

변형 에너지를 고려한 치구 위치의 선정

Determination of the location of fixture elements using the strain energy

기동우(서울대학교 기계설계학과 대학원), 이건우(서울대학교 기계설계학과), 정진평(MIT 기계공학과)

Dongwoo Ki(Mechanical Design & Production Engineering Graduate School, Seoul National Univ.),
Kunwoo Lee(Seoul National Univ.), Jinpyung Chung(Mechanical Engineering Graduate School, MIT)

ABSTRACT

A new method to locate modular fixtures using an optimization technique is proposed. The optimal fixture arrangement is derived to minimize the elastic deformation of a workpiece. That is, a fixture arrangement is regarded better if it minimized the elastic deformation of the workpiece while fixing a workpart of course. In this approach, the workpiece is projected into two dimensional domain to simplify the 3-dimensional fixture arrangement problem into 2-dimensional one. Thus the problem is reduced to find the optimal positions of one horizontal clamp and three locators which minimize the total deformation of the workpiece and the design variables are the location of the contact points between the boundary of the workpiece and the 4-fixels. The Genetic Algorithm is used for the optimization by mapping each design variables to a gene of a chromosome. The fitness value is the total strain energy of the workpiece calculated by the finite element analysis.

Key Words : optimization(최적화), modular fixture(모듈라 픽스춰), deformation(변형), strain energy(변형 에너지), genetic algorithm(유전 알고리즘), finite element analysis(유한 요소해석)

1. 서론

치구를 피고정체에 고정시키는 일련의 작업을 치구 설계(fixture design)라 하며, 실제 생산 자동화에 있어서 자동화의 진척이 가장 늦고 전문 기술자의 수작업에 의존하는 비중이 높은 부분 중의 하나이다. 물체 가공의 경우 실제 가공 시간은 전체의 30%미만이며 50%이상이 치구 설치, 해체등에 소요된다. 예로 치구의 개수가 10 개인 설계를 8 개로 줄인다면 전체적으로 약 10%의 가공 시간을 줄일 수 있게 된다. 결국 사용되는 치구의 개수가 적을수록 전체 가공 시간이 단축되어 원가절감을 이룰 수 있다. AFE(Automatic Fixture Design)란, 이 치구 설계를 자동화하는 것으로서, 유연생산시스템(FMS, Flexible Manufacturing System), CIM(Computer Integrated Manufacturing), CAPP(Computer Aided Process Planning)

를 구성하는데 필수이다.

본 연구에서는 유한요소 방법을 이용하여 피고정체에 치구를 설치할 때 회전이나 이동이 발생할 지를 조사하고, 또 가공 힘(machining force), 능동적인 힘(clamping force), 마찰력을 고려하여 피고정체의 변형이 최소가 되는 치구의 위치를 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 찾도록 하였다. 이는 가공 오차가 중요시되는 정밀 가공에서는 가공 중에 피고정체의 운동을 고정시키는 것 뿐만 아니라 피고정체의 변형이 최소가 되게 치구를 위치시키는 것이 중요시 되기 때문이다. Fig. 1 과 같이 피고정체를 고정시키고 치구에서의 반발력(reaction force)이 같아도 (b)의 경우가 (a)의 경우보다 피고정체의 변형이 작아서 피고정체의 탄성 변형으로 인해 발생하는 가공 오차를 줄일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 피고정체를 4 개의 치구로 고정시키는 것을 가정하고 이들의 최적 위치를 찾

도록 하였다.

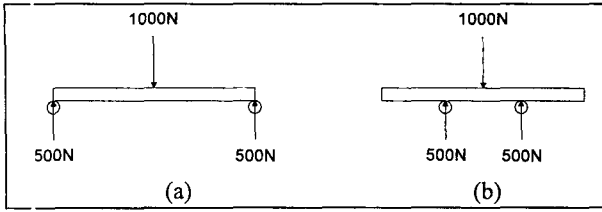


Fig. 1 Comparison the location of fixture elements

2. 관련 연구

치구 설계를 구현하는데는 많은 문제점들이 따르게 되는데 이들은 대체로 다음과 같다.

