

# 정수계획법에 의한 다수 표면실장기의 라인 최적화

## Integer Programming Approach to Line Optimization of Multiple Surface Mounters

김경민\*, 박태형\*\*

삼성전자(주) 정보통신총괄 무선사업부\*, 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부\*\*

Kyung-Min Kim(semcoacl@empal.com)\*, Tae-Hyoung Park(taehpark@chungbuk.ac.kr)\*\*

### 요약

다수 대의 표면실장기를 포함한 PCB 조립라인의 생산성 향상을 위한 방법을 제시한다. PCB 조립시간의 단축을 위하여 각 실장기 별로 부품공급 피더의 배치 및 실장순서가 최적화 되어야 하며, 표면실장기들의 라인 밸런스를 위하여 부품 할당이 최적화 되어야 한다. 전체의 최적화 문제를 정수계획문제로 수식화 하며, 전향경로문제와 후향경로 문제로 분할하여 구성한다. 클러스터링 알고리즘과 branch-and-bound 알고리즘을 사용하여 전향경로문제의 해를 구하며, 할당 알고리즘과 연결 알고리즘을 사용하여 후향경로문제의 해를 구한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법의 성능을 평가한다.

■ 중심어 : | PCB 조립라인 | 표면실장기 | 최적화 | 정수계획 | 라인밸런스 |

### Abstract

We propose an optimization method for PCB assembly lines including multiple surface mounters. To increase the productivity of PCB assembly line, the component allocation, feeder assignment, and assembly sequence of each surface mounter should be optimized. The optimization problem is formulated as an integer programming problem. We divide the overall problem into two hierarchical sub-problems: forward-path problem and backward-path problem. The clustering algorithm and branch-and-bound algorithm are applied to solve the forward-path problem. The assignment algorithm and connection algorithm are applied to solve the backward-path problem. Simulation results are presented to verify the usefulness of the proposed method.

■ keyword : | PCB Assembly Line | Surface Mounter | Optimization | Integer Programming | Line Balancing |

## 1. 서론

SMT(surface mount technology) 라인은 표면실장형 부품(SMD: surface mount device)을 인쇄회로기판(PCB : printed circuit board)에 조립하는 전자조립시스템이다. 휴대폰, 노트북, PDA 등 각종 전자 제품의 소

형 경박화 추세에 따라 전자 부품들은 기존의 삽입형에서 표면실장형으로 대체되고 있다. SMT 라인은 크게 스크린프린터 공정, 표면실장기 공정, 리플로우어 공정으로 분류된다. 이 중 표면실장기 공정은 전체 PCB 조립 시간과 생산성에 가장 큰 영향을 주며, 통상 2-4대의

\* 본 연구는 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

접수번호 : #060331-001

접수일자 : 2006년 03월 31일

심사완료일 : 2006년 04월 07일

교신저자 : 박태형, e-mail : taehpark@chungbuk.ac.kr

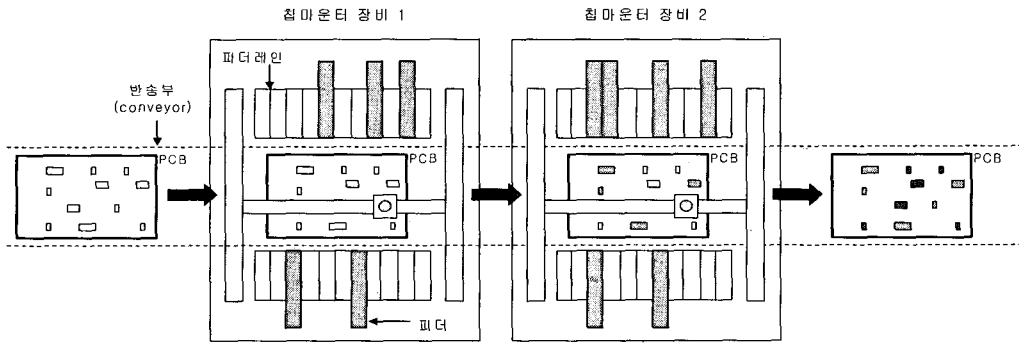


그림 1. 단일헤드 겐트리형 표면실장기 라인의 예

표면실장기를 운용하여 수백 개에서 수천 개에 이르는 부품을 실장한다.

