第3章 切削溫度

3·1 切削熱의 발생과 분포

절삭할 때 energy의 대부분은 열로 변환되며, 열의 발생영역은 그림 3·1과 같이 剪斷面, chip과 工具의 界面, 여유면과 가공면간의 계면 등이다.

대부분의 열은 전단면에서 발생하며, 위의 3영역에서 발생하는 열의 대부분은 chip과 함께 제거되고 일부는 공구에, 또 다른 일부는 가공물에 전도된다. 따라서, 이들의 온도가 상승하면 공구재료가 軟化되고 磨耗가 크게 된다. 일반적으로 공구의 수명에 영향을 주는 것은 切削速度라고 알려져 있는데, 이것은 속도가 커지면 공구의 온도가 상승하고 軟化되어 마모가 커지기 때문이다.

절삭 energy를 P_m, 절삭속도를 V_c, 절삭분력을 F_c라 하면

$$P_m = F_c \cdot V_c \tag{3·1}$$

이다. 또, 전단역에서의 熱發生率을 P_s, chip-공구의 계면에서의 열발생률을 P_f, 여유면에서

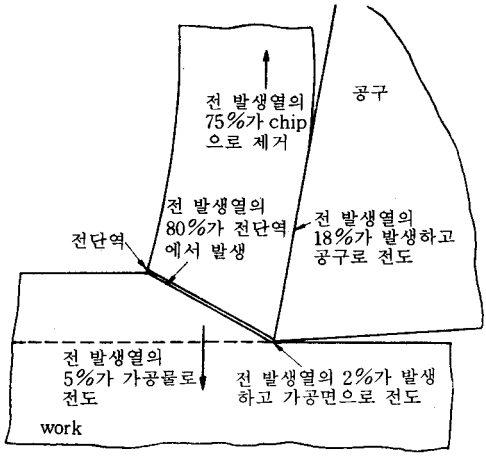


그림 3·1 열의 발생 및 분산

의 열발생률을 P_w, 열의 일당량을 J라 하면

$$P_m = (P_s + P_f + P_w) \cdot J \tag{3·2}$$

로 표시되나 P_w가 극히 작으므로

$$P_m = (P_s + P_f) \cdot J \tag{3·3}$$

와 같이 쓸 수 있다.

그런데, $P_f = A \cdot F_f \cdot V_f = A \cdot F_f \cdot V_c \cdot r_c$이므로

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{J} \cdot P_m - P_f = A \cdot P_m - A \cdot F_f \cdot V_c \cdot r_c \\ &= A(P_m - F_f \cdot V_c \cdot r_c) \end{aligned} \tag{3·4}$$

가 된다. 여기서 A는 일의 열당량이다.

3·2 運動物質의 熱傳達

그림 3·2에서 단위폭인 요소 ABCD를 생각한다. 물질이 x방향으로 유동하며, 점 A의 좌표를(x, y), 이 점에서 물질의 순간온도를 θ, 그리고 다른 B, C, D의 좌표와 온도는 그림 3·2에서와 같다.

경계면 ABB′A′를 통하는 열 :

$$\underset{\text{(전도에 의한 열)}}{-k \cdot (dy \times 1) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}} + \underset{\text{(물질의 이동에 의한 열)}}{c \cdot \rho \cdot (dy \times 1 \times V) \cdot \frac{1}{2}\left(\theta + \theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot dy\right)}$$

$$= -k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot dy + \rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\theta + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot dy\right) \cdot dy$$

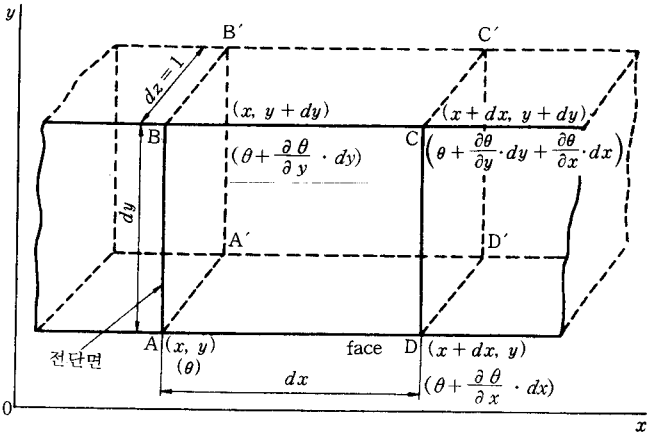


그림 3·2

CDD′C′의 면을 통하는 열 :

$$-k\cdot(dy\times 1)\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx\right)+c\cdot\rho\cdot(dy\times 1\times V)\cdot$$

(전도에 의한 열)

$$\frac{1}{2}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx+\theta+\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx\right)$$

(물질의 이동에 의한 열)

$$=-k\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx\right)\cdot dy+\rho\cdot c\cdot V\cdot\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx+\frac{1}{2}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy\right)\cdot dy$$

ADD′A′의 면을 통하는 열 :

$$-k(dx\times 1)\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}+0=-k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dx$$

(전도에 의한 열) (물질의 이동에 의한 열)

BCC′B′의 면을 통하는 열 :

$$-k(dx\times 1)\cdot\frac{\partial}{\partial y}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy\right)+0=-k\cdot\frac{\partial}{\partial y}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy\right)\cdot dx$$

(전도에 의한 열) (물질의 이동에 의한 열)

여기서 k : 熱傳導率(thermal conductivity)

c : 比熱(specific heat)

ρ : 密度(density)

V : 熱源에 대한 물질의 상대속도

열원의 강도(strength of heat source)가 일정하고 요소내에 加熱이 없다면 요소에의 순 열유동은 0이 될 것이다.

