工業經營學會誌 第15卷 第25輯 1992年 5月 30日 41

자동생산시스템에서 총비용을 최소로하는 가공방법의 선택문제
－Optimal Selection of Process Plan to Minimize Total Cost in Automated Manufacturing Systems－

박 수 관*
이 근 희**

Abstract

Most of the planing models for automated manufacturing systems are based on the assumption that for each part there is only one process method available. Really, for a part to be manufactured in an automated manufacturing system, a number of different process methods can be generated, each of which may require specific types of tools and auxiliary devices such as fixtures, grippers and feeders. In this paper, An optimal algorithm for the selection of a set of process methods with the minimum corresponding manufacturing cost and minimal number of tools and auxiliary devices is proposed. The proposed optimal algorithm is based on branch and bound method which is one of the optimal solution methods.

1. 서 론

자동화된 생산 시스템, 특히 수치제어 기계(NC 머신)에 의해 부품을 가공하는 생산시스템에서는 부품에 따라 각기 다른 종류의 부속장치들이 요구된다. 부품가공을 위해 부품을 고정시키는 고정장치(fixtures)와 부품이 가공될 수 있도록 부품을 조정하기 위한 그리퍼(grippers) 그리고 부품조립을 위해 작은 단위의 부품을 공급하는 공급장치(feeders) 등이 주요한 보조장치들이다. 물론 다양한 형태의 부품을 가공하기 위해 관리되는 여러 종류의 공구들이 필요하다.

많은 연구들이 한 부품을 가공하는 가공방법이 한가지인 경우를 가정한 것이다., 그러나 한 부품을 자동 생산시스템에서 가공하는 방법은 전형적으로 두 가지 이상의 가공방법이 있을 수 있다. 각각의 가공방법은 각기 다른 공구와 부속장치가 필요하다. 또한, 각각의 가공방법은 가공비용도 달라지게 된다. 따라서 생산계획의 담당자는 총 가공비용을 최소로하며 필요한 공구와 부속장치의 가지수가 최소가 되도록 각 부품의 가공방법을 선택해야 하는 문제에 부딪히게 된다. 공구와 부속장치의 가지수를 최소화하려는 주된 이유는 공구 매거진의 공구 보유능력의 제한과 부품가공의 일정계획을 원래 문제보다 쉽게 하려는 것이다.

복수 가공방법에 대한 연구로 Kusiak과 Finke[3]는 복수 가공방법이 가능할 때 가공비용을 줄이고 공구와 보조장치들의 사용개수를 최소화하는 발견적 해법을 제시하였다. Kusiak[1]은 복수 가공방법 중 기계 셀(machine cell)을 가장 효과적으로 구성할 수 있는 가공방법의 선택문제를 연구하였다.

본 연구에서는 한 부품을 가공하는 데 복수의 가공방법이 가능할 때 공구의 가지수와 보조장치의 가지수를 최소로하며, 총 가공비용이 최소가 될 수 있는 각 부품의 가공방법을 선택할 수 있는 최적해를 제시한다.

본 연구는 다음의 상황을 가정한다. 주어진 기간내에 가공할 부품은 결정되어 있다. 모든 부품의 가공방법은 한가지 이상의 복수 가공방법이 가능하다. 각 부품을 가공하기 위해 복수의 가공방법 중 반드시 하나만을 선택해서 가공한다. 기계의 기종과 대수는 고려하지 않는다. 그리고 모든 가공방법은 공구 매가진의 최대 보유능력 이하의 공구만을 필요로 한다.

2. 부품의 가공방법 선택 문제

가공방법의 선택문제를 설명하기 전에 본 논문에서 사용하는 기호를 먼저 정의한다.

---

*갑우정밀 대표

**한양대학교 산업공학과 교수

접수 : 1992. 4. 18.
확정 : 1992. 5. 2.

$V_l=(V_{l1}, \cdots\cdots, V_{ln})$는 부품을 다시 세팅하지 않고 한번 고정된 상태에서 제거되는 원료의 부분들이다. V는 원하는 부품을 가공하기 위해 원료에서 제거되는 모든 부분들이다(그림 1 참조). 즉,

$V=\sum_{l=1}^{m} V_l$ (여기에서 m은 부품의 총 셋팅 횟수)

$T_l=(T_l1, \cdots\cdots, t_{lk})$는 V_l을 제거시키기 위한 공구의 집합이다.

F_l은 V_l을 제거하는 동안 부품을 고정시키는 고정장치

$K=\{1, 2, \cdots\cdots, M\}$은 가공할 부품들의 집합이다.

