

레이저 절단공정에서 절단부재의 최적배치를 위한 네스팅 알고리즘

한국찬* · 나석주*

Nesting Algorithm for Optimal Layout of Cutting parts in Laser Cutting Process

G. C. Han* and S. J. Na*

1. 개 요

레이저 가공기술은 재료가공 분야에서 넓은 응용 분야를 가지고 있으며, 특히 절단, 용접, 열처리등의 가공분야에서 고정밀도와 자동화의 용이성으로 인해 생산성이 높은, 고부가가치의 첨단응용기술로 부각되고 있다. 특히 레이저절단은 타 절단법에 비교되는 절단정도, 열영향, 생산성, 작업환경등의 각종 우위성으로 박판 및 후판절단분야에서 급속한 보급을 보이기 시작하였다. 현재 대부분의 레이저 가공기는 CNC화 되어가고있는 추세이며, 레이저절단의 경우 생산성증대 및 고정밀화를 위하여 CAD/CAM 인터페이스에 의한 자동화가 필연적인 상황이다. 뿐만 아니라 고출력 레이저발전기를 가공기본체에 탑재한 탑재형 레이저가공기의 출현으로 대형부재의 절단이 가능하게 되었으며, 더불어 절단공정의 무인화를 지향하는 각종 시스템이 개발되고 있다. 이와같은 무인화, 생산성증대, 작업시간단축과 러닝 코스트 및 재료의 절감을 위한 노력의 일환으로 컴퓨터에 의한 자동 및 반자동 네스팅시스템의 개발을 들 수 있다.

레이저에 의한 2차원 절단응용분야에서의 네스팅

작업은 설계가 끝난 각 부품의 절단작업의 전단계로서 수행되며, 일반적으로 네스팅공정이 완료되면 절단경로를 결정하고 가공조건과 함께 수치제어공작기계의 제어에 필요한 NC코드를 생성하게 된다. 최근에는 이와같은 네스팅 시스템이 일부 생산현장에 적용되고 있으나 이러한 시스템들의 대부분이 외국에서 개발된 것을 수입하여 사용하는 실정이다. 2차원 패턴의 최적자동배치문제는 비단 레이저 절단과 같은 열가공 분야에서 뿐만 아니라 블랭킹 금형, 의류, 유리, 목재등 여러분야에서 응용이 가능하며 패키지의 국산화가 시급한 실정이다.

네스팅작업은 적용되는 분야에 따라 요구사항과 구속조건이 달라지며 이로 인해 알고리즘과 자료구조도 달라지게 되나 공통적인 목표는 주어진 영역 안에서 겹침없이 배치하면서 버림율을 최소화하는 것이다. 지난 10여년간 여러 산업의 응용분야에서는 네스팅시스템의 도입이 활발하게 이루어지고 있는데 수동에서 반자동 및 자동에 이르기까지 다양하나 자동네스팅시스템의 경우 배치효율의 신뢰성이 비교적 부족하기 때문에 아직까지는 생산현장에서 기피하는 실정이다. 배치알고리즘의 관점에서 볼 때 이러한 문제들은 NP-complete 문제로 분류하며 제한된 시간안에 최적의 해를 구하기가 불가능한 조합

* 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

최적화 문제로 알려져 있다. 따라서 이 글에서는 레이저 절단분야에서의 네스팅시스템에 관한 개요와 최근의 연구동향 그리고 몇 가지 전형적인 네스팅 알고리즘들을 소개하고 비교분석을 통해 개선점을 간략하게 논의하고자 한다.

2. 네스팅 공정의 분석

Fig. 1은 생산시스템에서 원소재로부터 최종제품을 얻기위해 수행되는 절단작업의 대략적인 개념도이다. 기본적으로 네스팅 작업은 설계부서에서 작성된 각 부품의 설계도면, 생산관리부서에서 작성된 절단공정에 관련된 일정계획 그리고 원소재에 관한 정보등을 가지고 수행된다. 네스팅이 완료되면 절단작업 지시서나 수치제어절단을 위한 NC 파트 프로그램을 작업현장에 보내주게 되며, 절단이 끝난 제품은 완성품의 형태로 고객에게 제공되거나 제품을 만들기위한 재료로서 다른 공정에 제공될 수가 있다. 절단작업이 끝나면 절단하고 남은 소재의 scrap이 발생하게되는데, 이용가능한 scrap과 이용불가능한 scrap의 두가지 형태가 존재한다.

