

# 배치 단위 밸브 부품 생산용 플런지 연삭의 최적 연삭 제어에 관한 연구

최정주<sup>1</sup>, 최태원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 고기능성밸브기술지원센터

## Study on the Optimal Control of the Plunge Grinding for Valve Parts in Batch Production

Jeongju Choi<sup>1</sup> and Tae-won Choi<sup>1\*</sup>

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

**요 약** 본 논문에서는 배치 단위로 이루어지는 플런지연삭의 최적 연삭 조건 선정을 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 연삭공정을 나타내는 상태변수를 선정하고 선정된 상태 변수를 바탕으로 각 사이클에서 이루어지는 최적의 연삭 조건을 GA(Genetic Algorithm)를 이용하여 선정하였다. 이를 바탕으로 전체 배치 단위의 최적 연삭 조건은 DP(Dynamic Programming)를 이용하여 구하였다. 제안된 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 그 가능성을 검증하였다.

**Abstract** This paper proposed the algorithm to select optimal grinding condition for plunge grinding in the batch production unit. In order to apply to the proposed algorithm, the state variable for plunge grinding process was defined and the optimal grinding condition for each cycle in batch production was decided by genetic algorithm. Based on the optimized grinding condition in each cycle, the optimal grinding condition for whole batch production was selected by dynamic programming. The proposed algorithm was evaluated by computer simulation.

**Key Words** : Control, Plunge grinding, Artificial intelligent, Optimization, Dynamic programming

### 1. 서론

연삭 가공은 기계 부품 생산의 최종 단계에서 이루어지는 가공 공정으로 이는 제품의 품질을 결정짓는 중요한 공정이다. 유압 밸브의 스펴이나 기타 정밀한 표면 거칠기를 요구하는 기계부품의 경우, 주로 배치(batch) 단위로 대량의 제품에 대한 가공이 이루어지므로 가공비용 및 시간에 대한 경비가 중요한 요소로 작용한다. 연속적으로 이루어지는 연삭 공정에서 가공 후 공작물의 품질을 미리 예측하기 위한 프로세스 모델들이 개발되어왔다. 이중 대표적인 모델이 제품의 표면 거칠기를 예측하는 거칠기 모델, 가공에 소요되는 파워를 예측하는 파워 모델[1-3] 그리고 연삭 가공 중에 국부적으로 공작물이 파

열되어 변색 변질하는 것을 판단하기 위한 모델 등이 있다[4, 5]. 연삭 작업은 일반적으로 황삭 및 정삭의 공정을 통해 이루어지는데 이때 필요한 연삭 조건 즉 절입 속도, 연삭 깊이 그리고 스파크 아웃 시간 등의 연삭 조건을 연삭기내에 입력하여야 한다. 그러나 이러한 연삭 조건의 선정은 작업자의 숙련도에 따라 경험적으로 조절되고 가공 결과물의 품질 또한 이러한 입력조건에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 연삭 공정에서 최적의 연삭 조건을 선정하기 위해서 연삭 공정에서 요구되는 변수를 이용하여 평가 함수를 선정하고 이를 바탕으로 최적의 연삭조건을 선정하는 방법들이 제안되었다. 이 중 대표적인 평가 함수는 연삭 사이클의 시간을 평가 함수의 변수로 사용하여 이를 최소화 할 수 있도록 하는 방법이 제안되었다[6,

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

\*교신저자 : 최태원(twchoi5@gmail.com)

접수일 11년 09월 09일

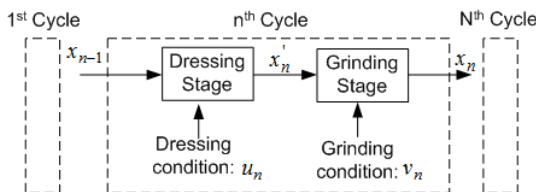
수정일 (1차 11년 10월 17일, 2차 11년 11월 02일)

