

# 트래버스 연삭의 최적 제어시스템

최정주<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 고기능성밸브기술지원센터

## Optimal Control System of Traverse Grinding

Jeongju Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Technical Center for High Performance Valves, Dong-a University

**요 약** 본 논문에서는 DEA(Differential Evolution Algorithm)기법을 이용하여 트래버스 연삭의 최적 조건을 선정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 최적 연삭 조건 선정을 위한 가격함수는 가공 경비, 생산율 및 표면 거칠기 등의 다중 함수식을 이용하였다. 또한 연삭 조건에 대한 구속 조건으로 열 손상 효과, 가공 틀의 강성, 연삭 휠 마모 상수 및 표면 거칠기 등을 고려하였다. 알고리즘의 구현은 산업현장에서 널리 사용되는 LabView소프트웨어를 사용하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 GA알고리즘의 결과와 비교하여 검증하였다.

**Abstract** In this paper, the algorithm to determine the optimal condition of traverse grinding is proposed by using differential evolution algorithm(DEA). The cost function to determine the optimal grinding condition is designed with considering process cost, production rate, surface roughness. Also, the constraint conditions for grinding such as thermal damage effect, machine tool stiffness, wear parameter of grinding wheel, surface roughness are considered. The algorithm is implemented with LabView software which is widely used at the industrial field. The performance of proposed algorithm is verified by comparing with the result of genetic algorithm(GA) through computer simulation.

**Key Words** : Optimal control, Grinding, Artificial intelligent

### 1. 서론

연삭은 기계가공에 있어 최종적으로 수행하는 공정으로 가공물의 품질에 직접적인 영향을 준다. 따라서 최상의 가공 품질 및 생산성을 높일 수 있는 가공 조건에 대한 연구는 연삭 분야에서 상당히 중요한 역할을 한다. 연삭 방법에는 공작물의 형상에 따라 다양한 가공 방법이 있으나, 공작물의 길이가 긴 외형 연삭에는 트래버스(traverse) 연삭 방법이 사용된다. 연삭 공정은 가공물에 영향을 주는 많은 변수 및 구속 조건을 내포하고 있어, 최적의 가공 조건을 선정하기는 상당히 어렵다[1]. 최근의 몇몇 연구자들에 의해 가공 시간 또는 가공비의 최적화를 위한 알고리즘이 제안되었다[2, 3]. 그러나 이러한

접근법은 가공시간 또는 비용에 대한 개별적인 최적화를 수행한 것으로 두 가지 이상의 최적함수를 만족하는 최적화 방법이 필요하다. 뿐만 아니라, 비선형 가격함수 및 구속조건을 가지는 시스템에 대한 최적화 방법은 인공지능알고리즘을 이용하여 다수의 연구자들이 수행하였으나 최적화에 과도한 시간 소요와 로컬 최적해를 구하는 단점이 있었다[4-6]. 따라서 본 논문에서는 다중 가격함수를 가지는 트래버스 연삭의 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 연삭 가공비, 생산율 지표 그리고 가공물의 표면 거칠기를 고려한 다중 가격함수를 선정하였다. 선정된 가격함수에 대한 최적해는 DEA를 이용하여 최적 연삭 조건을 구하였다.

본 논문은 지식경제부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Jeongju Choi (Dong-a University)

Tel: +82-10-8664-3708 email: jchoi72@dau.ac.kr

Received September 17, 2012 Revised October 31, 2012 Accepted December 6, 2012

## 2. 가격함수 및 구속조건

### 2.1 최적 연삭조건 선정을 위한 가격함수

최적의 연삭 공정 설계를 위해서는 공정을 평가하기 위한 가격함수를 우선 선정하여야한다. 가격함수의 선정에 따라 최적 해는 상이한 값을 가지므로 본 논문에서는 생산에 필요한 경비, 생산성 그리고 가공품의 품질을 동시에 고려할 수 있는 다중 가격함수를 고려하였다. 생산에 필요한 경비는 식 (1)과 같이 개당 연삭 소요 경비 식을 이용하였다[7].

