

## 레이저 토치의 절단경로 생성을 위한 혼합형 유전알고리즘

### A Hybrid Genetic Algorithm for Generating Cutting Paths of a Laser Torch

이 문 규, 권 기 범  
(Moon-Kyu Lee and Ki-Bum Kwon)

**Abstract :** The problem of generating torch paths for 2D laser cutting of a stock plate nested with a set of free-formed parts is investigated. The objective is to minimize the total length of the torch path starting from a known depot, then visiting all the given parts, and returning back to the depot. A torch path consists of the depot and piercing points each of which is to be specified for cutting a part. The torch path optimization problem is shown to be formulated as an extended version of the standard travelling salesman problem. To solve the problem, a hybrid genetic algorithm is proposed. In order to improve the speed of evolution convergence, the algorithm employs a genetic algorithm for global search and a combination of an optimization technique and a genetic algorithm for local optimization. Traditional genetic operators developed for continuous optimization problems are used to effectively deal with the continuous nature of piercing point positions. Computational results are provided to illustrate the validity of the proposed algorithm.

**Keywords :** laser cutting, torch path, optimization, hybrid genetic algorithm

#### I. 서론

레이저 절단 가공기(laser cutting machine)란 레이저광에 의해  $10^6\text{-}10^8 \text{ W/cm}^2$ 에 이르는 강력한 에너지 밀도를 가진 고출력의 레이저빔을 짧은 시간에 가공조사부에 집광시켜 절단 가공하는 공작기계이다. 이러한 레이저 절단 가공기에 의한 가공은 고정밀 절단으로 면이 깨끗하게 처리되어 별도의 후처리가 필요 없으며 가공면이 매끄럽고 부재의 변색이 없는 등의 장점 때문에 초정밀도를 요구하는 반도체, 전자, 광통신, 의료분야 등에서 널리 활용되고 있다.

현재 상용화되고 있는 대부분의 레이저 절단 가공기는 컴퓨터가 내장되어 있는 CNC 시스템화되어 있어서 설계로부터 가공까지 전과정의 자동화가 가능하다. 가공의 생산성과 정밀도를 향상시키기 위해서는 CAD 도면으로부터 공정 계획(process planning)을 하고 그에 따라 절단 작업을 하기 위한 가공 토치(torch)의 경로가 결정되면 실제 가공을 위한 NC 프로그램을 생성할 수 있는 CAD/CAM 시스템이 필수적이다. 현재 실용화된 대부분의 레이저 가공기에서는 이러한 CAD/CAM 시스템이 설치되어 있는 PC와 연결되어 있어서 바로 NC 프로그램을 이송 받아 가공작업을 자동으로 실행하고 있다.

CAD/CAM 시스템에서는 절단해야 할 판재의 평면도가 CAD파일 형태로 완성되는데, 이 파일로부터 절단해야 할 판재의 경로는 작업자의 경험적 직관에 전적으로 의존하는 대화식(interactive) 작업으로 결정되거나 또는 소프트웨어 내에 설치된 가공경로 결정루틴에 의하여 자동으로 결정될 수도 있다. 그러나, 대부분의 기존 자동경로 결정루틴들은 절

단 경로결정 문제가 수리적으로 난제에 속하기 때문에, 작업효율의 극대화나 비용 최소화의 관점은 고려하지 않고 CAD 파일을 읽어서 단순히 배치된 순서대로 경로를 결정하는 경우가 일반적이다. 이렇게 결정된 가공경로는 절단시간의 증가, 레이저 열원의 재료비 과다 지출, 작업비용의 증가 등 생산원가를 증가시키는 원인으로 작용한다.

레이저 절단 가공기를 이용하여 절단해야 할 부재들을 소재의 손실을 최소화하도록 겹치지 않게 판재상에 배열하는 2차원 배치 작업을 네스팅(nesting)이라고 한다[1][2]. 네스팅 작업이 완료되면 배치된 부재들을 절단하기 위한 최적의 경로를 결정해야 한다. 여기서 최적의 경로는 레이저 열에 의한 품질 수준의 저하를 방지하면서 동시에 최단의 이동길이를 나타내는 경로를 의미한다. 그러나, 이들을 동시에 고려하는 최적화 문제를 수리적으로 정형화하기도 힘들뿐더러 이에 대한 가능해조차 쉽게 구할 수가 없다. 따라서, 생산 비용에 직접적인 영향을 미치는 이동경로 길이를 최소화하는 경로에 의한 절단작업이 현실적인 대안일 것이므로 대부분의 기존 연구는 이 분야에 국한되어 있다.

최적 토치경로 결정문제는 순회판매원 문제(traveling salesman problem: TSP)를 확장한 것으로 정형화 될 수 있다. TSP는 주어진 모든 방문지점을 한번씩 경유하는 최단경로를 찾는 문제인데, 토치 경로결정 문제에서는 방문지는 부재로, 방문경로는 절단경로로 대응하여 표현될 수 있다[3]. 그러나 토치경로 결정 문제는 부재들의 위치가 한 점이 아니고 그 유파선 상에 어느 곳이든 가능하기 때문에 방문지가 한정된 영역 내에서 가변적이라는 특성 때문에 일반적인 TSP로 쉽게 정형화될 수 없는 최적화 문제 중의 하나이다. 이러한 어려움 때문에 현재까지 토치경로결정 문제에 대한 연구는 매우 미진한 편이다.

Manber and Israni[4]는 동일한 모양이나 불규칙한 모양의 부재들이 배치된 판재에서 이들을 절단하기 위한 시작점(판

논문접수 : 2002. 1. 21., 채택확정 : 2002. 10. 22.

