

유전자 알고리즘을 이용한 최적의 가공 조건 결정

Determination of Optimal Machining Parameters Using Genetic Algorithm

최 경 현 · 육 성 훈

K. H. Choi and S. H. Yook

Key Words : Machining Parameters(가공조건), Genetic Algorithm.(유전자 알고리즘), Computer-Aided Process Planning(컴퓨터 공정계획), Numerical Control Machine(NC 공작기계)

Abstract : The determination of the optimal machining parameters in metal cutting, such as cutting speed, feed rate, and depth of cut, is an important aspect in an economic manufacturing process. The main objective in general is either to minimize the production cost or to maximize the production rate. Also there are constraints on all the machining operations which put restrictions on the choice of the machining parameters. In this paper as an objective function the production cost is considered with two constraints, surface finish and cutting power. Genetic Algorithm is applied to determine the optimum machining parameters, and the effectiveness of the applied algorithm is demonstrated by means of an example, turning operation.

1. 서 론

소비자의 욕구가 다양해지고, 제품의 라이프 사이클이 단축됨에 따라 현대의 생산 형태는 다품종 소량체제로 변화하고 있기 때문에, 생산시스템은 제품 다양화에 적용할 수 있는 유연성이 필수적으로 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유연제조시스템(Flexible Manufacturing System)이 등장하였으며, NC공작기계는 산업용 로봇과 더불어 유연제조시스템의 핵심적인 구성요소이다.

NC공작기계의 절삭 가공시 최적의 가공조건을 결정하는 것은 생산시스템의 운용에 있어서 경제적인 측면을 고려할 때 매우 중요한 일이다. 최적의 가공 조건의 결정은 생산비용의 최소화 또는 가공시간의 최소화가 될 수 있으며, 실제 가공에 있어서 절삭 가공 조건을 제한적으로 선택하게 하는 제한 요소들이 존재한다. 이러한 제한요소들은 공구의 수명, 공구의 동역학적인 측면, 요구되는 표면거칠기와 같은 다양한 고려사항들에 의해서 발생되어 진다. 이러한 모든 요구사항들은 생산비용의 최소화 및 가공시간의 최소화와 같은 가공 문제의 해결책을 찾는 데 고려하여, 단순화된 수학적 모델을 이용하여 최적의 가공 조건을 결정하

는 접근법들이 연구되었다. Wu and Ermer¹⁾는 공구-수명 방정식에서 확률적 조건을 도입하여 선반가공에 대한 최적의 가공조건을 결정하였으며, Barrow²⁾와 Santos³⁾는 공구수명에 대한 확장된 테일러 방정식을 제안하여 절삭조건들에 대한 중요한 결정자가 되어질 수 있다고 서술하였다. Iwata 등⁴⁾은 목적함수와 제약조건 of 확률적인 특성을 고려한 최적의 절삭조건을 결정하는데 있어서 chance-constrained 프로그래밍 개념을 적용한 해석적인 방법을 제안하였다. Chang⁵⁾은 밀링가공에 대한 수학적 모델을 제안하고 다섯 개의 주요 제어변수들을 정의하였으며, Tolouer-Rad⁶⁾는 단일공구 혹은 다공구용 NC밀링에 대하여 최적 기법을 사용한 절삭 조건 결정시스템을 개발하였다. 또한 기하학적인 프로그래밍과 목표 프로그래밍과 같은 많은 수학적 프로그래밍 방법들이 제안되었는데, Ermer⁷⁾는 기하학적인 프로그래밍을 이용하여 제한요소가 있는 가공의 경제학적인 문제를 해결하였고, Hati⁸⁾와 Philipson⁹⁾은 기계가공의 최적 절삭 가공조건들을 결정하는데 수학적 프로그래밍 기법과 목표 프로그래밍 기법에 대해 언급하였다.