$$J_1 = \frac{M_c}{60p} \left( \frac{L_w + L_e}{1000v_w} \right) \left( \frac{b_w + b_e}{f_b} \right) \quad (1)$$

$$\times \left( \frac{a_w}{a_p} + S_p + \frac{a_w b_w L_w}{\pi d_e b_s a_p G} \right)$$

$$+ \frac{M_c}{60p} \left( \frac{L_d}{V_r} + t_1 \right) + \frac{M_c}{60} \frac{t_{ch}}{N_i}$$

$$+ \frac{M_c}{60p} \frac{1}{N_d} \frac{\pi b_s d_e}{1000s_d v_s}$$

$$+ C_s \left( \frac{a_w b_w L_w}{pG} + \frac{\pi a_d b_s D_e}{pG} \right) + \left( \frac{C_d}{pN_{td}} \right)$$

여기서  $M_c$  는 시간당 소요경비 (\$/h),  $p$ 는 공작물의 수,  $L_w$ 는 공작물의 길이 (mm),  $L_e$ 는 여유연삭 길이 (mm),  $b_w$ 는 공작물의 폭(mm),  $b_e$ 는 여유연삭 폭(mm),  $f_b$ 는 cross feed rate(mm/pass)  $a_w$ 는 전체 가공 두께,  $a_p$ 는 다운피드(mm/pass),  $S_p$  스파크아웃 수,  $D_e$ 는 연삭 휠 지름(mm),  $b_s$ 는 연삭 휠 폭(mm),  $G$ 는 연삭 ratio,  $L_d$ 는 연삭 휠의 아이들(idle) 길이(mm),  $V_r$ 은 연삭 휠 아이들 속도(mm/min).  $t_1$ 은 공작물 탈부착 시간(min),  $t_{ch}$ 는 공구 장착시간(min),  $N_i$ 는 배치 사이즈,  $N_d$ 는 드레싱 사이 가공물의 수,  $C_s$  연삭 휠 경비(원/ $mm^3$ ),  $N_{td}$ 는 드레싱 톨 수명 내 가공물의 수,  $C_d$ 는 드레싱 경비(원)이다.

생산 비용과 더불어 생산성에 대한 고려는 식 (2)와 같이 생산율을 가격함수에 고려하였다[7].

$$J_2 = 94.4 \frac{(1 + 2a_d/3s_d) s_d^{0.5789} v_s}{D_e^{0.1414} \eta^{0.47} d_g^{0.1316} R_c^{1.4211} (v_w/v_s)^{0.1579}} \quad (2)$$

여기서  $a_d$ 는 드레싱 깊이(mm),  $s_d$ 는 드레싱 리드(mm/rev),  $v_s$ 는 연삭 휠 속도(m/min),  $\eta$ 는 휠 분당 퍼센터(%),  $v_w$ 는 공작물의 속도(m/min),  $R_c$ 는 공작물 경도,

$d_g$ 는 그리드 사이즈(mm)이다.

마지막으로 고려한 가격함수는 연삭된 공작물의 표면 거칠기( $R_c$ )를 식 (3)과 같이 고려하였다[8].

$$J_3 = R_a = \begin{cases} 0.4587 T_{ave}^{0.30} & \text{for } 0 < T_{ave} < 0.245 \\ 0.7866 T_{ave}^{0.72} & \text{for } 0.254 < T_{ave} < 2.54 \end{cases} \quad (3)$$

여기서

$$T_{ave} = 12500 \frac{d_g^{0.5926} a_p^{0.7037}}{D_e^{0.2963}} \left( 1 + \frac{a_d}{s_d} \right) s_d^{0.5926} \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^{0.5926} \quad (3)$$

따라서, 최종적으로 선정한 가격함수는 식(4)와 같다.

$$J = w_1 \frac{J_1}{J_1^*} - w_2 \frac{J_2}{J_2^*} + w_3 \frac{J_3}{J_3^*} \quad (4)$$

여기서  $w_i$  ( $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ )는 가중치 벡터,  $J_i^*$  ( $i = 1, 2, 3$ )은 각 가격함수의 임계값이다.

### 2.2 트래버스 연삭의 구속 조건

최적 연삭 공정 중 가공물의 품질과 생산성 등을 고려하기 위해서는 연삭 조건에 대한 몇 가지 구속 조건이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 열에 의한 가공물의 손상 구속, 연삭 휠 마모에 대한 구속, 가동 톨에 대한 구속 및 가공물의 표면 거칠기에 대한 구속 조건을 고려하였다.

