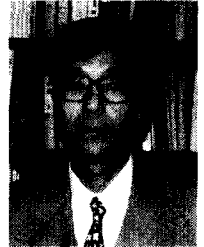


고능률 연삭

김 남 경*

High Efficiency Deep Grinding

Nam Kyung Kim*



1. 서 론

고정도를 가진 고능률연삭(UHSG: Ulter High Speed Grinding)은 밀링과 선반공정이 생략된 연삭법이라고 할 수 있다. Table 1에서 보듯이 UHSG중에서 HEDG 가공법은 연삭깊이 0.1~30mm 까지 절입깊이를 크게 할 수 있고, 공작물 속도(Table speed)도 0.5~10mm/min 으로서 일반연삭과 거의 비슷한 수준이다.

그러나 Vs즉 주속도는 80~200m/s 로서 일반연삭의 5 배 이상이다. 그러므로 금속제거율(removal rate)은 50~300mm³/mm·s로서 어느 가공법보다 생산성이 우수하다.

특히 Fig. 1과 같은 가공품은 일반적으로 사용되었던 크립피드연삭과 같은 가공법보다는 HEDG가공법을 이용하면, 생산성과 정밀도 측면에서 특히 뛰어날 것이다.

연삭작업시 단위체적당 제거율에 대해 고에너지가 발생하며 이것은 연삭 부위에 열에너지로 변환된다. 이는 작업시 공작물 내부에 온도 분포가 생기고, 공작물에 생기는 변형이나 열응력 등에 중요한 영향을 미치는 것은 사실이

다. 지금까지는 크립피드 연삭과 고속 연삭에서 열해석은 사각형과 삼각형 모델 등으로 실제가공 현상과 일치시키기 힘든 모양이다. 그래서 본 연구에서는 크립피드에서 가장 적합한 열원 모델을 개발하고 고속연삭에 이러한 모델 적용에 앞서 기존 모델로서 열유입 비율과 온도 분포를 파악하고, 이론적 실험적 바탕을 기준으로 고능률 연삭의 우수성을 밝히겠다.

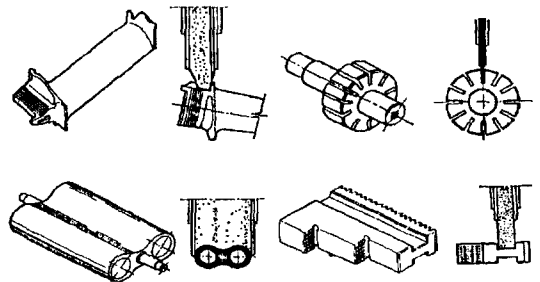


Fig. 1 Various Products of High Efficiency Deep Grinding

* 국립진주산업대학교 기계설계공학과

Table 1 Various grinding Method

mode parameters	Conventional grinding	Creep feed deeping grinding	UHSG	
			Precision PUHSG	High efficiency deep grinding(HEDG)
cut down (ap)(mm)	shallow 0.001-0.05	deep 0.1-0.3	shallow 0.003-0.05	deep 0.1-30
table speed (Vs)(m/min)	high 1-30	low 0.05-0.5	high 1.0-10	high 0.5-10
wheel speed (Vs)(m/s)	low 20-60	low 20-60	high 80-200	high 80-200
remove rate (θw)(mm ³ /mm · s)	low 0.1-10	low 0.1-10	middle <60	high 50-300

2. 열원 모델 해석 및 실험

실험은 하향 및 상향연삭의 두가지 방법으로 스톨 속도 $V_s = 30m/s$, 공작물 속도 $V_w = 5mm/s$, 그리고 스톨 연삭깊이 $a = 0.5mm$ 로 수행하였다. 하향연삭의 경우 스톨의 회전방향은 연삭영역에서 공작물 속도와 동일한 방향이며 유제는 Fig. 2에서 처럼 공급된다. 상향연삭은 왼쪽부터 유제를 공급하고 공작물 이동과 반대 방향으로 스톨회전 속도를 가지게 하여 실험하였다. 연삭유제는 5% 수용성유제를 사용하여 노즐 유량이 2 l/s로 공급하여 실험하였다. 한편 공작물의 이론적인 온도분포는 이동열원 이론을 이용하여 계산하였다. 여기서 기하학적 접촉호 $l_c = (d_s a)^{1/2}$ 와 같이 표현되고, a 는 연삭깊이, h_a 와 h_b 는 연삭 전방 및 후방의 대류 열전달계수, q 는 열원(Heat Flux)을 의미한다. 횡자표에 나타난 무차원 길이 (x/l) 는 열원의 위치에 대한 준정적상태를 나타내며 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{x}{l} = \frac{-V_w t}{l} + \frac{x_0}{l} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, l 은 $l_c/2$ 즉 접촉호의 반, x_0 는 연삭의 개시점으로부터 열전대의 거리 그리고 V_w 는 공작물 속도이다.