이문규: 계명대학교 기계 · 자동차공학부(moonkyu@kmu.ac.kr)

권기범: 계명대학교 대학원 산업시스템공학전공

(kkb72@zaigen.co.kr)

재상의 한 점으로서 판재를 관통하여 뚫어야 하는 최초의 점)들의 개수를 최소화하는 문제에 대하여 그래프 이론(graph theory)를 이용한 알고리즘을 제시하였다. Raggenbass and Reissner[5]는 CAD도면으로부터 스템핑(stamping)과 레이저 절단가공을 각각 또는 동시에 수행하기 위한 토치 경로를 생성하는 전문가 시스템을 제안하였다. Jackson and Mittal[6]은 주어진 CAD도면으로부터 부재정보를 추출하고 각 부재의 정점(vertex)과 에지(edge) 정보를 이용하여 절단 경로를 생성하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 그러나, 다각형구조인 부재만을 다룰 수 있는 단순화된 알고리즘이어서 곡선을 포함하는 불규칙한 형상으로 이루어진 일반적인 부재들의 절단가공에는 적용하기가 어렵다. 다각형 부재의 절단순서와 각 부재의 시작점의 위치를 동시에 결정할 수 있는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing: SA)을 기반으로 한 토치경로 알고리즘이 한국찬과 나석주[3]에 의하여 제시되었다. 제시된 알고리즘은 대규모 토치경로 문제에 대한 효과적인 해를 생성할 수 있으나 다각형 모양의 부재만을 대상으로 하고 있고 시작점도 각 부재의 정점으로 제한되어 있어서 얻어지는 경로가 최적 경로에서 벗어날 가능성이 많고 불규칙한 형상의 부재를 다루기가 힘들다는 단점이 있다.

한편, 레이저 가공에 관련된 여러 가지 모수, 즉, 절단 윤곽선의 형상, 속도, 레이저빔의 주사 밀도 등과 절단부위의 형상 및 특성과의 관계를 추정하는 수리적 모형을 제시한 연구[7]와 같이 레이저 가공 공정에 관한 공학적 특성을 규명하려는 일련의 연구도 진행되어 왔다[8][9]. 이러한 연구들은 향후 이동경로를 최소화함으로써 생산비용을 절감함과 아울러 가공 품질을 향상시키기 위한 모수들의 최적화를 함께 고려하는 연구에 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는  $N$ 개의 불규칙적인 형상을 한 부재들이 배치되어 있는 2차원 판재를 절단하기 위한 토치 경로의 길이를 최소화하는 문제를 다루고 있다. 이를 위해 조합최적화 문제에 효과적으로 적용되고 있는 유전 알고리즘을 기반으로 하는 토치경로 생성을 위한 혼합형 유전알고리즘(A Hybrid Genetic Algorithm for Generating Torch Paths: HYGATOP)을 제안하고자 한다. 본 연구의 결과로 개발된 알고리즘은 레이저 절단의 자동화 및 최적화를 위한 CAD/CAM 시스템에서 핵심적으로 사용되고 있는 토치경로 자동화 루틴의 성능향상에 크게 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 레이저 토치경로 결정을 위한 최적화 모형

본 연구의 대상이 되는 문제는 “하나의 판재상에서 폐곡선으로 이루어진  $N$ 개의 부재가 배치되어 있을 때, 레이저 토치가 하나의 출발점에서 시작하여 이들을 모두 절단하기 위한 총 이동길이를 최소화하는 경로를 구하는 것”으로 정의된다. 그림 1에서는 레이저 가공대상의 부재들이 배치된 대표적인 판재가 하나의 가능 절단경로(feasible cutting path)와 함께 도시되어 있다. 보다 일반적인 레이저 토치 경로 설정 문제는 폐곡선의 일차 부재내에 다수의 구멍이나 폐곡선으로 이루어진 이차 부재들이 존재하는 판재를 절단하

는 경우일 것이다. 이와 같은 일반적인 부재의 경로 결정문제는 계층적으로 접근해야 하는 난해한 비선형 최적화 문제 중의 하나이다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대한 시스템적 접근을 위하여 일차 부재들의 윤곽선만을 가공하는 단순화된 문제를 다루기로 한다. 그 이유는 일차부재들을 최적으로 가공하는 경로를 구할 수 있는 알고리즘이 개발되면 하나의 일차 부재내에 있는 이차 부재들을 가공하기 위한 최적 경로도 역시 동일한 알고리즘을 응용하여 구할 수 있기 때문이다.

일차 부재의 최적 경로는 그 윤곽선상에 있는 임의의 한 점을 지나게 되는데 이 점을 시작점으로 하여 폐곡선에 따라 한바퀴 돌아오면 절단이 이루어진다. 이러한 과정을 모든 부재에 대하여 반복 수행하게 되면 총 절단경로는 각 부재의 윤곽선의 길이와 부재간의 이동거리의 합으로 표현된다. 이때 부재들의 윤곽선 길이는 부재의 모양이 주어지면 고정된 값이기 때문에 결국 최적경로는 부재간의 이동거리의 합을 최소화하는 문제가 된다. 이러한 문제는 전형적인 경로최적화 문제인 TSP를 확장한 모형으로 표현될 수 있다. 즉 일반적인 TSP에서는 방문해야 할 지점의 위치가 고정되어 있으나, 토치경로 설정문제에서는 방문 대상인 부재들은 정해진 반면 그 위치가 윤곽선 상의 한 점으로서 가변적이라는 것이다. 이 문제에 대한 하나의 가능해(feasible solution)는 부재들의 경로와 각 부재를 절단하기 위한 절단 시작점(piercing points)들로 정의된다. 따라서 토치경로 결정 문제는 이러한 방문 위치의 가변성을 고려하여 일반적인 TSP를 확장한 형태로서 정형화될 수 있다.

