

## 加工面の 粗度와 성질



### 7.1 加工面の 粗度(표면 거칠기)

가공면을 현미경으로 보면 수많은凹凸을 볼 수 있다. 이와 같이 일정한 간격 사이에 나타나는凹凸의 빈도와 크기를 粗度(거칠기, roughness)라 하며, 정밀도를 정하는 중요한 인자이다. 조도가 작은 것이 정밀도가 좋다고 말할 수 있고, 조도는 摩擦, 磨耗 및 耐蝕性과도 밀접한 관계를 갖고 있다.

#### 7.1.1 표면상태를 표시하는 용어

① 표면(surface) : 다른 물체 및 물질과 분리되는 경계를 표면이라 하며, 그 형상 또는 그 연장은 도면 혹은 특별한 설명으로써 정의된다.

② 公稱表面(nominal surface) : 계획된 표면윤곽으로서, 그 형상 또는 그 연장은 도면 또는 특별한 설명에서 치수로 나타낸다.

③ 측정표면(measured surface) : 측정기 등에 의하여 구한 표면표시이다.

④ 斷面曲線(profile) : 특별한 각이 주어지지 않는 한 피측정면에 수직인 평면 내에서 표면의 윤곽(contour)이다. 특별한 지시가 없는 한, 조도가 가장 크게 나타나는 방향으로 절단한다.

⑤ 표면구성(surface texture) : 표면의 형태를 정하는 공칭표면으로부터의 불규칙적인 脫線이며, 粗度, 波狀度, lay, 흠집(flaws) 등을 포함한다.

⑥ 波狀度(waviness) : 표면조도에 비하여 상당히 큰 간격으로 반복되는 理想面에서의 偏差이다. 파상도는 공작기계와 가공물의 변형 및 진동 등과 같은 인자에서 발생한다.

⑦ 表面粗度幅(roughness width) : 조도를 표시하는 범위의 연속된 봉우리(peak) 사이의 공칭표면에 평행한 거리이다. 일반적으로 조도폭은 cut-off보다 공간이 좁다.

⑧ 表面粗度幅의 cut-off(roughness-width cut-off) : 평균조도 높이의 측정에 포함된 되

풀이되는 불규칙적인 표면의 제일 큰 간격이다.

⑨ lay : 공구자국, 할킴 및 입자의 방향을 의미한다.

⑩ 흠집(flaw) : 표면의 한 곳 또는 불규칙적인 간격으로 여러 곳에 생기는 긁힘(scratch), 구멍(hole), 균열(crack) 등을 flaw라 한다.

⑪ 平均線(최소 自乘平均線, mean line) : 단면곡선 또는 거칠기 곡선의 채취부분에서 피측정면의 기하학적 모양을 갖는 직선 또는 곡선으로서, 그 선에서 단면곡선 또는 거칠기 곡선까지의 편차의 제곱의 합이 최소가 되도록 설정한 선이다.

⑫ 中心線(center line) : 거칠기 곡선의 평균선에 평행한 직선을 그었을 때, 이 직선과 거칠기 곡선으로 둘러싸인 상부의 면적과 하부의 면적이 같게 되는 직선이다.

이상에서 설명한 용어에 대하여 그림 7.1을 참조하기 바란다.

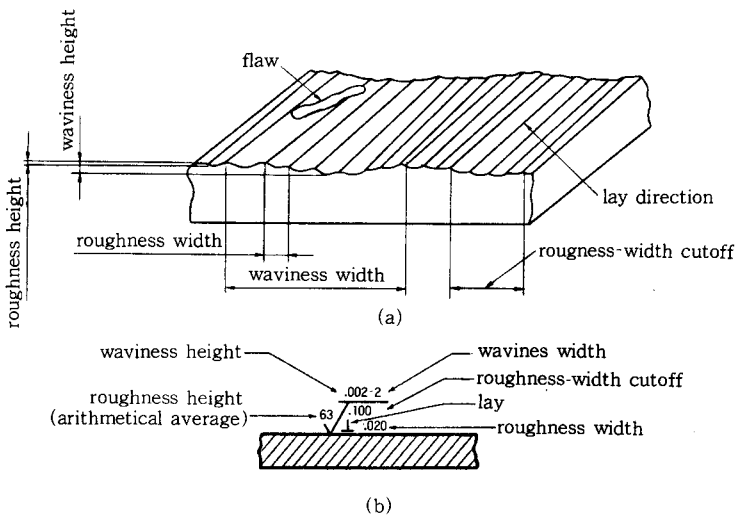


그림 7.1 표면특성의 용어와 표시법

### 7.1.2 粗度の 표시법과 측정법

#### [1] 粗度の 표시법

(1) 平均粗度(average arithmetic roughness,  $R_a$ )

영국에서는 中心線 平均粗度(center line average, CLA)라 부른다. 평균조도는 산술평균으로 정해지는 中心線으로부터의 平均離脫線間의 거리이다.

일반적으로 CLA와 AA의 기호에서는  $\mu\text{in}$ 로 표시하고,  $R_a$ 의 기호에서는  $\mu\text{m}$ 로 표시한다. 그림 7.2에서  $R_a$ 는

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |h_i| \cdot dx \doteq \frac{|h_1| + |h_2| + \dots + |h_N|}{N} \quad (7.1)$$

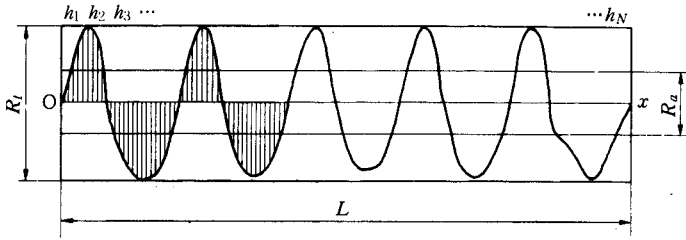
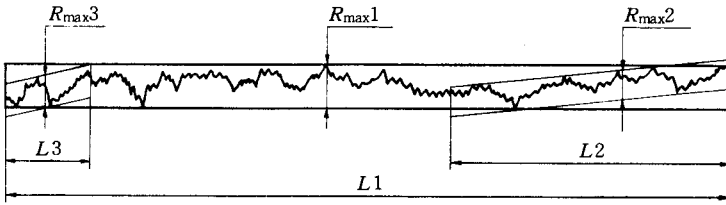


그림 7.2 평균 조도

이다.

(2) 최대높이 粗度(maximum height,  $R_{max}$ )

그림 7.3에서와 같이 단면곡선에서 기준 길이만큼 채취한 부분의 평균선에 최고산과 최저골을 지나는 2 직선을 평행하게 그었을 때, 2 직선의 간격을 단면곡선의 세로배율 방향으로 측정하여  $\mu\text{m}$ 로 표시한다.



$L1, L2, L3$  : sampling length  
 $R_{max1}, R_{max2}, R_{max3}$  : 각 기준길이  
 $L1, L2, L3$ 에서 측정된 조도

그림 7.3 최대높이 조도

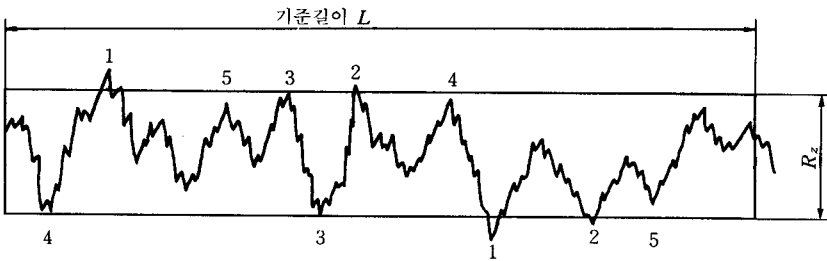


그림 7.4 10점 평균높이 조도

(3) 10點 平均粗度(ten point median height,  $R_z$ )

그림 7.4와 같이 KS에서는 단면곡선의 平均線에 평행하고, 상하에서 각각 3번째의 最高頂點과 골을 통과하는 평행선 사이의 거리를 세로배율 방향으로 측정하여  $\mu\text{m}$ 로 표시한다. ISO에서는 기준 길이 내의 가장 높은 봉우리에서 5번째까지의 평균 높이와 가장 낮은 골에서 5번째까지의 골평균깊이와의 거리를 세로배율 방향으로 측정하여  $\mu\text{m}$ 로 표시한다.

