 N 개의 제품 작업 순서를 구하는 문제를 구하는 정식화와 그것을 풀 수 있는 알고리즘은 아직 개발되지 않고 있다.

2. 혼합형 조립라인의 순서결정문제

혼합형 조립라인은 일정한 속도로 진행되는 컨베이어시스템으로 작업자는 컨베이어 위에 올라타서 함께 이동하면서 작업을 한다. 작업을 완료한 작업자는 후속 모델의 작업을 위하여 라인 상류방향, 즉 컨베이어 진행방향과 반대 방향으로 이동한다.

<그림 1>은 투입순서에 따라서 부가작업(utility work), 유휴작업(idle time), MST(maximum starting time)을 보여주고 있다. 두 번째 작업이 끝난 뒤, 유휴시간이 발생하고, 세 번째 작업에서는 부가작업이 발생하고 있다. 특히, 부가작업이 큰 경우에는 연속적인 조립라인에서 컨베이어의 중단을 초래하는 경우가 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 문제 접근을 위해서 다음과 같은 가정을 하고 있다.

- (1) 여러 개의 제품은 고정사이클 간격으로 투입되고 있다.
- (2) 제품별 각 작업시간은 결정적(deterministic)이며 사이클 타임과 제품혼합(product mix)은 미리 결정되어 있다.

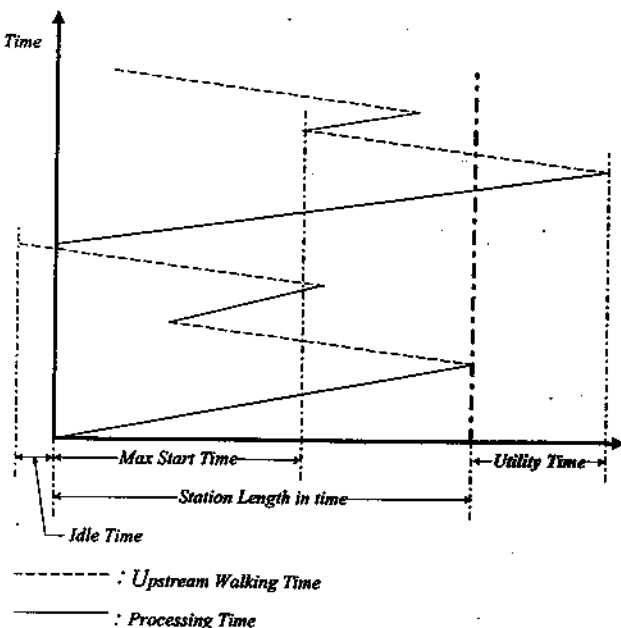


그림 1. 투입순서에 따른 부가작업과 유휴시간.

- (3) 작업장의 형태는 폐쇄작업장(closed station)으로서 유휴작업과 부가작업을 고려한다.
- (4) 작업장에는 1인의 작업자가 배치되어 있다.
- (5) 제품에 따른 작업 준비시간은 무시한다.
- (6) 새로운 작업을 위해 컨베이어 상류방향으로 이동하는 작업자의 이동 속도는 일정하다.

이러한 가정하에서 혼합모델 조립라인의 순서화 문제는 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= Z_1 + Z_2 \\ &= \text{Max } y_j + \sum_{j=1}^n [y_j + v_j - L]^+ \\ \text{s.t. } y_j &= [y_{j-1} + v_{j-1} - w]^+ \quad \forall_j \quad (1) \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= 1 \quad \forall_j \quad (2) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 \quad \forall_i \quad (3) \\ v_j &= \sum_i p_i x_{ij} \quad \forall_j \quad (4) \\ x_{ij} &= 0 \text{ or } 1, v_j \geq 0, p_i \geq 0, y_j \geq 0, y_1 = 0 \end{aligned}$$

여기서,

L : 작업장의 길이에 해당하는 시간

x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{if } i \text{ 작업이 } j \text{ 번째에 위치할 때} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

v_j : j 번째 작업의 작업시작 시간

y_j : i 작업의 작업시간

w : 작업자의 이동 시간

$[a]^+ = \text{Max}\{a, 0\}$

위의 정식화에서 목적함수는 최대시작시간(Maximum Starting Time: MST)을 최소화함으로써 컨베이어의 중단위험(Z_1)을 줄이며, 총 부가작업(Sum of Utility Time: SUT)을 최소화(Z_2)하고 있다.