연삭공정은 단위체적 당 높은 에너지 밀도를 가진다. 이러한 에너지는 연삭 공정을 통해 열로 발산하게 된다. 열에 의해 공작물은 열 손상을 입게 되므로 이에 대한 구속조건을 에너지 식을 이용하여 식 (5)와 같이 고려하였다[9].

$$U = 13.8 + \frac{9.64 \times 10^{-4} v_s}{a_p V_w} \quad (5)$$

$$+ \left( 6.9 \times 10^{-3} + \frac{2102.4 v_w}{D_e v_s} \right) \frac{K_u v_s L_w a_w}{v_w D_e^{0.5} a_p^{0.5}} \frac{v_s D_e^{0.5}}{v_w a_p^{0.5}}$$

여기서  $K_u$ 는 마모상수이다.

이와 관련해서 임계 연삭 에너지는 다음과 같이 선정하였다[9].

$$U^* = 6.20 + 1.76 \frac{D_c^{0.25}}{a_p^{0.75} v_w^{0.5}} \quad (6)$$

따라서 열 손상을 고려한 구속 조건은 다음과 같다 [10].

$$U \leq U^* \quad (7)$$

연삭 공정으로 인한 연삭 휠 마모에 대한 구속은 식 (8)과 같이 연삭 휠 마모 파라미터 식 과 생산율 식 (2)를 이용하여 식 (9)와 같이 고려하였다[9~10].

$$W_w = \frac{K_a a_p d_g^{0.1316} R_c^{1.4211}}{2.0936 D_c^{0.0303}} \times \frac{(1 + a_d/s_d) s_d^{1.4211} (v_s/v_w)^{0.1579} v_w}{1 + 2a_d/3s_d} \quad (8)$$

$$J_2/W_w \geq G \quad (9)$$

연삭 공정 중 발생하는 연삭 채터링은 공작물의 가공 결과에 악영향을 미치므로 이에 대한 구속 조건을 고려하여야 한다. 이를 위해 연삭 강성( $K_c$ )와 휠 마모 강성( $K_s$ )를 이용하여 과도한 채터링을 피하기 위한 구속 조건을 식 (12)와 같이 고려하였다[9~10].

$$K_c = \frac{1000 D_c^{0.1414} W_b d_g^{0.1316} R_c^{1.4210} f_b (v_w/v_s)^{0.8421}}{94.4 (1 + 2a_d/3s_d) s_d^{0.5789}} \quad (10)$$

$$K_s = \frac{1000 D_c^{1.2/a_d - 0.1414} a_d^{0.38} f_b}{K_a a_p d_g^{0.1316} R_c^{1.4210}} \times \frac{(1 + 2a_d/3s_d) (v_s/V_w)^{0.8421}}{(1 + a_d/s_d) s_d^{1.4210}} \quad (11)$$

$$\frac{1}{2K_c} \left(1 + \frac{v_w}{v_s G}\right) + \frac{1}{K_s} \geq K_{sm}^* \quad (12)$$

여기서  $K_{sm}^*$  은 임계 강성 값이다.

끝으로 공작물의 표면 거칠기에 대한 구속 조건은 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 선정하였다.

$$R_a \leq R_a^* \quad (13)$$

여기서  $R_a^*$ 은 표면 거칠기의 임계값이다.

### 3. DEA를 이용한 최적 연삭 제어

트래버스 연삭 공정에서 영향을 주는 많은 변수들이 있지만, 이 중 연삭 공정에 지배적으로 영향을 주는 주요 변수는 연삭 휠 속도( $v_s$ ), 공작물의 속도( $v_w$ ), 드레싱 깊이( $a_d$ ) 그리고 드레싱 리드( $s_d$ )이다. 따라서 본 논문에서는 최적 연삭 공정 선정을 위한 상태 변수를 다음과 같이 선정하였다.

$$\bar{x} = [v_s \ v_w \ a_d \ s_d]' \quad (14)$$

최적의 연삭 가공 효율을 높이기 위해서 앞서 설계한 가격합수와 연삭 구속 조건을 만족하는 해를 구해야 한다. 최적의 해를 구하기 위해 본 논문에서는 DEA를 이용하였다. DEA를 설계하기 위해서 상태 변수  $\bar{x}$ 를  $p_n$ 개의 균일 분포 랜덤 값(Uniformly distributed random number)으로 초기화 하였다.

$$\bar{x}_i^c = [x_{i1}^c \ x_{i2}^c \ x_{i3}^c \ x_{i4}^c]' \quad (15)$$

여기서  $i = 1, 2, \dots, p_n$  이고,  $x_{ij}^c$  ( $j = 1, \dots, 4$ )는 부모세대의  $v_s, v_w, a_d$  그리고  $s_d$ 이다.

