

〈논 문〉

레이저 절단공정에서의 토치경로 생성에 관한 연구

한국찬* · 나석주*

(1995년 11월 15일 접수)

A Study on Torch Path Generation for Laser Cutting Process

Guk-Chan Han and Suck-Joo Na

Key Words: Torch Path Problem(토치경로 문제), Simulated Annealing Algorithm(SA 알고리즘), Cost Function(가격함수), Laser Cutting(레이저 절단), Neighborhood Structure(이웃함수), Piercing Point(피어싱점)

Abstract

This paper addresses the problem of a torch path generation for the 2D laser cutting of a stock plate nested with regular or irregular parts. Under the constraint of the relative positions of parts enforced by nesting, the developed torch path algorithm generate feasible cutting path. In this paper, the basic object is a polygon (a many-sided figure) with holes. A part may be represented as a number of line segments connected end-to-end in counterclockwise order, and formed a closed contour as required for cutting paths. The objective is to traverse this cutting contours with a minimum path length. This paper proposes a simulated annealing based torch path algorithm, that is an improved version of previously suggested TSP models. Since every piercing point of parts is not fixed in advance, the algorithm solves an relaxed optimization problem for the constraint, which is one of the main features of the proposed algorithm. For solving the torch path optimization problem, an efficient generation mechanism of neighborhood structure and an annealing schedule were introduced. In this way, a global solution can be obtained in a reasonable time. Several examples are represented to illustrate the method.

1. 서 론

레이저 가공시스템을 이용하여 절단작업에 종사하는 작업자의 생산능률은 CAD 도면으로부터 CNC 프로그램 생성을 위한 마이크로 컴퓨터기반의 CAD/CAM 시스템의 도입에 의해 크게 향상될 수 있다. 현재 대부분의 레이저 가공기는 CNC화 되어가고 있는 추세이며, CAD/CAM 인터페이스에 의한 자동화가 필연적인 상황이다. 이와 같이

생산성증대, 작업시간의 단축과 러닝 코스트 및 재료의 절감을 위한 노력의 일환으로 이루어지고 있는 연구분야로 컴퓨터에 의한 자동 및 반자동 네스팅(nesting) 및 절단 경로계획(path planning) 시스템의 개발 등을 들 수 있다. 더욱이 절단토치의 최적경로 생성은 생산시간에 큰 영향을 미치는 요소일 뿐만 아니라 레이저 가공의 경우 절단시간은 곧 빔조사 시간(beam-on time) 동안의 레이저 가스 및 절단 가스의 소비와 집광렌즈 등 기타 광학부품의 소비와 연관되어 생산 코스트에 심각한 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 문제라 할 수 있다. Fig. 1은 생산시스템에서 원소재로부터 최종제품을 얻기

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

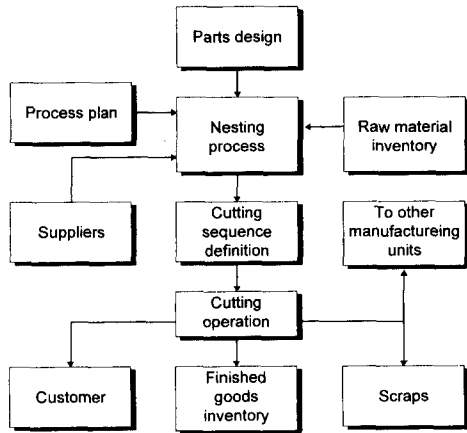


Fig. 1 Concept of cutting process in production line

까지 수행되는 절단작업의 대략적인 개념도이다. 설계가 끝난 각 부재(part)는 네스팅공정을 통해 판재 위에 배치되어지며 절단경로를 결정한 후 가공조건과 함께 수치제어 공작기계의 제어에 필요한 CNC 프로그램을 생성하게 된다. 최근 많은 상업용 CAD/CAM 패키지는 토치경로의 생성을 제공하여 화염 절단, 플라즈마 절단, 레이저 절단 등에 적용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 시스템에서는 작업자의 경험에 의존하는 대화식을 채택하거나 최적경로와는 무관한 CAD 데이터에 따른 순차적인 토치경로를 생성하는 것이 일반적이다.

토치 경로 문제는 일반적으로 operations research(OR)분야에서 가장 많은 연구가 이루어져 온 조합최적화 문제중 하나인 순회판매원 문제(traveling salesman problem: TSP)의 특수한 경우로 수식화될 수 있다. 이 TSP문제의 가장 일반적인 정의는 N개의 도시를 가장 짧은 거리로 여행하는 경로의 순서를 찾는 것으로, 정의 자체는 매우 단순하지만 극도로 어려운 전형적인 조합최적화(combinatorial optimization) 문제에 속한다.^(1~4) 이러한 이유로 토치경로 문제는 절단문제 중에서 네스팅 알고리즘과 더불어 NP-hard 유형에 속하는 조합최적화 문제이기 때문에 현실적인 시간 안에 최적의 해를 구하기란 불가능하다. 본 논문에서의 토치경로 문제는 TSP문제와 경로최소화를 목표로 한다는 점에서는 동일하지만 각 도시(city)를 지나가는 TSP문제와는 달리 내부홀(inner hole)을 포함한 절단윤곽(cutting contour)을 구속조건을 만족하면서 경유해야 한다는 점에서 차이가 있다고 할 수