계재확정일 11년 11월 10일

7]. 그리고 평가함수를 다목적 함수로 선정하여 이용한 방법 등이 있다[8,9]. 그러나 이러한 최적 연삭 조건 선정 방법은 각 사이클에서 소요되는 시간을 근거로 최적의 연삭 조건을 선정하게 되므로 배치 단위의 대량으로 이루어지는 가공 공정에서는 각 사이클 단위의 최적 조건이 전체 배치 단위에서 최적의 연삭 조건으로 성립되기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배치단위의 작업이 이루어지는 연삭 공정의 최적 연삭 조건을 선정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 사이클당 소요되는 경비를 나타내는 평가 함수를 선정하고 선정된 함수의 값이 전체 배치 단위에서 최소가 되는 연삭 조건을 선정하였다. 이를 위해서 연삭 공정을 나타내는 상태변수를 선정하고 선정된 상태변수에 대해 각 사이클당 발생하는 최적 연삭 조건을 GA(Genetic Algorithm)을 통해 선정하였다. 각 사이클에서 구한 최적의 연삭 조건 중 전체 배치 단위에서의 최적 조건은 DP(Dynamic Programming) 알고리즘을 이용하여 구하였다.

## 2. 사이클 단위 최적 연삭 조건 선정

배치 단위로 이루어지는 연삭 작업에서 전체 공정에 대한 최적의 연삭 조건을 선정하는 것은 최종 가공품의 품질 및 생산 단가에 중요한 영향을 미친다. 따라서 이러한 최적의 연삭 조건을 선정하기 위해서 배치 단위 가공 상태를 나타내는 상태변수  $x'_n$ 과  $x_n$ 을 선정하였다. 선정된 상태변수  $x'_n$ 는 드레싱 후의 상태를 나타내고  $x_n$ 는 연삭 공정 후의 상태를 나타낸다. 두 상태 변수를 이용하여 전체 배치 단위의 연삭 공정을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 전체 배치 단위 플린지 연삭 공정을 N등분 하였을 때 n번째 수행되는 공정은 드레싱 공정과 연삭공정으로 나누어 볼 수 있다. 이때 전체 배치 단위의 연삭이 진행될 동안 n번째 공정에서 드레싱 작업이 이루어지는 것이 최적의 공정인지는 전체 공정에 대한 최적 함수를 평가해서 구할 수 있다.



[그림 1] 배치단위 플린지 연삭에서의 상태변수  
 [Fig. 1] Stage variable of plunge grinding for batch production

이러한 전체 공정에 대한 최적의 조건을 선정하기 위해서 우선 각 사이클에서 수행 가능한 연삭 작업에 대한 최적 조건을 구하였다. 이를 위해 상태 변수  $x'_n$ 과  $x_n$ 를 다음과 같이 정의 하였다.

$$\begin{aligned} x'_n &= d(x_{n-1}, u_n) \\ x_n &= g(x'_n, v_n) \end{aligned}$$

여기서  $d(\cdot)$ 와  $g(\cdot)$ 는 드레싱 및 연삭에 의한 상태 변수 변환 함수이고  $u_n$ 과  $v_n$ 은 드레싱 및 연삭 변수이다.

각 사이클에 대한 평가 함수  $J_n$ 는 드레싱 및 연삭에 의해서 발생하는 가공비용을 근거로 다음과 같이 선정하였다[10,11].