N_k는 부품 k에 대한 가공방법의 집합이다. $\forall_k \in K$

N은 모든 가공방법의 집합이다. 즉, $\underset{k\in K}{U}\ N=N_k$

$A=\{(k, l) \mid (k, l)\in K\times K$ 그리고 $k \neq l$

d_{ij}는 WHD 가중 Hamming Distance(WHD)이다. $\forall(i, j)\in A$

C_i는 가공방법 Pi의 가공비용이다. $\forall_i \in N$

위의 정의된 기호를 이용하여 P_i을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$P_i=\{(V_1 : T_1 : F_1), \cdots\cdots, (V_m : T_m : F_m :)\}$

가공방법 P_i의 개념을 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

[예 1]

그림 2는 $V_1, \cdots\cdots, V_8$을 제거하여 부품을 가공하는 예이다. 그림 2의 부품을 가공하기 위해 다음과 같은 가공방법들을 생각할 수 있다.

$P_1=\{V_1, V_4, V_5, V_6 : T_1, T_2 : F_1), (V_7 : T_3 : F_2), (V_2, V_3, V_8 : T_4, T_5, T_6 : F_3)\}$

$P_2=\{(V_4, V_5, V_6 : T_1, T_7 : F_4), (V_1, V_7, V_2, V_3, V_8 : T_1, T_4, T_5, T_6 : F_4)\}$

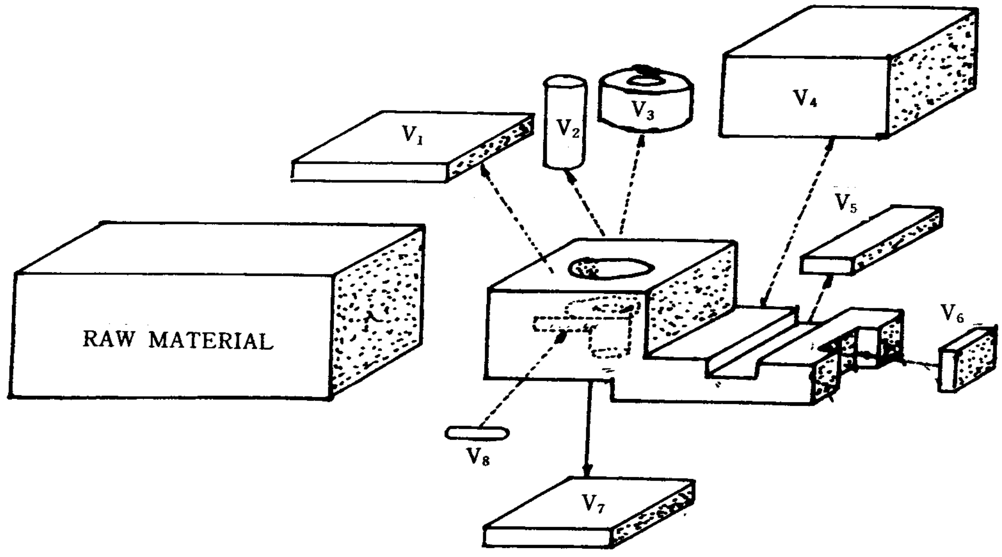


그림 2. $V_1, \cdots\cdots, V_8$이 제거되어 만들어진 부품

가공방법 P_1와 P_2에 상응하는 가공비용을 C_1과 C_2라하면 일반적으로 C_1과 C_2는 다른 값을 갖는다. 각 가공방법 P_i는 다음과 같은 열 벡터(column vector)로 정의한다(한 부품의 가공방법 개수이다).

$X_i=[\alpha_{1i}, \cdots\cdots, \alpha_{ai}, \alpha_{bi}, \cdots, \alpha_c]$

$\alpha_{ii}=\begin{cases}1, & \text{공구 } t\text{가 } P_i\text{에서 사용되는 경우, } t\in\{1, \cdots, a\} \\ 0, & \text{그 외의 경우}\end{cases}$

$\alpha_{fi}=\begin{cases}1, & \text{고정장치 } f\text{가 } P_i\text{에서 사용되는 경우, } f\in\{b, \cdots, c\} \\ 0, & \text{그 외의 경우}\end{cases}$

두 가지 가공방법 P_i와 P_j의 관계는 가중 Hamming Distance(WHD) d_{ij}에 의해 표현한다.

$$d_{ij}=\sum_{q=1}^{c} W_q\,\delta(\alpha_{qi},\ \alpha_{qj}),\ \forall_{i,j} \tag{1}$$

$$\delta(\alpha_{qi}=,\ \alpha_{qj})=\begin{cases}1, & \alpha_{qi}\neq\alpha_{qj}\text{인 경우}\\ 0, & \text{그 외의 경우}\end{cases}$$

W_q는 공구 또는 부속장치 q에 대한 가중치이다.

WHD(식 1)는 가공방법 P_i와 P_j간의 차이 정도를 측정하는 값이다. 모든 q에 대해 $W_q=1$이라면 WHD(식 1)는 가중치가 없는 Hamming Distance(HD)가 된다. 각각의 공구 또는 부속장치들이 각기 다른 중요성을 갖기 때문에 각 공구 또는 부속장치 q에 대한 가중치 W_q를 이용하여 HD를 수정하는 것이다. 예로 고정장치의 가중치 W_q는 공구의 가중치보다 전형적으로 큰 값이다. 가중치 W_q를 정하는 방법은 공구 또는 부속장치 q의 가격에 비례하도록 정한다.