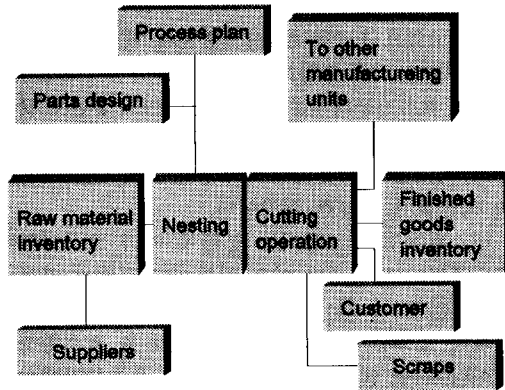


Fig.1 Concept of cutting process in production system

Fig.2는 레이저 절단등에서 상용화되고 있는 일반적인 네스팅 시스템의 작업 흐름도를 보여주고 있다. 상용 소프트웨어에서 일반적으로 제공하는 절단부재의 입력방법으로는 그래픽틀에 의한 수동입력방식(interactive graphic input), 표준패턴에 의한 치수입력방식(Macro input), 수동 NC코드 입력방식

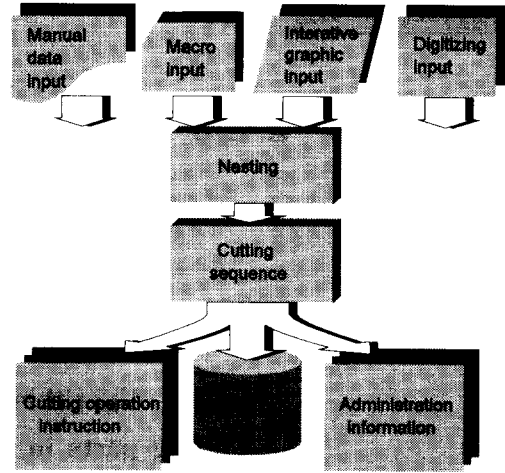


Fig.2 Computer aided nesting procedure

(Manual data input), 디지털입력방식(digitizing input) 등으로 나눌수가 있다. 작성된 부재들은 네스팅모듈에서 회전과 이동등의 다양한 조합에 의해 배치가 이루어지며 절단정보와 함께 절단경로및 공정계획이 결정되면 작업지시서와 NC 코드 그리고 관리정보등을 생성하게된다. 일반적으로 레이저 절단공정은 자동이나 반자동의 가스절단을 비롯한 플라즈마절단등에 비해 에너지 집속도가 크고 고속의 절단이 가능하기 때문에 열변형이 매우 작아 무시하는 경우도 있으나 박판절단과 정밀절단등에서는 절단시 열변형을 고려하지 않을수가 없다. 이때문에 네스팅 시스템은 재료의 사용율을 높이는 것 외에도 열변형을 고려하여 부재를 배치할 수 있어야 하며 절단 시간을 최소화하면서 열변형을 줄이는 절단경로를 만들고 이로부터 NC 코드를 생성하여 CNC컨트롤러에 전송할 수 있는 기능이 필요하다. 그러나 아직까지 이러한 문제는 숙련된 전문가의 경험과 직관에 의존하는 경우가 대부분이며 네스팅 또한 수동 혹은 반자동의 대화식에의한 배치방식에 의존하고 있는 실정이다. 이것은 디지털입력과 같은 입력장치를 통해 모니터상에 있는 부재를 이동하거나 회전하여 적절한 위치를 결정하며, 이때 컴퓨터는 자동으로 겹침등과같은 오류를 체크하거나 버림률등을 계산하게된다. 진보된 형태의 CAD/CAM시스템일수록 사용자의 접근이 용이하며, 사용자에게 요구하는 가공공정에 대한 기술적인 지식이 적다. 따라서 레이저 절단분야에 적합한 CAD/CAM시스템은

레이저 절단공정에서 필요로하는 자동화된 기능들을 보다 많이 지원해야 한다. 네스팅 및 CAD/CAM시스템을 현장에 적용시키기 위해서는 우선 실제의 가공 공정을 분석하여 가장 적합한 시스템을 도입하거나 개발해야하는데, 이들이 갖추어야 할 사항들을 나열하면 대략 아래와 같다¹⁷⁾.

- 대화식의 그래픽사용자 인터페이스에 의한 패턴의 입력
- 상용 CAD시스템과의 호환
- 패턴의 복사, 합성등 다양한 처리기능
- 반자동 및 자동 네스팅기능(옵션)
- 큰부재 내부홀에 작은부재의 배치
- 절단경로생성
- 절단면의 피어싱(piercing)홀을 방지하기 위한 피어싱 패턴제공
- 낙하방지용 마이크로조인트 설정
- 코너루프(coner loop) 처리
- 절단폭, 열 변형보정
- 표준 가공재료의 적절한 가공조건 제공
- 실시간 절단경로 표시
- 견적, 부재관리, 공정관리, 단재관리
- 다른 출력장치와의 간편한 연결
- 기존 제어장치와의 인터페이스
- 판금전개등 특수 계산