그러나 이러한 수학적 모델을 이용한 최적화 기법은 초기 설정값에 따라 국소 최적값에 수렴하거나 다차원공간에서 복잡한 비선형 함수의 해를 찾는 것은 매우 어렵거나 경우에 따라서는 불가능할 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 연속성, 미분

접수일 : 1999년 8월 2일

최경현 : 제주대학교 기계에너지생산공학부

육성훈 : 부산대학교 지능기계공학과 대학원

가능성 등과 같은 탐색공간에 대한 제약으로부터 자유롭고 목적함수 외에는 탐색공간에 대한 사전 지식이 필요하지 않으며 매우 크고 복잡한 공간이라도 전역해 쪽으로 수렴해 갈 수 있는 유전자 알고리즘을 이용하여 기계가공에 대한 특정한 구속 조건하에서의 최적의 목적함수를 얻을 수 있는 가공조건을 찾는 연구를 수행하였다.

2. 기본적인 가공 파라미터

2.1 피드와 이송률

피드 f 는 가공시 공구와 가공물의 측면의 상대적 운동에 의해 정의될 수 있다. 이것은 가공시 발생하게 되는 칩의 두께에 영향을 받는다. 선반과 드릴링 가공에서 가공물(선반)과 공구(드릴링)의 회전당 절삭날의 전진량으로 정의되어지며, 단위는 $i\text{pr}$ (inch per revolution)이다. 밀링가공에 있어서 피드는 커터(cutter) 이의 회전당 커터의 전진량으로 정의된다.

이송률 V_f 는 피드의 속도로 정의되며, 단위는 $i\text{pm}$ (inch per minute)이다. 수학적으로 이송률은 다음과 같이 표현된다.

$$V_f = F n N$$

이때, n = 밀링커터의 잇수이며 드릴링과 선삭 일때 n 의 값은 1이다.

N = 커터(드릴링과 밀링) 또는 공작물(선삭)의 회전속도

2.2 절삭속도

절삭속도 V 는 공구와 공작물간의 최대 선속도로 정의되어진다. 절삭속도는 공작물 또는 공구의 지름과 회전속도의 함수로 결정되어지며, 다음과 같이 수학적으로 표현된다.

$$V = \frac{f D N}{12}$$

이때, V = 절삭속도(feet per minute)

D = 공작물지름(inch)

N = 회전속도(rpm)

2.3 절삭깊이

칩의 넓이는 절삭깊이에 의해 결정되어진다. 황삭 가공 중에 절삭깊이는 보통 마무리 가공보다는 매우 크며, 선삭에 대하여 절삭깊이는 공작물의 내경과 외경간의 차이의 반이다. 수학적으로 이것은

다음과 같이 나타내어진다.

$$d_p = \frac{D_o - D_i}{2}$$

이때, d_p = 절삭깊이(inch)

D_o = 외경(inch)

D_i = 내경(inch)

3. 유전자 알고리즘의 최적절삭 문제에 적용

3.1 유전자 알고리즘

일반적인 유전자 알고리즘의 구조는 Fig. 1과 같으며, 유전자 알고리즘은 자연 진화의 법칙인 적자 생존과 자연 도태의 원리를 토대로 하여 정립한 최적화 알고리즘이다. 자연 진화의 법칙에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률이 크며, 교배와 돌연변이 과정을 거쳐 더 좋은 방향으로 진화해 나가고, 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다. 이와 같은 진화의 과정을 되풀이하면 결국 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들이 형성될 것이다. 유전자 알고리즘은 이러한 자연 진화 법칙을 복잡한 최적화 문제에 적용하는 하나의 방법으로, 해석 영역에 다수에 개체들을 분포시켜 목적함수 값과 제한 조건의 위반 정도에 따라 각 개체의 적합성을 판단하게 된다. 개체의 적합성이 좋은 개체들이 다음 단계에 보다 많이 형성되어, 계산이 진행될수록 전체 개체들은 재생성, 교배, 돌연변이 등의 과정을 통해 적합성이 좋은 방향으로 탐색이 진행되게 된다¹⁰⁾.