부모세대를 통해 생산되는 자손세대는 돌연변이 연산을 통해 구할 수 있다. 돌연변이 연산은 부모 세대에서 중복되지 않는 임의의 벡터를 선정하여 다음의 관계식을 이용하여 수행하였다.

$$\bar{x}_i^{c+1} = \bar{x}_{r1}^c + F(\bar{x}_{r2}^c - \bar{x}_{r3}^c) \quad (16)$$

여기서  $\bar{x}_i^{c+1}$ 은 자손세대이고,  $r1, r2$  그리고  $r3$ 는 랜덤 수이다.

돌연변이 연산 후 해집단의 다양성을 확보하기 위해서 재조합(recombination) 연산을 수행한다. 재조합 연산은  $\bar{x}_i^c$ 와  $\bar{x}_i^{c+1}$ 를 일정 확률( $CR$ )로 뒤섞는다.

$$\bar{x}_i^{c+1} = \bar{x}_i^c \quad \text{if } \text{rand}(0,1) > CR \quad (17)$$

여기서  $0 \leq CR \leq 1$ 이다.

재조합 연산 후 생성된 후손 세대를 평가하여 우수한 형질만 선택하여 최종적인 다음 세대로 전이 시킨다. DEA의 모든 연산으로 생긴 후손 세대는 앞서 선정 한

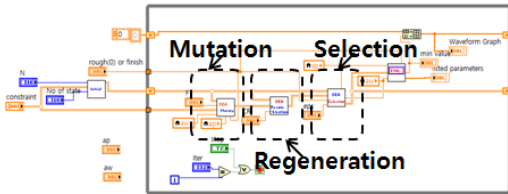
삭 구속 조건과 비교하여 구속 조건에 만족하는 값이 생성될 수 있도록 하였다.

### 4. 시뮬레이션 및 고찰

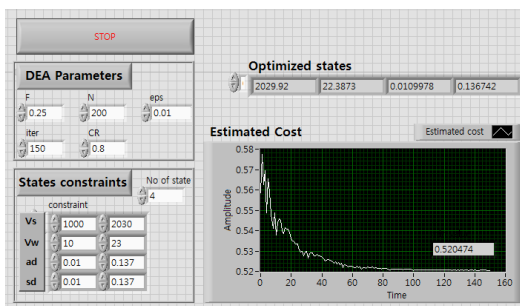
제안된 최적화 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 산업현장에서 널리 사용되는 LabView 소프트웨어를 사용하였다. Fig. 1과 2는 DEA를 이용한 최적화 알고리즘을 LabView 소프트웨어를 사용하여 구현한 것이다. 프로그램을 구현하기 위해 앞서 선정한 가격함수와 구속 조건에 대한 파라미터는 Table 1과 같이 선정하였다. 또한, 연삭기의 성능을 고려하여 상태변수의 제한 조건을 Table 2와 같이 고려하였다.

DEA의 초기 부모세대는 200개의 균일분포 랜덤 값으로 초기화하였다. 돌연변이 연산을 위한 파라미터는 0.25, 재조합을 위한 확률변수는 0.8을 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 획득한 최적 연삭 조건의 결과는 Table 3에 정리하였다.

제안한 DEA를 이용한 최적해의 우수성을 검증하기 위하여 최적 해 선정에 널리 사용되는 GA를 이용하여 구한 최적 해와 비교하였다. GA를 이용하여 구한 최적 해는 Table 4에 정리하였다.



[Fig. 1] Program for optimization of traverse grinding with LabView



[Fig. 2] Simulation result for the proposed algorithm

[Table 1] Parameters for computer simulation

Parameters	values	Parameters	values
$M_c$	36,000 $\frac{\text{원}}{\text{h}}$	$p$	1
$L_w$	300 mm	$L_e$	150 mm
$b_w$	60 mm	$b_e$	25 mm
$f_b$	2 mm/pass	$a_w$	0.1 mm
$a_p$	0.0505 mm/pass	$S_p$	2 pass
$D_e$	355 mm	$b_s$	25 mm
$G$	60	$L_d$	100 mm
$V_r$	254 mm	$t_1$	5 min
$t_{ch}$	30 min	$N_d$	20
$N_t$	12	$N_{td}$	2000
$C_d$	30,000 원	$C_s$	3.6 $\frac{\text{원}}{\text{mm}^3}$
$J_1^*$	12,000 원	$R_c$	58
$J_3^*(R_a^*)$	1.8 $\mu\text{m}$	$d_g$	0.3 mm
$J_2^*$	20	$K_{sm}^*$	$10 \times 10^{-6}$
$K_u$	$3.94 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$	$K_a$	0.0869

