

플런지 연삭공정을 위한 거칠기 모델

최정주*

(논문접수일 2008. 10. 2, 심사완료일 2009. 3. 24)

Roughness Model for the Plunge Grinding Process

Jeongju Choi*

Abstract

The roughness models have developed to describe the grinding behaviour and predict the final quality of workpiece. The model forms of the plunge grinding process are generally established with initial and steady state model form in accordance with the accumulated metal removal. The steady state roughness model form are based on the grinding condition and specific parameters are used to show the influence of it according to the grinding process such as the equivalent chip thickness and accumulated metal removal. However, the models have been developed in past are not considered the effect of changing the grinding conditions in the same batch. In this paper, the roughness model form to consider the effect of changing grinding condition is proposed and the performance of proposed model is evaluated based on the experimental results.

Key Words : 플런지연삭(Plunge grinding), 거칠기모델(Roughness model), 최적제어(Optimal control)

1. 서론

연삭공정은 대체로 마무리 공정에 수행하는 작업으로 공작물의 품질에 직접적으로 영향을 주는 고비용의 공정이다. 연삭 작업을 통한 공작물의 표면 거칠기는 연삭 메커니즘의 복잡성으로 인해 연삭숫돌과 공작물의 종류에 따라 다양한 형태의 거칠기 모델이 연구되어왔다^(1,2). 현재까지 제안된 다양한 형태의 모델식은 연삭숫돌과 공작물의 연삭 조건에 따라 그 모델의 형태가 상이하나, 연삭작업에 앞서 수행되는

드레싱 조건에 의해 그 초기 거칠기 값이 결정되고 이후 연삭 조건에 따라 정상상태의 거칠기 값이 결정됨을 알 수 있다.

이러한 거칠기 모델식의 개발은 가공중인 공작물의 거칠기를 추정하여 최적의 연삭 공정을 선정하기 위한 프로세스 모델로 이용되었으며^(1,7), 또한 지능형 연삭 시스템의 개발 및 모니터링 시스템 개발에 적용되었다^(4,6). 기존에 제안된 거칠기 모델식은 연삭숫돌의 마모정도에 따른 거칠기의 변화를 누적연삭량 (V_w) 또는 단위폭 당 절삭비율(Q_w)만을 이용하여 나타내고 있다^(2,5). 이러한 거칠기 모델들은 드레

* 동아대학교 고기능성벨트기술지원 지역혁신센터 (jchoi72@dau.ac.kr)
주소: 604-714 부산시 사하구 하단2동 840번지

싱(dressing) 후 이루어지는 연삭 조건을 일정하게 유지하고 이 후 연삭숫돌의 마모정도가 거칠기에 미치는 영향을 고려한 모델로써, 연삭 조건의 잦은 변화에 의한 연삭숫돌의 마모율을 충분히 고려하지 않았다.

따라서 본 논문에서는 드레싱 후 연삭 조건의 잦은 변화와 연삭숫돌의 마모가 가공물의 거칠기에 미치는 영향을 고려한 모델을 제안하였다. 제안된 거칠기 모델식은 연삭조건 변화와 연삭숫돌의 마모를 모델식에서 고려함으로써 비교적 큰 배치 단위의 연삭 공정에서 최적의 연삭 공정 조건 산출을 위한 모델로써 이용할 수 있다. 제안된 모델의 검증은 연삭 조건 변화에 대한 실험데이터를 바탕으로 가장 최근에 발표된 플런지 연삭의 거칠기 모델식인 일반화된 거칠기 모델식(Generalized roughness model)과 비교를 통해 수행하였다⁽¹⁾. 제안된 모델의 각 계수는 입력 조건이 다른 연삭 공정의 실험 결과치를 이용하여 선정하고 선정된 계수를 이용하여 추가적인 실험 결과 치와 매칭과정을 통해 제안된 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 플런지 연삭 시스템의 거칠기 모델

연삭 공정을 통해 가공된 제품의 거칠기는 여러 형태의 모델로써 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔다. 지금까지 제안된 거칠기 모델식은 연삭 공정에 앞서 수행하는 드레싱 공정에 의해 그 초기 거칠기 값이 결정되고 이후 공작물의 거칠기는 연삭 공정의 설정치와 연삭에 따른 연삭숫돌의 마모정도에 따른 거칠기 변화를 묘사하고 있다.

