

고능률 고속연삭에서 열원 모델에 관한 연구

김남경*

A Study on Heat Source Model to High Efficiency Speed Grinding

Nam Kyung Kim*

Abstract

An analytical thermal model of HESG (high efficiency speed grinding) is presented, in which the heat flux to workpiece in grinding zone is modeled as time dependent and moves along a slope decided by contact chord (approximation of contact arc). By matching the maximum surface temperature of workpiece derived from this model to the maximum surface temperature of grinding wheel composite as done in Lavine's simple thermal model, the relation of maximum surface temperature and energy partition of workpiece to grinding speed is obtained. In high speed grinding, as wheel speed increases, energy partition decreases with no regard to table speed.

Key Words : Grinding(연삭), heat transfer(열 전달), thermal model(열 모델), energy partition(에너지 유입비율)

1. 서 론

고속가공이라는 개념은 공작물의 관점에서 볼 때는 매우 상대적이라고 할 수 있다. 그것은 공작물의 종류에 따라 공구마모를 최소화하면서 가공할 수 있는 절삭속도에 큰 차이가 나기 때문이다. 따라서 고속가공을 주변형영역(Primary deformation zone)에서 진단의 국부화가 완전히 일어나는 속도 이상에서의 가공으로 정의하기도 한다. 그러나 이러한 정의는 정량적이지 못하므로 주축회전수를

기준으로 약 50m/sec 이상에서의 가공을 고속가공이라 부르는 것이 보다 일반적이다. 연삭가공시 슷돌 주속도 150m/sec⁽¹⁾ 전후의 고속연삭도 실용화되기 시작하고 연구 레벨에서는 300m/sec라는⁽²⁾ 초고속 연삭도 시도되고 있다. 고속연삭가공의 원리는 슷돌의 주속도를 높게 함으로써 최대 슷돌입자 절삭깊이가 감소한다. 절삭깊이가 감소하면 표면조도는 향상되고 슷돌 마모와 연삭저항이 감소하므로 재료 제거율을 높일 수 있다⁽³⁾. 슷돌 마모가 감소하기 때문에 드레스간격을 길게 할 수 있다. 고속연삭은 고

* 진주산업대학교 기계설계공학과(nkkim@jinju.ac.kr)

생산력과 우수한 성능을 겸비한 고정밀도, 고능률화를 실현할 수 있는 유효한 수단이다. 그리고 고속연삭으로 고능률 가공을 하기 위해서는 높은 안전성과 양호한 가공정밀도 및 연삭성을 가진 스톨이 요구된다. 종래의 연삭스톨과 비교해서 높은 원심력을 가지기 때문에 이를 견딜 수 있는 고속연삭용 스톨(CBN, 다이아몬드, 비트리파이드 등)을 개발하여 고속연삭에 활용할 수 있다.

연삭작업은 공작물을 가공시 단위체적당 제거율에 대해 고 에너지가 요구되며 이 에너지는 연삭부위에서 열로 변환된다. 이 열은 공작물에 전도되어 공작물 내부에 온도분포가 생기고, 이것에 의해서 공작물에 생기는 변형이나 열응력 등에 중요한 영향을 미친다. 그래서 본 논문에서는 연삭깊이가 크고 스톨 주속도가 고속인 고능률 고속연삭시 열원 모델의 수학적 해석을 통하여 이송속도의 증가에 따른 연삭 최고온도와 에너지유입비율을 살펴보고자 한다.

2. 고능률 고속연삭에서의 열전달 모델 해석

Fig. 1은 고능률 고속연삭의 전형적인 결과를 나타낸다. 일반적인 연삭과 Creep feed 연삭에서 주속도가 증가할수록 온도가 증가하다가 임계속도(100m/sec) 이후에는 온도가 감소하는 것을 실험을 통해 알 수 있다.⁽⁴⁾ 또, 그림에서 볼 수 있듯이 CBN스톨이 Al₂O₃스톨에 비하여 낮은 온도를 가진다.