표면실장기는 기본적으로 피더에서 부품을 흡착하여 PCB 보드 상의 지정된 위치에 부품을 장착하는 메커니즘을 갖으며, 부품을 흡착 및 장착하는 조립헤드, 조립헤드를 이동시키는 프레임, 부품을 공급하는 피더(feeder), PCB를 이동시키는 반송부 등으로 구성된다. 표면실장기는 기구적 구조에 따라 로터리형, 겐트리형 및 듀얼 겐트리형으로 구분될 수 있으며[1], 본 논문은 [그림 1]과 같이 조립헤드의 수가 하나인 단일헤드 겐트리형 표면실장기로 구성된 라인을 대상으로 한다.

표면실장기의 PCB 조립시간은 피더배치 및 조립순서에 크게 영향을 받는다. 또한 다수 대의 표면실장기가 하나의 PCB에 나누어 부품을 조립하는 경우, 각 표면실장기 간의 작업 밸런스가 전체 조립시간에 크게 영향을 준다. 표면실장기의 라인 최적화 문제는 작업 밸런스를 고려하여 전체 조립시간을 최소화하는 문제로서, 부품할당, 피더배치 및 조립순서를 적절하게 결정하는 문제이다.

표면실장기의 최적화 문제는 각 결정 변수가 상호 영향을 깊이 주는 비선형 문제로서, 최적해를 구하는 것이 계산적으로 매우 어렵다고 알려져 있다[2][3]. 따라서 전체 문제를 몇 개의 문제로 분할하고 이를 계층적으로 구성하여 근사적으로 최적해를 구하는 발전적 기법(heuristic)에 의한 접근이 시도되고 있다[2-6].

본 논문은 단일헤드 겐트리형 표면실장기로 구성된 라인 최적화를 위한 새로운 방법을 제시한다. 전체 라인

최적화 문제는 비선형 정수계획문제로 모델링하며, 전체 문제를 전향경로 최적화 문제와 후향경로 최적화 문제로 분리하여 구성한다. 라인 밸런스를 위한 부품할당과 피더배치, 전향경로 문제를 통합하여 비선형 기반의 branch and bound 알고리즘을 적용한다. 또한 조립순서 문제를 해결하기 위해서 할당 알고리즘과 연결 알고리즘을 적용한다. 모의 표면실장기 라인에 대한 비교 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방법의 유용성을 검증한다.

## II. 표면실장기 라인의 최적화 문제

[그림 2]는 단일헤드 겐트리형 표면실장기의 조립 사이클을 보여준다. PCB 상에 부품이 장착되는 위치를 장착점이라 하고, 피더로부터 부품을 흡착하는 위치를 흡착점이라 한다. 조립헤드는 흡착점으로 이동하여 부품을 흡착하고 이를 장착점으로 이동하여 부품을 장착한다. 흡착점에서 장착점으로의 이동경로는 전향경로(forward path)라 하며, 장착점으로부터 흡착점까지의 이동경로는 후향경로(backward path)라 한다. 하나의 조립헤드는 '부품 흡착 - 전향경로 이동 - 부품 장착 - 후향경로 이동'의 사이클을 반복적으로 수행하며 PCB 상의 모든 장착점에서 부품을 실장한다.

한 사이클 당 소요되는 시간은 흡착시간, 전향경로 이동시간, 장착시간 그리고 후향경로 이동시간의 합으로 표현된다. 이 중 흡착시간 및 장착시간은 조립헤드의 Z축 이동 시간 및 대기 시간이므로 피더배치나 조립순서

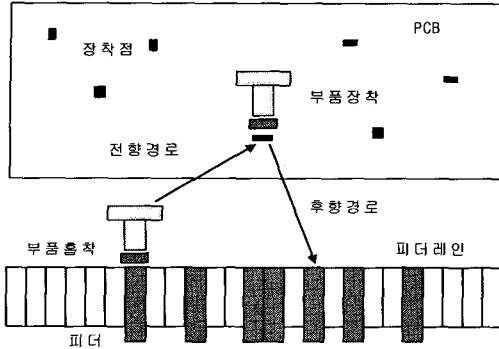


그림 2. 조립 사이클

의 변경과 무관하게 일정한 값을 갖는다. 한 사이클 당 조립헤드의 XY축 이동에 소요되는 시간  $t(i, l, j)$  은 다음과 같다.

$$t(i, l, j) = t(i, l) + t(l, j) \quad (1)$$

단,  $t(i, l)$  은 장착점  $i$  에서 피더라인  $l$  까지 후향 경로 이동시간이며,  $t(l, j)$  는 피더라인  $l$  에서 장착점  $j$  까지 전향경로 이동 시간이다.