즉,

(ABB′A′와 ADD′A′를 통하는 열) − (CDD′C′와 BCC′B′를 통하는 열) = 0

$$\left[-k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dy+\rho\cdot c\cdot V\left(\theta+\frac{1}{2}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy\right)dy+\left\{-k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dx\right\}\right]-$$

$$\left[-k\cdot\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx\right)\cdot dy+\rho\cdot c\cdot V\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx+\frac{1}{2}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}dy\right)\cdot dy+\right.$$

$$\left.\left\{-k\cdot\frac{\partial}{\partial y}\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot dy\right)\cdot dx\right\}\right]=0$$

$$\therefore\ k\cdot\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\cdot dy\cdot dx+k\cdot\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\cdot dx\cdot dy-\rho\cdot c\cdot V\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot dx\cdot dy=0$$

$k\cdot dx\cdot dy$로 除하고 $\rho\cdot c\cdot V/k=\dfrac{R}{a}$로 놓으면

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}-\frac{R}{a}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}=0 \tag{3·5}$$

여기에서 $R=\rho\cdot c\cdot V\cdot a/k$이며 이것을 thermal number라 하고, 금속절삭에서는 $R=\rho\cdot c\cdot V_c\cdot t/k$로 표시된다. 다만, V_c = 절삭속도, t = uncut chip 두께이다.

식 (3·5)의 해는 간단한 경계조건에서만 가능하고 1차원의 경우에 대해서는 그림 3·3과 같다.

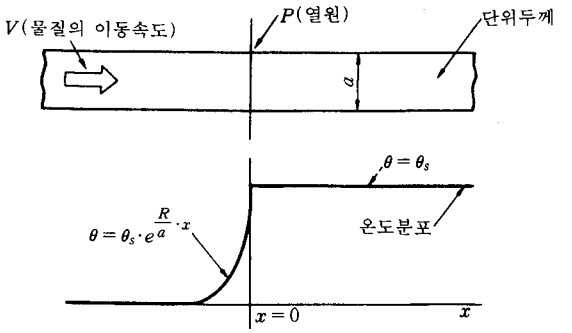


그림 3·3 1차원의 온도분포

물질의 이동속도가 크고, 熱源에 접근하는 물질의 1점은 빠른 속도로 가열되어 최고온도에 달해서 일정한 온도를 유지한다고 가정한다.

식 (3·5)에서 $\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}=0$이므로

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}-\frac{R}{a}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}=0 \tag{3·6}$$

$$\therefore\ \frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\Big/\frac{\partial\theta}{\partial x}=\frac{R}{a}$$

$$\therefore\ \log\frac{\partial\theta}{\partial x}=\frac{R}{a}x+c_1$$

$$\therefore\ e^{c_1}\cdot e^{\frac{R}{a}x}=\frac{\partial\theta}{\partial x},\qquad \therefore\ e^{c_1}\cdot\frac{a}{R}\cdot e^{\frac{R}{a}x}+c_2=\theta$$

$x=-\infty$일 때 $\theta=0$이므로 $c_2=0$

$$\therefore\ e^{c_1}\cdot\frac{a}{R}\cdot e^{\frac{R}{a}x}=\theta$$

$x=0$일 때 $\theta=\theta_s$이므로 $e^{c_1}=\frac{R}{a}\cdot\theta_s$

$$\therefore\ \theta=\frac{R}{a}\cdot\theta_s\cdot\frac{a}{R}\cdot e^{\frac{R}{a}x}=\theta_s\cdot e^{\frac{R}{a}x} \tag{3·7}$$

3·2·1 第1變形域의 온도

第1變形域(primary deformation zone)에서의 열발생률을 P_s, P_s에서 $\Gamma \cdot P_s$ 만큼이 가공물에 전도되고, $(1-\Gamma)P_s$가 chip과 함께 이동되어 나간다면 제1변형역을 통하는 물질(chip)의 평균온도 θ_s는 다음과 같다.

$$(1-\Gamma)\cdot P_s = c\cdot t\cdot b\cdot V_c\cdot \rho\cdot \theta_s$$

$$\therefore\ \theta_s = \frac{(1-\Gamma)\cdot P_s}{\rho\cdot c\cdot V_c\cdot t\cdot b} \tag{3·8}$$

식 (3·8)로부터 주어진 절삭조건에서 Γ가 주어지면 θ_s를 구할 수 있다.

가공물의 온도해석이 여러 사람에 의하여 시도되었으나 Weiner와 Rapier의 연구결과가 많이 이용되고 있다.

그림 3·4는 절삭의 理想 model로서 제1변형역을 강도가 일정한 平面熱源으로 하고, chip과 가공물의 자유표면으로부터 열손실이 없으며, 가공물의 열적 성질이 온도 등에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 가정한 것이다. 방정식 (3·5)의 완전한 해는 구하기 어렵고, 개략값을 구하기 위하여 몇 개의 경계조건의 가정이 필요하다. Weiner는 물질의 이동방향으로의 熱傳導가 없는 것으로 가정하였는데, 이것은 금속절삭에서 상당히 합리적인 가정이다. 왜냐하면, 운동방향의 열이동은 물질의 이동에 의한 것이고 전도에 의한 것은 절삭속도가 크므로 거의 무시할 수 있기 때문이다. 따라서, 식 (3·5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} - \frac{R}{a}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x} = 0 \tag{3·9}$$

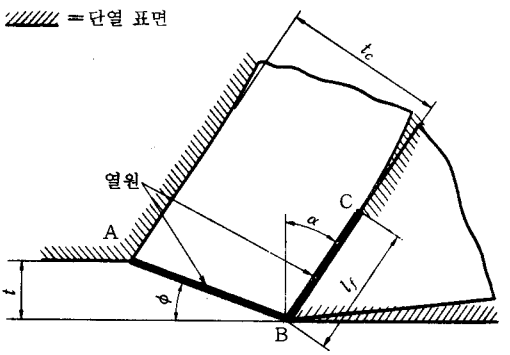


그림 3·4

Weiner는 가공물에 대한 경계조건 내에서 방정식 (3·9)의 해를 구하였다. 그는 $R\cdot\tan\phi$의 함수인 Γ식을 얻었고, 그림 3·5는 이론값과 실험값의 비교이다. 그림 3·5에서 이론값이 실험값보다 약간 낮은 것은 이론식의 전개에 있어서 단일평면의 熱源을 생각하였고, 열은 전도에 의해서만 가공물에 유동하는 것으로 가정하였으나, 실제에 있어서는 넓은 구역에 걸쳐 발생하고 그것의 일부가 가공물에 전도되기 때문이다.