- 1) 정역학적 평형상태 판정에 대한 도구
- 2) 최적의 치구 설계(Fixture Design)를 위한 구체적 알고리즘의 구현
- 3) 이론상의 AFD를 실제 공장에 적용시킬 때 나타나는 문제점

정역학적 평형상태 판정에 대한 도구는 능동 힘으로 작용하는 치구를 피고정체에 장착할 때 이 능동힘에 의한 피고정체의 이동 또는 회전의 가능 유무와 치구 장착 후 가공 또는 조립에 따른 외력이 존재할 때 이들에 의해 피고정체의 이동 또는 회전의 가능 유무를 판정하는 것으로서 이를 위한 접근 방법은 크게 역학의 관점과 운동학의 관점으로 나뉘어 진다. 피고정체를 고정하는 방법에는 여러 가지가 있는데 이들 중 어떤 것이 더 좋은 방법이며, 이때 어떠한 것을 선택할 지에 대한 문제가 최적의 치구 설계를 위한 구체적 알고리즘의 구현이다. 이론상의 AFD를 실제 공정에서 구현하기 위해서 일반적으로 모듈화된 치구들을 사용하게 되는데, 이러한 모듈라 픽스춰 시스템(Modular Fixture System)의 사용 시 치구와 피고정체간에는 공차(tolerance)문제, 클램프에 가할 힘의 크기 결정 등의 문제가 생기게 되는데 이를 어떻게 극복하는가 하는 것이 문제이다. 모듈라 픽스춰를 이용하는 방법은 기존의 생산 과정에서 전용 치구를 이용하거나 단순한 몇 개의 치구를 이용한 방법을 개선하기 위하여 여러 종류의 치구를 만들어 사용하는 것이다. 이 방법의 장점은 전용 치구를 사용할 경우 발생하는 전용 치구의 제작 비용과 세삭 시간을 줄일 수 있다는 것과 다른 형상의 피고정체를 고정할 때 재사용할 수 있다는 것이다. 그러므로 대량생산 보다는 다품종 소량 생산에 많이 사

용된다. 모듈라 픽스춰 시스템은 플레이트(plate)의 형상에 따라 다우웰핀 형태(dowel-pin type)와 T-슬롯 형태(T-slot type)로 나눌 수 있다. AFD 시스템을 구축할 때 일정한 가정을 하게 되는데 그중 대표적인 것이 '모든 물체는 강체(Rigid Body)이다.'라는 것과 '모든 마찰력은 무시된다.'라는 것이다. 그러나 실제 공정에 보다 가까운 시스템을 구현하려면 이러한 가정으로 인해 무시되었던 문제들을 해결해야 한다. 이들 문제점들을 해결하기 위한 방법들이 여러 측면에서 접근되고 있다.

D. T. Pham⁽¹⁾ 등이 현장의 지식을 바탕으로 데이터베이스를 만들어 이를 이용한 전문가 시스템의 구축에 관한 연구를 수행하였다. Kumar⁽²⁾는 처음으로 CAD와 전문가 시스템을 통합한 시스템을 개발하였다. 전문가 시스템의 데이터베이스에 모듈라 픽스춰(modular fixture)를 저장하여 치구의 종류와 위치를 선정하는 연구도 수행되고 있다. Brost⁽³⁾는 피고정체의 외부 경계를 다각형으로 근사화 시키고 다우웰핀 형태의 모듈라 픽스춰를 사용하여 고정시키는 연구를 수행하였다. 나사이론을 이용한 방법은 Lakshminarayana⁽⁴⁾등이 이용한 방법으로 가상일(virtual work)을 이용하였다. 기구학적인 해석을 이용한 방법은 Asada⁽⁵⁾가 이용한 방법으로 주로 동적인 해석을 하였는데, 이는 나사이론과 유사한 면을 보이고 있다. 기구학을 이용한 방법 중 3 차원에서 6 자유도를 고정시키는 방법으로 3-2-1 법칙이 Rong⁽⁶⁾ 등에 의해 연구, 발전되었다. 각기둥 모양의 물체를 고정시키기 위해 기구학적인 방법을 사용하는 연구가 수행되고 있다. Mattikali⁽⁷⁾가 Reuleaux⁽⁸⁾의 접촉 기하학을 응용하여 연구를 수행하였다. 김정일⁽⁹⁾은 접촉 기하학을 발전시켜 2 차원에서의 평형 상태 판정, 치구의 개수 최소화 및 치구의 부착 순서에 관한 연구를 하였다. 치구가 피고정체에 미치는 영향을 예측하기 위하여 접촉 기하학을 이용한 연구가 수행되었다. 다른 방법들이 피고정체를 강체로 가정하고 문제를 풀려고 한데 비해 유한요소를 이용하는 방법은 가공 중의 치구와 피고정체 사이의 응력이나 변위를 예측하기 위해 피고정체를 변형 가능한 물체로 가정하여 유한요소 프로그램을 이용하여 유한요소 해석을 한다. 피고정체를 변형 가능한 물체로 인정하는 것이 기존의 방법들과 큰 차이점이다. 치구와 피고정체가 접촉하는 영역에서의 변형과 미끄러짐을 고려하여 치구의 위치를 선정하는 연구와 피고정체를 등방성의 탄성체로 모델링하고 최대 응력을 최소화하는 방향으로 치구의 위치를 선정하는 연구가 수행되고 있다. DeVries⁽¹⁰⁾는 피고정체의 변위를 최소화시키기 위해 비선형