무차원 길이에 해당하는 값의 측정은 2l 길이의 연삭 접촉길이(-1 ~ 1)의 중간점에서 측정하였다. 연삭에 앞서 연삭스톨은 드레싱 리이드 $S_d = 0.038mm$ 이고 반경방향 드레싱 깊이 $a_d = 0.038mm$ 의 다이아몬드 드레싱 하였다. 실험은 먼저 시편의 평탄화를 위하여 연삭깊이

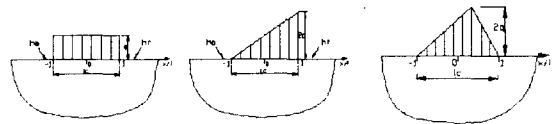
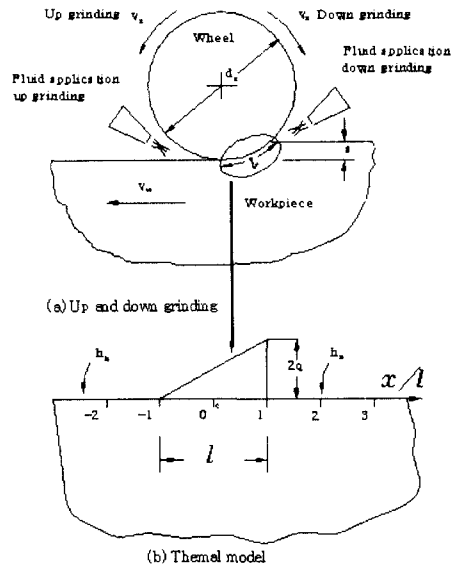
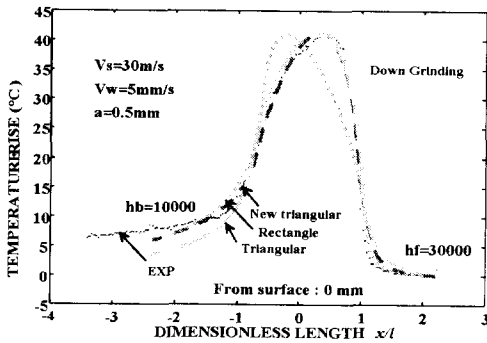
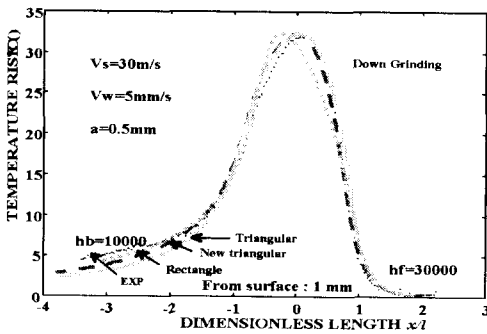


Fig. 2 Illustration of up and down grinding and thermal model and heat source

0.05mm로 5회의 연삭작업을 실시하여 시편을 평평하게 만들었다. 연삭실험 동안에 모든 온도와 동력에 관련된 데이터가 연속하여 수집하고, 공작물을 냉각하였다. 이 실험은 열전대 전기 회로가 끊어져 열전대가 그 역할을 중



(a)



(b)

Fig. 3 Measure temperature and analytical solution for creep feed grinding

지하는 동안에 1회 연삭깊이 0.5mm로 13번 연삭횟수 동안 계속되었다. 하향 연삭 시험에서는 중간 드레싱 없이 이뤄졌다. 상향 연삭에서 5회의 연삭 후에 연삭 버어닝이 발생되었기 때문에 버어닝 현상을 피하기 위해 슷들은 초기 드레싱할 때와 같은 조건으로 매 4번 연삭 후에 드레싱하였다.

