大韓造船學會論文集
第 37卷 第 3號 2000年 8月

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 37, No. 3, pp.90-98, August 2000

개선된 유전자 알고리즘을 이용한 부재 절단경로 최적화에 관한 연구

한윤근*, 장창두**

A Study on the Cutting Path Optimization using Improved Genetic Algorithm

Y.K. Han* and C.D. Jang**

요 약

부재 최적 배치 알고리즘(Nesting)과 절단 경로 최적화 알고리즘은 부재의 원판을 절단, 가공하여 조립하는 조선 공업, 자동차 산업, 의류 산업 등 매우 다양한 산업 분야에 가격 경쟁력 및 생산성 향상에 매우 큰 파급 효과를 미치는 요소 기술이라 할 수 있으나, 부재가 매우 복잡하고 다양하며 절단 공정에서의 높은 정도 관리가 요구되는 조선 산업 분야에 효율적으로 적용할 수 있는 절단 경로 최적화 알고리즘 개발에 관한 이론적인 접근은 아직 미진하다. 본 연구에서는 개선된 유전자 알고리즘을 사용하여 2차원 절단에서의 절단 경로 문제를 풀기 위한 새로운 해법을 제시하였으며, 절단 경로 문제와 같은 대규모 최적화 문제를 효과적으로 해결하기 위해 효율적인 이웃해의 생성방법을 도입 적용하여 부재의 절단 순서뿐만 아니라 피어싱점의 위치까지 탐색하는 최적화문제를 모델링 하였다.

Abstract

Nesting and cutting path optimization have a great effect on price competitions and improvement of productivity in various industries such as the shipbuilding, the auto, the clothing, and so on. But the theoretical approach on the development of cutting path optimization algorithm, which can be applied effectively in the shipbuilding, has not been performed enough because parts are so complex and various. In this study, a new solution has been presented to solve the cutting path problem in 2-D cutting by using improved genetic algorithm. The presented optimization algorithm can search not only the cutting sequence of parts but also the position of piercing point by applying the effective neighborhood solution generating method

접수일자 :1999년 11월 16일, 승인일자 : 2000년 5월 12일
* 서울대학교 대학원 조선해양공학과 박사과정(E-mail: yhhan@plaza.snu.ac.kr)
** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: cdjang@snu.ac.kr)

1. 서 언

부재 최적 배치(Nesting)와 절단 경로 최적화 알고리즘은 부재의 원판을 절단, 가공하여 조립하는 조선 공업, 자동차 산업, 의류 산업 등 매우 다양한 산업 분야에 가격 경쟁력 및 생산성 향상에 매우 큰 파급 효과를 미치는 요소 기술이라 할 수 있다. 그간 많은 산업 분야에서 네스팅과 절단 경로 최적화에 주력하여 왔으나, 부재가 매우 복잡하고 다양하며 절단 공정에서의 높은 정도 관리가 요구되는 조선 산업 분야에 효율적으로 적용할 수 있는 연구는 아직 미진하며, 특히 최소 절단 시간을 구하기 위한 최적화 문제의 이론적인 접근은 거의 전무하다.

조선 공업에서 일반적으로 설계가 끝난 각 부재(part)는 네스팅 공정을 통해 판재 위에 배치되어지며 절단 경로를 결정한 후 가공조건과 함께 수치제어 공작기계의 제어에 필요한 CNC 프로그램을 생성하게 된다. 최근 많은 상업용 CAD/CAM 패키지는 절단 경로의 생성을 제공하여 화염 절단, 플라즈마 절단, 레이저 절단 등에 사용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 시스템에서는 작업자의 경험에 의존하는 대화식을 채택하거나 최적경로와는 무관한 CAD 데이터에 따른 순차적인 절단 경로를 생성하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 조선 산업의 설계, 생산 공정 특성과 강판용 NC 절단기에 적합한 절단 경로 최적화 시스템을 개발하고 이를 PC급 컴퓨터에 구현함으로써 중소 조선소의 여건에서도 사용 가능한 환경을 도입하려한다.