최적화 알고리즘을 이용하였다. 전용 치구에 비해 모듈러 픽스춰를 사용할 경우의 경비 절감에 관한 연구가 수행되었고, 생산 공정과 치구 설계의 관계에 관한 연구가 수행되고 있다. 이론상의 AFD를 실제 공장에 적용시킬 때 나타나는 문제점에 관해 연구와 AFD 모델링 시 가정으로 인해 무시되었던 점들의 해결을 위해 마찰력을 고려한 연구가 수행되고 있다. 치구 위치를 결정된 후에 가공 도중 발생할 오차를 예측하는 방법도 연구되고 있다. 포텐셜의 개념을 이용하여 최적의 치구 위치를 찾으려는 연구가 수행되었다.

3. 치구의 위치 선정

3.1 목적 함수와 구속 조건

본 연구의 목표는 사용할 치구의 개수가 결정된 상태에서 피고정체의 변형이 최소가 되는 이들 치구의 위치를 찾는 것이다. 따라서 설계 변수는 치구와 접촉할 피고정체의 외부 경계상의 위치이다. 본 연구에서 피고정체의 변형을 최소로 하기 위해 목적 함수로 피고정체 전체의 변형 에너지를 사용하였다. 따라서 본 연구에서 최적화 문제는 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

Minimize: Strain Energy S

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \{\epsilon\}^T \{\tau\} d\Omega \\
 &= \frac{1}{2} \left[\int_{\Omega} \{u\}^T \{f\}_B d\Omega + \int_{\Gamma} \{u\}_S^T \{f\}_S d\Gamma \right. \\
 &\quad \left. + \sum_j^m \{u_j\}^T \{F_j\} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$\{\}$ 는 벡터 조작자(vector operator), $\{f\}_S$ 는 표면력(surface traction), $\{f\}_B$ 는 체력(body force), $\{F_j\}$ 는 집중력(concentrated force), $\{u\}$ 는 변위, $\{\epsilon\}$ 는 변형율, $\{\tau\}$ 는 응력을 나타낸다. m 은 유한 요소의 개수, Ω 는 전체 설계 영역, Γ 는 표면력이 작용하는 영역을 나타낸다.

설계 변수인 치구의 위치에 대한 구속 조건은 다음과 같다.

- 1) 치구의 후보 위치 사이의 거리가 가공 공구(tool)의 직경보다 커야 한다. 작업을 해야 될 곳에 인접한 두 치구 사이의 거리가 가공 직경의 직경과 같거나 작다면 가공 중 진동 등으로 인해

간섭이 일어나고 가공이 불가능해 진다.

- 2) 가공이나 조립 작업이 필요한 위치에는 치구를 위치시킬 수 없다.
- 3) 피고정체의 모서리나 치구가 위치했을 때 심한 변형을 일으킬 수 있는 영역에는 치구를 위치시킬 수 없다.

3.2 유한 요소 해석을 이용한 구현

본 연구에서는 변형 에너지의 계산을 위하여 유한 요소 방법을 사용하였다. 이를 위해서는 먼저 피고정체의 유한요소 모델을 만들어야 한다. 또한 만들어진 유한요소 모델에 대하여 경계 조건을 부여하고 외력이 작용할 때의 변형 에너지를 계산하여야 한다. Fig. 2에 이 과정을 개략적으로 나타내었다.

