

# LabView를 이용한 최적 연삭 제어시스템 설계에 관한 연구

최정주<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 고기능성밸브기술지원센터

## Study on the Design of Optimal Grinding Control System Using LabView

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

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

**요약** 본 논문은 연삭 공정의 최적화 알고리즘과 이를 구현하기 위한 방안을 제안하였다. 최적의 연삭 공정 설계를 위해서 최적화 함수를 제안하고 선정된 최적 함수의 해를 구하기 위해 DE(Differential Evolution)알고리즘을 이용하였다. 알고리즘의 구현은 산업현장에서 널리 사용되고 있는 LabView소프트웨어를 통해 구현하였고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 검증하였다. 본 논문에서 획득한 최적화 기법은 연삭공정의 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** his paper proposed the optimal algorithm of grinding system and the method to realize it. The optimal function was proposed in order to design the optimal grinding process. DE(Differential Evolution) algorithm was used to obtain the selective optimal function. The realization of algorithm was implemented by LabView software used widely at industrial field and the proposed algorithm was verified for through computer simulation. The result of the proposed algorithm can be used for the guide line of the grinding process.

**Key Words** : Artificial Intelligence, Optimization, Grinding Control

### 1. 서론

연삭 공정은 가공을 위해 설정해야 되는 많은 변수들로 인해 그 결과 값을 예측하기가 어렵다. 이러한 이유로 연삭 조건의 선정은 숙련된 작업자의 오랜 노하우에 의존하여 설정되고 있다. 이러한 이유로 연삭 공정에 대한 많은 예측 모델들이 개발되고 있으며 이러한 개발 모델을 바탕으로 연삭 조건을 선정하는 알고리즘들이 제안되고 있다. 연삭 공정 예측 모델은 일반적으로 실험적으로 구한 결과 값을 바탕으로 연삭 공정의 결과를 예측하는 모델이 주로 사용되는데 이 중 대표적인 것으로는 연삭 슷돌의 마모 측도, 가공 파워 및 거칠기 등에 대한 모델이 있다[1-4]. 실험 치에 근거해서 개발된 연삭 공정 모델 이외에 인공지능 알고리즘을 이용한 모델 또한 연구되고

있다[5,6].

연삭 공정과 관련한 또 하나의 연구 분야는 최적의 연삭 조건을 선정하기 위한 알고리즘 개발이다. 이러한 알고리즘의 개발은 연삭 공정 모델을 바탕으로 최적화를 위한 목적 함수를 설계하고 최적의 해를 일정한 연삭 경계 조건 하에서 구하는 것이다. 최적의 연삭 조건을 선정하기 위해 제안되어온 방법은 연삭이 이루어지는 때 사이클의 가공 시간을 최적화 하는 알고리즘이 대표적이다 [7,8]. 그러나 이 방법은 가공 경비에 대한 최적화 부분이 고려되지 않는 단점이 있다.

본 논문에서는 실험을 통해 연삭 공정 모델을 정의하고 정의된 연삭 공정 모델을 바탕으로 가공 시간 및 가공 경비 등을 충분히 고려할 수 있는 목적함수를 제안하였다. 제안된 목적 함수의 최적 해를 구하기 위해서는

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 October 12, 2012 Revised January 8, 2013

Accepted January 10, 2013

DE(Differential Evolution)알고리즘을 적용하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 2. 연삭공정 모델

공작물의 연삭공정을 나타내기 위한 모델로는 가공 후 공작물의 상태를 나타내는 표면 거칠기, 가공 중 소요되는 가공 파워, 연삭에 의한 공작물의 버닝, 연삭 슷들의 마모를 나타내기 위한 G-ratio 등이 있다. 이 중 본 논문에서는 표면 거칠기와 가공 파워에 대한 모델은 실험을 통해 얻은 결과 값을 이용하여 모델의 미지 파라미터를 결정하였다. 실험을 위해 선정한 가공 조건은 Table 1에 나타내었다. 표에서 선정된 변수는 드레싱 깊이 ( $a_d$ ), 드레싱 시 절입 속도( $s_d$ ), 등가 지름 ( $d_{eq}$ ), 등가 칩 두께 ( $h_{eq}$ ), 연삭 슷들의 회전속도( $v_s$ )이다. 이 변수들은 공작물의 표면 거칠기와 가공파워에 지배적인 영향을 미치는 연삭 변수로 알려져 있다[1,2].

