

高能率 加工에서 研削 溫度에 미치는 研削 條件의 影響 Influence of Operating Condition on Grinding Temperature in High Effect Grinding

김 남 경* 강 대 민** 송 지 복***
Nam Kyung Kim Dae Min Kang Ji Bok Song

ABSTRACT

In this paper, the influence of the table speed, metal removal rate and grinding fluid on long wheel workpiece contact zone at high effect grinding was investigated by theoretical analyses and measuring the temperature, and discussed by the temperature distribution in grinding surface layer.

Main results obtained are as follows,

- 1) Regardless of the table speed, the temperature gap of the workpiece(heat influx) is about 6-8 times as high in dry condition as in wet condition.
- 2) Good grinding condition can be obtained owing to the effect of grinding fluid without any burning defect under the condition of the metal removal rate(1.0mm³/mm.s) in case of wet grinding.
- 3) When the depth from the surface layer is about 1.25-1.5mm under the condition of the slow table speed, surface temperature goes up higher as the table speed slows down, because long contact time is taken at the surface layer.
- 4) In case of the same metal removal rate, the lower the table speed becomes, the higher the surface temperature is, because grinding depth has a far more influence on wheel workpiece contact zone than the table speed.

1. 緒 論

研削 過程에서 發生하는 研削熱은 機械 加工이나

精密을 요하는 금형加工 등에 열변형을 시켜서 形狀이나 치수 정도를 低下시키기도 하고, 加工을 행한 제품 表面의 금속 組織이나 경도등을 變化시켜 品質을 惡化시킨다.

또 發生하는 研削熱이 심한 경우에는 工作物이 과도하게 과열되어 누름현상이 생겨 作業을 계속 하기 곤란하게 하므로, 研削熱에 의한 工作物이 溫度

* 正會員 : 부산대학교 대학원 정밀기계학과
** 正會員 : 부산공업대학 산업안전공학과
*** 正會員 : 부산대학교 정밀기계공학과

分布를 밝히는 것은 重要하다.

工作物의 온도 및 溫度 分析는 研削 過程에서 消費되어지는 研削 energy, 冷却 條件 등에 의해 決定되어지지만 研削 energy 유속(단위 時間 단위 接觸 面積에 소비되어지는 研削 energy)이 열로써 工作物에 유입하는 경우에 發生한다.

종래 研削 溫度에 관한 研究^{1, 2)}가 행해져 왔지만 研削加工時 變질층의 生成기구, 研削 균열등에 가장 크게 영향을 미치는 研削面의 표층온도 分布 및 1980 년 이후 實用化 단계에 있는 高能率 加工의 하나인 Creep feed 加工 등의 條件³⁾ (저속의 Table speed) 에서 接觸弧內의 溫度 分布 등에 대한 研究⁴⁾는 精確하게 규명되어 지지 않고 있다.

그러므로 본 研究는 平面 研削時 研削溫度에 미치는 각종 인자에 대해 긴 接觸弧를 形成하는 Creep feed 高能率 加工등의 條件에서 온도분포에 대한 實驗을 행하고, 아울러 유한요소법을 利用해서 계산했다.

2. 理論解析

2.1 Jeager의 理論

Jeager의 이론을 研削의 경우에 응용하여, 平面 研削의 경우 工作物 表面을 반무한 表面으로 고려 하고 v는 工作物의 이송속도, b=I/2(接觸弧의 길이 I= $\sqrt{t \cdot d}$)로 두면 θ 는 接觸面 내의 平均 溫度가 되고 θ_m 은 接觸面內의 最高 溫度가 된다.

i) $L > 5$ 일 때

$$\theta = 0.752 \frac{R_w F_t V}{JB \sqrt{k \rho c} \sqrt{v I}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_m = 1.5 \theta$$

ii) $L < 5$ 일 때

$$\theta = 0.636 \frac{R_w F_t f V}{JB c \rho c I v} \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_m = \left(\frac{f_m}{f}\right) \theta$$

$$L = vb/2K \quad f = 2.2L^{0.58}$$

$$K = \frac{k}{\rho c} \quad f_m = 3.0L^{0.58} \dots\dots\dots (3)$$

(B=연삭폭, I=접촉호 길이, J=열의 일당량, F_t =연삭 저항, V=숫돌 주속도, v=table speed, k=재료의 열전도율, c=비열, ρ =밀도)

研削時 發生하는 총 熱量 중에서 工作物에 유입 하는 비율(R_w)^{5, 6)} 및 式(1) (2) (3)을 利用해서 接觸面에서의 溫度 分布를 推론할 수 있다.