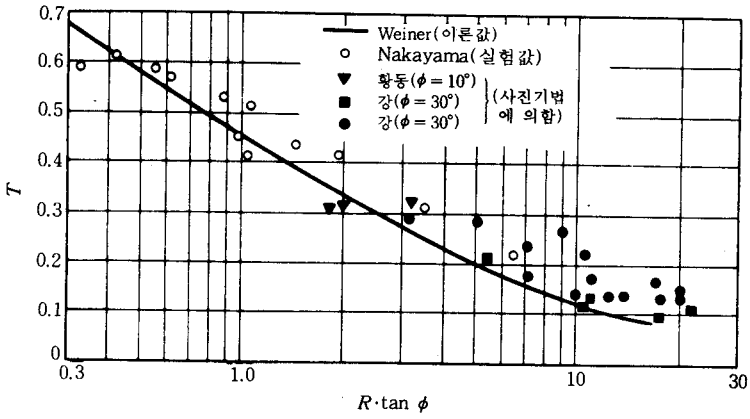


그림 3·5 $R\cdot\tan\phi$ 와 Γ의 관계(참고문헌 43)

3·2·2 第2變形域의 온도

그림 3·6과 같이 chip 이 공구면에서 이탈될 때 최고온도에 달하며, chip의 최고온도를 θ_{max}, 제2의 변형역을 통하는 물질의 온도상승을 θ_m, 제1변형역을 통하는 물질의 온도상승을 θ_s, 가공물의 초기온도를 θ_0라 하면

$$\theta_{max} = \theta_m + \theta_s + \theta_0 \tag{3·10}$$

이다.

chip 온도의 해석에서 Rapier는 chip-공구 계면에서의 마찰에 의한 열원을 熱強度가 일정한 단일평면 열원으로 가정하였다. 이러한 조건하에서 방정식 (3·9)의 해는(참고문헌 42)

$$\frac{\theta_m}{\theta_f} = 1.13\sqrt{\frac{R}{l_0}} \tag{3·11}$$

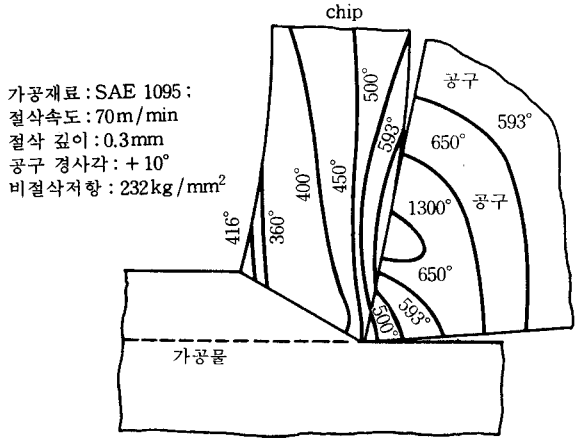


그림 3·6 온도분포

이다. 여기서 l_0 : 熱源의 길이/chip 두께(l_f/t_c), R : thermal number

제2변형역에서 chip의 평균 온도상승 θ_f는

$$\theta_f = \frac{P_f}{\rho \cdot c \cdot V_c \cdot t \cdot b} \tag{3·12}$$

로 표시된다.

3·3 切削條件과 切削溫度*

3·3·1 切削速度의 영향

그림 3·7에서 θ_s는 절삭속도 21[m/min] 정도에서 427[℃]이며, 그 후는 약간 감소하고 있으나 속도에 의한 큰 영향을 받고 있지 않다. θ_f는 15[m/min]까지는 0이고, 그 동안에 발생한 열은 공구쪽으로 확산되지만 어느 속도 이상에서는 급증하고 있음을 알 수 있다. $\theta = \theta_s + \theta_f$로서 이론값과 실측값이 잘 일치하고 있다.

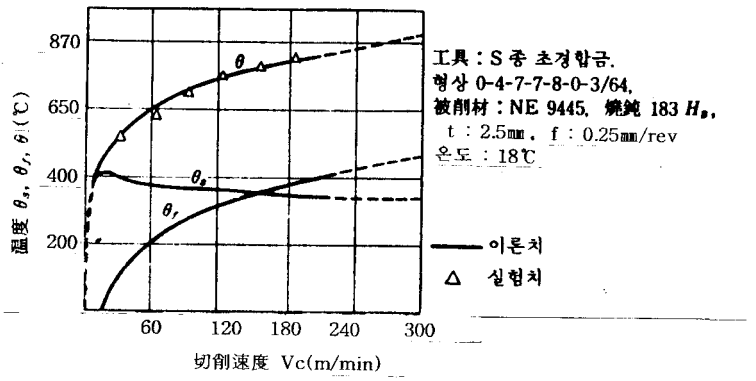


그림 3·7 절삭속도와 절삭온도의 관계

3·3·2 切削幅과 切削깊이의 영향

그림 3·8 및 그림 3·9는 절삭폭과 절삭깊이에 대한 절삭온도를 나타내며, 절삭온도는 절삭폭에 거의 무관하고 절삭깊이에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다.

절삭폭의 증가에 의하여 절삭저항과 절삭열이 증가하나, 열을 받는 면적이 동시에 커지기 때문에 온도의 변화가 거의 없고, 절삭깊이의 증가에서는 발생열량은 증가하나 열을 받는 면적이 일정하므로 온도가 상승하는 것으로 생각된다.