[Table 1] Experiment condition for grinding model

$a_d$	$s_d$	$d_{eq}$	$h_{eq}$	$v_s$
0.015	0.04	34.42	0.01548	28
0.023	0.1	34.42	0.05191	30.5
0.03	0.16	34.42	0.09697	33
0.015	0.04	49.24	0.08743	30.5
0.023	0.1	49.24	0.01970	33
0.03	0.16	49.24	0.04524	28
0.015	0.1	62.75	0.09697	33
0.023	0.16	62.75	0.01548	28
0.03	0.04	62.75	0.05191	30.5
0.015	0.16	34.42	0.01776	30.5
0.023	0.04	34.42	0.05758	33
0.03	0.1	34.42	0.07619	28
0.015	0.1	49.24	0.04524	28
0.023	0.16	49.24	0.08743	30.5
0.03	0.04	49.24	0.01970	33
0.015	0.16	62.75	0.05758	33
0.023	0.04	62.75	0.07619	28
0.03	0.1	62.75	0.01776	30.5

본 논문에서 고려한 공작물의 표면 거칠기 모델은 드레싱 직후 연삭을 통해 나타나는 초기 거칠기( $R_{a,0}$ )와 연삭 공정이 진행됨에 따라 나타나는 거칠기( $R_a$ )를 다음과 같이 선정하였다.

$$R_{a,0} = r_0 a_d^{r_1} s_d^{r_2} h_{eq}^{r_3} \{1 + \exp(-r_4 N_s)\} \quad (1)$$

$$R_a = R_{a,0} + (R_{a,\infty} - R_{a,0})(1 - \exp(r_5 V_w')) \quad (2)$$

$$R_{a,\infty} = r_6 h_{eq}^{r_7} (1 + \exp(-r_8 N_s)) \quad (3)$$

여기서  $r_i (i=1 \dots 8)$ 는 모델 파라미터,  $V_w'$ 는 누적 칩량,  $N_s$ 는 스파크 아웃 동안 공작물의 회전 수이다.

연삭 중 소요된 가공 파워 모델 또한 드레싱 직후 소요되는 초기 가공파워( $P_0$ )와 연삭 공정이 진행됨에 따라 소요되는 가공파워( $P$ )를 다음과 같이 고려하였다.

$$P_0 = p_0 a_d^{p_1} s_d^{p_2} d_{eq}^{p_3} h_{eq}^{p_4} v_s \quad (4)$$

$$P = p_5 P_0 (1 + p_6 V_w') \quad (5)$$

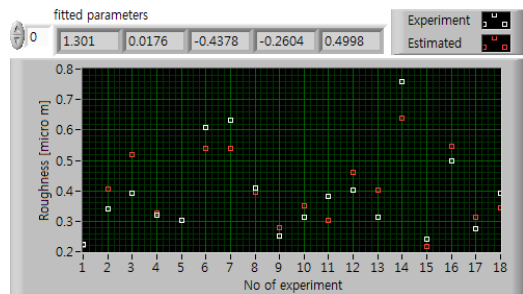
여기서  $p_i (i=1 \dots 6)$ 는 모델 파라미터이다.