2 관련 연구동향

절단경로 문제는 일반적으로 조합최적화 문제 중 하나인 순회판매원 문제(Traveling Salesman Problem)로 정식화 될 수 있는데, TSP 문제의 정의는 N개의 도시를 가장 짧은 거리로 여행하는 경로의 순서를 찾는 것으로, 정의 자체는 매우 단순하지만 매우 어려운 전형적인 조합 최적화 문제이다. 일반적으로 TSP 문제는 경로 최소화만을 목표로 하고 있지만 본 연구에서의 절단 경로 생성은 내부 홀(inner hole)을 포함한 절단 윤곽(cutting contour)을 구속조건으로 고려하여야 한다. 현재까지의 절단경로에 관련된 문헌들은 최적해를 구하기보다는 경험적이거나 직관적인 휴리스틱한 정보를 사용하여 근사해를 구하는 데에 국한되어 있는 경우가 대부분이었다.

Manber와 Israni[1]는 최소의 피어싱점(piercing points)을 갖는 절단경로를 구하는 문제를 풀었지만 내부 홀을 포함하는 절단문제는 다루지 않았다. Ragenbass와 Reissner[2]는 스템핑-레이저(stamping-laser) 조합 공정에서 제조계획을 위한 전문가 시스템에 대해 연구하였으며, 곡선부의 반경에 대한 최적 절단속도에 관한 상관관계에 대해서 다루었다. Jackson과 Mittal[3]은 NC 프로그램의 자동생성을 위한 절단 경로생성에 관해 소개하였는데, 이들은 CAD 데이터로부터 도형정보를 추출하고 적절한 절단경로 생성을 위한 알고리즘에 관해 연구하였다.

최근 대규모 최적화 문제를 풀기 위해 모의 어닐링법(Simulated Annealing), 타부서치(Tabu Search), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm) 그리고 신경 회로망(Neural Networks) 등 확률론적인 방법을 채택한 알고리즘들이 많이 등장하였는데, 이들은 실행시간이 상당히 길다는 단점과 항상 유용한 해를 제공한다는 확증은 없음에도 불구하고 국지해(local solution)를 탈출할 수 있는 가능성이 크기 때문에 전역해(global solution)를 구하는데 매우 유리하다는 이유로 선호되고 있다. 한 등[4]은 모의 어닐링 기법을 이용하여 절단 경로 최적화 문제를 풀었으며 좋은 결과를 나타내 주었다.

본 연구에서는 내부 홀을 포함하는 불규칙적인 부재들이 배치되어 있는 2차원 판재 위에서 절단 공정의 코스트(cost)를 줄이기 위해 최소의 거리를 가지는 절단경로를 생성하고자 하였다. 이를 위해 조합최적화 문제에 효과적으로 적용되고 있는 GA 알고리즘을 기반으로 하는 절단경로 알고리즘을 제안하였다. 또한 모의 어닐링 기법에서 많이 사용되는 이웃해 생성법을 유전자 알고리즘

에 도입하여 빠른 수렴 시간 내에 최적해를 구할 수 있는 TSP알고리즘을 개발하였고, 이를 이용하여 부재 절단을 위한 최적의 절단 경로를 구하였다.

3. 절단경로 최적화

3.1 시스템의 개요

절단 경로 최적화 문제는 조합 최적화 문제로 널리 알려진 TSP의 특수한 경우로 정식화되지만 TSP와는 달리 여러가지 제한 조건들을 가지고 있다. TSP에서는 방문 도시의 위치가 고정되어 있으나 절단 경로 생성의 경우에는 각 부재의 피어싱점이 변화될 수 있으며, 플라즈마 절단의 경우 절단 과정시 발생한 변형으로 인해 부재들의 위치 변화가 발생할 수 있으므로, 부재의 내부에 다른 부재가 배치되어 있을 경우 내부 부재를 먼저 절단해야 하는 등 고려해야 할 여러 인자들을 포함하고 있다.

본 연구에서는 내부 홀(inner hole)을 포함하는 불규칙적인 부재들이 배치되어 있는 2차원 판재 위에서 최소의 거리를 가지는 절단 경로를 생성하기 위해 유전자 알고리즘을 도입하여 최소 경로를 구하였다. 유전자 알고리즘에서 최종해의 질(quality) 및 수렴 속도는 유전자 조작 함수 및 조작 발생률 등의 선택에 따라 큰 영향을 받기 때문에 우수한 결과를 얻기 위해서는 문제의 적용대상에 따라 적절한 유전자 조작 함수의 선택이 필요하다.