(4) 자승평균 平方根粗度 (root-mean-square deviation of profile, RMS)

중심선(center line)에서 단면곡선까지의 높이를  $y_1, y_2 \dots y_n$ 이라 하면

$$\text{RMS 평균 높이} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad (7.2)$$

으로 표시된다.

(5) 平滑 높이(smoothing depth, leveling depth,  $R_p$ )

그림 7.5와 같이 surface smoothness의 깊이로 표시하며

$$R_p = \frac{1}{L} \int_0^L |y_i| \cdot dx = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N} \quad (7.3)$$

이다.

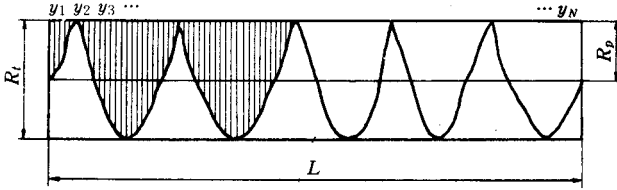


그림 7.5 平滑 높이

표 7.1은 조도의 호칭과 기준 길이(cut-off)이고, 다듬질 기호인 삼각형 기호를 사용할 때에는 표 7.2에 따르며, 그림 7.6은 lay의 기호이다.

[2] 粗度測定法

조도의 측정에는 두 가지가 있다. 하나는 표준표면에 대한 비교측정이고, 다른 하나는 측

표 7.1 粗度の 호칭, 기준 길이(cutoff)(KS B 0161)

조도	호 칭 방 법*	기준 길이 $L$ 또는 cutoff(mm)		
		종류**	조도의 범위 [ $\mu\text{m}$ ] ( $R_{\text{max}}, R_z$ )	$L$ (표준값)
최대 높이 조도 ( $R_{\text{max}}$ )	최대 높이 $\dots \mu\text{m}$ , 기준 길이 $\dots \text{mm}$ , 또는 $\dots \mu\text{m}$ $R_{\text{max}}, L \dots \text{mm}$ .	0.08	0.8 이하	0.25
		0.25	0.8을 초과 6.3 이하	0.8
10점 평균 조도 ( $R_z$ )	10점 평균조도 $\dots \mu\text{m}$ , 기준 길이 $\dots \text{mm}$ 또는 $\dots \mu\text{m}$ $R_z, L \dots \text{mm}$ .	0.8	6.3을 초과 25 이하	2.5
		2.5	25를 초과 100 이하	8
중심선 평균조도 ( $R_a$ )	중심선 평균조도 $\dots \mu\text{m}$ , cutoff 값 $\dots \text{mm}$ . 또는 $\dots \mu\text{m}$ $R_a, \lambda_c \dots \text{mm}$	8	$R_a$ 에 대한 cutoff의 표준값: 0.8	
		25		

\* 오른쪽 난에 표시한 기준 길이(또는 cutoff)의 표준값을 사용했을 때에는 기준 길이 cutoff의 표시를 생략한다.

\*\* 6종류로 하는 것을 원칙으로 한다.

표 7·2 조도의 기호

$R_{max}$	$R_z$	$R_a$	三角記號
(0.05S)	(0.05Z)	(0.012a)	▽▽▽▽
0.1S	0.1Z	0.025a	
0.2S	0.2Z	0.05a	
0.4S	0.4Z	0.1a	
0.8S	0.8Z	0.2a	
1.6S	1.6Z	0.4a	
3.2S	3.2Z	0.8a	
6.3S	6.3Z	1.6Z	
12.5S	12.5Z	3.2a	▽▽
(18S)	(18Z)		
25S	25Z	6.3a	
(35S)	(35Z)		▽
50S	50Z	12.5a	
(70S)	(70Z)		
100S	100Z	25a	
특별히 규정하지 않는다.			~

\*괄호를 붙인 것은 특별히 필요가 없는 한 사용하지 말 것.

정기에 의한 직접측정이다. 전자는 최종가공이 다를 때에는 오판을 가져올 경우가 있으므로, 같은 製作工程의 공작물 또는 같은 종류의 공작물을 다수 비교할 때에 편리하다. 후자의 직접측정법에는 觸針法, 光切斷法, 光波干涉法, 접촉측정법 등이 있으며, 標準片 또는 比較片을 필요로 하지 않는다.

#### (1) 비교측정법(method of comparison)

표면을 확대경, 현미경 등으로 확대하고 사진을 찍기도 한다. 때로는 손으로 만져보고 눈으로 보는(sight-and-touch) 것이 비교의 가장 좋은 방법이 되기도 한다. 사진에 의한 방법은 照明 또는 초점에 따라 정확한 깊이를 노출시키지 못하여 실제와 달라질 수가 있고, 이 방법은 상당한 숙련을 요한다.

#### (2) 직접측정법(method of direct measurement)

1) 觸針法 표면조도의 실제의 定量的 측정을 위하여 觸針式 測定器가 사용된다. 예리한 diamond 촉침이 arm의 일단에 고정되어 주어진 속도로 표면 위를 前後로 운동하며, 행정을 조정하여 표준 길이를 택한다. 촉침이 표면 위를 통과할 때 표면조도에 비례하여 상하로 움직이며, 이 때 상하의 움직임이 확대되어 기록되는 광학 또는 전기적 반응을 일으킨다. 그림 7·7에서와 같이 둥근 skid(round skid) 또는 평평한 shoe(flat-footed shoe)가 촉침(stylus)의 안내역할을 하며, 표면의 특성에 따라 여러 가지의 skid가 있다.

촉침선단의 곡률 반지름에 따라 조도가 다르게 나타나게 된다는 것을 그림 7·8이 보여



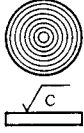
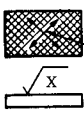
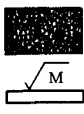
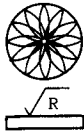
기 호	설 명	설 명도
	lay가 표면을 나타내는 선에 평행	 공구자국 방향
⊥	lay가 표면을 나타내는 선에 직각	 공구자국 방향
C	lay가 표면의 중심에 대하여 동심원주	
X	lay가 2방향으로 교차	 공구자국 방향
M	lay가 다방향으로 교차 또는 무방향	 (* 일정한 방향이 없음)
R	lay가 표면의 중심에 대하여 방사상에 근사	

그림 7-6 lay 기호

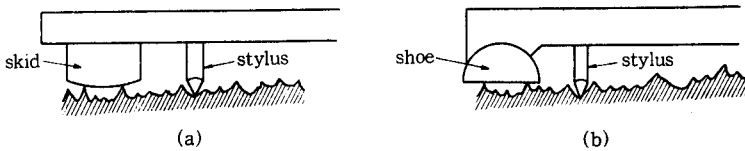


그림 7-7 축침식 측정기의 skid와 축침(stylus)

주고 있다.

선단 반지름  $r$ 가 클수록 조도는 실제보다 작게 나타나고,  $r$ 가 너무 작으면 측정압에 의하여 측정면을 손상하고 축침의 마모가 심하다.

반지름  $r$ 와 하중은 표 7-3의 값을 이용하는 것이 보통이다. 확대장치에는 기계적인 것, 광학적인 것, 전기적인 것 등이 있다.