선정된 모델 중  $R_{a,0}$ 와  $P_0$ 의 파라미터는 Table 1과 같이 수립한 실험 계획을 통해 획득한 결과 값을 이용하였다. 각 모델의 파라미터는 DE알고리즘을 이용하여 각 실험의 결과 값과 DE알고리즘을 통해 생성되는 파라미터를 식 (1)과 (4)을 이용하여 제곱 오차의 평균이 최소가 되도록 하여 구하였다. DE알고리즘의 구현은 산업현장에서 널리 사용되는 LabView소프트웨어를 이용하였다. 실험 및 추정된 결과 값은 Fig. 1에 나타내었고 이때 추정된 모델 식은 다음과 같다.

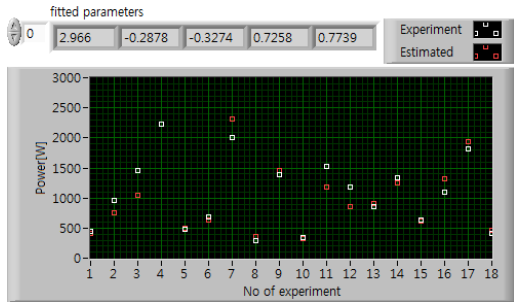
$$R_{a,0} = 1.301 a_d^{0.0176} s_d^{-0.4378} h_{eq}^{-0.2604} \times \{1 + \exp(-0.4998 N_s)\} \quad (6)$$

$$P_0 = 2.966 a_d^{-0.2878} s_d^{-0.3274} d_{eq}^{0.7258} h_{eq}^{0.7739} v_s \quad (7)$$

식(2)와 (5)에 나타난 연삭공정이 진행됨에 따라 변하는 공작물의 거칠기 및 가공 파워 모델은 Table 2와 같은 연삭 조건을 이용하여 그 파라미터를 구하였다. 실험 및 추정된 결과는 Fig. 2에 나타내었다.



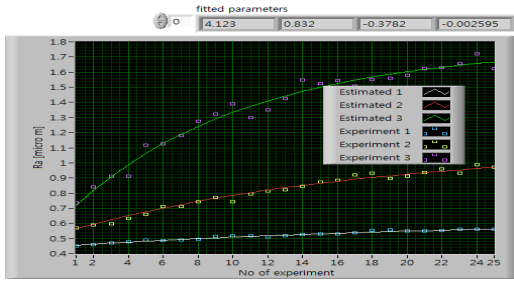
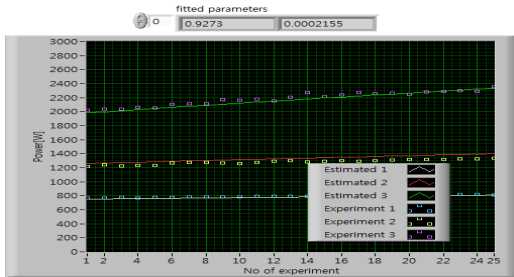
(a)  $R_{a,0}$  모델 파라미터 선정 결과


 (b)  $P_0$  모델 파라미터 선정 결과

[Fig. 1] Fitting result for initial grinding process model

[Table 2] Experiment condition for grinding process model

$a_d$	$s_d$	$d_{eq}$	$h_{eq}$	$v_s$
0.0208	0.1283	53.10	0.050096	30
0.0208	0.1283	53.10	0.098705	30
0.0208	0.1283	53.10	0.174216	30


 (a)  $R_a$  모델 파라미터 선정

 (b)  $P$  모델 파라미터 선정

[Fig. 2] Fitting result for grinding process model

이때 추정된 거칠기 및 가공 파워 모델은 다음과 같다.

$$R_a = R_{a,0} + (R_{a,\infty} - R_{a,0})(1 - e^{-0.00295 V_w'}) \quad (8)$$

$$R_{a,\infty} = 4.123 h_{eq}^{0.8321} (1 + e^{-0.3782 N_s}) \quad (9)$$

$$P = 0.9273 P_0' (1 + 0.0002155 V_w') \quad (10)$$

연삭 중 공작물의 버닝 현상은 높은 가공 파워에 의해 발생하게 되는데 버닝 현상이 발생되기 시작하는 에너지 ( $u^*$ )는 다음과 같다.

$$u^* = 6.2 + 10.192 d_{eq}^{0.25} a^{0.75} v_w^{-0.5} \quad (11)$$

여기서  $a$ 는 연삭 깊이,  $v_w$ 는 공작물의 회전 속도이다.

