

# 인쇄회로기판 조립용 디스펜서의 경로계획 알고리즘

## A Path Planning Algorithm for Dispenser Machines in Printed Circuit Board Assembly System

송 종 석, 박 태 형

(Jong-Seok Song and Tae-Hyoung Park)

**Abstract** : This paper proposes a path planning algorithm for dispensers to increase the productivity in printed circuit board assembly lines. We analyze the assembly sequence of the dispenser, and formulate it as an integer programming problem. The mathematical formulation can accommodate multiple heads and different types of heads through extended cost matrix. The TSP algorithms are then applied to the formulated problem to find the near-optimal solution. Simulation results are presented to verify the usefulness of the proposed scheme.

**Keywords** : PCB assembly, SMT, dispenser machine, path optimization, TSP algorithm

### I. 서론

컴퓨터, 휴대폰 등 정보통신 제품의 수요가 급증함에 따라, 제품 경쟁력의 향상을 위한 생산라인의 생산성 증대가 매우 중요시되고 있다. PCB (Printed Circuit Board; 인쇄회로기판) 조립라인은 전자부품을 PCB 에 자동으로 조립하는 생산시스템으로서, 생산성 및 수율 측면에서 핵심 공정을 수행하는 정보통신 제품의 제조라인이다. 따라서 정보통신 제품의 경쟁력을 높이기 위해서는 PCB 조립라인의 조립시간을 단축시키기 위한 연구가 필수적이다.

PCB 조립라인은 PCB 및 조립부품의 형식에 따라 자동삽입라인과 SMT(Surface Mount Technology; 표면실장기술) 라인으로 구분된다. 자동삽입라인은 삽입형 부품을 PCB 의 홀에 삽입하여 조립하는 라인이며, SMT라인은 표면실장형의 부품을 PCB 위에 장착시켜 조립하는 라인이다. 전자제품의 경박 단소화 추세에 입각하여 SMT라인의 비중이 크게 증가하고 있으며 자동조립의 수월성 측면에서도 유리하다[1]. 그림 1 은 SMT라인의 한 예를 보여준다. SMT라인은 로더, 스크린프린터, 디스펜서, 칩마운터, 리플로우어 및 언로더 등의 자동장비에 의하여 직렬로 구성된다. 로더에 의하여 PCB가 투입되며, 스크린 프린터는 PCB 의 납땜 패드에 납 크립을 도포한다. 디스펜서는 PCB의 부품이 실장될 위치에 정착액을 분사한다. 삽입형 부품이 아닌 표면실장형 부품의 경우 실장된 부품이 PCB로부터 미끄러져 위치를 이탈할 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 사전에 부품이 실장될 위치에 접착제를 분사하는 것이다. 칩마운터는 부품을 PCB 에 실장하는 공정을 담당하며 2-3 대가 분할하여 실장작업을 수행한다. 리플로우어는 반 액체 상태의 납 크립을 경화하여 PCB 조립을 완료시킨다.

그림 2는 디스펜서의 모형을 보여준다. 디스펜서는 직교 좌표형 로봇의 범주에 속하며 X축 및 Y축 구동에 의하여

헤드를 이동시킨다. 헤드는 정착액을 담은 용기(glue vessel)와 정착액을 분사하는 노즐로 구성되어 있다. 헤드의 수에 따라 하나의 헤드를 갖는 단일헤드 디스펜서와 2-3 개의 헤드를 갖는 멀티헤드 디스펜서로 구분될 수 있다. 또한 노즐은 분사량에 따라 여러 가지 종류로 분류될 수 있다. 부품의 크기에 따라 요구되는 정착액의 양이 다를 수 있기 때문이다. 멀티헤드 디스펜서는 모두 동일한 분사량의 노즐을 갖는 동형 멀티헤드 디스펜서와 서로 다른 분사량의 노즐을 갖는 이형 멀티헤드 디스펜서로 구분될 수 있다. 삼성항공산업의 DP20/30 [2], YAMAHA사의 YV64D/86D/100D [3], JUKI사의 D780 /770 [4] 등은 대표적인 멀티헤드 디스펜서이다.

디스펜서의 헤드는 PCB 상의 수십 내지 수백 개의 지정된 장착점을 방문하며 정착액을 분사한다. 이 때 디스펜서 헤드의 전체 이동시간은 장착점의 방문순서에 따라 크게 달라질 수 있으며, 따라서 디스펜서의 조립시간 단축을 위해서는 디스펜서 헤드의 이동경로에 대한 최적화가 필요하다. 일반적으로 디스펜서 제조업체들은 디스펜서의 작업순서를 자동으로 작성하는 프로그램을 사용자에게 제공하며, 이 프로그램의 최적화 성능은 디스펜서의 생산성에 크게 영향을 준다.

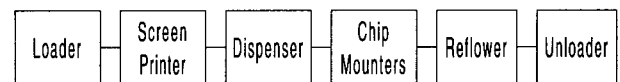


그림 1. SMT 인라인 시스템.

Fig. 1. A SMT in-line system.

본 논문은 SMT라인의 디스펜서를 대상으로 하여 작업시간 단축을 위한 경로계획 방법을 제시한다. SMT 라인의 칩마운터를 대상으로 한 경로계획 문제에 대하여는 많은 연구 결과가 발표되었으나[5][6][7][8], 디스펜서를 대상으로 한 경우는 본 논문이 처음이라고 추정된다. 디스펜서 헤드의 작업경로를 분석하여 정수계획문제의 하나인 TSP(Traveling Salesman Problem; 외판원 문제)[9] 로 모

접수일자 : 1999. 11. 30., 수정완료 : 2000. 3. 14.

송종석 : (주) 키스컴

박태형 : 충북대학교 전기전자공학부

※이 연구는 정보통신부의 정보통신 우수시범학교 지원사업에 의하여 수행되었습니다.

