

SMD기계의 PCB 생산순서 결정을 위한 발견적 기법

송창용¹ · 신성환²

¹탐라대학교 통상학부 경영학전공 / ²한라대학교 기계공학부 산업공학전공

Heuristics for Sequencing Printed Circuit Boards on a Surface Mount Device Placement Machine

Chang-Yong Song¹ · Seong-Whan Shinn²

This paper considers the problem of sequencing printed circuit boards(PCBs) on an automatic surface mount device(SMD) placement machine in order to minimize total setup time. Since the total set of component feeders needed by all boards cannot be loaded simultaneously on the magazine, the setup must be made between two successive boards in the sequence. It is assumed that the setup time depends on the number of component feeders to be replaced in the magazine. An important characteristic is that each feeder occupies a different number of slots in the magazine. This problem is equivalent to travelling salesman problem(TSP) except that the distances between two cities, that is, the setup times between two boards, are not known in advance. So, TSP-based heuristics with new distance functions are presented and their performances are compared through various test problems. Computational results indicate that our heuristics outperform existing methods.

1. 서론

최근 전자제품의 경박단소화 추세에 따른 전자부품의 소형화 요구로 인하여 표면실장기술(Surface Mount Technology)이 급속하게 발전하고 있다. 예를 들어, PCB(Printed Circuit Board)의 표면에 구멍을 내지 않고 직접 부착할 수 있는 부품(Surface Mount Device)이 개발되었고, 또한 SMD를 고속으로 부착하는 자동화된 첨단기계(SMD Placement Machine)도 등장하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 다양한 전자제품의 부품으로 사용되는 여러 종류의 PCB를 생산하는 SMD기계에서 발생하는 PCB 생산순서 결정문제를 다루고자 한다. 한 대의 SMD기계에서 여러 종류의 PCB를 생산할 때 전체생산시간(Makespan)을 결정짓는 요인으로는 (1) PCB의 생산순서, (2) 생산순서에 따라 각 PCB를 생산할 때 기계의 부속장치인 부품장착장치(Magazine)를 각 PCB에 부착될 부품들로 준비하는 시간, (3) 부품장착장치에 할당된 각 부품의 위치, 그리고 (4) 각 PCB에 여러 개의 부품을 부착할 때의 부품부착순서 등이 있다. 이 네 가지 요인 중에서 (1)과 (2)는 작업준비시간(Setup Time)과 밀접한 관련이 있는 반면, (3)과 (4)는 PCB 작업시간(Processing Time)과 밀접한 관련이 있다. 최근에 생산되는 여러 종류의 PCB에는 다양한 부품들이 부

착되므로 PCB를 생산할 때마다 부품장착장치를 생산에 필요한 부품들로 자주 교체해야 한다. 이는 오늘날 보편화된 다품종 소량생산 체제하에서는 전체생산시간에 비해 작업준비시간의 비중이 커졌고 중요해졌음을 의미한다(Askin *et al.*, 1994; Gunther *et al.*, 1998; Hashiba and Chang, 1991; Sadiq *et al.*, 1993). 따라서, 전체생산시간 대신에 총작업준비시간의 최소화를 본 연구에서 고려하는 PCB 생산순서 결정문제의 목적함수로 사용하고자 한다.

이와 관련된 연구로는 Rajkumar and Narendran(1998)이 정리한 바와 같이 많은 연구들이 있다(Askin *et al.*, 1994; Dessouky *et al.*, 1995; Fathi and Taheri, 1989; Gunther *et al.*, 1998; Hashiba and Chang, 1991; Luzzatto and Perona, 1993; Rajkumar and Narendran, 1998; Randhawa *et al.*, 1985; Sadiq *et al.*, 1993; Sule, 1992). 이런 연구 중에서 Sadiq *et al.*(1993)과 Gunther *et al.*(1998)의 연구를 제외한 대부분의 연구는 PCB에 부착될 각 부품의 크기가 부품장착장치상에서 하나의 슬롯(Slot)만을 차지한다고 가정하고 있다. 이는 부품의 크기가 다양한 실제 현장의 상황을 충분히 반영하지 못하고 있음을 의미한다. 반면, Sadiq *et al.*(1993)은 각 부품이 단지 하나 또는 두 개의 슬롯을 요구하는 제한된 상황에서 부품이 부품장착장치에 장착된 위치를 고려하여 PCB 생산순서를 결정하는 문제를 다루었다. Gunther *et al.*(1998)은 각 부품

의 크기가 다양한 경우의 PCB 생산순서 결정과 부품의 할당문제를 다루었고 또한 이 문제를 해결하는 발견적 기법도 제시하였다. 이 연구에서 제시한 방법은 PCB 생산순서 결정문제를 외판원문제(Travelling Salesman Problem)로 변환하여 기존에 제시된 외판원문제의 발견적 기법을 적용한 것이다. 이 방법에 대해서는 3절에서 자세히 설명하고 4절에서 본 연구에서 제시하는 새로운 방법과 비교하기로 한다.

또한 이와 유사한 문제가 유연생산시스템(Flexible Manufacturing Systems)에서도 발생하는데, 이를 공구교환문제(Tool Switching Problem)라고 한다. 공구교환문제란 유연생산기계의 공구장착장치를 각 부품을 가공할 때마다 필요한 공구로 교체하는 것을 말한다. 여기서 부품은 본 연구에서의 PCB에 해당되고 공구는 PCB에 부착될 부품에 해당된다. 이에 대한 연구도 많이 발표되어 있지만 Matzliach and Tzur (1998)의 연구를 제외한 대부분의 연구들은 각 공구는 하나의 슬롯을 요구한다고 가정하였다(Bard, 1988; Crama et al., 1994; Hertz et al., 1998; Privault and Finke, 1995; Tang and Denardo, 1988). Matzliach and Tzur(1998)의 연구는 각 공구는 하나 이상의 슬롯을 요구한다고 가정하고 있지만 가공할 부품이 임의의 시간에 기계에 도착하는 동적인 상황을 고려하고 있어서 생산 초기에 주어지는 정적인 상황을 고려하는 본 연구와는 차이가 있다.