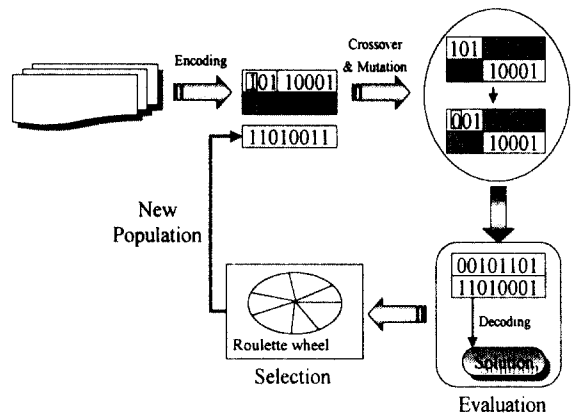


Fig. 1 The process of GA

유전자 알고리즘은 해의 초기 모집단을 생성하고 모집단의 스트링을 교차나 돌연변이 하여 변형된 스트링을 얻는다. 세대가 갈수록 적합도가 낮은 해는 제거되고 높은 적합도를 가지는 스트링을 임의의 점에서 교차하여 재생산한다¹¹⁾.

3.2 평가함수

본 논문에서는 주어진 가공 조건에 대하여 최적 절삭조건을 구하기 위해서 평가함수를 네 개의 비용성분으로 구성되는 생산비용 함수를 채택하였다. 선반가공에 있어서의 단위별 평균 생산비용은 가공비용과 공구비용, 공구교환비용 그리고 핸들링비용의 합으로 이루어진다.

$$(1) \text{가공비용} = C_o t_m$$

C_o 는 분당 소요되는 가공비용이며 t_m 은 하나의 공작물을 가공하는데 걸리는 시간이다.

$$(2) \text{공구비용} = C_t \frac{t_m}{T}$$

C_t 는 절삭날 당 공구비용이며, T 는 공구수명이고 $\frac{t_m}{T}$ 은 공작물 당 필요한 공구날의 수이다.

$$(3) \text{공구교환 비용} = C_o t_c \frac{t_m}{T}$$

t_c 는 공구교환시간이고 단위는 min/edge이다.

$$(4) \text{핸들링 비용} = C_o t_h$$

t_h 는 핸들링 시간이고 단위는 min/edge이다.

따라서 목표함수는 공작물 당 생산비용으로써 다음과 같이 주어진다.

$$C_u = C_o t_m + C_o t_h + \frac{t_m}{T} (C_o t_c + C_t) \quad (1)$$

가공시간은 하나의 공작물을 가공하는데 걸리는 총시간이며, 일정한 절삭깊이에 대해서는 다음식으로 주어진다.

$$t_m = \frac{IDL}{12Vf} \quad (2)$$

이때, D 는 공작물의 지름(inch)이고, L 은 축 방향 절삭길이(inch)이며, V 는 절삭속도(sfm), f 는 피드(ipr)이다.

일반화된 공구-수명방정식은 다음과 같이 주어진다¹²⁾.

$$VT^n f^m \phi^x = C_c \quad (3)$$

여기서, ϕ 는 주절삭날각(principal cutting edge

angle)이다

식(3)에서 공구수명 T 에 관하여 정리하면,

$$T = (C_c f^{-m} \phi^{-x} V^{-1})^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

로 구해진다.