2) 光切斷法 그림 7-9와 같이 光帶를 표면에 投射시켜 직각방향으로부터 각  $\gamma$ 를 현미경으로 측정한다. 이 광절단식 측정기에는 여러 가지 양식이 있는데, 投影光軸과 관측 현미

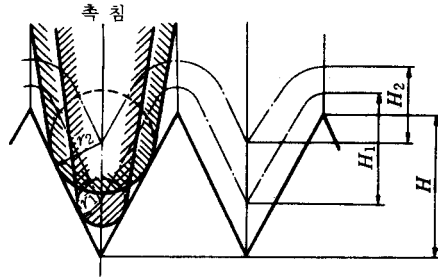


그림 7.8 축침선단 반지름과 조도

표 7.3 하중과 축침 반지름

조도	0.1S~0.8S ▽▽▽▽	1.6S~25S ▽▽▽ ▽▽	35S~560S ▽
선단 반지름( $\mu$ )	5	10	30
하중(g)	0.5	1	10

\*축침 끝이 마멸되거나 흠이 생기는 경우가 있으므로, 때때로 그 상태를 투영기 또는 현미경으로 검사하여야 한다.

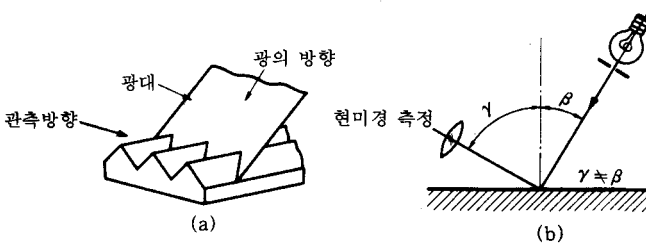


그림 7.9 광절단법

경축이 피측정면과 이루는 각에 따라 明視野觀察( $\beta = \gamma = 45^\circ$ ) 및 暗視野觀察( $\beta \approx \gamma$ )로 크게 분류할 수 있으며, 일반적으로 사용되는 명시야관찰법에 의하면 면의 거칠기가 실제의  $\sqrt{2} \approx 1.41$  배로 보이게 된다.

광절단법의 장점은 취급이 간편하고, 신속하고 확실하며, 측정면의 단면곡선을 촬영할 수 있다는 것과 압력접촉이 없다는 것이다. 결점으로는 경사지게 절단하기 때문에 윤곽이 변형되어 나타나며, 단면곡선을 上下로 크게 확대할 수 없으므로 사용한계가  $0.5 \sim 1[\mu\text{m}]$ 라는 것과, 관측할 수 있는 단면곡선의 길이가 짧다는 것이다.

이상에서 설명한 축침법, 광절단법 외에도 光波干涉法 및 공기 micrometer 에 의한 측정법 등이 있다.

7.1.3 이론적 粗度

절삭가공에서의 이론적 조도(ideal roughness)라는 것은 built-up edge, 진동, 공작기계의 부정확 등이 없이 주어진 工具形狀, 移送(feed)에 의해서만 정해지는 조도이다.

[1] 旋削에 의한 粗度

(1) 先端 반지름  $R=0$ 인 경우

그림 7·10(b)에서 평균조도  $R_a$ 는

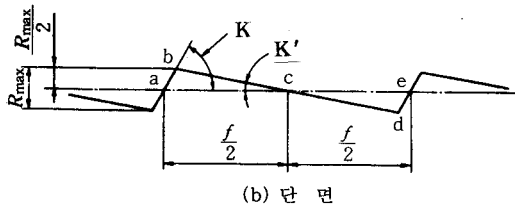
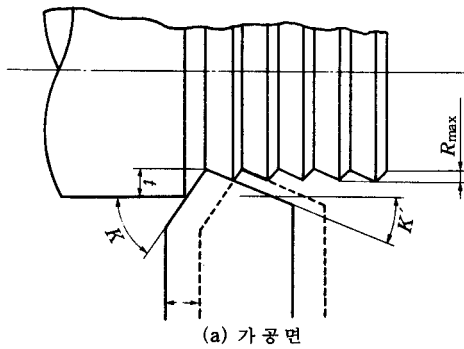
$$R_a = \frac{|\Delta abc| + |\Delta cde|}{f} \tag{7.4}$$

그런데,  $|\Delta abc| = |\Delta cde|$

$$\begin{aligned} \therefore R_a &= \frac{2 \times \Delta abc}{f} = \frac{2}{f} \times \frac{1}{2} \left( \frac{f}{2} \cdot \frac{R_{max}}{2} \right) \\ &= \frac{R_{max}}{4} \end{aligned} \tag{7.5}$$

또한, 그림 7·10(b)에서

$$\begin{aligned} \frac{f}{2} &= \frac{R_{max}}{2} \cdot \cot K + \frac{R_{max}}{2} \cdot \cot K' \\ \therefore R_{max} &= \frac{f}{\cot K + \cot K'} \end{aligned} \tag{7.6}$$



- $K$ : 주절인각(working major cutting edge angle)\*
- \* $K$ : 미식에서는 설치각, 영식에서는 주절인각
- $K'$ : 부절인각(working minor cutting edge angle)
- $f$ : 이송(feed)

그림 7·10 예리한 corner를 갖는 공구에 의한 조도



식 (7.5)와 (7.6)에서

$$R_a = \frac{f}{4(\cot K + \cot K')} \quad (7.7)$$

식 (7.6) 및 식 (7.7)에서 최대높이조도  $R_{max}$ 과 평균조도  $R_a$ 는 이송  $f$ 에 비례함을 알 수 있다.

그림 7.11은 주절인각과 이송이 주어졌을 때 부절인각에 대한 이론적 표면조도를 보인다.

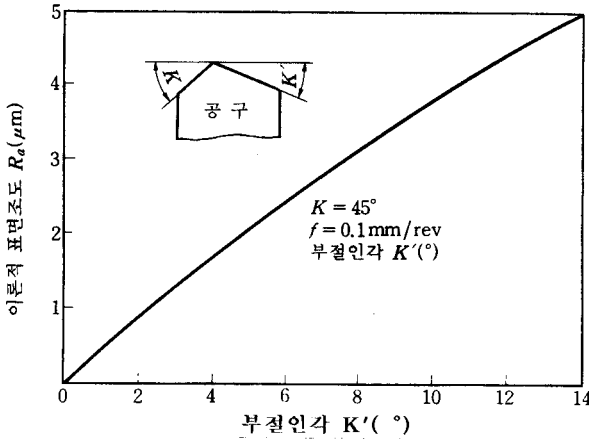


그림 7.11 부절인각과 이론적 조도

이론적 조도에서는 주절인각  $K$ 가 작을수록 조도가 향상되나, 실제에 있어서는 주절인각이 너무 작아지면 배분력이 증대하고, 공구와 가공물간의 진동이 발생하여 가공면의 조도를 악화시킬 수 있다. 마찬가지로 부절인각  $K'$ 가 작을수록 이론적 조도는 작아지나, 이 각이 너무 작으면 마찰력과 배분력이 증가하여 실제조도는 그림 7.12에서와 같이 커지게 된다.

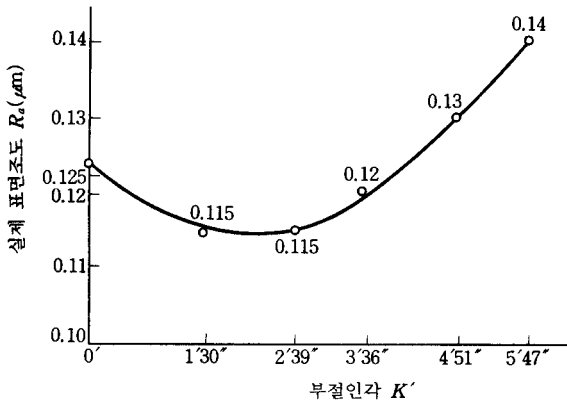


그림 7.12 부절인각과 실제조도

(2) 先端 반지름  $R \approx 0$ 인 경우

그림 7·13에서와 같이 가공면에 원호의 절삭무늬(cutting mark)만 남는 경우  $\left(\frac{f}{2} \leq R \cdot \sin K'\right)$ , 원호와 직선의 절삭무늬가 동시에 남는 때  $\left(\frac{f}{2} > R \cdot \sin K'\right)$ 가 있다. 또,  $\frac{f}{2} > R \cdot \sin K'$ 의 경우에도 主切刃(major cutting edge)에서는 원호절삭 무늬만 남기고, 副切刃(minor cutting edge)에서는 원호와 직선의 절삭무늬를 남기는 경우와, 주절인과 부절인이 동시에 원호와 직선의 무늬를 남기는 경우가 있다.