2.2 工作物 表面層의 溫度 分布

유한 요소법을 研削기구에 適用시켜 解析을 행 하기 위해 다음과 같은 假定을 하였다.

- 1) 材料는 均質이며 등방성이다.
 - 2) 2차원 정상 熱傳導 問題로 考慮한다.
 - 3) 研削過程에 있어서 工作物 內부의 열원(Heat Source)은 없다.
- 2차원 비정상 열전도 方程式은

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \dots\dots\dots (4)$$

로 주어진다(단, Q=열 발생율, T=온도) 가정 2), 3)에 의해 式(4)는 다음과 같이 주어진다.

$$0 = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

境界條件은 아래와 같다.

$$T = g \text{ on } S_1 \dots\dots\dots (6)$$

$$h(T-T_{\infty}) = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y \right) \text{ on } S_2 \quad (7)$$

(단, g =境界面 S_1 상에서의 特定溫度, T_{∞} =주위 溫度, h =대류계수, l_x, l_y =방향여현)

여기서, S_1 과 S_2 를 합하면 전체 境界面이 되고, S_1 은 외부열이 전되되어 들어 오는 면이고, S_2 는 주위와 대류 되어지는 境界面이다.

따라서 式을 整理하면

$$\left. \begin{aligned} 0 &= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \text{ on } \Omega \\ T &= g \text{ on } S_1 \\ h(T-T_{\infty}) &= -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y \right) \text{ on } S_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(단 Ω 는 熱傳導解析 領域을 意味한다.)

式(8)을 유한 요소법으로 解析하기 위해 가상일의 原理(Virtual Work Principle)를 適用하여 범함수를

구하면

$$\begin{aligned} x &= \int_V 1/2k \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right) dV \\ &+ \int_S h/2(T-T_{\infty})^2 dS \end{aligned}$$

선형적인 보간 모델(Interpolation Model)을 適用하여 범함수를 절점溫度 벡터 $\{T_m\}$ 에 대해서 얻은 평형 方程式을 행렬 形態로 整理하면 다음과 같다.

$$[k] \{T_m\} = \{F\} \quad (9)$$

(9)식에 대해서 Gauss 소거법을 이용, $\{T_m\}$ 을 구했다. 여기서 使用된 要素는 사각형 要素이며 모델링(Fig. 1)과 흐름도(Fig. 2)는 다음과 같다.