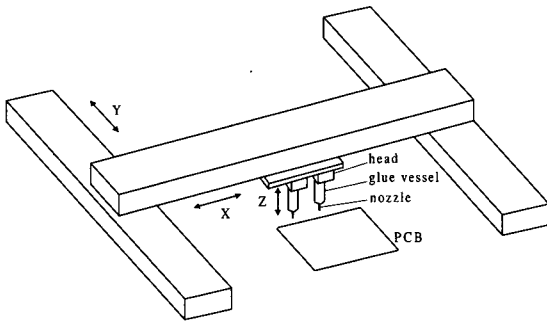
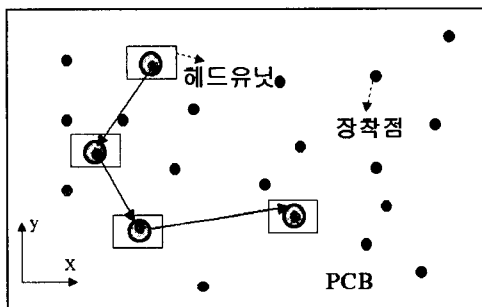


그림 2. 디스펜서의 모형.  
Fig. 2. Dispenser model.

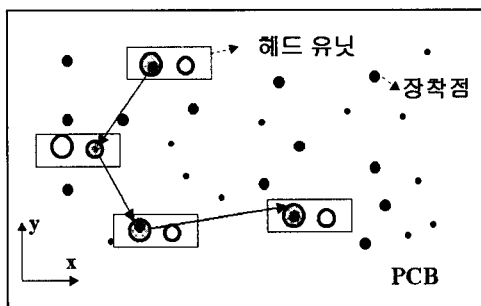
모델링한다. 단일 헤드 디스펜서의 경우는 전형적인 TSP 로 변환되며, 멀티헤드 디스펜서의 경우는 확장된 형태의 비용행렬을 갖는 TSP 로 변환된다. 이 때 동형 멀티헤드 디스펜서와 이형 멀티헤드 디스펜서를 모두 고려한다. 변환된 최적화 문제에 변형된 TSP 알고리즘을 적용하여 근사 최적해를 구한다. 제안된 방법을 모의 멀티헤드 디스펜서에 적용한 시뮬레이션 결과를 제시하고 그 유용성을 확인한다.

II. 디스펜서의 경로계획 문제

그림 3은 디스펜서가 PCB의 지정된 장착점에 정착액을 분사하는 작업 시퀀스를 묘사한다. 그림 3(a)는 단일헤드 디스펜서의 작업시퀀스로서 한 개의 헤드에 의하여 작업



(a) 단일헤드 디스펜서



(b) 멀티헤드 디스펜서

그림 3. 디스펜서의 작업 시퀀스.  
Fig. 3. Assembly sequence of dispenser.

이 이루어진다. 최초 지정된 대기점에서 출발한 헤드는 모든 장착점을 한번 씩 방문하고 다시 대기점으로 복귀한다. 단일헤드 디스펜서의 헤드가 방문하여야 하는 장착점의 집합  $M$  을 다음과 같이 정의한다.

$$M = \{0, 1, 2, \dots, m\} \tag{1}$$

단, 원소 0 는 대기점을 의미하며, 원소 1, 2, ...,  $m$  은 정착액이 분사되어야 하는 장착점을 의미한다. 단일헤드 디스펜서의 작업경로는, 헤드가 최초의 대기점에서 출발하여 모든 장착점을 한번씩 방문하여 작업한 후 다시 대기점으로 돌아오는 해밀토니안 경로(Hamiltonian path)[10]로서, 다음의 경로집합  $P_s$ 로 표현될 수 있다.

$$P_s = \{ \langle n_0, n_1 \rangle, \langle n_1, n_2 \rangle, \dots, \langle n_m, n_0 \rangle \} \tag{2}$$

단, 노드  $n_k \in M$  는  $k$ 번째 방문노드를 의미하며,  $n_0 = 0$ 로서 대기점을 의미한다. 또한 아크  $\langle n_k, n_{k+1} \rangle$ 는 노드  $n_k$ 에서 노드  $n_{k+1}$ 까지의 이동경로를 의미한다.

장착점  $i, j \in M$  사이의 이동시간  $t_{ij}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_{ij} = \max \{ \tau_x(|x_i - x_j|), \tau_y(|y_i - y_j|) \} \tag{3}$$

단,  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 는 각각 장착점  $i, j$ 의 XY 좌표이다. 또한  $\tau_x(\cdot), \tau_y(\cdot)$  각각 디스펜서의 X축 및 Y축 이동에 소요되는 이동시간으로서 각 축 이동거리의 함수이다. 디스펜서는 X, Y축의 독립적인 구동에 의하여 이동이 이루어지므로 이동시간은 (3)과 같이 X축 센터의 이동시간과 Y축 센터의 이동시간의 최대 값으로 계산된다.

단일헤드 디스펜서의 경로계획 문제(SDP; Single-head Dispenser Problem)는 총 이동시간이 최소화되는 최적의 이동경로  $P_s^*$ 를 생성시키는 문제로서, 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$(SDP) \quad P_s^* = \arg \min_{P_s} \sum_{\langle n_k, n_{k+1} \rangle \in P_s} t_{n_k, n_{k+1}} \tag{4}$$

그림 3(b)는 멀티헤드 디스펜서의 예로서 여러 개의 헤드가 함께 이동하며 작업을 수행한다. 모든 장착점에 대하여 임의의 헤드가 방문할 수 있는 경우가 동형이고, 각 장착점별로 사용 헤드의 형식이 구분되어 있는 경우가 이형이다. 그림 3(b)는 이형 멀티헤드 디스펜서의 작업 시퀀스로서, 장착점별로 요구되는 분사량이 다른 경우 (큰 점, 작은 점), 적절한 분사노즐을 부착한 헤드(큰 원, 작은 원)가 방문하여야 한다. 멀티헤드 디스펜서의 경우 여러 개의 헤드가 동시에 이동하며, 이동시간의 단축에 유리한 헤드를 사용하여 장착점을 방문할 수 있다. 따라서 전체 이동시간의 단축을 도모할 수 있으나, 장착점별 방문 헤드를 추가로 결정하여야 하는 어려움이 수반된다.