장착점 집합  $P$ , 부품타입 집합  $C$ , 피더라인 집합  $L$  및 표면실장기 장비 집합  $M$  을 다음과 같이 정의한다.

$$P = \{1, 2, \dots, n_P\} \quad (2)$$

$$C = \{1, 2, \dots, n_C\} \quad (3)$$

$$L = \{1, 2, \dots, n_L\} \quad (4)$$

$$M = \{1, 2, \dots, n_M\} \quad (5)$$

단,  $n_C \leq n_P$ 이다. 또한 장착점에 대한 부품타입을 지정하는 함수를  $\tau: P \rightarrow C$ , 피더라인에 배치된 피더의 부품타입을 지정하는 함수를  $\sigma: L \rightarrow C$  이라 정의한다. 부품타입  $c \in C$  에 해당하는 장착점의 집합  $P_c$  은 다음

과 같다.

$$P_c = \{p \in P \mid \tau(p) = c\} \quad (6)$$

장착점  $p \in P$  에 대한 소속 장비를 지정하는 함수를  $\sigma: P \rightarrow M$  이라 정의하며, 장비  $m \in M$  에 속하는 장착점의 집합  $P^m$  은 다음과 같다.

$$P^m = \{p \in P \mid \sigma(p) = m\} \quad (7)$$

장비  $m \in M$  에 속하며 부품타입  $c \in C$  에 해당하는 장착점의 집합  $P_c^m$  은 다음과 같다.

$$P_c^m = \{p \in P \mid \tau(p) = c, \sigma(p) = m\} = P_c \cap P^m \quad (8)$$

피더라인 집합  $L$  은 한 라인을 구성하는 모든 장비의 피더라인을 포함한다. 장비  $m \in M$  에 속한 피더라인 집합을  $L^m$  이라 정의하며 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$L^1 \cup L^2 \cup \dots \cup L^m \cup \dots \cup L^{n_M} = L \quad (9)$$

$$L^i \cap L^j = \emptyset, \quad i, j \in M, i \neq j \quad (10)$$

또한  $|L^m|$  은 장비  $m \in M$  의 사용가능한 피더라인의 수를 의미한다.

각 피더라인  $l \in L$  의 흡착도수를  $\lambda(l)$  이라 정의한다. 모든 피더라인에 대하여  $\lambda(l) > 0$  을 만족하며, 장비  $m \in M$  에 대하여 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\sum_{l \in L^m} \lambda(l) = |P^m| \quad (11)$$

각 부품타입  $c \in C$  의 피더배치수량을  $\mu_c$  이라 정의

한다. 모든 부품타입에 대하여  $\mu_c = 1$  인 피더배치를 단 일피더배치라 하며,  $\mu_c > 1$  인 부품타입이 존재하는 피더배치를 다중피더배치라 한다. 본 논문은 다중피더배치를 고려하며, 이 때 각 부품타입에 대한  $\mu_c$  는 미리 주어지는 값이라 가정한다.

피더배치변수  $x_{cl} \in \{0, 1\}$ , 전향경로변수  $y_{lp} \in \{0, 1\}$  및 후향경로변수  $z_{pl} \in \{0, 1\}$  을 다음과 같이 정의한다.

$$x_{cl} = \begin{cases} 1, & \text{피더라인 } l \in L \text{ 에 부품타입 } c \in C \text{ 의} \\ & \text{피더가 배치된 경우} \\ 0, & \text{나머지 경우} \end{cases} \quad (12)$$

$$y_{lp} = \begin{cases} 1, & \text{피더라인 } l \in L \text{ 에서 장착점 } p \in P \text{ 로의} \\ & \text{전향경로가 존재하는 경우, 단 } \xi(l) = \tau(p) \\ 0, & \text{나머지 경우} \end{cases} \quad (13)$$

$$z_{pl} = \begin{cases} 1, & \text{장착점 } p \in P \text{ 에서 피더라인 } l \in L \text{ 로의} \\ & \text{후향경로가 존재하는 경우} \\ 0, & \text{나머지 경우} \end{cases} \quad (14)$$

피더배치변수는 전체 피더라인 집합  $L$  에 대한 변수이므로 피더배치문제는 각 장비 별 할당 부품을 결정하는 부품할당 문제를 포함한다.