연삭에서의 열원의 전달을 분석하기 위해서 Fig. 2와 같이 열원 모델을 가정하였다.⁽⁵⁻⁷⁾ (a)는 사각형모델로써 균

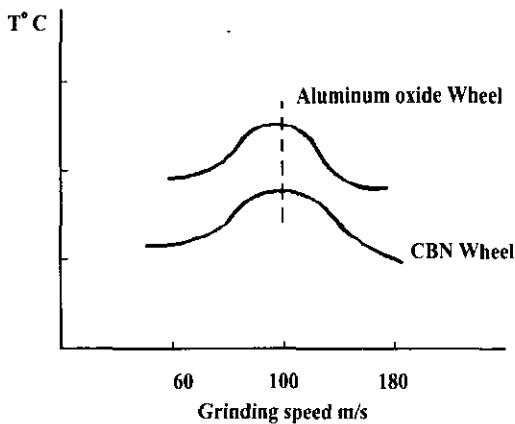


Fig. 1 Surface temperature of workpiece versus grinding speed in high efficiency speed grinding

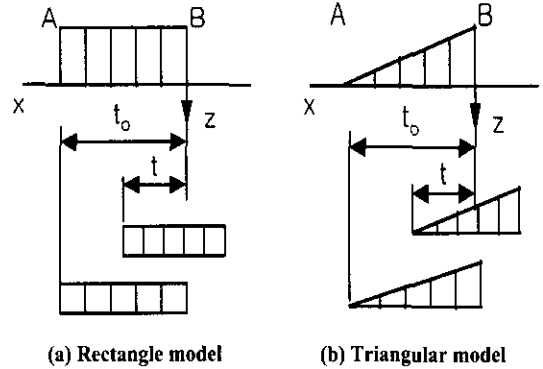


Fig. 2 Heat transfer model in grinding zone

일한 열원이 전달되는 것이고, (b) 삼각형모델로써 비례적으로 감소하는 열원 전모델이다.

2.1 사각형 열원 모델

Fig. 3에서 보듯이 고능률 고속연삭은 크랩피드연삭과 같이 연삭깊이(5~20mm)가 매우 크다. 그러나 공작물의 이송속도는 크랩피드의 이송속도(0.05 - 0.5m/min)보다 훨씬 빠르다. 스톨직경에 비하여 연삭 절입깊이가 작기 때문에 Fig. 2(a)의 접촉호를 (b)와 같이 직선으로 간주할 수 있다. Fig. 3의 (b)에서는 점 B에서 열이 발생하고 A'B'가 AB근처로 감에 따라 차차 B에서 A로 이동한다는 것을 볼 수 있다. 열이동 속도 V_{AB}와 공작물 이송속도 V_w가 같다고 가정한다.

$$t_0 = \frac{l}{V_{AB}} = \frac{l}{V_w} \quad (1)$$

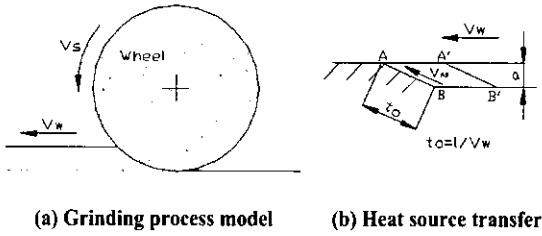
여기서, l: 접촉 길이(mm)

t₀: B점을 지나 A로의 열 이동 시간(sec)

Fig. 2의 (a)에서 AB면의 온도 상승은 다음의 평면열원 방정식과 중첩(superposition)법칙^(9,10)에서 설명되어 질 수 있다.

$$T_{(x,z)} = \int_{t=\lambda_0}^{t=t_0} \frac{2\bar{q}}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a\tau}\right) dt \quad (2)$$

여기서, \bar{q} : 평균열흐름(w/m²), c: 비열(J/kg · K), ρ: 밀



(a) Grinding process model (b) Heat source transfer

Fig. 3 Heat transfer in grinding zone of high efficiency speed grinding

도(\$kg/m^3\$), \$\alpha\$: 열확산계수(\$m^2/s\$, \$\alpha = \frac{k}{\rho c}\$, \$k\$: 열전도율 (\$w/m \cdot K\$)), \$\tau = t_0 - t(t_0 = \frac{l}{V_{AB}} = \frac{l}{V_w})\$ 그리고 \$\lambda = x/l\$, \$0 \le x \le l\$ 이다.

표면온도 \$T_{(x,0)}\$는

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

이다.

식 (3)로 부터 \$\lambda=0\$일 때의 점 B에서 최고온도를 가진다.

$$T_{max} = 0.752 \frac{\bar{q} \sqrt{l/V_w}}{\sqrt{k\rho c}} \quad (4)$$

각각의 면의 열흐름은 균일한 흐름이라는 가정과 Jaeger의 이동 열원 방정식에서 Lavine의 간단한 열원에 적용하면^(8,11)

$$F'_i V_s = K_w (V_w l)^{\frac{1}{2}} + K_c (V_s l)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서,

$$K_w = \left(\frac{T_{max}}{1.128} \right) \times (k\rho c)_w^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$K_c = \left(\frac{T_{max}}{1.128} \right) \times (k\rho c)_c^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