---

*金屬切削學 및 應用, 徐南燮 編譯, P. 39~54

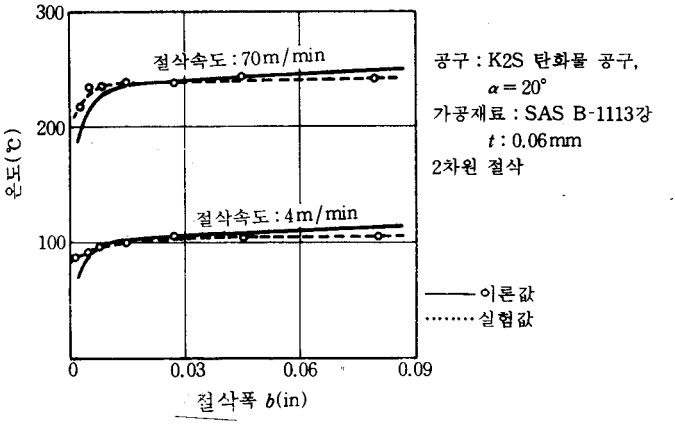


그림 3·8 절삭폭과 절삭온도

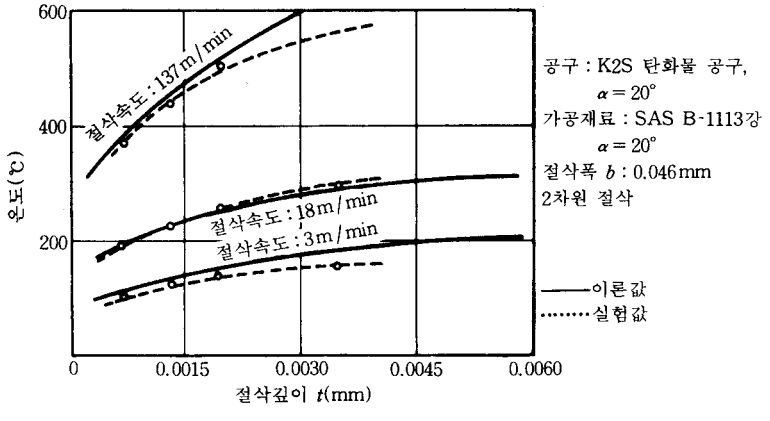


그림 3·9 절삭깊이와 절삭온도

3·3·3 加工物 硬度의 영향

그림 3·10은 SAE 9445鋼을 절삭깊이 2.6[mm], 이송 0.25[mm/rev]로 하고 超硬 bite로 절삭하였을 때의 절삭속도와 가공물 경도에 대한 절삭온도이다. 이 때 경도의 변화는 열처리에 의하였다. 일반적으로 속도와 경도가 증가함에 따라 절삭온도가 상승하고 있음을 알 수 있다.

실험식에 의하면

$$\theta = C \cdot V^n [℃] \tag{3·13}$$

이며, 여기서 C와 n은 상수이다. 가공재의 상태와 상수는 표 3·1과 같다.

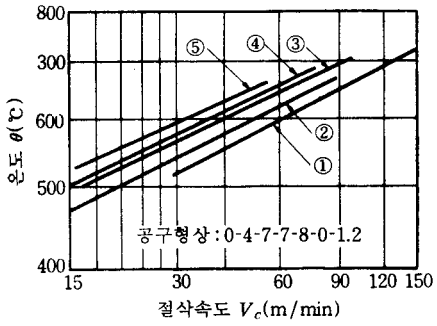


그림 3·10 절삭속도와 절삭온도

표 3·1 그림 3·10의 실험에 사용한 가공재료

번 호	鋼 材 의 상 태		실 험 식
①	壓延, 燒鈍, Brinell 硬度	183	$\theta = 268 V_c^{0.210}$
②	燒入, 燒戾 621℃, 硬度	283	$\theta = 306 V_c^{0.250}$
③	燒入, 燒戾 565℃, 〃	311	$\theta = 313 V_c^{0.195}$
④	燒入, 燒戾 510℃, 〃	352	$\theta = 319 V_c^{0.197}$
⑤	燒入, 燒戾 454℃, 〃	401	$\theta = 338 V_c^{0.188}$

3·3·4 加工物의 온도와 切削抵抗

그림 3·11은 가공물을 가열하고 超硬 bite로 절삭할 때의 전단면의 전단응력 τ_s와 수직응력 σ_s를 나타낸다.

가열온도의 상승과 더불어 두 응력이 감소됨을 알 수 있다. 즉, 가공물이 가열되면 절삭저항이 감소된다.

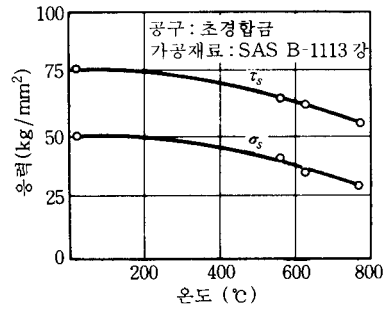


그림 3·11 가열온도와 응력

3·3·5 加工物의 熱的性質의 영향

가공물의 熱傳導率의 변화와 體積比熱(volume specific heat ; $\rho \cdot c$)의 변화가 공구온도에 미치는 영향을 그림 3·12와 그림 3·13에서 볼 수 있다. 즉, 열전도율과 체적비열이 증가할수록 공구의 온도가 감소하는 것을 알 수 있다.

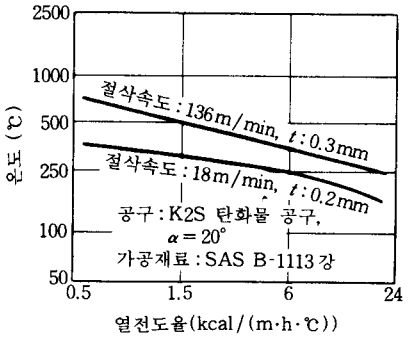


그림 3·12 열전도율과 공구온도

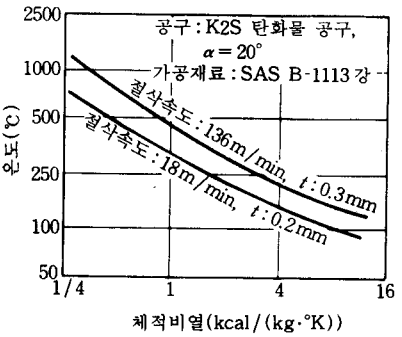
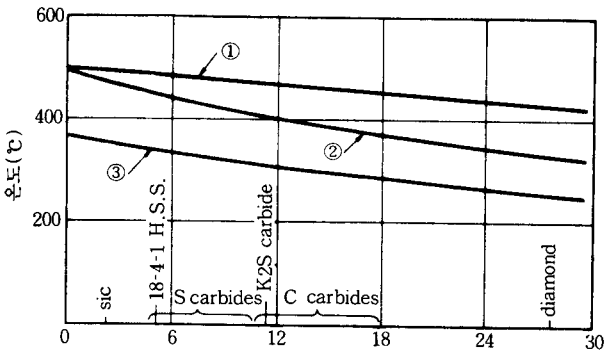


그림 3·13 체적비열과 공구온도

3·3·6 切削工具의 熱的性質의 영향

그림 3·14에서와 같이 熱傳導率이 큰 절삭공구는 보다 낮은 온도에서 절삭을 하게 된다. 비교적 열전도율이 큰 低炭素鋼을 절삭할 때에는 절삭공구의 열전도율에 특별한 관심을 가지지 않아도 되지만, 열전도율이 작은 stainless강 등을 절삭할 때에는 공구의 열적 성질의 영향은 중요하다.