멀티헤드 디스펜서에 부착된 헤드의 집합  $H$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$H = \{1, 2, \dots, h\} \tag{5}$$

단,  $h \leq m$ 이다. 또한 헤드 및 장착점의 분사형식의 집합  $\Lambda$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Lambda = \{1, 2, \dots, \lambda\} \quad (6)$$

단,  $\lambda \leq h$ 이다. 함수  $\varepsilon : M \rightarrow \Lambda$ 를 각 장착점의 분사형식을 지정하는 함수로 정의하며, 함수  $\psi : H \rightarrow \Lambda$ 는 각 헤드의 분사형식을 지정하는 함수로 정의한다.

단일헤드 디스펜서와 달리 멀티헤드 디스펜서의 이동 경로는 방문하는 장착점과 사용헤드를 함께 포함하여야 한다. 멀티헤드 디스펜서의 작업경로  $P_m$ 을 다음과 같이 표현한다.

$$P_m = \{ \langle n_0, h_0, n_1, h_1 \rangle, \dots, \langle n_m, h_m, n_0, h_0 \rangle \} \quad (7)$$

단,  $h_k \in H$ 는  $k$ 번째 노드  $n_k$ 를 방문하는 헤드이다. 또한  $\langle n_k, h_k, n_{k+1}, h_{k+1} \rangle$ 는  $k$ 번째 노드  $n_k$ 를 헤드  $h_k$ 가 방문하고,  $k+1$ 번째 노드  $n_{k+1}$ 을 헤드  $h_{k+1}$ 가 방문하는 경로를 의미한다. 이 때 멀티헤드 디스펜서의 헤드별 분사형식과 장착점별 분사형식을 고려하기 위하여 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\xi(n_k) = \psi(h_k) \quad , k=1, \dots, m \quad (8)$$

멀티헤드 디스펜서의 장착점간 이동시간은 헤드별 위치를 추가로 고려하여 계산되어야 한다. 장착점  $i \in M$ 를 헤드  $p \in H$ 가 방문한 후 장착점  $j \in M$ 를 헤드  $q \in H$ 가 방문한 경우, 이동시간  $\bar{t}_{(i,p),(j,q)}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{t}_{(i,p),(j,q)} = \max \{ \tau_x(|x_i + \delta_p - x_j - \delta_q|), \tau_y(|y_i - y_j|) \} \quad (9)$$

단,  $\delta_p, \delta_q$ 는 기준 헤드의 중심으로부터 헤드  $p, q$  중심까지의 X축 좌표 값이다.

멀티헤드 디스펜서의 경로계획 문제(MDP; multi-head dispenser problem)는 총 이동시간이 최소화되는 최적의 작업경로  $P_m^*$ 을 생성시키는 문제로서, 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$(MDP) P_m^* = \arg \min_{P_m} \sum_{\langle n_k, h_k, n_{k+1}, h_{k+1} \rangle \in P_m} \bar{t}_{(n_k, h_k), (n_{k+1}, h_{k+1})} \quad (10)$$

### III. 정수계획 문제로의 변환

#### 1. 단일헤드 디스펜서 문제

앞장에서 정의된 단일헤드 디스펜서 및 멀티헤드 디스펜서의 경로최적화 문제를 정수계획문제로 변환하여 구성한다. 단일헤드 디스펜서 문제의 구성을 위하여 결정변수  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ 를 정의한다. 장착점  $i, j \in M$ 에 대하여, 두 장착점 사이가 직접 연결된 경우  $x_{ij}=1$ 이며, 그렇지 않은 경우  $x_{ij}=0$ 이다. (4)에서 정의된 단일헤드 디스펜서의 경로 최적화 문제는 다음과 같이 구성된다.

$$(SDP) \quad [x_{ij}^*] = \arg \min_{x_{ij} \in \{0, 1\}} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m t_{ij} x_{ij} \quad (11)$$

s.t

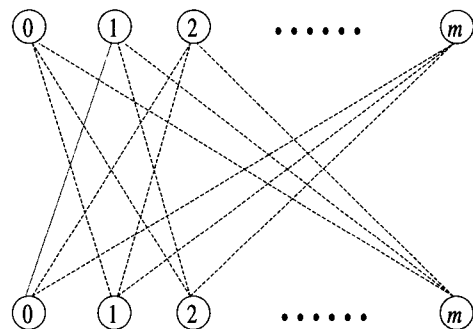
$$\sum_{i=0}^m x_{ij} = 1 \quad , \forall j \in M \quad (12)$$

$$\sum_{j=0}^m x_{ij} = 1 \quad , \forall i \in M \quad (13)$$

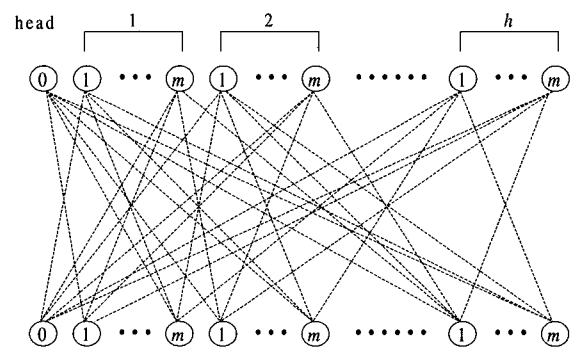
$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad , \forall S \subset M \quad (14)$$

$t_{ij}$ 는 장착점  $i, j$  사이의 이동에 소요되는 시간으로서 (3)과 같으며, 따라서 (11)은 전체 이동경로의 소요시간에 대한 최소화를 의미한다. (12)는 각 장착점에 대한 입력아크의 수가 1임을 의미하며, (13)은 각 장착점에 대한 출력아크의 수가 1임을 의미한다. 즉 각 장착점에 대하여 한번의 방문이 이루어져야 함을 의미한다. (14)의  $|S|$ 는 장착점  $M$ 의 진 부분집합  $S$ 의 원소의 개수를 표시한다. 이 식은 전체 장착점 중의 일부 장착점들만에 의하여 사이클이 구성될 수 없음을 의미한다. 즉 모든 장착점을 방문하는 사이클 경로의 생성을 요구하는 제약식이다. 결국 (12)-(14)의 제약식에 의하여 해밀토니안 사이클이 구성될 수 있다.

