

표면실장기계의 최적 통합환경 구성

°이성환*, 홍지민*, 김대원**, 진명수*, 이범희*

* 서울대학교 공과대학 제어계측공학과, ** 명지대학교 공과대학 제어계측공학과

Organization of the Optimal Integrated Environment for Surface Mounting Machines

° S.H. Lee*, J.M. Hong*, D.W. Kim**, M.S. Jeon*, B.H. Lee*

* Dept. of Control and Instrumentation Eng., Seoul National University

** Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Myongji University

Abstract

The environment for surface mounting machines plays an important role in a throughput. An approach to organize the optimal integrated environment for surface mounting machines is presented to increase a throughput. An optimization problem is divided into a feeder setting problem and a task sequencing problem. Two algorithms for each problem are proposed. The feeder setting problem is optimized by an algorithm based on heuristic methods. The task sequencing problem is modeled as a TSP(traveling salesman problem). An algorithm based on a heuristic tour-to-tour improvement method for TSP is proposed to optimize the task sequencing problem. A simulation is carried out to test developed algorithms.

1. 서론

과거의 인쇄회로기판(PCB: Printed Circuit Board)은 부품을 해당 구멍에 삽입한 후 납땀하여 조립하는 방법을 사용했었다. 그러나 최근들어 부품 제조기술이 발달함에 따라 부품의 소형화, 경량화가 이루어졌고, 인쇄회로기판에 구멍(PTH: Plate Through Hole)을 없애고 과거의 삽입방법 대신 표면실장(surface mount)하는 방식이 보편화되고 있다. 인쇄회로기판에 실장되는 부품을 표면실장부품(SMD: Surface Mounted Devices)이라 말하고 표면실장부품을 인쇄회로기판에 탑재하는 기계를 표면실장기계(surface mounting machine)라 한다.

표면실장부품의 제작에서부터 표면실장부품을 인쇄회로기판에 조립하는 과정에 이르기까지의 제반 관련기술들을 통칭하여 표면실장기술(SMT: Surface Mount Technology) [2] 이라 일컬으며 최근들어 전자제품의 소형화, 경량화, 고신뢰성화, 다기능화가 추구됨에 따라 표면실장기술의 개발 및 보급이 시급하게 되었다.

인쇄회로기판의 상품 경쟁력을 높이기 위해서는 생산비용을 낮추어야 하는데 생산비용의 큰 비중을 차지하는 부분이 생산소요시간이고 그 중에서도 표면실장기계가 표면실장부품을 인쇄회로기판에 실장하는 데 가장 많은 시간이 필요하다. 따라서 표면실장기계의 동작을 최적화하면 작업시간이 최소화되고 생산비용을 낮추게 되어 경쟁력을 높일 수 있다.

중소형 표면실장기계는 같은 종류의 부품을 자동공급하는

피더(feeder)를 수십개 가지고 있고 부품을 피더에서 흡착하여 인쇄회로기판에 장착하는 헤드(head)를 몇 개 가지고 있는데 헤드의 작업 경로를 결정하는 문제는 최적화 문제로서 기술적인 문제 외에 수학적 문제를 포함한다. 본 논문은 주어진 인쇄회로기판의 정보를 이용하여 피더를 최적배치하는 기법과 헤드의 최적경로를 찾아 내는 기법에 대해서 연구한다. 결과적으로 인쇄회로기판의 생산비용을 낮추고 생산효율을 높이고자 한다.

2. 외판원문제와 문제의 접근방법

2.1 외판원문제

한 외판원이 방문해야 하는 도시가 N개일 때, 특정한 한 도시를 출발하여 모든 도시를 단 한 번씩만 방문한 뒤 다시 출발점으로 되돌아오는 데 소요되는 총경비를 최소화하는 경로를 찾아내는 문제를 외판원문제라 일컫는다[4]. 여기서 총경비는 시간일 수도 있고, 거리가 될 수도있다. 외판원문제는 조합최적화문제(combinatorial optimization problem)의 한 형태이기도 하다[6]. 외판원문제의 가능한 경로의 개수는 $(N-1)!$ 개이고 최적해는 이 중 하나로서 반드시 존재한다. 물론 N값이 작은 경우에는 $(N-1)!$ 개의 경로를 모두 조사해 본 다음 그 중 총경비가 최소인 경로를 찾아내면 되겠지만 N값이 커짐에 따라 경우의 수는 기하급수적으로 증가하기 때문에 모든 경우를 조사하기에는 무리가 따른다. 과거 40년 동안 외판원문제의 최적해를 구하는 방법에 대해서 많은 연구가 진행되었는데 크게 세가지로 구분할 수 있다.