이 중 최근에 제안된 거칠기 모델 식 (1)은 기존에 제안되었던 다양한 거칠기 모델식들을 기존 모델에서 사용된 파라미터들의 영향도를 통계적 방법으로 분석하여 연삭 공정 후의 표면 거칠기에 가장 지배적 영향을 미치는 파라미터를 선정하고 이를 바탕으로 스파크 아웃 동안의 시편의 회전수가 거칠기에 미치는 영향 등을 고려하여 일반화된 거칠기 모델식을 제안하였다⁽¹⁾. 이 모델은 식 (1)과 같은 초기 거칠기 모델식($R_{a,0}$)과 연삭숫돌의 마모에 의한 제품의 거칠기 변화를 나타내는 모델식(R_a)을 식 (2)와 같이 제안하였다^(1,4).

$$R_{a,0} = R_0 a_d^1 s_d^2 h_{eq}^3 (1 + e^{-r_4 N_s}), \quad (1)$$

$$R_a = R_{a,0} + (R_{a,\infty} - R_{a,0})(1 - e^{-\alpha V_w}), \quad (2)$$

여기서 $R_{a,\infty} = r_0 h_{eq}^{\alpha} (1 + e^{-r_n N_s})$, α 와 r_n ($n=0, \dots, 6$)는 모델 파라미터, a_d 는 드레싱 두께, s_d 는 드레싱 이송속도, h_{eq}

는 등가칩두께, N_s 는 스파크아웃동안의 연삭숫돌의 회전수, V_w 는 총 누적 연삭량이다.

식 (1), (2)와 같이 표현된 일반화된 거칠기 모델식은 기존에 제안된 다양한 거칠기 모델식들을 일반화 한 모델식으로써 연삭숫돌과 공작물의 종류에 따라 모델의 계수를 많지 않은 실험을 통해 구함으로써 그 적용이 용이할 것으로 사료된다. 그러나 연삭 공정이 진행됨에 따라 연삭숫돌의 마모에 의해 발생하게 되는 거칠기 변화를 표현하는 모델식 (2)는 드레싱 후 일정한 연삭 조건하에서 거칠기 변화만을 고려하여 개발 되었다. 이는 배치(batch) 단위가 커지게 되면, 이에 따른 연삭숫돌의 마모가 전체 공정에서 시편의 거칠기 및 파워 요건 등에 영향을 미쳐 전체 배치 단위를 통해 생산되는 제품의 거칠기를 충분히 표현하기 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 제안된 일반화된 거칠기 모델식을 바탕으로 드레싱 공정 후 잦은 연삭 조건 변화와 연삭숫돌의 마모에 따른 거칠기 변화를 나타내는 모델식을 제안하였다. 또한 제안된 모델식은 비교적 큰 배치 단위의 연삭 공정에서 각 사이클에 대한 최적의 연삭 조건을 구하고 이를 바탕으로 전체 배치 단위에서 잦은 최적 연삭조건 변화에 대응할 수 있는 거칠기 모델식으로 사용토록 하였다.

제안된 거칠기 모델식은 다음과 같은 내용을 바탕으로 수립되었다⁽³⁾.

작업 조건의 변화에 대한 연삭숫돌의 마모는 등가 칩 두께(equivalent chip thickness)를 파라미터로 선정하여 그 마모 정도를 고려할 수 있도록 하였다.

연삭숫돌의 마모율에 따라 동일한 연삭 조건하에서도 등가 칩 두께의 값은 상이하다.

연삭숫돌의 마모율이 커짐에 따라 연삭에 필요한 파워도 증가한다.

실제 연삭 공정에서 입력되는 실제 절입속도(actual infeed rate)와 프로그램된 절입속도(programmed infeed rate) 사이에는 시간 지연이 존재한다.

연삭 공정 중 연삭숫돌의 절입 시 연삭 숫돌과 공작물 사이의 기하학적 변형(deformation)이 존재한다.

이를 바탕으로 등가 칩 두께는 연삭 파워 모델식을 바탕으로 추정하고, 추정된 등가칩두께 변수는 입력 조건 변화에 대한 연삭숫돌의 마모 정도를 나타낼 수 있도록 고려하여 식 (3)과 같은 모델식을 수립하였다. 또한, 연삭 공정의 진행에 따른 연삭숫돌의 마모율은 변수 R_i 를 선정하여 식 (4)와 같이 고려하였다.

$$R_a = R_r (1 + r h_{eq,spark-out}^\beta), \quad (3)$$

$$\frac{dR_r}{dV_w} = \frac{1}{\tau_s} [R_\infty - R_r], \quad (4)$$

여기서 τ_s 는 시상수이다.