따라서, 본 연구에서는 생산될 PCB의 수와 종류가 생산 초기에 주어지고 PCB에 부착될 부품들은 부품장착장치상에서 다양한 개수의 슬롯을 요구하는 상황하의 한 대의 SMD기계에서 총작업준비시간을 최소화하는 PCB 생산순서를 결정하고자 한다. 이를 위해 2절에서는 고려하는 문제상황을 자세히 설명하고 수리적으로 모형화한다. 3절에서는 문제 해결방법으로 외판원문제에 기초한 발견적 기법을 제시한다. 4절에서는 여러 가지 실험을 통하여 기존에 제시된 몇 가지 방법들과 성능을 비교한다. 마지막으로 5절에서는 본 연구의 결과를 정리하고 향후 연구방향을 제시한다.

2. 문제 정의

본 연구에서 고려하는 문제 상황은 다음과 같다. 다품종 소량 생산 체제하에서 여러 종류의 PCB(이하 제품이라고 함)를 생산할 수 있는 한 대의 SMD기계가 있고 이 기계의 부속장치로 제품에 부착될 부품들을 장착하는 부품장착장치가 있다. 제품에 부착될 부품들은 부품장착장치에 직접 장착되는 것이 아니라 부품공급기(Component Feeder)라고 불리는 보조기구에 먼저 장착된 후 이 기구가 SMD기계의 부품장착장치에 장착되고, 이 부품공급기를 통해서 같은 종류의 부품들이 연속적으로 공급되는 것이다. SMD기계에서 생산해야 될 N 종류의 제품과 각 제품별로 조립될 부품의 종류와 수가 생산 초기에 미리 정해져 있다. 각 제품은 소로트 단위로 생산된다고 가정한다. 부품장착장치는 여러 종류의 부품공급기를 장착할 수 있는 C 개의

슬롯이 있다. 그런데 여기에 모든 제품을 생산하는 데 필요한 M 가지 종류의 부품들을 동시에 장착할 수 없기 때문에 각 제품을 생산하기 전에 부품장착장치를 필요한 부품들로 교체해야만 한다. 단, 부품장착장치의 용량보다 많은 부품들을 요구하는 제품은 없다고 가정한다.

그 외에 필요한 가정들은 다음과 같다.

- (1) 제품을 생산하는 동안에는 부품교체가 일어나지 않는다.
- (2) 각 부품공급기는 부품장착장치상에서 하나 이상의 슬롯을 요구할 수 있다.
- (3) 각 부품공급기를 교체하는 데 걸리는 시간은 단지 부품장착장치상에서 차지하는 슬롯의 수에 비례하고 슬롯당 걸리는 시간은 상수로 일정하다.
- (4) 부품장착장치상의 부품공급기의 장착위치는 부품공급기의 교체시간과는 무관하다. 부품공급기의 장착위치는 제품생산시간뿐만 아니라 부품교체시간과도 서로 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 이 가정을 무시할 경우 고려하는 문제는 상당히 복잡해진다(Askin et al., 1994; Gunther et al., 1998).

이와 같은 가정을 바탕으로 총작업준비시간을 최소화하는 제품생산순서를 결정하는 문제는 다음과 같이 수리적으로 모형화할 수 있다.

<기호>

I : 제품을 나타내는 첨자($i = 1, \dots, N$)

t : 부품을 나타내는 첨자($t = 1, \dots, M$)

S_t : 부품 t 를 공급하는 부품공급기가 부품장착장치상에서 차지하는 슬롯의 수

시점 n : 생산순서상 n 번째 제품을 생산한 후, $(n+1)$ 번째 제품을 위한 부품교체가 일어나기 바로 직전의 시각을 나타내는 첨자($n = 1, \dots, N$)

a_{it} : 0-1 상수로 제품 i 가 부품 t 를 요구하면 1, 아니면 0

C : 부품장착장치의 용량(슬롯수로 표시)

x_{in} : 0-1 결정변수로 제품 i 를 n 번째로 생산하면 1, 아니면 0

y_{tn} : 0-1 결정변수로 부품 t 가 n 시점에 부품장착장치에 있으면 1, 아니면 0

p_{tn} : 0-1 결정변수로 부품 t 가 n 시점에서 교체되면 1, 아니면 0

이와 같은 기호를 사용하여 모형화하면 다음과 같다.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} S_i \cdot p_{in} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^M S_i \cdot y_{in} \leq C \quad n=1, \dots, N \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 a_{it} \cdot x_{in} &\leq y_{in} & i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, M \\
 & & n=1, \dots, N & (3) \\
 \sum_{i=1}^N x_{in} &= 1 & n=1, \dots, N & (4) \\
 \sum_{n=1}^N x_{in} &= 1 & i=1, \dots, N & (5) \\
 y_{in} - y_{i(n+1)} &\leq p_{in} & t=1, \dots, M \\
 & & n=1, \dots, N-1 & (6) \\
 x_{in} &= 0 \text{ or } 1 & i=1, \dots, N \\
 & & n=1, \dots, N & (7) \\
 y_{in} &= 0 \text{ or } 1 & t=1, \dots, M \\
 & & n=1, \dots, N & (8) \\
 p_{in} &= 0 \text{ or } 1 & t=1, \dots, M \\
 & & n=1, \dots, N-1 & (9)
 \end{aligned}$$

이 모형은 선형 0-1 정수계획법이다. 목적함수는 총착업준비시간을 최소화하는 것으로 슬롯당 걸리는 시간이 일정하다고 가정을 하였기 때문에 식 (1)과 같이 N 개의 제품을 생산하는 동안 교체되는 총 슬롯의 수를 최소화하는 것으로 수정하여 표현할 수 있다. 식 (2)는 각 제품을 생산하기 전에 부품장착장치에 장착되는 부품들은 부품장착장치의 용량, 즉 C 개의 슬롯을 초과해서는 안됨을 의미한다. 식 (3)은 각 제품이 요구하는 부품은 반드시 제품을 생산하기 전에 장착되어야 한다는 제약조건을 나타낸다. 식 (4)와 (5)는 하나의 생산순서 조건을 나타내는 제약식들이다. 식 (6)은 각 제품을 생산하기 전에 부품장착장치에서 교체되는 부품들을 나타내는 식이다. 식 (7), (8)과 (9)는 0-1 결정변수에 대한 제약식들이다.