효과적인 유전자 조작 함수를 도입하기 위하여 Lin[5]에 의해 제시되어 모의 어닐링을 이용한 TSP문제에서 많이 사용되는 이웃해(neighborhood solution) 생성 방법을 유전자 알고리즘의 유전자 조작 함수로 도입하였다.

본 연구에서 다루는 부재의 기본 형상은 내부 홀을 포함하는 다각형(polygon)이다. 본 연구에서는 열변형에 따른 부재의 이동문제를 반영하여 내부 홀에 배치된 부재, 내부 윤곽, 외부윤곽 순으로 절단하도록 하였으며, 부재의 절단방향은 모두 반시계 방향으로 가정하였고, 내부 홀의 절단 방향은 시계방향으로 하였다.

기존의 연구에서는 절단경로의 문제를 단순화시키기 위해 피어싱점을 고정시켜 토치 경로를 결정하는 연구들이 많았으나 본 연구에서는 최적화과정에서 부재의 모든 convex vertex들이 피어싱점으로 채택될 수 있도록 하였다.

3.2 문제의 정식화

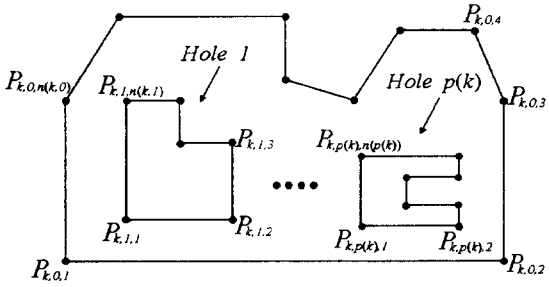


Fig. 1 Definition of part

N개의 부재들이 배치되어진 판재의 절단 공정을 최적화하기 위해 절단 경로를 결정하고자 할 때, 임의의 부재 $k(1 \le k \le N)$에 대하여 외곽과 내부 홀의 경계를 나타내는 다각형의 정점들을 Fig.1과 같이 표현하였다. 다각형의 정점을 나타내는 $P_{k,m,n}$의 k, m, n은 각각 부재 번호, 다각형 번호, 정점 번호를 나타낸다. 부재 k에 대하여 외곽 경계와 내부 홀을 모두 포함하는 다각형의 개수를 $p(k)$로 나타내면, 이때 $p(0)$는 외곽 경계이고 나머지는 내부 홀을 의미한다. 또한 각 다각형의 정점 수는 $n(k,0)$, $n(k,1)$....., $n(k,p(k))$로 표현된다. 또한 $P_{k,0,1}$와 $P_{k,0,n(k,0)}$은 Part k의 외곽 경계의 첫번째 정점과 마지막 정점을 나타내고, $P_{k,m,1}$와 $P_{k,m,n(m,k)}$은 k의 $m(1 \le m \le p(k))$번째 홀의 첫번째 정점과 마지막 정점을 각각 나타낸다. 절단 경로의 최적화과정 동안 모든 피어싱점은 부재 경계의 다른 모든 정점들에 의해 교체되어질

수 있으므로 절단경로 문제에서 고려되어지는 정점의 수는 부재의 모든 정점들로 $\sum_{k=1}\sum_{m=0} n(k,m)$가 되어야 하나, 실제로는 부재 윤곽의 한 정점과 내부 홀들의 각각 하나씩의 정점들만으로 한 부재의 절단 경로를 생성할 수 있으므로 임의로 선택된 $\sum_{k=1} p(k)$개의 정점들로만 최적화 과정을 수행할 수 있다.