3. 가공방법 선택을 위한 발견적 해법

가공방법 선택문제에 대한 기존 논문으로 Kusiak과 Finke[3]의 연구내용을 설명한다. Kusiak과 Finke[3]는 복수 가공방법이 가능한 자동 생산시스템에서 가공비용을 최소로하며 공구와 보조장치의 가지수를 최소로하는 가공방법 선택문제를 수리적으로 모형화했으며 발견적 해법을 제시하였다. 먼저 수리적 모형을 보이고 Kusiak 등이 제시한 발견적 해법을 예를 들어 설명한다.

3.1 정수계획 수리모형

2장의 기호설명에 추가하여 수리모형에서의 두가지 결정변수를 정의한다.

$$X_i=\begin{cases}1, & \text{가공방법 i가 선택되어진 경우}\\ 0, & \text{그 외의 경우}\end{cases}$$

$$Y_i=\begin{cases}1, & \text{가공방법 i와 j가 선택되어진 경우}\\ 0, & \text{그 외의 경우}\end{cases}$$

가공방법의 선택문제는 각 부품의 가공방법 중 단지 하나의 가공방법이 선택되어야 한다. 선택의 목적은 가공비용의 합을 최소로하고 가공방법이 WHD의 합을 최소로 한다. 즉, 총비용을 최소로 한다. 정수계획(IP)로 모형화하면 목적식은 다음과 같다.

$$(\text{IP})\ \min\ C=½ \sum_{(i,j)\in A} d_{ij}\,Y_{ij}+\sum_{i\in N} C_i\,X_i \tag{2}$$

제약식은 다음과 같다.

$$\sum_{i\in N_k} X_i=1,\ k\in k \tag{3}$$

$$X_i+X_j-1\leq Y_{ij},\ (i,\ j)\in A \tag{4}$$

$$X_i=0,1,\ i\in N \tag{5}$$

$$Y_{ij}=0,1,\ (i,\ j)\in A \tag{6}$$

제약식 (3)은 각 부품에 단지 하나만의 가공방법을 선택하게 한다. 제약식 (4)는 한 부품의 가공방법들이 두가지 이상 선택할 수 없도록 한다. 즉, 한 부품의 가공방법간의 Y_{ij}는 $Y_{ij}=0$이므로 $X_i=X_j=1$인 경우가 발생할 수 없도록 한다. 제약식 (5)와 (6)은 정수계획 문제임을 나타낸다. 식 (2)에서 $Y_{ij}=Y_{ji}$이므로 $d_{ij}Y_{ij}=d_{ij}Y_{ij}$가 두 번 발생하므로 ½을 곱한다. 식 (2)에서 가공비용 C_i는 d_{ij}값과 대응되도록 수정된 비용이다.

3.2 발견적 해법

실제 문제는 많은 계산량이 요구되므로 IP 또는 MIP로 풀기가 어렵다. Kusiak 등[3]은 가공방법 선택문제를 효율적으로 풀 수 있는 발견적 방법을 제시하였다.

3.2.1 알고리즘 수립(A1)

임의로 가정방법 집합의 순서를 N_1, N_2, ……, N_m으로 준다. 이 순서에 따라 집합 $S=\{S_i\}$를 구한다. 즉, $S_1\in N_1$이 먼저 선택되고 그 다음에 $S_2\in N_2$, …, 그리고 최종적으로 $S_m\in N_m$을 선택한다. $S^K=\{S_1,\ S_2,\ \cdots,$

$S_K\}$를 K단계까지 선택한 S_i의 집합으로 나타낸다.

```
단계 0 : [초기화]
    $S^{(0)} = \phi$, $K=1$
단계 1 : [$S_K \in N_K$의 선택] 비용을 계산
    $C_i = c_i + \sum_{s \in s(k-1)} d_{is}$,  $\forall_i \in N_k$
    계산된 $C_i$값 중 최소가 되는 가공방법이 $S_K$가 된다.
단계 2 : $S^{(k)} = S^{(k-1)} + \{S_k\}$
    $k=m$이면 정지, 그렇지 않으면 $K=K+1$, 단계 1로 간다.
```

3.2.2 알고리즘 수정(A2)

A1에서 구한 선택된 가공방법의 집합 S를 N_1, N_2, …순으로 각 N_k에 속한 가공방법을 교체하여 S를 향상시킨다.

```
단계 0 : [초기화]
    $C=0$, $K=1$
단계 1 : [가공방법의 교체]
    $C_i' = C_i + \sum_{s \in S - \{Sk\}} d_{is}$,  $\forall_i \in N_k$
    $C_i'$을 계산하여 최소가 되는 가공방법을 $T_k$로 둔다.
    IF $T_k \neq S_k$ Then $S = S - \{S_k\} + \{T_k\}$, $C=C+1$
단계 2 : IF $K=m$
    IF $C=0$ Then 종료한다.
    IF $C>0$ Then 단계 0으로 간다.
    ELSE $K=K+1$, 단계 1로 간다.
```

3.2.3 수치예

다음 데이타를 가정한다.