식 (5)는 식 (4)의 일반해이며 $R_{r,0}$ 와 $R_{r,\infty}$ 는 R_r 의 초기 및 최종 값을 나타낸다.

$$R_r = R_{r,\infty} - (R_{r,\infty} - R_{r,0})e^{-\frac{V_w}{V_0}} \quad (5)$$

여기서 V_0 는 모델 파라미터, V_w 는 누적 연삭량이다.

식 (3)과 (5)를 이용하여 초기 및 정상상태 거칠기 식은 각각 식 (6)과 (7)로 표현할 수 있다.

$$R_{a,0} = R_a(V_w = 0) = R_{r,0}(1 + r h_{eq}^\beta) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_{a,\infty} &= R_a(V_w = \infty) \\ &= R_{r,\infty}(1 + r h_{eq,spark-out}^\beta), \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 초기 및 정상상태의 거칠기를 표현하기 위해서 R_r 의 초기 및 최종값은 다음과 같이 정의하였다.

$$R_{r,0} = f_0 a_d^1 s_d^2, \quad R_{r,\infty} = f_3 h_{eq,spark-out}^4$$

여기서 $h_{eq,spark-out}$ 은 스파크 아웃 동안의 추정된 등가칩 두께, a_d 는 드레싱 두께, s_d 는 드레서 이송속도, r , β , f_n ($n=1, \dots, 4$)는 모델 파라미터이다.

$R_{r,0}$ 와 $R_{r,\infty}$ 의 선정은 기존에 제안된 거칠기 모델식에서 사용한 주요 파라미터를 이용하여 결정하였다.

3. 제안된 모델식의 시상수

제안된 거칠기 모델식에서 사용한 등가 칩 두께는 연삭 공정 중 발생하는 연삭숫돌과 공작물의 기하학적 변형에 따른 거칠기의 영향을 최소화하고 연삭숫돌의 마모 정도에 따라 등가 칩 두께의 변화를 고려하기 위해 스파크 아웃이 끝나는 시점의 등가 칩 두께를 추정하여 이용하였다. 연삭숫돌과 공작물 사이의 기하학적 변형은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며 여기서 연삭숫돌과 공작물의 강성 계수는 각각 k_s , k_w 로 나타내고 연삭 공정 중 연삭숫돌과 공작물의 연삭 가공 영역에서 기하학적 변형을 나타내는 강성 계수는 k_a 라 두면, 연삭 공정에서 연삭숫돌과 공작물 사이의 전체 강성 계수는 식 (8)과 같이 상수 k_e 을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k_a} \quad (8)$$

연삭공정에서 연삭숫돌의 절입속도는 $u(t)$ 와 같이 프로그램된 절입속도로 나타낼 수 있으나 연삭 공정 중 이루어지는 실제 절입속도는 이와 상이한 값을 가진다. 이를 $v(t)$ 로 표현하면 이 두 절입속도에 대한 상관관계는 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) - v(t) = \epsilon \quad (9)$$

Fig. 1에 대한 변형관계식은 수직응력과 유효 강성계수를 이용하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(t) = \frac{F_n}{k_e} \quad (10)$$

여기서 수직응력 F_n 은 절삭두께 a 을 이용하여 식 (11)과 같이 정의하고 비례상수 k_e 은 공작물의 두께 b 을 이용하여 $F_0 b v_w$ 로 선정하면 식 (12)로 다시 쓸 수 있다.

$$F_n = k_e a \quad (11)$$

$$F_n = F_0 Q_w \quad (12)$$

여기서 $a = \frac{\pi d_w v}{v_w}$, $Q_w = \pi b d_w v$, d_w 는 공작물의 지름, v_w 는 공작물의 회전 속도, v 는 실제 절입속도이다.

식 (11)과 (12)를 이용하여 실제 절입속도와 수직응력과 의 관계식은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_n = (\pi b d_w F_0) v = F_0 v \quad (13)$$

식 (9), (10) 그리고 (13)을 이용하면 프로그램된 절입속도와 실제 절입속도의 상관관계는 다음과 같이 나타낼 수

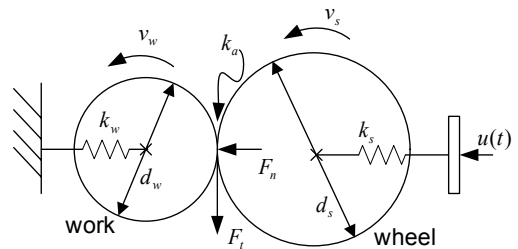


Fig. 1 Schematic of idealized cylindrical plunge grinding model

있다.

$$\dot{v} = \frac{1}{\tau_s} [u(t) - v(t)] \quad (14)$$

여기서 τ_s 는 시상수 이다.