식(2)에 보여진 가공시간 t_m 과 식(4)에 나타난 공구수명 T 를 식(1)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_u = C_o t_h + \frac{C_o IDL}{12} [V^{-1} F^{-1} + \frac{V^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{1}{n}-1} t_t}{\phi^{\frac{-x}{n}} C_c^{\frac{1}{n}}}] + \frac{C_t DL}{12 \phi^{\frac{-x}{n}}} \quad (5)$$

$$[\frac{V^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{m}{n}-1}}{C_c^{\frac{1}{n}}}] = C_o t_h + \frac{C_o IDL}{12} V^{-1} + V^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{m}{n}}$$

$$[\frac{C_o IDL t_t}{12 \phi^{\frac{-x}{n}} C_c^{\frac{1}{n}} f} + \frac{C_t IDL}{12 \phi^{\frac{-x}{n}} C_c^{\frac{1}{n}} f}]$$

주어진 $\phi, L, D, t_m, C_o, C_t, t_h, C_c$ 에 대하여 식(5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Min } C_u = K_1 + \frac{K_2}{f} V^{-1} + \frac{K_3}{f} V^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{m}{n}} \quad (6)$$

여기서, $K_1 = C_o t_h$

$$K_2 = \frac{C_o IDL}{12}$$

$$K_3 = \frac{C_o IDL t_t}{12 \phi^{\frac{-x}{n}} C_c^{\frac{1}{n}}} + \frac{C_t IDL}{12 \phi^{\frac{-x}{n}} C_c^{\frac{1}{n}}}$$

이다.

3.3 구속함수

유전자 알고리즘에서 평가함수의 최적치를 구하려면 절삭 조건들에 부여된 제한요소들인 구속함수가 고려되어야 한다. 제한요소들은 표면거칠기, 사용 가능한 동력, 발생하는 힘, 최소 공구수명과 같은 여러 가지의 고려사항으로부터 발생한다.

(1) 표면거칠기

표면거칠기 방정식은 단지 경험식으로만 나타내어져 왔다. Oslen¹²⁾은 표면거칠기를 경험적인 결과

에 의해 피드와 절삭속도의 함수로 표현하였는데, 표면거칠기의 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$R_a = 5.1 \times 10^{-9} f^{4.54} (\mu\text{in}), f > 0.03(\text{ipr}) \quad (7)$$

$$R_a = 1.36 \times 10^{-8} f^{1.004} V^{-1.52} \mu\text{in.} \\ \text{for } 75 \leq V \leq 750 \text{ and } f > 0.03(\text{ipr}) \quad (8)$$

$$R_a = 7.34 \times 10^{-4} f^{1.54} (\mu\text{in}), f > 0.03(\text{ipr}) \quad (9)$$

표면거칠기의 제약 조건은 다음과 같다.

$$R_a \leq R_{\max}$$

여기서 R_a : 중심선 평균거칠기, R_{\max} : 최대 높이 거칠기이다.

(2) 절삭속도의 경계치

절삭속도는 다음과 같이 최고값과 최저값의 사이에 존재해야만 한다.

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$$

(3) 피드의 경계치

피드는 다음과 같이 상한과 하한의 사이로 제한된다.

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$$

(4) 절삭력의 제약

높은 절삭력은 공작물의 과도한 변형의 원인이 되거나 절삭가공시 막대한 동력을 필요로 하기 때문에 가해지는 절삭력에 대해 제한을 둘 필요가 있다. 절삭력 F_c 는 다음과 같이 제한된다.

$$F_c \leq F_{\max}$$

(5) 동력의 제약

절삭동력은 사용 가능한 최대 동력을 초과하여서는 안된다. 따라서 제한값은 다음과 같다.

$$P_c \leq P_{\max}$$

(6) 공구수명의 경계치

공구수명의 경계는 다음과 같이 주어진다.

$$t_{\min} \leq T \leq t_{\max}$$

3.4 실험 데이터

최적의 가공 조건을 구하기 위한 임의의 평가함수에 대한 실험 데이터는 다음과 같다.

$$Bhn = 195 \quad \Phi = 60\text{degree} \quad D = 6\text{in} \quad L = 8\text{in}$$

$$C_o = \$0.1/\text{min} \quad C_t = \$0.5/\text{cutting edge}$$

$$t_h = 2.0\text{min} \quad t_c = 0.5\text{min}$$

$$d = 0.2 \text{ in} \quad n = 0.25 \quad m = 0.29 \quad x = 0.35$$

위의 값들을 식(6)에 대입하여 정리하면 평가함수는 다음과 같이 간단히 된다.

$$C_u = 0.20 + 1.26 f^{-1} V^{-1} + 1.779 \\ \times 10^{-8} V^3 f^{0.16} \quad (10)$$

위의 목표 함수에 대한 제약 조건들은 다음과 같다.