있다. 따라서 현재까지의 절단경로에 관련된 문헌들을 살펴보면 최적해를 구하기보다는 경험적이거나 직관적인 휴리스틱(heuristic)한 정보를 사용하여 근사해를 구하는 데에 국한되어 있다는 것을 알 수 있다.^(5~7)

레이저와 같은 집속된 열원을 이용하는 박판절단이나 예각절단의 경우 과도한 입열로 인해 예기치 않은 절단품질의 저하가 발생할 수 있는데, 이러한 이유때문에 가장 이상적인 토치경로 알고리즘은 요구되는 절단품질을 만족하면서 동시에 가장 짧은 경로를 탐색하는 것이다. 그러나 불행히도 최적화 알고리즘에 레이저 열원에 의한 열영향을 함께 고려해서 수식화한다는 것은 매우 어려운 문제이기 때문에 현재까지 이에 관한 연구가 미진한 상태이다. Manber와 Israni⁽⁵⁾는 최소의 피어싱점(piercing points)을 갖는 토치경로를 구하는 문제를 풀었다. 그러나 내부홀을 포함하는 절단문제는 다루지 않았다. Raggenbass와 Reissner⁽⁶⁾는 스탬핑-레이저(stamping-laser) 조합공정에서 제조계획(manufacturing plan)을 위한 전문가시스템에 대해 연구하였으며, 곡선부의 반경에 대한 최적 절단속도에 관한 상관관계에 대해서 다루고 있다. Jackson과 Mittal⁽⁷⁾은 NC 프로그램의 자동생성을 위한 절단 경로생성에 관해 소개하였는데, 이들은 CAD 데이터로부터 도형정보를 추출하고 적절한 토치경로 생성을 위한 알고리즘에 관해 연구하였다.

경로최적화 문제와 관련하여 많은 알고리즘들이 개발되어 왔는데 초기에는 주로 소규모의 문제에 적합한 최적 알고리즘이 대부분이었다.^(1,2) 그러나 최근 전자공학의 회로 설계분야와 같은 대규모 최적화 문제를 풀기 위해서는 새로운 접근방법이 요구되고 있으며, 이로 인해 많은 연구자들에 의해 다양한 종류의 휴리스틱 알고리즘들이 개발되고 있다. 현재 이러한 대규모 최적화 문제에 성공적으로 적용되고 있는 것으로는 모의 어닐링법(simulated annealing algorithm: SA),^(8,9) 타부서치(tabu search),⁽¹⁰⁾ 유전 알고리즘(genetic algorithm)⁽¹¹⁾ 그리고 신경회로망(neural networks)^(12,13) 등을 꼽을 수가 있으며 유형별로 볼 때 경로개선편에 속한다고 할 수 있다. 이들은 실행시간이 상당히 길다는 단점과 항상 유용한 해를 제공한다는 확증은 없음에도 불구하고 절차가 확률론적(stochastic)인 방법을 채택하고 있기 때문에 국지해를 탈출할 수 있어 전역해(global solution)를 구하는데 매우 유리하다

는 이유로 선호되고 있는 실정이다. 이 중에서 1983년 Kirkpatrick 등⁽¹⁴⁾이 TSP문제에 SA 알고리즘을 적용한 이후 조합최적화 문제의 근사 최적해를 구하기 위한 관심이 날로 증대되고 있으며 다양한 분야에서 성공적으로 적용되고 있다.

본 논문에서는 내부홀을 포함하는 불규칙적인 부재들이 배치되어 있는 2차원 판재 위에서 레이저 절단공정의 코스트(cost)를 줄이기 위해 최소의 거리를 가지는 토치경로를 생성하고자 하였다. 이를 위해 조합최적화 문제에 효과적으로 적용되고 있는 SA 알고리즘을 기반으로 하는 토치경로 알고리즘을 제안하였다. 절단문제에서의 SA 알고리즘의 응용으로는 이미 저자 등^(15,16)에 의해 네스팅문제에 적용한 연구결과를 발표한 바 있으며, 본 논문은 네스팅 문제의 연장된 연구로서 레이저 절단의 자동화 및 최적화를 위한 CAD/CAM 구축의 일환으로 진행된 연구이다.

2. 문제정의 및 접근방법

2.1 형상표현과 데이터 구조

본 논문에서 다루는 부재의 기본형상은 내부 홀을 포함하는 다각형(polygon)이다. 각 부재는 끝점이 반시계방향으로 연결되는 많은 선분들로 표현되어지며, 토치경로를 이루기 위해 폐곡선을 형성하고 있다. 부재의 둘레를 형성하고 있는 각 선분을 경계(edges)라 하며 경계의 끝점들을 다각형의 정점(vertices)이라 부른다. 하나의 부재는 절단되어질 내부홀을 포함할 수 있는데 이는 부재의 바깥경계(outer contour)와 같이 동일한 방법에 의해 표현된다.