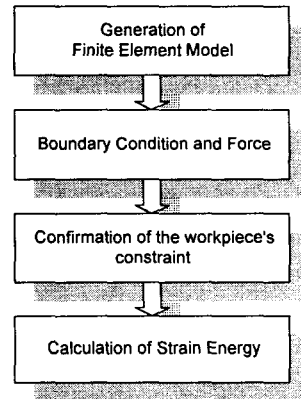


Fig. 2 Procedure of calculating strain energy

유한요소 모델 생성 과정에서는 가공을 하고자 하는 피고정체의 탄성계수, 마찰계수, 포아송 비 같은 물성치들을 지정하고, 치구와 접촉하게 될 외부 경계의 노드들을 생성하기 위한 유한 요소 모델을 생성하게 된다. 이 유한 요소 모델에서 외부 경계의 노드들이 치구의 후보 위치들이다. 그러나 외부 경계의 모든 노드가 치구의 후보 위치가 되는 것이 아니라 구속 조건을 만족하는 노드들만이 치구의 후보 위치가 될 수 있다.

유한 요소 모델을 생성하였으면 경계 조건과 하중 조건을 지정하여야 한다. 피고정체의 경계 조건으로는 실제 치구와의 접촉을 구현할 수 있도록 주어져야 한다. 실제 공정에서 클램프는 피고정체에 능동적인 힘을 가하므로 그것을 구현하기 위하여, 클램프의 후보 위치로 선정된 노드에는 피고정체의 표면에 수직한 내부 방향으로 힘을 가하는 것

이고, 능동적인 힘을 가하지 않는 로케이터의 경우에는 Fig. 3 과 같이 접촉 요소(contact element)를 사용하
 α 실제 로케이터의 역할을 구현한다.

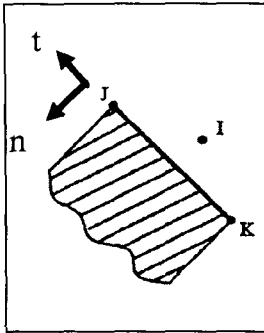


Fig. 3 Contact element for locator

노드 J와 K로 연결되어 있는 두꺼운 선이 물체의 외곽 경계로서, 노드 I와 접촉을 유지할 경우에는 경계에 수직하고 피고정체의 내부 방향(+n 방향)의 힘과 경계의 접선 방향으로서는 마찰력이 작용하고, 접촉이 일어나지 않는 경우는 어떠한 힘도 존재하지 않는다.

하중 조건은 피고정체에 가공이나 조립을 위한 힘이 가해지는 것을 유한 요소 해석에서 적용하기 위한 것으로 가공하는 힘이 작용하는 위치, 크기, 방향을 지정하여야 한다. 치구를 한번 설치하고 드릴링(drilling) 같은 작업을 여러 번 할 수도 있고 아니면 한 번의 작업이 끝나면 치구의 위치를 바꾸어야 할 수도 있다. 그러므로 한 번의 치구 설치로 작업 가능한 모든 경우를 포함하기 위해 여러 개의 힘을 동시에 고려할 수 있어야 한다.

실제 치구의 설치 순서는 로케이터나 서포트를 먼저 설치하고 나중에 능동적인 힘을 가하는 클램프를 설치한다. 클램프는 피고정체에 능동적인 힘을 가하기 때문에 로케이터의 위치와 클램프의 위치가 잘못 선택되면 치구 설치 도중 피고정체에 운동이 일어날 수 있다. 그러므로 선택된 로케이터와 클램프의 위치에 치구들을 설치할 경우 피고정체의 운동 여부를 확인하여야 한다. 운동 여부 확인은 변형 에너지를 계산하는 과정에서 확인할 수 있다. 능동적인 힘(clamping force)이나 가공 힘(machining force)이 작용할 경우, 변형 에너지 값이 어떤 값으로 수렴을 하면 치구에 의해 피고정체가 고정이 된 것이고, 수렴을 하지 않으면 피고정체가 고정이 안된 것이다. 클램프를 설치하는 과정에서 운동이 일어나지 않는다면 하중 조건을 적용하여 가공시 운동이 일어나는 지를 확인하여야 한다. 이를 만족할 경우 가공시 발

생하는 피고정체의 변형 에너지를 계산한다.