(1) 사용가능한 속도 및 피드

$$0.001 \leq f \leq 0.09(\text{ipr})$$

$$18 \leq N \leq 540(\text{rpm})$$

(2) 표면거칠기

속도와 피드에 근거하여 표면거칠기 방정식은 식(7), (8), (9) 중에서 다음과 같이 선택되어진다.

$$R_a = 1.36 \times 10^{-8} f^{1.004} V^{-1.52}$$

$R_{\max} = 100$ 이라 두면 표면거칠기에 대한 제약 방정식은 $1.36 \times 10^{-8} f^{1.004} V^{-1.52} \leq 100$ 이 된다.

(3) 동력

$$\text{동력의 제약 방정식은 } 3.58 f^{0.78} V^{0.91} = (HP)\eta$$

이며, 이때 HP = 동력(마력)이고, η 은 효율이다.

$(HP)\eta = 5 \text{ HP}$ 이라 하면 동력에 대한 제약 방정식은 $3.58 f^{0.78} V^{0.91} \leq 5$ 이다.

4. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 수행 과정 및 결과

4.1 최적화 수행과정

유전자 알고리즘을 이용해 선반가공에서 절삭 조건 중 피드 f 와 속도 V 의 최적치를 결정하기로 하고 이를 위해 먼저 초기 모집단에서 사용할 염색체 길이를 결정한다. 염색체는 주로 2진 bit로 나타내는데 여기에서는 20bit로 결정하였다. 또한, 초기 모집단을 임의로 생성시키는데 본 논문에서는 모집단의 크기를 50으로 정하고 모집단의 크기 만큼 2진수의 1차원 배열로 난수 발생기를 이용하여 랜덤하게 생성시킨다. 교배과정은 One-Cut-Point방법이 사용되어지며 이는 각 염색체에 대한 무작위 수를 생성하여 교차의 확률 P_c 를 0.7로 하고 P_c 보다 상대적으로 적은 값을 가지는 염색체를 교차시켰다. 돌연변이 과정은 bit-by-bit를 기본으로 수행되며 전체 모집단의 bit에 대하여 0과 1사이의 무작위 수를 생성하여 돌연변이 확률 P_m 을 0.01로 하고 P_m 값 보다 작은 값을 가지는 bit에 대하여 돌연변이를 행하였다.

적합도 평가는 제약조건을 만족하는 염색체에 대하여 식(10)의 목적함수의 값을 계산하고 만족

하지 못하는 염색체에 대하여서는 큰 패널티를 준다. 이런 과정을 거쳐 다음 세대에 대한 새로운 모집단을 생성하게 되는데 선택 전략으로 결정론적 선택(deterministic selection)을 적용하였다. 즉 모든 부모 염색체와 교배 및 돌연변이 과정을 통해 생성된 염색체를 내림차순으로 정렬하여 처음의 모집단 수 50만쯤 새로운 모집단을 생성한다. 이런 과정을 통하여 2000세대까지 반복 수행하여 최적 절삭 조건을 결정하였다.

4.2 최적화 결과

유전자 알고리즘을 이용한 최적화 탐색의 결과는 Fig. 2 와 같다. 유전자 알고리즘을 수행하여 구하여진 최적의 피드는 0.00561(ipr) 이고 절삭속도는 314.5(fpm)이었다. 그림에서도 알 수 있듯이 1000세대 정도 수행한 후 값이 수렴함을 알 수 있다.