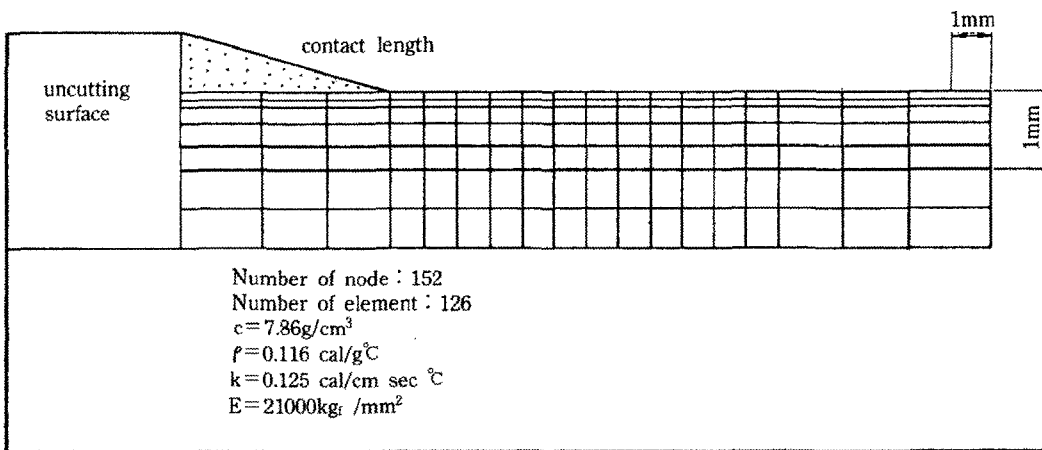


Fig. 1 The F. E. M modelling for grinding surface

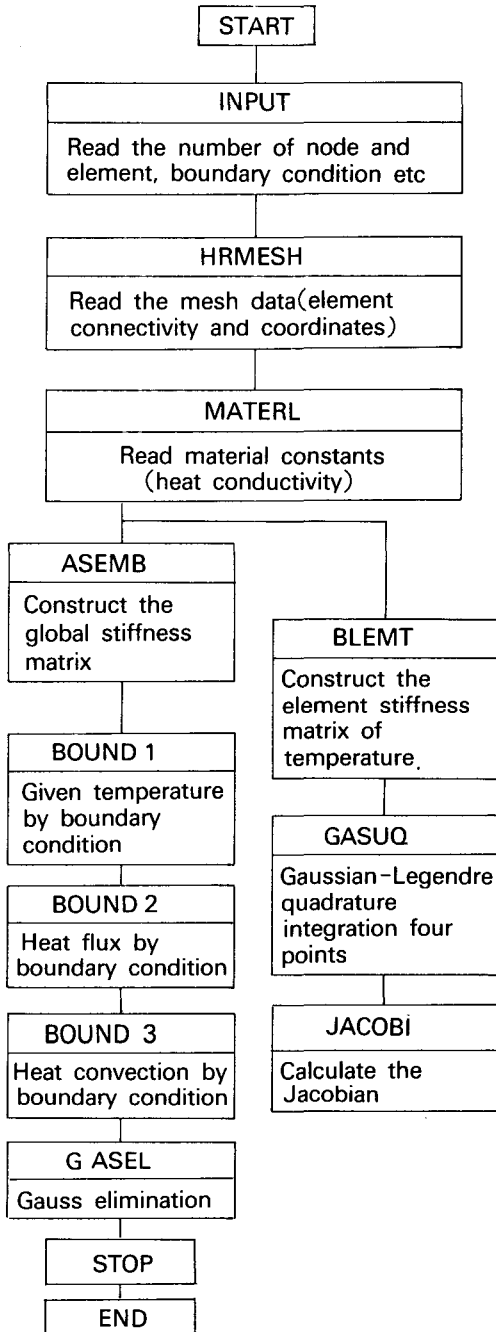


Fig. 2 The flow chart of heat transfer

3. 實 驗

본 實驗에 있어서 研削機는 平面 研削機(MITSUI TYPE407)를 이용하고, 研削條件은 Table. 1과 같다. 표면층의 溫度分布를 觀察하기 위해, 工作物 밑면에서 表面近方(表面으로부터 약 2mm)까지 직경 1mm의 구멍을 뚫고 그 구멍으로 직경 0.3mm의 Constantan 선을 심었으며 이때 선단의 열용량을 考慮하여 사포로 선단을 약 10 μ m로 가늘게 만들었다. 工作物의 溫度變化가 거의 없는 냉점 部分에 工作物과 같은 材質의 선을 부착시켜 열전대를 形成하였다. 제작한 바이스를 利用해서 一定한 接觸壓力를 가볍게 가하고, 加工物 材料와 Constantan 선에 의해 열전대 회로를 形成시켜 研削時 접점의 加熱에 의해 생긴 熱 기전력을 直流 增幅한 후 Osilloscope에 의해 기록했다.

접점의 절단 할 때까지 研削을 계속하고, 그때마다 研削面 표층부의 溫度分布를 구했다.