표면실장기의 라인 최적화 문제는 피더배치변수, 전향경로변수, 후향경로변수를 결정변수로 하는 다음의 비선형 정수계획문제로 정의될 수 있다.

$$\min \max_m \{ W_m \} \quad (15)$$

s.t

$$W_m = \sum_{l \in L} \sum_{c \in C} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} t(i, l, j) x_{cl} y_{lj} z_{il}, \quad \forall m \in M \quad (16)$$

$$\sum_{c \in C} x_{cl} \leq 1, \quad \forall l \in L \quad (17)$$

$$\sum_{l \in L} x_{cl} = \mu_c, \quad \forall c \in C \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in L} x_{cl} \leq |L^m|, \quad \forall m \in M \quad (19)$$

$$\sum_{l \in L} y_{lj} = 1, \quad \forall j \in P \quad (20)$$

$$\sum_{l \in L} z_{il} = 1, \quad \forall i \in P \quad (21)$$

$$\sum_{j \in P} y_{lj} = \sum_{i \in P} z_{il}, \quad \forall l \in L \quad (22)$$

$$\sum_{l \in L^m} \sum_{i \in S^m} \sum_{j \in S^m} x_{r(i)} y_{lj} z_{jl} \leq |S^m| - 1, \quad \forall m \in M \quad (23)$$

목적함수 (15)는 모든 장비에 대해, 최대 작업량( $W_m$ )을 갖는 표면실장기의 총 조립 시간을 최소화한다는 의미이다. (16)은 장비  $m$ 의 작업량을 의미하며, 각 장비의 작업량은 조립헤드의 총 이동 시간이다. (17)은 하나의 피더라인에는 하나의 부품 피더가 배치되어야 하고, (18)은 각 부품타입 당  $\mu_c$  개의 피더를 배치한다는 것을 의미한다. (19)는 각 장비별 사용 가능한 피더의 수량에 대한 제한 조건을 의미한다.

(20)과 (21)는 각 장착점은 단 한 번 방문되어야 하며 이때 장착점으로 이동하는 전향경로와 장착점으로부터 피더로 이동하는 후향경로의 수가 모두 하나임을 의미한다. (22)는 각 피더라인으로 돌아오는 후향경로의 수는 그 피더라인에서 공급하는 부품의 수와 같음을 의미한다. (23)은 모든 장착점과 피더라인을 한 번씩만 방문하는 하나의 연결된 조립경로가 생성되어야 한다는 것을 의미하며, 여기서  $S^m$ 은 장비  $m$ 의 장착점 집합  $P^m$ 의 부분 집합을 의미한다.

### III. 최적화 문제의 변환

복잡한 표면실장기 라인 최적화 문제의 해를 구하기 위하여, 전체의 문제를 전향경로 최적화 문제(FP : forward-path optimization problem)와 후향경로 최적화 문제(BP : backward-path optimization problem)로 분리하여 구성한다.

전향경로 최적화 문제는 전향경로 결정에 영향을 주는 변수를 최적화 시키는 문제로서, 피더배치변수 및 전

항경로변수를 결정한다. 전향경로 최적화 문제의 수학적 모델은 다음과 같다.

(FP)

$$\min_m \max_m \{W_m'\} \quad (24)$$

s.t

$$W_m' = \sum_{l \in L^m} \sum_{c \in C} \sum_{j \in P} t(l, j) x_{cl} y_{lj}, \quad \forall m \in M \quad (25)$$

$$\sum_{c \in C} x_{cl} \leq 1, \quad \forall l \in L \quad (26)$$

$$\sum_{l \in L} x_{cl} = \mu_c, \quad \forall c \in C \quad (27)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in L^m} x_{cl} \leq |L^m|, \quad \forall m \in M \quad (28)$$

$$\sum_{l \in L} y_{lj} = 1, \quad \forall j \in P \quad (29)$$

목적함수 (24)는 라인의 최대 작업량을 최소화하는 것이다. 이때 각 장비의 작업량은 (25)와 같이 조립체드의 총 전향경로 이동 시간의 합으로부터 구해진다. (26)은 하나의 피더레인에는 하나의 부품피더가 배치되어야 함을 의미하며, (27)은 각 부품타입 당  $\mu_c$ 개의 피더가 배치되어야 함을 의미한다. (28)은 각 표면실장기 장비 별 사용 가능 피더레인의 수를 의미하며, (29)는 각 장착점에 도달하는 전향경로는 하나임을 의미한다.

후향경로 최적화 문제는 각 장비별 후향경로 이동시간을 최소화시키는 후향경로변수를 결정하는 문제이다.