3. 발전적 기법

이 문제는 생산순서 결정문제(x_{in} 의 결정)와 생산순서에 따른 부품교체문제(y_{in} 의 결정)가 결합된 전형적인 NP-complete 문제이다(Crama *et al.*, 1994; Tang and Denardo, 1988). 만약 하나의 생산순서가 주어지면 그 생산순서에 따른 부품교체는 Gunther *et al.*(1998)의 연구에서 제시한 'Keep Component Needed Soonest (KCNS)' 방법을 적용할 수 있다. 이는 n 시점에서 부품장착장치를 생산순서상 $(n+1)$ 번째 제품이 요구하는 부품들로 교체할 때 현재 장착되어 있는 부품들 중에서 n 시점 이후로 가장 늦게 필요로 하는 부품들을 우선 교체해자는 것으로 Tang and Denardo(1988)의 연구에서 제시한 'Keep Tool Needed Soonest (KTNS)' 방법을 수정한 것이다. KTNS 방법은 모든 부품의 크기가 한 개의 슬롯으로 일정한 경우 최적해를 보장하지만 하나 이상의 슬롯을 요구하는 일반화된 경우에 대해서는 KTNS 방법뿐만 아니라 이를 수정한 KCNS 방법도 최적해를 준다는 보장이 없다. 또한 지금까지 최적해를 주는 부품교체 방법에 대한 연구도 발표된 적이 없기 때문에 Gunther *et al.*(1998)의 연

구에서와 같이 KCNS 방법을 부품교체문제에 적용하고 생산순서를 결정하는 발전적 기법을 제시하고자 한다.

생산순서 결정문제는 연속으로 생산하는 두 제품 i 와 j 사이에 교체되는 슬롯의 수, $d(i, j)$ 를 두 도시 사이의 거리라고 정의하면 외편원문제의 유사하다. 이것은 외편원문제를 위해 개발된 여러 가지 발전적 기법들을 생산순서 결정문제에도 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 두 제품 사이의 거리, $d(i, j)$ 를 정확하게 계산하기는 매우 어렵다. 만약 각 제품이 요구하는 부품들의 슬롯수의 합이 부품장착장치의 용량과 같다면 두 제품 사이의 거리를 정확하게 계산할 수는 있지만 그렇지 않다면 불가능하다(Crama *et al.*, 1994; Tang and Denardo, 1988). 따라서, 본 연구에서는 우선 두 제품 사이의 거리를 추정하는 몇 가지 함수를 고려하고 이 함수를 이용한 발전적 기법을 제시하고자 한다.

먼저 고려할 수 있는 간단한 함수로는 Gunther *et al.*(1998)의 연구에서 제시한 두 가지 함수가 있다. 이 함수들은 Crama *et al.*(1994)의 연구에서 제시한 함수를 각 부품의 크기, 즉 차지하는 슬롯의 수가 일정하지 않은 상황에 적합하도록 수정한 것이다. 함수의 형태는

$$d_1(i, j) = \max\left\{ \sum_{t \in (T_i \cup T_j)} S_t - C, 0 \right\}$$

과

$$d_2(i, j) = \sum_{t \in (T_i \setminus T_j)} S_t$$

와 같이 정의된다. 여기서, $T_i(T_j)$ 는 제품 i (제품 j)가 요구하는 부품들의 집합이다. 첫 번째 함수는 부품장착장치가 두 제품이 요구하는 부품들을 동시에 장착할 수 없는 경우 그 차이만큼 교체되는 부품들의 총 슬롯수로 계산한다. 그러나 동시에 장착할 수 있는 경우에도 제품 j 가 요구하는 부품이 실제로 장착되어 있지 않다면 부품교체가 발생하기 때문에 이 함수는 하한값을 나타낸다고 할 수 있다. 반면에 두 번째 함수는 순서상 뒤에 생산되는 제품 j 만 요구하는 부품들, 즉 $(T_j \setminus T_i)$ 는 반드시 교체되는 것으로 계산하기 때문에 부품교체의 상한값을 나타낸다. 이 두 함수는 전체적인 생산순서는 고려하지 않고 단지 두 제품만을 고려하기 때문에 정확하게 추정하지 못한다. 이 점을 개선하기 위해 Hertz *et al.*(1998)의 연구에서는 두 가지 함수를 제시하고 있는데, 본 연구의 상황에 적합하도록 다음과 같이 수정할 수 있다. 이 두 함수는

$$d_3(i, j) = \max\left\{ 0, \sum_{t \in (T_i \cup T_j)} S_t - \left\lceil \theta \frac{\Lambda(i, j)}{(N-2) \sum_{t \in (T_i \cup T_j)} S_t} \right\rceil C \right\}$$

과

$$d_4(i, j) = \left\lceil \frac{C+1}{C} \right\rceil \sum_{t \in (T_i \cup T_j)} S_t - \sum_{t \in (T_i \cap T_j)} S_t \cdot \left(\frac{(N-2) \sum_{t \in (T_i \cup T_j)} S_t}{\max\{\Lambda(i, j), 0.5\}} \right)$$