1) K(부품의 집합) = {1, 2, 3, 4}

2) 가공방법의 집합 : $N_1 = \{1, 2\}$, $N_2 = \{3, 4, 5\}$, $N_3 = \{6, 7\}$, $N_4 = \{8, 9, 10\}$

3) 4개 부품의 10가지 가공방법에 대한 행렬

		부품 1		부품 2			부품 3		부품 4		
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
공구	t_1	1		1	1		1	1	1		1
	t_2		1			1			1		1
	t_3	1	1	1	1	1	1			1	
	t_4	1				1		1	1	1	1
	t_5		1				1				1
고정장치	f_1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
	f_2		1			1			1		
	f_3		1	1			1		1		1

4) 가공방법의 가공비용 벡터

$C_i = [5.8, 9.4, 11.6, 5.7, 3.4, 4.3, 5.1, 6.4, 5.2, 5.3]$

5) 가중 벡터(weighted vector)

$W_q = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]^T$

3)에서의 행렬과 5)의 벡터로 WHD의 행렬 $D = [d_{ij}]$를 계산하면 다음과 같다.

$$
\begin{array}{cc|cccccccccc|}
 & P & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\
\hline
P & 1 & \infty & \infty & 2 & 1 & 3 & 3 & 1 & 4 & 1 & 4 \\
 & 2 & & \infty & 5 & 6 & 4 & 4 & 8 & 5 & 6 & 5 \\
 & 3 & & & \infty & \infty & \infty & 1 & 3 & 4 & 3 & 4 \\
 & 4 & & & & \infty & \infty & 2 & 2 & 5 & 1 & 5 \\
 & 5 & & & & & \infty & 6 & 4 & 3 & 2 & 5 \\
 & 6 & & & & & & \infty & \infty & 5 & 4 & 3 \\
 & 7 & & & & & & & \infty & 3 & 2 & 3 \\
 & 8 & & & & & & & & \infty & \infty & \infty \\
 & 9 & & & & & & & & & \infty & \infty \\
 & 10 & & & & & & & & & & \infty
\end{array}
$$

여기에서 $d_{ij}=\infty$인 경우은 $(i,\ j)\not\in A$인 경우이다.

이상에서 가정한 데이타를 A1과 A2에 적용해서 해를 구하는 과정은 다음과 같다.

〈알고리즘 A1 과정〉

단계 0 : $S^{(0)}=0,\ K=1$

단계 1 : $\sum_{S\in 0} d_{is}=0$이므로 $C_i(\forall_i \in N_1)$만 비교된다.
즉, $C_1=5.8$, $C_2=9.4$이므로 $S_1=1$

단계 2 : $S^{(1)}=\{1\},\ K=2$

단계 1 : C_i를 계산해 비교한다.
즉, $C_3+d_{31}=11.6+2=13.6$, $C_4+d_{41}=5.7+1=6.7$, $C_5+d_{51}=3.4+3=6.4$이므로 $S_2=5$

단계 2 : $S^{(2)}=\{1,\ 5\},\ K=3$

단계 1 : $C_6+d_{61}+d_{65}=13.3$, $C_7+d_{71}+d_{75}=10.1$이므로 $S_3=7$

단계 2 : $S^{(3)}=\{1,\ 5,\ 7\},\ K=4$

단계 1 : $C_8+d_{81}+d_{85}+d_{87}=16.4$, $C_9+d_{91}+d_{95}+d_{97}=10.2$, $C_{10}+d_{10.1}+d_{10.5}+d_{10.7}=17.3$이므로 $S_4=9$

단계 2 : 선택된 가공방법의 집합 $S=S^{(4)}=\{1,\ 5,\ 7,\ 9\}$이고 이에 상응하는 총 비용은 $C_1+C_5+C_7+C_9+d_{15}+d_{17}+d_{19}+d_{57}+d_{59}+d_{79}=32.5$

〈알고리즘 A2 과정〉

단계 0 : $C=0,\ K=1$

단계 1 : C_i'를 계산해 비교한다.
즉, $C_1+d_{15}+d_{17}+d_{19}=10.8$, $C_2+d_{25}+d_{27}+d_{29}=27.4$, $T_1=S_1=1$이므로 S는 변하지 않는다.

