

高能率 短工程 研削時 研削溫度에 關한 研究 — A Study on Grinding Temperature in High Effect Grinding —

김 남 경* 안 국 찬*
Nam - Kyung Kim Kook - Chan Ahn

ABSTRACT

The purpose of this reserch is to suggest grinding temperature for high effect grinding and to clarify the sufficient grinding heat by experiment and theory(developed finite element program).

Main results to be obtained are as follows :

- 1) The grinding temperature distribution by F. E. M is comparatively in good apreement with the experimental results.
- 2) The up cut grinding method of grinding methods is decreased burning effect.
- 3) Regardless of the table speed on the temperature distribution in grinding surface layer, cooling effect is about 6-8times when developed nozzle is used.

1. 서 론

研削 加工은 예리한 스톨날에 의해서 高速度으로 切削이 行해 지기 때문에 研削 抵抗도 크고 加工에 의해 생기는 發生熱도 많아 研削 点에서는 상당히 高溫이 된다. 研削 스톨을 構成하고 있는 스톨날과 結合濟는 熱傳導가 나쁘므로 加工에 인해 發生하는 發生熱의 대부분은 被削材와 칩으로 傳導된다. 被削材

로 傳導된 熱 때문에 表層部の 상당 깊이 까지 金屬組織을 變化시키고 加工變質層까지 殘留應力이 發生, 被削材의 疲勞強度 耐磨耗性的 低下를 가져와 研削 龜裂을 일으키게 하는 등 表面을 惡化시켜 被削材의 品質을 低下시키고, 熱膨脹에 의한 置數精度와 形狀精度의 誤差를 가져온다.

熱膨脹과 아울러 加工部品の 形狀置數 精密도에 影響을 치는 被削材 溫度는 Yamamoto⁽¹⁾가 精密研削

* 正회원 : 국립 진주 농림전문대학 금형 설계과

을 행하여 被削材 溫度 分布가 피치 精密度에 미치는 影響에 관해서 報告했다. 被削材 表面에 研削 누름이나 龜裂과 加工 變質層의 生成에 가장 크게 影響을 미치는 被削材의 表面溫度는 研削中에 칩이 酸化되어 排出되는 것으로 보아 순간적이지만 相當히 높게 加熱된다고 생각된다.⁽²⁾ Jeager⁽³⁾는 移動 熱源쪽을 생각해서 이론 및 실험을 통해 연구 했으며, 濕式 研削 溫度의 定量化를 目的으로 Heiji⁽⁴⁾는 여러가지 研削 條件에서 實驗에 의해 被削材 表面온도 및 研削 누름에 관해 밝히고 있다.

한편 表面의 平面度를 증시하는 研削加工에 있어서는 통상 스파크아웃 研削이나 미소 연삭깊이로 연삭을 反復 수행한다. 그러나 연삭작업의 능률을 向上시키기 위해서는 요즈음 실용화 단계에 있는 단공정에 의한 고능률 크리프드(Creep feed) 研削⁽⁵⁾ 등이 행해지고 있으나, 現場에 가장 많이 사용하는 凡用研削機가 가지고 있는 강성의 範圍내에서 短工程 高性能 研削時 일어날 수 있는 機械의 剛性이나 研削熱이 被削材에 미치는 영향의 研究는 미흡한 實定이다.

그래서 本 研究에서는 研削作業 能率을 향상시키기 위해 高性能 短工程 가공시 發生할 수 있는 被削材의 열변형거동을 被削材 溫度 및 被削材 表面 溫度 측면에서 有限요소법으로 각각 理論적으로 糾明하고 實驗을 통해 타당성 與否를 檢討했다.

2. 피삭제의 온도해석

정지하고 있는 연속체에 대한 비정상 2次元 熱傳導問題의 支配方程式은 일반적으로 아래식과 같이 表現된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \dot{Q} \quad (2-1)$$

(여기서, T=온도, ρ = 밀도, c = 비열, λ = 열전도율, Q̇ = 열 발열율)

境界條件은

- (i) T = T̄ (경계 S₁에서 온도가 지정된 조건)
- (ii) q = q₀ (경계 S₂에서 열유속 q₀가 있는 조

건)(2-2)

(iii) q = h(T - T_∞) (경계 S₃에서 열전달이 있는 조건)