$$J = \min_{u_n, v_n} \left[ \sum_{n=1}^N \{C_d(u_n) + C_g(v_n)\} \right] \quad (1)$$

$$C_d(u_n) = \frac{t_d M}{60} + C_s \left[ \frac{\pi d_s (u_n + a_t) b_s}{1000} \right] + C_{dr} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_g(v_n) &= \frac{M}{3600} (t_1 + t_2 + t_3) \\ &+ C_s \pi d_w b \left( \frac{u_1 t_1}{G_r} + \frac{u_2 t_2}{G_f} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $C_d$ 와  $C_g$ 는 드레싱 및 연삭 가공 경비를 나타내는 함수,  $t_d$ 는 트루잉 및 드레싱 시간,  $M$ 은 시간당 가공 노동비,  $d_s$ 는 연삭 슷돌 지름,  $a_d$ 는 드레싱 깊이,  $a_t$ 는 트루잉 깊이,  $b_s$ 는 연삭 슷돌 폭,  $C_{dr}$ 은 드레싱에 따른 드레싱 톨 경비,  $t_1$ 은 황삭 시간,  $t_2$ 는 정삭 시간,  $t_3$ 는 스파크 아웃 시간,  $C_s$ 는 가공에 의한 연삭 슷돌 경비,  $d_w$ 는 공작물 지름,  $u_1$ 과  $u_2$ 는 황삭과 정삭 시 절입속도,  $b$ 는 공작물의 폭,  $G_r$ 과  $G_f$ 는 황삭과 정삭의 G ratio이다.

식 (1)과 같이 선정한 평가함수는 연삭공정 과 드레싱 공정으로 나누어 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$J'_n(x'_n) = \min_{v_n} [C_g(v_n) + J_{n-1}(x_{n-1})] \quad (4)$$

$$J_n(x_n) = \min_{u_n} [C_d(u_n) + J'_n(x'_n)] \quad (5)$$

식 (4)와 (5)의 최적 값을 구하기 위해서는 연삭 공정 중 발생하게 되는, 거칠기 정도, 가공 파워, 버닝 유무 등과 같은 연삭의 구속 조건을 만족해야 한다. 이러한 구속 조

건은 다음과 같이 선정하였다[6, 7].

(a) 절입속도에 대한 한계치

$$u_1^{\min} \leq u_1 \leq u_1^{\max}, u_2^{\min} \leq u_2 \leq u_2^{\max} \quad (6)$$

여기서  $u_1^{\min}, u_2^{\min}$  은 황삭과 정삭 시 최소 절입속도,  $u_1^{\max}, u_2^{\max}$  는 황삭과 정삭 시 최대 절입 속도이다.

(b) 버닝 연삭이 일어나지 않기 위한 가공파워 한계치

$$P'(v_n) \leq P^* \\ P^* = 6.2v_w a + 10.192d_{eq}^{0.25} a^{0.25} v_w^{0.5} \quad (7)$$

여기서  $v_w$ 는 공작물의 회전속도,  $a$ 는 절삭 깊이,  $d_{eq}$ 는 등가 지름이다.

(c) G ratio의 한계치

$$G^{\min} \leq G \leq G^{\max} \quad (8)$$

여기서  $G = g_1 \left( \frac{v_w a}{v_w} \right)^{-g_2}$ 이다.

(d) 가공파워 및 거칠기 한계치

$$P^{\min} \leq P \leq P^{\max}, R_a^{\min} \leq R_a \leq R_a^{\max} \quad (9)$$

황삭 및 정삭 가공 시간에 대한 구속조건은 다음의 관계를 가진다.

$$t_1 = \frac{s_1}{u_1}, t_2 = \frac{s_2}{u_2} = \frac{\Delta r - s_1}{u_2} \quad (10)$$

여기서  $\Delta r$ 은 절삭에 따른 공작물의 반경,  $s_1, s_2$ 는 황삭과 정삭 시 절삭 깊이이다.

연삭 구속 조건 식 (7)부터 (10)까지를 만족하는 평가 함수  $J_n(x'_n)$ 을 구하기 위해서는 상태변수  $x'_n$ 가  $n$ 번째 사이클에서 고려되어야 할 드레싱 및 상태변수에 대한 최적 연삭 공정 조건을 우선 수행하고 이를 바탕으로 식

(4), (5)을 이용하여 전체 공정의 평가함수가 최소가 되는 조건을 DP알고리즘으로 구할 수 있다.