와 같이 정의된다. 여기서, $\Lambda(i, j) = \sum_{i \in (T_i \cup T_j)} \lambda_i(i, j) \cdot S_i$, $\lambda_i(i, j)$ 는 제품 i 와 j 를 제외한 $(N-2)$ 개의 제품들 중에서 $(T_i \cup T_j)$ 에 속하는 부품 i 를 요구하는 제품의 수, 그리고 θ 는 0과 1사이의 범위를 갖는 일양분포(Uniform Distribution)에서 추출한 파라미터이다. $\Lambda(i, j)$ 값이 크면 클수록 $(T_i \cup T_j)$ 에 속하는 부품을 요구하는 제품들이 많다는 것을 의미한다. 이 값은 $\Lambda(i, j) \leq (N-2) \sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i$ 를 만족한다. $d_3(i, j)$ 함수는 제품 i 와 j 가 요구하는 부품의 총 슬롯수 $\left(\sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i \right)$ 에서 0과 C 사이의 임의의 값 $\left[\left[\theta \frac{\Lambda(i, j)}{(N-2) \sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i} \right] C \right]$ 을 뺀 것이다. 이 값은 $(T_i \cup T_j)$ 에 속하는 부품이 다른 제품에서 자주 사용되면 커지도록 되어 있다. $d_4(i, j)$ 함수는 $\left(\sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i - \sum_{i \in (T_i \cap T_j)} S_i \right)$ 를 변형한 것인데, $\left(\frac{C+1}{C} \right)$ 은 1과 2 사이의 값을 갖는 것으로 부품장착장치의 용량이 작은 경우, 즉 부품교체가 자주 발생하는 경우 $\sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i$ 값에 비중을 더 주기 위한 것이다. $\left(\frac{(N-2) \sum_{i \in (T_i \cup T_j)} S_i}{\max\{\Lambda(i, j), 0.5\}} \right)$ 는 제품 i 와 j 가 요구하는 부품들이 자주 사용되지 않으면 낮을수록 함수의 값이 커지도록 하기 위한 것이다. 여기서, 분모의 0.5값은 0으로 나누는 것을 방지하기 위한 것이다. 위의 두 함수는 $\lambda_i(i, j)$ 를 도입함으로써 제품 i 를 생산하는 데는 필요하지 않지만 부품장착장치의 여유슬롯 $\left(C - \sum_{i \in T_i} S_i \right)$ 에 장착되어 있는 부품들에 대해서 고려하고 있다.

그러나 위의 두 함수는 추정해야 하는 파라미터(θ)가 존재하거나 부품교체의 하한값에 어떤 값을 곱하여 계산을 함으로써 부품교체에 대한 실제값이 아닌 확대된 값을 나타내고 있다. 이런 점을 개선하기 위해 본 연구에서는 하한값보다는 상한값을 기초로 부품교체의 슬롯수를 추정하는 두 함수를 제시하고자 한다. 두 함수는

$$d_{new1}(i, j) = \sum_{i \in (T_i \setminus T_j)} S_i \cdot \left[1 - \left(\frac{C - \sum_{i \in T_i} S_i}{C} \right) \left(\frac{\delta_i(i, j)}{N-1} \right) \right]$$

과

$$d_{new2}(i, j) = \sum_{i \in (T_i \setminus T_j)} S_i \cdot \left[1 - \left(\min \left[1, \frac{C - \sum_{i \in T_i} S_i}{\sum_{i \in (T_i \setminus T_j)} S_i} \right] \right) \left(\frac{\delta_i(i, j)}{N-1} \right) \right]$$

과 같이 정의된다. 여기서, $\delta_i(i, j)$ 는 제품 i 와 j 를 제외한 제품들 중에서 $(T_i \setminus T_j)$ 에 해당하는 부품 i 를 요구하는 제품의

수를 의미한다. 제품 i 와 j 사이의 부품교체는 제품 j 의 요구부품이 제품 i 의 생산이 끝난 시점에 부품장착장치상에 없는 경우에만 발생한다. 따라서 두 제품 중에서 제품 j 가 요구하는 부품이 제품 i 를 생산하는 동안에 장착되어 있을 가능성을 추정함으로써 부품교체가 이루어지는 슬롯의 수를 계산할 수 있다.

$d_{new1}(i, j)$ 함수는 $d_2(i, j)$ 함수에 $\left\{ 1 - \left(\frac{C - \sum_{i \in T_i} S_i}{C} \right) \left(\frac{\delta_i(i, j)}{N-1} \right) \right\}$ 계수를 곱한 것으로 이 계수는 두 제품 중에서 제품 j 만의 요구부품이 제품 i 의 생산이 끝나는 시점에 $\left(C - \sum_{i \in T_i} S_i \right)$ 개의 슬롯에 장착되어 있을 가능성을 나타낸다. 이 계수의 $\left(\frac{C - \sum_{i \in T_i} S_i}{C} \right)$ 인자는 부품장착장치 내에 제품 i 의 요구부품을 장착하고 난 후 남아 있는 여유슬롯의 비율을 나타내고 $\left(\frac{\delta_i(i, j)}{N-1} \right)$ 인자는 이 여유슬롯에 제품 j 만의 요구부품 j 가 장착되어 있을 가능성을 나타낸다. 생산 순서상 제품 i 앞에서 $(T_i \setminus T_j)$ 의 부품을 요구하는 제품을 생산하고 난 다음 T_j 의 부품을 장착하고 남아 있는 여유슬롯 $\left(C - \sum_{i \in T_i} S_i \right)$ 에 $(T_i \setminus T_j)$ 의 부품이 장착되어 있다면 그 부품은 교체될 필요가 없다. 이 가능성을 제품 i 와 j 를 제외한 $(N-1)$ 개의 제품들(제품 j 가 생산 순서상 첫 번째 제품일 경우도 포함)에 대한 $(T_i \setminus T_j)$ 의 부품을 요구하는 제품수의 비율로 계산한다.

$d_{new2}(i, j)$ 함수에서는 이 여유슬롯에 대한 비율을 제품 j 만의 요구부품의 총 슬롯수 $\left(\sum_{i \in (T_i \setminus T_j)} S_i \right)$ 에 대한 비율로 계산한다. 여기서, \min 값은 $\left(\frac{C - \sum_{i \in T_i} S_i}{\sum_{i \in (T_i \setminus T_j)} S_i} \right)$ 값이 1보다 커지는 것을

방지하기 위한 것이다. 위의 두 함수의 차이는 여유슬롯에 대한 비율을 계산하는 과정에서 나타난다. $d_{new1}(i, j)$ 함수에서의 여유슬롯의 비율은 다음에 생산되는 제품에 상관없이 항상 일정하게 계산되지만 $d_{new2}(i, j)$ 함수에서는 항상 달라지게 된다. 즉, 제품 j 만의 요구부품의 총 슬롯수보다 여유 슬롯수가 크면 클수록 제품 i 의 생산이 끝난 시점에 $(T_i \setminus T_j)$ 에 속하는 부품이 장착되어 있을 가능성이 커지게 된다. 따라서, 제품 i 와 j 사이에 부품교체가 발생하지 않을 가능성이 높다는 것을 의미한다.