3. 관련연구 및 알고리즘 분석

3.1 형상표현 방법

대부분의 네스팅 알고리즘은 프로그램의 빠른 실행을 위해 실제형상 대신에 이를 근사화시킨 근사표현 방법을 사용하고 있다. 많은 연구논문들이 다각형근사법⁸⁻⁹⁾과 격자표현법¹⁰⁻¹³⁾에 의해 패턴을 정의하고 단순화 시켰는데, 다각형 근사법은 임의의 패턴을 직선선분(line segment)들로 근사화시켜 처리시간을 빠르게 하기 위함이며, 격자 표현법은 패턴간 겹침판별을 효율적으로 하기 위함이다. 이와 다른 방식의 표현방법으로는 Weishuang등¹⁴⁾이 제안한 직사각형들의 조합에 의한 표현법과 저자등¹⁶⁾이 제안한 단순패턴들(직사각형, 원)에 의한 복합패턴의 표현법등이 있다. 네스팅 공정에서는 실제형상을 단순패턴으로 분해하여 사용하고 최종 절단공정에서는 실제형상을 사용하는 방법을 채택하였기 때문에 겹

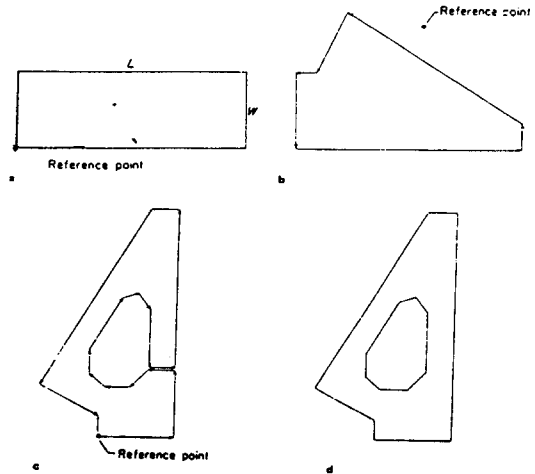


Fig.3 Polygonal approximation (by Adamowicz)

침판별을 손쉽게 계산할 수 있다는 장점이 있다. 부재형상의 정밀도는 기본패턴의 수를 증가시킴으로서 향상시킬수 있다는 유연성을 부여하나 시스템의 메모리의 한계와 계산시간의 증가 때문에 적절한 절충이 필요하다. Fig.3은 Admowicz등이 제안한 다각형표현법의 한 예이다⁵⁾. 그들은 패턴을 직사각형과 다각형으로 구분하였는데, 직사각형은 길이와 폭 그리고 기준점으로 정의하고 하나의 다각형은 반시계 방향으로 이루어진 일련의 정점(vertex)들로 기술하였다. 또한 각 정점들의 좌표는 기준점에 대한 상대적인 위치로 정의하였다. 이 후의 많은 논문에서 나타난 다각형표현법들은 이와 유사하거나 개선된 형태를 취하고 있다. 격자표현법에는 영역표현법과 경계표현법이 있는데, 영역표현법¹¹⁾. 이 자료구조및 메모리공간에 있어서 비효율적인데 비해 Fig. 4는 격

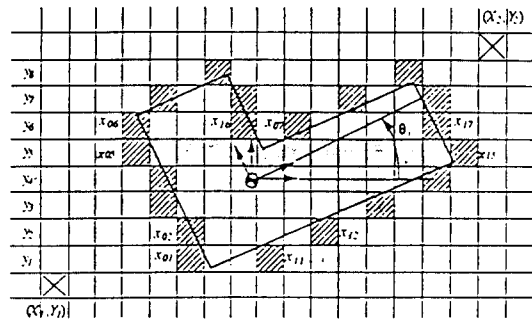


Fig.4 Shape representation by grid model (by Ref[13])

자의 경계표현법의 한 예¹³⁾이며 모든 경계의 격자 정보를 갖는대신에 동일한 y 값에 대한 x 의 시작과 끝에 해당하는 빛금친 격자만을 저장하는 방식을 사용하여 필요로하는 메모리공간을 줄였다. 그러나 영역표현법은 패턴의 형상정보를 추출하기가 용이하다는 장점이 있어 패턴인식, 이미지 프로세싱, 컴퓨터 그래픽스등에서 많이 쓰이고 있다. 조준홍¹²⁾은 영역표현법에 의한 패턴배치에서 메모리 공간을 줄이고 오프레이션을 간단히 하기위해 quadtree라는 자료구조를 이용하여 패턴정보를 압축하는 방법을 제시하였다. Fig.5는 저자등¹⁶⁾이 제안한 단순패턴들로 이루어진 복합패턴의 표현법을 보여주고 있는데, 단순패턴은 길이와 폭으로 정의되는 직사각형과 반경에 의해 정의되는 원으로 나누어지며, 기준점(reference point)은 그 중심에 위치하도록 하였다. 하나의 복합패턴은 최소포함직사각형(smallest rectangular enclosure), 내부홀(inner hole) 및 외부홀(outer hole) 그리고 다각형을 이루는 정점들(vertexes)로 표현하였으며, 최소포함직사각형의 기준점은 배치영역의 원점에 대한 절대좌표를 가지며 내부홀의 기준점들은 최소포함직사각형의 기준점에 대한 상대좌표를 가지도록 하였다. 이 표현방법은 단순화 정도의 유연성과 메모리공간의 절약 그리고 처리시간의 단축등 많은 장점을 가지고 있으나 사용자에게 의해 실제 패턴을 단순패턴들로 분해해야 하는 적절한 절차를 필요로 한다.