본 연구에서 사용된 최적 절단경로 생성을 위한 목적함수는 절단경로의 총 길이이고 설계변수는 부재별 대표점 및 대표점들의 배치 순서이다. 부재간의 두 피어싱점 k과 $k+1$ 사이의 경로의 합이 짧을수록 최적의 해에 접근하게 되는데, 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

minimize :

$$F = \sum_{k=1}^{N-1}[\ h_{k+1}\cdot F_1(k,k+1) + (1-h_{k+1})\cdot F_2(k,k+1)\ ]$$

where :

$$F_1(k,k+1) = \overline{P_{k,0,1}P_{k+1,1,1}} + \sum_{m=1}^{p(k)-1}\overline{P_{k+1,m,1}P_{k+1,m+1,1}} + \overline{P_{k+1,n(k,p(k)),1}P_{k+1,0,1}}$$

$$F_2(k,k+1) = \overline{P_{k,0,1}P_{k+1,0,1}}$$

$$\begin{cases} h_{k+1}=1, & \textit{If Part } (k+1) \textit{ include hole} \\ h_{k+1}=0, & \textit{If Part } (k+1) \textit{ not include hole} \end{cases}$$

여기서, $F_1(k,k+1)$는 $k+1$번째 부재가 내부 홀을 포함할 경우의 총 경로이며 $F_2(k,k+1)$는 $k+1$번째 부재가 내부 홀을 포함하지 않을 경우의 총 경로이다.

한 부재에 여러 개의 홀이 존재할 때 이들의 절단 순서를 고려한 목적함수를 도입하여야 하지만 실제 부재는 내부 홀의 개수가 많지 않으며 전체 절단 경로 길이에 이들의 순서가 미치는 영향은 미미하므로 부재 $k+1$의 내부 홀의 절단 순서는 부재 k의 외곽 피어싱점에서 가까운 순서로 정하였다. 내부 홀 속에 다른 부재가 배치되어 있을 때는 내부에 배치된 부재를 외부 부재의 홀로 취급하여 절단 순서를 정할 수 있는데 이 부재의 절단 순서는 이 부재를 둘러싼 홀보다 앞선다고 미리 정할 수 있다.

Fig.2는 임의의 선택된 부재들의 절단 순서를 바꾸어 절단 경로길이를 최소화하도록 피어싱점을 탐색하는 방법에 대해 도시적으로 보여주고 있다.

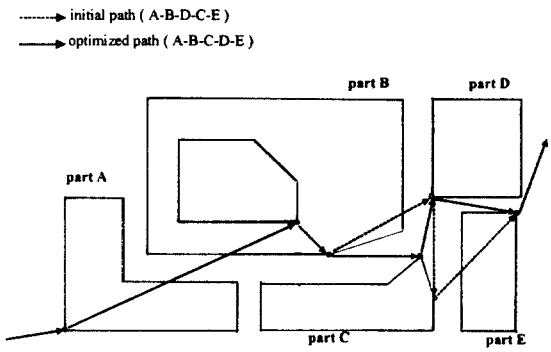


Fig. 2 Cutting path generation

본 연구에서 적용된 부재의 형상은 선분의 끝점이 반시계 방향으로 연결된 다각형으로 정의되어 폐곡선을 이루고 있어 한 번의 피어싱으로 하나의 윤곽절단을 하는 방법을 이용하고 있다. 이밖에도 현실적으로 고려되어야 할 절단 공정상의 구속조건들이 존재하고 있다. 판재의 최초 피어싱점에서 과도한 입열을 방지하기 위해 일반적으로 lead-in 절단을 사용하게 된다. 이는 절단 토오치가 부재의 윤곽상의 시작점에서 약간 떨어진 거리에서 피어싱점을 잡아 서서히 재료를 제거하면서 윤곽으로 접근하는 방법이다. 또한 절단폭(kerf-width)의 위치와 절단품질의 영향을 고려한 절단방향을 생각할 수가 있다. 본 연구에서는 이러한 열영향에 대한 고려는 생략하고 절단경로의 길이만을 목적함수에 포함시켰다.

