

불꽃소멸에 의한 연삭특성에 관한 연구

A Study on the Characteristic of Grinding by Spark-Out

이 연 종* 김 정 두**
Youn-Jong Lee, Jeong-Du Kim

ABSTRACT

The surface roughness of workpiece is reduced during spark-out. The reduction of roughness is a benefit of spark-out, but spark-out lowers productivity. The characteristics of spark-out are different to those of plunge grinding to which feed is applied. This difference is due to overlapping cutting during spark-out. Effect of spark-out is in proportion to volume of grain wear. This phenomenon is due to different overlapping area. Dressing interval can be enlarged by spark-out, when volume of grain wear is large. In this study, the characteristic of spark-out was studied by spark-out obserbation in various grinding conditions. For this purpose thrust force, spark-out time and surface roughness of workpiece were experimentally investigated in various grinding conditions.

주요기술용어 : Spark-out(불꽃소멸시간), Dressing(드레싱), Grinding Life(연삭수명),
Surface Roughness(표면거칠기), Attrition Wear(마찰마멸),
Removal Rate(재료제거율)

기 호 설 명		
a_p	: 연삭되는 폭	t_s : 불꽃소멸 시간
A_w	: 단위 시간당 단위 배분력당 연삭되는 양	s_e : 연삭 시스템의 강성도
f	: 실제 연삭깊이	v_f : 이송 속도
L	: 공작물의 길이	V' : 연삭 슷들의 단위 폭당 연삭량
F_l	: 배분력	
F_{l0}	: 연삭작용이 일어날 때의 배분력	
n_w	: 공작물의 행정	

1. 서 론

최근 자동차 산업의 발전과 각종 부품의 정밀가공 요구에 따라 정밀연삭에 대한 관심이

* 한국과학기술원 정밀공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

높아지고 있으며, 아울러 자동화 연삭시 부차적으로 수반되는 드레싱 시점을 평가하기 위한 불꽃소멸 시간의 필요성이 높아지고 있다. 연삭기와 공작물, 연삭숫돌의 탄성변형으로 인해서 불꽃소멸동안 연삭숫돌은 더 이상의 이송을 주지 않아도 공작물과 접촉하여 가공이 이루어진다. 그 결과로서 연삭력은 지수함수적으로 감소한다. 이 기간동안 공작물은 반복 가공되고 공작물의 표면거칠기도 지수함수적으로 감소한다. 불꽃소멸동안 표면거칠기의 감소는 마멸에 의한 연삭입자의 그레이징(glazing)의 결과라고 판단하기 쉽다. 그러나 불꽃소멸은 연삭 입자의 마찰마멸(attribution wear)이 일어나기에는 대단히 짧은 시간이다.¹⁾ 따라서 불꽃소멸동안 표면거칠기의 감소는 연삭숫돌면의 최외각 연삭입자(extreme cutting edge)의 중복절삭(overlapping cut)의 결과이다. 불꽃소멸은 표면거칠기에는 좋은 영향을 주지만 경제적 측면에서는 바람직하지 못하다. 그래서 원하는 표면거칠기를 얻으면서 불꽃소멸 시간을 줄이려는 시도가 이루어져 왔다. 따라서 불꽃소멸 시간등 불꽃소멸을 제어하기 위해서는 불꽃소멸 특성을 명확히 밝힐 필요가 있다.