여기서, 要素내의 溫度分布 T(x, y, t) = [N(x, y)] {φ(t)}를 가지는 형상함수(보간함수)를 導入하여 정리하면 다음의 式을 얻을 수 있다.

$$[k]\{\phi\} + [C] \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} \right] = \{f\} \dots \dots \dots (2-3)$$

여기서,

$$[k] = \int_V \lambda \left[\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right] dV$$

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV$$

$$\{f\} = \int_V \rho Q_s [N]^T dS$$

식(2-3)에 境界條件式을 이용하면, 전체 有限요소식은 아래와 같이 表現된다.

$$[K]\{\phi\} + [C] \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} \right] = \{F\} \dots \dots \dots (2-4)$$

{φ} : 전체 절점온도 벡터, [K] : 열전도 매트릭스
[C] : 열용량 매트릭스, {F} : 열유속 벡터

式(2-4)에서 時間積分을 하기 위해서 크랭크-니콜슨(Crank-Nikolson)의 차분식⁽⁶⁾을 도입하면 시간(t + Δt/2)에 대한 節點溫度 벡터는

$$\left[\phi \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right] = \frac{1}{2} \left[\phi(t + \Delta t) \right] + \left[\phi(t) \right] \dots \dots \dots (2-5)$$

와 같이 주어진다.

또한 時刻(t + Δt/2)에 대한 節點溫度 벡터의 時間微分은 다음과 같이 表現되며

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial t} \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right] = \frac{\phi(t + \Delta t) - \phi(t)}{\Delta t} \dots \dots (2-6)$$

式(2-5)과 式(2-6)을 式(2-4)에 代入하여 整理하면

$$\left[\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] \phi(t + \Delta t) =$$

$$\left[-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] \phi(t) + \{F\} \dots\dots(2-7)$$

와 같이 된다.

3. 온도측정 실험방법 및 장치

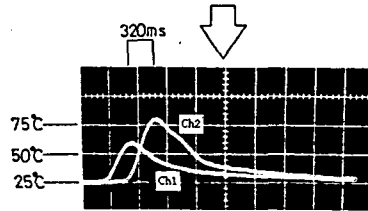
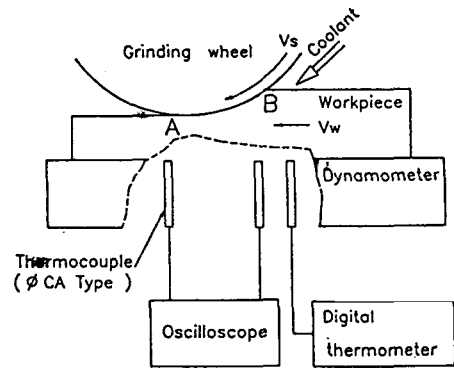
研削숫돌이 加工方向으로 진행함에 따라 被削材 溫도와 表面의 裝置 變化를 알기 위해 다음과 같은 實驗 裝置를 構成하였다.

被削材溫度를 測定하기 위해 지름 1.0mm의 구멍을 被削材 밑면에서 표면 아래 5mm까지 뚫고, Fig. 1의 (a)와 같이 2개의 熱電對는 지름 1mm의 CA형이며, 접착제로 固定했다.

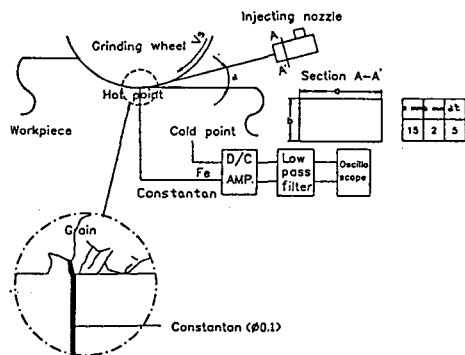
지그를 使用하여 被削材를 고정하고 길이 方向의 단열을 위해서 단열재를 사용했으며, 動力計를 사용해서 研削 抵抗을 測定했다. 최초 기준면은 습식으로 연삭깊이 5μm로써 2회 연삭후 스파크 아웃(spark out)시켰다. 그리고 被削材 表面의 溫度를 測定⁽⁷⁾하기 위해 Fig.1의 (b)와 같이 實驗裝置를 구성하였다. 研削條件은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding method	Dry & wet, one pass, up & down cut
Wheel	WA 60K _m V
Wheel Speed	1150m/min
Table speed	1-10m/min
Depth setting	10-50 μm
Material	SM45C
Grinding fluid	Soluble type(Hocut 757)D 5/100
Dressing	Single point Diamomd Depth of cut = 20 μm