(BP)

$$\min \sum_{l \in L^m} \sum_{i \in P^m} t(i, l) z_{pl}, \quad \forall m \in M \quad (30)$$

s.t

$$\sum_{l \in L^m} z_{il} = 1, \quad \forall i \in P^m, \forall m \in M \quad (31)$$

$$\sum_{i \in P^m} z_{il} = \lambda(l), \quad \forall l \in L^m, \forall m \in M \quad (32)$$

$$\sum_{l \in L^m} \sum_{i \in S^m} \sum_{j \in S^m} x_{r(l)}^* y_{li} z_{jl} \leq |S^m| - 1, \quad \forall m \in M \quad (33)$$

위의 문제는 장비  $m \in M$ 에 속한 장착점 집합  $P^m$ 의 원소를 공급노드로 하고, 장비  $m \in M$ 의 피더레인 집합  $L^m$ 의 원소를 수요노드로 하는 수송문제[7]의 범주에 속한다. (31)은 각 공급노드의 공급수량 제한 조건이며, 각 장착점에서 피더로 이동하는 후향경로의 수가 하나임을 의미한다. (32)는 각 수요노드의 수요수량 제한 조건이며 각 피더로 이동하는 후향경로의 수는 그 피더의 흡착도수  $\lambda_l$ 와 같음을 의미한다. (33)은 하나의 연결된 조립순서가 생성되어야 함을 의미하며,  $x_{cl}^*$ 와  $y_{lj}^*$ 는 전향경로 최적화 단계에서 이미 구해진 피더배치 변수와 전향경로 변수이다.

#### IV. 최적화 알고리즘

앞장에서 변환된 문제의 해를 구하기 위한 알고리즘을 구성한다. 전체 알고리즘은 전향경로 최적화 단계와 후향경로 최적화 단계로 나누어진다.

##### 1. 전향경로 최적화 단계

(24)-(28)의 전향경로 최적화문제 (FP)는 비선형 정수계획문제로서 그 해를 구하기 어려우며, 이를 다시 (FP-1) 및 (FP-2)의 두 개의 문제로 분할시킨다.

(FP-1)

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{i=1}^{\mu_c} d(p, k_i) \quad (34)$$

s.t

$$\bigcup_{i=1}^{\mu_c} P_c^i = P_c, \quad \forall c^j \in \bar{C} \quad (35)$$

$$\bigcap_{i=1}^{\mu_c} P_c^i = \emptyset, \quad \forall c^j \in \bar{C} \quad (36)$$

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_{\mu_c}\} \quad (37)$$

(FP-2)

$$\min \max_m \{ W_m'' \} \quad (38)$$

s. t

$$W_m'' = \sum_{l \in L^m} \sum_{c \in \bar{C}} \sum_{j \in P_c^*} t(l, j) x_{cl}, \quad \forall m \in M \quad (39)$$

$$\sum_{c \in \bar{C}} x_{cl} \leq 1, \quad \forall l \in L \quad (40)$$

$$\sum_{l \in L} x_{cl} = 1, \quad \forall c \in \bar{C} \quad (41)$$

$$\sum_{c \in \bar{C}} \sum_{l \in L^m} x_{cl} \leq |L^m|, \quad \forall m \in M \quad (42)$$

단, 확장된 부품타입 집합  $\bar{C}$ 는 부품타입 집합  $C$ 로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{C} = \{1^1, \dots, 1^m, 2^1, \dots, 2^m, \dots, n_c^1, \dots, n_c^m\} \quad (43)$$

같은 부품 피더를 여러 개 배치하는 다중피더배치를 고려하기 위하여 부품타입  $c \in C$ 을 피더배치수량  $\mu_c$ 개로 분할하여, 이를  $c^1, \dots, c^{\mu_c}$ 로 표시한 것이다.

### 1.1 장착점 클러스터링

(FP-1) 문제의 해를 구하는 단계이다. (FP-1)은 각 부품타입 당 장착점 집합  $P_c$ 을 클러스터링하여  $\mu_c$ 개의 그룹으로 최적 분할하는 문제이다. 같은 클러스터 내의 장착점들이 위치가 밀집되도록 최적화 시켜야 한다. 클러스터링 결과 확장된 부품타입  $\bar{c} \in \bar{C}$ 에 일대일로 대응하는 장착점 집합  $P_{\bar{c}}$ 를 생성시킨다. 이 문제는 전형적인 클러스터링 문제에 해당하며, 잘 알려진 클러스터링 알고리즘인 K-means 알고리즘[8]을 적용하여 해를 구한다.