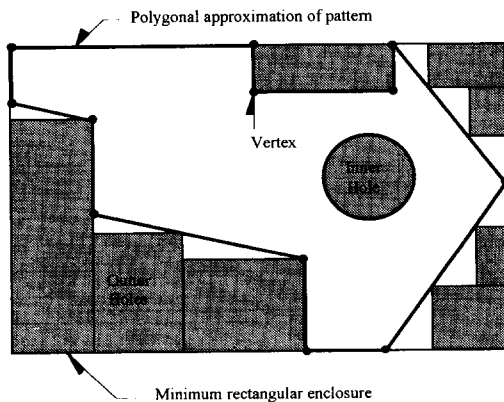


Fig.5 An arbitrarily shaped pattern approximated by simple patterns of rectangle and circle(by Han)

3.1 배치전략

2차원 패턴의 네스팅은 일반적으로 직사각형 패턴과 불규칙패턴의 배치문제로 나눌 수 있으며, 이를 최적화 기법에 따라 분류해보면 수학적접근법^{1, 2, 4)}과 휴리스틱접근법^{3, 5~8)}으로 나눌 수가 있다. 지금까지 발표된 연구논문들은 주로 직사각형 패턴이나 임의의 패턴들로 구성된 직사각형 모듈의 배치에 치중되어 왔다^{1~6)}. 직사각형 배치에 관한 연구는 1960년대의 Gilmore^{1, 2)} 등에 의해 논문이 발표되면서부터 본격적으로 시작되었는데 이들은 선형계획법(linear programming technique)과 낭색 함수(knapsack function)를 사용하여 1차원, 2차원 및 3차원 절단문제를 풀었다. Adamowicz와 Albano³⁾는 2단계 접근법을 도입한 휴리스틱알고리즘을 제안하였다. 이는 직사각형들을 스트립(strip)들로 형성시키는 단계와 동적 계획법(dynamic programming algorithm)을 사용하여 스트립들의 최적배치에 들어가는 2단계로 구성되어 있다. Christofides⁴⁾ 등은 동적 계획에 기반을 둔 트리(tree) 탐색알고리즘을 사용하여 2차원 절단문제를 풀었다. 불규칙 배치문제에 관한 네스팅 알고리즘들은 대부분이 휴리스틱 알고리즘에 속하는데, 알고리즘의 성격상 이들은 다시 순차적 알고리즘(sequential algorithm)과 반복개선 알고리즘(iterative improvement algorithm)으로 나눌 수가 있다.

3.1.1 순차적 알고리즘(Sequential algorithm)

불규칙패턴의 배치문제에 관한 연구는 Adamowicz와 Albano⁵⁾에 의해 처음 발표되었다. 이 논문은 2단계 접근법에 관한 것으로 임의의 패턴 혹은 패턴들의 집단을 둘러싸는 최소포함직사각형(smallest rectangular enclosure)모듈의 생성단계(Fig.6)와 이 모듈들의 최적배치단계를 통해 해를 구하였다. 그들은

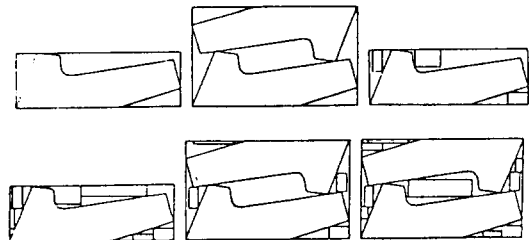


Fig.6 Modules after clustering(by Adamowicz)

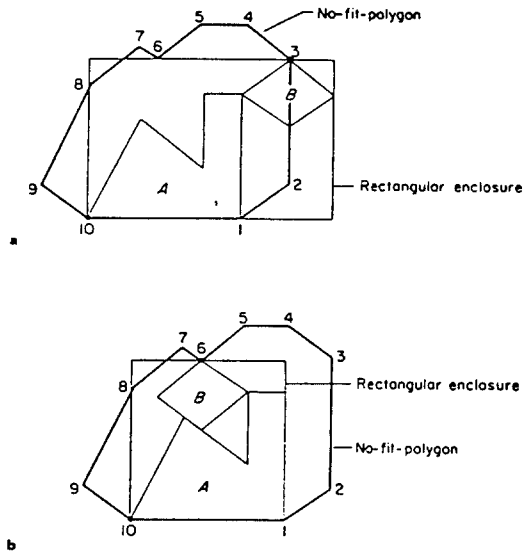


Fig.7 Clustering using the no-fit-polygon (by Adamowicz)