(a)



(b)

Fig. 1 Measuring method of workpiece temperature distribution

4. 결과 및 고찰

4-1. 被削材 溫度

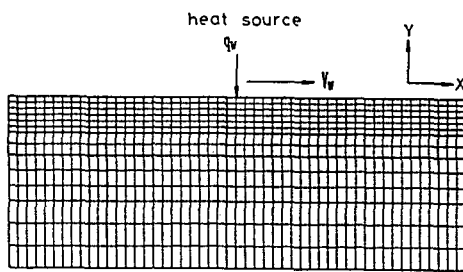
被削材와 研削숫돌과의 干涉領域에서 발생되는 연

삭에너지는 연삭숫돌, 被削材, 연삭칩 그리고 연삭유 제 등으로 分配되어 진다. 被削材로 傳達되는 熱量은 다음과 같이 表現되어 질 수 있다.⁽⁸⁾

$$qw = R_w Ft Vs / (B\sqrt{aD})$$

(여기서, R_w : 被削材로 전달되는 연삭 에너지비, V_s : 숫돌의 회전속도 B : 연삭폭, Ft : 주분력, a : 연삭깊이, D : 숫돌의 직경)

Fig. 2는 研削中 被削材의 溫度分布와 열변형을 계산하기 위한 유한요소 계산모델이다. X축의 길이는 80mm이고 y축은 20mm이다. 여기서, 실제 연삭현상에 接近하기 위해 X축 방향의 메쉬(mesh)길이를 연삭숫돌과 被削材의 接觸弧의 길이와 같게 하였다. 연삭숫돌이 被削材의 좌측끝에서 우측끝까지 移動하는 순간의 被削材의 溫度分布를 구하기 위하여 熱流速(연삭숫돌)경계를 研削速度로 移動하도록 하였다. 그래서 被削材를 700개의 요소와 765개의 節点으로 분할하여 연삭숫돌이 被削材의 어느 지점을 지나갈때의 被削材 全體의 溫度分布를 구하도록 했다. 열유속(heat flux)의 이동속도는 1m/min, 5m/min, 10m/min로 하였고, 熱流速 강도(heat flux intensity) qw 는 $7J/mm^2sec$ 에서 $50J/mm^2sec$ 으로 하였다.



Number of nodes : 765 Number of elements : 700
 $\rho = 7.86g/cm^3$ $c = 0.116cal/g^{\circ}C$
 $\lambda = 0.125cal/cm\ sec^{\circ}C$ $E = 21000kgf/mm^2$
 $\nu = 0.3$ $k = 1.42 \times 10^{-4}m^2/s$

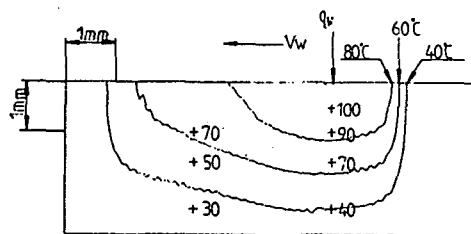
Fig. 2 The F. E modelling for grinding surface

熱源이 테이블速度로 移動하는 경우에 計算에 의해

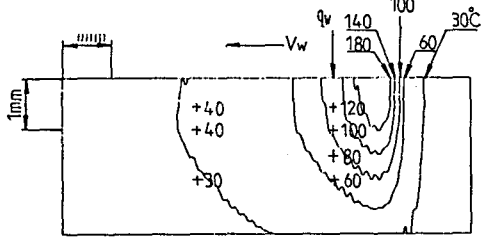
구한 被削材의 溫度 分布와 實驗 結果를 Fig. 3(a, b)에 表示했다.

