

Design of Component Layout and Tool Path for Machining Multiple Components

이 창근*, 임 석철**

* 대우중공업(주) 선박해양기술연구소 자동화연구실

** 아주대학교 산업공학과

Abstract

In machining multiple components fixed on the same pallet of a NC machine, it is very important to minimize the total time required to finish the machining by carefully determining the component layout on the pallet, and the tool path of NC machine, and the sequence of tools to be used.

In this paper, a linear integer programming model is presented to obtain an efficient layout; and a two-phased heuristic algorithm is proposed to minimize the total time for machining multiple components.

Numerical examples are given for the case of identical components and nonidentical components, respectively. The result of either case shows significant reduction of 7.2 ~ 15.0% in the total time required to finish the machining.

1. 서론

기계 및 부품 가공업의 일반적인 경향이 다품종 소량화됨에 따라, 수치제어 공작기계(Numerical Control Machine)의 사용이 보편화되는 추세에 있다. 특히 100여개 이상의 가공공구가 부착된 공구 매거진과 30여개 이상의 복수 가공물 가공을 위한 머시닝 센터(Machining Center)의 이용이 증대되고 있다.

이러한 가공물의 총 가공시간(Total Machining Time)은 팔레트 상의 가공물 배치(Component Layout), 가공경로(Tool Path) 그리고 가공공구(Tool)의 사용순서에 따라서 상당히 변화하게 된다.

본 연구는 복수 가공물 가공을 위한 수치제어 가공에서 가공물의 총 가공시간을 최소화 하기 위하여 팔레트상의 가공물의 배치 및 가공경로를 찾는 경험적인 알고리즘을 제시함으로써 NC 절삭가공 라인의 생산성을 개선하는데 연구의 목적이 있다.

복수 가공물 가공의 최적화 접근방법은 크게 세 가지로 분류된다. 첫째, 팔레트상에서 가공물의 배치를 최적화하는 방법이 있고 둘째, 가공물의 배치가 주어진 상황에서 가공경로를 최적화 하는 방법과 셋째, 가공 공구의 사용순서를 최적화하는 방법이 있다.

본 연구에서는 팔레트상의 가공물의 배치 및 가공경로를 최적화 함으로써, 복수 가공물 가공에서 가공물의 총 가공시간을 최소화 하고자 한다. 이를 위해 첫번째 단계는, 팔레트상의 가공물의 배치를 최적화하는 수리적 모형을 구축한다. 두번째 단계는, 주어진 가공물의 배치에 대하여 가공경로를 최소화하는 수리적 모형을 구축한다. 세번째 단계는, 가공물의 배치 및 가공경로를 구하는 경험적 알고리즘을 개발한다. 네번째 단계는, 사례연구를 통하여 경험적 알고리즘의 성능을 평가한다.

2. 기존 연구

수치제어 편칭 프레스기(Numerical Control

Punching Press)에 대하여 Walas(1984)는 단일 가공물에 대하여 가공물의 총 가공시간을 최소화 하는, 가공물내에서 편칭될 구멍(Hole)의 순서와 편칭공구의 Turret내 위치를 구하기 위하여 TSP(Traveling Salesman Problem)와 QAP(Quadratic Assignment Problem)로 분해하여, 각각의 하부문제에 대하여 초기해를 구한후, 반복적으로 해를 개선하는 경험적 알고리즘을 제시하였다.

Khan(1991)은 단일 가공물에 대하여 가공경로사이의 비가공 이동경로(Nonproductive Tool Movement)를 최소화함으로써 수치제어 공작기계에서 가공물의 총 가공시간을 최소화 하기 위하여, Euclidian TSP로 모델링 한후, 이에대한 해법으로 Simulated Annealing 알고리즘을 적용하였다. 이 논문에서는 단일 가공물과 단일 가공공구에 대하여, 이차원 가공을 적용하였으며 Euclidian 거리를 가정하였다.

복수 가공물에 대한 논문으로, Afifi(1995)는 머시닝센터에서 여러개의 가공물을 장착한 팔레트의 총 소요시간을 최소화 하기 위하여 이차원문제를 대상으로, 팔레트상의 가공물의 배치는 주어졌다고 가정하고 전체 가공경로를 Euclidian TSP로 모델링 한후, 이에대한 해법으로 Simulated Annealing 알고리즘을 적용하여 비가공 이동경로를 최소화하고자 하였다. Khan(1991)이 단일 가공물에 대하여 비가공 이동경로를 최소화한데 비하여, Afifi(1995)는 복수 가공물에 대하여 비가공 이동경로를 최소화하였으며 추가적으로 공구의 반경, 공구 길이, Canned Cycle 특성을 고려하였다.