### 1.2 부품할당 및 피더배치 결정

(FP-2) 문제의 해를 구하는 단계이다. 피더배치변수  $x_{cl}$ 와 전향경로변수  $y_{lp}$ 가 결정되며, 각 장비별 할당 부

품타입 과 소속 장착점  $P^m$ 이 결정된다. 이 문제는 비선형 정수계획문제로서, 비선형 기반의 branch and bound 알고리즘[7]을 적용하여 구한다.

## 2. 후향경로 최적화 단계

(30)-(33)의 후향경로 최적화문제 (BP)는 정수계획 문제 중 수송문제 또는 할당문제의 변형이다[9]. (30)-(32)는 전형적 수송문제로서 후향경로를 결정하는 문제이며, 이 때 (33)은 전향 및 후향경로를 연결하여 모든 장착점을 한 번씩 방문하는 투어를 생성하는 추가 조건을 의미한다.

### 2.1 후향경로 결정

(BP) 중 (30)-(32)로 구성된 균형수송문제의 최적해인 후향경로변수  $z_{\mu}$ 를 결정한다. 균형수송문제는 할당 문제로 변환할 수 있으며, 할당문제의 최적해를 구하는 헝가리안 알고리즘[7]을 적용한다.

### 2.2 조립순서 결정

1.2 단계에서 생성된 전향경로와 1.3 단계에서 생성된 후향경로를 연결하여 전체 조립경로를 생성한다[9]. 즉 앞 단계에서 구한  $y_{lp}$ 와  $z_{\mu}$ 로부터 하나의 연결된 시퀀스를 구하고, 모든 장착점을 방문하는 한번씩 방문하는 경로는 오일러 투어 알고리즘[10]을 적용하여 구한다. 또한 TSP의 2-opt 알고리즘[11]을 적용하여 경로를 개선시킨다.

## V. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 성능을 평가하고 그 유용성을 검증하기 위해, 모의 칩마운터 라인을 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 칩마운터의 X축 및 Y축 겐트리는 모두 동일한 사다리꼴 속도 프로파일을 갖는다고 가정하였다. 표면실장기의 전후면 피더열에는 각각 20개씩 모두 40개의 피더라인이 있으며, 라인은 동일한 모델의 표면실장기 장비로 구성된다고 가정하며, 장비의 수

는 최대 3대로 설정하였다. (FP-2)의 비선형문제 해를 구하기 위해 LINDO사의 소프트웨어 팩키지LINGO 9.0을 사용하였으며, 그 이외의 알고리즘은 모두 Microsoft사의 Visual C++로 제작되었다. 제작된 프로그램은 IBM-PC 호환기종 Pentium-IV급 2.66GHz/MS-Windows XP 환경에서 실행되었다.

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 두 가지 비교대상 알고리즘을 구현하였다. 첫 번째 비교 대상 알고리즘(method 1)은 표면실장기의 라인최적화에 적용되는 전형적 방식으로서, 전체 라인 최적화 문제를 부품할당, 피더배치 그리고 조립순서 문제로 나누었다. 부품할당 문제와 피더배치 문제는 각 각 탐욕적 알고리즘(greedy algorithm)으로 해를 구하고, 조립순서 문제는 TSP 알고리즘으로 해를 구하였다.

두 번째 비교 대상 알고리즘(method 2)은 method 1과 같으나, 피더 배치 문제에 할당 알고리즘을 적용하여 피더 배치 성능을 개선하고자 하였다.

표 1. 테스트 PCB

PCB Id.	부품타입 수	장착점 수
1	15	317
2	35	317
3	55	425
4	55	700
5	70	700
6	70	807
7	90	997

[표 1]은 시뮬레이션에 사용된 테스트 PCB 들의 부품 타입 및 장착점의 수를 보여준다. [표 2] 및 [표 3]은 각각 장비별 2대 및 3대 사용하는 라인에 대하여, 제안된 알고리즘과 비교 대상 알고리즘을 적용한 결과를 보여준다. 각 장비 별 조립시간 및 의 장비 별 라인 밸런스를 비교하였으며, 라인 밸런스는 다음과 같이 계산하였다.

$$Balance(\%) = \frac{\sum_{m=1}^{n_M} W_m}{\max\{W_m\} \times M} \times 100(\%) \quad (44)$$

단,  $n_M$ 은 라인을 구성하는 장비의 수이며,  $W_m$ 은 각 장비 별 총 조립 시간을 의미한다.