그림 2에서는 부재  $i$  ( $i=1, \dots, N$ )의 윤곽선 상에 있는 한 점을 수리적으로 용이하게 정의할 수 있게 하는 특징점들인  $V_{ik}$  ( $k=1, \dots, n(i)$ )가 도시된 예를 보여주고 있다(여기서,  $n(i)$ 는 부재  $i$ 의 특징점들의 총수를 의미함). 이러한 특징점들은 직선이나 원의 일부분인 아크와 같이 수학적으로 알려진 곡선의 경우에는 양끝점으로 정의된다. 기타 곡선부분은 일련의 부분곡선으로 나뉘어서 근사화한다. 각 부분곡선은 시작점과 종점을 포함한 조정점(control point)들을 이용하여 베지어(Bezier) 곡선이나 스플라인(spline) 등의 자유

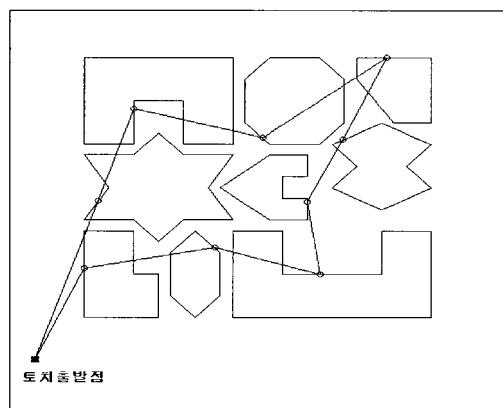


그림 1. 절단가공대상인 9개의 이형부재가 배치된 판재의 예.

Fig. 1. An example layout of plate from which 9 different parts are cut.

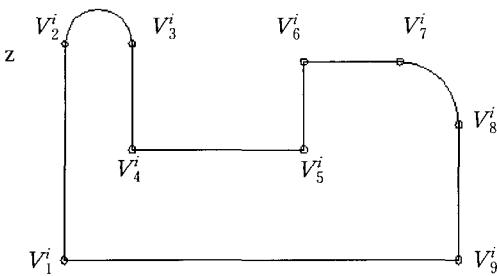


그림 2. 윤곽선상에 특징점들이 도시된 부재의 예.

Fig. 2. An example part with feature points.

곡선(free curve) [10]으로 표현하고 이 시작점과 종점을 특징점으로 정의한다. 이러한 자유곡선들은 시점과 종점사이를 0과 1사이의 값을 갖는 매개변수로 표현할 수 있기 때문에 곡선상의 임의의 한 점을 매개변수 값으로 정의할 수 있는 편리함을 이용할 수 있다.

우선,  $\lambda_k^i$ 를  $V_1^i$ 부터  $V_k^i$ 까지의 윤곽선 길이를 부재 i의 총윤곽선 길이  $L_i$ 로 나눈 값으로 정의하자. 또한,  $\mu_i$ 를 부재 i의 윤곽선상의 한 점인 절단시작점을 나타내는 변수로서  $V_1^i$ 에서의  $\mu_i=0$ 이고,  $V_{n(i)}^i$  점을 지나서 다시  $V_1^i$ 에 도달했을 때의  $\mu_i$ 는 1로 정의한다. 그러면, 윤곽선상의 임의의 한 점의 위치  $p_i = (x_i, y_i)$ 는 직선구간의 경우,

$$p_i(\mu_i) = \frac{[(\mu_i - \lambda_k^i)V_{k+1}^i + (\lambda_{k+1}^i - \mu_i)V_k^i]}{\lambda_{k+1}^i - \lambda_k^i},$$

if  $\lambda_k^i \leq \mu_i < \lambda_{k+1}^i$  (단,  $V_{k+1}^i = V_1^i$ , if  $k = n(i)$ ) 로 표현된다. 직선이외의 구간에 속하는 한 점의 위치는 역시 유사한 방법으로 특징점이나 조정점을 이용하여 변수  $\mu_i$ 의 함수로 표현될 수 있다. 이를 이용하면 토치경로 결정문제는 방문지의 위치가 가변적이라는 점을 변수  $\mu_i$ 로 표현할 수 있게 되므로 다음과 같이 확장된 TSP로 정형화된다:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij}(\mu_i, \mu_j) \cdot w_{ij} \quad (2-1)$$

$$\text{s.t } \sum_{i=1}^N w_{ij} = 1 \quad j=1, \dots, N \quad (2-2)$$

$$\sum_{j=1}^N w_{ij} = 1 \quad i=1, \dots, N \quad (2-3)$$

$$d_{ij}(\mu_i, \mu_j) = \|p_i(\mu_i) - p_j(\mu_j)\| \quad (2-4)$$

$$0 \leq \mu_i \leq 1 \quad \forall i \quad (2-5)$$

$$t_i - t_j + Nw_{ij} \leq N-1 \quad (1 \leq i \neq j \leq N) \quad (2-6)$$

$$w_{ij} = 0 \quad \text{or} \quad 1 \quad \forall i, j \quad (2-7)$$

$$t_i = \text{실수} \quad \forall i \quad (2-8)$$

여기서,  $d_{ij}(\mu_i, \mu_j)$ 는 부재 i와 j사이의 이동길이이고  $\mu_i, \mu_j, w_{ij}$ 는 결정변수이다.  $w_{ij}$ 는 부재 i와 j가 인접되어 있는

경우에는 1이고 그렇지 않으면 0으로 정의된다. (2-1)은 목적함수로서 총 경로의 길이를 의미한다. (2-4)는 직선거리로 표현되는 두 부재사이의 이동길이를 나타내고 있고, (2-5)는 변수  $\mu_i$ 의 범위에 대한 제약조건이다. 이 모형에서 모든  $\mu_i$ 들의 값이 정해졌을 때는 두 부재 사이의 길이  $d_{ij}$ 가 상수 이므로 제약조건식 (2-2), (2-3), (2-6), (2-7), (2-8)과 목적함수 Z로 정형화되는 일반 TSP가 된다. 이 수리모형은 비선형 최적화 문제로서 기존의 소규모의 문제의 경우에도 비선형코드를 사용하여 최적해를 구하기가 매우 어렵다. 이에 따라, 본 연구에서는 대규모의 문제의 경우에도 우수한 해를 생성해 낼 수 있는 유전알고리즘 기반의 발견적 기법을 제안하고자 한다.