이 6가지 함수의 이해를 돕기 위해 다음과 같은 간단한 예를 가정하자. 10종류의 PCB를 생산해야 하는 SMD기계에 용량이 15개 슬롯인 부품장착장치가 있다. 10개 제품이 요구하는 총 부품의 수는 12가지이며 각 제품이 요구하는 부품과 각 부품이 부품장착장치에서 차지하는 슬롯의 수는 <표 1>과 같다.

제품 A와 B 사이에 교체되는 슬롯의 총 개수를 6가지 함수를 이용하여 계산하면 다음과 같다. 단, $d_4(i, j)$ 함수의 θ 값은 Hertz *et al.*(1998)에서 추천한 대로 0.25를 사용한다.

표 1. 예제 데이터

부품(<i>t</i>) \ 제품(<i>t</i>)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	S_t	$\lambda_t(A, B)$	$\delta_t(A, B)$
1	1	1			1	1	1		1		3	4	
2		1		1		1				1	4	3	3
3			1		1				1		1		
4	1	1	1							1	3	2	
5					1	1		1	1		2		
6		1		1			1			1	2	3	3
7	1						1			1	1	2	
8			1	1	1						2		
9			1		1				1		2		
10	1					1		1			4	2	
11	1				1	1		1		1	2	4	
12	1		1	1							1	2	

$$(1) d_1(A, B) = \max \left\{ \sum_{i \in (T_A \cup T_B)} S_i - C, 0 \right\} = 5$$

$$= 5.6667$$

$$(2) d_2(A, B) = \sum_{i \in (T_B \setminus T_A)} S_i = 4 + 2 = 6$$

$$(3) d_3(A, B) = \max \left\{ 0, \sum_{i \in (T_A \cup T_B)} S_i - \left[\theta \frac{\Lambda(A, B)}{(N-2) \sum_{i \in (T_A \cup T_B)} S_i} \right] C \right\}$$

$$= \max \left\{ 0, 20 - \left[0.25 \times \frac{56}{8 \times 20} \right] \times 15 \right\} = 18.6875$$

$$(4) d_4(A, B) = \left(\left[\frac{C+1}{C} \right] \sum_{i \in (T_A \cup T_B)} S_i - \sum_{i \in (T_A \cap T_B)} S_i \right) \left(\frac{(N-2) \sum_{i \in (T_A \cup T_B)} S_i}{\max \{ \Lambda(A, B), 0.5 \}} \right)$$

$$= \left(\left[\frac{16}{15} \right] 20 - 6 \right) \left(\frac{8 \times 20}{\max \{ 56, 0.5 \}} \right) = 43.8095$$

$$(5) d_{new1}(A, B) = \sum_{i \in (T_B \setminus T_A)} S_i \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{C - \sum_{i \in T_A} S_i}{C} \right) \left(\frac{\delta_t(A, B)}{N-1} \right) \right\}$$

$$= 4 \times \left\{ 1 - \left(\frac{15-14}{15} \right) \left(\frac{3}{9} \right) \right\} + 2 \times \left\{ 1 - \left(\frac{15-14}{15} \right) \left(\frac{3}{9} \right) \right\} = 5.8667$$

$$(6) d_{new2}(A, B) = \sum_{i \in (T_B \setminus T_A)} S_i \cdot \left\{ 1 - \left(\min \left[1, \frac{C - \sum_{i \in T_A} S_i}{\sum_{i \in (T_B \setminus T_A)} S_i} \right] \right) \left(\frac{\delta_t(A, B)}{N-1} \right) \right\}$$

$$= 4 \times \left\{ 1 - \left(\frac{15-14}{6} \right) \left(\frac{3}{9} \right) \right\} + 2 \times \left\{ 1 - \left(\frac{15-14}{6} \right) \left(\frac{3}{9} \right) \right\}$$

이와 같이 정의한 6가지의 함수들을 외판원문제를 위한 발견적 기법에 응용할 수가 있다. 기존에 제시된 많은 발견적 기법들이 있지만 본 연구에서는 Farthest Insertion heuristic(Lawler *et al.*, 1985)을 사용하기로 한다. 이는 Hertz *et al.*(1998)의 연구에서 빠른 시간 내에 좋은 해를 얻고자 할 경우에 Farthest Insertion heuristic을 추천하고 있고 또한 실제 현장에서도 대부분 빠른 수행 결과를 원하고 있기 때문이다.

4. 실험 및 분석

앞에서 제시한 6가지 방법의 성능을 비교하기 위해 <표 2>와 같이 (*N, M, R, S_t, C*)로 표현되는 5가지 모수를 조합하여 총 48가지 유형으로 구분하여 실험을 시행하였다. 각 모수는

- N* = 제품의 수
- M* = *N*개의 제품이 요구하는 총 부품의 수
- R* = 총 부품의 수에 대한 각 제품이 요구하는 부품의 수
- S_t* = 부품 *t*가 차지하는 슬롯의 수 (*t* = 1, ..., *M*)
- C* = 부품장착장치의 용량(슬롯의 수)

을 의미한다.