(1) 경로 구성법(tour construction)

출발점을 지정하고 그 점으로부터 다음 지점들을 하나씩 하나씩 차례대로 찾아내는 방법이다. 동적계획법(dynamic programming), 삽입발견법(insertion heuristics)[5][7], 분기및경계탐색법(branch and bound search technique)[1]이 여기에 속한다.

(2) 부경로 소거법(subtour elimination)

할당 문제의 해법을 이용하여 얻을 수 있는 부경로들을 합성하여 최적경로를 찾아내는 방법이다. 정수선형계획법(integer linear programming), 분기및경계법(branch and bound method)[8-12] 이 여기에 속한다.

(3) 경로 수정법(tour-to-tour improvement)

우선 임의의 완성된 경로를 찾아낸다. 주어진 경로를 수

정하여 원래의 총경비보다 작은 경로를 찾아내고 갱신된 경로를 다시 수정하여 총경비를 줄여나가는 이런 과정을 되풀이 하는 방법이다. 수정을 계속하다가 더 이상 총경비를 줄일 수 없을 때에 작업을 그만두게 된다.

위의 세가지 방법은 외관원문제에서 고려되는 도시, 즉 노드(node)의 수가 작은 경우에는 최적해를 구할 수 있는 반면 노드의 수가 많은 경우에는 최적해가 아닌 부최적해(suboptimum)만을 찾아낼 수 있다. 그리고 위의 알고리즘들을 이용하여 해를 구하는 데 소요되는 계산시간은 노드의 수가 커짐에 따라 지수함수적으로 증가한다.

2.2 논문의 접근방법

본 논문이 대상으로 하고 있는 표면실장기계의 조립작업은 고려해야 될 노드의 개수가 수백~수천이기 때문에 앞에서 소개한 알고리즘들을 이용해서는 최적해를 구할 수 없을 뿐더러 계산시간도 비현실적으로 많이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 여러 기존해법들의 장단점을 고려하고 인간의 판단력을 절충시킨 발견적(heuristics)[4] 접근방법을 사용한다. 본 논문이 해결해야 하는 문제는 크게 피더배치의 최적화 문제와 헤드의 작업경로 최적화문제로 나눌 수 있다. 헤드의 작업경로문제는 외관원문제로 모델링이 가능하지만 피더의 최적배치문제는 외관원문제와는 거리가 멀다. 따라서 피더 배치문제는 표면실장기계의 기계적 특성을 고려한 순수한 발견적 방법을 사용한다.

3. 문제의 설정

3.1 표면실장기계

중소형 표면실장기계의 구조는 기종에 따라 조금씩 다르다. 그러나 피더, 컨베이어, 인쇄회로기판 정지장치(stopper)의 위치와 헤드의 동작영역등 본 논문에서 필요로 하는 자료들만을 특징적으로 그려보면 그림 1 과 같다.

본 논문에서 대상으로 사용한 표면실장기계에 대한 가정은 다음과 같다. 컨베이어는 왼쪽에서 오른쪽으로 계속 움직이며 조립작업이 진행되는 동안은 정지장치가 인쇄회로기판을 고정시켜 준다. 컨베이어의 실선 부분은 고정되어 있지만 점선 부분은 전후로 이동이 가능해 여러 크기의 인쇄회로기판을 운반할 수 있게 되어 있다. 표면실장기계의 앞과 뒷부분에는 피더를 설치할 수 있게끔 일렬로 구멍이 배열되어 있다. f_i 는 피더가 설치된 후 헤드가 부품을 흡착하게 될 지점을 나타내며 첨자 F는 앞 피더 열에 있는 피더의 개수를, T는 전체 피

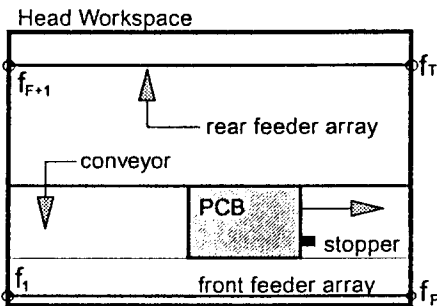


그림 1 중소형 표면실장기계의 평면도

더의 개수를 나타낸다. 대부분의 경우에 인쇄회로기판이 뒤쪽 피더열(rear feeder array)보다 앞쪽피더열(front feeder array)에 가깝다. 표면실장기계는 2~3개의 헤드를 가지고 있다. 각 헤드는 z축 회전운동이 가능하여 임의의 부품 장착각도에 맞게 장착할 수 있다. 2~3개의 헤드는 피더 열과 평행하게 배치되어 있으며 헤드간격은 고정되어 있다. 헤드의 z축 운동속도는 공압에 의해 조절이 가능하고, x, y 축 운동은 최고 제한 속도에 이를 때까지 등가속도 운동을 한다. 최고 속도는 하드웨어적 특성에 의해서 결정되고 사용자가 그 범위 내에서 지정할 수 있다.