### III. 토치경로 결정을 위한 혼합형 유전알고리즘

#### 1. 혼합형 유전알고리즘의 개요

자연계의 진화원리를 모방한 유전 알고리즘은 문제 공간 탐색능력을 뛰어나지만 일단 수렴된 해에 대해 그 주변을 정밀하게 탐색할 지역적 탐색능력이 부족하다. 정도의 차이는 있지만 교차와 돌연변이 연산이 임의적으로 이루어지므로 지역 최적점 근처에서의 미세조정 능력이 떨어지기 때문이다. 이를 보완하기 위해 교차와 돌연변이로 만들어진 해에 지역 최적화 알고리즘을 적용하는데 이를 혼합형 유전 알고리즘이라고 한다. 이렇게 하면 교차와 돌연변이는 해를 전역적으로 탐색하여 지역 최적점 근처에 갖다 놓는 역할을 하고 지역 최적화 알고리즘은 해를 지역 최적점으로 안내한다.

이러한 특성을 지닌 혼합형 유전알고리즘은 그동안 여러 분야에서 응용되어 왔다. 그 중에서 Memetic 알고리즘은 Moscato and Norman[11]이 제시한 것으로서 부모 염색체(parent chromosome)로부터 생성된 자손 염색체(offspring chromosome)를 곧바로 다음 세대에 유전하지 않고 그 자체를 지역최적화 탐색하여 유전하면 해공간(solution space)의 광역탐색을 효과적으로 수행할 수 있다는 것이다. 따라서, 지역최적화 탐색을 위해서 유전알고리즘 대신에 이전에 개발된 효과적인 발견적해법이나 최적화해법을 사용하는 기법이다. 순서화(sequencing)문제중 P//Lmax문제를 해결하기 위하여, 광역최적화를 위한 탐색에서는 유전알고리즘을 사용하고 지역최적화 탐색은 잘 알려진 V-shaped 순서화기법을 이용한 것이 대표적인 예이다[12]. 최근에는 친테이너 속에 적재물의 최적배치에 관한 분야[13]와 기계들의 작업스케줄링 문제[14][15]에 적용된 결과가 발표된 바 있다.

#### 2. 지역최적화

토치의 절단 경로결정 문제는 2장에 기술한 바와 같이 절단시작점 위치의 가변성으로 인하여 각 부재의 절단 시작점 위치와 주어진 부재들을 모두 절단하기 위한 경로를 동시에 최적화하기가 어렵다는 특성이 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해서 각 부재의 절단시작점의 위치를 임의로 생성하고 이들로부터 최적해를 찾기 위한 전반적인 절차는 전술한 유전알고리즘의 틀을 따르고 있다. 한편, 임의로 생성된 절단시작점들의 위치 자료를 이용하여 절단 경로를 최적화하고, 또한 역으로 주어진 경로 하에서 각 부재에 대

한 절단시작점 위치를 최적화하는 지역최적화 과정을 각기 문제의 특성에 적합한 최적화 기법이나 발견적 알고리즘을 사용한다.

### 2.1. 경로 최적화

모든 부재들의 유판선상에 있는 절단시작점이 주어지면 방문지의 위치가 확정되어 있는 경로결정문제가 되므로 전형적인 TSP로 정형화될 수 있다. 이렇게 정형화된 TSP의 해를 구하기 위한 경로 최적화는 문제 크기가 작을 경우( $N \leq 12$ )에는 동적계획법[16] 등과 같은 최적화 알고리즘을 사용하고 그 이상 규모의 경우에는  $r$ 개의 링크 교환법[17] 등과 같은 기준에 개발된 여러 가지 발견적 기법을 활용할 수 있다.

### 2.2. 위치 최적화

경로최적화에서는 모든 부재의 절단 시작점 위치가 미리 정해져 있을 때, 주어진 모든 부재들을 절단하기 위한 효과적인 절단순서를 구하게 된다. 반면에, 위치최적화에서는 각 부재의 절단 시작점 위치는 정해져 있지 않으나 모든 부재들의 절단순서가 주어졌을 때, 각 부재에 대한 최적의 절단 시작점을 구하고자 한다. 예로서, 그림 1에서 보면 임의의 절단 시작점을 가진 9개의 부재에 대한 절단 경로가 도시되어 있는데 이 절단 시작점들은 주어진 경로에 대한 최적의 위치가 아니다. 그러므로 토치의 전체 이동 거리를 최소화하는 절단 시작점들의 최적 위치를 구해야 한다. 그림 4에는 거의 최적이라고 여겨지는 절단시작점들을 지나가는 토치의 절단경로가 도시되어 있다.

이러한 위치최적화 문제는 그의 효과적인 해법이 아직까지 발표된 바 없는 어려운 최적화 문제 중의 하나이다. 여기서는 위치최적화를 위하여 다음에 기술하는 HYGATOP 유전알고리즘에서 지역최적화 과정을 제외한 절차를 그대로 사용한다. 즉, HYGATOP에 포함된 지역최적화 과정인 경로 최적화와 위치 최적화를 수행하지 않지만 해의 표현방법, 유전연산자, 자손세대 생성 방법, 종료조건 등과 전체적인 절차는 HYGATOP과 동일하다는 것이다. 따라서, 단계 1의 모집단 생성 부분은 경로가 이미 고정되어 있기 때문에 단순히 절단시작점들의 위치가 다른 해들을 생성하는 작업이 된다. 단계 6의 경우에는 위치최적화를 수행하지 않고 단지 적합도만을 계산하는 과정으로 단순화된다.

## 3. HYGATOP(Hybrid Genetic Algorithm for Generating Torch Paths)

### 3.1. 표현방법

유전알고리즘을 적용하기 위해서는 문제의 해가 개체표시자인 염색체로 적절하게 표현되어야 하며 이는 유전알고리즘의 탐색 성능과 확장성에 있어서 중대한 영향을 미친다. 본 연구에 있어서는 앞의 2장에서 기술한바와 같이 각 부재의 유판선상 위치를 특정 기점을 기준으로 하여  $\mu_i$  ( $0 \leq \mu_i \leq 1$ )로 나타낼 수 있으므로, 하나의 개체는  $P = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ 로 표현할 수 있다.