이를 위해서 본 논문에서는  $d(\cdot)$  그리고  $g(\cdot)$ 를 다음과 같이 선정하였다.

$$d(x_n, v_n) = \begin{cases} x_n & \text{if } u_n = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$g(x'_n, v_n) = x'_n + \pi d_w (s_1 + s_2) N_d \quad (12)$$

상태 변수  $x$ 는 연삭 공정이 진행됨에 따라 누적되는 절삭량  $V'_w$ 를 선정하고 이를  $0 \leq V'_w \leq 600$ 로 고려하였다. 드레싱 변수  $u_n$ 은 드레싱 속도  $s_d$ 를 이용하여  $0.02 \leq s_d \leq 0.2$ 로 선정하고  $d_1$  및  $d_2$ 개수만큼 각각 등분하였다. 선정된 상태변수와 드레싱 변수에 대한 최적 연삭 조건 선정을 위해  $n$ 번째 사이클에서의 연삭 변수는 다음과 같이 선정하였다.

$$v_n = [s_1 \ u_1 \ u_2 \ t_3 \ N_d \ v_s \ v_w]_n \quad (13)$$

$n$ 번째 사이클에서 최적의 연삭 조건은 선정된 상태변수와 드레싱 변수에 의해  $d_1 \times d_2$ 개수만큼의 최적 조건을 선정할 수 있다. 이를 구하기 위해서 GA알고리즘을 이용하였다. GA알고리즘의 평가 함수는 식(4)에서 선정한  $n$ 번째 연삭에서의 소요 비용을 이용하였고 연삭 구속 조건 식(7)~(10)을 만족하도록 구성하였다. GA알고리즘의 수행 루틴은 다음과 같다.

Procedure GA()

```

initialize (population);
evaluation (population);
while not (terminal condition satisfied) do
    matingPool = reproduce(population);
    mutationPool = crossover(matingPool);
    population = mutation(mutationPool);
    evaluation(population);
end while
end procedure
    
```

### 3. Dynamic programming을 적용한 최적연삭 조건 선정

앞서 제안한 각 사이클 별 최적 연삭 조건 선정을 바

탕으로 전체 배치 단위의 최적 조건을 구하기위해서 DP 알고리즘을 적용하였다. DP 알고리즘을 적용하기 위해 전체 배치 공정의 역순(N~1)으로 가공 경비를 합산하고 그 가공 경비가 최소가 되는 각 사이클의 연삭 및 드레싱 조건을 구하였다. 제안된 배치단위 최적연삭 조건 산출 알고리즘은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

제안된 알고리즘을 적용하기 위해 일반적으로 연삭공정에서 이루어지는 배치단위와 드레싱 및 연삭 시 배출되는 절삭량을 고려하여 전체 배치 단위(N)는 20으로 선정하고, 상태변수  $V_w'$ 은 600등분, 드레싱 변수  $s_d$ 는 20 등분하였다. 따라서 각 사이클에서는 전체 연삭 공정을 나타내는 상태변수와 드레싱 변수에 의해 12,000가지의 최적 연삭 조건이 선정되고 이를 바탕으로 N번째 에서 1번째 사이클까지 소요되는 경비 식(4)와 (5)의 값 중 최소가 되는 조건을 구하였다. 최적조건 선정을 위해 사용된 구속조건 및 파라미터 값은 표 1과 2에 나타내었다. 제안된 알고리즘에 의해 선정된 연삭 가공비용은 그림 2와 3에 나타내었다. 그림 3은 각 사이클에서 소요될 비용을 나타내었다. 그림에서 총 배치 단위가 20인 경우 2번의 드레싱을 1, 10번째 사이클에서 수행함으로써 최소의 비용으로 전체 연삭 공정을 수행할 수 있음을 나타내고 있다. 그림 4는 드레싱과 연삭 공정에 의해 누적되는 가공 비용을 나타내었다. 표 3은 최적화를 적용하여 구한 각 사이클에서의 연삭 조건이다.