2차원 레이저 절단에서의 토치경로 문제를 위한 데이터 구조가 갖추어야 할 요건으로는 컴퓨터 메모리의 효율적인 사용과 구조의 단순성을 유지하면서 부재의 모듈화를 높이는 직관적인 형태를 갖추는 것이다. Fig. 2는 2차원 절단문제에서 이러한 요구조건을 갖추도록 토치경로 알고리즘의 구현을 위해 개발된 데이터 구조를 나타내고 있다. ELEMENT라는 데이터형은 부재의 내부 및 외부 윤곽(contour)에서 필요로 하는 모든 정보를 포함하는 기본 데이터 구조이며, EDGE라는 데이터형은 각 윤곽의 경계와 정점을 표현하기 위한 리스트로서 사용된다. 내부홀과 외부윤곽은 동일한 방식의 다각형으로 표현되기 때문에 데이터형을 ELEMENT

```

typedef struct edge EDGE
typedef struct elmt ELEMENT

struct edge // Structure of edges
{
float stx, sty; // Start vertex of edge
float edx, edy; // End vertex of edge
EDGE *NextEdge; // Next edge
};

struce elmt // Structure of contours
{
ELEMENT *NextElmt; // Next element of contour
ELEMENT *FirstHole; // First hole list of part
EDGE *FirstEdge; // First edge list of contour
EDGE *LastEdge; // Last edge list of contour
};

```

Fig. 2 Key data structure declarations

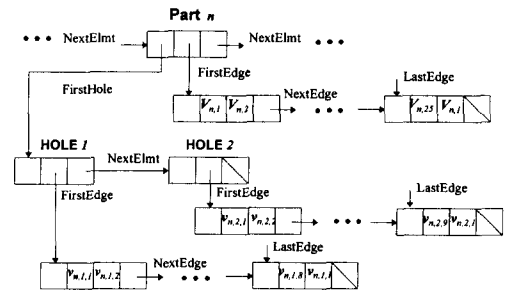


Fig. 3 Hierarchical data structure

와 공유하도록 하였다. 메모리의 효율적인 사용을 위해 포인터(pointer)를 사용한 다중 링크 리스트(multiple linked list)를 적용하였다. Fig. 3은 Fig. 4의 부재에 대한 계층적인 데이터 구조를 보여주고 있다. Fig. 3에서 부재를 표현하는 리스트(list)인 Part n 은 FirstHole이라는 데이터형에 의해 최초의 내부홀 리스트를 포인터하며, FirstEdge라는 데이터형에 의해 최초의 경계 리스트를 포인터한다. 부재의 외부윤곽과 내부홀은 ELEMENT 데이터형을 공유하기 때문에 각 부재의 외부윤곽의 리스트와 내부홀의 리스트는 동일한 변수 NextElmt로 연결되어 토치가 절단경로 방향으로 경유하도록 되어 있다. 윤곽 위의 피어싱점들은 항상 첫 번째 경계 리스트의 출발점이 되도록 하였으며 경로 최적화과정에서 피어싱점들은 다른 정점들에 의해 위치가 바뀌어질 수 있다.

2.2 토치경로 문제의 수식화

임의의 부재 Part $n(1 \leq n \leq N)$ 은 $V(n)$ 개의 정점과 $h(n)$ 개의 내부홀을 가지며, N 개의 부재들이 배치되어진 원소재의 절단공정을 최적화하기 위해 토치경로를 결정하고자 한다. 이때 부재 Part n 에서의 홀 $k(1 \leq k \leq h(n))$ 는 $v(n, k)$ 개의 정점들로 구성

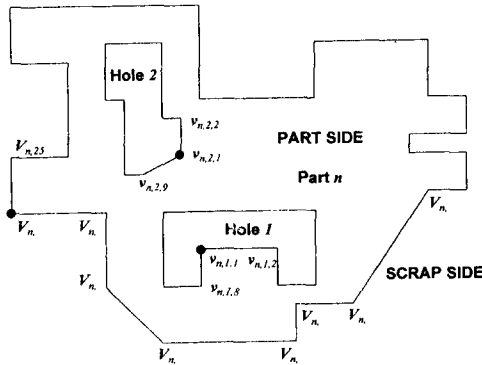


Fig. 4 Definition of irregular part contours

되어져 있다. Fig. 4에서와 같이 V_{ni} 은 Part n 에서의 1번째 정점들, v_{nkm} 은 Part n 의 홀 k 의 m 번째 ($1 \leq m \leq v(n, k)$) 정점들 각각 나타낸다. 모든 피어싱점은 최적화과정중 부재경계의 다른 모든 정점들에 의해 교체되어질 수 있으므로 토치경로 문제에서 고려되어지는 정점의 수는 총 $\Sigma V(n) + \Sigma \Sigma v(n, k)$ 개가 된다. 그러나 $V(n)$ 와 $v(n, k)$ 는 단지 한번만 경우하도록 정의된 폐곡선을 이루고 있는 윤곽들이기 때문에 알고리즘의 최적화과정동안 매 단계에서는 원점에서 출발하여 단지 임의로 선택된 $N + \Sigma h(n)$ 개의 정점들에 대한 경로가 형성된다.

본 논문에서 사용된 가격함수는 토치경로의 총 길이이다. 부재간의 두 피어싱점 n 과 $n+1$ 사이의 경로의 합이 짧을수록 최적의 해에 접근하게 되는데, 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{minimize: } h_{n+1} \cdot PA_{n,n+1} + (1 - h_{n+1}) \cdot PB_{n,n+1}$$