먼저 *N*과 *M*값은 크기가 작은 경우와 큰 경우 두 가지로 구분하였다. *R*값은 각 제품이 요구하는 부품수의 편차가 작은 경우와 큰 경우 두 가지로 구분하였고 각각의 값은 *M*값에 대

표 2. 문제의 유형

<i>N</i>	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>S_t</i>	<i>C</i>
30	40	[0.1 × <i>M</i> , 0.3 × <i>M</i>]	[1, 1]	T(Tight)
50	100	[0.1 × <i>M</i> , 0.6 × <i>M</i>]	[1, 2]	NT(Not Tight)
			[1, 4]	

표 3. R값이 [0.1M, 0.3M]인 경우 IR값의 평균과 표준편차

N	M	R	S _r	C	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d _{max1}	d _{max2}		
30	40	[4, 12]	[1, 1]	T(12)*	4.30 (2.56) [†]	2.68 (1.63)	1.58 (1.39)	2.14 (1.62)	1.21 (1.07)	0.91 (1.24)		
				NT(18)	32.14 (4.68)	4.01 (2.83)	2.37 (2.04)	2.40 (2.03)	1.79 (2.58)	1.84 (1.62)		
			[1, 2]	T(18)	3.91 (1.89)	2.68 (1.76)	0.61 (1.12)	2.31 (2.15)	1.90 (1.91)	1.27 (1.35)		
				NT(24)	18.67 (7.95)	3.09 (2.16)	2.12 (1.39)	2.47 (1.84)	1.79 (1.60)	1.93 (1.66)		
			[1, 4]	T(30)	5.56 (4.06)	1.46 (1.40)	1.22 (1.76)	2.33 (2.16)	1.31 (1.11)	1.18 (1.02)		
				NT(48)	31.76 (6.41)	3.42 (2.15)	2.93 (1.97)	1.12 (1.42)	2.89 (1.74)	2.13 (2.08)		
			100	[10, 30]	[1, 1]	T(30)	2.29 (1.61)	1.31 (0.84)	0.85 (1.05)	1.22 (0.87)	0.79 (0.66)	0.64 (0.75)
						NT(45)	16.56 (2.98)	1.80 (1.78)	1.44 (1.31)	1.78 (1.15)	1.31 (1.33)	1.20 (1.46)
[1, 2]	T(45)	2.63 (1.70)			1.00 (0.80)	0.99 (0.75)	0.83 (0.86)	0.72 (0.71)	0.85 (0.72)			
	NT(60)	9.50 (3.73)			1.94 (1.13)	1.18 (1.24)	1.24 (1.24)	1.32 (0.84)	0.78 (0.77)			
[1, 4]	T(75)	2.79 (1.35)			1.38 (0.94)	1.00 (0.80)	0.86 (0.88)	1.11 (1.04)	0.54 (0.72)			
	NT(120)	19.06 (4.38)			2.27 (1.58)	1.81 (1.51)	0.87 (1.10)	1.24 (1.02)	1.33 (1.27)			
50	40	[4, 12]			[1, 1]	T(12)	4.68 (1.53)	2.70 (1.35)	1.55 (1.10)	2.29 (1.12)	0.53 (0.92)	0.67 (0.88)
						NT(18)	41.30 (5.09)	3.55 (2.03)	1.16 (1.30)	2.03 (1.38)	0.87 (1.10)	1.74 (1.80)
			[1, 2]	T(18)	4.90 (2.60)	1.84 (0.96)	1.24 (1.22)	1.95 (1.30)	0.94 (0.87)	0.78 (0.80)		
				NT(24)	25.71 (10.38)	2.92 (1.99)	1.81 (1.83)	2.45 (1.56)	1.47 (1.46)	1.17 (1.65)		
			[1, 4]	T(30)	4.74 (2.42)	1.95 (1.51)	1.40 (1.19)	1.81 (1.77)	1.15 (0.96)	1.06 (0.94)		
				NT(48)	45.87 (7.72)	3.51 (2.52)	2.61 (2.18)	2.11 (1.69)	1.98 (1.66)	1.65 (1.95)		
			100	[10, 30]	[1, 1]	T(30)	2.69 (1.65)	1.35 (0.90)	0.94 (0.70)	1.35 (0.71)	0.40 (0.57)	0.39 (0.51)
						NT(45)	2.35 (1.35)	1.25 (0.83)	0.60 (0.56)	1.28 (0.73)	0.71 (0.68)	0.35 (0.59)
[1, 2]	T(45)	2.71 (1.48)			1.12 (0.82)	0.97 (0.67)	0.87 (0.77)	0.93 (0.74)	0.33 (0.49)			
	NT(60)	11.60 (3.72)			1.61 (1.10)	1.08 (0.67)	1.31 (1.01)	1.04 (1.06)	0.55 (0.72)			
[1, 4]	T(75)	2.49 (1.38)			0.97 (0.73)	0.96 (0.77)	1.46 (1.11)	0.59 (0.64)	0.53 (0.50)			
	NT(120)	24.43 (3.73)			1.88 (1.20)	1.30 (1.03)	1.28 (1.06)	0.82 (0.81)	0.96 (1.04)			
평균 (표준편차)					13.44 (13.84)	2.15 (1.77)	1.41 (1.41)	1.66 (1.46)	1.20 (1.32)	1.03 (1.28)		