현재까지의 연구에 따르면 연삭영역 내에서 전체 열 흐름은 균일한 것(Fig. 2의 사각형 형태) 또는 비례하는 것(Fig. 2의 비례적인 삼각형 형태)로 모델화되어져 있으며 공작물로의 열 분배는 연삭지점을 따라 일정한 균일한 속도로 이동한다는 가정으로 되어졌다. 그러나 연삭 영역에서 열흐름은 급격히 상승하였다가 서서히 하강한다. Fig. 2의 변형된 삼각형 모델과 같이 기존의 비례하는 삼각형 모델을 양쪽으로 붙힌 형태로 비교적 간단하게 사용할 수 있는 새로운 열원 모델로 분석한다. 그리고 Fig. 2에서 사각형, 삼각형 모델은 응용되고 있으나 새로운 삼각형 모델은 처음 적용하였다. 위의 실험에서 Fig. 3과 같이 새로운

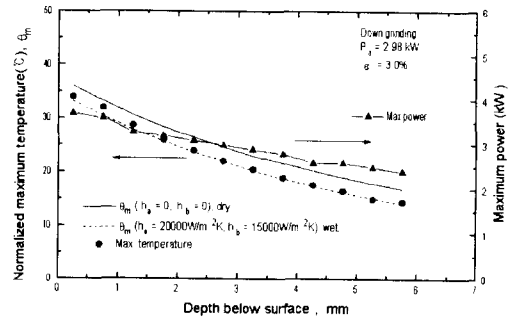


Fig. 4 Normalized maximum temperature and power versus depth below surface for down grinding

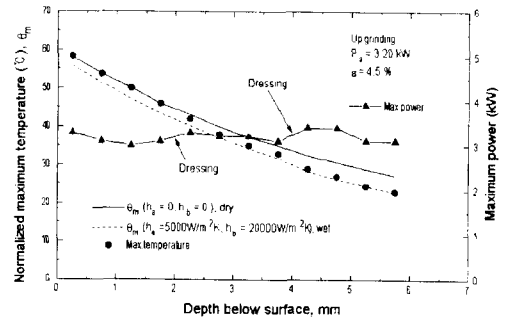


Fig. 5 Normalized maximum temperature and grinding power versus depth down surface for up grinding

모델 즉, 처음 적용된 변형된 삼각형 모델이 실 연삭과 잘 일치함을 보여주고 있다.

위의 Fig. 4에서는 하향연삭으로 크릴피드 연삭에서 하향연삭시 표면온도는 40°C미만이고, 소요 동력은 3kW, 열유입 비율은 일반연삭(50~60%)보다 현저히 낮은 3%이다. 반면에 Fig. 5에서는 상향연삭에서 슷들은 앞에서 언급한 바와 같은 버어닝 현상을 피하기 위하여 매회 4번의 연삭 후에 재 드레싱을 하였다. 이 경우 총 12번의 연삭동안에 평균 동력은 하향연삭보다 약간 큰 3.2kW이다. 이것은 크릴피드 연삭에서는 하향연삭 보다는 상향연삭이 로우딩 등에 의하여 더 큰 동력이 발생하므로 하향연삭이 크릴피드 연삭에서 좋은 방법으로 추천할 수 있다. Fig. 5에서는 상향연삭시 측정된 최대온도와 동력 변화를 설명하기 위해 하향연삭과 같은 방법으로 최대온도를 표준화하였다.