본 연구에서는 각기 다른 연삭조건에 불꽃소멸을 관찰하고 불꽃소멸 특성을 밝히는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 가공변수에 따른 가공면의 표면거칠기, 연삭력, 불꽃소멸 시간을 실험적으로 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

플런지(plunge)연삭에서, 연삭숫돌의 마멸을 무시하고 연삭시스템이 강체라고 하면 공작물은 요구되어지는 양만큼 연삭될 것이다. 그러나 실제 연삭작업에서, 연삭되는 양은 연삭시스템의 탄성변형과 연삭숫돌의 마멸 때문에 요구하는 양보다 작아진다. 더 이상의 이송량 없이 연삭작업을 계속하면 탄성변형에 의해 남겨진 양을 연삭하게 된다. 이것을 불꽃소멸이라 한다. 불꽃소멸동안 공작물의 표면거칠기는 감소하는데 이때의 감소량은 연삭숫돌, 공작물, 드레싱조건

에 따라 다르며, 불꽃소멸동안 표면거칠기는 대략 25%~67% 감소하게 되며²⁾ 이 감소량은 연삭숫돌의 마멸상태에 따라서도 변하게 된다. 본 연구에서는 입자의 마멸이 불꽃소멸 표면거칠기에 어떠한 영향을 주는지 실험적으로 고찰한 것으로서 불꽃소멸 동안 표면거칠기의 감소는 연삭숫돌의 최외각 연삭입자(extreme cutting edge)의 중복절삭 때문으로 분석된다. 이론적으로 불꽃소멸 과정동안 표면거칠기의 감소는 공작물과 연삭숫돌의 회전비가 정수라면 불가능하며 이는 최외각 연삭입자의 궤적이 공작물 외주면의 전체를 통과하지 못하고 어느 특정한 지역만 통과하기 때문이다.²⁾

Fig.1은 연삭시스템의 모델을 나타낸 것으로서 정상상태에서 연삭시스템의 총변형량 δ 을 계산하면 다음과 같다.

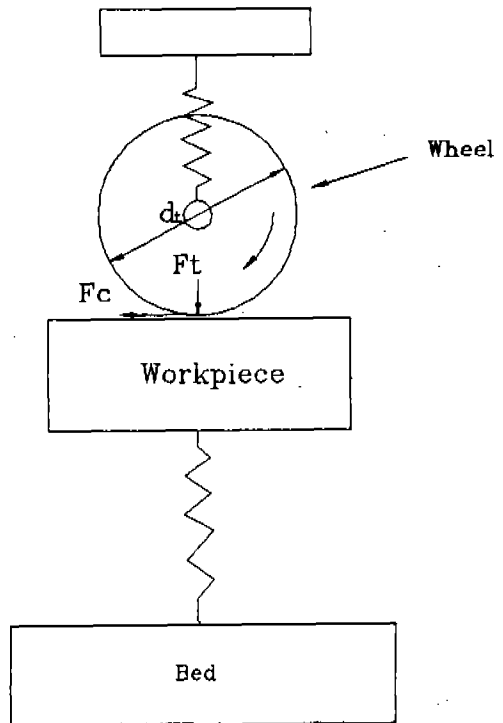


Fig.1 Idealized model of surface plunge grinding

$$\delta_t = F_t / S_e \quad (1)$$

$$F_t = (L a_p v_f) / A_w + F_{t0} \quad (2)$$

여기에서 식 (2)를 식 (1)에 치환하면 다음과 같다.

$$\delta_t = [(L a_p v_f / A_w) F_{t0}] / S_e \quad (3)$$

또한 이송이 멈춘 뒤 연삭 깊이 f 는 다음과 같다.

$$f = v_f / n_w = [A_w (F_t - F_{t0})] / (L n_w a_p) \quad (4)$$

여기에서 n_w 는 공작물의 행정(stroke)수로서 식 (1)과 (2)로부터 (5)식이 얻어진다.

$$f = [A_w (S_e \delta_w - F_{t0})] / (n_w a_p L) \quad (5)$$

불꽃소멸 과정동안 연삭숫돌이 m 번 회전했을 때 이송(f_m)값은 식(6)과 같이 얻어진다.

$$f_m = X (\delta_{wm} - F_{t0} / S_e) \quad (6)$$

여기서 X 는 $(A_w S_e) / (n_w a_p L)$ 이다.