Table 1. Grinding condition

Grinding method		Down cut
Wheel size	mm	305×127×30
Workpiece size	mm	75×25×4
Wheel speed	cm/sec	1916
Table speed	m/min	10-0.01
Grinding width	mm	4.0
Grinding depth	μ m	20-1000
Grinding fluid		Solution type

이때 利用된 裝置의 개요를 表示한 것이 Fig. 3이다.

위와 같은 實驗 裝置와 條件을 利用하여 오실로스코프로 얻어진 結果가 Fig. 4이다.

설정 깊이가 100 μ m/pass로 研削하고 表面으로부터의 接觸弧 內 및 그 近方의 研削物 表面溫度를

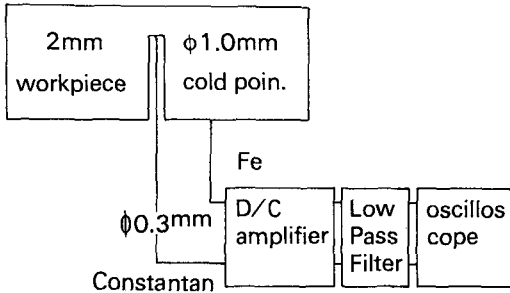


Fig. 3 Block diagram of experimental equipments

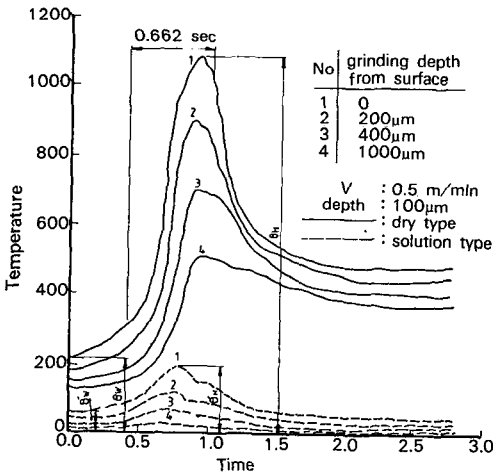


Fig. 4 Temperature distribution of the grinding surface layer from oscilloscope.

건식과 습식 때를 比較한 것이다.

θ_w 는 피삭재의 최초의 表面 溫度로서 여기에서는 분위기 溫度 및 그 前 研削시 충분히 冷却되지 않고 남아 있는 溫度가 包含된 溫度로 볼 수 있다.

실제 溫度 θ_m 은 接觸弧 내의 最高溫度 θ_H 와 工作物 表面온도 θ_w 의 差($\theta_H = \theta_m + \theta_w$)이다. θ_m 은 건식일 때 더 높은 것을 알 수 있다.

그리고 Down cut 方式인 관계로 接觸弧 近方에서 급격한 溫度 上昇이 모든 경우에 잘 나타나 있으나 건식인 경우는 현저한 反面에 습식인 경우는 接觸弧 내의 冷却效果 등에 의해서 溫度 上昇이 減少되었다. 그리고 接觸弧를 통과 후에 빠른 速度로 溫度가 減少되어 가는 모습을 볼 수 있다.

그것은 Down cut 方式은 研削이 개시 될 때에는 接觸弧 내에까지 研削液 供給이 힘들지만 研削 숫돌이 接觸弧를 통과한 후에는 원활한 冷却效果를 얻을 수 있으므로, 良好한 加工정도를 얻을 수 있다.

그러나 高能率 研削시에는 研削 개시점에서의 급격한 溫度 上昇 때문에 Up cut 方式을 행하여 서서히 溫度가 上昇되게 함으로써 溫度 上昇으로 인한 Burning效果 등을 防止할 수도 있다.

전압을 溫度로 환산하기 위해서 보정 實驗을 행하였다. 보정 實驗을 위하여, Constantan선이 심어져 있는 工作物에 다시 표준열전대(IC선)를 심어서 Heater에 의해 加熱되어 질 때 Constantan선 - Fe선을 통하여 오실로스코프에 나타나는 기전력과 標準 열전대를 통한 Thermometer에 記錄되는 溫度를 연결시켜 보정곡선을 구했다.