### 3.2 유전연산자

#### 3.2.1 교차변이(crossover)

본 연구에서는 이산변수가 아닌 연속적인 값을 갖는 인자로 표현되는 염색체의 교차변이에 많이 사용되는 비일양

성 수리교차변이법을 사용한다[18]. 교차연산을 수행할 2개의 부모개체  $P1, P2$ 가

$$P1 = (\mu_{11}, \mu_{12}, \dots, \mu_{1N})$$

$$P2 = (\mu_{21}, \mu_{22}, \dots, \mu_{2N})$$

으로 표현될 때, 교차변이를 위해 선택될 인자쌍이  $\mu_{1k}, \mu_{2k}$ 라면 교차변이에 의해 만들어질 새로운 인자  $\mu_{1k}^*, \mu_{2k}^*$ 는 다음과 같이 표현된다:

$$\mu_{1k}^* = a \cdot \mu_{1k} + \beta \cdot \mu_{2k}$$

$$\mu_{2k}^* = \beta \cdot \mu_{1k} + a \cdot \mu_{2k}$$

여기서  $a$ 는 0에서 1사이에서 임의로 발생된 난수이고  $\beta = (1-a)$ 이다. 이렇게 생성된  $\mu_{1k}^*, \mu_{2k}^*$ 를 원 부모개체의  $\mu_{1k}, \mu_{2k}$ 와 교체시키면 아래와 같은 새로운 자손개체  $P1^*, P2^*$ 가 생성된다:

$$P1^* = (\mu_{11}, \mu_{12}, \dots, \mu_{1k}^*, \dots, \mu_{1N})$$

$$P2^* = (\mu_{21}, \mu_{22}, \dots, \mu_{2k}^*, \dots, \mu_{2N})$$

#### 3.2.2. 돌연변이(mutation)

돌연변이는 임의로 하나의 인자를 선택한 후 이를 0과 1 사이의 새로운 난수로 교체한다. 예로서, 부모개체  $P = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k, \dots, \mu_N)$ 으로부터  $\mu_k$ 가 선택되면 새로운 자손개체( $O^*$ )는 다음과 같이 생성된다:

$$O^* = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k^*, \dots, \mu_N)$$

### 3.3. 알고리즘

기술상 편의를 위하여 다음의 용어를 사용한다:

$$p(t) = \text{세대 } t (= 0, 1, \dots, T) \text{의 모집단};$$

$$N_p = \text{모집단의 개체 수};$$

$$C(t) = \text{모집단 } p(t-1) \text{로부터 생성된 세대 } t \text{의 자손집단};$$

$$G = \text{세대차(generation gap)} (0 < G < 1);$$

$$a = \text{모집단 대비 교차변이율}$$

$$(\text{crossover rate}, 0 \leq a \leq 1).$$

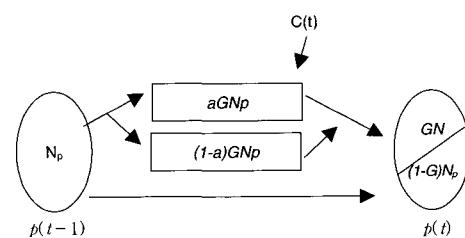


그림 3. 모집단  $p(t-1)$ 에서 다음세대의 모집단  $p(t)$ 를 생성하는 과정.

Fig. 3. The process of generating the next generation population.

그림 3에서는 본 연구에서 설정한 모집단으로부터 자손집단이 생성되는 과정을 도시하고 있다. 모집단의  $(1-G)$  만큼을 자손에게 그대로 유전하고  $100G$ 는 교차변이( $100\alpha$ )와 돌연변이( $1-\alpha$ )를 거쳐 새로이 생성된 개체들을 자손집단에 투입시키는 것으로 가정한다.

이상의 상황을 고려한 혼합형 유전알고리즘인 HYGATOP의 절차는 다음과 같다:

단계 1 :  $t=0; (\mu_i, i=1, \dots, N)$ 으로 정의되는 하나의 개체를 임의로 생성하여 경로최적화를 수행한 다음 구해진 경로가 기존의 개체와 다를 경우, 그 경로하에서 다시 위치최적화를 수행하여 적합도를 평가함; 이렇게 하여 총  $Np$ 개의 서로 다른 경로를 갖는 개체를 생성함.

단계 2 :  $t=t+1; p(t) = C(t) = \phi$ .

단계 3 :  $p(t-1)$ 에서 가장 우수한 개체를 포함하여  $(1-G)Np$ 개의 개체를 중복시키지 않게 선택하여  $p(t)$ 에 그대로 유전시킴.

단계 4 :  $p(t-1)$ 에 포함된 개체 중 임의로 2개를 선택하여 교차변이와 경로최적화에 의하여 하나의 자손개체를 생성하는데 이 자손개체가  $p(t)$ 에 속한 기존 개체와 서로 상이한 경로를 가지면  $C(t)$ 에 추가함. 이 과정을 반복적으로 적용하여 모두  $\alpha G Np$ 개의 서로 다른 경로를 갖는 자손개체를 만들어서  $C(t)$ 에 추가함.

단계 5 :  $p(t-1)$ 에서 하나의 개체를 임의로 선택하여 돌연변이와 경로최적화에 의하여 모두  $(1-\alpha) Np$ 개의 서로 다른 경로를 갖는 자손개체를 생성하여  $C(t)$ 에 추가함.

단계 6 :  $C(t)$ 에 속한 모든 개체들에 대하여 위치 최적화를 수행함;  $p(t) = p(t) \cup C(t)$ ;  $t \geq T$ 이면 종료하여  $p(t)$  내의 가장 우수한 개체를 최종해로 선택하고, 그렇지 않으면 단계2부터 반복 수행함.