단계 2 : $K=2$

단계 1 : $C_3+d_{31}+d_{37}+d_{39}=19.6$, $C_4+d_{41}+d_{47}+d_{49}=9.7$, $C_5+d_{51}+d_{57}+d_{59}=12.4$이므로 $T_2=4\neq S_2$가 되어 $S_2=5$를 $S_2=4$로 교체한다. 새로운 가공방법의 집합 $S=\{1,\ 4,\ 7,\ 9\}$가 된다. 이에 상응하는 총 비용은 29.8이 된다. $C=1$로 둔다.

알고리즘은 $k=4(=m)$까지 변경없이 진행된다. $C>0$이므로 다시 단계 0부터 $S=\{1,\ 4,\ 7,\ 9\}$를 가지고 $K=4(=m)$까지 진행한다. 이 과정에서는 변경이 없으므로 $C=0$이 되어 현재의 $S=\{1,\ 4,\ 7,\ 9\}$가 최종 선택안이 된다. 즉, 최종 선택된 가공방법은 $\{P_1,\ P_4,\ P_7,\ P_9\}$가 된다. 최종해의 가공방법이 필요로 하는 공구는 $\{t_1,\ t_3,\ t_4\}$이고 고정장치는 $\{f_1\}$이므로 공구 $\{t_2,\ t_5\}$와 고정장치 $\{f_2,\ f_3\}$가 절약된다.

4. 가공방법 선택을 위한 최적해법

가공방법을 선택하기 위한 문제에 대해 Kusiak 등[3]은 발견적 해법을 제시하였다. 발견적 해법에서는 최적해를 보장받을 수 없으므로 최적해에 대한 알고리즘이 필요하다. 본 장에서는 분지 한계법을 이용하여 최적해

를 구할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘에서 사용할 용어 정의를 위해 가공방법 선택의 문제를 그래프로 나타내면 다음과 같이 트리(tree)가 된다.

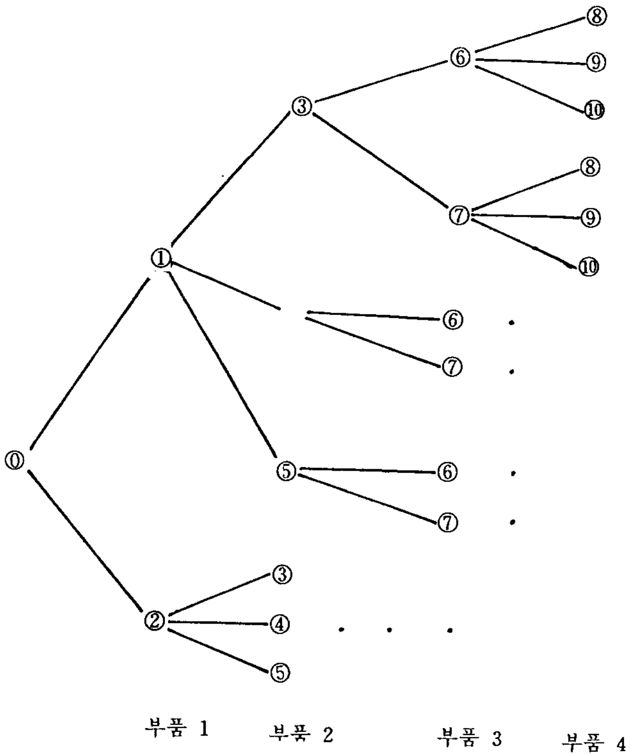


그림 3. 3장의 수치예를 트리로 나타낸 그래프

그림 3에서 각 교점은 가공방법을 나타낸다. 0번 교점은 가상교점(dummy node)이다. ⓘ 노드와 ⓘ′, ⓘ″, ……은 동일 작업방법이다. 최적해는 총비용이 최소가 되는 경로를 찾는 문제이다. 그림 3에서 부품 1에서 부품 4로 가는 36가지의 경로중 최소 총비용의 경로를 선택해야 한다. 그러나 가공해야할 부품수가 많고 가공방법의 가지수도 많아지면 계산량이 증가하여 계산되기가 어려워진다.

본 연구에서는 최적 가공방법을 효율적으로 선택하기 위해 분지 한계법의 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘에서 사용하는 용어를 다음과 같이 정의한다. 경로는 2개 이상의 교점을 갖으며, 각 교점은 서로 다른 부품의 가공방법 집합에서 하나씩 선택한다. 경로길이는 경로내에 속한 교점의 개수(가상교점은 제외)로 정의한다. 그리고 경로값은 해당 경로내에 속한 가공방법을 수행하기 위해 필요한 비용(가공비용+WHD)으로 정의한다. 경로길이가 M(부품의 개수)이 되는 경로를 완전경로라 정의하며 완전경로 중 비용이 최소가 되는 경로를 찾는 것이 최적의 가공방법을 선택하는 알고리즘의 목적이다.

본 연구에서 제안하는 복수 가공방법이 가능한 자동 생산시스템에서 총 비용이 최소가 되도록 최적 작업방법을 선택하는 알고리즘은 다음과 같다. 제안하는 알고리즘의 최적성에 대해서는 증명의 정리 1에서 보인다.