[표 1] 연삭 조건의 한계치

[Table 1] Constraints of grinding conditions

연삭 조건 경계치	최소	최대
황삭 조건		
Depth of cut[mm]	0.5	0.6
Infeed rate[mm/s]	0.01	0.04
Grinding Power[W]	0	2300
Grinding ratio	25	1000
정삭 조건		
Depth of cut[mm]	0.05	0.2
Infeed rate[mm/s]	0.004	0.02
Grinding Power[W]	0	2300
Grinding ratio	25	1000
기타 조건		
Spark out time	0	10
Roughness[ $\mu m$ ]	0	0.4

Wheel speed[rpm]	1500	2000
Workpiece speed[rpm]	90	180
No burning		

[표 2] 평가함수에 사용된 파라미터 값

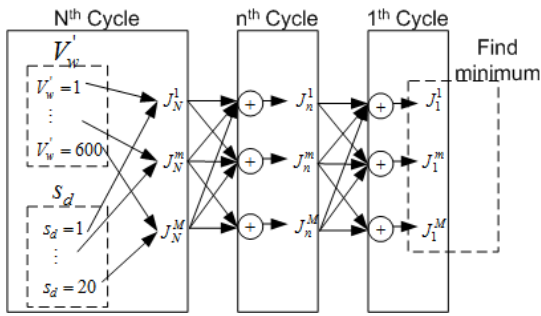
[Table 2] Values of parameter for cost function

기호	값
$M$ [W/h]	33,000
$C_{dr}$ [W/mm <sup>3</sup> ]	2.75
$C_s$ [W/mm <sup>3</sup> ]	3.3
$d_s$ [mm]	254
$a_t$ [mm]	0.1
$b_s$ [mm]	25.4
$d_w$ [mm]	25
$b$ [mm]	20
$t_d$ [min]	2.5

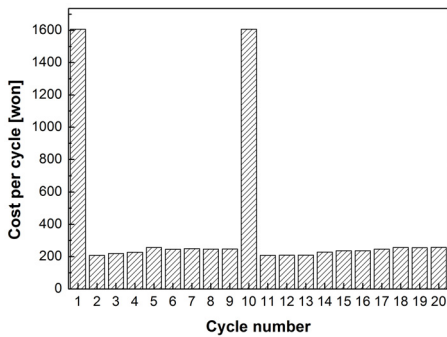
[표 3] 선정된 최적 연삭 조건

[Table 3] Optimized grinding condition

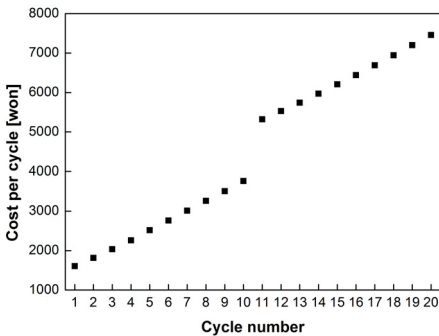
Cycle	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$u_1$	$u_2$	$C_g$	$C_d$
1	15.0	5.0	3.0	0.040	0.020	218.35	1388.40
2	12.0	6.0	4.0	0.037	0.020	207.87	0.00
3	15.0	5.0	3.0	0.050	0.016	218.91	0.00
4	14.0	6.0	4.0	0.045	0.014	227.41	0.00
5	15.0	7.0	5.0	0.050	0.020	256.51	0.00
6	16.0	6.0	4.0	0.035	0.024	245.91	0.00
7	15.0	8.0	3.0	0.054	0.025	249.67	0.00
8	14.0	8.0	4.0	0.038	0.031	246.55	0.00
9	13.0	9.0	4.0	0.039	0.035	247.57	0.00
10	16.0	8.0	3.0	0.042	0.018	256.33	0.00
11	14.0	4.0	4.0	0.043	0.018	208.21	1350.00
12	13.0	6.0	3.0	0.038	0.024	208.65	0.00
13	14.0	4.0	4.0	0.048	0.020	209.62	0.00
14	16.0	5.0	3.0	0.047	0.019	228.31	0.00
15	14.0	7.0	4.0	0.040	0.022	236.92	0.00
16	15.0	6.0	4.0	0.037	0.020	236.15	0.00
17	16.0	6.0	4.0	0.042	0.014	246.35	0.00
18	16.0	8.0	3.0	0.043	0.020	256.56	0.00
19	15.0	8.0	4.0	0.038	0.024	255.36	0.00
20	16.0	8.0	3.0	0.048	0.021	257.53	0.00