추가적으로 고려해 볼 수 있는 척도로는 작업시작 시간의 합(Sum of Starting Time: SST: Z_3)과 유휴 시간의 합(Sum of Idle Time: SIT: Z_4)을 고려할 수가 있으며, 목적함수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_3 = \sum_{j=1}^n y_j$$

$$Z_4 = \sum_{j=1}^n [w - (y_j + v_j)]^+$$

제약조건은 각 작업장에 작업할당을 하나만 할 수 있도록 하고(식 (2), (3)), 후행 작업의 시작 시간(Starting time)은 선행작업이 종료되는 시간과 작업자가 다음 작업을 위하여 이동하는 시간과의 차이에 의해서 구해진다(식 (1), (4)).

3. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 생물의 진화과정, 즉 자연선택과 유전법칙을 모방한 확률적 탐색기법으로서 복잡한 해공간의 탐색능력이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제를 푸는데 적합한 기법으로 알려져 있고, 특히 모형에 대한 유연성이 좋아 제약 첨가나 목적함수의 변경이 용이하다는 장점을 가지고 있는 탐색기법이다.

유전 알고리즘은 문제의 잠재해를 표현한 개체들로 이루어진 모집단을 가지고 시작한다. 모집단은 매 세대마다 일정수의 개체를 유지하고, 매 세대에서 각 개체의 적응도(fitness)를 평가하여 이에 따라 다음 세대에 생존할 개체들을 확률적으로 선별한다. 선별된 개체들 중 일부의 개체들이 임의로 짝을 지어 교배하여 자손을 생성한다. 이때 교차(crossover)에 의해 부모의 유전자가 자손에게 상속되고 돌연변이가 일어날 수 있다. 자손은 부모로부터 좋은 유전형질을 상속받는다 고 가정함으로써 다음 세대의 잠재해들은 평균적으로 전 세대보다 더 좋아진다고 본다. 이러한 진화과정은 종료조건을 만족할 때까지 반복하게 된다. 이 과정을 정리하면 <그림 2>와 같다. 여기서 $f(t)$ 는 세대 t 에서의 모집단을 나타낸다.

유전 알고리즘의 요소로는 해의 표현, 초기 모집단, 적응도 평가, 선별, 유전 연산자, 유전 파라미터 등이 있다. 해의 표현은 문제의 잠재해를 유전적 표현, 즉 개체로 표현하게 된다. 이 유전적 표현은 유전 알고리즘의 다른 절차(적응도 평가와 유전 연산자 적용 등)에 영향을 주므로 문제의 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다. 초기 모집단은 발견적 기법에 의해 생성된 해들은 초기 수렴하며 해공간의 다양한 탐색을 방해하는 경향이 있기 때문에 주로 임의생성방법을 사용한다. 적응도는 목적함수에 의해 측정되고, 선별에는 확률바퀴(roulette wheel)방법, 순위선별(ranking selection), 토너먼트 선별(tournament selection) 등이 있다. 유전 연산자로는 교차와 돌연변이로 나누어진다. 교

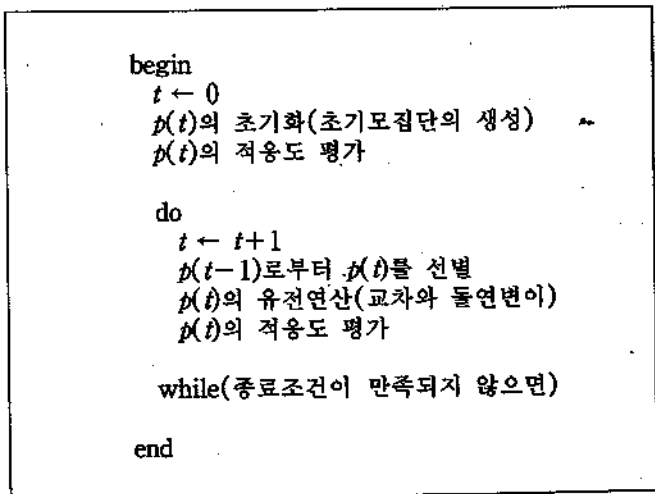


그림 2. 유전 알고리즘의 구조.