따라서 연삭 가공 시 공작물의 버닝 현상을 피하기 위해서는 가공 파워는 다음의 임계 가공 파워( $P^*$ ) 이하로 이루어져야 한다.

$$P^* = 6.2 v_w a + 10.192 d_{eq}^{0.25} a^{0.75} v_w^{0.5} \quad (12)$$

### 3. 최적 연삭 공정 시스템

연삭 조건에 따라 공작물의 정밀도, 가공 시간 및 생산 단가는 서로 상이 하게 된다. 따라서 이러한 내용 들을 고려한 목적함수를 설계하고 설계된 목적함수의 최적해를 구함으로써 만족스러운 연삭 조건을 선정할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 플런지 연삭의 가공 시간, 가공비 및 드레싱 간격을 고려한 목적함수를 다음과 같이 제안 하였다.

$$J = w_1 \left( \frac{C_g + C_d}{C^*} \right) + w_2 \frac{T}{T^*} - w_3 \frac{D_i}{D_i^*} \quad (13)$$

여기서

$$C_d = \frac{t_d M}{60} + C_s \frac{\pi d_s (a_d + a_t) b_s}{1000} + C_{dr}$$

$$C_g = \frac{M}{3600} (t_1 + t_2 + t_3) D_i + C_s \pi d_w b \left( \frac{u_1 t_1}{G_r} + \frac{u_2 t_2}{G_r} \right) D_i$$

$$T = t_1 + t_2 + t_3$$

$w_i (i=1,2,3 \ w_1 + w_2 + w_3 = 1)$ 은 가중치  $C_g$ 는 연삭 경비,  $C_d$ 는 드레싱 경비,  $C^*$ 임계 가공비  $T$ 는 사이클 당 가공시간,  $T^*$ 임계 가공시간  $D_i$ 는 드레싱 간격,  $D_i^*$ 는 임계 드레싱 간격,  $t_d$ 는 트루잉 및 드레싱 시간,  $M$ 은 시간 당 인건비,  $C_s$ 단위 체적당 사용되지 않은 슷돌 경비,  $d_s$  연삭 슷돌 지름,  $a_d$ 드레싱 깊이,  $a_t$ 트루잉 깊이,  $b_s$  연삭 슷돌의 폭,  $C_{dr}$  드레싱 툴 비용,  $d_w$ 공작물의 지름,  $b$  공작물의 폭,  $u_1$ 과  $u_2$ 는 황삭과 정삭의 절입 속도,  $t_1$ 은

황삭 시간,  $t_2$ 는 정삭 시간,  $t_3$ 은 스파크아웃 시간,  $G_r$ 과  $G_f$ 는 황삭과 정삭 시의 G-ratio이다.

식 (13)과 같이 설계된 목적함수에 다음과 같이 연삭 가공의 경계 조건을 고려하였다[1,4].

- G-ratio : 연삭 슷들의 마모저항에 대한 성능지수로 경계조건은 다음과 같이 나타낸다.

$$G = 10.71h_{eq}^{-1.2554} \leq G^* \quad (14)$$

- 절입량: 황삭 및 정삭을 통해 절입 되는 절입량 ( $d_r$ )에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$d_r = s_1 + s_2 \leq d_r^* \quad (15)$$

여기서  $s_1$ 은 황삭 깊이,  $s_2$ 는 정삭 깊이이다.