Fig.7과 같이 고정패턴(모듈) A에 대해 패턴(모듈) A와 겹치지않고 최대한 접근하면서 이동패턴(모듈) B의 기준점이 지나는 자취 즉, NFP(No-Fit-Polygon)을 정의하여, 이러한 NFP위에서 적절한 위치를 찾았다. 이는 최소포함직사각형의 생성을 위한 클러스터링(clustering) 기법으로 사용되었다. Fig.8은 2단계 접근법을 통한 최종 배치 예이다. 이러한 2단계 접근법은 휴리스틱접근법에 속하며 이후의 많은 논문들^{6,7,9)}과 현재 상용화되고 있는 소프트웨어들이 대부분 이와 유사하면서 개선된 알고리즘을 채택하고 있다. Albano³⁾는 휴리스틱 방법과 동적계획법을 조합해 대략적인 배치를 자동으로 구한다음 사용자의 의해 대화식으로 개선하는 방법을 제안하였다. Nee⁹⁾는 블랭크배치문제에서 동일패턴의 배치문제를 다루었으며 Nee등⁹⁾은 경계의 구축이 있는 경우의 임의의 패턴배치에 관한 논문을 발표하였다. 이 논문에

서는 회전축(pivot point)을 이용하여 직사각형 모듈의 배치를 시도하였는데, Fig.9는 직사각형 패키징의 메카니즘을 보여주고 있다. Fig.10(a)는 불규칙한 원소재 경계를 직선으로 근사화시킨 후 이들 경계직선들을 대각선으로 하는 직사각형들의 안쪽을 유용한 원소재로 정의하고 내부에 결합이 있을 경우는 이 결합 부위를 완전히 둘러싸는 직사각형을 구하여 이 직사각형의 외부를 유용한 배치 공간으로 정의한 것이다. Fig.10(b)는 이렇게 정의된 원소재에 자동 및 수동에 의한 패턴들의 배치 결과를 보여주고 있다. 이러한 알고리즘들은 배치해를 탐색하는데 있어서 휴리스틱정보를 적용하여 탐색속도를 증가시켰으며 탐색절차가 순차적(sequential)이며 결정론적(deterministic)이라는데 그 한계가 있다. 이는 집단성장(clustering)에 의한 배치방식을 채택하기 때문에 이미

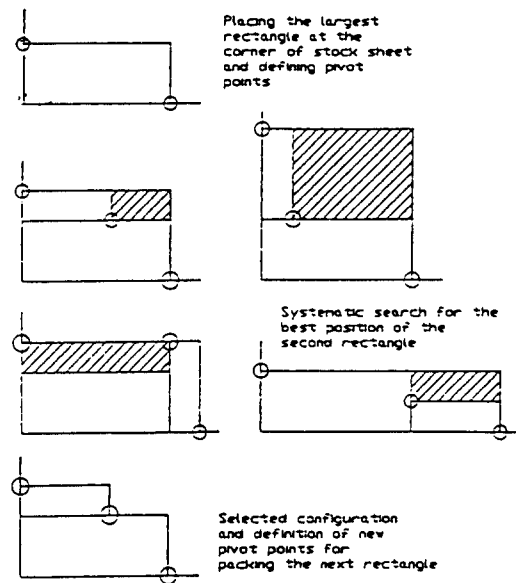


Fig.9 The rectangular packing mechanism (by Nee)

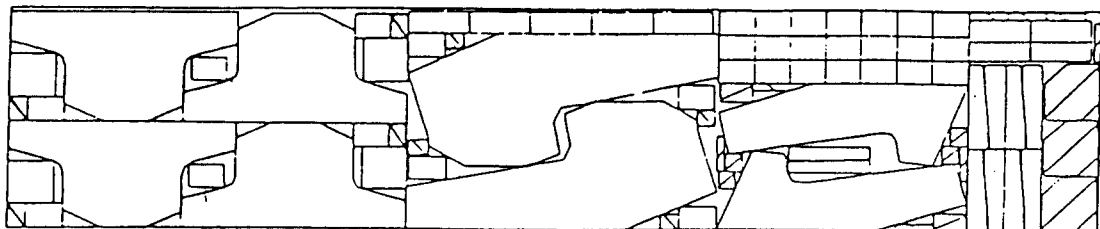


Fig.8 Nesting result of clustered modules (by Adamowicz)

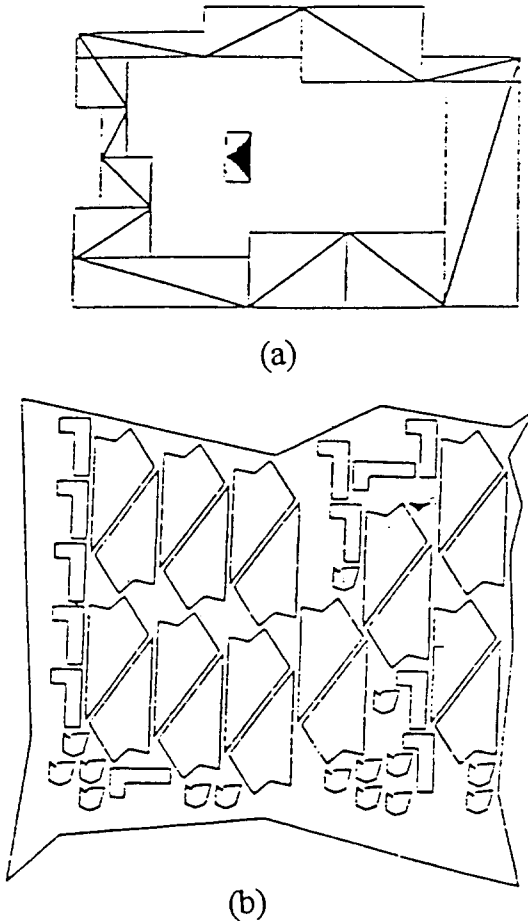


Fig.10 Nesting example with boundary constraints and internal defects(by Nee)

배치된 패턴에 대해서는 재배치를 시도하지 않는 것이 일반적이다.