3. 수리모형

본 장에서는 팔레트상의 가공물의 배치를 구하기 위하여, 각 가공물내 가공경로의 중심점들 사이의 거리가 최소가 되도록 혼합정수계획문제(Mixed Integer Programming Problem)로 모델링 한다. 여기서 구한 가공물의 배치를 갖고서 전체 가공경

로를 Chebyshev TSP로 모델링하여 최소의 비가공 이동경로를 구한다. 이를 위해 제1절에서는 필요한 가정사항을 제시하고, 제2절에서는 가공물의 배치에 대하여 수리적 모형을 구축하고, 제3절에서는 가공경로에 대하여 수리적 모형을 구축한다.

3.1 가정

가공물의 배치에 대한 수리적 모형 및 가공경로에 대한 수리적 모형을 구축하기 위하여 본 연구의 가정사항은 다음과 같다.

- (1) 단일 가공공구를 사용하는 경우만을 고려한다.
- (2) 가공은 이차원 가공을 가정한다.
- (3) 두 지점간의 이동거리는 Chebyshev 거리를 따른다.
- (4) 가공물의 배치를 결정하기 위해 가공물의 위치를 이동시킬때, 가공물의 상하좌우는 일정하게 유지한채, 그 가공물의 좌표만을 이동시킨다. 즉, 가공물의 회전은 허용하지 않는다.
- (5) 각 가공물은 직사각형으로 표시되고 이는 팔레트에 고정하기 위한 Jig용 공간을 포함한다.

3.2 가공물 배치에 대한 수리적 모형

팔레트상의 가공물의 배치에 대한 수리적 모형을 구축하기 위하여, 먼저 각 가공물내에서 가공경로의 중심점을 찾은 후, 이들 사이의 거리의 합이 최소가 되도록 혼합정수계획문제(Mixed Integer Programming Problem)로 모델링한다. 여기서 각 가공물의 중심점이란 가공물의 가공경로를 모두 포함하는 최소의 Rectangular Convex Hull의 중심점을 의미한다. 모델링을 위한 모수와 변수를 다음과 같이 정의한다.

(1) 모수

- ① n 은 가공물의 갯수를 나타낸다.
- ② R_i 는 가공물 i 를 표시하는 영역으로, 이는 지그(Jig)용 공간을 포함하며 직사각형으로 표시된다.
- ③ l_{ij} (l_{ji})는 R_i 가 R_j 좌측(우측)에 위치한 경우, x 축 방향으로 가공물 i 와 j 가 중복되지 않도록 하는, 가공물 i 의 중심점과 가공물 j 의 중심점 사이의 최소거리이다.
- ④ w_{ij} (w_{ji})는 R_i 가 R_j 하단(상단)에 위치한 경우, y 축 방향으로 가공물 i 와 j 가 중복되지 않도록 하는, 가공물 i 의 중심점과 가공물 j 의 중심점 사이의 최소거리이다.

(2) 변수

- ① (x_i, y_i) 는 가공물 i 에서 모든 가공경로를 포함하는 Rectangular Convex Hull의 중심점이다.
- ② z_{ij}^x 는 $x_j > x_i$ 이면 1이고 아니면 0이다.

③ z_{ji}^x 는 $x_i > x_j$ 이면 1이고 아니면 0이다.

④ z_{ij}^y 는 $y_j > y_i$ 이면 1이고 아니면 0이다.

⑤ z_{ji}^y 는 $y_i > y_j$ 이면 1이고 아니면 0이다.

⑥ u_{ij}, u_{ji} 와 v_{ij}, v_{ji} 는 식 $|x_j - x_i|$ 와 $|y_j - y_i|$ 의 절대기호를 제거하여 주기 위해 도입된 양의 연속형 변수이다.

⑦ f_{ij} 는 식 $\max(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|)$ 의 \max 기호를 제거하여 주기 위해 도입된 양의 연속형 변수이다.

이제, 가공물 배치 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f_{ij}$$

$$u_{ij} + u_{ji} - f_{ij} \leq 0$$

$$v_{ij} + v_{ji} - f_{ij} \leq 0$$

$$-x_i + x_j - u_{ij} + u_{ji} = 0$$

$$-y_i + y_j - v_{ij} + v_{ji} = 0$$

$$-x_i + x_j - Mz_{ij}^x \geq -M + l_{ij}$$

$$x_i - x_j - Mz_{ji}^x \geq -M + l_{ji}$$

$$-y_i + y_j - Mz_{ij}^y \geq -M + w_{ij}$$

$$y_i - y_j - Mz_{ji}^y \geq -M + w_{ji}$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x \leq 1$$

$$z_{ij}^y + z_{ji}^y \leq 1$$

$$R_i \subset L \quad \text{for } i=1, \dots, n$$

$$x_i, y_i, u_{ij}, u_{ji}, v_{ij}, v_{ji} \in R^+$$

$$z_{ij}^x, z_{ji}^x, z_{ij}^y, z_{ji}^y \in \{0, 1\} \quad \text{for all } 1 \leq i \neq j \leq n$$

단, L 은 팔레트의 크기를 나타내는 정방형의 양의 수를 나타내고 M 은 충분히 큰 양의 수를 나타낸다.