\$F'_i\$: 단위폭당 접선력

첨자 c: 혼합물체(냉각재와 연삭입자)

첨자 w:공작물

식(4)에 식(6)를 이용하여 다시 쓰면

$$K_w = \left(\frac{T_{max}}{0.752} \right) \times (k\rho c)_w^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

고능률 고속 연삭에서 최고온도를 식(4), (5), (7)과 (8)로 다시 쓰면,

최고온도 \$T_{max}\$는

$$T_{max} = 0.752 \frac{F'_i V_s}{(k\rho c)_w^{\frac{1}{2}} (V_w l)^{\frac{1}{2}}} \cdot \epsilon \quad (9)$$

이다.

여기서, \$\epsilon\$: 공작물로의 에너지 유입비율

$$\epsilon = \left\{ 1 + \frac{0.752 \left[(k\rho c)_c \frac{V_s}{V_w} \right]^{\frac{1}{2}}}{1.128 \left[(k\rho c)_w \frac{V_s}{V_w} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^{-1} \quad (10)$$

접선력 \$F'_i\$에 관한 함수로 나타내면, 식(11)과 같다.

$$F'_i = K_1 \cdot V_s^{-\alpha} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (11)$$

식 (9)으로부터

$$T_{max} = K_2 \cdot V_s^{\beta} \cdot \epsilon \quad \beta = 1 - \alpha \quad (12)$$

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

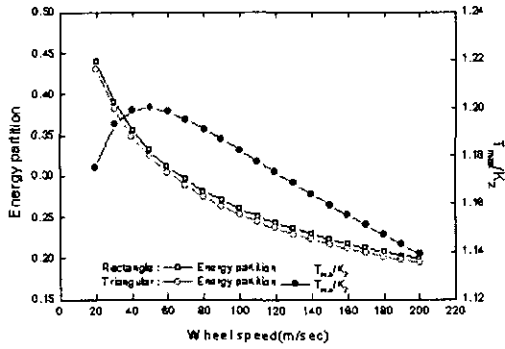
2.2 삼각형 열원모델

열원이 삼각형 모델이라고 가정하여 식 (2)을 변형하면

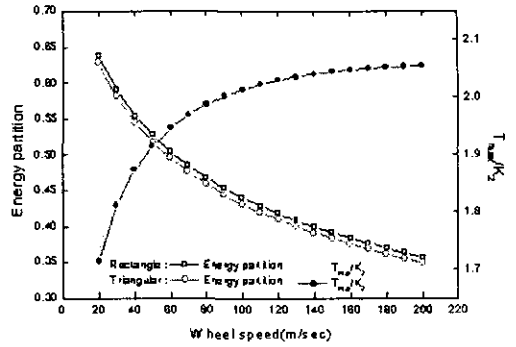
$$T_{(x,z)} = \int_{t=\lambda_0}^{t=t_0} \frac{2\bar{q}\lambda \frac{l}{t_0} dt}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \quad (13)$$

표면온도 \$T_{(x,0)}\$는

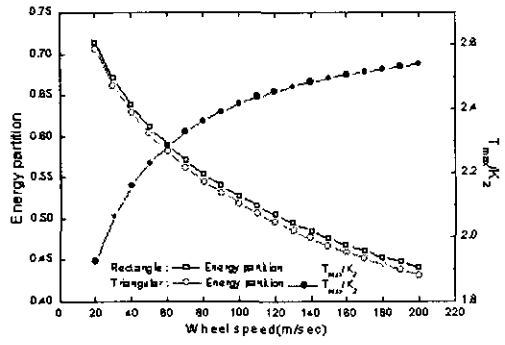
$$T_{(x,0)} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{\bar{q}\lambda}{\sqrt{k\rho c}} \sqrt{\frac{l}{V_w}} (1-\lambda)^{\frac{1}{2}} (2+\lambda) \quad (14)$$



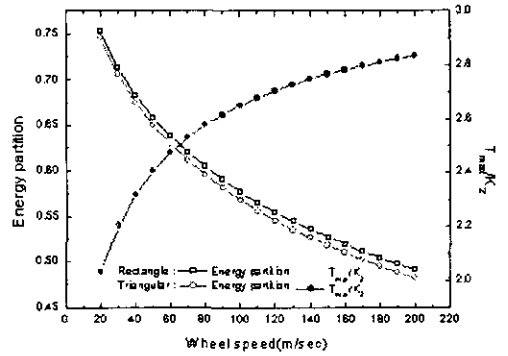
(a) Table speed 16.7mm/sec



(b) Table speed 83.5mm/sec



(c) Table speed 167mm/s



(d) Table speed 250.5mm/s

Fig. 4 Energy partition and T_{max}/K_2 to workpiece versus grinding speed(Al_2O_3).