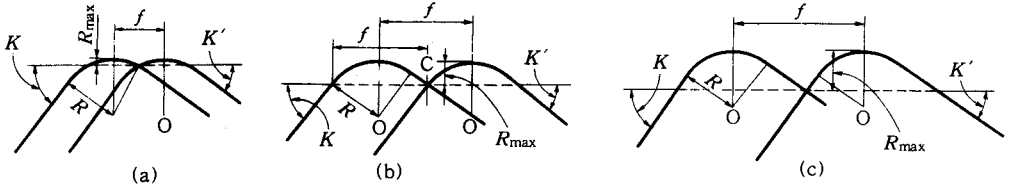


그림 7·13

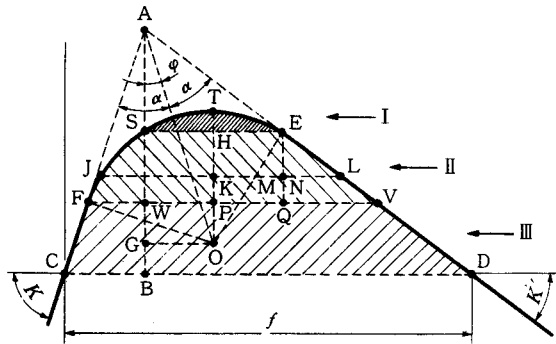


그림 7·14

그림 7·13을 확대하여 그림 7·14와 같이 나타낼 수 있으며, 그림 7·13의 (a), (b), (c)는 각각 구간 I, II, III에 해당한다.

1) I 區間  $\left(\frac{f}{2} \leq R \cdot \sin K'\right)$  실제의 旋削에 있어서는 그림 7·13(a), 즉 그림 7·14의 I 구간에서와 같이 둥근 끝만의 절삭무늬를 내는 것이 보통이다.

그림 7·15에서

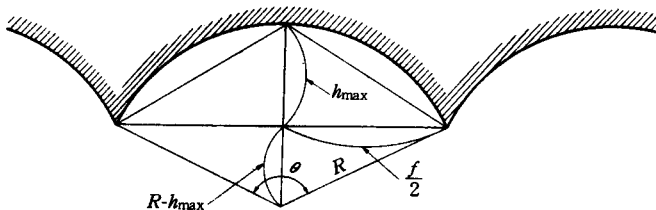


그림 7·15

$$\left(\frac{f}{2}\right)^2 + (R - h_{\max})^2 = R^2$$

$$h_{\max}^2 - 2R \cdot h_{\max} + \frac{f^2}{4} = 0$$

$$\therefore h_{\max} (= R_{\max}) = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - f^2}$$



$$\doteq R - \frac{1}{2} \left( 2R - \frac{f^2}{4R} \right)$$

$$= \frac{f^2}{8R}$$

(7·8)

無次元化하면

$$\frac{R_{\max}}{R} = \frac{1}{8} \left( \frac{f}{R} \right)^2$$

(7·9)

또한

$$\diamond \text{의 면적} = \frac{1}{2} R^2 \cdot \theta,$$

$$\text{◐의 사선부분의 면적} = \frac{1}{2} (R - h_{\max}) \cdot f$$

$$\therefore \text{◑의 사선부분의 면적} = \frac{1}{2} R^2 \cdot \theta - \frac{1}{2} (R - h_{\max}) \cdot f$$

그림 7·16에서 中心線의 정의에 의하여

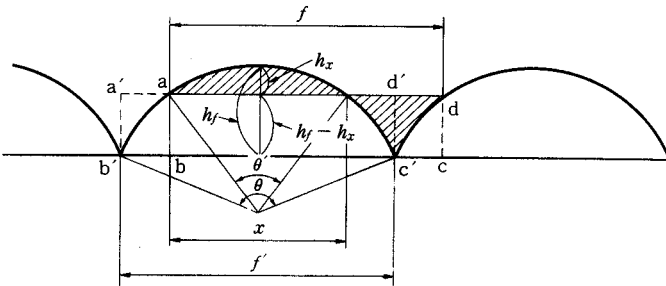


그림 7·16

$$\begin{aligned} \text{면적 } \text{◑} &= \text{면적 } \text{◐} - \text{면적 } \text{◒} \\ &= \left( \frac{f^2}{8R} - \frac{x^2}{8R} \right) \cdot f - \text{면적 } \text{◑} \end{aligned}$$

$$A_x = \text{면적 } \text{◑} = \frac{1}{2} R^2 \cdot \theta' - \frac{1}{2} (R - h_x) \cdot x$$



$$= \frac{1}{2} R^2 \cdot 2 \sin^{-1} \frac{x}{2R} - \frac{1}{2} \left( R - \frac{x^2}{8R} \right) \cdot x$$

그런데,

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{f}{2R} = \frac{f}{2R} \quad \therefore \theta = 2 \sin^{-1} \frac{f}{2R}$$

$$\therefore A_x = \frac{1}{2} R^2 \left[ \frac{x}{2R} + \frac{1}{6} \left( \frac{x}{2R} \right)^3 \right] - \frac{1}{2} R \cdot x + \frac{x^3}{16R} = \frac{1}{12} \cdot \frac{x^3}{R}$$

$$\therefore \text{면적} = \frac{f^3}{12R} - \frac{x^3}{12R}$$

$$\therefore \frac{x^3}{12R} = \left( \frac{f^2}{8R} - \frac{x^2}{8R} \right) \cdot f - \left( \frac{f^3}{12R} - \frac{x^3}{12R} \right)$$

$$\therefore \frac{f^3}{12R} + \frac{f \cdot x^2}{8R} = \frac{f^3}{8R}$$

$$\therefore x = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot f$$

평균조도는

$$R_a = \frac{2 \cdot A_x}{f} = \frac{2 \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot \frac{x^3}{R} \right)}{f} = \frac{1}{6R} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot f \right)^3$$

$$\therefore R_a = \frac{0.0321 f^2}{R} \tag{7.10}$$

그림 7.17은 구리를 chatter와 built-up edge의 영향이 거의 없도록 조심스럽게 절삭하였을 때, 이송에 대한 조도를 이론값과 실제값을 비교한 것으로서 비교적 잘 일치하고 있다.

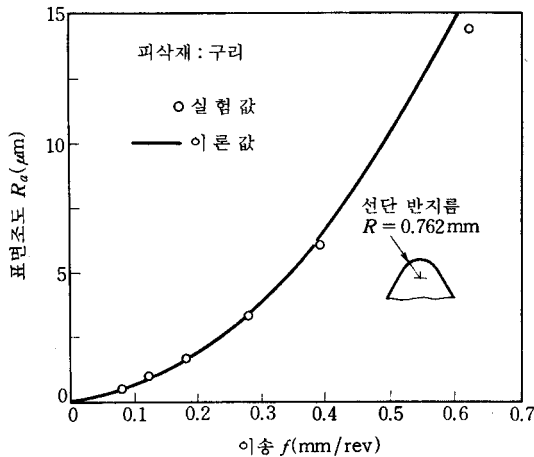


그림 7.17 이송에 대한 이론적 조도 및 실험값

식 (7·10)에 의하면 곡률 반지름  $R$ 에 역비례하여  $R$ 가 클수록 조도는 향상된다. 또한, 물림깊이가 일정할 때  $R$ 가 커지면 곡선절인의 보다 많은 부분이 절삭에 참여하여 평균 un-cut chip 두께가 얇아지고, 열전도와 방열이 용이하여지는 등 가공면 조도에 유리한 영향을 준다. 그러나  $R$ 가 어느 이상 커지면 주절인각 및 부절인각이 작아져서 배분력을 증가시키고 진동을 야기시켜, 가공면 조도를 악화시키는 영향이 그림 7·18과 같이 크게 나타난다. 가공면 조도를 최소로 하는 선단 반지름은 절삭조건에 따라 다르며, 실험에 의하여 찾을 수밖에 없다.