공구의 열전도율(kcal/(cm·sec·℃))
① SAE B-1113강, V_c : 136m/min, t : 0.3mm
② 18-8 stainless강, V_c : 26m/min, t : 0.16mm
③ SAE 1113강, V_c : 19m/min, t : 0.16mm

그림 3·14 공구의 열전도율과 온도

표 3·2 소결 탄화물 공구의 열전도율

종 류	성 분(%)			kcal/(cm·sec·℃)
	W	Co	Ti	
C	97	3	–	17.0
C	93	6	–	16.0
C	87	13	–	12.0
S	86	10	4	11.2
S	84	6.5	9.5	6.7
S	82	8	10	6.5
S	76	8	16	5.8

표 3·2는 燒結炭化物 공구의 열전도율의 예이다.

3·3·7 切削油劑의 영향

절삭속도가 낮을 때에는 절삭유제로 인하여 공구 경사면의 마찰이 감소되고 built-up edge의 발생이 방지되어 절삭저항과 공구수명의 관점에서 유익하다. 절삭유제의 다른 중요한 역할은 공구의 열을 제거하는 냉각작용이며, 이와 같은 냉각효과는 가능하면 比熱이 큰 것일수록 좋고, 공구냉각에 사용되는 절삭유제는 물(H_2O)을 주성분으로 한 것이 많다.

그림 3·15에서 보는 바와 같이 공구온도를 크게 저하시키려면 절삭속도를 저하시키는 것이 현명하다. 절삭속도와 절삭깊이가 크면 절삭유제가 절삭공구-chip의 계면에 도달할 수 없다. 이것은 毛細管 현상에 의하여 절삭공구-chip 사이에 들어가기 전에 빠른 속도로 유동하는 chip과 함께 절삭유제가 제거되기 때문이다. 또, 절삭깊이가 크면 절삭저항도 크게 되어 절삭공구-chip의 간격이 좁아지거나 없게 되며, 절삭속도와 절삭깊이가 크게 되면 짧은 시간에 발생되는 열은 많은 데 비하여 절삭유제가 그 열을 흡수할 수 있는 시간이 없게 된다.

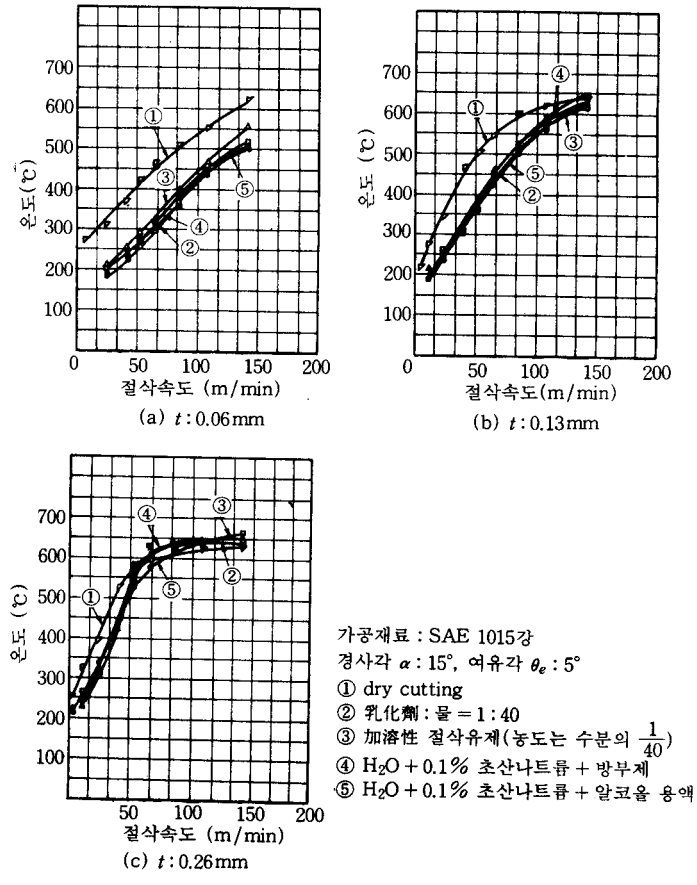


그림 3·15 절삭깊이, 절삭속도 및 절삭유제가 절삭온도에 미치는 영향

3·4 切削溫度와 工具壽命

Schallbroch는 절삭온도 θ(℃)와 공구수명 T(min)와의 관계식을 다음과 같이 발표하였다.

$$\theta \cdot T^n = C \tag{3·14}$$

鋼材의 실험에 의하면 상수 $n = \frac{1}{20} \sim \frac{1}{10}$의 범위이고 절삭깊이(물림깊이) $t = 1$[mm], 이송량 $f = 0.32$[mm/rev]로 乾式切削을 하였을 때 탄소강 및 각종 합금강에 대하여 상수 $C = 1000 \sim 1600$ 정도이다.

切削性이 좋은 재료일수록 상수 C가 크며, n값이 작은 것은 절삭온도의 微小變化가 공구수명에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 따라서, 절삭중에 절삭유제를 충분히 공급하여 공구를 냉각시켜 주는 것이 공구수명을 크게 하는 데 중요하다는 것을 식 (3·14)로 재확인할 수 있다.

이 밖에도 Taylor, Friedrich와 M.I.T.에서도 절삭온도와 공구수명의 관계식을 각각 발표한 바 있다.