* 실험에 사용된 C값

† 표준편차

표 4. R값이 [0.1M, 0.6M]인 경우 IR값의 평균과 표준편차

N	M	R	S_i	C	d_1	d_2	d_3	d_4	d_{max1}	d_{max2}
30	40	[4, 24]	[1, 1]	T(24)	7.09 (3.84)	3.23 (2.74)	2.34 (1.99)	4.10 (2.19)	1.48 (2.01)	1.13 (1.15)
				NT(30)	20.52 (5.04)	3.52 (2.24)	1.87 (1.96)	2.84 (2.38)	0.99 (1.78)	1.78 (1.67)
			[1, 2]	T(36)	7.14 (4.07)	4.29 (1.89)	2.47 (2.07)	3.17 (2.58)	1.72 (1.75)	1.01 (1.22)
				NT(48)	22.02 (5.72)	3.60 (1.68)	1.86 (1.66)	2.33 (2.32)	2.16 (1.91)	1.85 (1.71)
			[1, 4]	T(60)	7.90 (5.40)	3.45 (2.14)	2.11 (1.79)	4.15 (3.13)	1.68 (1.79)	1.39 (1.37)
				NT(80)	22.26 (5.76)	2.96 (1.90)	2.16 (1.64)	2.56 (2.08)	1.44 (1.21)	1.32 (1.33)
100	[10, 60]	[1, 1]	[1, 1]	T(60)	3.94 (2.09)	2.14 (1.40)	1.37 (1.20)	3.06 (1.34)	0.75 (1.17)	0.88 (0.94)
				NT(75)	10.52 (2.54)	2.00 (1.32)	1.11 (1.20)	1.94 (1.46)	1.43 (1.17)	0.72 (0.98)
			[1, 2]	T(90)	5.11 (2.74)	2.50 (1.51)	1.49 (1.22)	2.41 (1.46)	0.99 (0.81)	0.59 (0.94)
				NT(120)	11.73 (2.52)	2.01 (1.58)	1.46 (1.16)	1.63 (1.25)	1.10 (1.78)	0.99 (1.03)
			[1, 4]	T(150) ^a	5.55 (3.35)	1.56 (1.09)	1.32 (0.96)	2.04 (0.88)	0.75 (0.95)	0.64 (0.75)
				NT(240)	4.56 (2.71)	1.11 (1.09)	1.03 (1.04)	0.79 (0.83)	0.90 (1.04)	0.96 (0.90)
50	40	[4, 24]	[1, 1]	T(24)	8.23 (5.93)	4.64 (1.98)	2.94 (1.67)	4.31 (1.51)	1.17 (1.38)	0.87 (1.18)
				NT(30)	28.69 (3.32)	4.04 (2.46)	2.08 (1.83)	3.13 (1.91)	0.90 (1.51)	1.55 (1.34)
			[1, 2]	T(36)	11.61 (6.59)	4.39 (2.99)	2.24 (1.99)	4.67 (2.54)	1.42 (1.87)	1.10 (1.46)
				NT(48)	31.87 (6.81)	4.37 (2.03)	1.91 (2.06)	3.04 (2.78)	1.02 (1.42)	2.35 (1.85)
			[1, 4]	T(60)	7.35 (2.71)	2.91 (1.95)	1.32 (1.18)	3.69 (2.13)	0.96 (0.96)	1.00 (1.24)
				NT(80)	33.77 (6.30)	4.41 (2.46)	2.53 (2.36)	3.68 (2.47)	1.41 (1.89)	1.97 (2.18)
100	[10, 60]	[1, 1]	[1, 1]	T(60)	5.19 (2.01)	1.49 (1.24)	1.14 (0.67)	2.49 (0.73)	0.48 (0.72)	0.45 (0.60)
				NT(75)	16.00 (3.69)	1.95 (1.56)	1.61 (1.14)	2.23 (1.79)	1.01 (1.25)	0.80 (1.07)
			[1, 2]	T(90)	5.29 (2.20)	1.73 (1.14)	1.20 (1.07)	2.71 (1.27)	0.73 (0.84)	0.45 (0.67)
				NT(120)	17.13 (2.76)	1.84 (1.42)	1.28 (1.12)	2.06 (1.31)	1.04 (0.96)	0.89 (0.95)
			[1, 4]	T(150)	6.87 (2.66)	2.30 (1.28)	1.47 (1.22)	2.45 (1.21)	0.85 (1.00)	0.52 (0.74)
				NT(240)	9.04 (4.37)	1.49 (0.84)	0.88 (0.70)	0.82 (0.91)	0.68 (0.57)	0.75 (0.78)
평균 (표준편차)					12.99 (9.80)	2.83 (2.10)	1.72 (1.58)	2.76 (2.09)	1.13 (1.41)	1.08 (1.30)

한 비율로 정의한 이산일양분포에서 임의로 선정하였다. 즉, M 값이 40인 경우의 R 값은 [4, 12]와 [4, 24]에서 선정하였고 100인 경우는 [10, 30]과 [10, 60]에서 선정하였다. S 값은 실제 현장의 상황을 고려하여 최대 4개의 슬롯을 요구하는 경우를 포함한 세 가지로 구분하였고 [1, 1], [1, 2], 그리고 [1, 4]의 범위를 갖는 이산일양분포에서 임의로 선정하였다. 또한 C 값은 R 과 S 를 고려하여 용량이 작은 경우(T)와 큰 경우(NT) 두 가지로 구분하였다. 각 유형에 대해 20문제씩 총 960문제를 선정하였다.

6가지 방법의 성능을 평가하기 위한 기준으로 다음과 같은 간접적인 방법을 사용하였다. 6가지 방법에 의한 목적함수의 값들 중에서 가장 우수한 것을 최저해로 하고, 이 최저해에 대해 각 방법에 의한 목적함수값의 개선비율(Improvement Ratio: IR)을 평가지수로 사용하였다.

$$IR(\%) = \left(\frac{\text{제시한 방법에 의한 해} - \text{최저해}}{\text{최저해}} \right) \times 100$$

총 960개의 문제를 수행한 결과는 <표 3>과 <표 4>와 같이 나타났다. 표에서 각 유형별로 실험한 20문제의 수행결과를 IR의 평균값으로 거리함수로 표시한 각열에 기록하였다. 이 표에서 각 함수 열에 있는 괄호 안의 숫자는 20문제에 대한 IR 값의 표준편차를 나타낸다. $d_3(i, j)$ 함수의 θ 값은 Hertz et al.(1998)에서 추천한 대로 0.25를 사용하였다. 표에서 나타난 바와 같이 6가지 방법 중 $d_1(i, j)$ 방법이 나머지 방법에 비해 가장 성능이 떨어지고 부품장착장치의 용량(C)이 큰 경우는 특히 좋지 않은 결과를 보여주고 있다. 전체 평균이나 표준편차 면에서 비교하면 본 연구에서 제시한 두 함수 중 $d_{new2}(i, j)$ 함수가 다른 함수에 비해 비교적 좋은 결과를 준다. 특히 각 제품이 요구하는 부품의 수의 편차가 크고 부품장착장치의 용량이 작은 경우 즉, R 값이 [0.1M, 0.6M]이고 C 값이 작은 경우(T)에 대해서 $d_{new2}(i, j)$ 에 의한 방법이 다른 방법에 비해 두 배 이상 좋게 나타났다. 이것은 부품교체가 자주 그리고 많이 발생하는 경우에 대해 특히 좋은 결과를 보여준다는 것을 의미하며 그 이유는 부품교체의 슬롯수를 다른 함수에 비해 비교적 정확하게 추정하기 때문인 것으로 판단된다. 또 다른 흥미로운 결과는 부품의 슬롯 크기가 1로 일정한 경우, 즉 S_i 가 [1, 1]인 경우에도 Hertz et al.(1998)이 제시한 함수 $d_3(i, j)$ 와 $d_4(i, j)$ 에 의한 결과보다 $d_{new2}(i, j)$ 에 의한 결과가 좋은 것으로 나타났다. 이는 Hertz et al.(1998)에서 실험한 상황과 같다.