3.3 가공경로에 대한 수리적 모형

각 가공물의 배치에 대한 수리적 모형에 의해 구한 가공물의 배치를 갖고서, 전체 가공경로를 Chebyshev TSP로 모델링하여 최소의 비가공 이동경로를 최소화하는 가공경로를 구한다.

이를위한 모수로서 N 은 전체 가공경로상의 노

드의 갯수이며, C_{ij} 는 가공경로상의 노드 i 와 노드 j 사이의 Chebyshev 거리를 나타낸다. 이때 노드 i 와 노드 j 사이의 경로가 가공 이동경로(Productive Tool Movement)일때는, 두 노드중 어느하나에 도착하면 가공이 이루어져야 하므로 C_{ij} 는 $-M$ 의 값을 갖는다.

변수 x_{ij} 는 TSP의 해중 노드 i 에서 노드 j 로의 이동이 존재하면 1의 값을 갖고 아니면 0의 값을 갖는다. 이제 비가공 이동경로를 최소화하는 가공 경로문제는 다음과 같이 모형화 된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_i \sum_j C_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t. } & \sum_j x_{ij} = 1 \quad \text{for all } i = 1, \dots, N \\ & \sum_i x_{ij} = 1 \quad \text{for all } j = 1, \dots, N \\ & u_i - u_j + N x_{ij} \leq N - 1 \\ & \quad \text{for all } 1 \leq i \neq j \leq N \\ & x_{ij} : \text{binary variable} \\ & u_j \geq 0 \quad \text{for all } j = 1, \dots, N \end{aligned}$$

4. 이단계 경험적 알고리즘

4.1 가공경로와 관련된 용어 정의

- (1) Edge는 가공경로의 시작점과 끝점이 다른 밀링(Milling)가공경로를 나타내고 낸다.
- (2) Edge Set S_o 는 Edge들의 집합을 나타낸다.
- (3) Single Node는 드릴링(Drilling)이나 보링(Boring)가공과 같은 단일 지점에서 가공이 이루어 지는, 가공 경로상의 노드를 나타낸다.
- (4) Single Node Set S_s 는 Single Node들의 집합을 나타낸다.
- (5) Cycle은 가공경로의 시작점과 끝점이 동일한 밀링(Milling)가공경로를 나타낸다.
- (6) Cycle Set S_c 는 Cycle들의 집합을 나타낸다.

4.2 가공물 배치와 관련된 용어 정의

- (1) Merging Edge는 가공물의 전체 가공경로를 최소화시키는 TSP경로내에서 가장 큰 비가공 이동경로를 의미한다.
- (2) Merging Edge Set S_L 은 Merging Edge들의 집합을 나타낸다.

4.3 경험적 알고리즘

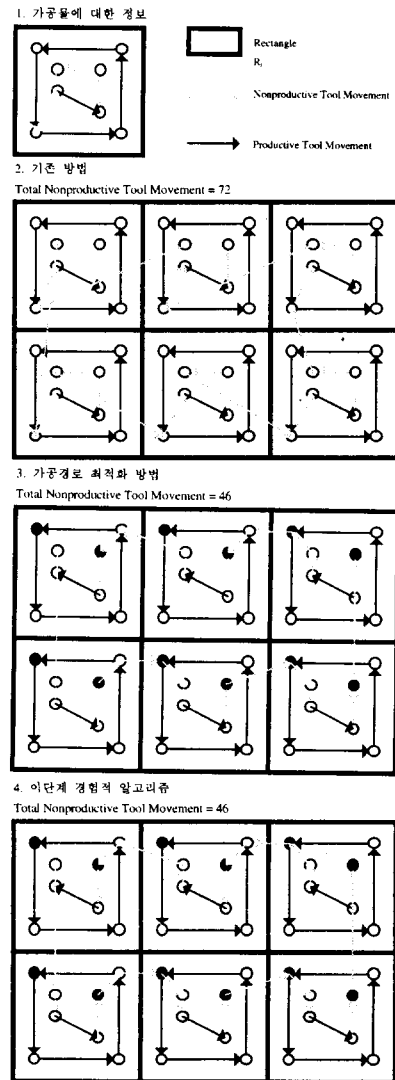
Phase 1. 가공물을 배치한다.