#### IV. 컴퓨터 실험

제3장에서 토치경로 생성에 대한 혼합형 알고리즘을 제시하였다. 그런데, 혼합형 유전알고리즘을 실제 문제에 적용하기 위해서는 적합한 유전조정변수 값을 알아야 한다. 여기서는 조정변수인  $T$ ,  $Np$ ,  $\alpha$  및  $\beta$ 의 값의 변화와 특성을 파악하고 알고리즘의 성능평가를 수행한다.

##### 1. 유전조정변수(Genetic parameter)값 결정

본 연구에서는 컴퓨터 실험을 위하여 그림 1에 주어진 2차원 판재를 절단하기 위한 토치경로 결정문제를 다루었다. 이 문제에 대하여  $Np=20$ ,  $\alpha=0.5$ ,  $G=0.3$ ,  $T=200$ 의 조건하에 개발된 HYGATOP을 적용한 결과, 그림 4에 도시된 경로를 얻게 되었는데 총 이동길이는 37.23로 나타났다. 그런데 다양한 실험 조건하에서 수행된 다수의 실험 결과 이 값이 최적해에 가까운 것으로 판단되어 다음의 실험에서는 이를 종료조건의 기준으로 하였다.

##### 1.1. 종료조건 및 모집단의 크기 변화

종료조건 및 모집단의 크기변화에 따른 HYGATOP의 성능추이를 알아보기 위하여  $\alpha=0.5$ ,  $G=0.3$ ,  $T=200$ 으로 고정하고  $Np$ 값을 3, 5, 10, 15, 20의 각각 경우에 대하여 실험을

하였다. 이 결과, 예상과 같이 그림 5에서 보는 것처럼 모집단의 크기와 세대수가 증가할수록 적합도가 향상되는 경향을 나타내고 있다. 이는  $Np$ 값이나 세대수의 증가로 인하여 탐색공간의 범위가 커지게 되므로 최적해에 도달할 기회가 증가되기 때문으로 해석된다. 그런데,  $Np$ 값이 증가함에 따라, 최적해에 수렴하는 속도가 현저하게 빨라지고 있으므로 세대수를 줄이기 위해서는  $Np$ 값을 크게 설정하는 것이 바람직하다. 그러나,  $Np$ 값을 크게 하면 한세대의 모집단에 속한 모든 개체들을 평가하기 위한 소요 시간이 증가하게 되므로 계산소요시간의 관점에서 상쇄효과를 고려해야 할 것이다.

실험결과를 보면  $Np=20$ 일 때는 많은 계산시간을 요구하지 않으면서 첫 세대에서 바로 기준 적합도에 도달하는 것으로 나타나고 있기 때문에 이러한  $Np$ 값을 사용하고, 아울러 최대 세대수  $T$ 는 100 정도로 하여도 충분한 것으로 판단된다.

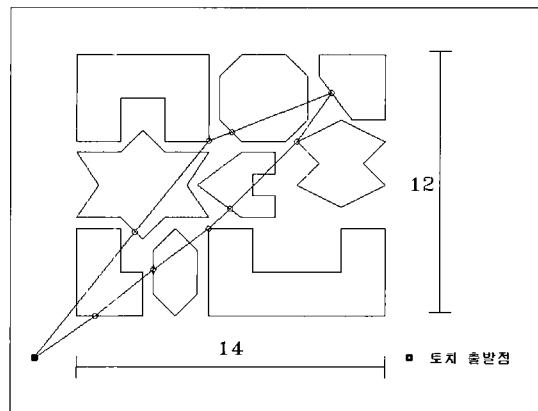


그림 4. 그림 1에 주어진 판재에 대하여 HYGATOP을 적용하여 구한 토치 경로.

Fig. 4. A torch traveling path obtained by using HYGATOP for the example given in Fig. 1.

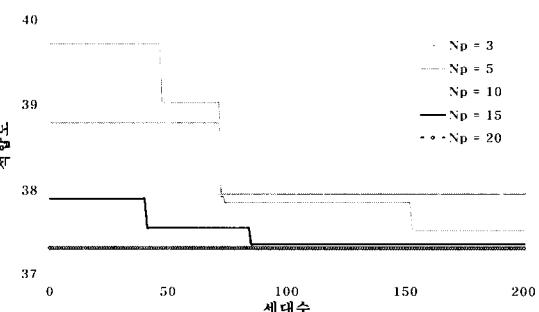


그림 5.  $Np$ 값의 변화에 따른 HYGATOP 해의 적합도 변화.

Fig. 5. Fitness values of the HYGATOP solutions obtained for different  $Np$  values.

##### 1.2. 교차변이율의 변화

여기서는 교차변이율( $\alpha$ )의 변화에 따른 민감도 분석을 위하여,  $Np=20$ ,  $T=100$ 의 상태에서  $\alpha$ 를 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9의 각 경우에 대하여 실험하였다. 실험 결과, 그림 6에서 보듯이 교차변이율의 적합도는 초기값이나 최종해의 변화는

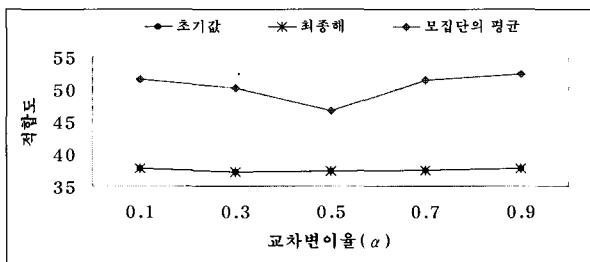
그림 6.  $\alpha$ 의 변화에 따른 HYGATOP 해의 적합도 추이.

Fig. 6. Fitness values of the HYGATOP solutions obtained for different  $\alpha$  values.

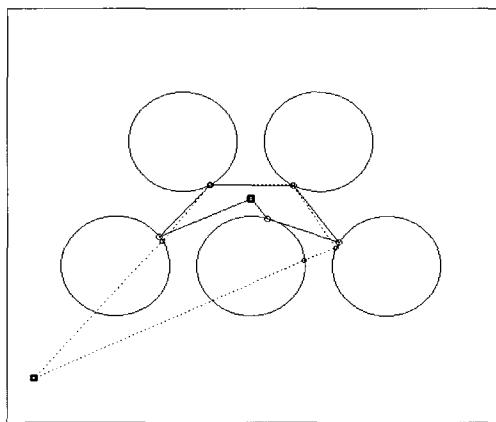


그림 7. 5개의 원이 배치된 판재의 토치 경로.