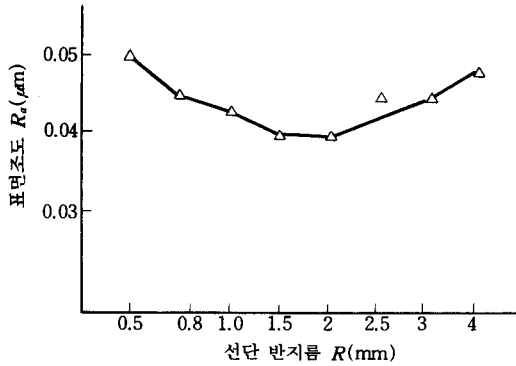


그림 7·18 선단 반지름과 표면조도

2) II 區間 ( $\frac{f}{2} > R \cdot \sin K'$ ) 그림 7·14에서 II구간은 주절인의 圓弧切削 무늬와 부절인의 圓弧 및 직선무늬가 생기는 경우로서, 이송이  $f = SE$ 에서  $f = FV$ 의 區間에 있는 경우이다. 그 구간의  $f = JL$ 에 대하여 생각하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 f &= JK + HE + NL \\
 &= [R^2 - (R - R_{max})^2]^{\frac{1}{2}} + R \cdot \sin K' + EN \cdot \cot K' \\
 &= [R^2 - (R - R_{max})^2]^{\frac{1}{2}} + R \cdot \sin K' + (TK + HO - R) \cdot \cot K' \\
 &= [R^2 - (R - R_{max})^2]^{\frac{1}{2}} + R \cdot \sin K' + (R_{max} - R + R \cdot \cos K') \cdot \cot K' \\
 &= [R^2 - (R - R_{max})^2]^{\frac{1}{2}} + R \cdot \sin K' + R \left( \frac{R_{max}}{R} - 1 + \cos K' \right) \cdot \cot K' \quad (7 \cdot 11)
 \end{aligned}$$

윗식을 無次元化하면

$$\frac{f}{R} = \left[ 2 \cdot \frac{R_{max}}{R} - \left( \frac{R_{max}}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \sin K' + \left( \frac{R_{max}}{R} - 1 + \cos K' \right) \cdot \cot K' \quad (7 \cdot 12)$$

3) III 區間 ( $\frac{f}{2} > R \cdot \sin K'$ ) 주절인과 부절인의 (원호 + 직선) 무늬가 양측에서 나타나는 경우로서, 그림 7·13(c)와 그림 7·14의 III구간이 이에 속한다.

그림 7·14에서

$$R_{max} = AB - AG + R$$

이고, 여기에서 AB와 AG만 구하면  $R_{\max}$ 가 계산된다.

그런데  $f = AB \cdot \cot K + AB \cdot \cot K'$

$$\begin{aligned} \therefore AB &= \frac{f}{\cot K + \cot K'} \\ \angle CAD &= 180^\circ - (K + K') \\ \therefore \alpha &= \frac{1}{2} \cdot \angle CAD = 90^\circ - \frac{K + K'}{2} \\ \triangle ABD \text{에서 } \angle BAD &= \alpha + \varphi = 90^\circ - K' \\ \therefore \varphi &= (90^\circ - K') - \alpha = (90^\circ - K') - \left(90^\circ - \frac{K + K'}{2}\right) \\ &= \frac{K - K'}{2} \end{aligned}$$

$\triangle AOE$ 에서

$$\begin{aligned} AO &= R \cdot \frac{1}{\sin \alpha} = R \cdot \frac{1}{\sin\left(90^\circ - \frac{K + K'}{2}\right)} \\ &= \frac{R}{\cos\left(\frac{K + K'}{2}\right)} \\ \therefore AG &= AO \cdot \cos \varphi = \frac{R}{\cos\left(\frac{K + K'}{2}\right)} \cdot \cos\left(\frac{K - K'}{2}\right) \\ \therefore R_{\max} &= \frac{f}{\cot K + \cot K'} - \frac{R \cdot \cos\left(\frac{K - K'}{2}\right)}{\cos\left(\frac{K + K'}{2}\right)} + R \end{aligned} \quad (7.13)$$

윗식에서  $f \gg R$ 라 하고 2항과 3항을 무시하면

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K'} \quad (7.14)$$

와 같이 되어 식 (7.6)과 같게 됨을 알 수 있다.

식 (7.13)을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{R_{\max}}{R} = \frac{f/R}{\cot K + \cot K'} - \frac{\cos\left(\frac{K - K'}{2}\right)}{\cos\left(\frac{K + K'}{2}\right)} + 1 \quad (7.15)$$

식 (7.9), (7.12) 및 (7.15)의  $R_{\max}/R$ 을  $f/R$ 에 대하여 graph를 그리면 그림 7.19와 같다.

다듬질 가공에서는  $f/R < 3.0$ 인 경우이므로 이에 대한 graph는 그림 7.20과 같다.

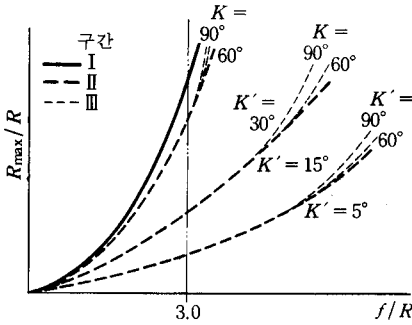


그림 7-19 (Shaw and Crowell)

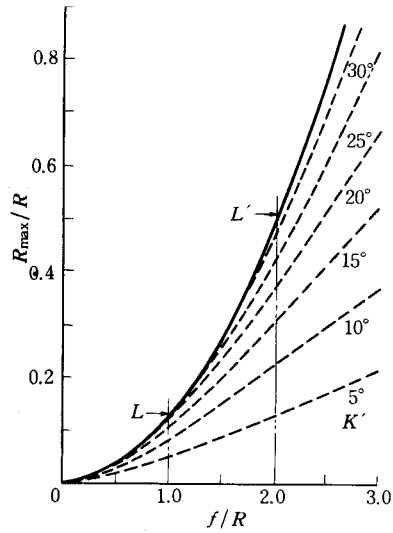


그림 7-20 (Shaw and Crowell)

그림 7-20에서 실선은 공구선단 반지름  $R$ 만 고려한 가공의 경우(I구간)이며, 점선은 II구간의 경우이다. 副切刃角  $K' = 30^\circ$ 일 때 I구간에서  $f/R$ 의 한계값은

$$\frac{f}{R} = 2 \cdot \sin 30^\circ = 1.0$$

이 되며 이 점을  $L$ 이라 하였다. 그러나 점선(II구간)의 경우에  $K' = 30^\circ$ 일 때  $R_{\max}/R$ 가 실선(I구간)에서 벗어나지 않으며( $L'$ 점), 이 때  $f/R$ 는 I구간 경우의 2배 정도임을 알 수 있다. III구간의 경우는 정밀가공에서는 고려대상이 못된다.

[2] milling에 의한 粗度

milling cutter에 의한 표면조도는 날(tooth) 하나하나의 자국으로 나타나겠으나, 실제에 있어서는 cutter의 진동, milling machine의 강성 등이 영향을 미친다.