熱源 前方에서는 거의 熱이 傳道되지 않은 것을 보이고, 接觸弧 近方의 表面에 偏在되어 있는 것을 알 수 있으며, 熱源이 移動하기 때문에 等溫度의 間隔이 熱源 後方에서는 좁은 模樣을 보이고 있다. 그리고 熱源의 速度가 늦을 때의 等溫線 模樣(a)보다 溫度 分布가 集中되어 있음을 알 수 있는데, 이것은 熱源의 速度가 빠를수록 被削材로 熱이 傳道되는 時間이 짧기 때문이다. 아울러 熱源 速度가 늦을 경우 表面에서 깊은 쪽으로 높은 溫度가 形成되고 있음을 보여 주고 있다. 研削 速度가 빠를 때가 一般적으로 느릴 때 보다 熱源 強度가 큰데 比하여, 被削材의 溫度 分布가 보다 낮은 이유는 研削 速度가 빠른 경우가 單位 時間當 被削材에 流入되는 全體 熱量이 작기 때문이다. 實測과 計算 結果의 若干의 誤差는 解析에서는 被削材 表面으로부터 熱傳達率을 空間적으로 時間적으로 一定하다고 假定한 反面 實際 研削 作業 中에는 숫돌 回轉時 空氣의 흐름이 대단히 크기 때문에 溫度 低下가 꽤 크기 때문이라고 생각된다.

그러나, 전자척(Chuck)의 兩側面 및 밑면을 室溫이라고 假定했지만 實際에서는 전자척 內部의 發熱과 被削材 밑면에 있어서 摩擦熱의 發生 등으로 엄밀히는 室溫보다 높다. 그리고 計算에 의한 被削材의 溫度 分布는 實驗値와 比較의 잘 一致한다.



$V_s = 1150m/min$ $V_w = 10m/min$
 $\Delta = 50\mu m$ $h = 1.0 \times 10^4 Kcal/m^2h^{\circ}C$
 Grinding fluid; Soluble type(D5/100)
 — Theoretical, +++ Experimental
 (a)



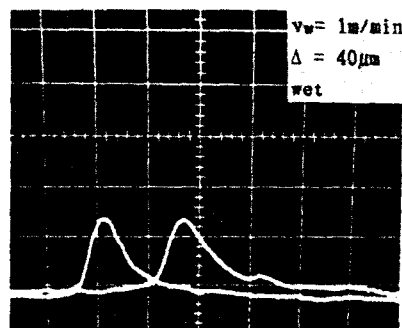
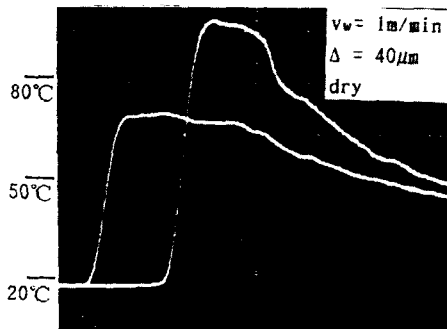
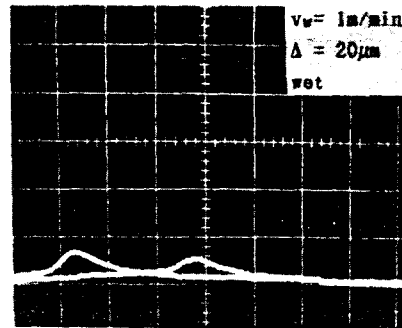
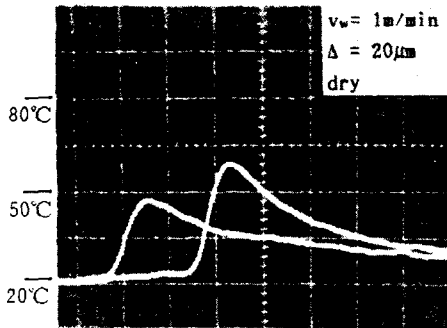
$V_w = 1150\text{m/min}$ $V_c = 1\text{m/min}$
 $\Delta = 50\ \mu\text{m}$ $h = 1.0 \times 10^4 \text{Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
 Grinding fluid; Soluble type(D5/100)
 — Theoretical, + + + Experimental
 (b)

Fig. 3 Comparison between theoretical and experimental temperature distribution of work-piece

Fig. 4(a, b)는 研削숫돌의 移動에 따른 被削材 A와 B 支點의 溫度狀態를 오실로스코프에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 A지점에 열원(숫돌)이 있을때 B지점의 溫度狀態는 初期狀態와 같다. 이것은 熱源 移動에 의해 熱源의 前方에는 溫度上昇의 效果가 작다는 것을 알 수 있다.

그러나 熱源이 B지점에 도달하였을 때 A지점의 溫度는 研削깊이에 따라서 最高치에 가까워짐을 알 수 있다.