(11)-(14)의 정수계획문제는 전형적인 TSP 문제이며,  $[t_{ij}] \in R^{(m+1) \times (m+1)}$ 인 비용행렬을 구하여 TSP 알고리즘을 적용할 수 있다[6][9]. 그림 4(a)는 단일헤드 디스펜서 문제의 최적화 모형으로서,  $m+1$ 개의 노드를 갖는 최적화 문제이다.



(a) 단일헤드 디스펜서 문제 (SDP)



(b) 멀티헤드 디스펜서 문제 (MDP)

그림 4. 최적화 모형.

Fig 4. Optimization model.

정수계획문제 (11)-(14)의 최적해  $[x_{ij}^*] \in \{0, 1\}^{(m+1) \times (m+1)}$  를 구하여 단일헤드 디스펜서의 최적경로  $P_s^*((4))$ 를 생성시킬 수 있다. 즉 다음의 재귀적 관계식에 의하여  $k$ 번째 방문노드  $n_k \in M$  를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0 \\ n_k &= j \quad (x_{n_{k-1}, j}^* = 1) \quad , k=1, \dots, m \end{aligned} \quad (15)$$

2. 멀티헤드 디스펜서 문제

단일헤드 디스펜서의 경우 장착점만에 의하여 경로가 표현될 수 있으므로, 장착점을 노드로 정의하였다. 그러나 멀티헤드 디스펜서의 경우 장착점과 헤드를 함께 사용하여야 경로를 표현할 수 있다. 그러므로 멀티헤드 디스펜서 문제의 구성을 위하여 확장노드를 정의한다. 장착점  $i \in M$  에 헤드  $p \in H$  가 방문한 경우를 하나의 확장노드  $\alpha$  로 표현하며 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha \equiv (p-1) \cdot m + i \quad , p=1, \dots, h, i=1, \dots, m \quad (16)$$

단,  $h \leq m$  이며, 헤드  $p$ 와 장착점  $i$ 의 분사형식이 일치하여야 한다. 즉,

$$\xi(i) = \psi(p) \quad (17)$$

확장노드를 원소로 하는 집합  $\bar{M}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{M} = \{0, 1, \dots, m, m+1, \dots, 2m, \dots, hm\} \quad (18)$$

단, 원소 0는 대기점에 기준헤드가 방문함을 의미한다. 또한 집합  $\bar{M}$ 의 부분집합  $\bar{M}_i$  ( $i=1, \dots, m$ )을 장착점  $i$ 만을 포함하는 확장노드의 집합으로 정의한다. 즉,

$$\bar{M}_i = \{i, m+i, \dots, (h-1)m+i\} \quad (19)$$

멀티헤드 디스펜서 문제의 구성을 위하여 결정변수  $\bar{x}_{\alpha\beta} \in \{0, 1\}$ 를 정의한다. 확장노드  $\alpha, \beta \in \bar{M}$ 에 대하여, 두 확장노드가 직접 연결된 경우  $\bar{x}_{\alpha\beta} = 1$ 이며, 그렇지 않은 경우  $\bar{x}_{\alpha\beta} = 0$ 이다. (10)에서 정의된 멀티헤드 디스펜서의 경로 최적화 문제는 다음과 같이 구성된다.

(MDP)

$$[\bar{x}_{\alpha\beta}^*] = \arg \min_{\bar{x}_{\alpha\beta} \in [\bar{x}_{\alpha\beta}]} \sum_{\alpha=0}^{hm} \sum_{\beta=0}^{hm} \bar{t}_{\alpha\beta} \bar{x}_{\alpha\beta} \quad (20)$$

s.t.

$$\sum_{\alpha \in \bar{M}_i} \bar{x}_{\alpha\beta} = 0 \quad , \forall \beta \in \bar{M}_i \quad (21)$$

$$\sum_{\alpha \in \bar{M}_i} \bar{x}_{\alpha\beta} = 1 \quad , \forall \beta \in \bar{M}_j \quad (i \neq j) \quad (22)$$

$$\sum_{\beta \in \bar{M}_i} \bar{x}_{\alpha\beta} = 1 \quad , \forall \alpha \in \bar{M}_i \quad (i \neq j) \quad (23)$$

$$\sum_{\alpha \in \bar{S}} \sum_{\beta \in \bar{S}} \bar{x}_{\alpha\beta} \leq \|\bar{S}\| - 1 \quad , \forall \bar{S} \subset \bar{M} \quad (24)$$

(20)은 전체 이동시간의 최소화를 의미하며,  $\bar{t}_{\alpha\beta}$ 는 확장

노드  $\alpha, \beta$  사이의 이동에 소요되는 시간으로서 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{t}_{\alpha\beta} \equiv \bar{t}_{(i,p),(j,q)} \quad (25)$$

단,  $\bar{t}_{(i,p),(j,q)}$ 는 (9)에서 정의되었다. 이 때  $i$ 와  $p$ 는 확장노드  $\alpha$ 에 해당하는 장착점 및 헤드이며,  $j$ 와  $q$ 는 확장노드  $\beta$ 에 해당하는 장착점 및 헤드로서, (16)에 의하여 다음의 관계를 갖는다.

$$i = \text{mod}(\frac{\alpha-1}{m}) + 1, \quad p = \text{int}(\frac{\alpha-1}{m}) + 1 \quad (26)$$

$$j = \text{mod}(\frac{\beta-1}{m}) + 1, \quad q = \text{int}(\frac{\beta-1}{m}) + 1 \quad (27)$$

단, 기호  $\text{mod}(\frac{a}{b})$  및  $\text{int}(\frac{a}{b})$ 는 각각 정수  $a$ 를 정수  $b$ 로 나누었을 때의 나머지 및 몫을 의미한다.