또한 시상수 τ_s 는 식 (15)와 같이 정의될 수 있다.

$$\tau_s \equiv \frac{F_v}{k_c} \quad (15)$$

식 (15)와 같이 정의된 시상수는 파워 모델식 (16), (17)과 식 (14)로부터 스파크 아웃동안의 값을 추정할 수 있다⁽⁴⁾.

$$P' = \lambda_0 P_0' (1 + \lambda_1 V_w^{\lambda_2}) \quad (16)$$

$$P_0' = F_{t,0} v_s = F_0 a_d^{p_1} s_d^{p_2} d_{eq}^{p_3} h_{eq}^{p_4} v_s \quad (17)$$

여기서 a_d 는 드레싱 두께, s_d 는 드레서의 이송속도, $F_{t,0}$, p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , λ_0 , λ_1 그리고 λ_2 는 모델상수이고, d_w 는 공작물 지름, d_s 는 연삭숫돌의 지름, v_s 는 연삭숫돌 속도, h_{eq} 는 등가 칩 두께, $d_{eq} = \frac{d_w d_s}{d_w + d_s}$ 이다.

따라서 식 (14)에서 유도된 스파크 아웃시점의 실제 절입 속도 v 와 파워 모델 식을 이용해서 구한 시상수 τ_s 는 이용하여 식 (18)과 같이 스파크 아웃 시점의 등가 칩 두께를 추정할 수 있다.

$$h_{eq,spark-out} = \frac{\pi d_w v}{v_s} \quad (18)$$

4. 모델 검증

모델 검증을 위한 실험 데이터는 [1]에서 수행한 실험 조건과 동 논문에서 제안한 일반화된 거칠기 모델식의 결과를 비교 검증하였다. 실험에 사용된 연삭기는 G20-50CNC이며 연삭 숫돌은 32A-60-K-VBE를 사용하였다. 그리고 실험에 사용된 시편은 4140 alloy steel(RC40)을 이용하였다. 드레싱 공정 후 발생하는 거칠기를 나타내는 초기 거칠기 모델식은 다구찌(Taguchi) 방법을 이용한 실험 조건식을 Table 1과 같이 선정하여 수행하였다. 또한 연삭 공정에 의한 연삭숫돌의 마모에 의한 거칠기 영향을 알아보기 위해 Table 2와 같은 실험 조건을 이용하였다.

Table 1과 같은 조건식을 바탕으로 연삭공정 후의 거칠기

결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 거칠기 모델식의 계수를 비선형 커브피팅법을 이용하여 구하였다. 이때 사용한 비선형 커브피팅은 Matlab ver. 7.3을 이용하였다.

$$R_{a,0} = 0.298 a_d^{0.113} s_d^{0.461} (1 + 1.303 h_{eq}^{0.418}) \quad (19)$$