그리고 研削이 進行됨에 따라 A지점의 溫度보다 B지점의 溫度가 높게 나타나는데 이것은 研削의 進行에 따라 熱量이 蓄積된 結果로 볼 수 있고, 被削材의 研削後 잔류형상에 미치는 중요한 要素라고 생각 된다. 그리고 연삭이 다 進行되고 4-5초 지난후에는 A지점과 B지점의 溫度는 같게 됨을 알 수 있다.



(a)

(b)

Fig. 4 Temperature of the workpiece

Fig. 4의 (b)는 濕式狀態에서의 A와 B지점의 溫

度狀態를 나타낸 것으로 乾式에 비해서 전체적인 溫度는 낮고 양호한 研削油劑의 供給으로 인하여 溫度曲線이 열원이 지남에 따라 乾式과는 달리 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

그리고 研削의 進行함에 따른 熱源의 蓄積이 적어서 A지점의 온도와 B지점의 온도가 서로 비슷함을 알 수 있다. 그리고 研削速度가 늦을때 연삭유제 속도를 制御하여 숫들의 進入에서부터 나갈때까지 Fig. 4의 (b)와 같이 溫度를 一定하게 제어할 수 있다면 가공 형상오차를 최소화할 수 있다고 사료된다.

Fig. 5는 被削材 表面부터 깊이 2mm정도까지의 溫度를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 被削材의 表面에만 高溫의 상태이고 깊이 0.5mm以下에서는 溫度가 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

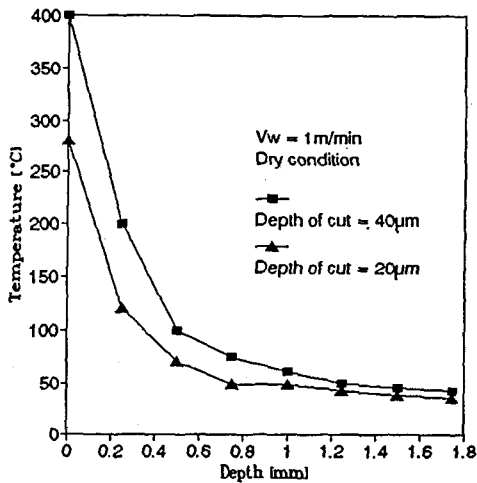
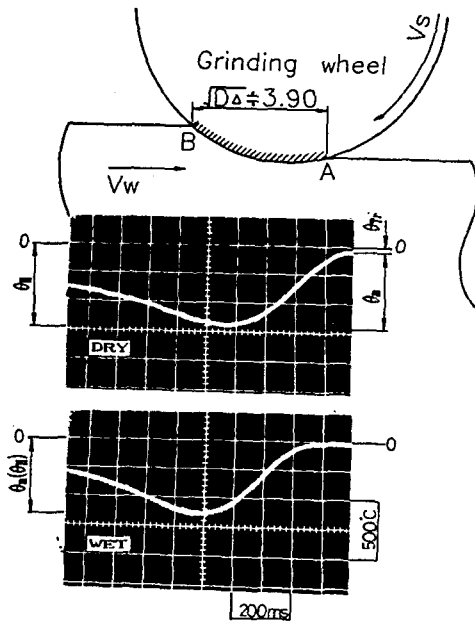


Fig. 5 Temperature of the workpiece from surface

4-2. 피삭재 표면온도

보통의 研削液 供給 方法에 의해서 Fig. 6에 WA46KmV 研削 숫들을 이용한 研削깊이 50µm, 테이블 速度 1m/min으로 한 경우의 상향 방식의 研削 方向으로 接觸弧 內 및 그 근방의 테이블 表面 溫

도를 濕式과 乾式을 比較 表示한 것이다. 그림으로부터 보듯이 被削材 表面 溫度는 被削材 表面이 接觸弧 入口 A에 到達할 때 까지 乾式이나 濕式의 경우, 어느것도 거의 變化가 보이지 않는다. 被削材 表面이 接觸弧 內에 들어 가면 研削熱에 의해서 溫度 上昇이 생기고, 어느 위치까지는 溫度가 上昇한다. 最高 溫度에 도달한 후에 그 位置로부터 接觸弧 出口 B 附近까지는 거의 일정하게 溫度를 유지하고 接觸湖 內에 들어 가는 것으로부터 被削材 表面 溫度는 正常的으로 이러한 變化를 하지만 濕式과 乾式과를 比較하면 最高 溫度는 거의 變化하지 않는다. 즉 研削液 供給 效果가 보이지 않는다. 接觸弧 通過後 溫度 下降 速度는 乾式보다 濕式쪽이 다소 큰 程度이다.