Fig. 7. Obtained torch traveling paths for the plate with 5 circular blanks.

거의 없다. 그러나 모집단의 평균값은 0.1에서 0.5까지는 감소하나 0.7이상에서는 모집단의 평균값이 증가하고 있다. 특히,  $\alpha$ 가 0.5일 때는 초기값과 모집단의 평균값이 편차가 가장 적으므로 부모의 우수한 유전 형질을 잘 유지할 수 있다고 판단된다.

## 2. HYGATOP의 성능평가

앞 절에서 전술한 바와 같이 HYGATOP은 서로 다른 형상을 가진 부재들을 다룰 수 있으므로 이에 대한 성능을 평가하기 위해서 그림 7에서 보는 것처럼 다각형이 아닌 원형상을 한 부재들이 배치된 문제에 적용하여 보았다. 그리고, 토치 출발점에 따른 영향을 살펴보기 위하여 부재외부와 부재사이에 있는 임의의 2곳의 출발점을 고려하였다.

그림 7의 점선은 부재외부에 있는 한점을 출발점으로 하여 생성된 절단경로이고, 실선은 부재사이의 한 점에서 출발할 경우 생성된 경로를 보여주고 있다. 이로부터 출발점의 위치에 상관없이 HYGATOP은 원의 형상을 가진 부재에서도 우수한 해를 생성함을 알 수 있다.

지금까지는 실현대상 문제 규모가 작기 때문에 경로최적화를 위하여 TSP에 대한 최적해를 보장하는 동적계획법[16]을 사용하였다. 그러나, 문제의 규모가 커지면 계산시간과 컴퓨터 기억용량의 제한 때문에 최적해를 구하기가 어렵다. 이 때문에 발견적 방법을 사용할 수밖에 없다. 본 연구에서는 끝으로 이와 같이 대규모 문제를 검토하였는데 그것은 한국찬과 나석주[3]가 다룬 문제(그림 8)이다.

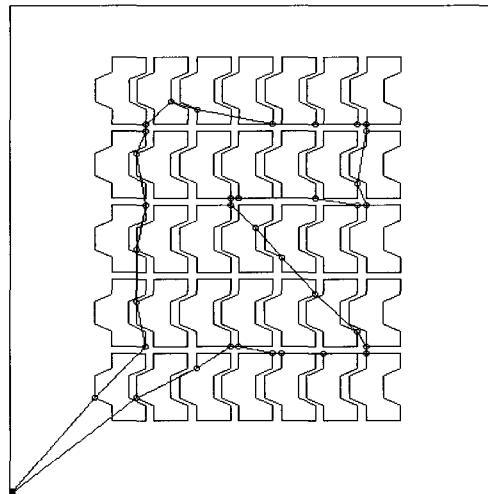


그림 8. 한국찬과 나석주[3]의 SA기법에 의하여 구한 최종 경로.

Fig. 8. The final torch path obtained by using the SA technique[3].

동 연구에서는 다각형 모양의 부재에 대해서 절단시 정점만을 지난다는 가정에 바탕을 둔 SA기법을 제안하였다. 그림 8에서는 한국찬과 나석주가 SA에 의하여 구한 최종 경로가 도시되어 있는데 총 이동길이는 186.97이다. 동일한 문제에 대하여, 한국찬과 나석주가 구한 절단경로를 그대로 유지한 채 HYGATOP의 위치최적화만을 수행한 결과를 그림9에 도시하였는데 총 이동길이는 183.01로 나타났다.

이러한 이동길이의 절감효과는 부재들의 정점만을 고려하는 것이 아니라 윤곽선상의 모든 점을 고려하여 경로를 생성하였기에 나타난 것이다. 같은 문제에 대하여 그림 10에 도시된 경로하에서  $Np=20$ ,  $T=100$ ,  $\alpha = 0.5$ 인 조건에서 HYGATOP을 적용한 결과, 그림에서 보는 바와 같이 총 이동길이가 179.83로 나타났다. 이것은 HYGATOP을 적용할 때 경로최적화를 수행하지 않았음에도 불구하고 한국찬과 나석주가 제시한 SA에 의한 결과보다는 상대적으로 훨씬 우수한 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 레이저 절단해야 할 부재들이 판재에 2차원으로 배열되는 네스팅 작업이 완료된 후, 이를 절단하기 위한 토치의 경로결정 문제를 다루었다. 이러한 문제는 TSP를 확장한 최적화 모형으로 정형화될 수 있음을 보였고, 다양한 조합최적화 문제에 많이 활용되어 왔던 유전 알고리즘을 바탕으로 한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘인 HYGATOP은 전역적인 탐색에는 유전알고리즘을 사용하고 지역적인 해 공간의 탐색에는 발견적 기법이나 알려진 최적화 기법을 활용하여 해공간의 탐색을 효과적으로 수행할 수 있는 혼합형 유전 알고리즘이다. 개발된 혼합형 유전알고리즘은 컴퓨터 실험 결과 부재가 규칙적인 형상은 물론 원과 같이 다각형이 아닌 형상이 포함된 경우에도 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었고, 부재가 많이 있는 대규모의 절단 문제에도 타 기법에 비하여 우수한 성

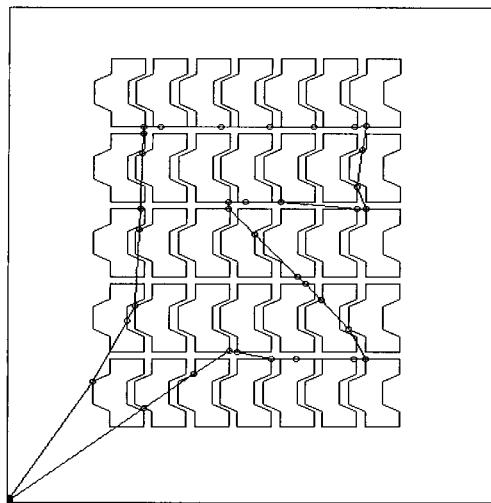


그림 9. 한국찬과 나석주[3]의 문제에 대하여 HYGATOP에 의한 위치최적화 수행후의 최종경로.