(1) plain cutter의 경우

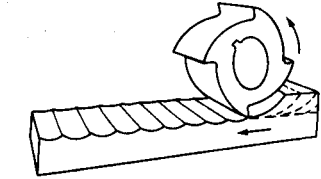
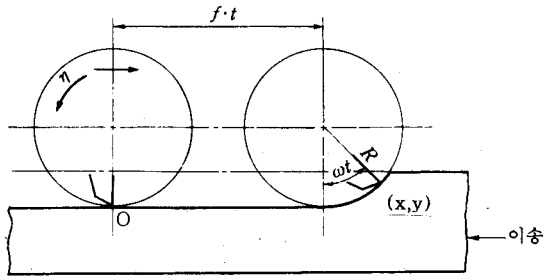
그림 7-21과 같이 이송방향에 대한 수직선이 날끝과 plain cutter의 중심을 지날 때의 점을 원점으로 한다.

상향절삭에서  $f$ : 이송속도라 할 때  $t$ 시간 후의 cutter인의 좌표는

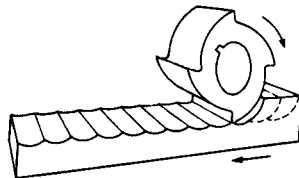
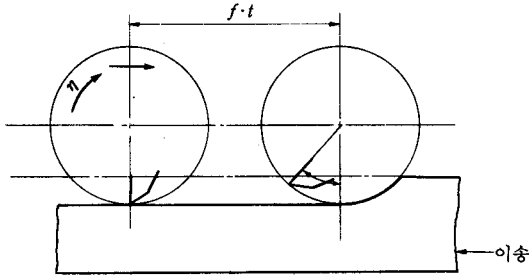
$$\begin{aligned} x &= f \cdot t + R \cdot \sin \omega t \\ y &= R(1 - \cos \omega t) \end{aligned} \tag{7-16}$$

하향절삭에서  $f$ : 이송속도라 할 때  $t$ 시간 후의 cutter인의 좌표는

$$\begin{aligned} x &= f \cdot t - R \cdot \sin \omega t \\ y &= R(1 - \cos \omega t) \end{aligned} \tag{7-17}$$



(a) 상향절삭(up-cutting, up-milling)



(b) 하향절삭(down-cutting, down-milling)

그림 7·21 plain cutter 의 운동

그림 7·21(a)에서 날 1개의 feed를  $f_z$ 라 할 때 이론적 최대 높이 조도  $R_{max} = y$ 이며,  $x = \frac{f_z}{2}$ 가 된다.

$$\therefore \frac{f_z}{2} = f \cdot t + R \cdot \sin \omega t \tag{7·18}$$

식 (7·16)에서

$$R_{max} = R(1 - \cos \omega t) \tag{7·19}$$

그런데,

$$\sin \omega t \approx \omega t, \quad \cos \omega t \approx 1 - \frac{(\omega t)^2}{2}$$



식 (7·18)에서

$$\frac{f_z}{2} = f \cdot t + R \cdot \omega t = (f + R \cdot \omega) \cdot t$$

로 되고, 식 (7·19)에서

$$R_{\max} = \frac{R}{2} (\omega t)^2$$

으로 된다.

$$t = \frac{f_z}{2(f + R \cdot \omega)}$$

를 위식에 대입하면

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \frac{R}{2} \left[ \omega \cdot \frac{f_z}{2(f + R \cdot \omega)} \right]^2 \\ &= \frac{R \cdot f_z^2}{8} \left[ 2\pi n \cdot \frac{1}{R \left( \frac{f}{R} + 2\pi n \right)} \right]^2 \\ &= \frac{f_z^2}{8R} \left[ \frac{1}{\frac{f}{2\pi n R} + 1} \right]^2 \\ &= \frac{f_z^2}{8R} \left[ \frac{f}{2\pi n R} + 1 \right]^{-2} \\ &= \frac{f_z^2}{8R} \left[ 1 + \frac{f}{2\pi n R} \right]^{-2} \end{aligned}$$

위식을 2 항까지만 전개하면

$$\begin{aligned} R_{\max} &\doteq \frac{f_z^2}{8R} \left[ 1^{-2} + (-2) \cdot (1)^{-2-1} \cdot \frac{f}{2\pi n R} \right] \\ &= \frac{f_z^2}{8R} \left[ 1 - 2 \cdot \frac{f}{2\pi n R} \right] \\ &= \frac{f_z^2}{8R} \left( 1 - \frac{f}{\pi n R} \right) \end{aligned} \quad (7 \cdot 20)$$

같은 방법으로 하향절삭에서는

$$R_{\max} = \frac{f_z^2}{8R} \left( 1 + \frac{f}{\pi n R} \right) \quad (7 \cdot 21)$$

식 (7·20)과 (7·21)에서 상향 절삭면의 이론적 조도가 하향 절삭면의 것보다 작다는 것을 알 수 있다.

(2) face cutter의 경우

face milling의 조도는 旋削의 경우를 적용하여 설명할 수 있다.

선삭에서의 主切刃角에 모서리각(corner angle)  $K$ , 副切刃角에 正面餘裕角  $K'$ 를 대응시켜 생각할 수 있으며, cutter의 刃當移送를  $f_z(\text{mm}/\text{rev}\cdot\text{tooth})$ 라 할 때

$R=0$ 인 경우 식 (7.6)에서

$$R_{\max} = \frac{f_z}{\cot K + \cot K'} \quad (7.22)$$

$R \approx 0$ 인 경우(圓弧의 cutting mark 만 생길 때) 식 (7.8)에서

$$R_{\max} = \frac{f_z^2}{8R} \quad (7.23)$$

그림 7.22(a)에 의한 가공면의 斷面을 표시하면 그림 7.23 과 같다.

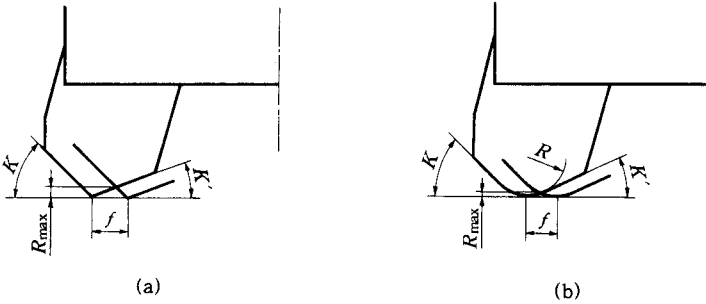


그림 7.22

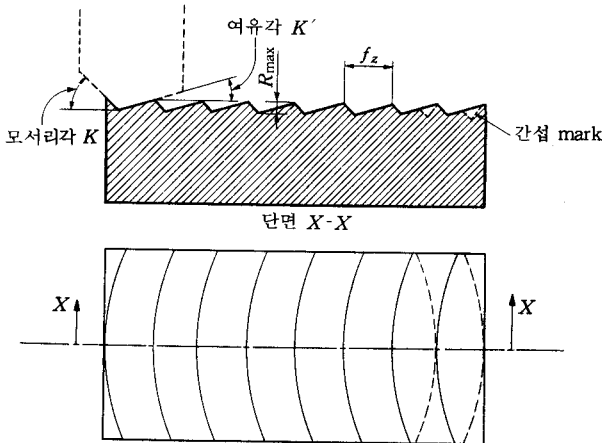


그림 7.23

### 7.1.4 粗도에 영향을 주는 因子

#### [1] 切削方向의 粗度

##### (1) chip 形狀의 영향

裂斷形 chip(tear type chip)에서는 뜯긴 자국이 남게 되고, 균열형 chip(crack type

chip)에서는 工具先端에서 시작된 crack가 母材의 내부까지 침투하여 거친 표면이 형성된다.

유동형 chip(flow type chip)에서는 전단면상에서 전단되므로, 가공면이 뜯기거나 crack이 없어 비교적 매끈한 면이 얻어진다.