이다.

T_{max} 를 가지는 위치는 $\lambda=0.716$ 일 때이다.

$$T_{max} = 0.7796 \frac{\bar{q} \sqrt{l/V_w}}{\sqrt{k\rho c}} \quad (15)$$

이다. 식 (13)을 Jaeger의 이동 열원 방정식과 Lavine의 간단한 열원에 적용시키면 최고온도 T_{max} 는

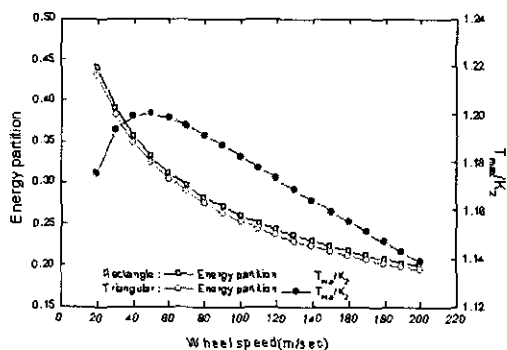
$$T_{max} = 0.7796 \frac{F_t V_s}{(k\rho c)_w^2 (V_w l)^2} \cdot \varepsilon \quad (16)$$

$$\varepsilon = \left\{ 1 + \frac{0.7796}{1.128} \left[\frac{(k\rho c)_c V_s}{(k\rho c)_w V_w} \right]^2 \right\}^{-1} \quad (17)$$

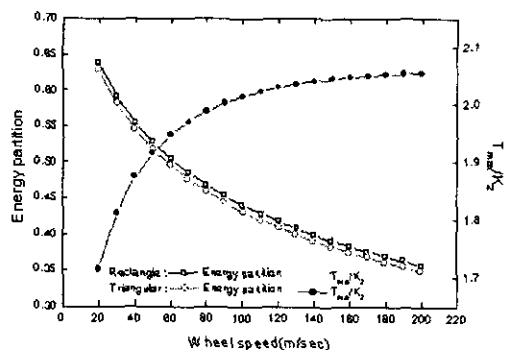
접선력에 의한 식으로 나타내면, 식 (16)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{max} = K_2 \cdot V_s^\beta \cdot \varepsilon \quad \beta = 1 - \alpha \quad (18)$$

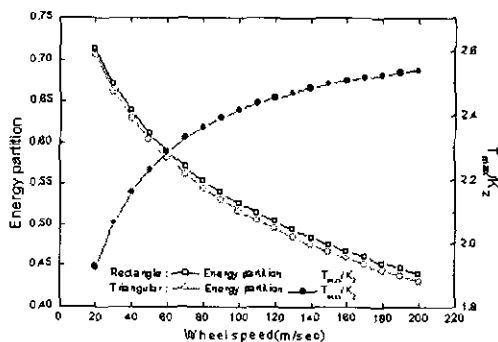
$$K_2 = \frac{0.7796 K_1}{(k\rho c)_w^2 (V_w l)^2}$$



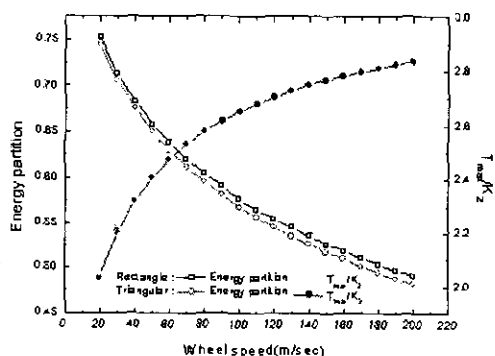
(a) Table speed 16.7mm/sec



(b) Table speed 83.5mm/sec



(c) Table speed 167mm/s



(d) Table speed 250.5mm/s

Fig. 5 Energy partition and T_{max}/K_2 to workpiece versus grinding speed(CBN).

3. 고성능 고속연삭에서 열전달 분석

Al_2O_3 에서 연삭에 영향을 주는 인자 β 값을 0.3345로 하고 연삭 숫돌과 유체에 대한 열적 특성값 $(kpc)_c^{\frac{1}{2}}$ 는 $800 W_s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}$, 공작물에 대한 열적 특성 값은 $(kpc)_w^{\frac{1}{2}} = 14520 = W_s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}$ 로⁽⁶⁾ 놓고 식 (10), (12), (17) 그리고 (18)을 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다.