연삭량이 연삭기계시스템 전체변형량 δ 의 90%에 도달하는 시간을 기준으로 하여 불꽃소멸 시간(t_s)을 계산하면 다음과 같다.³⁾

$$\sum_1^m f_m = 0.9 (\delta_t - F_{t0} / S_e)$$

$$(1-X)^m = 0.1$$

$$m = (2v_w a_p) / (A_w S_e)$$

$$t_s = (2a_p L) / (A_w S_e) \quad (7)$$

3. 실험방법

실험에 사용된 연삭숫돌은 WA46K6V이고, 연

삭기는 평면연삭기로서 WGS-64형이다. 주축의 회전수는 1800rpm이고 테이블의 이송속도는 1-25m/min이다. 연삭력의 측정은 일본 삼보전기 주식회사의 AST-GL형 공구동력계를 사용하였으며 표면거칠기의 측정은 독일 HOMELWE-RKE사의 807980형을 사용하였다. 실험재료는 SM45C로서 크기는 길이 167mm, 폭 37.6mm이다. 이들의 구성은 Fig.2에 나타내었다. Table.1에는 실험조건을 나타내었다. 연삭실험은 일정한 양만큼 이송을 주고 가공하며 연삭된 양이 일정한 값에 도달하면 배분력과 표면거칠기를 측정하는 방법으로 행하였다. 표면거칠기는 6번을 측정하여 평균값을 사용하였다. 이때의 표면거칠기, 배분력을 $(Ra)_0$, $(Fn)_0$ 로 각각 표시하였다. 이후 이송을 증가시키지 않고 다시 연삭작업을 하여 불꽃소멸 과정동안 연속적으로 배분력과 표면거칠기를 측정하였다. 이때의 배분력과 표면거칠기를 $(Fn)_s$, $(Ra)_s$ 로 표시하였다. 공작물의

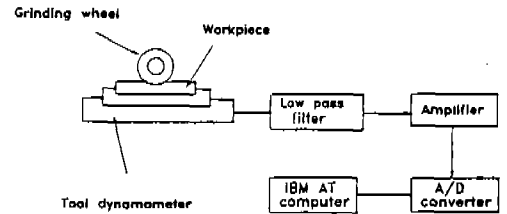


Fig.2 Schematic diagram of force measurement system

Table.1 Grinding Condition

Grinding machine	surface grinding machine whacheon CO.Ltd(WGS-64)
Power of main spindle	3.7KW
Grinding type	up cut grinding
Wheel	WA46K6V
Workpiece	SM45C
Table speed	6~18m/min
Depth of cut	0.01mm~0.02mm
Dressing	a=0.05mm
Grinding fluid	solution type(40 : 1)

속도를 6m/min, 12m/min, 18m/min로 절입깊이를 0.01mm과 0.02mm로 각각 적용하여 실험을 되풀이하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면거칠기