3.2 문제의 설정

표면실장기계는 부품의 종류에 따라 노즐을 교환할 수 있는 자동노즐교환기(auto nozzle changer)를 가지고 있다. 그러나 노즐을 교환하는 데는 상당히 많은 시간이 소요되고 또 현장에 설치되어 있는 실제 조립라인은 여러 대의 표면실장기계를 같이 사용할 수 있기 때문에 노즐을 교환하지 않고도 임의의 인쇄회로기판을 완전히 조립할 수 있다. 실제로 대부분의 조립 라인에서 자동노즐교환기를 사용하지 않고 인쇄회로기판을 조립하고 있다. 본 논문에서도 자동노즐교환기는 사용하지 않는다고 가정한다. 헤드의 개수는 2개이고 두 헤드의 간격은 피더 간격의 3배로 가정하며, 이에 따라 동시흡착이 가능하다. 또한 각 헤드당 1개의 노즐을 사용, 모두 2개의 노즐을 사용하는 경우를 고려한다. 각 부품의 사용 가능 노즐은 유일하다고 가정한다. 한 종류의 부품은 한 개의 피더만 사용할 수 있고 피더의 개수는 제한이 없다. 헤드의 z축 운동은 x, y 방향으로 정지한 상태에서만 가능하며 z축 회전 운동은 x, y 운동 중에도 가능하다. x, y 운동속도는 그림 2 와 같다. 여기서, T_a 는 등가속 운동을 시작하여 최고 제한속도에 이를 때까지 소요되는 시간이며, T_c 는 등속 운동을 하는 시간이고, T_d 는 등감속 운동을 시작하여 정지 상태에 도달하는 데 소요되는 시간을 나타내며, V_h 는 최고 제한 속도를 나타낸다. T_a , T_c , T_d , V_h 는 모두 상수이고, T_a 와 T_d 는 같다.

본 논문의 목적은 인쇄회로기판의 조립시간을 최소화하는 데에 있다. 따라서 목적함수는 특정 인쇄회로기판의 조립에 소요되는 총시간으로 정의한다. 목적함수를 정의하기에 앞서 사용되는 문자의 정의는 다음과 같다.

P_0 : 헤드의 초기 위치

P_i : 헤드가 부품을 흡착 또는 장착하게 되는 위치

N : $n(P_i)$, 즉 P_i 의 개수

d_{ij} : distance(P_i, P_j), 즉 P_i 와 P_j 사이의 거리

t_{ij} : time(P_i, P_j) 단 i, j , 즉 헤드가 P_i 와 P_j 사이를 움직이는 데 소요되는 시간

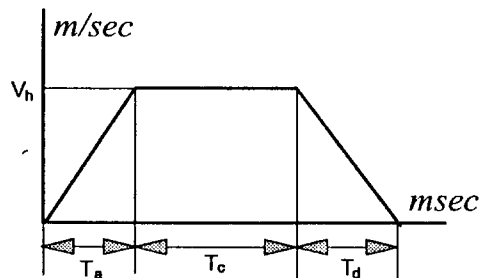


그림 2 헤드의 x,y방향 운동속도

t_u : P_i 에서 부품을 흡착 또는 장착하는 데 소요되는 시간
 $c(t)$: 목적함수

목적함수인 총 작업소요시간 $c(t)$ 는 x, y 방향 운동시간과 z 방향 운동시간으로 구성된다.

(1) x, y 방향 운동 시간

P_i, P_j 의 좌표가 각각 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 일 때 두 지점 P_i 와 P_j 사이의 거리 d_{ij} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$d_{ij} = d_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.1)$$

헤드의 x, y 운동은 그림 2와 같이 움직이는데 움직여야 할 거리가 짧은 경우에는 최고 제한속도인 V_h 에 도달하기도 전에 다시 감속운동을 하게 된다. 따라서 x, y 방향 운동 시간은 두 경우로 나누어서 계산해야 한다. 계산하기에 앞서 두 경우의 거리 경계치, T_h 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_h &= \frac{1}{2} \times T_a \times V_h + \frac{1}{2} \times T_d \times V_h \\ &= 2 \times \left(\frac{1}{2} \times T_a \times V_h \right), \quad T_a = T_d \\ &= T_a \times V_h \end{aligned} \quad (3.2)$$

서로 다른 두 지점 P_i 와 P_j 사이에 소요되는 시간 t_{ij} 는 d_{ij} 가 T_h 보다 큰 경우와 작은 경우로 나누어서 계산할 수 있다.