3.3 변형 에너지의 계산

변형 에너지를 계산하기 위해서 가상 변위의 원칙(The Principle of Virtual Displacement)⁽¹¹⁾에 기초한 유한 요소 해석 기법을 사용했다. 가상 변위의 원칙은 그 물체에 대한 적합한 가상의 작은 변위에 대하여 전체 내부 가상일(total internal virtual work)은 전체 외부 가상일(total external virtual work)과 같다는 것이다.

$$\int_{\Omega} \{\delta \epsilon\}^T \{\tau\} d\Omega = \int_{\Omega} \{\delta u\}^T \{f\}_B d\Omega + \int_{\Gamma} \{\delta u\}_B^T \{f\}_B d\Gamma + \sum_J \{\delta u_J\}^T \{F_J\} \quad (2)$$

여기서 δ 는 가상 조작자(virtual operator)이다. 따라서, $\{\delta \epsilon\}$ 는 가상 변형율이고 $\{\delta u\}$ 는 가상 변위이다. 이 때 변위 u 는 절대 좌표계에 대한 값이다.

물체를 유한 요소로 잘랐을 때, 각 요소 내에서 국소 좌표계(local coordinates system)에 의해 나타내어지는 변위는 다음과 같이 변위 보간 행렬(displacement interpolation matrix) $[H_e]$ 와 각 노드점에서의 변위 $\{\hat{u}\}$ 로 나타내어질 수 있다.

$$\{u_e(x, y, z)\} = [H_e(x, y, z)] \{\hat{u}\} \quad (3)$$

여기서 $[]$ 은 행렬 조작자(matrix operator)이고, e 는 유한 요소를 나타낸다. $[B_e]$ 을 변형율-변위 행렬(strain-displacement matrix)이라 할 때,

$$\{\epsilon_e(x, y, z)\} = [B_e(x, y, z)] \{\hat{u}\} \quad (4)$$

라고 할 수 있고, $[C_e]$ 를 탄성 행렬(elasticity matrix)이라고 할 때,

$$\{\tau_e\} = [C_e] \{\epsilon_e\} \quad (5)$$

라고 할 수 있으며, 식(3)-(5)를 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$[K] \{\hat{u}\} = \{R\} \quad (6)$$

여기서, $[K]$ 와 $\{R\}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 [K] &= \sum_e W_e [B_e]^T [C_e] [B_e] dW_e \\
 \{R\} &= \sum_e W_e [H_e]^T \{f_e\}_B dW_e \\
 &+ \sum_e G_e [H_e]^T \{f_e\}_S dG_e + \{F\}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

식(6)으로부터 $\{u\}$ 을 계산할 수 있고, 전체의 변형 에너지 S 는 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{2} \{ \bar{u} \}^T [K] \{ \bar{u} \}
 \tag{8}$$

3.4 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연계의 적자 생존에 의한 유기체의 진화 방법을 이용한 최적화 기법으로, 설계의 특성을 2진수로 코드화시켜 표현한 염색체로 나타낸다. 이 코드는 문자열로 이루어져 있는데, 각 위치에 있는 문자열은 유전자와 유사하게 염색체의 특징을 나타낸다. 유기체가 교배를 통하여 다음 세대의 염색체를 생성하며 진화하는 과정에서 형질이 우수한 염색체가 살아남는 과정을 흉내내어 최적화 과정을 만든 것이 유전 알고리즘이다.

본 연구에서 유전자가 가지는 정보는 치구의 후보 위치이다. 유한요소 해석을 위해서 피고정체의 유한요소 모델을 생성했었을 때 외부 경계의 노드들이 치구 위치의 후보들이다. 이 각각의 후보들은 Fig. 4에서 처럼 유전자로 매핑된다. 예를 들면, 치구 후보 위치의 개수가 16이면 하나의 유전자는 1에서 16까지 표현할 수 있는 2진수로 표현된다.

4개의 치구를 사용할 경우에는 염색체 안에 4개의 유전자가 있어야 한다. Fig. 5에 염색체의 구조를 나타내었다. 처음의 유전자는 클램프의 위치를 나타내고 다음 3개의 유전자는 로케이터의 위치를 나타낸다.