4. 結果 및 考察

實際溫度(θ_m)에 미치는 影響은 주로 Δ 와 v 이기 때문에 Fig. 5는 Δ 와 v 에 관한 그림이다. 그리고 본 研削機에서 可能한 範圍에서 實驗을 행한 값과 數值解析한 理論值와의 일치여부를 보여주고 있다. v 가 1.0 m/min로 增加할수록 완만하게 溫度가 增

加하나 연삭유가 供給되지 않는 條件(dry condition)에서는 研削깊이 100 μ m일 때의 增加 폭이 顯著한 것으로 볼 수 있다. 그것은 研削 energy 유속 (단위 접촉 面積에 消費되어지는 研削 energy)이 消費되어지는 비율이 적기 때문이라고 생각된다.

아울러 같은 研削깊이 20 μ m, 100 μ m 일 때 건식과 습식의 溫度 차이는 매우 크다. 이것은 接觸弧 내에서 研削液의 열전도에 의한 冷却 效果의 影響이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 그 차이는 습식은 건식의 1/8-1/6 정도이므로 극히 계산적으로는 습식의 경우 工作物의 열 유입량은 v에 관계없이 건식 경우의 약 1/8-1/6 정도가 된다.

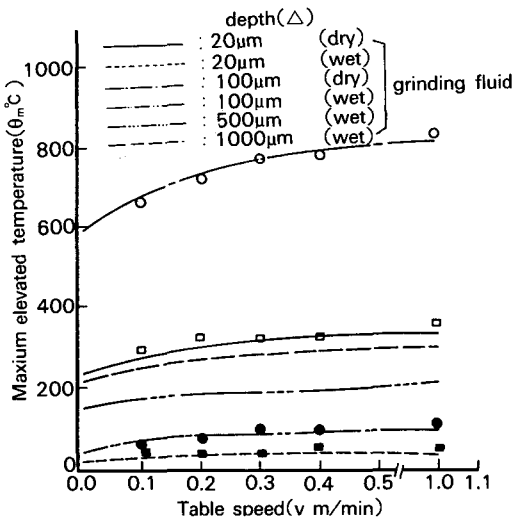


Fig. 5 Relationship between maximum elevated temperature and table speed at same depth.

研削液을 利用하여 Δ 와 v의 곱으로 단위 時間 단위의 연삭폭 당의 金屬除去率 $Z=v \cdot \Delta \cdot B/B=v \cdot \Delta$ (B: 연삭폭, θ_m 과의 實驗과 理論의 그림이 Fig. 6이다.

동일한 金屬除去率(Z)일 경우 v가 낮을수록 Δ 를 크게 해야 하므로 溫度는 크게 增加하나 v가 크면

相對的으로 溫度는 減少한다.

金屬除去率 Z가 1.0mm³/mm.s 이하의 부분에서는 v에 상관없이 接觸弧 내에서 研削液의 效果 등으로 거의 증발현상을 보이지 않는 溫度이므로 열적 장애가 없는 狀態에서 좋은 加工 現狀을 얻을 수 있으나 Z=2.0mm³/mm.s 이상 높은 加工 能率을 얻기 위해서는 接觸弧 內에 열적현상을 잘 考慮해서 加工에 주의를 해야 할 것 같다.

그러므로 열적 장애가 없는 狀態에서 높은 加工 能率을 얻기 위해서는 v를 크게 하는 것도 하나의 방법이다.⁷⁾

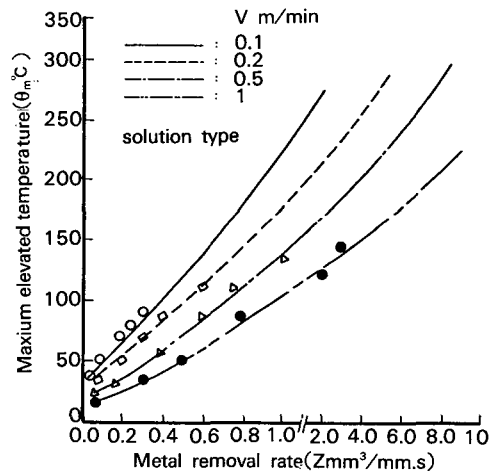


Fig. 6 Relationship between maximum elevated temperature and metal removal rate at same table speed.