3.3 유전자 알고리즘을 이용한 절단 경로 생성

직접탐색법에 의한 최적화 방법이 한 점에서 다른 점으로의 이동에 의한 국부적인 탐색과정을 가지는 반면에, 유전자 알고리즘는 여러개의 설계점들이 집단(population)을 이루어 동시에 탐색을 행하여 보다 넓은 설계 영역에 대한 정보를 활용함으로써, 전체 최적점에 수렴할 확률이 기존의 방법에 비해 상대적으로 매우 크다. 또한 유전자 알고리즘는 목적함수와 제한조건의 값만을 사용하고 미분값이나 그 외의 다른 정보를 필요로 하지 않는 직접 탐색방법을 이용하므로 실제 구조물의 설계와 같은 복잡하고 다양한 환경의 최적화 문제에 적합하며 기본 모델의 변경으로 인한 수정이 용이하다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘을 절단 경로 문제에 적합하도록 구현한 알고리즘에 관해서 기술하였다. 최종해의 질(quality) 및 수렴 속도는 유전자 조작 함수 및 조작 발생률 등의 선택에 따라 큰 영향을 받기 때문에 우수한 결과를 얻기 위해서는 문제의 적용대상에 따라 적절한 선택이 필요하다. 이전 많은 TSP문제들은 모의 어닐링 알고리즘을 활용하였는데, 이때 얻은 최종해의 질은 어닐링 스케쥴 외에도 이웃함수와 그의 생성방법에도 크게 영향을 받는다. 특히 아래는 Lin[5]이 제시한 2-changes법으로 TSP문제를 위한 국부탐색(local search) 알고리즘으로 잘 알려져 있다.

① 경로의 임의의 한 부분을 선택하여 제거한 다음 동일한 부재에 대해 방향을 반대방향으로 바꾼 다음 다시 삽입하는 방법 - Reversed touring

② 경로의 임의의 한 부분을 선택하여 제거한 다음 다른 경로 중 임의로 선택된 두 부재 사이에 삽입하는 방법 - Shifted Touring

본 연구에서는 유전자 알고리즘의 교배, 변종 등의 기존의 유전자 조작 함수에 Lin의 2-change 방법과 몇 가지 함수를 추가하여 유전자 알고리즘의 수렴속도와 최적해를 찾을 확률을 향상 시켰다. 또한 라이프 사이클(life cycle)이라는 개념을 도입하여 전역해를 찾는 기능을 강화하였다. 이는 한번의 유전자 조작 후 차세대 유전자를 선택하는 기존의 유전자 알고리즘과 달리 유한번의 유전자 조작을 한 후 유전자를 선택함으로써 국부해로부터 탈피할 수 있도록 하였다.

최적 절단경로 생성을 위해 본 연구에서 구현된 유전자 알고리즘의 순서도(Fig.3) 및 유전자 조작 함수는 아래와 같다.

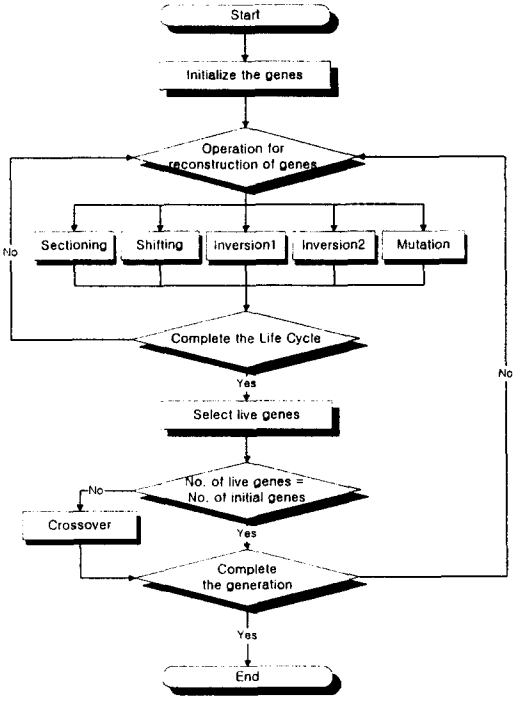


Fig. 3 Flowchart for cutting path generation using Genetic Algorithm

(1) Reproduction

생성된 개체 중 일정수의 우수한 종을 미리 선택한 후 나머지는 적합도에 따라 확률적으로 선택한다.

(2) Sectioning

Fig.4와 같이 부모(parent) 유전자 배열의 일부분(3-4-5-6-7)을 떼어낸다. 떼어낸 유전자 고리를 두 부분(3-4 | 5-6-7)으로 나눈 후 순서를 바꾸어 결합(5-6-7-3-4)시키고, 이를 원래 유전자 배열 중 최적의 위치(1과2사이)에 결합시켜 새로운 자식(offspring) 유전자를 생성한다(Fig.4).