Nozzle type; Normal nozzle

Grinding condition : Table speed; 1m/min

Depth of cut; 50µm

Fig. 6 Comparison between the grinding temperature in dry and wet grinding

여기에서 θ_r 는 被削材 최초의 表面溫度로서 霧圍 氣 溫度 및 그 前 研削時 충분히 冷却되지 않고 남아

있는 表面의 殘留溫度라고 볼 수 있으며, 表面 最高溫度 θ_m 은 殘留溫度를 포함한 表面 最高溫度 θ_H 와 被削材의 表面 殘留溫度 θ_r 의 差($\theta_m = \theta_H - \theta_r$)이다. 그림에서 보듯이 濕式일 때는 θ_r 은 거의 보이지 않는다. 그리고 高性能 加工에서는 研削 시작점에서의 급격한 溫度 上昇때문에 上向 方式을 行하여 서서히 溫度가 上昇되게 함으로써 溫度上昇에 의한 버어닝(Burning) 效果등을 防止할 수 있다. Fig. 7에 研削깊이 $20\mu m$ 에서 테이블 速度를 變換한 경우 接觸湖 內및 그 근방의 被削材 表面 溫度를 乾式일 경우 比較한 것이다. 테이블 速度에 대한 溫度 變化는 各 部分에 對해 그렇게 큰 差異는 보이지

않지만 테이블 速度가 減少할수록 서서히 表面의 溫度는 減少하는 傾向이 있으며 테이블 速度 $10m/min$ 과 $1m/min$ 比較하면 $200^\circ C$ 이내의 差異를 보이고 있다. 最近 比較的 많은 加工에 移用되기 시작한 매우 낮은 테이블 速度와 대단히 큰 研削 깊이의 加工을 行하는 크립피드 研削은 이러한 現狀을 利用한 加工法이라고 생각된다.

그러나 테이블 速度가 빠른 경우는 接觸弧를 通過한 後 冷却 速度가 顯著한데 反하여 低速으로 갈수록 冷却 效果는 느린 것을 알 수 있다. 이것은 테이블 速度가 低速인 경우 숫돌과 被削材의 接觸 時間이 길