Fig. 7은 研削깊이를 100 μ m로 두고 表面으로부터 표면 깊이에 따른 最大 溫度를 v의 變化에 관한 理論的 結果이다.

v가 1m/min에서 0.01m/min로 낮어질수록 각 溫度는 낮아진다.

즉, 유입되는 研削 energy 유속이 減少되기 때

문이라고 생각된다.

그러나, grinding surface 1.5mm 近處에서는 v가 늦어질수록 溫度가 높게 나타난다.

그것은 v가 低速으로 갈수록 表面과 接觸時間이

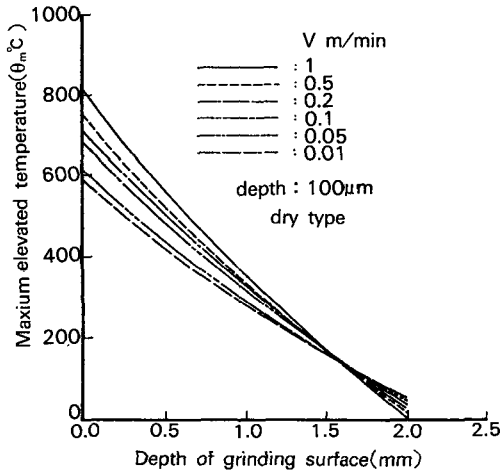


Fig. 7 Relationship between maximum elevated temperature and depth of grinding surface at same depth.

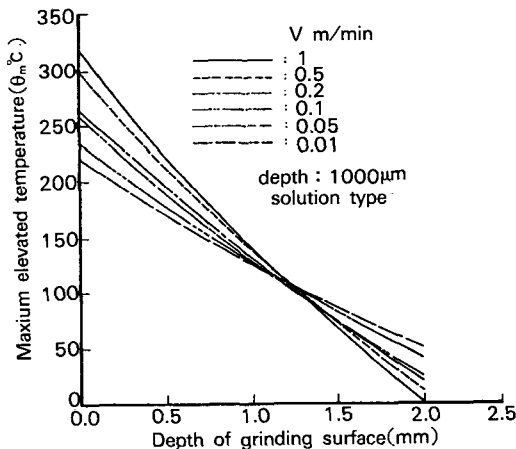


Fig. 8 Relationship between maximum elevated temperature and depth of grinding surface at same depth.

길어지기 때문에 表面으로부터 좀더 깊은 곳까지 溫度가 나타난다고 생각된다.

Fig. 8도 습식시 研削깊이 1000µm로 두고 表面으로부터 각 깊이에 따른 最大 溫度를 v의 變化에 대해서 나타난 것이다.

이 條件은 高能率 研削의 일종인 Creep feed 條件에서 行한 理論的 값이다. v가 늦어질수록 溫度는 低下되고 있고 表面으로부터 약 1.25mm에서는 v가 늦어질수록 溫度가 上昇되어지는 것을 볼 수 있다.

그리고 表面에서는 500°C 누름온도 이하인 最大 325°C 를 나타내는 것으로 보아 Creep feed 條件에서 研削시 研削油液의 供給 方法의 改善 등으로 高能率의 研削을 行할 수 있다.

습식시 v=1m/min(실선), 研削깊이 1000µm 와 v=0.01m/min(파선), 研削 깊이 1000µm 인 高能率 研削條件을 나타낸 등온선 그림이 Fig. 9(a) 이다. v가 늦을수록 研削 energy 유속이 減少되어가며 긴 接觸弧 때문에 溫度分布은 研削재의 水平위치에 고루퍼져 分布되어 있다. Fig. 9(b) v를 0.5m/min로 하고 研削깊이 100µm 이며 건식일 경우의 溫度分布을 計算과 實測과의 比較이다.