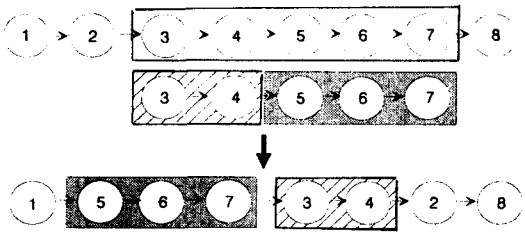


Fig. 4 Graphical representation of sectioning

(4) Shifting (shifted touring)

부모 유전자 배열의 일부분(3-4-5)을 떼어내어 떼어낸 유전자 고리를 임의의 위치(7-8사이)로 이동시켜 유전자 배열에 결합하여 자식 유전자를 생성한다(Fig.5).

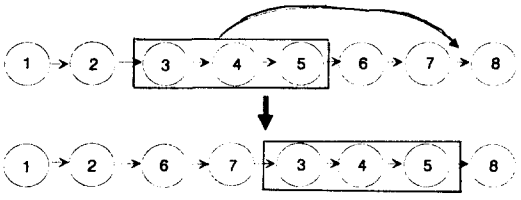


Fig. 5 Graphical representation of shifting

(3) Inversion 1 (reversed touring)

부모 유전자 배열의 일부분(3-4-5-6)을 떼어내어 떼어낸 유전자 고리를 역순(6-5-4-3)으로 다시 원래 유전자 배열에 결합하여 자식 유전자를 생성한다(Fig.6).

(5) Inversion2

부모 유전자의 임의의 위치(3)에서 끝까지를 떼어내어 이를 역순(8-7-6-5-4-3)으로 다시 결합하여 자식 유전자를 생성한다(Fig.7).

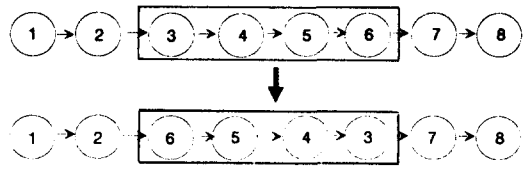


Fig. 6 Graphical representation of inversion1

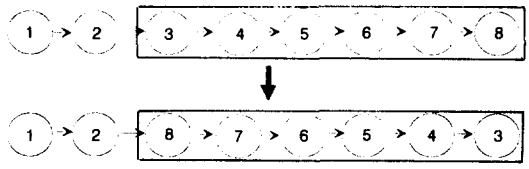


Fig. 7 Graphical representation of inversion2

(6) Crossover

TSP 문제를 풀기 위한 GA의 crossover 방법으로는 partially-mapped (PMX), order(OX), cycle(CX) 방법이 있으나, 일반적으로 OX 방법이 가장 적합하다고 알려져 있다. 본 연구에서도 OX 방법을 사용하였다. 이 방법은 우선 선택된 두 개의 부모 유전자 배열의 일부분을 그대로 자식 유전자 배열에 이식한다.

```
P1 = ( 1 2 3 | 4 5 6 7 | 8 9 )
P2 = ( 4 5 2 | 1 8 7 6 | 9 3 )
O1 = ( x x x | 4 5 6 7 | x x )
O2 = ( x x x | 1 8 7 6 | x x )
```

다음으로 한 부모 유전자의 유전자 배열을 보존된 유전자의 뒤를 시점으로 일렬로 배열한 후(9-3-4-5-2-1-8-7-6) 다른 부모 유전자의 보존된 유전자에 있는 번호를 제외시켜 새로운 유전자 배열(9-3-2-1-8)을 생성한다. 이 배열을 자식의 빈 유전자 배열에 이식한다.

```
O1 = ( 2 1 8 | 4 5 6 7 | 9 3 )
O2 = ( 3 4 5 | 1 8 7 6 | 9 2 )
```

(7) Mutation

유전자 배열 중 임의의 한 점(4)을 떼어내어 이를 적합도에 따라 확률적으로 다른 위치로 이동

시켜 돌연변이된 유전자를 생성한다(Fig.8).