한 세대는 위의 염색체 구조를 가진 여러 개의 염색체로 이루어져 있고, 각각의 염색체들이 나타내는 치구의 후보 위치에 치구를 위치시켰을 때, 구속 여부 확인과 변형에너지를 계산하여 구속이 되면 변형 에너지값을 유전 알고리즘에 돌려주고 구속이 되지 않으면 큰 값을 돌려준다. 그러면 유전 알고리즘은 돌려 받은 값이 낮을 수록 다음 세대의 염색체 생성에 참여할 확률을 높여 여러 세대에 반복하면 세대가 지날수록 형질이 우수한 염색체는 계속 살아 남고 형질이 나쁜 유전자는 소멸되면서 전체적인 유전자의 형질은 개선된다.

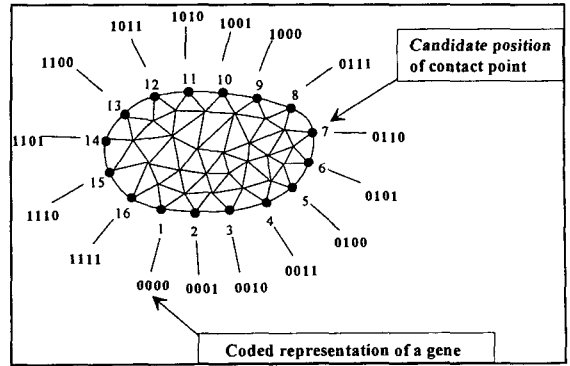


Fig. 4 A design variable is mapped to a gene

이 유전 알고리즘을 최적의 치구 위치를 찾기 위해 적용하면 처음 세대에서는 피고정체를 구속시키는 치구의 위치를 가진 염색체가 많지 않지만 세대가 지날수록 피고정체를 구속시키는 치구의 위치를 가진 염색체가 많아지고 변형 에너지도 감소한다.

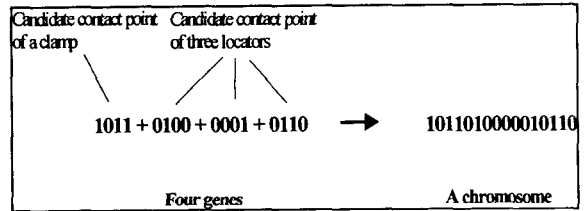


Fig. 5 The structure of a chromosome

4. 적용 예

본 장에서는 앞 장에서 설명한 변형 에너지를 이용하여 Fig. 6과 같이 5각형에 두 개의 외력이 작용하는 경우에 대한 치구의 위치를 결정해 보았다. 우선 결정할 것이 사용할 로케이터와 클램프의 수이다. 2차원 문제에서는 x, y 방향의 이동과 z 방향의 회전의 3개의 자유도가 있으므로 3개의 로케이터로 3개의 자유도를 고정할 수 있다. 그러나 가공 중 발생하는 진동이나 가공 후 가공 공구를 피고정체로 부터 분리시킬 때 운동이 발생할 수 있으므로 1개의 클램프로 이러한 발생 가능한 운동을 저지하여야 한다. 따라서 2차원 문제의 경우에는 3개의 로케이터와 1개의 클램프로 가능한 모든 운동을 저지할 수 있다. 다음은 피고정체의 유한요소 모델을 만들어 외부 경계를 따라 구속 조건을 위배하지 않는 치구 위치의 후보들을 만들어야 한다. Fig. 6와 같이 유한요소 모델에서 피고정체의 외부 경계를 따라 63개의 치구 위치의 후보를 만들었다. 전술한 바와 같이, 치구의 후보 위치의 구

속조건을 만족하지 못하는 곳에는 후보가 존재하지 않도록 한다. 피고정체의 물성치는 Table 1 과 같다. 두개의 힘을 동시에 고려한 최적의 치구의 위치는 Fig.7 과 같다.

Young's modulus	2.07E5 Pa
Poisson's ratio	0.3
Coefficient of friction	0.1
Fa	$10\sqrt{2}$ N
Fb	2 N

Table 1. Material property of Workpiece

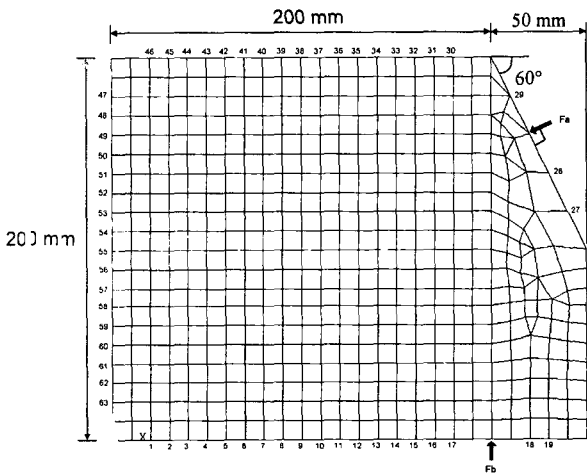


Fig. 6 FEM Model of Workpiece

본 연구에서는 유한요소 해석을 위해 IN2DIGO2 에서 상용 해석 프로그램인 ANSYS5.0 을 사용하였다.