- (1) 가공물별로 TSP로 최단 가공경로를 구한후, 그중 최대의 비가공 이동경로를 찾아, 이를 그 가공물의 Merging Edge라 정의한다.
- (2) Merging Edge들 사이의 Additional Distance가 최소가 되도록 가공물을 순차적으로 배치한다.

Phase 2. Phase 1에서 구한 가공물의 배치를 갖고 차례로 Edge Set S_o , Single Node Set S_s , Cycle Set S_c 에서의 Additional Distance가 최소가 되는 가공경로를 찾는다.

5. 사례연구

5.1 동일 가공물의 경우



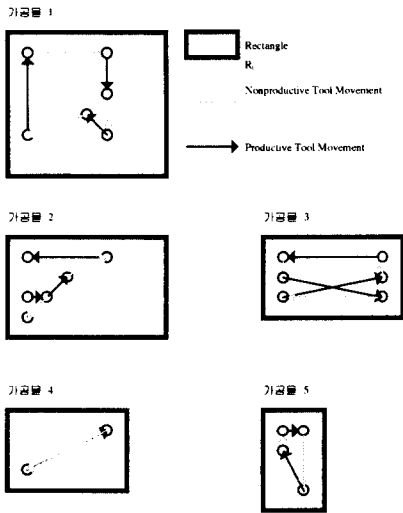
이에대한 결과를 요약하면 표1과 같다.

[표 1] 동일 가공물 수행도 결과

	총 비가공 이동 경로	개선비(%)	총 가공시간 개선비(%)
기존방법	72	-	-
가공경로 최적화 방법	46	36.0	7.2~10.8
이단계 경험적 알고리즘	46	36.0	7.2~10.8

5.2 비동일 가공물의 경우

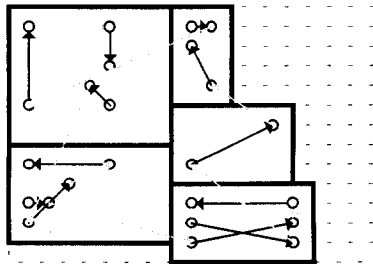
1. 가공물에 대한 정보



2. 기존 방법

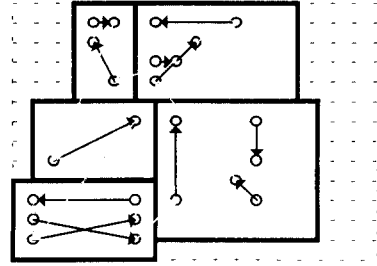
(1) 가공물 배치를 Random 하게 선택한 경우

Total Nonproductive Tool Movement = 44



(2) 최적화된 가공물 배치를 선택한 경우

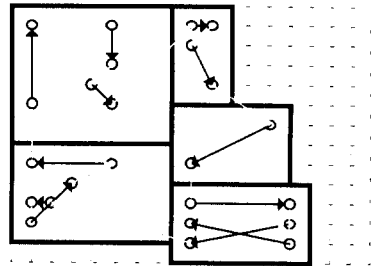
Total Nonproductive Tool Movement = 36



3. 가공경로 최적화 방법

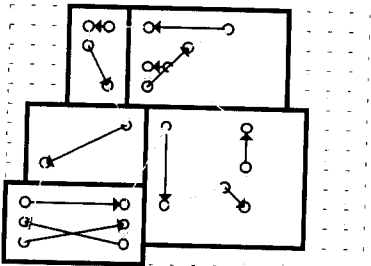
(1) 가공물 배치를 Random 하게 선택한 경우

Total Nonproductive Tool Movement = 35



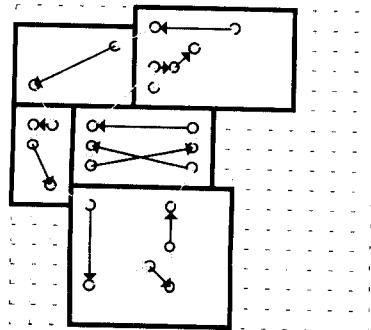
(2) 최적화된 가공물 배치를 선택한 경우

Total Nonproductive Tool Movement = 27



4. 이단계 경험적 알고리즘

Total Nonproductive Tool Movement = 22



이에대한 결과를 요약하면 표2와 같다.