Fig.3은 불꽃소멸 시간에 대한 표면거칠기비의 감소경향을 나타낸것으로서 불꽃소멸 과정동안 표면거칠기비를 관찰하였을 때 $(Ra)_s/(Ra)_0$ 비는 대략 70~85%의 범위에 걸쳐 존재하였다. 이송을 연속적으로 주는 플런지 연삭(plunge grinding)의 표면거칠기는 연삭량에 비례하여 증가한다. 그러나 불꽃소멸 과정동안 이 두 변수는 비례하지 않는다. 불꽃소멸의 목적이 공작물의 표면거칠기 감소라고 보았을 때 연삭량이 많을수록, 즉 슷들의 마멸량이 증가할 때 불꽃소멸의 효과가 크다. 이는 Fig.3의 기울기로부터 알 수 있다. 연삭 슷들의 단위 폭당 연삭량(ground volume)이 $V'=500\text{mm}^3/\text{mm}$ 일 때 기울기가 가장 크다. Fig.4는 불꽃소멸 시간에 대한 표면거칠기 값의 변화를 나타낸 것으로, 그림에서 나타낸 바와 같이 불꽃소멸 과정동안 연삭량에 대한 표면거칠기 값의 크기 순위가 여러번 변한다. 이현상은 공작물의 속도가 적을수록 분명하게 나타난다. 이는 공작물의 속도가 작을수록 중복 절삭의 횟수가 많아진 결과라고 볼 수 있다. 불꽃소멸의 시간이 길면 표면거칠기와 연삭량(스틀입자의 마멸정도)의 비례관계가 성립되지 않는다. 이는 불꽃소멸 과정동안 표면거칠기는 연삭스틀의 형상(profile)이 아니라 중복절삭에 의해 좌우되기 때문이라고 볼 수 있다. 연삭작업에서 연삭스틀의 단면적 형상들이 공작물 표면에서 서로 잘 중복된다면 표면거칠기는 작아질 것이다. 이런 현상은 불꽃소멸이나 공작물의 속도를 줄임으로써 얻어질 수 있다. 본 연구의 작업조건에서 불꽃소멸 과정동안 연삭스틀의 공작물 가공 회수가 4~8회를 넘으면 표면거칠기의 변화는 아주 작아져 불꽃소멸의 효과가 거의 존재하지 않는다.

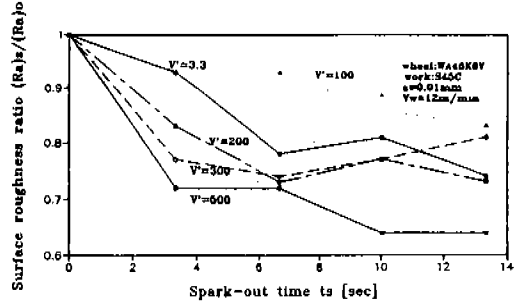


Fig.3 Surface roughness ratio in relation to spark-out time

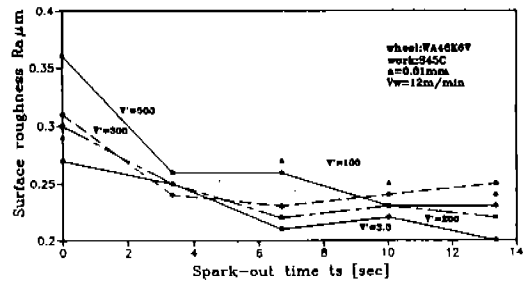


Fig.4 Decrease of surface roughness in relation to spark-out time

4.2 연삭력

Fig.5는 불꽃소멸에 의한 배분력의 변화 추이를 나타낸 것으로서, 이 결과를 불꽃소멸 시간에 대한 배분력 감소현상을 분석하면 Fig.6과 같이 나타난다. 연삭량 V' 300mm³/mm에 도달한 후에는 불꽃소멸 과정동안 배분력의 감소는 유사한 형태를 나타내며 또한 재료제거율(Metal Removal Rate)이 클수록 더 작은 V' 값에서 이 현상이 일어난다. 연삭입자를 연삭스틀의 본드가 강하다면 드레싱할 때 마찰마멸(attrition wear)에 의한 입자 마멸이 증가하며 연삭력은 마멸면적(wear flat area)에 비례하여 증가한다.⁴⁾ 따라서 이 실험에서 연삭량이 증가함에 따라 연삭력이 감소하는 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다. 연삭초기에는 마멸면적이 다소 증가함으로써 연삭력이 크게 나타나며 연삭가공이 진행됨에 따라 자생작용에 의해 연삭입자는 드레싱