[표 2][표 3] 및 [그림 3][그림 4]에서 보는 바와 같이, 제안된 알고리즘을 적용한 경우 method 1 및 method 2에 비해 조립 시간이 단축되었음을 확인할 수 있다. 대부분의 경우 제안된 알고리즘은 다른 방법에 비해 총 조립 시간 단축과 라인 밸런스 개선에 효과가 있었으나, 몇몇 실험의 경우 라인 밸런스의 개선에는 효과가 있었으나 총 조립 시간은 근소하게 증가됨을 확인할 수 있다. 이는 전향경로 최적화 문제의 목적이 각 장비 별 조립 시간을 밸런스를 이루도록 하여 총 조립시간을 단축하는 것이기 때문이며, 결과적으로 제안된 알고리즘은 method 2에 비해 라인 밸런스가 최대 6.7% 향상되었다.

또한 라인을 구성하는 장비의 수가 증가함에 따라 라인 밸런스를 이루는 것이 어렵다는 것을 확인할 수 있으며, 제안된 알고리즘이 상대적으로 라인 밸런스에 효과가 있음을 확인할 수 있다.

## VI. 결론

본 논문은 PCB 조립 장비인 단일헤드 젠트리형 표면실장기로 구성된 라인에 대해 총 조립 시간과 라인 밸런스를 개선하기 위한 부품할당과 피더배치, 조립순서의 최적화 알고리즘을 제시하였다. 특히 하나의 부품을 여러 개의 피더에 나누어 배치하는 다중피더배치를 고려하였다.

기존의 방법들이 전체의 문제를 부품할당 최적화 단계, 피더배치 최적화 단계 및 조립순서 최적화 단계로 분리하는 것에 대하여, 본 논문은 전향경로 최적화 단계 및 후향경로 최적화 단계로 분리하는 새로운 방법을 제안하였다. 전체의 문제를 정수계획문제로 모델링하고 이를 변환하여 문제를 구성하고 이에 적합한 알고리즘을 제시하였다.

표 2. 장비별 조립 시간 및 라인 밸런스 비교(장비 2대 사용 라인)

PCB Id	method 1			method 2			Proposed		
	조립 시간 (sec)		Bal (%)	조립 시간 (sec)		Bal (%)	조립 시간 (sec)		Bal (%)
	장비 1	장비 2		장비 1	장비 2		장비 1	장비 2	
1	237.9	226.0	97.5	199.2	174.8	93.9	196.6	178.2	95.3
2	218.2	230.9	97.3	173.3	168.7	98.7	169.6	171.5	99.4
3	264.8	297.9	94.5	230.2	213.1	96.3	229.1	213.4	96.6
4	618.5	464.2	87.5	434.8	376.5	93.3	401.4	414.2	98.5
5	607.2	445.7	86.7	422.8	379.3	94.9	401.01	417.7	98.0
6	509.3	659.5	88.6	478.1	433.0	95.3	462.0	449.5	99.7
7	238.0	226.0	97.5	199.2	174.8	93.9	196.6	178.1	95.3

표 3. 장비별 조립 시간 및 라인 밸런스 비교(장비 3대 사용 라인)

PCB Id	method 1				method 2				Proposed			
	조립 시간 (sec)			Bal (%)	조립 시간 (sec)			Bal (%)	조립 시간 (sec)			Bal (%)
	장비 1	장비 2	장비 3		장비 1	장비 2	장비 3		장비 1	장비 2	장비 3	
1	176.0	151.8	139.3	88.5	143.1	121.8	116.9	88.9	121.4	143.1	137.1	93.6
2	146.5	161.7	144.3	93.3	123.7	121.0	103.9	93.3	113.9	119.7	123.9	96.2
3	179.0	211.5	180.3	90.0	161.1	140.0	143.3	91.9	159.3	160.4	132.5	94.0
4	507.6	276.6	312.1	72.0	307.3	265.7	235.5	87.7	277.9	308.9	254.8	90.8
5	533.1	260.8	270.2	66.5	362.1	244.3	207.1	74.9	362.9	318.4	206.8	81.6
6	387.8	354.6	441.3	89.4	379.4	272.4	278.7	82.7	255.7	315.4	379.4	83.5
7	661.7	347.3	456.5	73.8	535.3	298.2	306.4	71.0	531.9	398.5	279.2	75.8