計算과 實測과는 比較的 一致하지만 水平 位置에 따라서 약간의 溫度差를 보여주고 있다.

Fig. 10(a)는 v=10m/min, 研削깊이 20µm (실선)과 v=0.2m/min, 研削깊이 1000µm (파선)일 때의 등온선의 分布이다.

같은 金屬除去率(3.3mm³/mm.s)을 가지고 있지만 研削깊이가 1000µm 인 條件에서 溫度가 약 3-4배 이상 높게 나타난다.

이것은 溫度에 미치는 影響은 v 보다는 研削깊이 (Δ) 部分이 훨씬 큰 影響을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

金屬除去率을 8.3mm³/mm.s로 했을 때 研削條件을 달리한 것이 Fig. 10(b)이다. Fig. 10(a, b)에서 알 수 있듯이 研削깊이 500µm, 1000µm 인 高能率

研削 條件일 때의 溫度가 약 2-4倍 以上 溫度가 높지만, 研削누름 發生溫度는 0m이 500℃ 부근을 초월하면 發生한다고 보고 되고 있다.^{8,9)} Fig. 10(a), Fig. 10(b)의 두 高能率條件 모두 研削누름 發生溫度는 超越하지 않기 때문에 one pass 加工에 유리한 Creep feed 研削을 容易하게 할 수 있다.

Fig. 11(a)와 b는 Fig. 9(a)와 Fig. 10(b)에 있는 條件을 (Calcom plotter) 이용하여 3次元의으로 나타낸 것이다.

$\Delta=500\mu\text{m}$ 보다는 $\Delta=1000\mu\text{m}$ 인 경우가 直接觸弧의 形成으로 인하여 수평위치의 溫度分布가 完만한 것을 볼 수 있다.

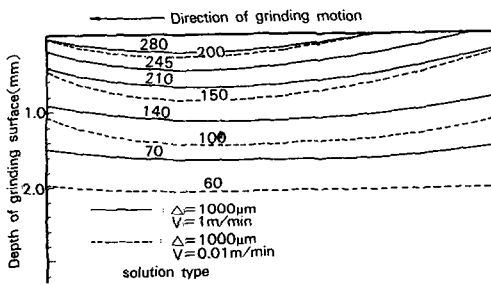


Fig. 9(a) Isothermal line distribution according to table speed at same depth.

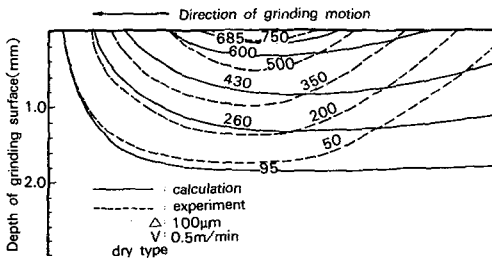


Fig. 9(b) Isothermal line distribution between experiment and calculation at same condition.

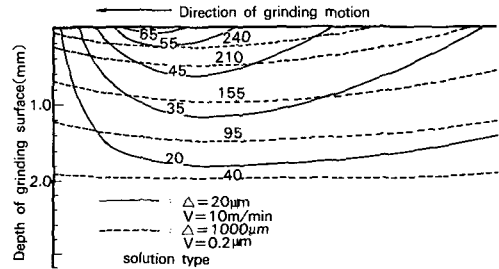


Fig. 10(a) Isothermal line distribution at same metal removal rate.

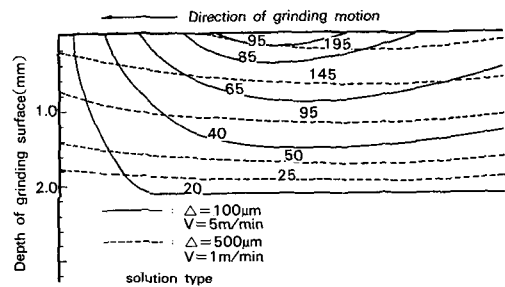


Fig. 10(b) Isothermal line distribution at same metal removal rate.