(2) 切削速度와 切削角의 영향

그림 7-24는 軟鋼을 H.S.S. 공구로 절삭하는데 절삭깊이 0.06[mm]일 때 각 절삭각과 절삭속도에 대한 표면조도이다.

절삭각이 작을수록 chip의 변형이 작고 예리한 切刃으로 절삭을 하는 결과가 되어, built-up edge의 크기가 작아지거나 없고, 표면조도가 향상된다. 이들 관계가 그림 7-24에서와 같이 對數座標에서 직선으로 표시되며

$$R_{max} = \frac{620}{(90^\circ - \alpha)^{0.86}} \cdot e^{-0.0124V_c} \tag{7.24}$$

의 식이 도입된다. 여기서  $\alpha$ 는 절삭각[°],  $V_c$ 는 절삭속도[m/min]이다.

$V_c$ 가 커지면  $R_{max}$ 은 감소하는 것을 알 수 있다.

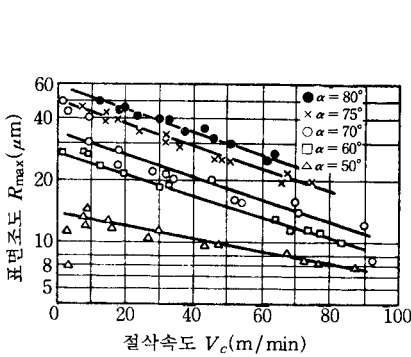


그림 7-24 절삭속도, 절삭각 및 조도( $\alpha$ =절삭각)

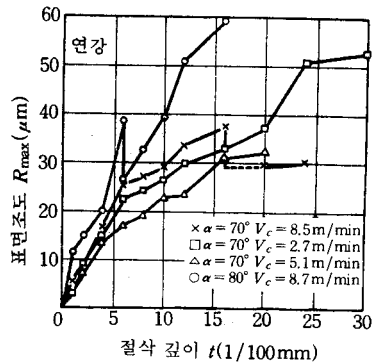


그림 7-25 절삭깊이, 절삭각 및 조도( $\alpha$ =절삭각)

(3) 切削 깊이의 영향

절삭 깊이가 증가하면 chip 형상은 유동형 → 전단형 → 균열형의 순으로 변화하여 조도는 크게 된다. 같은 유동형 chip이라 할지라도 절삭깊이가 증가하면 built-up edge가 커지게 되므로, 가공면은 거칠어진다. 그림 7-25는 절삭 깊이와 조도의 관계이다.

(4) 工具 다듬질 방법의 영향

그림 7-26과 같이 공구의 다듬질이 정밀하게 되면 刃先이 균일하고 예리하며, 마찰이 적어서 built-up edge의 발생이 적고, 인선에 요철이 없거나 작으므로 가공면이 매끈하게 되며 공구수명도 커진다.

[2] 移送(feed) 방향의 粗度

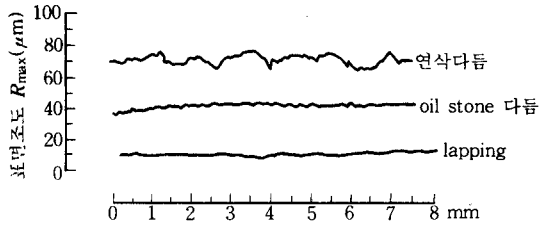


그림 7·26 공구의 다듬질과 가공면의 조도

이송에 의한 刃先의 mark가 가공면에 남는 경우이다. 일반적으로 broaching, reaming, gear cutting 등에서는 절삭방향의 조도가 크고, 旋削, 形削, milling, boring 등에서는 이송 방향의 조도가 더 크다. 그림 7·27은 각종 절삭의 이송자국(feed mark)을 보여 준다.

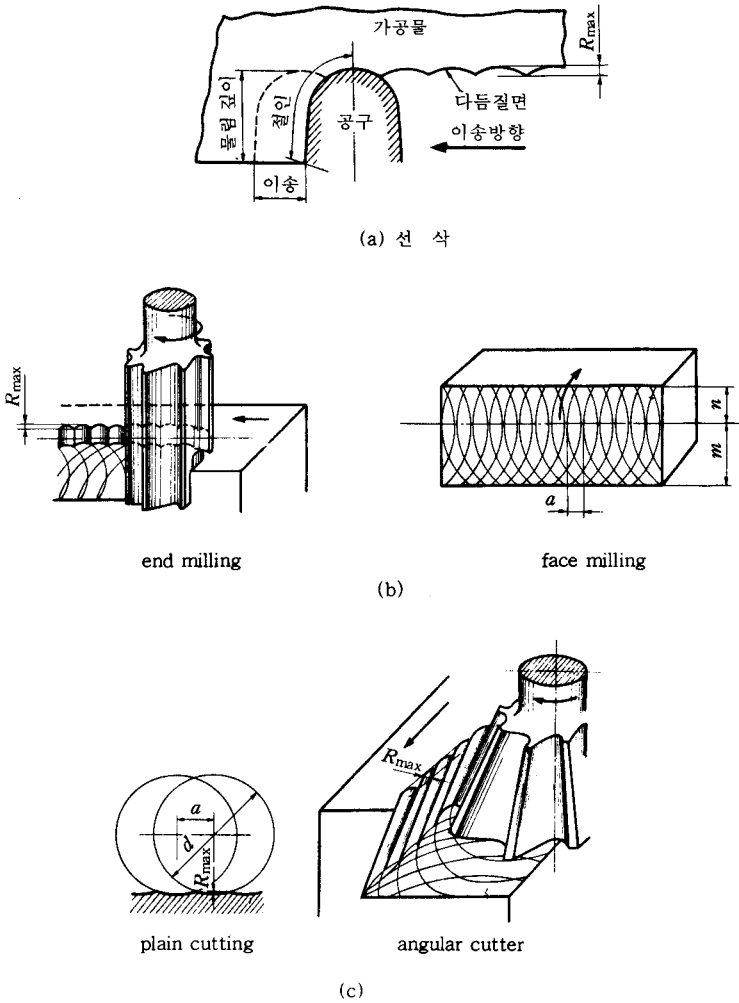


그림 7·27 각종 공구의 이송자국(feed mark)

(1) 이송의 영향

그림 7·28은 절삭속도가 서로 다를 때 이송과 표면조도의 관계를 보여 준다. 이송이 작으면 표면조도는 작아진다. 그러나 너무 작으면 다른 영향에 의해 오히려 표면 거칠기가 나빠지는 경우가 있다. 본 예에서 이것의 한계는 0.1[mm/rev] 정도이다.

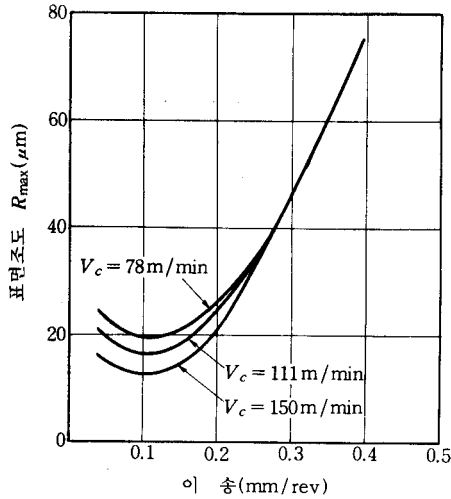


그림 7·28 이송과 조도

(2) 切削速度의 영향

그림 7·29는 탄소강(C = 0.45[%])을 초경공구로 절삭하는데 물림깊이 1[mm], 이송 0.15[mm/rev]일 때 절삭속도에 대한 표면조도를 보여 준다. 절삭속도 100[m/min]에서 조도가 작아진 것은 built-up edge가 방지되기 때문이다.