(21)은 같은 장착점을 여러 헤드에 의하여 중복 방문할 수 없음을 의미한다. (22)는 각 장착점에 대한 입력아크의 수가 1임을 의미하며, (23)은 각 장착점에 대한 출력아크의 수가 1임을 의미한다. (24)의  $\|\bar{S}\|$ 는 장착점  $\bar{M}$ 의 진부분집합  $\bar{S}$ 에 포함된 서로 다른 장착점의 개수를 표시한다. 이 식은 전체 장착점 중의 일부 장착점들만에 의하여 사이클이 구성될 수 없음을 의미한다. 즉 모든 장착점을 방문하는 사이클 경로의 생성을 요구하는 제약식이다. 결국 (21)-(24)의 제약식에 의하여 헤밀토니안 사이클이 구성될 수 있다. (20)-(24)에 주어진 정수계획문제는 TSP의 범주에 속하는 문제로 간주될 수 있다. 즉  $[\bar{t}_{ij}] \in R^{(hm+1) \times (hm+1)}$ 의 비용행렬을 구하여 TSP 알고리즘을 적용할 수 있다. 이 때 (21)-(24)의 조건이 알고리즘에서 적절히 고려되어야 한다. 그림 4(b)는 멀티헤드 디스펜서 문제의 최적화 모형으로서,  $hm+1$ 개의 노드를 갖는 최적화 문제이다.

정수계 획문제 (20)-(24)의 최적해  $[\bar{x}_{ij}^*] \in \{0, 1\}^{(hm+1) \times (hm+1)}$ 를 구하여 멀티헤드 디스펜서의 최적 경로  $P_m^*((10))$ 을 생성시킬 수 있다. 즉 다음의 재귀적 관계식에 의하여  $k$ 번째로 방문하는 확장노드  $\bar{n}_k \in \bar{M}$ 을 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{n}_0 &= 0 \\ \bar{n}_k &= \beta \quad (\bar{x}_{\bar{n}_{k-1}, \beta}^* = 1) \quad , k=1, \dots, m \end{aligned} \quad (28)$$

확장노드가 결정되면 (27)에 의하여 장착점 및 헤드가 결정된다.

IV. 경로계획 알고리즘

정수계 획문제로 변환된 단일헤드 디스펜서의 경로 최적화문제(SDP)는 전형적인 TSP이므로, 잘 알려진 TSP 알고리즘을 적용하여 그 해를 구할 수 있다. 그러나 멀티헤드 디스펜서의 경로최적화 문제(MDP)는 확장된 형태의 TSP로서, 새로운 알고리즘의 개발을 필요로 한다.

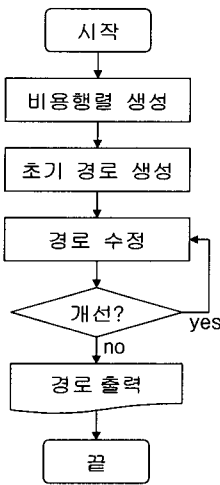


그림 5. 경로계획 알고리즘의 흐름도.  
Fig 5. Flowchart of path planning algorithm.

TSP 는 NP-hard 의 조합 최적화 문제에 속한다.[9] 따라서 최적해를 보장하며 다항식의 계산복잡도를 갖는 최적화 알고리즘의 개발은 어렵다고 알려져 있다.[9][11][12] TSP 문제의 근사 최적해를 짧은 시간에 구할 수 있는 방법에 관한 많은 연구가 진행되었으며, 다음의 세 가지 범주로 구분될 수 있다[11][12]

1) 경로 구성법(tour construction)

출발노드를 임의로 지정하고 그 노드로부터 다음 노드를 하나씩 차례대로 찾아내는 방법이다. 근접노드 연결법(nearest neighbor), 삽입 발견법(insertion heuristics) 등이 이 방법에 해당된다.

2) 부경로 소거법(subtour elimination)

할당 문제(assignment problem)의 해법을 이용하여 얻을 수 있는 부경로들을 합성하여 최적경로를 찾아내는 방법이다. 정수선형계획법(integer linear programming), 분기 및 경계법(branch and bound method) 등이 여기에 속한다.

3) 경로 수정법(tour-to-tour improvement)

우선 완성된 초기 경로를 임의로 생성한다. 초기 경로의 일부 노드의 방문순서를 교체하여 총 비용이 줄어든 경우 새로운 수정경로를 생성한다. 경로의 수정을 총 비용이 더 이상 줄어들지 않을 때까지 반복한다. 2-opt, 3-opt 및 Simulated Annealing 방법 등이 여기에 해당한다.

또한 방문노드의 수가 많은 문제의 경우, 적은 계산시간에 효과적인 해를 구하기 위하여, 인간의 판단력으로 위의 몇 가지 방법을 절충시킨 발견적 기법이 많이 사용되고 있다. [13][14][15][16] 방문 노드의 수가 수백-수천에 이르는 디스펜서 문제의 경우, 경로계획 알고리즘의 계산복잡도가 높으면 디스펜서의 운용 프로그램 작성에 많은 시간이 소요될 수 있다. 이는 작업준비시간의 지연을 초래하며 전체 SMT라인의 가동률에도 영향을 줄 수 있다. 최근의 다품종 소량생산의 FMS(Flexible Manufacturing System) 추세에 입각하여 라인에 투입되는 PCB 모델의 교체주기가 짧아지고 있으며, 따라서 낮은 계산복잡도를 갖는 경로계

획 알고리즘이 필요하다.