① $d_{ij} \geq T_h$ 인 경우

그림 2에서 사다리꼴의 면적이 헤드가 움직인 거리이므로 d_{ij} 는

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \frac{1}{2} \times T_a \times V_h + T_c \times V_h + \frac{1}{2} \times T_d \times V_h \\ &= (T_a + T_c) \times V_h, \quad t_{ij} = 2T_a + T_c \\ &= (t_{ij} - T_a) \times V_h \end{aligned} \quad (3.3)$$

따라서 t_{ij} 는 다음과 같다.

$$t_{ij} = T_a + \frac{d_{ij}}{V_h} \quad (3.4)$$

② $d_{ij} < T_h$ 인 경우

이 경우에는 그림 3과 같이 최고 제한 속도인 V_h 보다 낮은 값인 V_p 에서부터 감속운동을 한다. 그림 3에서의 가감속 운동은 그림 2인 경우와 동일하므로 V_p 는 다음과 같다.

$$V_p = \frac{V_h}{T_a} \times \frac{t_{ij}}{2} \quad (3.5)$$

그리고 d_{ij} 는 삼각형의 면적이므로

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \frac{1}{2} \times t_{ij} \times V_p \\ &= \frac{1}{2} \times t_{ij} \times \left(\frac{V_h}{T_a} \times \frac{t_{ij}}{2} \right) \\ &= \frac{1}{4} \times \frac{V_h}{T_a} \times t_{ij}^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

따라서 t_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{ij} = 2 \times \sqrt{d_{ij} \times \frac{T_a}{V_h}} \quad (3.7)$$

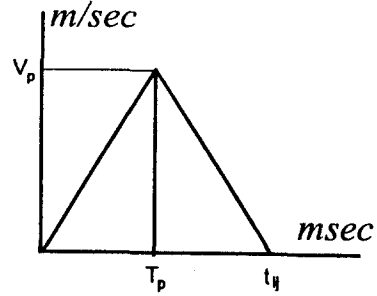


그림 3 $d_{ij} < T_h$ 인 경우의 x, y 방향 운동속도

(2) z 방향 운동 시간

z 방향 운동 속도는 공압에 의해 결정되는 것으로 공압이 변하지 않으면 속도도 일정하다. 즉 헤드가 부품을 흡착거나 장착하기 위해서 아래로 내려갔다 다시 올라오는 데 소요되는 시간은 일정한 셈이다. 따라서 t_u 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_u = T_z \quad (3.8)$$

여기서 T_z 는 공압에 의해서 결정되는 상수를 나타낸다.

(3) 목적함수

헤드가 지나갈 수 있는 링크(link: P_i 와 P_j 를 연결하는 선분)의 개수는 $n_1 C_2$ 이고 완성된 작업 경로는 N 개의 링크로 구성된다. 구성된 작업경로가 실제로 작업을 완수하기 위해서는 찾아낸 N 개의 링크를 사용하여 헤드가 초기위치에서부터 출발하여 모든 P_i 를 거쳐야 한다. 이런 조건을 만족하는 N 개 링크에 해당되는 시간 t_{ij} 를 원소로 갖는 집합을 F_i 라 정의한다.

$$F_i = \{ t_{ij} \mid t_{ij} \text{ is one of link times in one feasible path} \}$$

동시 흡착, 장착되는 P_i 를 원소로 갖는 집합을 S_p 라 정의하면 총 작업시간인 목적함수 $c(t)$ 는 x, y 방향 운동시간과 z 방향 운동시간들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c(t) &= \sum_{i \in F_i} t_{ij} + \left(\sum_{i=1}^N t_{ij} - \frac{\sum t_{ij}}{2} \right) \\ &= \sum_{i \in F_i} t_{ij} + \left(N - \frac{n(S_p)}{2} \right) \times T_z \end{aligned} \quad (3.9)$$

4. 최적 피더 배치 알고리즘

표면실장기계의 동작 중 가장 많은 시간을 필요로 하는 작업은 자동노즐교환이고 그 다음으로 헤드가 부품을 흡착하는데 많은 시간이 필요하다. 두 가지의 노즐을 사용한다고 가정했기 때문에 가장 많은 시간을 소요하는 작업은 흡착이다. 그리고 헤드의 간격은 피더 간격의 정수배로 가정하여, 두 부품을 동시에 흡착할 수 있다. 따라서 동시흡착을 최대한 가능하게 하는 것이 피더를 최적배치할 수 있는 방법이다. 동시에 피더의 위치가 해당부품의 장착점에 가까울수록 시간을 줄일 수 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 우선 일련의 부품목록을 이용하여 부품의 우선순위를 결정한다. 다음, 피더의 위치에 따라 피더의 우선순위를 결정한다. 마지막으로 이렇게 구한 부품, 피더의 우선 순위를 이용하여 부품을 피더에 배치한다.

4.1 부품의 우선순위

본 알고리즘에서 사용하는 문자들의 정의는 다음과 같다.