- 표면 거칠기: 정삭 후 공작물의 표면 거칠기의 경계 조건은 다음과 같다.

$$R_a \leq R_a^* \quad (16)$$

- 가공 파워: 가공 중 버닝 현상을 방지하기 위한 가공 파워의 경계조건은 다음과 같다.

$$P \leq P^* \quad (17)$$

설계된 목적함수와 경계조건을 바탕으로 최적 해를 구하기 위해 연삭 변수를 다음과 같이 선정하였다.

$$\bar{x} = [s_d \ s_1 \ u_1 \ u_2 \ t_3 \ v_s \ v_w \ D_i] \quad (18)$$

여기서  $s_d$ 는 드레싱 절입속도,  $s_1$ 은 황삭 절입량,  $u_1$ 은 황삭 속도,  $u_2$ 는 정삭 속도,  $t_3$ 는 스파크아웃 타임,  $v_s$ 연삭 슷들의 회전 속도,  $v_w$ 공작물의 회전 속도 그리고  $D_i$ 는 드레싱 간격이다.

식 (14)와 같이 선정된 연삭 변수의 최적 해를 구하기 위해서 본 논문에서는 DE알고리즘을 이용하였다[9,10]. DE알고리즘 구현을 위해 연삭 변수  $\bar{x}$ 는  $p$ 개의 균일 분포 랜덤 값(uniformly distributed random number)으로 초기화 하였다. 초기화 된 부모세대는 다음과 같다.

$$\bar{x}_i^c = [x_{i1}^c \ x_{i2}^c \ x_{i3}^c \ x_{i4}^c \ x_{i5}^c \ x_{i6}^c \ x_{i7}^c \ x_{i8}^c] \quad (19)$$

여기서  $i = 1, 2, \dots, p$  이고,  $x_{ij}^c$  ( $j = 1, \dots, 8$ )는 부모 세대의  $s_d, s_1, u_1, u_2, t_3, v_s, v_w$  그리고  $d_i$ 이다.

일반적으로 DE알고리즘은 돌연변이 연산을 통해 자

손 세대를 생성한다. 돌연변이 연산은 부모 세대에서 중복되지 않는 임의의 벡터를 선정하여 다음의 관계식을 이용하여 수행한다.

$$\bar{x}_i^{c+1} = \bar{x}_{k1}^c + F(\bar{x}_{k2}^c - \bar{x}_{k3}^c) \quad (20)$$

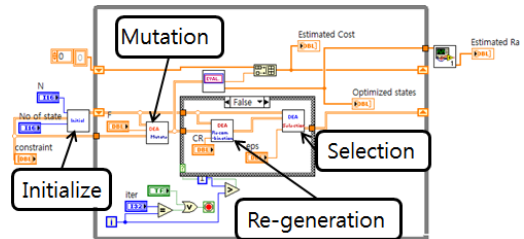
여기서  $\bar{x}_i^{c+1}$ 은 자손세대이고,  $k1, k2$  그리고  $k3$ 는 랜덤 수이다.

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

$$\bar{x}_i^{c+1} = \bar{x}_i^c \quad \text{if } \text{rand}(0,1) > CR \quad (21)$$

여기서  $0 \leq CR \leq 1$ 이다.

재조합 연산 후 생성된 후손 세대를 평가하여 우수한 형질만 선택하여 최종적인 다음 세대로 전이 시킨다. DE 알고리즘의 모든 연산으로 생긴 후손 세대는 앞서 선정 한 연삭 구속 조건과 비교하여 구속 조건에 만족하는 값이 생성될 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘은 Fig. 3과 같이 LabView 소프트웨어를 이용하여 구현하였다.