CBN숫돌에서 연삭에 영향을 주는 인자 β 값을 0.4907로 하고 연삭 숫돌과 유체에 대한 열적 특성값 $(kpc)_c^{\frac{1}{2}}$ 는 $20788 W_s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}$, 공작물에 대한 열적 특성 $(kpc)_w^{\frac{1}{2}} =$

14520 값은 $W_s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}$ 로⁽⁶⁾ 놓고 식 (10), (12), (17) 그리고 (18)을 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 보듯이 고속연삭에서는 공작물 속도에 관계없이 연삭 주속도가 증가하면 증가할수록 에너지유입비율은 감소한다. 또 이송속도가 증가함에 따라 에너지유입비율이 증가함을 볼 수 있다. Fig. 4(a)에서 주속도가 50m/s에서 이론적 최고온도가 낮아진다. Fig. 4(b)에서는 연삭 주속도가 80m/s이상에서는 T_{max}/K_2 값(무차원 최고온도)이 거의 같다. 그리고 사각형 모델에서 삼각형 모델로 변화함에 따라 에너지유입비율이 크립피드 같이 줄어들고 있다.⁽¹²⁾ 따라서 낮은 이송속도, 고속 주속도에서 에너지유입비율이 낮게 값이 나타남을 알 수 있다. CBN숫돌과 Al_2O_3 숫돌을 비교하여 보면 CBN숫돌이 최고온도와 에너지유입비율이 현저하게 낮게 나타나고 있음을 알

수 있다. 그 이유는 Al_2O_3 슷돌에 비하여 CBN 슷돌의 열전도율이 Al_2O_3 는 36 W/mK, CBN은 1300 W/mK로 큰 차이가 나기 때문이다.

4. 결 론

고능률 고속연삭을 행하여 온도 분포와 에너지 유입비율을 연구한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

- (1) 공작물 속도에 관계없이 연삭 주속도가 증가하면 에너지 유입비율은 감소한다.
- (2) 연삭 슷돌 재료에 관계없이 공작물 속도가 저속인 경우 (16.7mm/s) 저연삭 주속도(50mm/s)에서 무차원 최고온도(T_{max}/K_2)가 감소하고, 공작물 속도가 고속으로 갈수록 무차원 최고온도가 비슷한 경향으로 증가하고 있다.
- (3) 연삭 슷돌재료에 관계없이 이송속도가 증가함에 따라 에너지 유입비율이 증가함을 알 수 있다.
- (4) CBN 슷돌과 Al_2O_3 슷돌을 비교하여 보면 CBN 슷돌이 연삭 최고온도와 에너지유입비율이 현저하게 낮게 나타난다.

후 기

본 연구는 2000년도 선도기술개발사업(G7)의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사합니다.

참 고 문 헌

- (1) Yozo OGURA, "Trend of Wheel for High Speed Grinding", Journal of the society of grinding engineers, Vol.44, No.8 pp. 362~364, 2000.
- (2) Kiyoshi NARITALI, "Development of Ultra-high Speed Grinding Wheel", Journal of the society of grinding engineers Vol.44 No.8 pp. 359~361, 2000.
- (3) 이상태, 정운교, "연삭동력을 이용한 슷돌수명 판정" 한국 공작기계학회지, 제9권, 제4호, pp. 62~67, 2000.
- (4) Tawakoli, T., et al., "Hochleistungss - chleifen (HEDG) von Inconel und anderen Werks-toffen", VDI-Z 134, Nr.1-Januar, 1992.

- (5) Malkin, "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and Cubic Boron Nitride abrasive Wheels", 1993.
- (6) C. Guo, S. Malkin, "Effectiveness of Cooling in Grinding", For presentation at CIRP Annals Convention, 1995.
- (7) N. K. Kim, C. Guo, S. Malkin, "Heat Flux Distribution and Energy Partition in Creep-Feed Grinding" Annals of the CIRP, Vol. 46 pp. 227~232, 1997.
- (8) Lavine, A.S., A simple model for convective cooling during the grinding process, ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.110, pp.1~6, 1988.
- (9) Ren, J.X., et al., Grinding principle, Press of Northwestern Polytechnic University, Xian, 1988.
- (10) Hou, Z.B., et al., Heat transfer of solid Shanghai science and technology press, 1984.
- (11) Kim, J.W., et al., The search for economic domain of operation when grinding below the film boiling limit, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.37, No.4, pp. 391~399, 1997.
- (12) J. D. Chung, H. D. Jeong, H.Z.Choi, N. K. Kim, "크립피드연삭에서 열원 모델에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol.18, No.2 pp. 171~176, 2001.