과정 1 : WHD의 행렬 $D=[d_{ij}]$를 계산한다.

과정 2 : 최적 가공방법의 선택

단계 0 : [초기화]

- $S=0$로 둔다.
- 부품 1의 가공방법(N_1) 중에서 C_i가 최소인 i를 선택하여 ⓪→ⓘ의 경로를 P(1)에 둔다.

단계 1 : [경로의 전개]

- 선택된 경로 P(1)의 끝 교점에서 다음 부품의 모든 교점에 대하여 전개한다. 전개된 모든 경로값을 계산하여 이 중 최소값을 갖는 경로를 P(1)로 한다.

- P(1)로 선택된 경로를 제외한 나머지 경로값 중 최소값을 찾는다. 이 경로를 P(2)로 한다. 해당 경로가 2개 이상이면 경로길이가 긴 경로를 우선 선택한다.

단계 2 : [경로의 선택]
다음 경우에 따라 전개할 경로를 선택한다.

경우 1 P(1)의 값>P(2)의 값
IF P(2)가 완전경로 Then P(2)를 최적 경로로 두고 종료한다.
Else P(1)=P(2)로 둔다.
경우 2 P(1)의 값<P(2)의 값
IF S=1 Then P(1)을 최적 경로로 두고 종료한다.

경우 3 P(1)의 값=P(2)의 값
IF S=1이고 P(2)가 완전경로 Then P(1)과 P(2)를 최적 경로로 두고 종료한다.
ELSE IF S=1이고 P(2)가 불완전경로 Then P(1)을 최적 경로로 두고 종료한다.
ELSE IF S=0이고 P(2)가 완전경로 Then P(2)을 최적 경로로 두고 종료한다.

단계 3 : [S값 결정]
P(1)의 경로길이가 M−1이면 S=1, 그렇지 않으면 S=0로 한다. 단계 1로 간다.

S는 효율적으로 알고리즘을 종료할 수 있도록 하기 위해 현재의 경로길이를 조사하는 값이다. S=1이면 현재의 경로길이가 M−1임을 나타낸다. 즉, 경로길이가 M−1인 경로를 전개하면 완전경로가 된다. 최적 경로는 모두 완전경로이므로 경로길이가 M−1인 경로에서 전개할 때에는 최적경로의 유무를 확인해야 한다. 따라서 S=1일 때에는 최적해 유무확인이 필요하다.

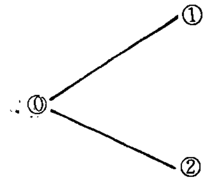
5. 최적해에 대한 수치 예

3장의 수치예에서 사용한 데이타 [1)~5)]를 이용해서 본 연구에서 제안한 알고리즘을 적용하면 다음과 같다.

과정 1 : HD의 행렬 $D=[d_{ij}]$를 계산한다.

과정 2 : 최적의 가공방법을 선택한다.

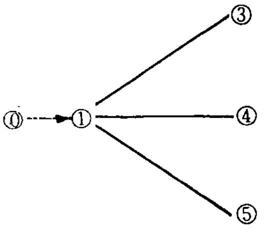
단계 0 : 가상교점(0)에서 $N_1=\{1, 2\}$으로의 모든 경로값을 계산한다.



경로	경로값
0−1	$C_1=5.8$
0−2	$C_2=9.4$

최소의 경로값이 $C_1=5.8$이므로 P(1)=0−1로 둔다. S=0으로 둔다.

단계 1 : 경로를 선택한다.



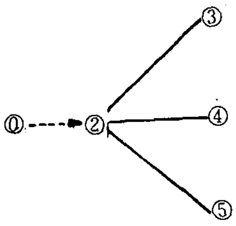
경로	경로값
0−1−3	$C_1+C_3+d_{13}=5.8+11.6+2=19.4$
0−1−4	$C_1+C_4+d_{14}=5.8+5.7+1=12.5$
0−1−5	$C_1+C_5+d_{15}=5.8+3.4+3=12.2$

경로값이 최소가 되는 경로를 골라 P(1)에 둔다. P(1)을 제외한 현재까지 전개된 경로 중 경로값이 최소가 되는 경로를 골라 P(2)에 둔다. 즉, 0−2의 경로값이 9.4로 최소가 되므로 P(2)=0−2로 둔다.

단계 2 : 전개할 경로를 선택한다.
P(1)의 값=12.2>P(2)의 값=9.4이므로 P(1)을 0−2로 둔다.

단계 3 : P(1)의 경로길이는 1이므로 S=0으로 두고 단계 1로 간다.

단계 1 : 경로를 선택한다.