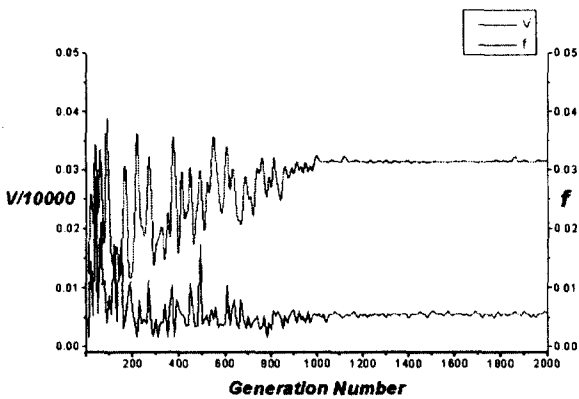


Fig. 2 The result of GA by generation

4.3 유전자 알고리즘의 파라미터 조정

다른 최적화 알고리즘과 마찬가지로 유전자 알고리즘도 탐색 성능에 미치는 여러 가지 파라미터들이 있는데 모집단의 크기와 교배확률, 돌연변이 확률이 여기에 속한다. 주어진 환경에서 최적의 성능을 얻기 위한 이 파라미터들의 조정은 대단히 중요하다. 본 논문에서는 이런 파라미터를 변화시켜 가면서 최적의 파라미터를 선정하였다. Fig. 3 은 세대수를 1000으로 하고 다른 파라미터는 고정시키고 교배확률을 변화시키면서 유전자 알고리즘을 실행한 결과이다. 이 결과로 미루어 볼 때 교배 확률이 0.45에서 1사이에서 정확한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 돌연변이 확률을 변화시키면서 유전자 알고리즘을 수행한 결과이다. Fig. 4에서 알 수 있

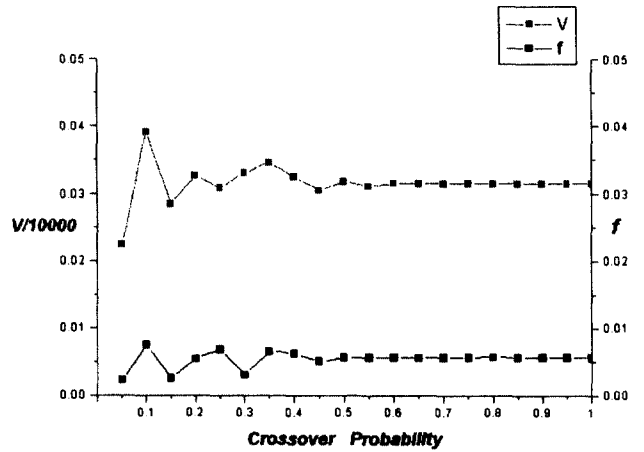


Fig. 3 The result of GA by crossover

듯이 돌연변이 확률이 0에서 0.01사이일 때 정확한 값을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 모집단의 크기를 변화시키면서 유전자 알고리즘을 실행한 결과이다. 이 결과로 모집단 크기가 30 이상일 때 정확한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