식 (19)과 같이 추정된 초기 거칠기 모델식을 바탕으로 실

Table 1 Experimental conditions for initial roughness

Run	u [mm/s]	t [sec]	v_s [mm/sec]	N_s	d_w [mm]	a_d [mm]	s_d [mm]	h_{eq} [μ m]	d_{eq} [mm]
1	3.39	1	28.01	2.6	40.63	0.015	0.04	0.0154	34.42
2	12.39	3	30.48	9.8	40.63	0.023	0.10	0.0518	34.42
3	25.08	5	33.00	19.6	40.63	0.03	0.16	0.0969	34.42
4	13.87	3	33.00	6.5	61.14	0.015	0.04	0.0806	49.24
5	3.39	5	28.01	13.0	61.14	0.023	0.10	0.0232	49.24
6	6.59	1	30.48	1.7	61.14	0.03	0.16	0.0415	49.24
7	12.46	1	30.48	1.9	81.78	0.015	0.10	0.1049	62.75
8	1.69	3	33.00	3.9	81.78	0.023	0.16	0.0131	62.75
9	6.16	5	28.01	8.1	81.78	0.03	0.04	0.0564	62.75
10	4.24	5	30.48	16.3	40.63	0.015	0.16	0.0177	34.42
11	14.89	1	33.00	3.9	40.63	0.023	0.04	0.0575	34.42
12	16.70	3	28.01	7.8	40.63	0.03	0.10	0.0760	34.42
13	6.59	5	33.00	8.7	61.14	0.015	0.10	0.0383	49.24
14	13.87	1	28.01	2.2	61.14	0.023	0.16	0.0950	49.24
15	3.39	3	30.48	7.8	61.14	0.03	0.04	0.0213	49.24
16	7.40	3	28.01	5.8	81.78	0.015	0.16	0.0678	62.75
17	8.30	5	30.48	6.5	81.78	0.023	0.04	0.0699	62.75
18	2.11	1	33.00	1.6	81.78	0.03	0.10	0.0163	62.75
증명 1	8.80	3	30.50	6.2	57.15	0.023	0.10	0.0521	49.24
증명 2	12.50	4	30.50	12.5	38.10	0.017	0.15	0.0492	38.10
증명 3	13.80	3	30.50	9.6	38.10	0.025	0.10	0.0542	53.0

Table 2 Wheel wear test conditions

Run	u [mm/s]	v_s [mm/sec]	d_w [mm]	a_d [mm]	s_d [mm]	h_{eq} [μ m]	d_{eq} [mm]
1	0.027	30.48	71.74	0.025	3.55	0.208	59.7
2	0.017	30.48	70.31	0.025	3.55	0.124	58.7
3	0.007	30.48	71.31	0.025	3.55	0.052	59.4
증명1	0.014	27.99	67.74	0.025	3.55	0.106	56.9
증명2	0.019	29.24	68.45	0.025	3.40	0.139	57.4

험치와 추정치를 Fig. 2에 나타내었다. 추정된 거칠기값의 선형회귀분석에 의한 결정계수 R^2 는 0.89이다. 식 (19)을 바탕으로 세 번의 추가 실험을 통하여 수립된 모델식의 타당성을 검증하였다. 이에 대한 실험결과와 추정치는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 결과는 제안된 모델식의 결과와 일반화된 거칠기 모델식을 비교하였다⁽¹⁾.

연삭숫돌의 마모에 의한 거칠기 변화 실험은 Table 2와 같은 연삭 조건을 바탕으로 수행하였다. 실험의 결과치를 이용하여 식 (20), (21)과 같이 제안된 모델식의 파라미터를 선정하였다. Fig. 4는 실험결과치와 추정된 거칠기 값을 나타내고 있다.

$$R_u = R_{\infty} - (R_{\infty} - R_{u,0})(1 + 1.303h_{eq}^{0.418}) \quad (20)$$

$$R_{\infty} = 13.619h_{eq}^{0.795} \quad (21)$$

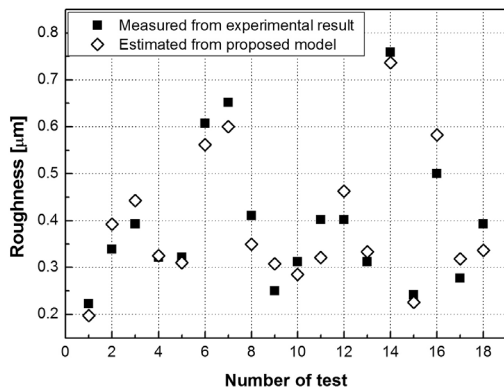


Fig. 2 Experimental result for fresh wheel test

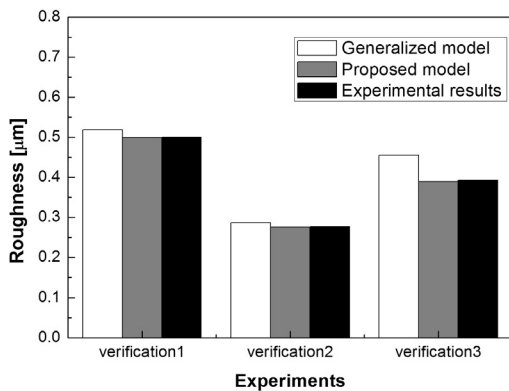


Fig. 3 Verification experimental result for fresh wheel test

제안된 거칠기 모델식의 검증을 위해 선정된 모델식 (20)과 (21)을 이용하여 Table 2에서 제시한 두 번의 증명 실험을 통하여 제안된 모델식의 타당성을 검증하였다. 증명 실험 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같은 결과를 바탕으로 계산된 R^2 는 Table 3에 나타내었다. 결과에서와 같이 제안된 거칠기 모델식은 기존에 제안된 일반화된 거칠기 모델식⁽¹⁾에 비해 더욱 향상된 추정 결과치를 나타냄을 알 수 있다.