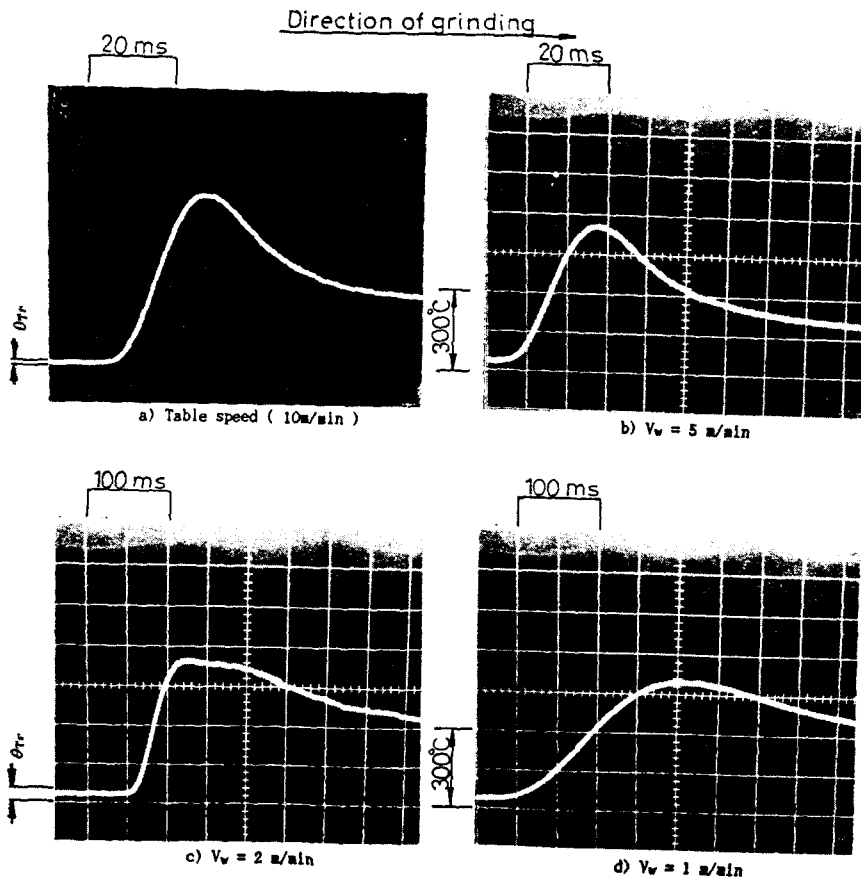


Fig. 7 Examples of variation of grinding temperature on dry grinding process(The depth of cut $20\mu m$)

어지므로 接觸弧를 通過한후의 空氣에 의한 冷却 效果가 低下되기 때문이라고 생각된다. 그리고 乾式의 研削 條件이므로 研削 後 모든 경우에 殘留溫度가 잘 나타나 있다.

Fig. 8은 研削 油劑를 使用하여(범용노즐이 아닌 폭 15mm 두께 2mm형 개조 노즐)각 研削 깊이를 달리 하였을 경우에 表面 溫度 分布를 나타내고 있다. 乾式의 경우와는 달리 前回の 研削에 의한 殘留溫度는 보이지 않는다. 또 接觸 入口로부터 溫度 上昇 및 最高

溫度는 乾式의 경우에 비해서 相當히 낮다. 이 結果로부터 이들 研削 條件의 경우 被削材 表面이 接觸弧를 通過한 후 研削後에 被削材 表面의 殘留 研削熱이 除去되어지는 것은 물론 接觸弧내 研削液이 侵入해서, 研削液 供給 效果가 發揮되고 있음을 보여 주고 있다. 그러나 테이블 速度가 低速인 관계로 熱流速 流入 時間이 길어져서 接觸弧를 通過한 후의 溫度 減少는 그렇게 크지 않으므로 接觸弧 出口쪽에서도 研削 油劑의 供給이 되었으면 한다.

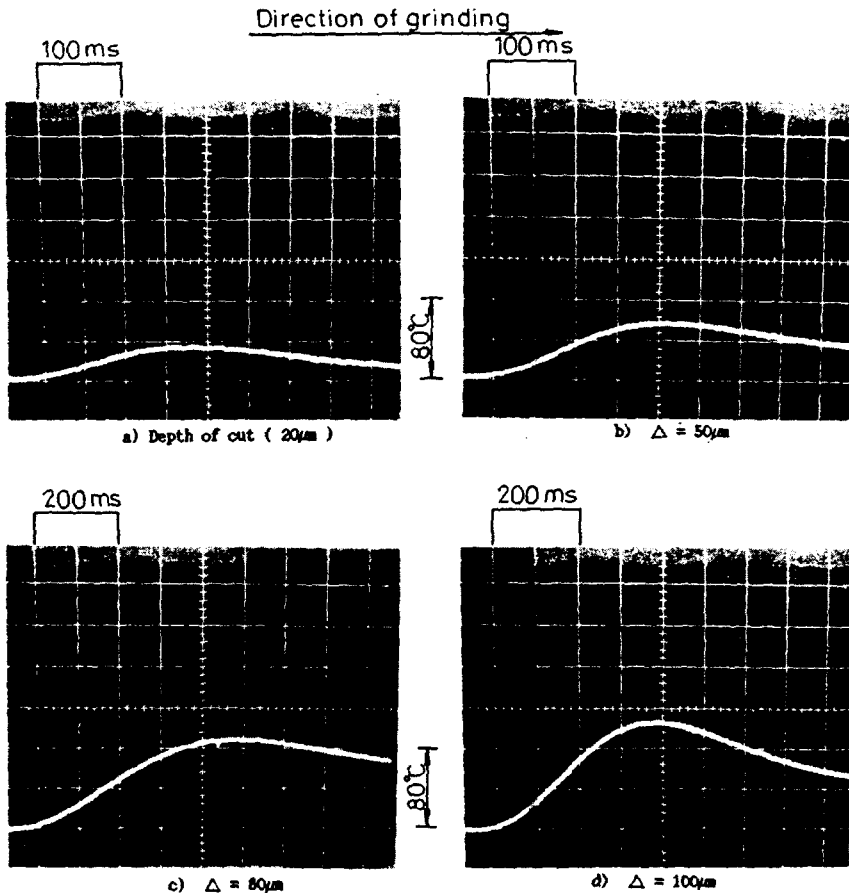


Fig. 8 Examples of variation of grinding temperature on dry grinding process (Table speed 1m/min)