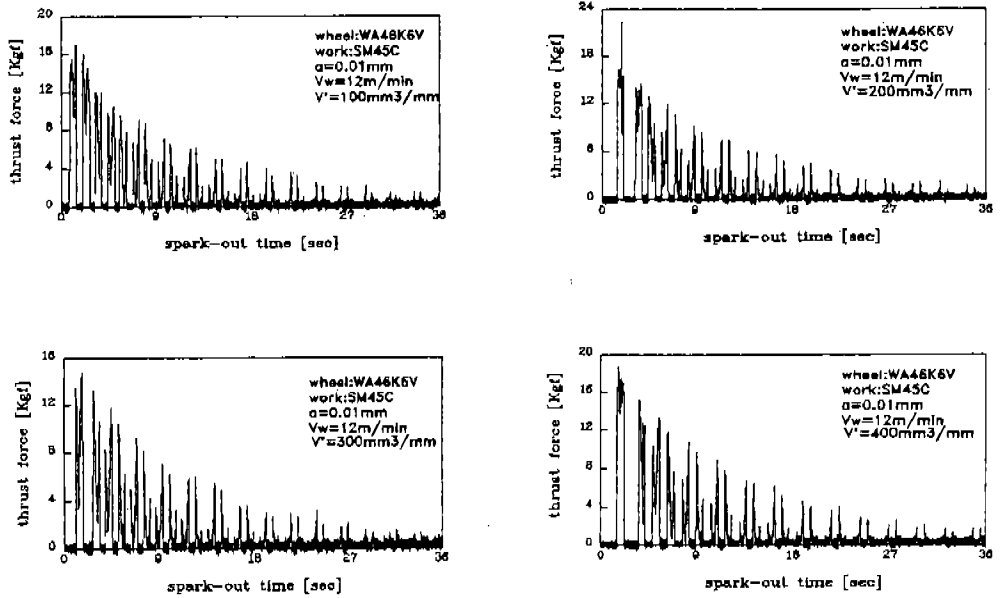


Fig.5 Decrease of thrust force in relation to spark-out time

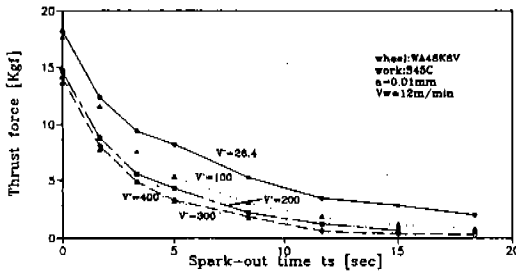


Fig.6 Decrease of thrust force in relation to spark-out time

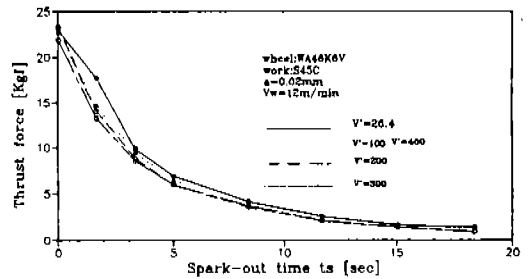


Fig.7 Decrease of thrust force in relation to spark-out time

직후 보다 예리해지고 따라서 연삭력은 작아진다. 재료제거율 $Z^0 = 4\text{mm}^2/\text{s}$ ($a = 0.02\text{mm}$, $V_w = 12\text{m}/\text{min}$)일 때 불꽃소멸 과정동안의 배분력 감소 형태에는 변화가 없다. 이는 다른 실험조건에서 이미 선행조건으로 자생작용이 연삭초기에 발생했기 때문이라 사료된다.

이와 같은 결과들은 Fig.7에서 증명되고 있다. Fig.8과 Fig.9에서 나타난 결과를 볼 때, 재료제거율 ($Z^0 = 2\text{mm}^2/\text{s}$)을 같게 할 경우 공작물의 속도와 절입깊이를 변화시킨다 하여도 불꽃소멸 과정동안의 배분력의 감소형태는 유사하게 나타나고 있다.