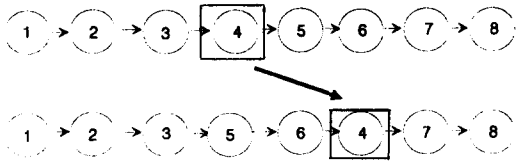
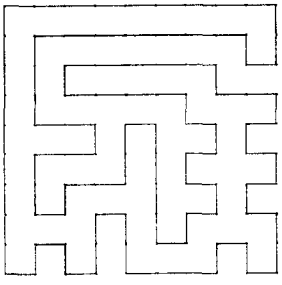


Fig. 8 Graphical representation of mutation

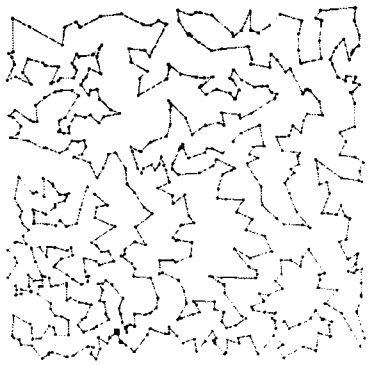
절단 경로 문제에서 피어싱점은 바로 TSP문제에서 도시(cities)에 해당한다. 이전의 문헌들에서는 절단 경로 문제를 단순화시키기 위해서 피어싱점들을 고정시켰으나, 본 연구에서는 최적화과정에서 모든 피어싱점들은 부재의 윤곽상의 정점들에 의해 바뀌어질 수 있다.

4. 적용 및 결과 검토

본 연구에서 개발한 절단경로 최적화 알고리즘의 성능을 검토하기 위해서 일반적인 TSP 문제에 적용해 보았다. 등간격으로 배치된 100개의 도시를 방문하는 TSP 문제의 경우 정해가 알려져 있는데 본 연구의 결과도 정해를 구할 수 있었다. 도시가 불규칙하게 분포되어 있는 경우에는 정해를 알 수 없으나 배치 결과에서 볼 수 있듯이 도시의 방문 경로가 교차하는 경우가 발생하지 않았다(Fig.9). 100개 도시의 TSP 문제는 53초(Pentium II 266MHz)에 수렴하는 해를 구할 수 있었다.



(a) Regularly distributed 100-cities



(b) Randomly distributed 600-cities

Fig. 9 Test results of TSP problem

일반적으로 TSP 문제에 많이 사용되는 모의어닐링의 경우 수렴성은 뛰어나나 국부해에 빠지는 경우를 종종 볼 수 있다. 본 연구에서 사용된 유전자 알고리즘의 경우 여러 개의 설계점들이 집단(population)을 이루어 동시에 탐색을 행하여 보다 넓은 설계영역에 대한 정보를 활용함으로써, 전체 최적점에 수렴할 확률이 기존의 SA 알고리즘에 비해 상대적으로 매우 높고, 일반적인 GA의 수렴 속도를 개선하기 위해 도입된 이웃해 생성법과 라이프 사이클의 도입으로 SA 알고리즘과 비슷한 수렴속도를 얻을 수 있었다.

36개 부재의 경우 6초 정도의 짧은 시간에 절단 경로를 생성하였으며 Fig.10에 생성된 절단 경로가 나타나 있다.