3.1.2 반복개선 알고리즘(Iterative improvement algorithm)

최근 조합최적화(combinatorial optimization)문제와 관련하여 개발된 전역최소 지향의 알고리즘으로는 모의 진화(simulated Evolution), 타부써치(tabu search), 유전 알고리즘(genetic algorithm), 모의 어닐링(simulated annealing)등이 있는데, 이 알고리즘들의 공통적인 특징은 기존의 휴리스틱한 순차적 알고리즘이나 재래적인 반복개선 알고리즘에서는 찾아볼 수 없었던 힐클라이밍 능력(hill climbing ability)과 백트래킹 능력(backtracking ability)을 갖추고 있으며,

그 적용성과 우수한 탐색능력 때문에 여러 응용분야에서 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 특히 대규모집적회로(VLSI) 설계분야에서 표준셀(cell) 배치에 성공적으로 적용되고 있으며, 네스팅분야에서도 최근 유전 알고리즘^{18, 19)}과 모의 어닐링법^{21~23)}을 적용한 논문이 발표되고 있다. 이 절에서는 모의 어닐링 알고리즘에 대해서 간단히 소개하고 이를 이용한 최적배치의 결과를 비교하였다.

원래 이 알고리즘은 1953년 Metropolis등³⁰⁾에 의해 고체가 열평형 상태로 변화해가는 과정을 효율적으로 시뮬레이션 하기위해 소개된 것이었으나 고체 물리학에서의 이러한 이론이 Kirkpatrick등²¹⁾에 의해 조합최적화문제에서 가격 함수를 최소화시키는 문제로 개발되었다. 전통적인 반복개선 방식의 최적화 알고리즘은 가격함수가 감소하는 방향으로만 진행하기 때문에 지역최소점(local minima)에 빠져버려 더 이상의 개선이 진전되지 못할 때가 흔하다. 이를 극복하기 위해서는 임의의 초기점에 대해 수많은 시도가 필요하나 전역적인 최적해는 여전히 보장되기가 어렵다. 모의 어닐링법은 이러한 반복개선방식의 알고리즘과 유사하나 가격함수가 증가하는 방향으로의 진행이 가능하다는 점에서 큰 차이점을 보이고 있다. 이 때문에 전보다 더 나쁜 상황으로의 상태전이가 발생함으로써 지역적 최소점을 탈출하고 결국에는 전역적 최소점에 도달할 수 있다는 잠재적인 가능성을 내포한다.

모의 어닐링법은 초기온도 T_0 와 임의의 초기배치 X_0 에서 출발하여 매 온도 단계에서 새로운 배치 X' 를 생성한다. 또한 이때의 가격함수의 변화 $\Delta C = C(X') - C(X)$ 를 계산하고 새로운 배치에 대한 허용여부를 결정하게 된다. 만약 $\Delta C \leq 0$ 이면 확률 1로써 새로운 배치를 받아들이며, $C > 0$ 인 경우 새로운 배치상태는 볼츠만 분포의 제한적인 확률로서 허용된다. 이 제한적인 확률은 온도 $T = \infty$ 에서는 1이며, 온도가 $T = 0$ 으로 감소함에 따라 확률도 0으로 감소하여 결국에는 응고하게 된다. 실제 응용에 있어서 모의 어닐링법은 유한한 횟수의 상태전이와 온도단계로 인해 각 온도단계에서 평형상태를 만족하면서 최적의 상태로 수렴한다는 보장은 없으나 냉각스케줄이 충분히 완만하게 한다면 매우 훌륭한 결과를 얻을 수가 있다.