여기서,

$$PA_{n,n+1} = \sum_n \overline{V_{n,1} v_{n+1,1,1}} + \sum_n \sum_k \overline{v_{n+1,k,1} v_{n+1,k+1,1}} + \sum_n \overline{v_{n+1,h(n),1} V_{n+1,1}}$$

$$PB_{n,n+1} = \sum_n \overline{V_{n,1} V_{n+1,1}}$$

Part n 의 최초의 정점 $V_{n,1}$ 은 외부 윤곽의 피어싱점이며, 마찬가지로 $v_{n+1,1,1}$ 은 Part $n+1$ 의 첫 번째 홀의 피어싱점이며, $v_{n+1,k,1}$ 과 $v_{n+1,k+1,1}$ 은 각각 Part $n+1$ 의 k 번째와 $k+1$ 번째의 피어싱점이며, $v_{n+1,h(n),1}$ 은 Part $n+1$ 의 마지막 홀의 피어싱점이며, $V_{n+1,1}$ 은 Part $n+1$ 의 외부 윤곽의 피어싱점이다. Part $n+1$ 의 내부홀이 있을 경우 $h_{n+1}=1$ 이며, 내부홀이 없을 경우 $h_{n+1}=0$ 이 된다. $PA_{n,n+1}$ 은 n

+1번째 부재가 내부홀을 포함할 경우의 총 경로합이 되며, $PB_{n,n+1}$ 은 $n+1$ 번째 부재의 내부홀이 없는 경우의 총 경로합이 된다.

실제의 작업상황에서 볼 때 절단할 판재는 작업 테이블의 평면베드에 놓여있기 때문에 부재를 절단하더라도 절단된 부재가 낙하하지는 않는다. 이 때문에 부재의 내부홀을 외부윤곽보다 나중에 절단하더라도 이론적으로는 문제가 되지 않는다. 그러나 열변형과 이에 따른 부재의 이동문제로 인해 생산라인에서는 일반적으로 내부홀을 외부윤곽 보다 먼저 절단할 것을 추천하고 있다. 본 연구에서도 이러한 경험적인 정보를 최적화 문제의 구속조건으로 채택하여 임의의 부재 Part n 에서 $V(n)$ 개의 정점으로 이루어진 외부윤곽의 절단은 $h(n)$ 개의 내부홀 절단작후 이루어지도록 하였다. Fig. 5는 임의로 선택된 부재의 내부홀에 대한 경로길이를 최소화하도록 피어싱점을 탐색하는 방법에 대해 도시적으로 보여주고 있다. 이때 두 외부윤곽과 하나의 내부홀 사이의 토치경로에 대한 가격함수(cost function)는 정점 $V_{n,1}$ 와 정점 $v_{n+1,1,1}$ 사이의 길이와 정점 $v_{n+1,1,1}$ 과 정점 $V_{n+1,1}$ 사이의 길이의 합이다. 본 연구에서 적용된 부재의 형상은 선분의 끝점이 반시계방향으로 연결된 다각형으로 정의되어 폐곡선을 이루고 있어 한 번의 피어싱으로 하나의 윤곽절단이 이루어지도록 구속되어 있다. 실제 레이저 절단에서도 열영향 빛 작업시간을 최소화하기 위해 피어싱점을 최소화하는 목적으로 이와같은 방법을 이용하고 있다.

이밖에도 현실적으로 고려되어야 할 절단 공정상의 구속조건들이 존재하고 있다. 판재의 최초 피어싱점에서 레이저 빔에 의한 과도한 입열을 방지하기 위해 일반적으로 lead-in 절단을 사용하게 된

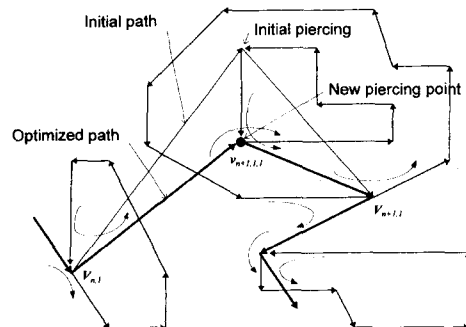


Fig. 5 Illustration of finding the best piercing point to minimize cost

다. 이는 레이저 빔이 부재의 윤곽상의 시작점에서 약간 떨어진 거리에서 피어싱점을 잡아 서서히 재료를 제거하면서 윤곽으로 접근하는 방법이다. 이 밖에도 절단폭(kerf-width)의 위치와 절단품질의 영향을 고려한 레이저 빔의 절단방향을 생각할 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 열영향에 대한 고려는 차후의 연구과제로 하였고 때문에 단지 토치경로의 길이만을 가격함수에 포함시켰다. 따라서 부재의 절단방향은 모두 반시계방향으로 정해져 있다고 가정하였다.

3. SA에 의한 토치경로 알고리즘의 구현

전통적인 반복개선방식의 최적화 알고리즘이 가지고 있는 지역 최소화문제를 극복하기 위해 확률적인 상태전이의 특징을 가지는 SA 알고리즘을 도입하여 토치경로의 전역해를 구하고자 하였으며, 이를 위해 효과적인 이웃해(neighborhood solution)의 생성법과 어닐링 스케줄(annealing schedule)을 적용하였다. SA 알고리즘은 조합최적화 문제에서의 해(solution)를 물리적 시스템에서의 상태(state)에 동치시킨 것이다. 즉, 고체 물리학에서 온도에 따른 자유에너지(free energy)의 확률은 볼츠만(Boltzmann) 분포식에 의해 지배된다는 개념을 SA 알고리즘에서 제어변수(control parameter)에 따른 가격함수와 상관관계로 확장한 것이다.