[그림 2] 배치단위 최적알고리즘  
 [Fig. 2] Optimal algorithm for batch production



[그림 3] 각 사이클 당 소요 가공경비  
 [Fig. 3] Production cost for each cycle



[그림 4] 배치 단위 누적 가공경비  
 [Fig. 4] Accumulated production cost in batch production

#### 4. 결론

본 논문에서는 기계 가공의 마지막 단계에서 이루어지는 연삭 공정의 최적 연삭 조건 선정에 관한 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 기존에 제안된 사이클 단위의 최적 연삭 조건 선정 방법을 배치 단위로 이루어지는 연삭 공정으로 확장하여 적용할 수 있도록 제안하였

다. 제안된 가공 경비를 바탕으로 선정된 평가함수를 최적화함으로써, 대량으로 이루어지는 연삭 공정의 가공 경비를 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] S. Markin, Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [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. 61~7, 2008.
- [3] L. Li, J. Fu, "A study of grinding force mathematical model," Annals of the CIRP Vol. 29, No. 1, pp.245~249, 1980.
- [4] G. Werner, "Influence of work material on grinding forces," Annals of the CIRP Vol. 27, No. 1, pp.243~248, 1978.
- [5] R. P. Lindsay, S. Hahn, "On the surface finish-metal removal relationship in precision grinding," Annals of the CIRP Vol. 22, No.1 pp. 105~106, 1973.
- [6] S. Xiao, and S. Markin, "On-line Optimization for Internal Plunge Grinding," CIRP- Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 1, pp. 287~292, 1996.
- [7] G. Xiao, S. Malkin, K. Danai, "Automated system for multi-stage cylindrical grinding," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 115, pp.667~672, 1993.
- [8] X. M. Wen, A. A. O. Tay, A. Y. C. Nee, "Micro-computer-based optimization of the surface grinding process," Journal of Material Processing Technology Vol. 29, pp. 75~90, 1992.
- [9] J. Choi, "Design of the Optimal Grinding Process Condition Using Artificial Intelligent Algorithm", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 6, pp. 590~597, 2009.
- [10] C. W. Lee, T. Choi and Y. C. Shin, "Intelligent Model-Based Optimization of the Surface Grinding Process for Heat-Treated 4140 Steel Alloys with Aluminum Oxide Grinding Wheels",
- [11] C. W. Lee, "Dynamic Optimization of the Grinding Process in Batch Production", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 131, Issue. 2, pp. 021006-1~021006-9, 2009.

**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 기술지원 센터 연구교수

<관심분야>

지능형 가공시스템, 적응제어, 인공지능

---

**최 태 원**(Tae-Won Choi)

[정회원]



- 1992년 8월 : 동아대학교 산업대학원(공학석사)
- 2003년 2월 : 동아대학교 일반대학원(공학박사)
- 1984년 4월 ~ 2009년 4월 : (주) 대우버스 부산공장(공장장)
- 2009년 6월 ~ 2010년 8월 : (주) 한국화이바 차량사업부 생산총괄이사

<관심분야>

자동차관련 산업, 지능형 가공시스템, 적응제어