삼각형 열원 분배와 함께 동적 열원이론을 이용함으로써 추론되어진 반응에서 측정된 온도 적합성은 하향연삭

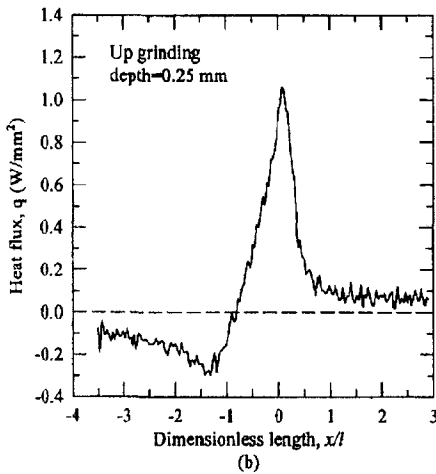
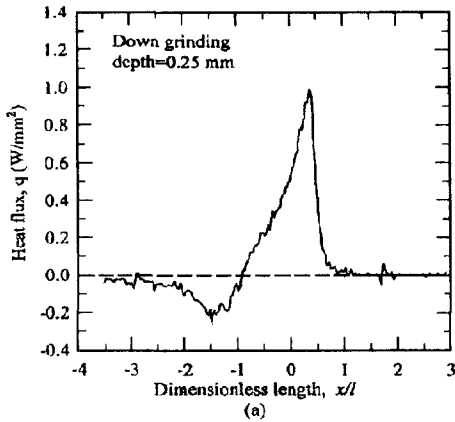


Fig. 6 Heat flux distributions obtained from inverse heat transfer analysis

에서 약 $\epsilon = 3.0\%$, 그리고 상향연삭에서는 $\epsilon = 4.5\%$ 의 에너지 분할 값을 구했다. Fig. 6에서와 같이 각각의 펄스가 열흐름 양이 상향연삭보다 하향연삭시 0으로의 접근이 양호함을 나타내 보이고 있다. 따라서 상향연삭보다 하향연삭이 열원이 적고, 연삭 시작점에서 냉각능력이 뛰어난 것을 보이고 있다.

3. Heat transfer model of high efficiency deep grinding

현재 고능률 연삭은 빠른 공작물속도와, 고절삭 깊이 그리고 높은 금속 제거율, 등이 계속 연구되어야 할 과제이

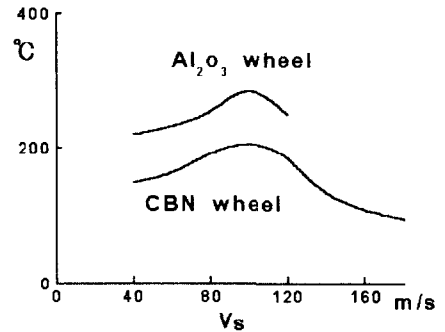


Fig. 7 Surface temperature of workpiece versus grinding speed in HEDG

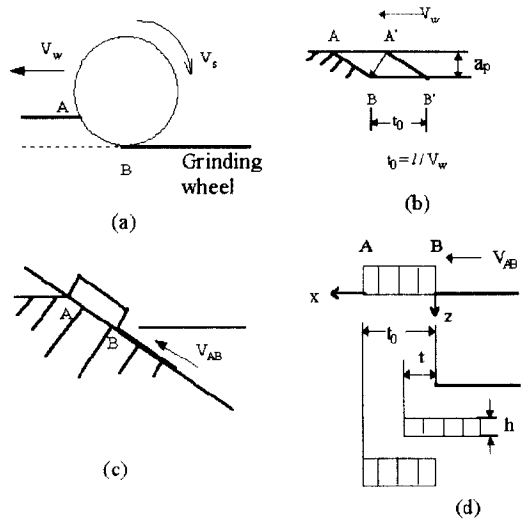


Fig. 8 Heat transfer model in grinding zone of HEDG

다. 그리고 종래의 연삭휠과 비교해서 높은 수준에 도달할 수 있는 CBN숫돌을 사용함으로써 많은 이점을 가져올 수 있다. Fig. 7은 HEDG의 전형적인 실험적 결과를 나타낸다. 일반적으로 CBN휠이 일반휠 보다 좋은 조도를 가질 수 있고, 임계 연삭속도에서 최고 온도를 가지고, 임계 속도를 지나면 온도는 감소한다.

HEDG에서 접촉호는 절삭깊이가 깊기 때문에 매우 크다. Fig. 7에서 보듯이 공작물 이송속도는 크릴피드의 이송속도 보다 훨씬 빨라서 Jaeger의 열 이동 이론은 HEDG 열 이동의 분석을 바로 적용할 수 없다. Fig. 8의 (b)그림에서 점 B에서 열이 발생하여 A'B'가 AB근처로 감에 따라 차차 B에서 A로 이동한다는 것을 볼 수 있다.