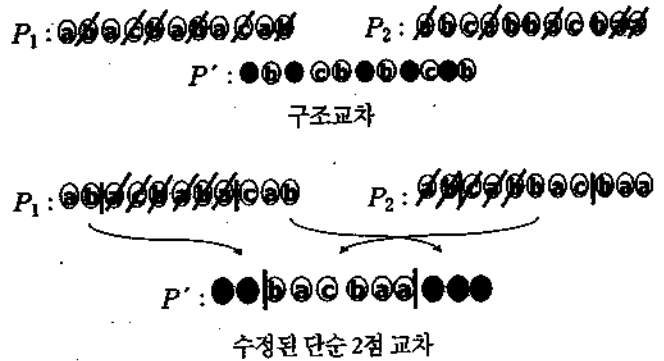


그림 3. 구조교차와 수정된 단순 2점 교차의 예.

차에는 일점교차, 이점교차, 순서교차, 순서기반교차, 구조교차, 부분교차 등이 있고, 돌연변이로는 역순, 삽입, 교환, 전위 등이 있다.

본 연구에서 적용된 유전 알고리즘의 요소를 보면, 해의 표현은 고정길이의 기호열을 염색체로, 개개의 기호를 유전자로 각각 대응하여, 이 기호열에 의해 개체를 표현한다. 간단한 예로서, 작업 형태가 a, b, 생산대수가 각각 10, 12라면, 해의 표현은 "abababbababbabababbaba" 등으로 나타낼 수가 있다.

교차는 구조교차와 수정된 단순 2점 교차를 고려하였다. 구조교차는 두 개의 부모개체(P_1, P_2)를 선택한 후, P_1 에서 임의의 기호를 선택한 후 그 위치를 자손에게 상속한다. P_2 에서 나머지 기호들을 상속받는다. 수정된 단순 2점 교차는 임의로 두 개의 절단점을 정한 뒤, P_1 에서 첫 번째 절단점의 앞부분과 두 번째 절단점의 뒷부분에 해당하는 기호를 상속받은 후, P_2 에서 나머지 기호를 상속을 받게 된다. 실험의 결과 구조교차의 경우 좋은 적응도를 가지는 개체의 유전자 정보를 자식 세대에 잘 상속하고, 세 가지 이상의 작업 형태를 가질 때에 유효하였다. 다음은 구조교차와 수정된 단순 2점 교차의 간단한 예이다(<그림 3>).

구조교차의 예는 부모세대 P_1 에서 기호 ①이 선택되어 자식세대인 P' 에게 상속된다. P_2 에서는 ①을 제외한 ②, ③이 P' 에게 상속되는 것이다.

돌연변이는 선택된 절단점을 기준으로 단순히 앞뒤로 하나의 기호만 바꾸어 주는 역순 돌연변이를 사용하였다.

4. 실험 및 분석

제안된 모형을 사용하여 기존의 문제를 풀기 위하여, 적합한 유전 파라미터 설정을 위한 샘플링 데이터를 추출하고, 이것을 토대로 유전 알고리즘을 30회 반복 수행하여 결과치를 얻었다. 1회 반복시에 5000번의 유전연산을 거쳤다. 실험환경은 IBM PC를 사용하였고, 유전 알고리즘은 Visual C++ Ver 6.0으로 구현하였다.