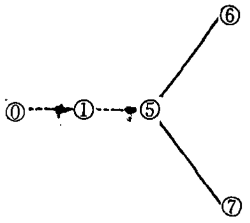
경로	경로값
0−2−3	$C_2+C_3+d_{23}=9.4+11.6+5=26$
0−2−4	$C_2+C_4+d_{24}=9.4+5.7+6=21.1$
0−2−5	$C_2+C_5+d_{25}=9.4+3.4+4=16.8$

경로값이 최소가 되는 경로는 0−2−5이므로 P(1)을 0−2−5로 둔다. P(2)는 0−1−5로 둔다.

단계 2 : P(1)의 값=16.8>P(2)의 값=12.2이므로 P(1)을 0−1−5로 둔다.

단계 3 : S=0로 두고 단계 1로 간다.

단계 1 :



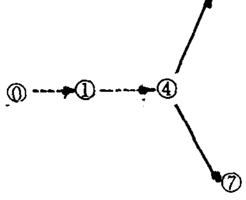
경로	경로값
0−1−5−6	$C_1+C_5+C_6+d_{15}+d_{56}+d_{61}=25.5$
0−1−5−7	$C_1+C_5+C_7+d_{15}+d_{57}+d_{71}=22.3$

P(1)은 0−1−5−7이 된다. P(2)는 0−1−4가 된다.

단계 2 : P(1)의 값=22.3>P(2)의 값=12.5이므로 P(1)을 0−1−4로 둔다.

단계 3 : 경로값이 2이므로 S=0으로 두고 단계 1로 간다.

단계 1 :



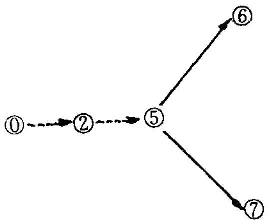
경로	경로값
0−1−4−6	$C_1+C_4+C_6+d_{14}+d_{46}+d_{61}=21.8$
0−1−4−7	$C_1+C_4+C_7+d_{14}+d_{47}+d_{71}=19.8$

경로값이 최소가 되는 0−1−4−7을 P(1)에 둔다.
P(2)는 0−2−5가 된다.

단계 2 : P(1)의 값=19.8>P(2)의 값=16.8이므로 P(1)은 0−2−5가 된다.

(단계 3 생략)

단계 1 :



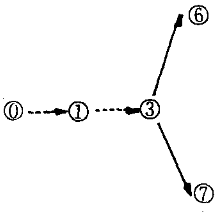
경로	경로값
0−2−5−6	$C_2+C_5+C_6+d_{25}+d_{56}+d_{62}=31.1$
0−2−5−7	$C_2+C_5+C_7+d_{25}+d_{57}+d_{72}=33.9$

P(1)은 0−2−5−6이 된다. P(2)는 0−1−3이 된다.

단계 2 : P(1)의 값=31.1>P(2)의 값=19.4이므로 P(1)은 0−1−3이 된다.

(단계 3 생략)

단계 1 :



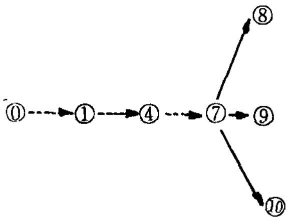
경로	경로값
0−1−3−6	$C_1+C_3+C_6+d_{13}+d_{36}+d_{61}=27.7$
0−1−3−7	$C_1+C_3+C_7+d_{13}+d_{37}+d_{71}=28.5$

P(1)은 0−1−3−6이 된다.
P(2)는 0−1−4−7이 된다.

단계 2 : P(1)의 값=27.7>P(2)의 값=19.8이므로 P(1)은 0−1−4−7이 된다.

단계 3 : P(1)의 경로길이가 M−1=4−1=3이므로 S=1로 두고 단계 1로 간다.

단계 1 :



경로	경로값
0−1−4−7−8	$C_1+C_4+C_7+C_8+\Sigma d_{ij}=38.2$
0−1−4−7−9	$C_1+C_4+C_7+C_9+\Sigma d_{ij}=29$
0−1−4−7−10	$C_1+C_4+C_7+C_{10}+\Sigma d_{ij}=37.1$

P(1)은 0−1−4−7−9가 된다.
P(2)는 0−2−4가 된다.
이상의 과정을 계속하면 다음과 같은 순서로 경로를 전개하게 된다.