- N_i : i 번째 노즐
- C_j : i 번째 노즐을 사용하는 j 번째 부품의 종류
- N'_j : i 번째 노즐을 사용하며 우선순위가 j 번째인 부품종류
- E_i : i 번째 노즐을 사용하는 부품종류의 가지수 $n(C_i)$, $n(N'_i)$: C_i 나 N'_i 가 가지고있는 부품의 장착회수
- D_i : i 번째 우선순위의 동시흡착용 피더쌍(pair)
- S_i : i 번째 우선 순위의 단일흡착용 피더
- a : $\min(E_1, E_2)$, E_1 과 E_2 중 작거나 같은 값
- k : 두 노즐중 부품종류의 가지수가 큰 쪽의 첨자

부품의 우선순위를 결정하는 순서는 다음과 같다.

- (a) N_i 를 사용하는 E_i 개의 C_j 를 해당부품수의 크기순으로 재배열하여 N'_j 를 구한다.
 - (b) N'_1 과 N'_2 를 부품수가 큰 것부터 쌍으로 연결하여 a 개의 D_i 를 구한다.
 - (c) D_i 를 구하고 남은 N'_k 를 S_i 로 정의한다.
- 이렇게 하여 구한 D_i , S_i 의 우선순위는 다음과 같다.
- $$D_1 > D_2 > \dots > D_a > S_{a+1} > S_{a+2} > \dots > S_{E_k}$$

4.2 피더의 우선순위

본 알고리즘에서 사용하는 문자들의 정의는 다음과 같다.

- $d(P_i, P_j)$: 점 P_i 와 점 P_j 사이의 거리
- f_i : i 번째 피더의 위치
- CENTER : 장착점의 무게 중심
- d_r : CENTER에서 앞쪽 피더열에 이르는 최소 거리
- d_b : CENTER에서 뒤쪽 피더열에 이르는 최소 거리

인쇄회로기판의 종류가 달라짐에 따라 CENTER의 위치도 변하기 때문에 CENTER의 위치에 따라 ($d_r < d_b$) 인 경우와 ($d_r > d_b$) 인 경우로 나눌 수 있다. 그러나 ($d_r > d_b$)인 경우는 ($d_r < d_b$) 인 경우의 앞 피더열과 뒤쪽 피더열이 바뀐 경우이기 때문에 대칭시켜 고려하면 된다. 따라서 ($d_r < d_b$) 인 경우만 고려한다. 이 경우의 개념도는 그림 4 와 같다. 그림 4 에 표시된 A, B, C, D 는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \{ f_{i-1}, f_i, f_{i+1} \mid d(\text{CENTER}, f_i) \leq d \}$$

$$B = \{ f_i \mid d(\text{CENTER}, f_i) \leq \max[d(\text{CENTER}, f_i), d(\text{CENTER}, f_r)], F < i \leq T \}$$

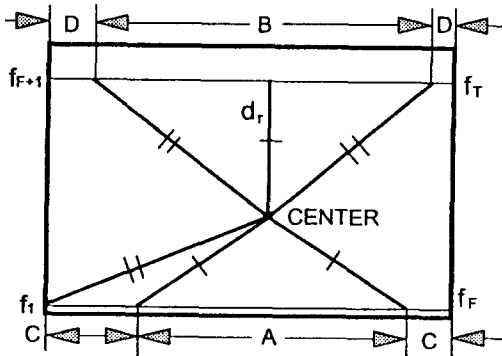


그림 4 피더의 우선순위

$$C = \{ f_1, f_2, \dots, f_F \} - A$$

$$D = \{ f_{F+1}, f_{F+2}, \dots, f_T \} - B \tag{4.1}$$

그림 4 에서 A에 f_{i-1} , f_{i+1} 을 포함한 것은 되도록이면 동시 장착 피더쌍을 앞 피더열에 많이 배치하기 위한 것이다. B에 위치한 피더들이 C에 존재하는 피더보다 인쇄회로기판에 가까운 확률이 높기 때문에 영역의 우선순위는 A,B,C,D 순이고 각 영역내에서의 피더점의 우선순위는 인쇄회로기판의 중심 점에서의 거리가 가까울수록 높다.

4.3 최적 피더 배치

동시흡착의 기회를 제공하는 동시흡착용 피더쌍 D_i 는 단일 흡착용 피더 S_i 보다 효율이 높기 때문에 D_i 를 먼저 피더에 배치하고 S_i 를 나중에 배치한다. 그림 4 에서 피더의 우선순위가 높은 A에서부터 B,C,D순으로 D_i 를 배치한다. S_i 의 배치는 두 가지 경우로 나누어서 고려할 수 있다.