SA는 초기 제어변수 θ_0 와 임의의 초기 해 X_0 에서 출발하여 매 제어변수 단계에서 새로운 해 X' 를 생성한다. 또한 이때의 가격함수의 변화 $\Delta C = \text{cost}(X') - \text{cost}(X)$ 를 계산하고 새로운 해에 대한 허용여부를 결정하게 된다. 만약 $C < 0$ 이면 확률 1로써 새로운 해를 받아들이며, $C > 0$ 인 경우 새로운 해는 볼츠만 분포의 제한적인 확률로서 허용된다. 이 제한적인 확률은 제어변수 $\theta = \infty$ 에서는 1이며, 제어변수가 $\theta = 0$ 으로 감소함에 따라 확률도 0으로 감소하여 결국에는 수렴하게 된다. 실제 응용에 있어서 SA는 유한한 회수의 상태전이와 제어변수로 인해 각 제어변수 단계에서 평형상태를 만족하면서 최적의 상태로 수렴한다는 보장은 없으나 냉각규칙을 충분히 완만하게 한다면 매우 훌륭한 결과를 얻을 수가 있다. SA 알고리즘의 이론적 배경 및 적용례는 참고문헌⁽¹⁷⁻¹⁹⁾에 자세히 기술되어 있으며, 본 논문에서는 단지 토치경로 문제에 대한 알고리즘의 구현에 관해서 기술하였다.

SA 알고리즘에서 확률적 상태전이(state transitions)는 각 제어변수(θ)에서 준 평형(quasi-equilibrium)상태에 도달할 때까지 계속되며, 이는 알고리즘에서 inner-loop에 의해 구현된다. 또한 제어변수 θ 는 냉각규칙(cooling rule)에 따라 감소되어 종결조건이 만족될 때까지(outer-loop) 반복하게 되어 최종적으로 최소의 가격함수에 따른 최적 경로를 얻게된다. 이러한 작업을 위해 SA 알고리즘은 이웃함수, 가격함수, 평가기준 그리고 어닐링 스케줄 등의 요소를 필요로 한다. 최종해의 질(quality)은 이러한 모든 요소들의 선택에 따라 큰 영향을 받기 때문에 우수한 결과를 얻기 위해서는 문제의 적용대상에 따라 세심한 주의를 요한다. 최적 토치경로 생성을 위해 구현된 SA 알고리즘은 아래와 같다.

```

generate random torch path, X;
while(stopping_criterion(loop_count) < iTEMP
and  $\theta > \epsilon_s$ ) { // outer-loop
while(inner_loop_criterion < nOVER and
nsucc < nLIMIT) { // inner-loop
do a shifted pathing, Xr;
 $\Delta C = \text{cost}(X) - \text{cost}(X_r)$ ;
if ( $\Delta C < 0$  or  $\exp(\Delta C / \theta) > R$ ) accept( $X = X_r$ );
else{
do a reversed pathing, Xr;
 $\Delta C = \text{cost}(X) - \text{cost}(X_r)$ ;
if ( $\Delta C < 0$  or  $\exp(\Delta C / \theta) > R$ ) accept( $X = X_r$ );
}
choose a new piercing point in outer contour, Xp;
 $\Delta C = \text{cost}(X) - \text{cost}(X_p)$ ;
if ( $\Delta C < 0$  or  $\exp(\Delta C / \theta) > R$ ) accept( $X = X_s$ );
choose a new piercing point in inner hole, Xh;
 $\Delta C = \text{cost}(X) - \text{cost}(X_h)$ ;
if ( $\Delta C < 0$  or  $\exp(\Delta C / \theta) > R$ ) accept( $X = X_h$ );
}
}
update  $\theta$ ;
}

```

여기에서 $iTEMP$ 는 어닐링이 수행되는 outer-loop의 최대 반복횟수이며, ϵ_s 는 종결조건을 위한 작은 양의 값을 가지는 상수이며, $nOVER$ 는 각 제어변수에서의 최대 반복횟수이며, $nLIMIT$ 는 각 제어변수에서 해가 평가기준을 만족하는 최대 허용횟수이다. inner-loop의 최대 반복횟수는 $nOVER$ 회이지만 허용되는 새로운 해가 $nLIMIT$ 회 얻어지지 않으면 종결된다. Press 등⁽²⁰⁾은 TSP문제에서 이러한 변수들의 설정에 관한 기준선을 제시하였다. 본 논문에서는 실험에 의해서 $nOVER$ 를 $100N$, $nLIMIT$ 를 $10N$ 으로 설정하였으며, 이때 N 은 절단 부재의 총 개수이다.

이밖에도 Monte Carlo방법에 기반을 둔 SA 알고리즘으로부터 얻은 최종해의 질은 어닐링 스케줄 이외에도 이웃함수와 그의 생성방법에도 크게 영향을 받는다. 본 논문의 토치경로 문제에서 이웃함수는 경로의 한 부분을 재배열함으로써 얻어지는데, 다음과 같은 3가지의 생성방법에 의해 이웃함수를 구성하였다.

(1) 경로의 임의의 한 부분을 선택하여 제거한 다음 동일한 부재에 대해 방향을 반대방향으로 바꾼 다음 다시 삽입하는 방법.

(2) 경로의 임의의 한 부분을 선택하여 제거한 다음 다른 경로중 임의로 선택된 두 부재사이에 삽

입하는 방법.

(3) 부재의 내부홀과 외부윤곽 상에서 피어싱점을 임의로 선택하여 배열하는 방법.