[Fig. 3] Optimization using DE algorithm

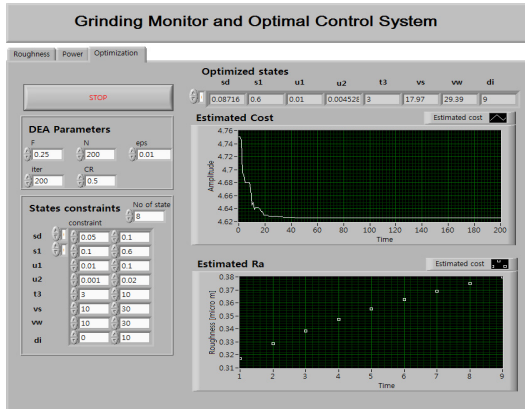
### 4. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 최적화 알고리즘의 시뮬레이션 구현을 위해서 앞 절에서 선정된 연삭의 경계 조건을 Table 3과 같이 선정하였다. 시뮬레이션 수행을 위해서 DE알고리즘의 초기 부모세대는 200개로 선정하였고 이 외 DE알고리즘의 파라미터  $F$ 와  $CR$ 는 각각 0.15 와 0.5로 선정하였다. 또한 설계한 목적함수의 가중치  $w_i$ 는 각각 0.4, 0.3그리고 0.3로 선정하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 Table 4와 같다.

제안된 최적화 알고리즘을 통해 선정된 연삭 조건은  $0.4 \mu m$ 이내의  $R_a$ 값을 보장할 수 있는 드레싱 간격을 제시하고 있다.

[Table 3] Constraints of grinding for computer simulation

variable	min value	max value
$s_d$ [mm/rev]	0.05	0.1
$s_1$ [mm]	0.1	0.6
$u_1$ [mm/rev]	0.01	0.1
$u_2$ [mm/rev]	0.001	0.02
$t_3$ [s]	0	10
$v_s$ [m/s]	10	30
$v_w$ [m/min]	10	30
$d_i$ [회수]	0	10
$P^*$ [W]	-	2000
$R_a^*$ [ $\mu$ m]	-	0.5
$G^*$	-	500
$d_r^*$ [mm]	-	0.1



[Fig. 4] Optimization result using DE algorithm

[Table 4] Optimized grinding condition through computer simulation

variable	optimized value	variable	optimized value
$s_d$ [mm/rev]	0.08716	$s_1$ [mm]	0.6
$u_1$ [mm/rev]	0.01	$u_2$ [mm/rev]	0.0045
$t_3$ [s]	3	$v_s$ [m/s]	17.97
$v_w$ [m/min]	29.39	$d_i$ [회수]	9

## 5. 결론

본 논문에서는 기계 가공 중 최종 단계에서 이루어지는 연삭 공정 중 플런지 연삭에 대한 최적 연삭 조건 설정을 위한 목적함수 및 최적화 방법을 제안하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 제안한 알고리즘은 가공 시간 및 가공비를 동시에 최적화 할 수 있는 목적함수를 사용하여 이에 대한 최적해를 도출하였다.
- (2) 본 연구를 통해 제안된 알고리즘은 산업현장에서 널리 사용되는 LabView 소프트웨어를 활용하여 그 활용도를 높일 수 있도록하였다.
- (3) 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서와 같이 제안된 연삭 공정의 최적화 알고리즘은 연삭 공정을 수행하기 위한 초기 가이드라인으로 활용될 수 있을 것이다.

향후 본 논문의 결과를 실험적으로 증명하여 플런지 연삭이외의 트래버스 연삭 등에서도 그 활용도를 높이고자 한다.

## References

- [1] 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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.07.010>
- [2] S. Malkin, Grinding Technology: Theory and applications of Machining with Abrasive, Ellis Horwood Ltd., Chichester, UK, 1989.
- [3] L. Li and J. Fu, "A study of grinding force mathematical model," Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 1, pp. 245-249, 1980.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61330-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61330-4)
- [4] 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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954406211406201>
- [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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.062>
- [6] 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.
- [7] Jeongju Choi, Tae-won Choi, "Study on the Optimal Control of the Plunge Grinding for Valve Parts in Batch

- Production,” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 11, pp. 4726-4731, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.11.4726>
- [8] 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.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90426-S](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(92)90426-S)
- [9] 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.
- [10] A. G. Krishna, “Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183, pp. 202-209, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.010>
- 

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