- (1) 모든 D_i 가 A에 배치가 가능한 경우 p 를 다음과 같이 정의한다.

$$p \equiv \sum_{i=1}^a [n(N'_1) - n(N'_2)] \tag{4.2}$$

다음과 같이 p 의 부호에 따라 세가지로 나누어서 S_i 를 배치한다

- ① $p = 0$: A,B,C,D 순으로 S_i 를 배치
- ② $p > 0$: $k=1$ 이면 A,B,C,D 순으로 S_i 를 배치하고 $k=2$ 이면 우선 다음식을 만족하는 l 의 최대값 L 을 찾는다.

$$\sum_{i=1}^l n(N_i^{*i}) \leq p \tag{4.3}$$

L 개의 S_{a+1}, \dots, S_{a+L} 이 모두 A에 배치되면 A,B,C,D순으로 나머지 S_i 를 배치하고 그렇지 않은 경우에는 C에 배치하다가 S_{a+1}, \dots, S_{a+L} 이 모두 배치되면 바로 B,C,D순으로 나머지 S_i 를 배치한다.

- ③ $p < 0$: $k=2$ 이면 A,B,C,D순으로 S_i 를 배치하고 $k=1$ 이면 다음 식을 만족하는 l 의 최대값 L 을 찾아서 앞의 (1)-②와 동일한 방법을 사용하여 S_i 를 배치한다.

$$\sum_{i=1}^l n(N_i^{*i}) \leq p \tag{4.4}$$

- (2) A가 모든 D_i 를 수용하지 못하는 경우

아래 피더열에 있는 D_i 의 개수를 b 라고 정의했을 때 p 는 다음과 같이 정의된다.

$$p \equiv \sum_{i=1}^b [n(N'_1) - n(N'_2)] \tag{4.5}$$

나머지 절차는 앞의 (1)의 경우와 동일하다.

5. 최적 작업경로 생성 알고리즘

헤드의 작업경로문제는, 장착점의 개수를 N 이라 했을 때 $1.5N \sim 2N$ 개의 노드가 존재하는 외판원 문제로 인식할 수 있다. 작업경로 문제의 목적함수는 시간함수이기 때문에 노드 사이를 움직이는데 소요되는 시간외에 각 노드에서 부품을 흡착하는 데 필요한 시간도 목적함수에 고려되어야 한다. 따라서 노드사이를 움직이는데 소요되는 총시간을 줄이는 것은 물론이고 흡착회수를 줄이는 것도 최적화의 목적이다.

즉 되도록이면 동시흡착을 한 후 인쇄회로기판으로 가서 장착을 해야 하는 것이다. 대략적인 작업순서는, 우선 동시흡착가능 부품을 흡착한 후 단일흡착용 부품을 나중에 조립하도록 한다. 그리고 가능한 한 두 헤드에 두 부품을 흡착한 후 인쇄회로기판으로 가서 장착하도록 한다.

최적 작업경로를 찾아내기 위해, 2.2 절에서 제시한 발견법을 이용하기 위해서는 알고리즘을 크게 초기경로를 결정하는 부분과 찾아낸 초기경로를 조금씩 수정하여 최적해에 접근하도록 하는 부분으로 나누어야 한다.

5.1 초기작업경로 생성 알고리즘

헤드의 최적 작업경로 생성 알고리즘은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 동시흡착용 피더쌍중 한 개를 선택하여 초기작업지점으로 정의한다.
- 동시흡착용 부품만을 조립하는데, 헤드의 현재위치에서 가장 가까운 위치를 다음 작업지점으로 정의하는 방법으로 작업순서를 결정한다.
- 단일흡착용 부품을 조립한다. 한 개의 부품을 흡착한 후 현재 헤드가 위치한 피더열에 사용되지 않은 헤드로써 흡착할 수 있는 부품이 존재하면 그 부품이 위치한 피더로 가서 흡착하고, 존재하지 않으면 한 개의 부품만을 흡착한 상태에서 인쇄회로기판으로 가서 장착한다.

(a)~(c)를 수행하게 되면 헤드가 임의의 동시흡착 피더점으로부터 작업을 시작한 후 흡착을 반복하여 모든 장착점에 부품을 조립하는 하나의 완성된 경로를 찾게 된다.

5.2 경로수정을 통한 최적해 접근기법

앞의 5.1절에서 찾아낸 초기경로는 헤드의 현재위치에서 가장 가까운 지점으로 이동하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 현재의 관점에서 가장 가까운 점이라고 해서 전체경로의 총 경비를 반드시 절감시켜주는 것은 아니다. 오히려 그 점을 택함으로써 더 나은 경로를 찾지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 경로수정의 방법을 사용한다.

일반적인 경로수정법에 대해서 간단히 설명하자면, 초기경로의 링크중 가장 불합리하다고 생각되는 것을 찾아내어 그 링크 대신 다른 가능한 몇 개의 링크를 선택한다. 교체된 각 링크에서부터 초기경로를 결정하는 방식으로 새로운 경로를 찾아낸 후 그 중 목적함수값이 가장 작은 경로를 선택하는 방법을 말한다.