본 논문은 멀티헤드용 디스펜서의 경로계획문제의 해를 구하기 위한 멀티헤드용 TSP 알고리즘을 제안한다. 비교적 합리적인 초기 경로를 생성하고, 이로부터 경로 수정하여 개선된 경로를 생성시키는 방법을 적용한다. 근접노드 연결법을 멀티헤드 디스펜서 문제에 변형하여 적용하여 초기경로를 구성한 후, 2-opt 방법에 의하여 초기 경로를 수정하여 근사 최적해를 구하는 방법이다. 그림 5는 본 논문에서 제시하는 멀티헤드용 TSP 알고리즘의 흐름도이다.

흐름도의 각 단계에서 처리하는 과정은 다음과 같다.

단계 1: 비용행렬 생성

멀티헤드 디스펜서 문제의 비용행렬  $[ \bar{t}_{\alpha\beta} ] \in R^{(hm+1) \times (hm+1)}$ 를 구하고, 결정변수 행렬  $[ \bar{x}_{\alpha\beta} ] \in \{0, 1\}^{(hm+1) \times (hm+1)}$ 을 초기화한다.

S1. 주어진 장착점 집합  $M((1))$ 과 헤드 집합  $H((5))$ 로부터 확장노드의 집합  $\bar{M}((18))$ 을 생성시킨다.

S2. 확장노드  $\alpha, \beta \in \bar{M}$ 에 대하여  $\bar{t}_{\alpha\beta}((25))$ 를 계산하여 비용행렬  $[ \bar{t}_{\alpha\beta} ]$ 에 저장한다. 이 때 (17)의 분사형식 조건을 만족시키지 못하는 경우, 비용행렬의 원소는 매우 큰 값으로 설정한다.

S3. 행렬  $[ \bar{x}_{\alpha\beta} ]$ 의 모든 원소를 0으로 초기화한다.

단계 2: 초기경로 생성

초기경로  $\bar{n}_k (k=0, 1, \dots, m)$ 을 생성한다.

S1. 방문카운터를 0으로 설정한다. 또한  $\alpha=0$ 으로 설정한다.

S2.  $\beta=1$ 로 설정한다.

S2.1.  $\bar{x}_{\alpha\beta}=1$ 이면 S2.3으로 간다. 그렇지 않으면  $\bar{x}_{\alpha\beta}=1$ 라 가정하여 (21)-(23)의 제약식이 만족되는지의 여부를 확인한다. 만족시키지 못하면 S2.3으로 간다.

S2.2.  $\bar{t}_{\alpha\beta}$ 가 최소가 되면  $\beta$ 를  $\beta^*$ 로 저장한다.

S2.3.  $\beta$ 를 1 증가시킨다.  $\beta \leq hm$ 이면 S2.1로 가고 그렇지 않으면 S3으로 간다.

S3.  $\bar{x}_{\alpha\beta^*}=1$ 로 설정하고, 방문 카운터를 1 증가시킨다. 방문 카운터가  $m$  미만이면  $\alpha=\beta^*$ 로 하여 S2.1로 간다. 그렇지 않으면  $\bar{x}_{\beta^*0}=1$ 로 설정하고 S4로 간다.

S4. S1-S3에 의하여 생성된  $[ \bar{x}_{\alpha\beta} ]$ 에 대하여 다음을 수행한다.

S4.1.  $\bar{n}_0=0$ 로 하고  $k=1$ 로 설정한다.

S4.2.  $\bar{x}_{n_{k-1}, \beta}=1$ 인  $\beta$ 를  $\bar{n}_k$ 에 저장시킨다.

S4.3.  $k$ 를 1 증가시킨다.  $k>m$ 이면 종료하고 그렇지 않으면 S4.2로 간다.

단계 3: 경로 개선

[단계 2]에서 생성된 초기경로  $\bar{n}_k$ 를 개선하여 새로운 경로를 생성한다.

S1. 전체 이동시간  $t_{total}$ 을 계산한다.

S2.  $k=1$ 로 설정한다. 또한 부울변수  $IMP = FALSE$ 로 설정한다.

S3.  $l=k+1$ 로 설정하고,  $\Delta t_{max}=0$ 으로 설정한다.

S3.1.  $\bar{n}_k$ 와  $\bar{n}_l$ 의 값을 서로 교환하고, 교환 전의 전체

이동시간에서 교환 후의 전체 이동시간을 뺀 값  $\Delta t$  를 구한다.  $\Delta t > \Delta t_{max}$  이면 다음의 S3.1.1 을 수행하고 그렇지 않으면 S3.2 로 간다.

S3.1.1. IMP=TRUE,  $\Delta t_{max} = \Delta t$ ,  $l^* = l$  로 설정한다.

S3.2.  $\bar{n}_k$  와  $\bar{n}_l$  의 값을 다시 교환한다.

S3.3.  $l$  을 1 증가시킨다.  $l \leq m$  이면 S3.1 로 가고, 그렇지 않으면 S4 로 간다.

S4.  $\bar{n}_k$  와  $\bar{n}_l$  의 값을 서로 교환하고,  $t_{total} = t_{total} - \Delta t_{max}$  로 설정한다.

S5.  $k$  1 증가시킨다.  $k \leq m-1$  이면 S3 로 가고, 그렇지 않으면 다음의 S6 로 간다.

S6. IMP 가 FALSE 이면 종료하고, 그렇지 않으면 S2 로 간다.