4.4 결과 분석

<표 2>에서 발견된 최적 투입순서를 보면, 일련의 부분 기호열(ababb*****, abababb*****)이 반복됨을 알 수가 있다. 이와 같은 부분 기호열은 개체가 좋은 적합도값을 가지도록 도와주는 역할을 하고 있다. 여러 번의 반복 수행 결과, 어느 정도까지는 반복되는 부분 기호열의 종류가 증가하지만 계속 증가하지는 않는다.

Tsai(1995)의 경우에는 한 가지의 최적 투입 순서(abababb ababbababababa)를 제시하고 있다(<그림 6>). 이를 위의 결과와 비교해 보면, 본 연구에서 발견한 부분 기호열을 포함하고 있음을 알 수가 있다(<표 2>의 음영부분). 또한, 본 연구에서는 다양한 해를 찾은 반면에, Tsai(1995)는 다중해를 전부 찾도록 하지 않는다.

한편, 다목적 유전 알고리즘에서는 목적식을 그냥 더하는 것보다 Pareto 최적해를 제시하는 것이 목적함수의 속성이 다를 때 가치가 있다. 그러나, 본 연구의 목적함수의 척도는 시간으로 모두 동일한 척도를 사용하므로, Pareto 최적해보다 목적함수의 상대적 중요성을 반영하기 위해 목적함수에 가중치를 주어 민감도 분석을 해 보았다. 그 결과 가중치를 변화시켜도 최적 투입순서에는 그다지 영향을 주지 않는 것으로 나타났다(<표 3>). <표 3>에서 “발견된 최적 투입순서”는 <표 2>에서의 최적 투입순서의 번호를 가리킨다.

표 3. 민감도 분석의 결과

가중치		적응도 값		발견된 최적 투입순서
MST (w_1)	SUT (w_2)	MST (x_1)	SUT (x_2)	
0.2	0.8	6	2	① ② ③ ④ ⑤ ⑦
0.3	0.7	6	2	① ② ③ ④ ⑤ ⑦
0.4	0.6	6	2	① ② ③ ④ ⑤ ⑦
0.5	0.5	(6, 5)	(2, 3)	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦
0.6	0.4	5	3	⑥
0.7	0.3	5	3	⑥
0.8	0.2	5	3	⑥

4.5 추가적 분석

추가적 분석에서는 부가작업의 합과 작업시작 시간의 합을 최소화하는 $Min Z = Z_2 + Z_3$ 에 대하여 실험을 해 보았다. 실험 조건은 4.1과 동일하다. 실험의 결과는 다음과 같다(<표 4>).

표 4. 실험의 결과

최적 투입순서	SUT	SST	반복 횟수
abbababbabababababaa	4	51	611
ababbababababababaa	4	51	1259
ababbababababababaa	4	51	1341
ababbababababababaa	3	52	2873
ababbababababababaa	4	51	3267

다음은 <표 4>의 최적 투입순서 중에서 하나(음영 부분)를 도식화시켜 본 것이다(<그림 7>).

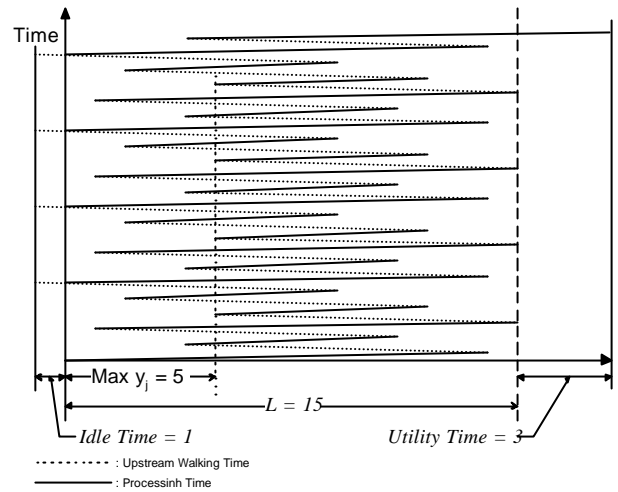


그림 7. 투입 순서에 따른 부가작업과 유휴 시간 및 작업시작 시간.

<표 4>에서 발견된 부분 기호들은 <표 2>에서 발견된 것과 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다.