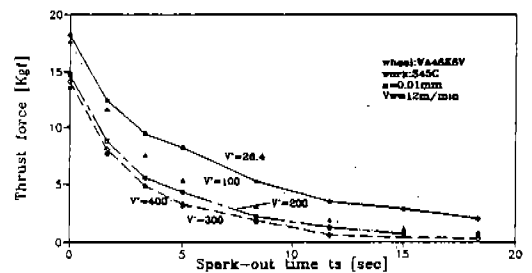


Fig.8 Decrease of thrust force in relation to spark-out time

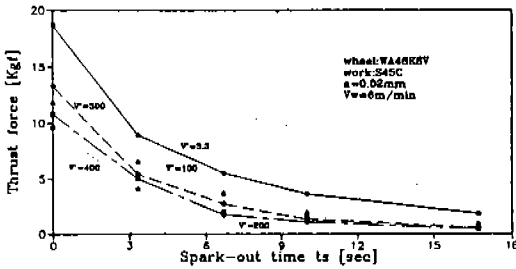


Fig.9 Decrease of thrust force in relation to spark-out time

4.3 불꽃소멸 시간

식(7)로부터 알 수 있듯이 이론적으로 공작물의 속도는 불꽃소멸 시간에 어떠한 영향을 주지 않으며 Fig.8과 Fig.9에서 얻어진 실험결과는 이를 증명하고 있다. 또한 불꽃소멸 시간을 줄이기 위하여 연삭 폭(a_p)을 줄이거나 재료제거율 A_w 또는 연삭기계시스템의 유효강성(S_s)을 증가시켜야 하며, 본 실험결과로부터 연삭량이 적을수록 불꽃소멸 시간이 크다는 것을 알 수 있었다. 본 실험조건에서는 연삭 초기에 대한 연삭 입자는 드레싱에 의하여 다소 마멸되어 둔화되었으며 이때 불꽃소멸 시간이 가장 크게 나타난 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구의 실험조건으로 불꽃소멸 연삭특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구의 실험조건에서는, 불꽃소멸하는 동안 연삭숫돌이 공작물을 4~8번 통과하고 난 이후에는 불꽃소멸의 효과가 급속히 작아진다.
2. 재료제거율을 일정하게 유지하면서 공작물의 속도나 절입깊이를 변화시키더라도 불꽃소멸 동안 배분력의 감소형태는 유사하다.

3. 이송이 연속적으로 주어지는 플런지 연삭(plunge grinding)에서 연삭 입자의 마멸이 증가하면 공작물의 표면거칠기에 나쁜 영향을 주지만, 불꽃소멸동안 연삭입자의 마멸이 크면, 중복되는 면적이 커져 표면거칠기에 좋은 영향을 준다. 따라서 연삭숫돌 입자의 마멸이 중대하면 불꽃소멸을 오래 유지시키는 것이 드레싱 간격을 늘릴 수 있고 바람직하다.
4. 연삭한 양이 적을수록 불꽃소멸 시간은 커지고 불꽃소멸의 효과가 작다.
5. 연삭과정의 효율성을 높이기 위하여 연삭초기에는 불꽃소멸을 생략하고 입자의 마멸이 커지면 불꽃소멸을 실행시켜 표면거칠기를 감소시킴으로서 불꽃소멸시간을 줄일 수 있고 드레싱 간격을 늘릴 수 있다.

참 고 문 헌

1. Verker, J.,1977, 'Final report concerning the CIRP cooperative work on characterization of grinding wheel topography', Annals of CIRP, vol.26/2 pp.103~11
2. Verker, J.,1978, 'Predictive measurement of the spark-out roughness during grinding operation', Annals of CIRP, vol.27/1 pp.227~231.
3. Geoffrey Boothroyd., 1975, 'Fundamentals of Metal Machining and Machine Tool' pp.229~233.
4. Malkin, S. and Cook, N.H.,1971 'The Wear of Grinding Wheels, Part1, Attritious Wear', Trans.ASME, J.of Eng. for Ind., 93, pp.1120~1128.
5. Kazuo Nakayama, 1980, "Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by the Grinding of Steel Ball", Annals of the CIRP vol.29/1 pp. 132~139.