변형 에너지가 제일 작은 경우의 치구의 위치를 피고정체의 외부 경계에 표시한 것이 Fig.7 과 같다. 원으로 표시된 것이 로케이터의 위치이고 사각형으로 표시된 것이 클램프의 위치이다. Fig. 8 은 세대가 지남에 따른 변형 에너지의 값을 나타내는 것이다. 이 적용 예에서는 열 세대동안의 변형 에너지 값을 비교해 보았는데 그래프의 각 점은 각 세대에서 가장 작은 변형 에너지를 나타낸다. 다섯 번째 세대 이후에 수렴을 하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

에너지의 개념을 이용하여 최적의 치구의 위

치를 찾는 새로운 방법을 제시하였다. 피고정체의 외부 경계 상의 위치들을 설계 변수로 해서 주어진 수의 치구를 사용하여 피고정체의 전체 변형 에너지가 최소가 되는 치구의 위치를 찾는 시스템을 개발하였다.

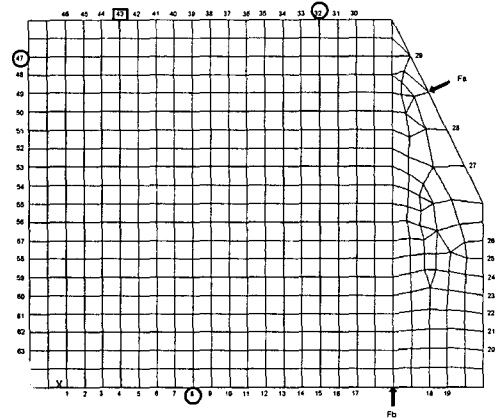


Fig. 7 Final Solution

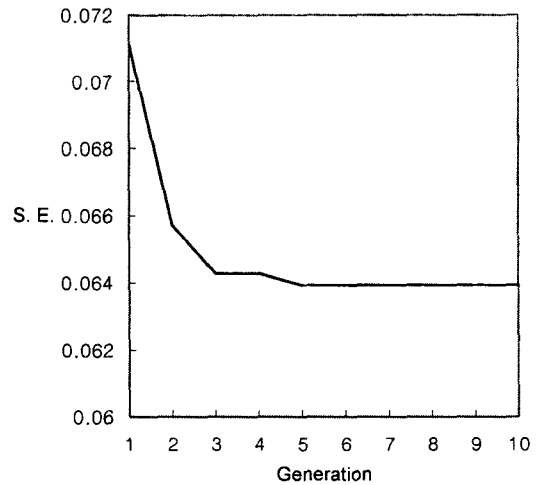


Fig. 8 Graph of generation vs strain energy

기존의 연구에서는 각기둥 형상의 피고정체에 대한 연구가 대부분이었으나 본 연구에서는 피고정체의 형상에 제한을 두지 않았기 때문에 곡면을 포함한 형태의 피고정체에 대해서도 적용할 수 있다. 또 대부분의 기구학적인 해석에서는 외부 경계를 다각형으로 근사화 시키고 하나의 선분에 하나의 치구만을 위치시킬 수 있었으나 본 연구에서는 하나의 선분에 여러 개의 치구를 위치시킬 수 있다.

본 연구에서 제시한 변형 에너지를 이용한 방법과 기구학적인 방법을 비교하면 다음과 같다. 기구학적인 해석 방법에서는 피고정체를 강체로 가정하므로 가공 시 발생할 피고정체의 변형을 고려할 수 없다. 재료의 특성상 변형이 심한 경우나 정밀 가공의 경우 가공 오차를 줄이기 위해 변형을 고려하여야 하는데 기구학적인 해석 방법에서는 변형이 무시된다. 또 기구학적인 해석에서는 가공 힘(machining force)을 고려하지 않고 치구들로만 정역학적 평형 상태를 조사한다. 또 대부분의 기구학적인 해석에서는 구속시 중요시 되는 마찰을 무시하기 때문에 실제 현상과 큰 오차를 가질 수도 있다. 본 연구에서는 기구학적인 해석 방법에서의 여러 문제점들을 해결하여 피고정체의 변형을 고려하였고 가공힘을 고려하여 가공 시 일어나는 변형을 고려하였다. 또 피고정체와 치구사이의 마찰을 고려하였다.