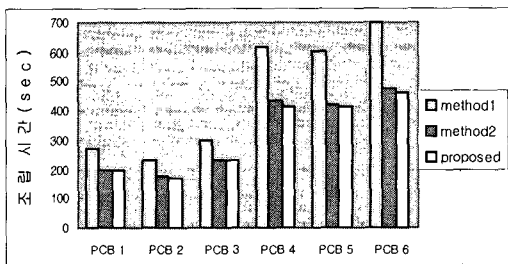


그림 3. 조립시간 비교(장비 2대 사용 라인)

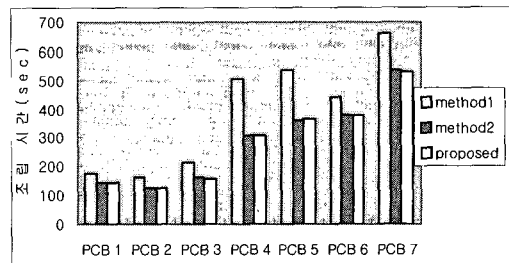


그림 4. 조립시간 비교(장비 3대 사용 라인)

실제의 PCB 조립라인과 유사한 조건의 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다. 기존의 상용화 장비에서 많이 사용되는 휴리스틱 알고리즘과 제안 알고리즘의 비교 시뮬레이션을 통하여, 제안된 방법이 PCB 조립시간의 단축 및 가동률 향상에 기여할 수 있

음을 확인하였다. 본 논문에서 개발된 방법은 상용화 과정을 통하여, 휴대폰, 컴퓨터 등의 생산을 위한 표면실장기 라인에 적용될 예정이다.



참고 문헌

[1] 박태형, “전자조립용 CAM 시스템의 기술동향”, 전자공학회지, 제26권, 제3호, pp.48-61, 1999.

[2] J. C. Ammons, M. Carlyle, L. Cranmer, and G. Depuy, "Component allocation to balance workload in printed circuit card assembly systems," IIE Transaction, Vol.29, No.4, pp.265-275, 1997.

[3] R. Kumar and H. Li, "Integer programming approach to printed circuit board assembly time optimization," IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part-B: Advanced Packaging, Vol.18, No.4, pp.720-727, 1995.

[4] D. Ben-Arieh and M. Dror, "Part assignment to electronic insertion machines : Two machine case," Int. J. of Production Research, Vol.28, No.7, pp.1317-1327, 1990.

[5] W. Wang, P. C. Nelson, and T. M. Tirpak, "Optimization of high-speed multistation SMT placement machines using evolutionary algorithms," IEEE, Trans. On Electronics Packaging Manufacturing, Vol.22, No.2, pp.137-146, 1999.

[6] P. Csazar, P. C. Nelson, R. R. Rajbhandari, and T. M. Tirpak, "Optimization of automated high-speed modular placement machines using knowledge-based systems," IEEE, Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol.30, No.4, pp.408-417, 2000.

[7] A. Sultan, Linear Programming an Introduction with Application, Academic Press, 1933.

[8] A. K. Jain, M. N. Murty, and P. J. Flynn, "Data clustering: A review," ACM computing surveys, Vol.31, No.3, 1999.

[9] 박태형, 김철환, “수송알고리즘에 의한 칩마운터의 조립순서계획”, 제어 자동화 시스템 공학 논문지, 제

6권, 제9호, pp.836-843, 2000.

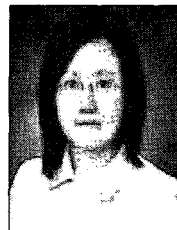
[10] 김경민, 박태형, “다중피더배치를 고려한 칩마운터의 조립순서계획”, 제어 자동화 시스템 공학 논문지, 제11권, 제2호, pp.144-151, 2005.

[11] G. Reinelt, The Traveling salesman : Computational solutions for TSP Applications, Springer-Verlag, 1994.

저자 소개

김 경 민(Kyung-Min Kim)

정회원



- 2003년 2월 : 충북대학교 전기전자공학부(공학사)
  - 2005년 2월 : 충북대학교 제어계측공학과(공학석사)
  - 2005년 3월~현재 : 삼성전자(주) 정보통신총괄 무선사업부 연구원
- <관심분야> : 임베디드 소프트웨어, 최적화 알고리즘

박 태 형(Tae-Hyoung Park)

정회원



- 1988년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학사)
  - 1990년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)
  - 1994년 8월: 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)
  - 1994년 9월~1997년 2월 : 삼성테크윈(주) 선임연구원
  - 1997년 3월~현재 : 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수
  - 2000년 8월~2001년 8월 : Univ. of Toronto 방문 교수
- <관심분야> : 로보틱스 및 자동화, 반도체 및 전자 조립 시스템