Fig. 9는 테이블 速度와 研削 表面의 溫度에 관한 實驗과 이론치와의 一致與否를 보여 주는 것이다. 두

값은 比較的 잘 일치 하고 있으며, 乾式이 濕式인 경우 보다 테이블 速度에 대한 증가치는 比較的 큰데

反하여 濕式인 境遇에는 緩慢한 증가치를 보이고 있다. 같은 研削깊이 20 μ m, 50 μ m일때 乾式과 濕式의 溫度차이는 매우 크다. 이것은 接觸弧 內에서 研削液의 熱傳導에 대한 冷却効果의 影響이 상당히 큰 것을 알 수 있으며 그 차이는 濕式이 乾式의 1/6-1/8정도이므로 定量的으로 濕式인 경우 被削材의 熱流入量은 테이블 速度에 관계없이 乾式 경우의 1/6-1/8程度가 된다.

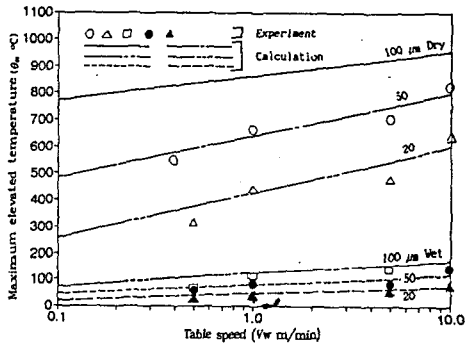


Fig. 9 Relation between maximum elevated temperature and table speed

5. 결론

短工程(One pass)高能率研削에 있어서 被削材 内部에 流入되는 研削熱과 外部로 放熱되는 熱量의 비 정상 狀態를 고려하고 被削材溫度分布 및 表面 溫度 分布를 有限요소법에 의해 解析하고, 實驗에 의해서 다음과 같은 結果를 얻었다.

- 1) 計算에 의한 被削材溫度 및 表面溫度 分布는 실험 値와 비교적 잘 一致한다.
- 2) 乾式 研削時 被削材溫度는 濕式 研削에 비해 매우 높았으나 表面 0.5mm以下 地點의 溫度는 매우 낮았다.
- 3) 下向 方式 研削보다 上向 方式이 被削材 表面溫度가 서서히 上昇되므로, 버어닝(burning)效果를 減少시킬 수 있다.

- 4) 테이블 速度가 減少할수록 被削材表面 溫度는 減少하는 경향이 있으며, 개조 노즐을 使用하여 현저한 溫度 감소 效果가 나타났다.
- 5) 被削材 表面溫度는 테이블 速度에 관계없이, 개조된 노즐 사용시 冷却效果가 1/6-1/8정도이다.

참고문헌

1. 山本晃, 大塚二郎, “精密 ねじ研削に する 研究”, 日本機械學會論 論文集, 34, 266, pp. 1805, 1968
2. M. C. Shqw, “A Simplified Approach to Workpiece Temperature in Fine Grinding”, CIRP, 39, 1, pp. 345-347, 1990
3. J. C. Jeager, “Moving Source of Heat and Temperature at Sliding Contacts”, Proc. Roy. Soc. New South Wales, 76, pp. 203-224, 1942
4. Hiji Yasui, “Influene of Operating Conditions on Wet Grinding Temperature (part2)-Studies on Wet Grinding Temperature(3nd Report)”, JSPE, 51, 9, pp. 1718-1724, 1985
5. G, J. Trmal, “Comparison of creep feed and conventional grinding”, proc. 21st MTDR conf, pp. 323-328, 1980
6. 矢川元基, “流れと熱傳導の 有限要素法入門”, 培風館, 1980
7. 金南京외, “高能率 加工에서 研削溫度에 미치는 研削 條件의 影響”, 韓國 産業 安全 學會紙, 5, 1, pp. 31-39, 1990
8. 大石進, “クリープ フィード 研削に 關する 研究”, Ph. D. Thesis, 東京都立大學 pp. 65-82, 1984