0—2—4에서 경로를 전개

경로	경로값
0—2—4—6	31.4
0—2—4—7	36.2

0—1—4—6에서 경로를 전개

경로	경로값
0—1—4—6— 8	42.2
0—1—4—6— 9	33
0—1—4—6—10	39.1

0—1—5—7에서 경로를 전개

경로	경로값
0—1—5—7— 8	38.7
0—1—5—7— 9	32.5
0—1—5—7—10	39.6

0—1—5—6에서 경로를 전개

경로	경로값
0—1—5—6— 8	43.9
0—1—5—6— 9	37.7
0—1—5—6—10	42.8

0—2—3에서 경로를 전개

경로	경로값
0—2—3—6	35.6
0—2—3—7	42.1

0—1—3—6에서 경로를 전개

경로	경로값
0—1—3—6— 8	45.1
0—1—3—6— 9	40.9
0—1—3—6—10	44

0—1—3—7에서 경로를 전개

경로	경로값
0—1—3—7— 8	45.9
0—1—3—7— 9	39.7
0—1—3—7—10	39.5

여기에서 P(1)은 0—1—3—7—10이고 P(2)는 0—1—4—7—9가 된다. P(1)의 경로값=39.5>P(2)의 경로값=29이고 D(2)가 완전경로이므로 P(2)의 경로인 0—1—4—7—9가 최적 경로가 된다. 즉 최적 해는 $\{P_1, P_4, P_7, P_9\}$가 된다.

6. 결 론

지금까지의 공구 및 부속장치에 대한 문제는 대부분 각 부품의 가공방법이 단일 가공방법인 경우이다. 그러나 현실적으로 각 부품의 가공방법이 복수개인 경우가 가능하므로 이에 대한 연구가 필요하다. Kusiak 등[3]이 이 문제에 대해 연구하였으나 최적해가 아닌 발견적 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서는 복수의 가공방법이 가능한 자동 생산시스템에서 총 비용을 최소로 하는 가공방법을 선택하기 위한 최적 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 다음의 상황을 가정한다. 가공할 부품은 결정되어 있다. 각 부품의 가공을 위해 복수의 가공방법 중 반드시 하나만의 가공방법을 선택한다(모든 가공방법은 공구 매가진의 최대 보유능력 이하의 공구만을 필요로 한다).

본 연구에서 제안한 알고리즘은 두 과정으로 크게 나누어 진다. 첫 과정에서는 각 가공방법간의 유이성(WHD)을 계산한다. 두 번째 과정에서는 분지 한계법의 최적된 알고리즘을 이용해 최적 가공방법을 선택한다. 선택된 최적해는 최소의 공구 및 부속장치를 필요로 하므로 공구 및 부속장치의 관리가 용이하고 부품의 생산

일정 계획을 보다 용이하게 한다.

부품가공의 일정계획은 높은 계산량을 요하므로 좋은 알고리즘을 개발하기가 어렵다. 가공순서에 따라 공구교체 횟수가 달라지므로 전체 생산시간에 많은 영향을 미친다. 지금까지의 대부분의 연구는 가공방법이 단일인 경우의 문제를 다루고 있다. 그러나 현실적으로는 복수의 가공방법이 가능한 문제에서도 공구교체 횟수를 줄일 수 있는 일정계획에 대한 연구가 필요하다.

증 명

정리 1. 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의해 선택된 가공방법의 집합은 총비용을 최소로 하는 가공방법이 된다.

〈증명〉 제안한 알고리즘은 최적화 기법의 한 방법인 분지 한계법을 이용해서 최적해를 구한다. 따라서 다음 조건이 만족되면 최적해가 된다.

조건 1) 최적해는 완전경로이어야 한다. 제안한 알고리즘에서 최적해는 단계 2에서 구해진다. 단계 2의 3가지 경우 모두 완전경로만이 최적해가 된다.

조건 2) 최적해는 다른 어떤 경로의 경로값보다 작거나 같아야 한다. 단계 2의 경우 1과 2에서는 최적해로 선택될 경로는 다른 완전경로 또는 불완전경로 보다 작아야지 선택되도록 하였다. 단계 2의 경우 3에서는 최적해로 선택될 경로는 다른 완전경로 또는 불완전 경로보다 같을 경우에만 선택되도록 하였다. 경로는 경로 길이가 증가하면 최소한 같거나 증가하게 되므로 단계 2에서 선택된 최적해는 다른 어떤 경로의 경로값보다 작다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 위의 2가지 조건을 만족하므로 최적해이다.

参 考 文 獻

1. Kusiak, A.(1987), "The Generalized Group Technology Concept," *Int. J. Prod. Res., 25(4)*, 561-569.
2. Kusiak, A. and G. Finke(1987), "Modeling and Solving the Flexible Forging Module Scheduling Problem," *Engineering Optimization, 12(3)*, 1-12.
3. Kusiak, A. and G. Finke(1988), "Selection of Process Plans in Automated Manufacturing Systems," *IEEE Journal of Robotics and Automation, 4(4)*, 397-402.
4. Sarin, S. C. and C. S. Chen(1987), "The machine loading and tool allocation problem in a flexible manufacturing system," *INT. J. PROD. RES., 25(7)*, 1081-1094.
5. Tang, C. S. and E. V. Denardo(1988), "Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part I : Minimization of the Number of Tool Switches," *Operations Research, 36(5)*, 767-777.
6. Tang, C. S. and E. V. Denardo(1988), "Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part II : Minimization of the Number of Switching Instants," *Operations Research, 36(5)*, 778-784.