전체 경로를 구성할 때 앞 부분을 먼저 결정하고 순차적으로 뒷부분을 찾아 나가기 때문에 뒷부분보다는 앞부분이 전체경로를 결정하는 데에 더 큰 역할을 한다. 따라서 경로수정은 앞부분에서 주로 이루어져야 하고, 초기 경로에 사용된 링크 중 어느 한 링크가 불합리하다고 판단할 수 있는 근거가 불명확하기 때문에 특정 순서에 있는 링크보다 작업순서상 앞쪽에 있는 링크에 대해서 일률적으로 수정작업을 한다.

알고리즘에 사용될 문자의 정의는 다음과 같다.

- L : 초기경로의 링크의 개수
- l_i : 임의의 경로의 순서상 i번째에 위치한 링크(헤드가 정지하는 임의의 두 점을 연결하는 선분)
- B : 수정될 링크의 개수, $B \leq L$

- r_i : i번째 노드에서 출발하는 링크 중 j번째로 짧은 링크
- R : 각 링크의 최대 반복수정회수

초기경로를 수정하여 최적해에 접근하는 방법은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 초기경로에 R개 이하의 r_i 를 대체시킨 최대 R개의 경로를 구한다($i = 1$)
- 앞 단계에서 구한 최대 R개의 각 경로의 l_{i+1} 를 R개 이하의 r_i 로 대체시킨 후 최대 R^{i+1} 개의 경로를 찾는다.
- $i < (B-1)$ 면 $i = i+1$ 하고 (b)로 되돌아 간다.
- 지금까지 찾아낸 최대 R^B 개 경로중 목적함수값을 최소로 하는 경로를 부최적해라 정의한다.

위의 알고리즘을 이용하여 찾아낸 경로는 초기경로보다 작은 목적함수값을 갖는 것은 당연하지만 최적해라고 볼 수는 없다. 다만 주어진 초기경로를 이용해서 구할 수 있는 협의의 최적해, 즉 부최적해인 것이다.

6. 모의 실험

제안된 알고리즘의 성능평가를 위해서, 실제 한 전문조립업체에서 생산되고 있는 인쇄회로기판을 실험대상으로 삼는다. 이 인쇄회로기판은 80개의 장착점과 16가지의 부품종류를 가지고 있다. 조립을 수행하는 표면실장기계의 xy방향 최고운동속도는 0.1 m/s 이고, 가속도는 0.042 m/s² 이다. 그리고 흡착에 소요되는 시간은 0.2 sec 이다.

성능평가를 위해 세가지 유형의 실험이 수행된다. 처음에는, 수정되는 링크의 개수를 네개로 고정시키고 각 링크의 최대 반복수정회수를 1~6 만큼 변화시켰을 때의 결과를 구해본다. 두번째, 링크의 최대 반복수정회수를 세번으로 고정시키고 수정되는 링크의 개수를 1~9 까지 변화시켰을 때의 결과를 구해본다. 처음과 두번째 실험은 최적 피더배치 알고리즘에 의한 피더배치를 사용한 경우이다. 그와는 달리, 전문가에 의한 피더배치를 사용하는 실험을 마지막으로 수행하는데 링크의 최대 반복수정회수는 세번으로 고정하고 수정되는 링크의 개수를 1~9 만큼 변화시켜서 결과를 얻는다. 각 경우의 실험결과를 그림 5, 그림 6, 그림 7 과 같다. 각 그래프의 x축은 링크의 최대 반복수정회수나 수정되는 링크의 개수를 나타내고 y축은 알고리즘에 의해 작성된 조립작업의 소요시간을 나타낸다. 초기값은 전문가에 의해서 구성된 작업의 소요시간을 나타낸다. 링크의 최대 반복수정회수를 3으로 고정하고 9개의 링크를 수정하였을 때, 최적 작업경로생성 알고리즘을 적용하게 되면 전문가에 의한 조립작업소요시간의 0.5%를 줄일 수 있고 최적 피더배치 알고리즘과 최적 작업경로생성 알고리즘을 동시에 적용하게 되면 약4%의 작업소요시간을 줄일 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 표면실장기계의 조립작업소요시간을 최소화하는 목적으로 최적통합환경을 제공하는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘을 최적피더배치 알고리즘과 최적작업경로생성 알고리즘으로 나누어서 고려하였고, 실제 생산되고 있는 인쇄회로기판을 대상으로 모의실험을 하였다. 수정되는 링크의 개수를 9개로 정의하여 얻은 조립작업의 소요시간은 전문가에 의해 구성된 조립작업에 비해 약4%가 줄어들었다. 최적화할 대상의 링크의 개수가 많고 수정회수를 증가시키게 되면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 예상된다.