이러한 실험식에 의한 값은 실험조건에 따라 다소 다르므로, 定量的 의미보다 定性的으로 吟味하는 것이 바람직하다.

3·5 切削溫度의 측정

切削溫度를 측정하는 방법에는 다음과 같은 것이 있다.

(1) chip의 색에 의한 측정
(2) thermo-colour에 의한 측정
(3) 熱量計(calorimeter)에 의한 측정
(4) 熱電帶(thermocouple)를 공구에 삽입하는 측정
(5) 熱電帶를 이용한 공작물 온도측정
(6) 熱電帶를 공구와 공작물에 사용하는 측정
(7) 輻射高溫計를 이용하는 측정

3·5·1 Chip 색에 의한 측정

금속을 가열하면 온도에 따라 각각 다른 색이 반사되는 사실을 역으로 이용하는 방법으로서 색에 의하여 온도를 추정하는 방법이다.

금속을 가열하면 그 표면에 얇은(10μ 정도) 투명한 산화막이 생긴다. 그림 3·16에서와

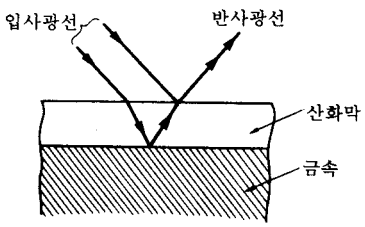


그림 3·16

같이 入射光의 일부는 산화막 표면에서 반사하고 다른 일부는 산화막을 투과하여 금속표면에서 반사한다. 이 두 反射光의 位相差에 의하여 干涉色이 나타나며 이 색은 산화막의 두께에 의한다. 산화막의 두께는 가열온도와 지속시간에 따라 다르며, 표 3·3은 탄소강에 대한 예이다.

표 3·3 鋼의 가열온도 및 가열시간과 산화색

산화색 / 가열시간(min) / 가열온도(℃)	볏짚색	갈색	자색	濃藍色	灰藍色
200	6	47	–	–	–
220	3	33	63	–	–
250	1	10	39	–	–
275	0.5	3	11	27	40

3·5·2 Thermo-colour에 의한 측정

溫度測定部에 thermo-colour를 발라 이것의 變色에 의하여 개략온도를 추정하는 방법이다.

현재 사용되고 있는 示溫塗料는 그 變色溫度가 60[℃]에서 450[℃] 정도까지 20[℃] 간격으로 측정할 수 있는 것이 있으며, 이것을 alcohol에 녹여 bearing, 열기관, 전기기계 및 절삭공구의 측정부위에 0.03~0.07[mm] 두께 정도 바르고 건조하여 각 변색에 따른 온도를 알 수 있다. 특히, 절삭공구에서는 여유면 등에 바르고 等溫線을 구할 수도 있다.

측정장치가 필요없어 간편하기는 하지만, 같은 조건에서 5min 이상 절삭해야 하며 도료의 두께에 의한 오차가 있을 수 있고, 인선 근처에서는 chip에 의하여 도료가 벗겨지는 등의 단점이 있다.

3·5·3 Calorimeter에 의한 측정

Schmidt는 그림 3·17과 같은 calorimeter를 사용하여 공구의 열량, chip과 공구의 총열량 및 chip의 열량을 측정하여 온도를 계산하였다.

그림 3·17(b)에서와 같이 drill 지름보다 약간 작은 中空棒을 chuck에 고정하고, 단열된

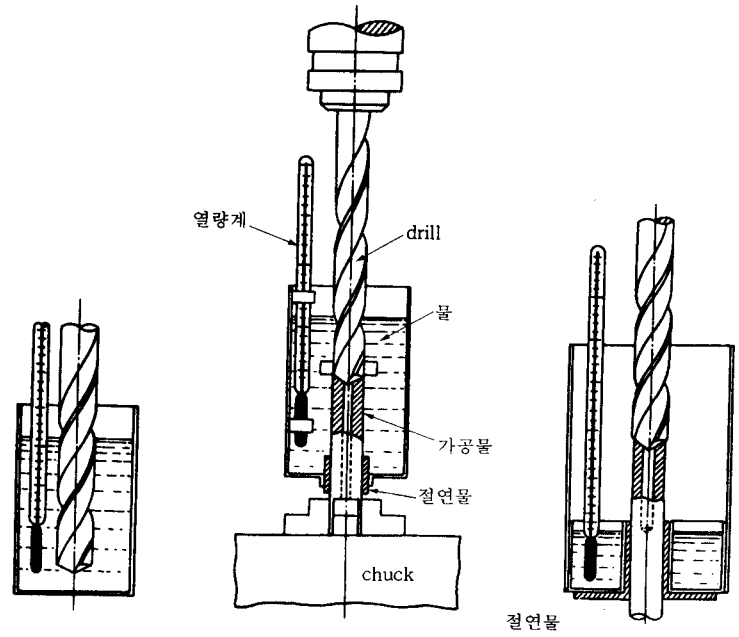


그림 3·17 calorimeter에 의한 열량 측정

용기 내의 水中에서 drill 가공을 한 다음 발생된 총열량 Q는 다음 식에 의하여 구한다.

$$Q = c \cdot m \cdot (t - t_0) \tag{3·15}$$

다만, Q : 발생된 총열량(cal)

c : 비열(cal/gm·℃)

m : (물의 질량 + calorimeter의 水當質量)(gm)

t : 절삭 후의 물의 온도(℃)

t_0 : 절삭 전의 물의 온도(℃)

drill에 流入된 열량 Q_T만을 알기 위해서는 그림 3·17(c)와 같은 상태에서 drill 가공 후 곧바로 drill만을 그림 3·17(a)와 같은 물에 넣은 다음 식 (3·15)에 의하여 계산한다.

chip에 流入된 열량 Q_c만을 알기 위해서는 그림 3·17(c)와 같은 방법으로 가공하여 chip만을 물 속에 떨어지게 한 후, 식 (3·15)에 의하여 계산한다. 즉, 그림 3·17(c)에서 계산된 열량을 chip의 질량과 비중으로 나누어 평균온도를 구하는 것이다. 이 방법에 의하면 절삭에서 주로 문제시되는 최고온도를 측정할 수 없고 평균온도만이 계산된다는 것이 단점이다.