기존의 유한요소 방법을 이용한 방법들은 최적화라기 보다는 원하는 위치에 치구를 위치시켰을 경우, 최대 응력이나 최대 변위를 조사하는 단순히 유한요소 해석이거나 초기값을 입력하여 초기값 근처의 위치들을 조사하는 정도였다. 본 연구에서는 최적화를 위하여 치구가 위치할 수 있는 영역이 피고정체의 일부 영역이 아닌 외부 경계의 전체를 사용하였다.

본 연구를 통해 문제점으로 나타난 것은 유전 알고리즘이 변형 에너지의 변화율을 필요로 하지 않는 대신 여러 세대를 거치는 과정에서 많은 수의 계산을 하여야 수렴을 하기 때문에 계산 시간이 오래 걸린다는 것이다. 또 치구 후보 위치로서 피고정체의 외부 경계상의 연속적인 점들을 고려하지 않고 유한요소 모델의 노드만을 고려하여 최적화를 수행한 것도 문제가 될 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 최적화의 목적함수로 변형 에너지만을 계산하였는데 실제 가공에서 최대 응력을 최소화할 필요도 있고, 접촉점에서의 반발력도 고려해야 할 필요가 있을 것이다. 위의 여러 가지의 고려사항을 함께 고려할 필요도 있다. 이런 고려사항들에 비중을 준 새로운 목적 함수의 개발이 요구된다.

본 연구에서 변형 에너지의 개념을 이용하여 2 차원의 피고정체의 외부 경계에 치구 위치를 선정했으나 실제 가공에서는 3 차원의 피고정체를 고정시켜야 하기 때문에 3 차원으로의 확장이 요구된다. 3 차원에서의 문제점이 될 수 있는 것은 유한 요소의 개수가 많아짐에 따라 변형 에너지의 계산량도 많아진다는 점이다. 또 유전 알고리즘에서 수렴값을 찾기 위해 많은 세대를 거쳐야 하기 때문에 시간이 많이 걸릴 것이다. 최적화에 소요되는 시간을 줄일수 있는

새로운 알고리즘의 개발이 요구된다.

6. 참고문헌

- 1 D. T. Pham, M. J. Nategh and A. De Sam Lazaro, "A Knowledge-based Jig-and-Fixture Designers' Assistant," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 4, pp.26-45, 1989
- 2 A. S. Kumar, A. Y. C. Nee and S. Prombanpong, "Expert fixture-design system for an automated manufacturing environment," *Compute Aided Design*, Vol.24, No.4, pp.316-326, June 1992
- 3 Randy C. Brost and Kenneth. Y. Goldberg, "A Complete Algorithm for Synthesizing Modular Fixtures for Polygonal Parts," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, IEEE, pp.535-542, 1994
- 4 K. Lakshminarayana, "Mechanics of form closure," ASME Paper No.78-DET-32, 1978
- 5 Asada, H., and By, A. B., "Kinematic Analysis of Workpiece Fixturing for Flexible Assembly with Automatically Reconfigurable Fixtures," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-1(2), pp. 86-94, 1985
- 6 Bai, Y. and Rong, "Automated Modular Fixture Design," *Research Report*, Southern Illinois University at Carbondale , pp.681-688, 1993
- 7 R. S. Mattikalli, P. Kosla and Y. Xu, "Subassembly Identification and Motion Generation for Assembly: A Geometrical Approach," *Proceedings of IEEE Conference on System Engineering*, 1990
- 8 F. Reuleaux, *The Kinematics of Machinery*, Mac Millan, 1876, republished by Dover, 1963
- 9 Kim Jung-il, "Automation of Fixture Design," Ph. D. Thesis, Seoul Univ., 1995
- 10 Menassa, R. J. and DeVries, W. R., "Optimization Methods Applied to Selecting Support Positions in Fixture Design," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.113, pp.412-418, 1991
- 11 K. J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Civil Engineering and engineering mechanics series, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1982