특히 방법 (1)과 (2)는 Lin⁽²¹⁾이 제시한 2-changes 방법으로 TSP문제를 위한 국부탐색(local search) 알고리즘으로 잘 알려져 있는 것으로 참고문헌⁽²²⁾에서도 찾아볼 수 있다. Fig. 6에서 재배열되는 부재는 매 이웃해 생성단계에서 $2 \sim N-2$ 사이의 부재가운데 임의로 k 개 선택하게 된다. 이와 같은 두 가지의 이웃해의 생성방법을 각각 reversed pathing과 shifted pathing이라 부른다.

부재가 배치된 판재 위에서 임의 형상의 부재를 절단하기 위해 토치가 이동하는 동안 조사되는 레이저 빔은 초기에 판재를 피어싱한 다음 재료를 제거하면서 부재의 윤곽으로 접근하게 된다. 토치경로 문제에서 이러한 피어싱점은 바로 TSP문제에서 도시(cities)에 해당한다. 이전의 문헌들에서는 토치경로 문제를 단순화시키기 위해서 피어싱점들을 고정시켰으나, 본 논문에서는 최적화과정에서 모든 피어싱점들은 부재의 윤곽상의 정점들에 의해 바뀌어질 수 있는 완화된 최적화 문제(relaxed optimization problem)로 취급하였다(Fig. 7). SA 알고리즘의 구현에서 가격함수의 계산은 알고리즘의 속도를 증가시키기 위해 매 단계에서 충분만 고

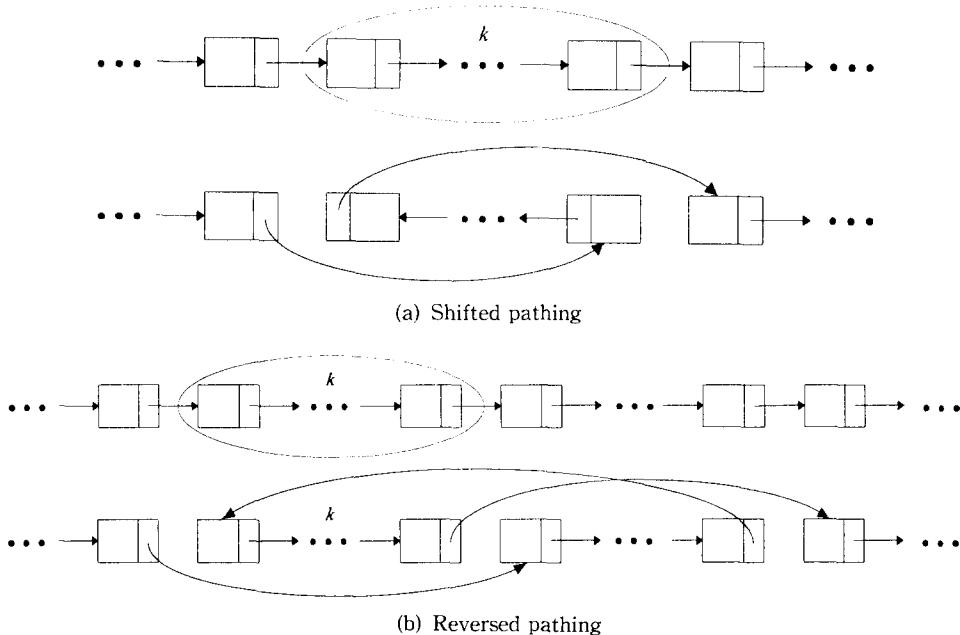


Fig. 6 Cutting path generation mechanism

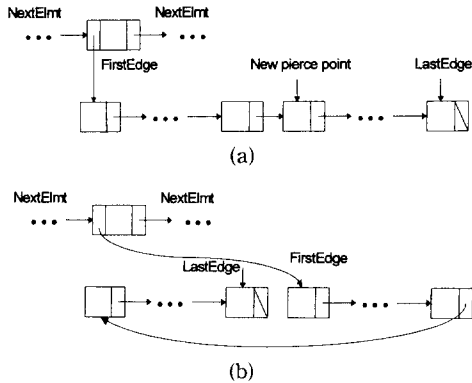


Fig. 7 Rearranging of piercing point

려하였으며, ^(20,22) 새로 얻어진 이웃해의 수용여부는 알고리즘이 진행함에 따라 감소하는 확률함수 (Metropolis 허용기준) ^(15,16)에 의해 주어진다.

일반적으로 최적화 알고리즘은 두 가지의 초기해로부터 출발하게 되는데, 완전히 임의적으로 생성된 초기해이거나 휴리스틱한 방법에 의해 빠르게 생성된 초기해로부터 출발하는 경우이다. 전자의 경우는 유용한 해로 수렴하는데 걸리는 시간이 길다는 단점이 있는 반면에 후자의 경우 알고리즘의 초기단계에서 해에 근접하도록 해 준다는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 SA 알고리즘에서는 제어변수가 초기의 큰 값에서 고전적인 국부탐색 알고리즘과는 달리 대부분의 상태전이 허용되기 때문에 SA 알고리즘은 초기해의 선택에 영향을 크게 받지 않는다는 특징이 있다. 따라서 본 논문에서는 N 개의 부재를 무작위로 배열한 초기해에서부터 알고리즘이 시작하도록 하였다. 원점에서 출발한 토치가 모든 부재를 무작위로 경유하고 다시 원점으로 되돌아오면 하나의 루프가 완성되어 유용한 초기경로를 구성하게 된다.