Jain등²¹⁾은 블랭크(blank)네스팅을 위해 모의 어닐링법을 적용했는데, Fig.11은 3개의 블랭크에 대한 네스팅결과를 보여주고 있다. 초기온도를 100.0, 최종온도를 0.001 그리고 각 온도에서의 패턴이동 횟

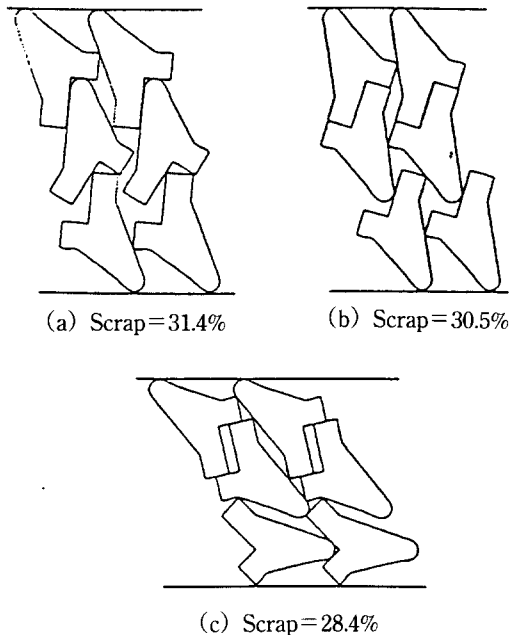


Fig.11 Three locally optimal configurations for the three blank nesting problem(by Jain)

수를 75회로 시도한결과 평균 1467.6초가 소요되었다. 조경호²²⁾는 판재가공에서의 네스팅문제를 해결하기 위해 모의 어닐링법에 적용하였는데, 국부적 풀림을 통한 간극 채워넣기 라는 개념을 도입하여 마지막 단계에서의 배치효율을 향상시키는 방법을 제안하였다. Fig.12는 36개의 패턴을 일정폭의 원소재 위에 배치한 결과이다.

모의 어닐링법이 우수한 배치해를 제공하는 것임에는 틀림없으나 계산시간의 방대함으로 인해 현실적인 적용에 어려움이 있다. Fig.11의 결과에서는 단지 3가지의 패턴배치임에도 불구하고 상당히 많은 계산시간이 소요되었으며, Fig.12의 결과에서도 계산시간 단축에 대한 고려는 배제되어 있었다. 이러한 문제를 극복하기 위한 한 방편으로 인공지능의 한

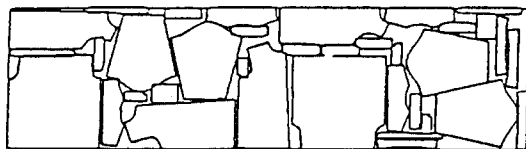


Fig.12 Nesting example of 36 patterns(by Ref [13])

분야인 자율조직 신경회로망과 모의 어닐링 알고리즘을 결합한 2단계 스위칭 구조가 저자등²³⁾에 의해 발표되었었다. 이는 초기배치 단계에서 신경회로망에 의해 빠른 시간안에 대략적인 배치윤곽을 얻으며, 배치개선단계에서 모의 어닐링법을 통해 상세배치를 얻는 전략이다. Fig.13은 2단계 스위칭 전략으로 부터 얻은 경계구속및 내부결합이 있는 임의의 2차원 패턴들의 배치 결과로 초기배치와 배치개선단계에서 소요된 계산시간은 각각 98초와 371초 이었다. 여기서 계산시간 단축에 관한 문제는 많이 해결이 되었으나, 배치개선단계에서 모의 어닐링법의 초기온도 설정의 적절한 선정이 필요한데, 초기온도가 너무 높으면 초기배치에서 얻은 배치윤곽이 많이 왜곡되며, 너무 낮으면 지역적 최소점에 빠져 초기배치에서 큰 개선이 없게되는 어려움이 있다. 그러나 적절한 초기 온도 설정에 관한 근본적인 문제 해결의 방법은 통상 제시되지 못하고 있으며, 통상 실험에 의존해 설정하는 방법을 취하고 있다.

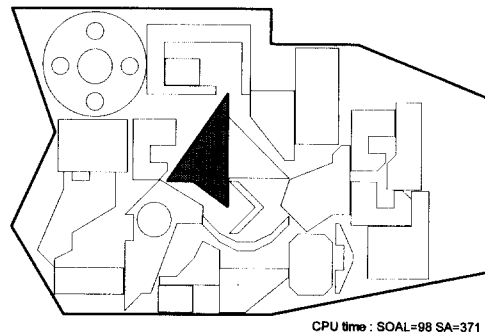


Fig.13 Nesting result with boundary and internal constraints(by Han)

5. 결 언

제조업 분야에서 원가 절감을 위한 한 방편으로 재료의 손실을 최소화 시키는 노력들을 들 수 있다. 판재 소재를 다루는 레이저 절단분야에서의 필수적인 작업공정인 네스팅은 바로 이러한 관점에서 매우 중요한 공정이라 할 수 있다. 이 분야에 대한 기존의 연구를 비롯하여 근래에 상용화 되고 있는 네스팅 시스템의 공통적인 특징은 일반적으로 순차적인 휴리스틱알고리즘에 치중되어 있거나 배치 효율을 높

이기위해 대화형시스템에 의존한다는 아쉬움이 있다. 그러나 최근에 전역적 최적화 알고리즘 가운데 유전 알고리즘이나 모의 어닐링법이 네스팅분야에서도 각광을 받고있는 실정인데, 이에 이 글에서 회로설계분야에서도 가장 잘 개발된 배치(layout)기법으로 알려진 모의 어닐링에 대해 간략하게 소개하였으며 그 배치결과를 비교 검토하였다. 또한 모의 어닐링에 의한 네스팅 알고리즘이 기존의 순차적인 방법에 비해 상당히 좋은 배치결과를 제공해 주고 있으나 실제 산업현장에 적용이 되기위해서는 아직까지 개선의 여지가 남아있음을 알 수 있었다.