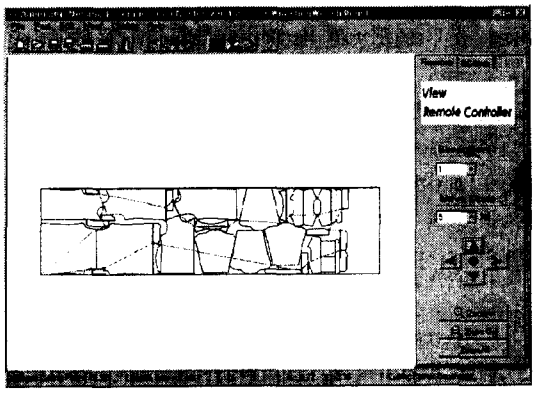


Fig. 10 Result of cutting path generation of the present algorithm

본 연구에서 제시한 알고리즘은 확률론적인 방법을 채택하고 있으므로 결정론적인 탐색법에 비해 전역해에 도달할 수 있는 가능성이 높다. 절단경로 문제와 같은 대규모 최적화 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 효율적인 이웃해의 생성방법을 도입, 적용하였으며 부재의 절단 순서뿐만 아니라 피어싱점의 위치까지 탐색할 수 있도록 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 개선된 GA 알고리즘을 사용하여 2차원 프라즈마 절단에서의 절단경로 문제를 풀기위한 새로운 해법을 제시하였다. 제시된 절단경로 알고리즘은 결정론적인 탐색법에 비해 보다 더 전역해에 도달할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 절단경로 문제와 같은 대규모 최적화 문제를 효과적으로 해결하기 위해 효율적인 이웃해의 생성방법을 도입 적용하였으며 부재의 절단 순서 뿐만 아니라 피어싱점의 위치까지 탐색하는 구속조건을 완화시킨 최적화문제로 모델링 하였다. 특히, 최적화 과정에서 부재의 모든 convex vertex 들이 피어싱점으로 채택될 수 있도록 하여 고정된 피어싱점을 사용하는 알고리즘에 비해 개선된 절단 경로를 생성하였다.

이렇게 하여 생성된 절단경로는 플라즈마 절단가공을 위해 CNC 프로그램으로 변환되어 생산성 향상은 물론 생산단가까지 감소시키는데 기여하게 될 것이다. 현장에서 사용하기 위해서는 각 현장 실정에 맞는 데이터 생성, 저장 등 많은 개선이 뒤따라야 하겠지만, 생성된 절단경로는 절단가공을 위해 CNC 프로그램으로 변환되어 생산성 향상은 물론 생산단가까지 감소시키는데 기여하게 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구의 일부는 BK21 사업의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

[1] Mander, U. and Israni, S., "Pierce Point Minimization and Optimal Torch Path Determination in Flame Cutting," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 81-89, 1984

[2] Raggenbass, A. and Reissner, J., "Stamping-Laser Combination in Sheet Processing," Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 291-294, 1989

[3] Jackson, S. D. and Mittal, R. O., "Automatic Generation of 2-Axis Laser Cutter NC Machine Program and Path Planning from CAD," Computer in Industry, Vol. 21, pp. 223-231, 1993

[4] 한국찬, 나석주, "레이저 절단공정에서의 토치 경로 생성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, Vol. 20, No. 6, pp. 1827-1835, 1996

[5] Lin, S., "Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem," The Bell System Tech. Journal, Vol. 44, pp. 2245-2269, 1965

[6] Albano, A., "A Method to Improve two-dimensional layout," Computer Aided Design, Vol. 9, No. 1, pp. 48-52, 1976

[7] Albano, A., and Sapuppo, G., "Optimal Allocation of Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Method," IEEE Trans. Syst., Man and Cyber., Vol. SMC-10, No. 5, pp. 242-248, May, 1980

[8] Rutenbar, R. A., "Simulated Annealing Algorithms: an Overview," IEEE Circuits and Devices Magazine, pp. 19-26, 1989

[9] Press, V., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., "Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing," Cambridge University Press, New York, 1990

[10] Bland, J. A. and Dawson, G. P., "Tabu

Search and Design Optimization," Computer Aided Design, Vol. 23, No. 3, pp. 195-201, 1991

[11] Nee, A. Y. C. and Cheok, B. T., "Algorithms for Nesting of Ship/Offshore Structural Plates," ASME, Advances in Design Automation, Vol. 2, DE-Vol. 32-2, pp. 221-226, 1991

[12] Fujita, K., Akagi, S. and Hirokawa, N., "Hybrid Approach for Optimal Nesting using a Genetic Algorithm and a Local Minimization Algorithm," ASME, Advances in Design Automation, Vol. 1, DE-Vol. 65-1, pp. 477-484, 1993

[13] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680

[14] 조경호, 이건우, "임의 형상의 여러 원자재 위에서의 효과적인 배치 방안," 대한기계학회 논문집, Vol. 19, No. 8, pp. 1854-1868, 1995