[표 2] 비동일 가공물 수행도 결과

		총 비가공 이동 경로	개선비 (%)	총 가공시간 개선비 (%)
기존 방법	임의적으로 주어진 가공물 배치	44	-	-
	수리적 모형에 의해 최적화된 가공물 배치	36	-	-
가공 경로 최적화 방법	임의적으로 주어진 가공물 배치	35	20	4.0~6.0
	수리적 모형에 의해 최적화된 가공물 배치	27	25	5.0~7.5
이단계 경험적 알고리즘		22	39~50	7.8~15.0

6. 결론

본 연구에서는, 수치제어 공작기계에 여러개의 가공물을 한꺼번에 팔레트 상에 장착하여 가공하는 복수 가공물 가공에 있어서, 생산성을 향상시키기 위해 가공시간을 최소화하는 가공물의 배치 및 가공경로를 구하는 알고리즘을 제시하고자 하였다. 먼저 가공물의 배치에 대하여 혼합정수계획문제로 모델링 한후, 여기서 구한 가공물의 배치를 갖고서 최단 가공경로를 구하는 수리적 모형을 구축하였다. 본 논문에서 제시된 수리적 모형은 가공물의 갯수가 증가하면 계산시간이 폭발적으로 증가하여, 이에대한 해결책으로 이단계 경험적 알고리즘을 제시하였다. 동일 가공물의 경우, 본 예제에 대하여 기존방법을 적용시 총 비가공 이동경로가 72인데 비하여, 본 논문에서 제시한 이단계 경험적 알고리즘을 적용시 비가공 이동경로는 46으로 감소하였다. 일반적으로 비가공 이동경로는 총 가공시간에서 차지하는 비율이 20 ~ 30%라는 Afifi(1995)의 조사결과에 비추어볼때, 이는 총 가공시간이 기존 방법보다 7.2~10.8% 정도 감소됨을 의미한다. 또한 비동일 가공물의 경우, 본 예제에 대하여 기존방법을 적용시 비가공 이동경로가 36~44인데 비하여, 이단계 경험적 알고리즘을 적용시 비가공 이동경로가 22로 감소하였으며, 총 가공시간은 기존 방법보다 7.8~15.0% 정도 감소됨을 알 수 있다. 총 가공시간의 7.2~15.0% 감소는, 머시닝센터 10대를 운영하는 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)에서 적어도 머시닝센터 1대 이상의 절감효과를 얻을 수 있다.

參 考 文 獻

1. Afifi, A. A. and Hayhurst, D. R., "Part programming optimization of multi-component pallet residence time in a machining center for canned cycles and cutter tool compensation", INT. J. Computer Integrated manufacturing, 1995, VOL. 8, NO. 1, 1-20
2. Bozer, Y. A., Schorn, E. C. and Sharp, G. P., "Geometry approaches to solve the chebyshev traveling salesman problem", IIE Transaction, Volume 22, Number 3, 238-254, 1990
3. Francis, R. L., Leon F. McGinnis, Jr. and John A. White, "Facility layout and location - An analytical approach", Prentice Hall, 1992
4. Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte G., "New insertion and post-optimization procedures for the traveling salesman problem", Operation Research, forthcoming, 1992
5. Golden, B. L. and Stewart, Jr. W. R., "Empirical analysis of heuristics", in : Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. and Shmoys, D. B., "A guided tour of combinatorial optimization", Wiley, Chichester, 207 - 249, 1985
6. Heragu, S. S., "Recent models and techniques for solving the layout problem", European Journal of Operation Research, 57(1992), P. 137-144, North-Holland.
7. Jacques Desrosier, Francois Soumis, Martin Desrochers and Michel Sauve, "Methods for routing with time windows", European Journal of Operation Research, 23(1986), P. 236-245, North-Holland.
8. Khan, W. A. and Hayhurst, D. R., "Computer aided part program segmentation and reconstruction for minimization of machine tool residence time", INT. J. Computer Integrated manufacturing, 1991, VOL. 4, NO. 5, 300-314
9. Laurene Fausett, "Fundamentals of Neural Network", Prentice Hall, P.338-348
10. Lin, S. and Kermighan, B. W., "An effective heuristic for the traveling salesman problem", Operations Research, 21, P. 498-516, 1973
11. Walas, R. A. and Askin, R. G., "An algorithm for NC turret punch press tool location and hit sequencing", IIE Transaction, Vol. 16, No. 3, 1984
12. Winston, W. L., "Operations research : application and algorithms", Duxbury Press, 529-530, 1994
13. Younis, N. A. and Cavalier, T. M., "On location part bins in a constrained layout area for an automated assembly process", Computers ind. Engineering Vol.18, No. 2, 111-118, 1990