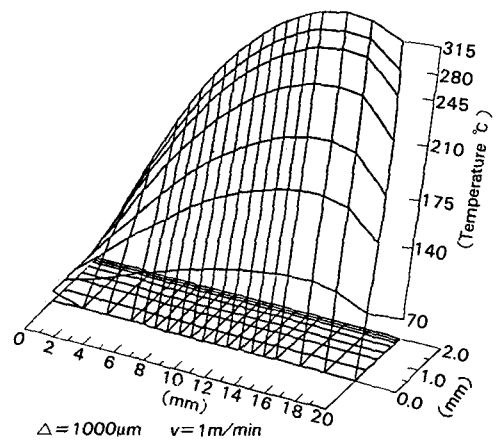


Fig. 11(a) 3-dimensional isothermal line distribution.

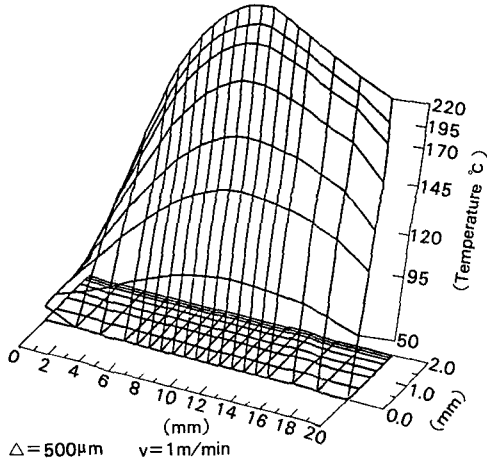


Fig. 11(b) 3-dimensional isothermal line distribution

5. 結 論

研削溫度에 미치는 研削條件 중 table speed와 研削깊이 및 研削液 有無 등의 條件에서 高能率 加工을 行할 때 나타난 本 論文의 結果들은 다음과 같다.

- 1) Table speed에 관계없이 工作物의 溫度差(熱流入量)는 건식이 습식의 6-8배 정도이다.
- 2) 습식 研削시 金屬除去率이 1.0mm³/mm.s이하에서는 研削液의 效果로 熱的 障癖가 없는 良好한 加工 狀態를 얻을 수 있다.
- 3) Table speed를 저속으로 하면 表面과 接觸時間이 길어지므로 1.25-1.5mm 近處에서 Table

speed가 늦어질수록 溫度가 높게 나타난다.

- 4) 接觸弧에서 溫度에 미치는 影響은 Table speed 보다는 研削깊이쪽이 影響이 크기 때문에 동일한 金屬除去率일 경우 table speed가 낮을수록 表面層의 溫度는 높다.

參 考 文 獻

1. N. R. Desruisseaux and R. D. Zerkle : Thermal analysis of the grinding process, Trans. ASME, Ser. B, 92,2(1970) 428.
2. 高澤孝哉 : 研削面表面層溫度分布의 理論とその測定法, 精密機械, 30, 11(1964) 851.
3. 松井正巳 : クリープフィード研削に關する考察, 精密機械, 47, 4(1981) 483.
4. G.J. Trmal : Comparison of creep feed and conventional grinding, proc. 21st MTDR conf (1980) 323.
5. 長谷川嘉雄, 奥山繁樹, 今正彦 : 研削熱の工作物への流入割合, 精密機械, 47, 10(1981) 1223.
6. 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(1984).
7. 稻崎一郎 : 最近の高能率研削技術, 日本機械學會誌, 87,783(1984) 133.
8. S. Malkin : Thermal aspects of grinding, part2 - surface temperature and workpiece burn, Trans. ASME, Ser. B, (1974) 1184.
9. S. Malkin : Burning limit for surface and cylindrical grinding of steels, Ann. CIRP, 27,1(1978) 233.