조선업에서 주로 이루어지고 있는 화염절단(flame cutting)의 경우에는 경사절단(bevel cut), 절단폭(kerf width) 보상 그리고 열변형까지 고려해야 하는 경우도 발생하지만, 레이저 절단의 경우에 아직까지 박판절단에 주로 이용되고 있어 이와같은 문제들이 중요하게 부각되지 않고 있으나 최근 수십 kW에 달하는 고출력 CO₂ 레이저 발전기의 개발에 힘입어 후판절단에서도 레이저 절단이 주목을 받고있는것을 볼때 이러한 인자를 고려한 네스팅 시스템의 개발이 시급하다는 사실을 인식할 수가 있으며, 뿐만아니라 로봇 등에 의해 이루어지고 있는 3차원 레이저 절단의 경우에 현재의 2차원 네스팅 알고리즘은 3차원으로까지 확장이 되어야 하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. P.C.Gilmore & R.E.Gomory : Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions, *Opns. Res.*, Vol.13, (1965), pp.94-120
2. P.C.Gilmore & R.E.Gomory : The Theory and Computation of Knapsack Functions, *Opns. Res.*, Vol.14, No.61, (1966), pp.1045-1074
3. M.Adamowicz & A.Albano : A Solution of the Rectangular Cutting-Stock Problem, *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-6, No.4, (1976), pp.302-210.
4. N.Christofides & C.Whitlock : An Algorithm for Two-Dimensional Cutting Problems. *Opns. Res.*, Vol.25, No.1, (1977), pp.30-44
5. M.Adamowicz & A.Albano : Nesting Two-Dimensional Shapes in Rectangular Modules, *Computer-Aided Desn.*, Vol.8, No.2, (1976), pp.27-33
6. A.Albano : A method to Improve Two-Dimensional Layout, *Computer-Aided Design*, Vol.9, No.1, (1977), pp.48-52
7. A.Albano & G.Sapuppo : Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Methods, *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybernetics*, Vol. SMC-10, No.5, (1980), pp.242-248
8. A.Y.C.Nee : A Heuristic Algorithm for Optimum Layout of Metal Stamping Blanks, *Annals of the CIRP*, pp.317-320
9. A.Y.C.Nee, K.W.Seow & S.L.Long : Designing Algorithm for Nesting Irregular Shapes With and Without Boundary Constraints, *Annals of the CIRP* Vol.35, No.1, (1986), pp.107-110
10. P.Jain, P.Fenyas and R.Richter : Optimal Blank Nesting Using Simulated Annealing, *J. of Mech. Desn.*, *Trans. of the ASME*, Vol.114, (1992), pp. 160-165
11. 방기범 : 판재 소모를 최소화하는 이차원 형상의 최적배치, 석사학위논문, 서울대학교, (1990)
12. 조준홍 : Quadtree를 이용한 불규칙한 형상을 갖는 패턴의 최적배치에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, (1991)
13. 조경호 : 판재 부품의 가공 자동화를 위한 CAD /CAM 통합 시스템, 박사학위논문, 서울대학교, (1993)
14. Q.Weishuang & L.S.Jerry : A Nesting Algorithm for Irregular Parts and Factors Affecting Trim Losses, *Int. J. Prod. Res.*, Vol.25, No.3, (1987), pp.381-397
15. 한국찬, 나석주 : 신경회로망을 이용한 직사각형의 최적배치에 관한 연구, *대한기계학회논문집*, 제17권, 제12호, (1993), pp.3063-3072
16. 한국찬, 나석주 : 레이저 절단을 위한 형상 자동 배치 및 CAD/CAM 시스템 개발, 제4차 레이저 가공기술 심포지움, 대전, 한국기계연구원, (1993), 89-101
17. Teamwork Does the Job in Selecting Nesting Software, *Welding Journal*, Vol.68, No.7, (1989), pp. 51-52
18. H.S.Ismail & K.K.B.Hon : New Approaches for the Nesting of Two-Dimensional Shapes for Press Tool Design, *Int. J. Prod. Res.*, Vol.30, No.4,

- (1992), pp.825-837
19. Fujita, Kikuo & Gakkai : Approach for Optimal Nesting Algorithm using Genetic Algorithm and Local Minimization Algorithm, Trans. of the JSME, Part C, Vol.59, No.564, (1993), pp.2576-2583
20. N.Metroporis, A.W.Rosenbluth, M.N.Rosenbluth, & A.H.Teller : Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, J. of Chem. Physics, Vol.20, No.1334, (1953), pp.1087-1092
21. S.Kirkpatrick, C.D.Gelatt & M.P.Vecchi : Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol.220, No.4598, (1983), pp.671-680