[Table 2] Range of state variable

states	range	states	range
$v_s$ [m/min]	1000-2030	$v_w$ [m/min]	10-23
$a_d$ [mm]	0.01-0.137	$s_d$ [mm/rev]	0.01-0.137

[Table 3] Optimized values for the proposed DEA

Parameters	values	Parameters	values
$v_s$	2029.92	$v_w$	22.387
$a_d$	0.011	$s_d$	0.137
$J$	624.60	$J_3(R_a)$	0.7872
U	22.492	$J_2$	20.001

[Table 4] Optimized values for the GA

Parameters	values	Parameters	values
$v_s$	1986	$v_w$	21.40
$a_d$	0.024	$s_d$	0.136
$J$	651.24	$J_3(R_a)$	0.8269
U	22.698	$J_2$	20.680

Table 3과 4의 최적 조건을 비교해 보면 가공에 따른 열 발생 및 생산계수는 비슷한 수준을 나타내지만 제한한 방법은 공작물 당 4.1%( $J$ )의 가공비용 절감과 4.8% ( $R_a$ )의 향상된 고른 표면 거칠기를 결과를 나타내었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 트래버스 연삭의 최적 연삭 조건 선정을 위한 최적화 알고리즘을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) DEA를 이용하여 가공비용, 생산성 및 가공물의 품질을 평가할 수 있는 다중 가격 함수를 제안하였다.
- (2) 연삭공정의 비선형 구속 조건을 고려하여 최적의 해를 구하는 알고리즘을 제안하였다.
- (3) 제안된 알고리즘을 통해 구한 최적 해는 트래버스 연삭을 수행하는 작업자의 연삭 조건 선정의 가이드라인으로 활용가능하다.

이상의 연구 성과는 연삭 공정에서 생산성 향상 및 우수한 가공 성능을 보장할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

[1] B. V. Babu, and M. M. L. Jehan, "Differential Evolution for Multi-objective Optimization," In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Canberra, Australia, Vol. 4, pp. 2696-2703, 2003.

[2] T. J. Choi, N. Subrahmanya, and Y. C. Shin, "Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes," Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp. 61-72, 2008, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[3] S. Xiao, and S. Markin, "On-line Optimization for Internal Plunge Grinding," CIRP- Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 1, pp. 287-292, 1996, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[4] R. Saravanan, P. Asokan, and M. Sachidanandam, "Genetic Algorithm Approach for Optimization of Surface Grinding Operations," International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 42, pp. 1327-1334, 2002.

[5] J. Choi, and J. H. Park, "Development of Roughness Estimation Model for Plunge Grinding of Valve Parts Using Neural Network," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No.

1, pp. 62-67, 2011.

[6] J. Choi, C. W. Lee. and J. H. Park, "Development of the Process Model for Plunge Grinding and Optimization of Grinding Process," Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 225, pp. 2628-2637, 2011, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[7] A. G. Krishna, "Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183, pp. 202-209, 2007, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[8] N. Baskar, R. Saravanan, P. Asokan, and G. Prabhakaran, "Ants Colony Algorithm Approach for Multi-objective Optimization of Surface Grinding Operations," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, pp. 311-317, 2004, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[9] N. Baskar, R. Saravanan, P. Asokan, and G. Prabhakaran, "Ants Colony Algorithm Approach for Multi-objective Optimization of surface grinding operations," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, pp. 311-317, 2004, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[10] X. M. Wen, A. A. O. Tay, and A. Y. C. Nee, "Micro-computer-based Optimization fo the Surface Grinding Process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 29, pp. 75-90, 1992, [Article\(CrossRefLink\)](#)

## 최 정 주(Jeongju Choi)

[정회원]



- 2001년 8월 : 부산대학교 공과대학원 지능기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 부산대학교 공과대학원 지능기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 2009년 2월 : University of Michigan-Dearborn 포스터닥터

- 2009년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 고기능성 밸브 기술 지원 센터 연구교수

<관심분야>

지능형 가공시스템, 적응제어, 인공지능