초기경로 알고리즘의 계산복잡도는  $O(h^2 m^2)$  ( $h$ : 헤드 수,  $m$ : 장착점 수) 이다. 또한 경로개선 알고리즘의 계산복잡도는  $O(\rho h^2 m^2)$  이며, 이 때  $\rho$  은 개선이 진행되는 전체 루프의 수로서, 대략 1 에서 10 사이의 값을 갖는다. 따라서 멀티헤드 TSP 알고리즘의 전체 계산복잡도는  $O(h^2 m^2)$  으로 간주할 수 있다. 또한 상용화된 멀티헤드 디스펜서의  $h$  값은 통상 2 또는 3 이므로, 본 논문에서 제시한 알고리즘의 실제 계산복잡도는  $O(m^2)$  이다. 그러므로 2-3개의 헤드를 갖는 멀티헤드 디스펜서가 수백 개의 장착점에 대한 작업을 수행하는 일반적인 경우에 대하여, 본 논문에서 제시한 알고리즘이 효과적으로 적용될 수 있다.

## V. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 멀티헤드 디스펜서의 경로계획 알고리즘, 즉 멀티헤드용 TSP 알고리즘을 컴퓨터 프로그램으로 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터 프로그램은 MS-Visual C++을 사용하여 작성되었으며 MS-Windows98 운영체제를 갖는 IBM-PC Pentium-II 호환기종에서 수행되었다. 시뮬레이션 모델로서 2 개의 헤드를 갖는 멀티헤드 디스펜서를 사용하였다. 이 때 디스펜서의 헤드가 부착된 XY 겐트리의 속도는 X축과 Y축이 동일한 사다리꼴의 가 감속 프로파일 갖는다고 가정하였으며, 최고 속력은 0.1(m/s), 가속도는 0.05(m/s<sup>2</sup>)로 설정하였다. 또한 헤드간의 간격은 50(mm)로 설정하였다. PCB 의 장착점은 난수를 발생하여 생성하였으며, 장착점 사이의 최소 거리는 5(mm)로 설정하였다.

우선 헤드 두 개의 분사형식이 서로 다른 이형 멀티헤드 디스펜서를 대상으로 알고리즘을 수행하였다. 이 때 각 헤드가 방문하여야 할 장착점의 수량은 동일하다고 가정하였다. 제시된 알고리즘의 성능 분석을 위하여 비교 알고리즘을 구현하였다. 비교 대상으로 사용한 알고리즘은 각 헤드 별로 별도의 TSP 알고리즘을 적용하는 방(헤드별 TSP)이다. 즉 어느 헤드가 해당 장착점들을 모두 방문 한 후, 다른 헤드가 해당 장착점들을 모두 방문하는 방식이다. 각 헤드의 방문순서는 근접노드연결법과 2-opt 방법을 병행한 TSP 알고리즘에 의하여 결정하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 멀티헤드 디스펜서 문제를 통합된 하나의 TSP 로 정의하고, 이를 위한 알고리즘을 개발하여 적용하는 방법이다. 그러나 비교 알고리즘은 각 헤드 별 TSP 알고리즘

을 별도로 적용하는 방법으로서 상용화된 방법 중의 하나이다.

표 1 은 장착점의 수를 50개에서 600개까지 증가시키며 모의 실험한 결과이다. 장착점의 수가 증가할수록 본 논문에서 제시한 멀티헤드용 TSP 알고리즘이 보다 효과적인 해를 생성시킴을 알 수 있다. 이 때 개선율은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{개선율} = \frac{\text{비교 알고리즘의 해} - \text{제안 알고리즘의 해}}{\text{비교 알고리즘의 해}} \times 100(\%) \quad (29)$$

비교 대상 알고리즘의 경우, 어느 헤드에 의한 방문이 모두 끝난 후에만 다른 헤드를 사용하는 장착점으로 이동시킬 수 있다. 그러나 제안된 알고리즘을 적용한 경우, 어느 헤드가 장착점을 방문한 후, 다음 장착점 방문 시 다른 헤드가 사용될 수 있다. 따라서 전체 이동시간의 단축 면에서 제안된 알고리즘이 유리하다.

다음으로 헤드 두 개의 분사형식이 모두 같은 동형 멀티헤드 디스펜서를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 동형 및 이형 멀티헤드 디스펜서에 모두 동일하게 적용될 수 있다. 그러나 이형 멀티헤드 디스펜서에 적용된 비교 알고리즘(헤드별 TSP 알고리즘)은 동형 멀티헤드 디스펜서에 적용 시 그 성능이 매우 저하될 수 있으므로, 새로운 비교 대상 알고리즘을 구현하였다. 두 개의 헤드 중 어느 하나의 기준헤드에 대한 TSP 알고리즘(근접노드 연결법 + 2-opt 방법)을 적용하여 모든 장착점을 방문하는 순서를 생성한다. 이 방문순서에 의하여 각 장착점을 방문하되, 두 개의 헤드 중 이동시간이 작은 헤드를 선택하여 방문하는 방법이다. 즉 단일헤드용 TSP 알고리즘에 근접헤드 선택법을 보완한 방법이다.

표 2 는 동형 멀티헤드 디스펜서에 대한 시뮬레이션 결과이다. 장착점의 수가 증가할수록 본 논문에서 제시한 방법의 개선율이 증가하였다. 비교 대상 알고리즘은 장착점만을 고려하여 TSP 알고리즘을 적용하였고, 국지적으로 이동 헤드를 고려하여 경로를 보완하였다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법은 장착점과 헤드를 모두 고려한 전체 노드에 대하여 TSP 알고리즘을 적용하였으므로, 전체 이동시간의 단축 측면에서 유리하다.

## VI. 결론

PCB 조립용 SMT 라인의 디스펜서 장비를 대상으로 생산시간 단축을 위한 효과적인 경로계획 방법을 제시하였다. 멀티헤드 디스펜서는 여러 헤드가 동시에 이동하며 장착점을 방문하므로, 기존 TSP 알고리즘의 직접 적용이 어렵다. 본 논문은 수학적 모델링을 통하여 헤드와 장착점을 통합한 형태의 정수계획문제를 구성하였으며, 기존 TSP 알고리즘의 변경을 통하여 새로운 멀티헤드용 TSP 알고리즘을 제안하였다. 실제 디스펜서와 유사한 모델에 알고리즘을 적용하여 제안된 방법이 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 상용화된 일부 알고리즘과 비교하여, 본 논문에서 제안된 방법은 헤드 형식의 구분과 무관하게 동일한 알고리즘의 적용이 가능하며 장착점 수가 증

가될수록 시간 단축 효과가 증가된다.