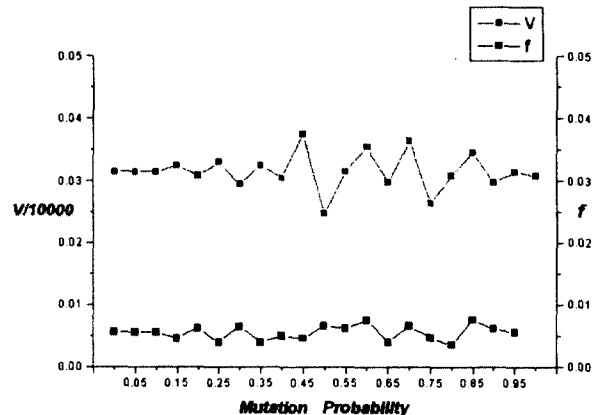


Fig. 4 The result of GA by mutation

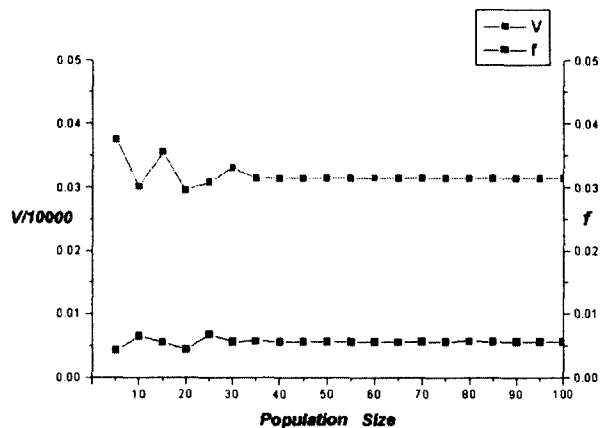


Fig. 5 The result of GA by population

5. 결론

본 논문에서는 주어진 가공 조건에 대하여 최적 절삭조건 문제를 다루기 위해 평가함수로 생산비용 함수를 채택하여 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 절삭 조건의 해를 도출하였다. 생산비용함수는 가공비용, 공구비용, 공구교환비용, 이송비용으로 구성되었으며, 정확한 절삭 조건을 위해 표면 거칠기와 가공 동력이 중요한 제약함수로 도입하여 생산비용을 최소화하도록 하였다.

절삭 조건의 최적화에 유전자 알고리즘을 적용할 때 모집단의 크기, 교배확률, 돌연변이 확률 등의 값을 결정하는데 경험적 직관력에 의하는데, 본 연구에서 이 들의 최적 값을 구하였다. 또한, 유전자 알고리즘은 전역적 최적값을 얻을 수 있고, 그 적용에 있어 기존의 최적화 기법에 비해 거의 제한 없이 사용할 수 있어, 그 적용성이 넓다고 할 수 있다.

참고문헌

1. S. M. Wu, and D. S. Ermer, "Maximum profit as the criterion in the determination of the optimum cutting conditions", Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME, Vol. 88, pp. 435~442, 1966
2. G. Barrow, "Tool-life equations and machining economics", Proceedings of the 12th International Machine Tool Design and Research conference, Manchester, 15-17 September, pp. 481~49, 1971
3. A. L. B. Dos Santos et al., "An optimisation procedure to determine the coefficients of the extended Taylor's equation in machining", Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 17~31, 1999
4. K. Iwata, Y. Morutsu, and F. Oba, "Optimization of cutting conditions for multi-pass operations considering probabilistic nature in machining processes", Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, Vol. 98, pp. 210~217, 1977
5. T. C. Chang, R. A. Wysk, R. P. Davis, and B. Choi, "Milling parameter optimization through a discrete variable transformation",

- International Journal of Production Research, Vol. 20, No. 4, pp. 507~516, 1982
6. M. Tolouei-Rad and I. M. Bidhendi, "On the optimization of machining parameters for milling operations", Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 37, pp. 1~16, 1997
7. D. S. Ermer, "Optimization of the constrained machining economics problem by geometric programming", Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, Vol. 93, pp. 1067~1072, 1971
8. S. K. Hati, and S. S. Rao, "Determination of optimum machining conditions," Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol. 99, pp. 354~359, 1976
9. R. H. Philipson, and A. Ravindran, "Application of goal programming to machinability data optimization", Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME, Vol. 100, pp. 286~291, 1978
10. 황상문, 성활경, "유전자 알고리즘을 이용한 동역학적 구조물의 최적설계", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, January, Vol. 16, No. 1, pp. 116~123, 1999
11. 공성곤 외 4, "유전자 알고리즘", 도서출판 그린, 1996
12. K.F. Oslen, "Surface Roughness as a function of cutting conditions when turning steel", Machine Tool and Production Trends, Engineering Proceedings, pp. 149~160, 1965