<그림 7>에서 최대 작업시작시간이 <그림 6>의 경우보다 작다. 그러나, 유휴작업의 합이나, 부가작업의 합의 경우는 <그림 7>의 경우가 더욱 크게 나오고 있다.

5. 모형의 확장

앞에서 제안된 모형은 단일 작업장에서 M개의 제품형태를 고려한 M개 작업의 투입순서를 구하는 문제를 정식화하고, 두 가지 제품형태를 고려하여 유전 알고리즘을 적용해 보았다. 이 모형을 좀더 확장하여 일반화하면, M개의 제품형태를 고려한 M개 작업의 투입순서를 L개의 작업장에서 구할 수 있다.

예로서 다음과 같은 자동차 조립라인을 들 수가 있다(<표 5>).

ABS Brake 옵션의 경우를 살펴보면, <표 5>에서 ABS Brake를 장착하게 되는 차종은 A뿐이다. 그러므로, Brake 장착 공정에서 ABS Brake를 장착하는 차의 생산 대수는 1이 되고, 장착하지 않은 차량의 대수는 9가 되는 것이다. 보통 Brake를 장착하는 공정보다 ABS Brake를 장착하는 공정의 Processing Time이 더 길다는 것을 알 수가 있다. AT(Automatic Transmission), DOHC engine, DUAL Airbag의 경우도 위와 같은 해석과정을 거치면, 위의 예제는 4개의 작업장에서 4종류의 차종을 고려하여 10대의 제품을 생산해야 되는 문제가 된다. 이때 일반적으로 선택사양이 없는 조립 작업장이 선택사양이 있는 조립 작업장보다 많으며, 그 사이클타임은 작업시간보다 크므로 선택사양으로

표 5. 차종에 따른 옵션사항과 생산조건

옵션	차종			
	A	B	C	D
ABS Brake	✓			
A/T	✓	✓	✓	
DOHC engine	✓	✓		
DUAL Airbag	✓	✓		✓
합계	1	2	3	4

옵션	생산대수		Processing Time		Cycle Time	Upstream Walking Time
	장착	장착안함	장착	장착안함		
ABS Brake	1	9	14	7	15	10
A/T	6	4	18	14	20	15
DOHC engine	3	7	17	13	20	15
DUAL Airbag	7	3	25	20	30	24

러므로, 다음과 같은 가정을 추가할 수 있다.

(7) 각 작업장 사이에 선택사항이 없는 조립 작업장이 있고, 작업장의 길이가 작업시간보다 길다면, 이는 최적생산순서계획에 영향을 주지 않으므로 선택사항이 있는 작업장만을 가지고 최적생산순서계획을 할 수 있다.

이러한 가정하에서 생산순서 결정문제는 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z &= Z_1 + Z_2 \\
 &= \sum_{k=1}^l \text{Max } y_{jk} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l [y_{jk} + v_{jk} - L_k]^+ \\
 \text{s.t.} \quad & y_{jk} = [y_{(j-1)k} + v_{(j-1)k} - w_k]^+ \quad \forall j, \forall k \quad (1) \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 \quad \forall j \quad (2) \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 \quad \forall i \quad (3) \\
 v_{jk} &= \sum_i d_{ik} x_{ij} \quad \forall j, \forall k \quad (4) \\
 x_{ij} &= 0 \text{ or } 1, v_{jk} \geq 0, d_{ik} \geq 0, y_{jk} \geq 0, y_{1k} = 0
 \end{aligned}$$

여기서,

- L_k : k 작업장 길이에 해당하는 시간
- x_{ij} : $\begin{cases} 1 & \text{if } i \text{ 작업이 } j \text{ 번째에 위치할 때} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
- v_{jk} : k 작업장에서 j 번째 작업에 할당되는 시간
- y_{jk} : k 작업장에서 j 번째 작업의 작업시작 시간
- d_{ik} : k 작업장에서 i 작업의 작업시간
- w_k : k 작업장에서 작업자의 이동 시간

$$[a]^+ = \text{Max} \{a, 0\}$$

단일 작업장에 대한 모형과는 다르게, 확장된 모형은 작업장 k 에 대한 제약이 추가되어 있다. 목적함수는 모든 작업장에서의 최대시작시간(Maximum Starting Time : MST)을 최소화함으로써 컨베이어의 중단위험을 줄이는 것(Z_1)과, 모든 작업장에서의 총 부가작업(Sum of Utility Time : SUT)을 최소화하는 것(Z_2)이다.