Schmidt는 그림 3·18과 같이 절삭열이 chip, 공구 및 가공물에 어떤 비율로 분포되는가를 알기 위하여 이 방법을 사용하였으며, 대부분의 열이 chip에 있다.

가공물에 유입된 열량 Q_w는 다음과 같다.

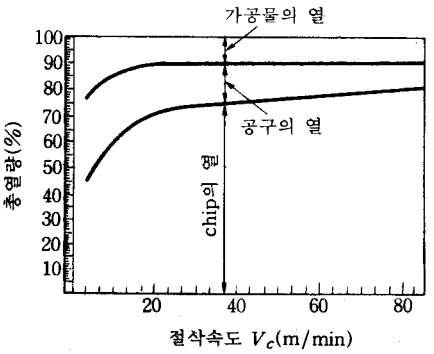


그림 3·18 절삭열의 분포

$$Q_w = Q - (Q_T + Q_c) \tag{3·16}$$

3·5·4 熱電帶의 삽입에 의한 공구온도 측정

그림 3·19와 같이 공구의 온도를 측정하기 위하여 공구에 작은 구멍을 뚫고 열전대(thermocouple)를 삽입하는 방법이며, 이 방법은 刃先部의 온도를 정확히 측정할 수 없는 등 측정범위가 극히 제한되고, 공구의 강도를 해치는 경우가 있기 때문에 별로 사용되지 않는다.

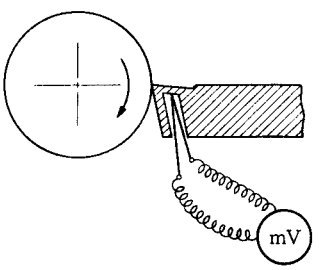


그림 3·19 공구에 열전대를 삽입하는 방법

그림 3·20은 外插法에 의하여 공구의 경사면과 여유면에 等溫線을 그린 것이며, 경사면의 최고온도의 위치는 工具刃先으로부터 약간 뒤쪽에 있고, 등온선은 crater와도 관계가 있다.

3·5·5 熱電帶의 접촉에 의한 工作物 온도측정

그림 3·21과 같이 절삭하기 전에 ring을 회전시키고 constantan wire와 가공물의 마찰에 의한 起電力을 millivoltmeter에서 읽어둔다. 이 때 가공물과 chuck 및 심압 center와 가공물 사이에는 각각 절연물을 삽입한다.

절삭 중에 읽은 온도에서 위의 초기값을 감하는 방법으로 전단역의 열중 가공물에 전도된

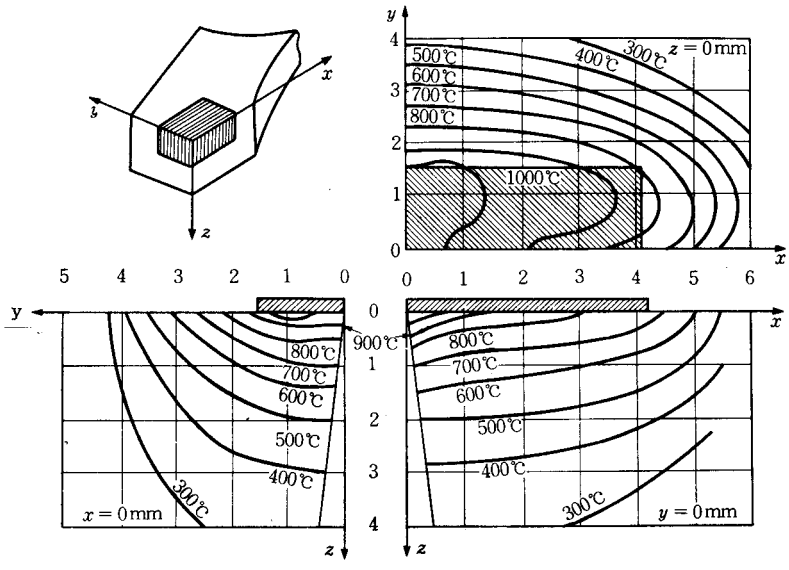


그림 3·20 單刃工具의 온도분포(℃) (Reznikov)

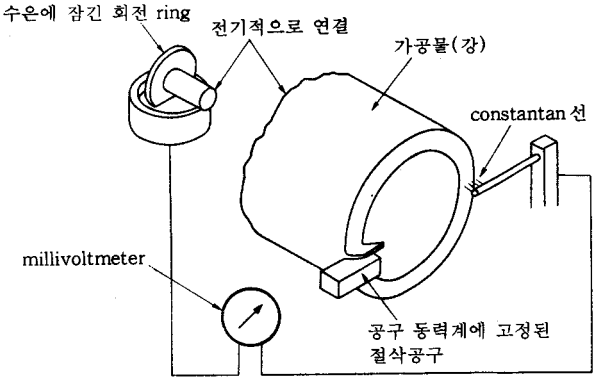


그림 3·21 열전대에 의한 가공물의 온도측정

양을 알 수 있다. 이 방법에 의하면 공작물과 공구의 접촉부분의 온도만을 알 수 있고, 또 그 접촉부분 중에서도 刃先部의 위치에 따라 공작물의 온도가 다른데에도 평균온도밖에 알 수 없다.

3·5·6 熱電帶의 접촉에 의한 공구온도 측정

chip-공구 사이의 평균온도를 측정하기 위하여 공구와 가공물 사이에 그림 **3·22**와 같이 열전대의 회로를 형성한다. 이 방법에 의하면 chip과 공구의 접촉부분의 온도만 알 수 있고 刃의 위치에 따른 온도는 알 수 없으나, 공구수명 등에 영향을 주는 최고온도의 확인이 가능하므로 실용상 많이 사용되는 측정법이다.