여기서 열이동 속도 V_{AB} 와 공작물 속도(V_w)와 같다고 가정한다면 열원의 높이는 아래의 (1)식과 같다

$$h = \bar{q} \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

여기서, q : 연삭영역에서의 공작물 평균 열흐름

$$t_0 = \frac{l}{V_{AB}} = \frac{l}{V_w}$$

l : 접촉 길이 t : B점을 지난 후 열의 이동 시간

다음에 Fig. 8의 (b)그림에서 AB하의 온도 상승은 다음의 평면열원 방정식(식3)에서 논의 되어질 수 있다.

$$T_{(x, z)} = \int_{t=\lambda t_0}^{t=t_0} \frac{2\bar{q} \frac{t}{t_0} dt}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} \quad (3)$$

여기서, c : 비열, ρ : 밀도, α : 온도 전도율 $\tau = t_0 - t$ 그리고 $\lambda = x/\lambda$, $0 \leq x \leq l$, $0 \leq \lambda \leq 1$,

$\lambda=0$: 점 B, $\lambda=1$: 점 A

$T_{(x, 0)}$ 관점(표면온도)에서

$$T_{(x, 0)} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{\bar{q}}{\sqrt{k\rho c}} \sqrt{\frac{l}{V_w}} \times (1-\lambda)^{1/2} (2+\lambda) \quad (4)$$

$\lambda=0$ 인 점 B에서

$$T_B = 0.752 \frac{\bar{q} \sqrt{l/V_w}}{\sqrt{k\rho c}} \quad (5)$$

접촉 길이의 중앙점 점 C에서 $\lambda = \frac{1}{2}$

$$T_c = 0.665 \frac{\bar{q} \sqrt{l/V_w}}{\sqrt{k\rho c}} \quad (6)$$

$\therefore T_B = T_{max}$
(관련된 실험결과와 일치)

4. Modification of Lavine's simplified thermal model

Lavine의 단일 열원 모델에서 연삭부위에 생성된 열은 공작물 그리고 냉각수와 혼합체인 복합물로 옮겨진다. 각

각의 공작물과 복합체에서의 표면온도는 연삭방향에서 일정한 열적 특성과 무시해도 좋은 열전도, 균일한 열흐름과 같은 가설과 함께 Jaeger의 이동열원 이론을 사용함으로써 계산되어질 수 있다.

접촉면의 각면에서 최대 표면온도를 접촉시켜서 아래와 같은 방정식을 얻을 수 있다. 공구면의 최대온도는 다음의 식(7)과 같다.

$$F'_i V_s = K_w (V_w l)^{1/2} + K_c (V_s l)^{1/2} \quad (7)$$

여기서 :

$$K_w = \left(\frac{T_{max}}{1.128} \right) \times (k\rho c)_w^{1/2} \quad (8)$$

$$K_c = \left(\frac{T_{max}}{1.128} \right) \times (k\rho c)_c^{1/2} \quad (9)$$

C: 합성, W: 공작물, T_{max} : 최대표면온도

F'_i : 단위면적당 접선력, k : 열 전도율

위의 식(5)의 최대표면온도를 이용하여 식 (8)를 수정하면 다음과 같다.

$$K_w = \left(\frac{T_{max}}{0.752} \right) \times (k\rho c)_w^{1/2}$$

5. Analysis and Explanation of Heat Transfer in HEDG

식 (5), (7), (9)으로부터 HEDG의 연삭영역 최대표면온도는 아래의 식(10)과 같다.

$$T_{max} = 0.752 \frac{(l/V_w)^{1/2} F'_i V_s}{(k\rho c)_w^{1/2} l} \cdot \epsilon$$

또는

$$T_{max} = 0.752 \frac{F'_i V_s}{(k\rho c)_w^{1/2} (V_w l)^{1/2}} \cdot \epsilon \quad (10)$$

여기서 :

$$\epsilon = \left\{ 1 + \frac{1.752 \left[\frac{(k\rho c)_c V_s}{(k\rho c)_w V_w} \right]^{1/2}}{1.128} \right\}^{-1} \quad (11)$$