Fig. 9. The torch path for the problem in ref. [3] refined by using the location-optimization routine of HYGATOP.

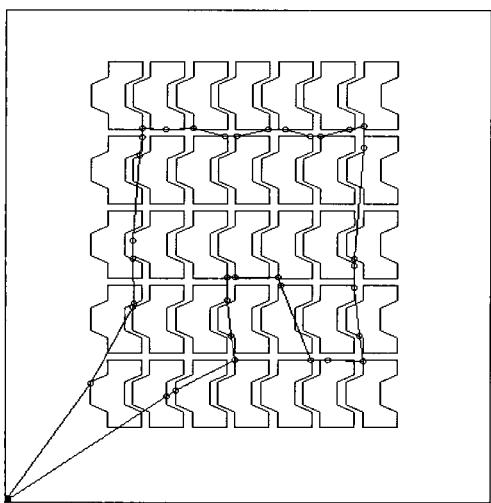


그림 10. HYGATOP에 의하여 구한 최종해.

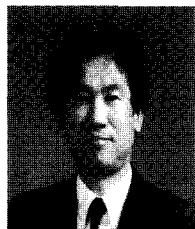
Fig. 10. The final torch path obtained by using HYGATOP.

능을 나타내었다. 따라서, 현재 상용화된 레이저 절단가공기에 설치된 CAD/CAM시스템의 토치경로 자동화 루틴의 성능을 향상시키는 데 이 알고리즘을 사용할 수 있을 것이고, 이렇게 되면 절단경로를 최적화하여 가공시간의 단축, 레이저 열원의 비용 절감 등에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

향후에는 알고리즘의 실용성을 제고하기 위하여 본 연구 결과를 확장하여 일차 부재내에 있는 이차 부재들의 절단경로까지를 한꺼번에 고려하여 최적화하는 알고리즘을 개발하는 연구가 필요할 것이다.

#### 참고문헌

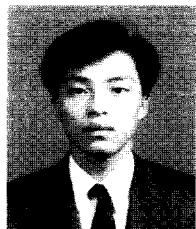
- [1] 한국찬, 나석주, "레이저 절단 공정에서 절단부재의 최적배치를 위한 네스팅 알고리즘," 대한용접학회지, 제 12 권 제 2 호, pp. 11-19, 1994.
- [2] A. R. Babu and N. R. Babu, "A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, No. 12, pp. 879-891, 2001.
- [3] 한국찬, 나석주, "레이저 절단 공정에서의 토치경로 생성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 6호, pp. 1827-1835, 1996.
- [4] U. Manber and S. Israhi, "Pierce point minimization and optimal torch path determination in flame cutting," *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 81-99, 1984.
- [5] A. Raggenbass and J. Reissner, "Stamping-laser combination in sheet processing," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 291-294, 1989.
- [6] S. D. Jackson and R. O. Mittal, "Automatic generation of 2-axis laser cutter NC machine program and path planning from CAD," *Computers in Industry*, Vol. 21, pp. 223-231, 1993.
- [7] P. Sheng and L.-H. Cai, "Model-based path planning for laser cutting of curved trajectories," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No. 6, pp. 739-754, 1996.
- [8] D. Schuocker and W. Abel, "Material removal mechanism of laser cutting," *Proc. SPIE*, pp. 88-95, 1983.
- [9] S. Roy and M. Modest, "CW laser machining of hard ceramics- I. Effects of three-dimensional conduction, variable properties and various laser parameters," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 36, pp. 3515-3528, 1993.
- [10] D. F. Rogers and J. A. Adams, *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill, 1990.
- [11] P. Moscato and M. Norman, "A memetic approach for the traveling salesman problem: implementation of a computational ecology for combinatorial optimization on message-passing systems," *Proceedings of the International Conference on Parallel Computing and Transportation Applications*, Amsterdam, 1992.
- [12] R. Cheng and M. Gen, "Parallel machine scheduling problems using memetic algorithms," *Proceedings of the 20th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Kyongju, Vol. 1, pp. 17-20, 1996.
- [13] A. Bortfeldt and H. Gehring, "A hybrid genetic algorithm for the container loading problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 131, pp. 143-161, 2001.
- [14] 이문규, 이승주, "병렬의 동일기계에서 처리되는 순서 의존적인 작업들의 스케줄링을 위한 유전알고리즘," *대한산업공학회지*, 제 25 권 제 3 호, pp. 360-368, 1999.
- [15] P. M. Franca, A. Mendes and P. Moscato, "A memetic algorithm for the total tardiness single machine scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 132, pp. 224-242, 2001.
- [16] S. Lin, "Computer solutions of the traveling salesman problem, Bell systems Technical Journal," Vol. 44, pp. 2245-2269, 1965.
- [17] N. Christofides and S. Eilon, "An algorithm for the vehicle dispatching problem," *Operational Research Quarterly*, Vol. 20, pp. 309-318, 1969.
- [18] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1997.



이 문 규

1957년 1월 8일생. 1979년 서울대학교 산업공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 (석사). 1989년 동대학 (박사). 1991년~1993년 미국 Rutgers대학 산업공학과 방문교수. 1985년~현재 계명대학교 기계·자동차공학부 교수. 주요 관심분야 : machine vision, 생산시스템 자동화, 신경망.

o: machine vision, 신경망, 물류시스템.



권 기 범

1973년 2월 1일생. 1998년 경일대학교 기계설계학과 졸업. 2002년 계명대학교 산업공학과 (석사). 주요 관심분야 : machine vision, 생산시스템 자동화, 신경망.