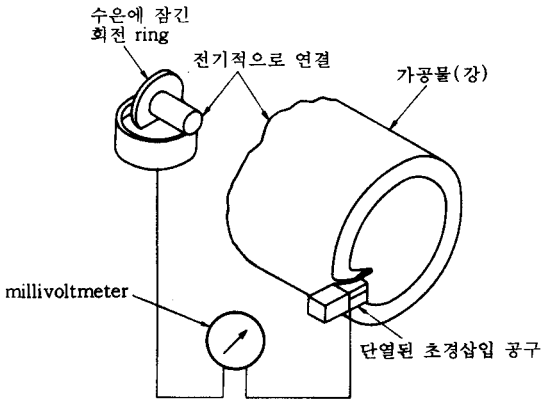


그림 3·22 열전대에 의한 공구의 온도측정

3·5·7 輻射高温計를 이용한 측정

그림 3·23과 같이 온도를 측정하고자 하는 점에 맞추어 岩鹽 또는 螢石으로 만든 lens를 놓고 그 점에서 나오는 熱線을 받아 열전대에 주면 온도에 비례하는 기전력이 발생하고, 이것을 다시 감도가 큰 galvanometer로 측정하여 그 점의 온도를 알 수 있다. 측정점을 이동하면서 측정할 수 있기 때문에 온도분포를 조사하는 데 편리하다.

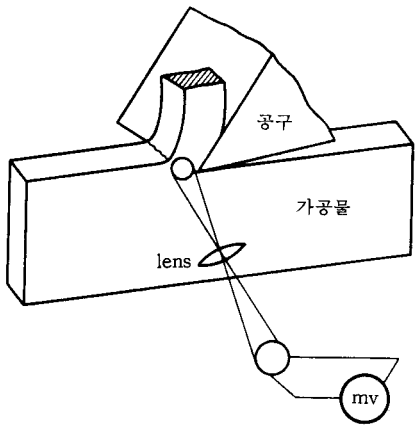


그림 3·23 輻射高温計에 의한 온도측정

【예제】 폭 $b=1.6$[mm]의 탄소강을 절삭깊이 $t=0.110$[mm], 절삭속도 $V_c=100$[m/min]로서 경사각 $\alpha=8°$인 공구로 2차원 절삭하였을 때 절삭주분력 $F_c=70.3$[kg], 수직분력 $F_t=49.8$[kg]이었고 chip 두께 $t_c=0.33$[mm]이었다. 이 때 전단면 및 공구 경사면에 단위시간당 발생하는 이론적 열량을 계산하라.

풀이 ① 절삭비 : $r_c=\dfrac{t}{t_c}=\dfrac{0.110}{0.33}=0.33$

② 전단각 : $\tan\phi = \dfrac{r_c \cdot \cos\alpha}{1 - r_c \cdot \sin\alpha} = \dfrac{0.33 \times \cos 8^\circ}{1 - 0.33 \times \sin 8^\circ} = 0.34$

$\therefore\ \phi = 18.78[^\circ]$

③ 전단면상의 발생열 Q_s

$$Q_s = F_s \cdot V_s \cdot A = (F_c \cdot \cos\phi - F_t \cdot \sin\phi) \cdot \frac{V_c \cdot \cos\alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \cdot A$$

$$= (70.3 \times \cos 18.78^\circ - 49.8 \times \sin 18.78^\circ) \cdot \frac{\frac{100}{60} \times \cos 8^\circ}{\cos(18.78^\circ - 8^\circ)} \times \frac{1}{427}$$

$$= 0.20[\text{kcal/sec}]$$

다만, A : 일의 熱當量(1[kcal]는 427[kg·m]에 해당)

④ 경사면상의 발생열 Q_f

$$Q_f = F_f \cdot V_f \cdot A = (F_c \cdot \sin\alpha + F_t \cdot \cos\alpha) \cdot (r_c \cdot V_c) \cdot A$$

$$= (70.3 \times \sin 8^\circ + 49.8 \times \cos 8^\circ) \times \left(0.33 \times \frac{100}{60}\right) \times \frac{1}{427}$$

$$= 0.08[\text{kcal/sec}]$$

연 습 문 제

1. 高速切削에 있어서 공구에 열이 전도되는 것을 무시하고 발생열의 4[%]가 가공물에 전도된다고 할 때, 최후에 chip의 온도 θ를 비절삭 energy P_s, 가공재료의 비열 c, 가공재료의 밀도 ρ로 나타내라.

답 chip의 평균 온도상승 $\theta = \dfrac{0.96\,P_s}{\rho \cdot c}$

2. 공구 경사각 $\alpha = 0°$인 공구로 2차원 절삭을 할 때 전단면에서 열발생률 P_s가 다음 식으로 표시될 수 있음을 증명하라.

$$P_s = F_c \cdot V_c(1 - \mu \cdot r_c)$$

다만, F_c : 절삭력, V_c : 절삭속도, μ : 공구면의 마찰계수, r_c : 절삭비

3. 문제 2와 같은 조건에서 금속의 比切削 energy 2.8[GN/m^2], $\mu = 1.0$, $r_c = 0.2$, 전단역에 발생되는 열의 10[%]가 가공물에 전도될 때 전단역의 평균온도 θ_s를 구하라. 다만, 가공물의 밀도 $\rho = 7200$[kg/m^3], 비열 $c = 500$[J/kg·K]이다.

답 $\theta_s = 560$[℃]

4. 문제 3에서 절삭속도가 2배로 되고 가공물에 전도되는 율이 같다고 하면 θ_s는 얼마가 되겠는가?

5. 形削(shaping)에서 생성된 chip을 열량계에 담아서 측정하여 보았더니 평균 온도상승은 500[℃]였다. 절삭조건은 $V_c = 1$[m/sec], $t = 0.5$[mm], $b = 5$[mm], $\alpha = 45°$, $F_c = 6000$[N], $F_t = 0$, $t_c = 1.2$[mm], 가공물 길이 $l = 300$[mm]이었다. 100行程(stroke) 후에 斷熱된 가공물을 열량계에 담그었을 때 30[kJ]의 열량이 증가되었다. 공구에 전도된 열량을 무시할 때 전단역에서 가공물에 전도된 열량의 비를 구하라.

답 $\dfrac{\text{가공물에 유입된 열}}{\text{전단역의 열}} = 0.236/\text{stroke}$

6. 절삭온도 측정법의 종류를 들고 간단히 설명하라.

7. 절삭온도에 영향을 주는 因子에 대하여 써라.