ϵ : 공작물에서 열분배

$(k\rho c)_w$: 제거율, $(k\rho c)_c$: 냉각재 공급

참고로 HEDG에서 열전행은 주로 연삭속도(V_s)의 영

향을 받는다. 최대온도를 갖는 임계속도는 아래의 식(12)와 같다.

$$F'_t = K_1 \cdot V_s^\alpha \quad 0 < \alpha < 1 \quad (12)$$

식(10)에서

$$T_{max} = K_2 \cdot V_s^\beta \cdot \varepsilon \quad \beta = 1 - \alpha \quad (13)$$

$$\text{where : } K_2 = \frac{0.752K_1}{(k\rho c)_w^{1/2} (V_w l)^{1/2}}$$

식(10),(13)에서 V_s 가 커지며 따라 공작물에 들어가는 열의 비율은 작아진다.

Table 2 Energy partition (to workpiece versus Grinding Speed ($V_w=0.033m/s$))

V_s (m/s)	20	60	100	140	180
Alum. Composite	0.525	0.390	0.331	0.295	0.269
CBN Composite	0.041	0.024	0.019	0.016	0.014

양쪽 온도가 균형을 가질 때의 온도

Table 3 Relative Surface Temperature T_{max}/K_2 versus Grinding Speed

V_s (m/s)	20	60	100	140	180
T_{max}/K_2	1.4301	1.5341	1.5446	1.5406	1.5281

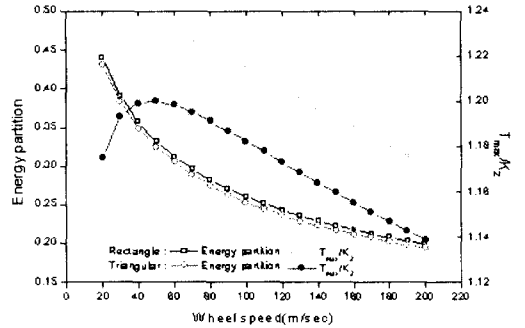
(a) : Aluminum oxide wheel 90A80Q4BH50/100, oil base coolant Critical grinding speed : 100m/s ; $\beta=0.3345$

V_s (m/s)	20	60	100	140	180
T_{max}/K_2	0.1783	0.1790	0.1820	0.1808	0.1789

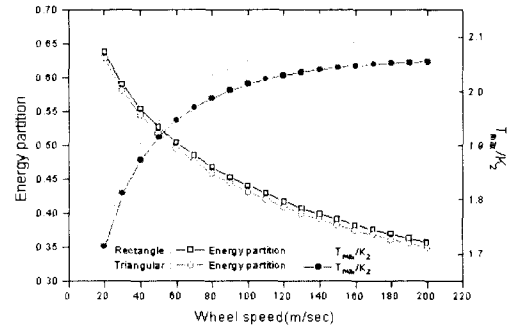
(b) : CBN wheel : GY B252N200G, oil base coolant Critical grinding speed : 100m/s ; $\beta=0.4907$

연삭에 영향을 주는 인자 β 값을 0.3345로 하고 연삭숫돌과 유체에 대한 열적 특성값인 $(k\rho c)_c^{1/2}$ 는 $800 W_s^{1/2} m^{-2}k^{-1}$, 공작물에 대한 열적특성 값은 $k\rho c_w^{1/2} = 14520 W_s^{1/2} m^{-2}k^{-1}$ 로 놓고 식(6), (8), (12)그리고 (13)을 그래프로 나타내면 Fig.9와 같다.

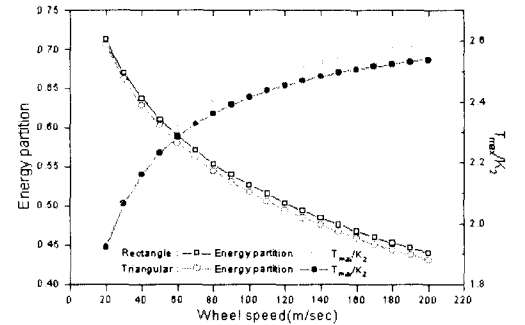
Fig. 9에서 보듯이 고속연삭에서는 공작물 속도에 관계



(a) Table speed 16.7mm/sec



(b) Table speed 83.5mm/sec



(c) Table speed 167m/s

Fig. 9 Energy partition and T_{max}/K_2 to workpiece versus grinding speed

없이 연삭 주 속도가 증가하면 증가할수록 열유입 비율은 감소한다. 그림 (a)에서 주 속도가 $500m/s$ 에서 이론적 최고온도가 낮아진다. (b)에서는 연삭 주 속도가 $80m/s$ 이상에서는 T_{max}/K_2 값이 거의 같다. 그리고 열유입 비율이 비교하여 보면 사각형 모델에서 삼각형 모델로 변화함에 따라 유입비율이 크릴피드와 같이 줄어들고 있다.