본 논문의 결과는 디스펜서 장비의 운용프로그램 작성을 지원하는 상용 소프트웨어에 최적화 엔진으로서 탑재 가능하다. 최근 컴퓨터 처리속도가 향상됨에 따라 새로운 접근방식의 TSP 알고리즘들이 출현하고 있다. 디스펜서 문제에 이들 알고리즘의 적용이 가능하며, 추후 연구를 통하여 보다 개선된 성능의 알고리즘을 개발할 예정이다.

표 1. 총 이동시간 (이형 멀티헤드 디스펜서).  
Table 1. Total assembly time (odd head-type).

장착점 수 알고리즘	50	100	200	400	600
헤드별 TSP (sec)	72.5	115.1	302.1	367.4	415.4
멀티헤드용 TSP (sec)	59.1	91.6	231.3	279.0	304.0
개선율(%)	18.4	20.4	23.4	24.0	26.8

표 2. 총 이동시간 (동형 멀티헤드 디스펜서).  
Table 2. Total assembly time (same head-type).

장착점 수 알고리즘	50	100	200	400	600
헤드별 TSP + 근접헤드 선택법(sec)	78.9	103.3	157.4	268.6	380.0
멀티헤드용 TSP (sec)	71.7	90.8	130.3	218.3	305.3
개선율(%)	9.3	10.0	11.0	12.7	14.6

참고문헌

[1] T. L. Landers et. al., *Electronic Manufacturing Processes*, Prentice-Hall, 1994.  
 [2] *Samsung Surface Mount System*, 삼성항공산업(주), 1999.  
 [3] *PCB Assembly system*, Yamaha Motors Co. Ltd., 1998.  
 [4] *SMT System*, LG 산전(주), 1998.  
 [5] Michael O. Ball, "Sequencing of insertions in printed circuit board assembly," *Operations Research*, vol. 36, no. 2, pp. 192-201, 1988.  
 [6] R. Kumar and H. Li, "Integer programming approach to printed circuit board assembly time optimization," *IEEE Trans. on Component, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B*, vol. 18, no. 4, pp. 720-727, 1995.  
 [7] W. Wang, P. C. Nelson, and T. M. Tirpak, "Optimization of high-speed multistation SMT placement machine using evolutionary algorithms", *IEEE Trans. on Electronics Packaging*

*Manufacturing*, vol. 22, no. 2, 1999.  
 [8] S. H. Lee, B. H. Lee, and T. H. Park, "A hierarchical method to improve the productivity of a multi-head surface mounting machine", *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2110-2115, 1999.  
 [9] C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization : Algorithms and Complexity*, Prentice-Hall Inc., 1982.  
 [10] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, *Network Flows : Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice-Hall Inc., 1993.  
 [11] M. Bellmore and G. Nemhauser, "The traveling-salesman problem: a survey," *Operation Research*, vol. 16, pp. 538-558, 1968.  
 [12] B. Golden, L. Bodin, T. Doyle, and W. Stewart , "Approximate traveling salesman algorithms," *Operation Research*, vol. 28, no. 3, pp. 694-711, 1980.  
 [13] R. L. Karg and G. L. Thompson, "A heuristic approach to solving traveling salesman Problems", *Management Science*, vol. 10, no. 2, pp.225-248, 1964.  
 [14] S. Lin, "Computer solutions of the traveling-salesman problem", *Bell System Technical Journal*, vol. 44, pp. 2245-2269, 1965.  
 [15] S. Lin, and B. W. Kernighan, "An effective heuristic for the TSP," *Operation Research*, vol. 21, pp. 498-516, 1973.  
 [16] B. Gavish, "An optimal solution method for large-scale multiple traveling salesman problems," *Operation Research*, vol. 34, no. 5, pp. 698-717, 1986.

기호정의

- $M$  : 장착점의 집합. ( $i, j \in M$ )
- $H$  : 헤드의 집합. ( $p, q \in H$ )
- $\Lambda$  : 분사형식의 집합
- $\bar{M}$  : 확장노드의 집합. ( $\alpha, \beta \in \bar{M}$ )
- $\epsilon: M \rightarrow \Lambda$  : 장착점별 분사형식을 지정하는 함수.
- $\psi: H \rightarrow \Lambda$  : 헤드별 분사형식을 지정하는 함수.
- $n_k \in M$  :  $k$  번째 방문하는 장착점.
- $h_k \in H$  :  $k$  번째 방문하는 장착점의 사용 헤드.
- $\bar{n}_k \in \bar{M}$  :  $k$  번째 확장노드.
- $t_{ij}$  : 장착점  $i, j$  사이의 이동시간.
- $\bar{t}_{\alpha\beta}$  : 확장노드  $\alpha, \beta$  사이의 이동시간.
- $x_{ij} \in \{0, 1\}$  : 장착점  $i, j$  사이의 연결여부를 결정하는 변수.
- $\bar{x}_{\alpha\beta} \in \{0, 1\}$  : 확장노드  $\alpha, \beta$  사이의 연결여부를 결정하는 변수.



**송 종 석**

1998년 충북대학교 제어계측공학과 학사. 2000년 동 대학원 석사. 2000년~현재, (주)키스컴 연구원. 관심분야는 전자 조립 시스템 및 물류자동화 시스템, 컴퓨터 알고리즘.



**박 태 형**

1988년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1990년 동 대학원 석사 및 1994년 동 대학원 박사, 1992년~1994년 제어계측신기술 연구센터 연구원, 1994년~1997년 삼성항공산업(주) 정밀기기연구소 선임연구원, 1997년~현재 충북대학교 전기전자공학부 조교수. 관심분야는 반도체 및 전자 조립 시스템, 최적화 알고리즘 응용.