5. 결론

본 연구는 다품종 소량생산하에서 크기가 상이한 부품들을 요구하는 여러 종류의 PCB를 생산하는 SMD기계상의 생산순서

결정문제를 다루었다. 이 문제에서는 각 PCB에 부착될 부품들을 부품장착장치에 장착하는 데 소요되는 총작업준비시간을 최소화하는 것을 목적함수로 하였으며 해결방법으로는 새로운 거리함수를 도입한 외판원문제를 기초로 한 발전적 기법을 제시하였다. 새로운 방법의 성능을 평가하기 위해서 많은 실험을 실시하였고 간접적인 평가기준을 사용하여 기존의 방법들과 비교하였다. 실험결과에 의하면 제시된 방법이 기존의 방법에 비해 비교적 좋은 해를 제공하는 것으로 나타났으며, 특히 작업준비가 길고 부품의 수와 종류가 많고 다양해서 부품 교체가 자주 발생하는 PCB 생산 현장에서 아주 짧은 시간 내에 좋은 해를 얻고자 하는 경우에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 다음과 같은 내용을 추가로 고려하여 확장될 수 있다. 먼저 제품의 생산순서가 주어지고 각 제품이 다양한 크기의 부품을 요구할 때 그 생산순서에 따른 부품교체를 해결하기 위한 효과적인 방법을 개발하는 것이다. 지금까지 이 문제에 대한 최적해를 주는 방법은 발표된 바가 없다. 또 다른 연구 방향은 여러 대의 SMD기계로 구성된 셀(Cell)이나 라인(Line)을 고려하는 것이다.

참고문헌

- Askin, R. G., Dror, M., and Vakharia, A. J. (1994), Printed circuit board family grouping and component allocation for a multimachine, open-shop assembly cell, *Naval Research Logistics*, 41, 587-608.
- Bard, J. F. (1988), A heuristic for minimizing the number of tool switches on a flexible machine, *IIE Transactions*, 20(4), 382-391.
- Crama, Y., Kolen, A. W. J., Oerlemans, A. G., and Spieksma, F. C. R. (1994), Minimizing the number of tool switches on a flexible machine, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 6, 33-54.
- Dessouky, M. M., Adiga, S. and Park, K. (1995), Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards, *International Journal of Production research*, 33(3), 757-775.
- Fathi, Y. and Taheri, J. (1989), A mathematical model for loading the sequencers in a printed circuit pack manufacturing environment, *International Journal of Production research*, 27(8), 1305-1316.
- Gunther, H. O., Gronalt, M., and Zeller, R. (1998), Job sequencing and component set-up on a surface mount placement machine, *Production Planning and Control*, 9(2), 201-211.
- Hashiba, S. and Chang, T. C. (1991), PCB assembly setup reduction using group technology, *Computers and Industrial Engineering*, 21(1-4), 453-457.
- Hertz, A., Laporte, G., Mittaz, M., and Steckel, K. E. (1998), Heuristics for minimizing tool switches when scheduling part types on a flexible machine, *IIE Transactions*, 30, 689-694.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan A. H. G., and Shmoys, D. B. (1985), The Traveling Salesman Problem: A Guide Tour of Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons, Chichester, U. K., 207-249.
- Luzzatto, D. and Perona, M. (1993), Cell formation in PCB assembly based on production quantitative data, *European Journal of Operational Research*, 69, 312-329.
- Matzliach, B. and Tzur, M. (1998), The online tool switching problem with non-uniform tool size, *International Journal of Production research*, 36(12),

3407-3420.

Privault, C. and Finke, G. (1995), Modelling a tool switching problem on a single NC-machine, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6, 87-94.

Rajkumar, K. and Narendran, T. T. (1998), A heuristic for sequencing PCB assembly to minimize set-up times, *Production Planning and Control*, 9(5), 465-476.

Randhawa, S. U., McDowell, E. D., and Faruqi, S. D. (1985), An integer programming application to solve sequencer mix problems in printed circuit board production, *International Journal of Production research*, 23(3), 543-552.

Sadiq, M., Landers, T. L., and Don Taylor, G. (1993), A heuristic algorithm for minimizing total production time for a sequence of jobs on a surface mount placement machine, *International Journal of Production research*, 31(6), 1327-1341.

Sule, D. R. (1992), A heuristic procedure for component scheduling in printed circuit pack sequencers, *International Journal of Production research*, 30(5), 1191-1208.

Tang, C. S. and Denardo, E. V. (1988), Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part I: Minimization of the Number of Tool Switches, *Operations Research*, 36(5), 767-777.

송창용

한양대학교 산업공학과 학사

한국과학기술원 산업공학과 석사

한국과학기술원 산업공학과 박사

현재: 탐라대학교 경영학전공 전임강사

관심분야: FMS/CIM, ERP, 물류/생산관리, 데이터베이스 등

신성환

인하대학교 산업공학과 학사

한국과학기술원 산업공학과 석사

한국과학기술원 산업공학과 박사

현재: 한라대학교 기계공학부 조교수

관심분야: 생산시스템 최적화, 물류관리 등