작업시작 시간의 합(Sum of Starting Time : SST : Z_3)과 유휴 시간의 합(Sum of Idle Time : SIT : Z_4)을 고려하면 목적함수는 다음과 같이 바뀐다.

$$\begin{aligned}
 Z_3 &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l y_{jk} \\
 Z_4 &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l [w_k - (y_{jk} + v_{jk})]^+
 \end{aligned}$$

제약조건은 각 작업장에 작업할당을 하나만 할 수 있도록 하고(식 (2), (3)), k 작업장에서 후행 작업의 시작시간(Starting time : y_{jk})은 선행작업이 종료되는 시간($v_{(j-1)k}$)과 작업자가 다음 작업을 위하여 이동하는 시간(w_k)과의 차이에 의해서 구해진다(식 (1), (4)).

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 혼합모델 조립라인에서 컨베이어의 중단위험과 부가작업(Utility Time)을 최소화하는 문제를 풀어 보았다.

이를 위하여 먼저 작업자의 유휴작업과 총 부가작업을 최소화하는 단일 작업장에 M 개의 제품형태를 고려한 N 개 작업의 투입순서를 구하였다. 또한, 이것을 확장한 L 개의 작업장 문제를 풀기 위해, 새로운 모형을 제안하였다. 유전 알고리즘에서는 해가 가진 정보를 자연스럽게 나타낼 수 있는 표현 방법과 최적해 탐색의 효율을 높여주는 유전 연산자를 적용하여 문제를 풀었다. 유전알고리즘은 제한된 반복횟수나 종료조건 안에서, 항상 최적해를 찾는다 할 수는 없으므로, 여러 번의 반복 실험을 하거나 충분한 유전연산 반복횟수를 가져야 한다.

향후의 연구과제는 확장된 새로운 모형을 실제 문제에 적용해 기존의 해법과 비교해 보는 것이다. 또한, 제안된 목적함수(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)들의 조합에 따라 나온 결과를 비교하는 것도 필요할 것이다. 다목적 유전 알고리즘에서 목적함수의 상대적 중요성이 다르므로 목적식을 그냥 더하지 않고, 의사결정과정에서 유효경계에 있는 해 중에서 대표적인(다양한) 해들을 찾아서, 의사결정자에게 제시하는 Pareto 최적해에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김여근, 이수연, 김용주 (1997). 혼합모델 조립라인에서 작업부하의 평활화를 위한 유전알고리즘, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 23(3), 15-332.
- Bolat, A., Yano, C. (1992a), Scheduling algorithms to minimize utility work at a single station on a paced assembly line, *Production Planning and Control*, 3(4), 393-405.
- Macaskill, J. L. C. (1972), Production-line balances for mixed model lined, *Management Science*, 19(4), 423-434, 1972
- Okamura, K., Yamashina, H. (1979), A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor, *International Journal of Production Research*, 17(3), 223-247.
- Rachamadugu, R., Yano, C. A. (1991), Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options, *Management Science*, 37(5), 572-586.
- Tasi, L. H. (1995), Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage, *Management Science*, 41(3), 485-495.
- Thomopoulos, N. T. (1967), Line balancing-sequencing for mixed model assembly, *Management Science*, 14(2), B59-75.

김연민

서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
한국과학기술원 경영과학과 박사
현재: 울산대학교 산업공학과 교수
관심분야: 생산전략, 기술관리, 생산시스템 설계 및 운영

김영진

울산대학교 산업공학과 학사
현재: 울산대학교 산업공학과 석사과정
관심분야: STEP, Computer Graphics