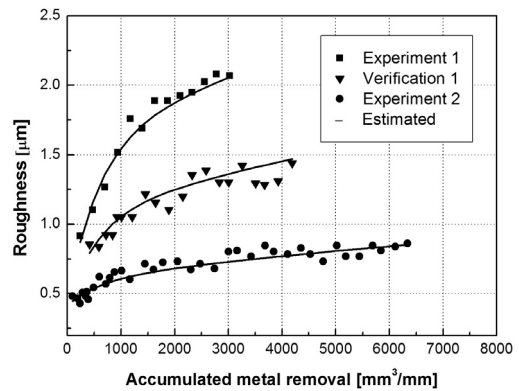


Fig. 4 Experimental result for wheel wear test

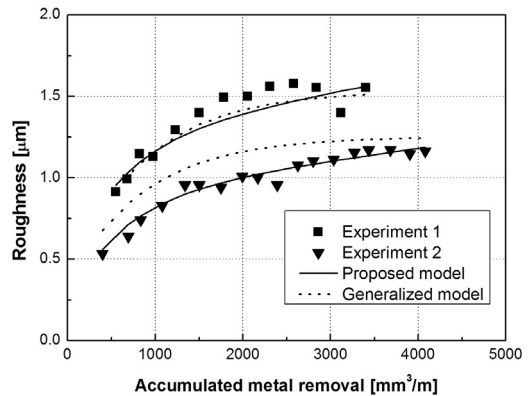


Fig. 5 Verification experimental result for wheel wear test

Table 3 Comparison of R^2

	Experiment 1	Experiment 2
Proposed model	0.849	0.96
Compared model	0.867	0.54

5. 결론

공작물의 거칠기는 연삭 공정의 입력 조건에 따라 연삭숫돌과 공작물 사이의 복잡한 상호 작용에 의해 결정된다. 이러한 복잡한 연삭 메커니즘을 표현하기 위해 지금까지 다양한 거칠기 모델식들이 제안되었으며 이러한 모델식은 저마다의 특징을 가지고 연삭공정의 거칠기를 표현하고 있다. 이 중 본 논문에서는 드레싱 후 가공조건의 변화와 연삭숫돌의 마모를 고려할 수 있는 거칠기 모델식을 제안하였다. 제안된 거칠기 모델식의 타당성은 세 차례의 실험 결과치를 이용하여 제안된 모델의 파라미터를 선정하고 선정된 파라미터를 이용한 모델이 추가적으로 실시한 실험의 결과에 어느 정도 부합하는지를 통해 검증하였다. 제안된 모델식은 큰 배치단위의 연삭공정 작업에서 연삭조건이 변하더라도 그 거칠기 변화를 기존 모델식에 비해 더욱 더 잘 추정할 수 있음을 보였다. 이는 연삭 가공이 진행되면서 공작물의 거칠기 가공 조건을 만족시키면서 추후 수행하여야 하는 드레싱 작업의 최적 시점을 선정하는 최적 연삭가공을 알고리즘 개발을 위한 거칠기 지표로써 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Choi, T. J., Subrahmanya, N., and Shin, Y. C., 2008, "Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes," *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 61~72.
- (2) Xiao, S. and Markin, S., 1996, "On-line Optimization for Internal Plunge Grinding," *CIRP-Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 287~292.
- (3) Markin, S., 2008, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Subrahmanya, N., Choi, T., and Shin, Y. C., 2007, "Model-Based Optimization of the OD Plunge Grinding Process via Generalized Intelligent Grinding Advisory System(GIGAS)," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 35, pp. 489~496.
- (5) Xiao, G., Markin, S., and Danai, K., 1993, "Autonomous System for Multistage Cylindrical Grinding," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 115, pp. 667~672.
- (6) Ivester, R. W. and Heigel, J. C., 2007, "Smart Machining Systems: Robust Optimization and Adaptive Control Optimization for Turning Operations," *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. 35, pp. 505~512.
- (7) Ivester, R., Danai, K., and Markin, S. 1997, "Cycle-Time Reduction in Machining by Recursive Constraint Bounding," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 201~207.