4. 실험결과

제안된 토치경로 알고리즘은 IBM PC 호환기종에서 C++언어로 구현하였다. Fig. 8은 SA를 이용해 구현한 토치경로 알고리즘의 최적화과정을 보여주고 있다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 초기해는 규칙적으로 배치된 35개의 동일한 부재에 대해 임의적으로 주어진 경로로부터 시작한다. 따라서 초기에 매우 무질서하고 큰 가격함수 값을 가지게 되며, 차츰 최적화과정이 진행함에 따라 Fig. 8(b)와

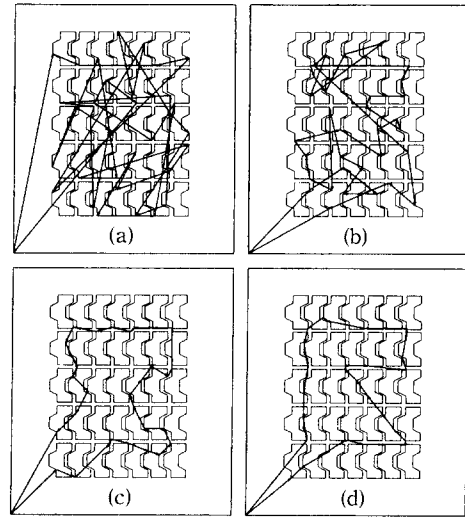


Fig. 8 Intermediate results of SA optimization process with increasing time from (a) to (d)

(c)에서와 같이 질서적으로 배열되면서 경로의 길이가 감소해감을 알 수 있다. Fig. 8(d)는 최종적으로 도달한 최적의 토치경로를 보여준다. 이 문제에 적용한 어닐링 스케줄은 초기 제어변수를 1.5, 각 제어변수 값에서 inner-loop를 $100N$ 회 반복시도, outer-loop에서 제어변수는 $\theta_{i+1} = 0.9 \times \theta_i$ 의 냉각규칙을 따르도록 하였다. 알고리즘은 outer-loop가 $iTEMP$ 에 도달하거나 제어변수가 주어진 ϵ_s 값 이하가 되면 종결한다. 이 값들은 SA 스케줄이 수행되는 반복횟수를 결정하게 되며, 본 연구에서는 $iTEMP$ 과 ϵ_s 를 각각 300과 0.00001로 설정하였다.

제어변수의 감소에 따른 가격함수의 변화가 Fig. 9에 나타나 있다. 제어변수의 변화는 오른쪽에서 왼쪽으로 진행되며, 0에 접근할수록 이웃해의 허용 확률이 감소하기 때문에 가격함수의 최소점으로 수렴해 나감을 볼 수 있다. 알고리즘의 수행 초기부분에서는 가격함수의 증가가 허용되도록 매우 임의적인 경로의 교란이 있는데, 이는 지역해를 탈피하는데 필요한 수단이다. 그러나 어닐링과정이 진행함에 따라 전체 토치경로는 감소하게 되어 마지막에는 경로길이가 전역적인 최소값에 도달한다는 것이 SA 알고리즘의 철학이다. Fig. 10은 내부 홀을 포함하는 부재들에 대한 SA 알고리즘의 또 다른 적용 예를 보여주고 있다. 내부홀을 포함하는 부재의 경우 외부윤곽을 절단하기직전 홀절단이 먼저 수행됨을 볼 수 있다. Fig. 8과 Fig. 10의 경우

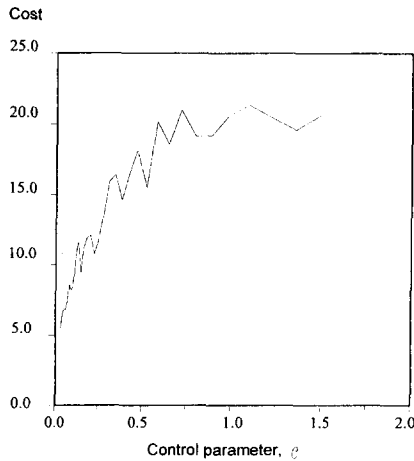


Fig. 9 Optimization curve : cost vs. control parameter of Fig. 8

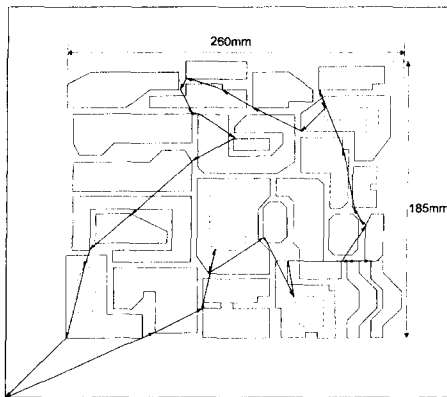


Fig. 10 Example of torch path optimization for irregular parts with holes

IBM Pentium PC/120 MHz에서 수행한 결과 최적 해를 얻기까지 1초미만이 소요되었다. 알고리즘의 수행시간은 가격함수의 계산에 대부분 소요되는데 본 알고리즘에서는 매 단계에서 증분에 대한 가격함수만 고려하였기 때문에 속도를 크게 향상시킬 수가 있었다. 따라서 단순히 경로의 길이만을 최소화하는 본 알고리즘의 속도면에서의 수행능력은 부재의 개수 변동에 따라 그다지 민감하지 않다고 볼 수 있다.