조립되는 인쇄회로기판의 종류가 다양한 경우에는 한 대의 표면실장기계로는 작업이 불가능하다. 이 경우에는 여러대의 표면실장기계를 인라인시스템(in line system)으로 구성하여 조립작업을 수행하게 되는데, 각 표면실장기에 어떤 작업을 할당할 것인가하는 작업할당문제가 발생한다[3]. 다품종소량 생산의 추세에 대처해나가기 위해서는 작업할당문제에 대한 많은 연구가 필요할 것이다.

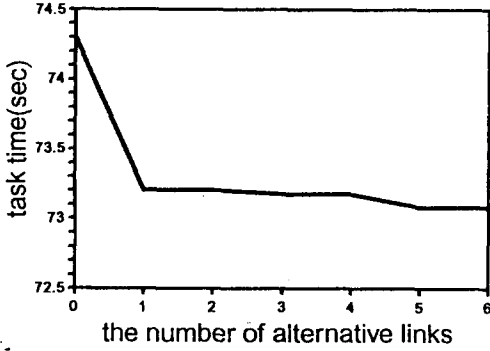


그림 5 최적 피더배치를 사용하고 B=4, R=1~6인 경우

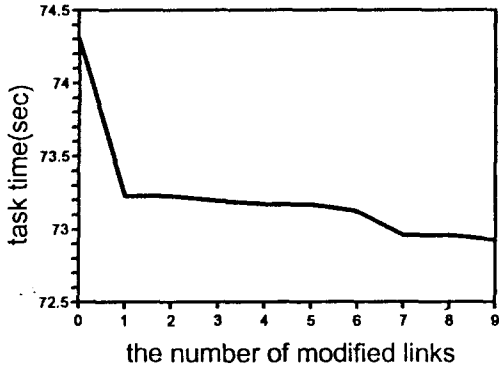


그림 6 최적 피더배치를 사용하고 R=3, B=1~9인 경우

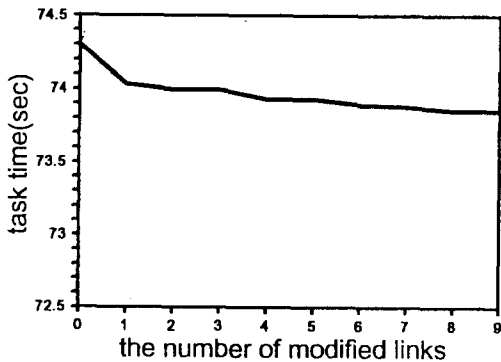


그림 7 주어진 피더배치를 사용하고 R=3, B=1~9인 경우

- [1] Dr. Dimitrios A. Andreou, " Optimization of the Traveling Sequence of a Pick-and-Place Robot by Simulating its Operation as a Traveling Salesman Problem ", The 21th Annual Simulation Symposium, pp.91-105, 1988.
- [2] Dennis Measor and Greg Mesko, " Optimizing the SMT Process Through Computer Integrated Manufacturing ", Surface Mount Technology, Oct, 1988.
- [3] K. Feldmann, " Optimization of Set-up Strategies for Operating Automated SMT Assembly Lines ", Annals of the CIRP, Vol.40, pp.433-436, 1991.
- [4] S.Lin and B. W. Kernighan, " An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem ", Opns. Res., Vol.21, pp.498-516, 1973.
- [5] Timo Leipala and Olli Nevalainen, " Optimization of the Movements of Component Placement Machine ", European Journal of Opns. Res., Vol.38, pp.167-177, 1989.
- [6] A. Nijenhuis and H.Wilf, " Combinatorial Algorithms ", Academic Press.
- [7] Michael O. Ball, " Sequencing of Insertions in Printed Circuit Board Assembly ", Opns. Res., Vol.36, No.2, pp.192-201, 1988.
- [8] Bezalel Gavish, " An Optimal Solution Method for Large-Scale Multiple Traveling Salesman Problems ", Opns. Res., Vol.34, No.5, pp.698-717, 1986.
- [9] Patrick Jaillet, " A Priori Solution of a Traveling Salesman Problem in Which a Random Subset of the Customers Are Visted ", Opns. Res., Vol.36, No.6, pp.929-936, 1988.
- [10] James N. Eagle, " An Optimal Branch-And-Bound Procedure for the Constrained Path, Moving Target Search Problem ", Opns. Res., Vol.38, No.1, pp.110-114, 1990.
- [11] M. Padberg and G. Rinaldi, " A Branch-And-Cut Approach to a Traveling Salesman Problem with Side Constraints ", Management Science, Vol.35, No.11, 1989.
- [12] Odile Marcotte and Richard M. Soland, " An Interactive Branch-And-Bound algorithm for Multiple Criteria Optimization ", Management Science, Vol.32, No.1, 1986.