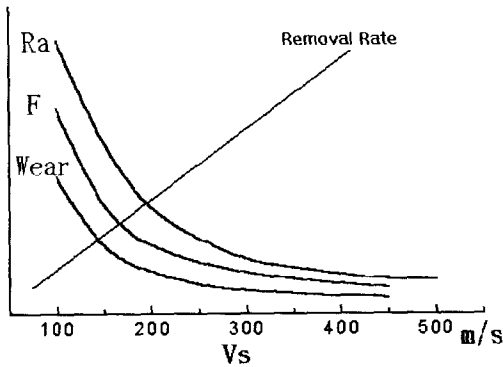


Fig. 10 Surface roughness, Wheel wear, Grinding force and Removal rate

따라서 공작물 속도가 증가할수록 열 유입비율이 높고 최고온도도 높게 나타난다.

위의 실험에서 고속연삭에서는 공작물 속도에 관계없이 연삭 주 속도가 증가하면 열유입비율은 감소한다. 그리고 고속연삭에서 공작물 속도가 16.7mm/s 일 때 연삭 주 속도 50m/s 에서 167mm/s가 감소하고, 공작물 속도가 83.5mm/s와 167mm/s로 증가하면 연삭 주 속도가 80m/s 이상에서는 T_{max} / K_2 값이 완만하게 증가한다.

Fig. 10과 같이 주속도가 크면 표면 거칠기(Ra), 휠 마모량(Wear), 그리고 연삭력(F)는 감소하고 반면에 금속제거율은 증가하는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

고능률 연삭에 관한 이론적인 배경을 통하여 연삭기 개발의 기초를 제공한 것으로 몇가지 결론은 다음과 같다.

- (1) 크립피드연삭의 새로운 모델을 제시하여 실가공과 근접성을 제시하고 그때 열유입비율을 3~4.5%로 밝혔다.
- (2) 크립피드 연삭에서는 상향연삭이 3.2kW이고 하향연삭이 3kW였다. 아울러 냉각효과도 하향연삭이 우수한 것으로 보여 크립피드와 같은 고능률 연삭에서는 하향연삭을 추천할 수 있다.

- (3) 고속연삭에서 평면 열원 방식을 이용하여 최대 표면 온도 모델식을 제시하였다.
- (4) 최대 표면온도가 감소하는 임계속도를 제시하고 연삭 주속도가 증가하면 증가할수록 열유입비율이 감소함을 밝히고, 금속제거율이 증가하는데 반하여 표면거칠기와 휠 마모량 그리고 연삭력 측면에서 우수성을 제시하였다.

이러한 이론적 배경을 바탕으로 국내의 고능률 연삭기 개발을 위해 주축, 베어링과 휠 등의 개발 필요성의 방향을 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, N.K. & et al., (1997) Heat flux distribution and energy partition in creep-feed grinding. Annals of the CIRP, 1997,46(1):227~232
- (2) Lavine, A.S., (1988) A simple model for convective cooling during the grinding process, ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.110, pp. 1~6
- (3) Jin, T. & Cai, G. Q.,(1999) Analytical thermal models of oblique moving heat source for deep grinding and cutting, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, (submitted)
- (4) Tawakoli. T. & et al.,(1992) Hochleistungsschleifen (HEDG) von Inconel und anderen Werkstoffen, VDI-Z 134, Nr.1-Januar
- (5) Tawakoli. T., (1990) Hochleistungsschleifen, Technologic, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz Duesseldorf: VDI-Verlag
- (6) T. Jin & Guangqi Cai, Hae Do Jeong, Nam Kyung Kim (1999) Study on Heat Transfer of Super-high Speed Grinding, AFDM'99 pp. 285~290