본 연구에서 적용된 부재의 형상이 내부홀을 포함하는 다각형으로 제한되어 있는 것은 현재 연구 진행중인 열영향을 고려한 경로생성 알고리즘을 적용하기 위함이다. 따라서 열영향을 고려하지 않

는 본 알고리즘의 대상으로는 원형 및 자유곡선을 포함하는 임의의 윤곽절단에 대해서도 동일하게 적용가능하다. 차후 연구가 진행된다면 기존의 CAD 시스템과의 인터페이스를 통해 실제 절단문제를 풀기 위한 패키지화도 가능하리라 본다.

5. 결 론

SA 알고리즘을 사용하여 2차원 레이저 절단에서의 토치경로 문제를 풀기 위한 새로운 해법을 제시하였다. 제시된 토치경로 알고리즘은 확률론적인 방법을 채택하고 있기 때문에 기존의 결정론적인 탐색법에 비해 보다 더 전역해에 도달할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 토치경로 문제와 같은 대규모 최적화문제를 효과적으로 해결하기 위해 효율적인 이웃해의 생성방법을 도입 적용하였으며 부재의 절단순서 뿐만 아니라 피어싱점의 위치까지 탐색하는 구속조건을 완화시킨 최적화문제로 모델링 하였다. 홀을 포함하는 불규칙적인 부재의 형상을 표현하기 위해 단순하면서도 계층적인 데이터 구조를 제시하였다. 본 연구를 통해 구현된 알고리즘은 SA 알고리즘 자체가 가지고 있는 뛰어난 이식성과 확장성으로 인해 차후 연계될 열영향을 고려한 경로생성 및 레이저 절단공정의 실질적인 반영에 크게 기여하리라 본다. 따라서 레이저 열원에 의한 판재에서의 열영향에 대한 연구가 시급하며, 이를 고려한 절단경로의 최적화가 이루어지게 되면 더욱 현실적인 토치경로 문제의 해법이 될 것이다. 이렇게 하여 생성된 토치경로는 레이저 절단가공을 위해 CNC 프로그램으로 변환되어 생산성 향상은 물론 생산단가까지 감소시키는데 기여하게 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Laporte, G., 1992, "The Traveling Salesman Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms," *European J. Operations Research*, Vol. 59, pp. 231~247.
- (2) Langevin, A. and Soumis, F., 1990, "Classification of Traveling Salesman Problem Formulations," *Operations Research Letters*, Vol. 9, pp. 127~132.
- (3) Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan., A. H. G.,

- 1975, "Some Simple Applications of the Traveling Salesman Problem," *Operational Research Quarterly*, Vol. 26, No. 4, pp. 717~733.
- (4) Garfinkel, R. S., 1977, "Minimizing Wallpaper Waste, Part 1: A Class of Traveling Salesman Problems," *Operational Research*, Vol. 25, No. 5, pp. 741~751
- (5) Manber, U. and Israni, S., 1984, "Pierce Point Minimization and Optimal Torch Path Determination in Flame Cutting," *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 81~89.
- (6) Raggenbass, A. and Reissner, J., 1989, "Stamping-Laser Combination in Sheet Processing," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 291~294.
- (7) Jackson, S. D. and Mittal, R. O., 1993, "Automatic Generation of 2-Axis Laser Cutter NC Machine Program and Path Planning from CAD," *Computer in Industry*, Vol. 21, pp. 223~231.
- (8) Rutenbar, R. A., 1989, "Simulated Annealing Algorithms: an Overview," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, pp. 19~26.
- (9) Cerny, V., 1985, "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: an Efficient Simulation Algorithm," *J. Opt. Theory and App.*, Vol. 45, No. 1, pp. 41~51.
- (10) Bland, J. A. and Dawson, G. P., 1991, "Tabu Search and Design Optimization," *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 3, pp. 195~201.
- (11) 윤창경, 1993, "유전 알고리즘을 이용한 이동로봇의 충돌회피경로 계획에 관한 연구," 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (12) Hopfield, J. J. and Tank, D. W., 1985, "Neural Computation of Decisions in Optimization Problems," *Biol. Cybern.*, Vol. 52, pp. 141~152.
- (13) Mehmet Ali, M. K. and Kamoun, F., 1993, "Neural Networks for Shortest Path Computation and Routing in Computer Networks," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 4, No. 6, pp. 941~954.
- (14) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., 1983, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671~680.
- (15) 한국찬, 나석주, 1993, "신경회로망을 이용한 직사각형의 최적배치에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, pp. 3063~3072.
- (16) 한국찬, 나석주, 1994, "경계구속 및 내부결함을 고려한 이차원 패턴의 최적배치를 위한 다단계 배치전략," 대한기계학회논문집, 제18권, 제12호, pp. 3236~3245.
- (17) Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N. and Teller, A. H., 1953, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines," *J. Chemical Physics*, Vol. 20, No. 1334, pp. 1087~1092.
- (18) Cerny, V., 1985, "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: an Efficient Simulation Algorithm," *J. Opt. Theory and App.*, Vol. 45, No. 1, pp. 41~51.
- (19) Aarts, E. H. L. and Korst, J. H. M., 1989, *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*, John Wiley, New York, pp. 13~114.
- (20) Press, V., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1990, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York.
- (21) Lin, S., 1965, "Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem," *The Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 44, pp. 2245~2269.
- (22) 조경호, 이건우, 1993, "플림모사기법을 이용한 NC터릿 작업에서의 공구경로 최적화," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1183~1192.