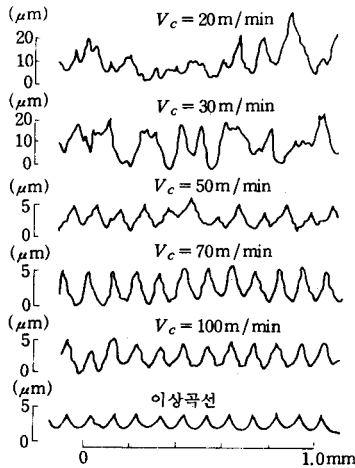


그림 7·29 절삭속도와 조도

그림 7·30은 다른 예로서 절삭속도에 대한 조도를 표시한다. built-up edge가 소실되는 속도를 臨界速度(critical speed)라 하며, 공구와 가공물의 재질, 공구의 형상, 물결깊이, 이송, 절삭유제 등에 따라 다르다. 정밀절삭에서는 이송을 작게 하고 절삭속도를 크게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

이상에서 설명한 것 외에 공작기계의 상태, 공구운동의 부정확, 불규칙적 이송, 가공물의 결합, chip의 유동에 의한 굽힘 등이 가공면 조도에 영향을 준다.

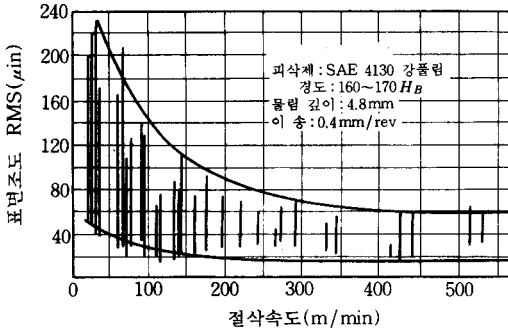


그림 7·30 절삭속도와 조도

## 7·2 加工變質層

### 7·2·1 變質層의 구성과 특성

그림 7·31과 같은 절삭 model에서 切削刃의 前方 □ABFE를 절삭깊이  $t$ 로 절삭할 때, □ABDC는 전단면에서 □A'B'D'C'로 되고 공구 경사면의 마찰에 의하여 다시 斜線部分 A'B'O로 된다. 또, □CDFE는 工具刃의 압축을 받아 사선부분 OFE로 된다.

이와 같은 表皮層은 소성변형, 결정구조나 조직변화를 포함하며 이 층을 加工變質層(deformed layer, cold worked layer, flow layer)이라 한다. 이로 인하여 경도의 변화가 생기

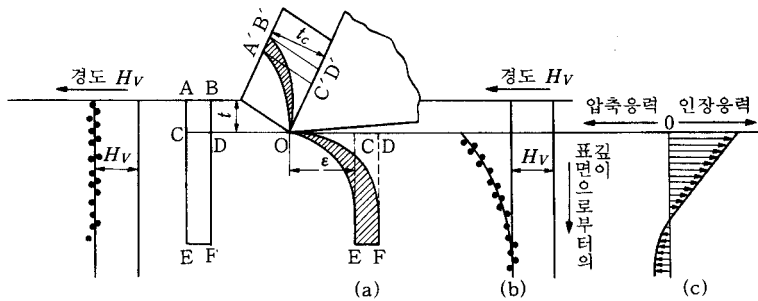


그림 7·31 가공 변질층의 생성원리

고 잔류응력이 존재하게 된다.

이 변질층은 결정입자가 파쇄되어 미세화되고, 표피에는 非結晶質에 가까운 微結晶(20~50[Å])으로 된다. 또, 결정입자가 절삭방향으로 유동하여 같은 방향을 취하는 섬유조직(fiber structure)과 같이 된다. 이 변질층의 두께는 1[mm] 이하이며 절삭조건, 피삭재의 조직, 硬化能, 결정입자의 크기에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 이러한 변질층에는 커다란 잔류응력이 존재하며, 이와 같이 내부 energy가 높고 變化勾配가 큰 표피는 여러 가지 영향을 받기 쉬우며, 화학적 또는 기계적 성질도 내부의 것과는 달라진다.

예를 들면, 가공 변질층이 가공경화로 인하여 脆性を 갖고, 표면조도가 크며, 응력변화에 의한 변형이 생겨 공차범위에서 벗어나기 쉽다.

이러한 표면은 磨耗와 腐蝕에 대한 저항이 적다. 鍍金을 하면 부착속도가 느리고 도금이 쉽게 벗겨지며, 섬유조직이 생겨 마모와 부식저항이 방향에 따라 다르다.

### 7-2-2 變質層 깊이의 측정

#### [1] X-線回折法

변질층을 형성하는 결정은 그 格子가 틀어져 있다. 原質部와 같은 格子寫眞이 얻어질 때까지 부식제거시켜 그 깊이를 변질층의 깊이로 하며, 시료의 표피에 특성X선(철에는 Co의  $K\alpha$ 선, 구리 및 Al에 대해서는 Cu의  $K\alpha$ 선)을 투사하고 X선회절 사진을 찍어서 식별한다.

#### [2] 顯微鏡組織法

시편단면을 만들어 현미경 조직을 조사하면 표피부의 것은 모체의 것과 다르므로 그 깊이를 측정할 수 있다. 모재의 粒度나 조직에 따라서 오차가 다른 것이 단점이다.

#### [3] 腐蝕法

변질층은 화학적으로 부식되기 쉽다. 따라서, 부식으로써 변질층의 깊이를 측정할 수 있다. 그림 7-32에서와 같이 부식이 진행되다가 일정값에 달하는 시기가 있다. 이 때까지 부식으로 제거된 깊이를 변질층의 깊이로 한다.

#### [4] 硬度法

변질층은 가공경화를 받으므로 단면의 경도를 미소경도계(micro-hardness tester)로 측

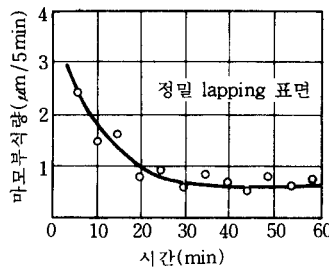


그림 7-32 부식속도의 측정에 의한 변질층 깊이의 결정

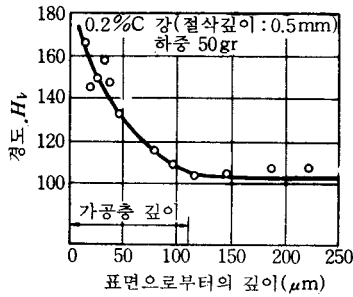


그림 7-33 경도측정에 의한 변질층 깊이의 결정

정하여 그 값이 그림 7-33 과 같이 일정값이 될 때까지 측정하고, 그 깊이를 변질층으로 한다.

[5] 再結晶法

가공변질된 금속을 가열하면 결정입자가 성장하며, 그 성장정도는 변질정도에 따라 달라진다. 이 성질을 이용하여 시편을 가열하고, 그 후의 치수변화로써 간접적으로 변질층의 깊이를 측정한다.

표 7-4는 Asaeda 교수가 측정한 것이며, 측정방법에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 측정법이 복잡하고, 또 변질층의 경계가 모호하기 때문이다. 따라서, 측정법이 상이한 변질층 깊이를 비교하는 것은 곤란하다. 일반적으로 chip의 변형속도, 절삭저항, 가공면의 조도가 크게 되면 변질층은 깊게 된다.

표 7-4 측정법에 따른 변질층 깊이의 비교

[단위 μm]

재 료	절삭깊이 mm	부식법	현미경 조직법	X선 회절법	경도법	재결정법
0.2% C 탄소강	0.1	15~20	30~40	42~55	50~90	50~80
	0.5	30~40	50~60	45~50	130~150	100~130
0.6% C 탄소강	0.1	25~35	30~50	30~55	50~130	90~130
	0.5	40~70	60~70	55~65	140~180	160~200

\*경사각 : 14°, 절삭속도 : 14m/min

7-2-3 變質層 깊이에 영향을 주는 因子

[1] 切削角의 영향

그림 7-34는 절삭각과 변질층 깊이의 관계를 표시한 것으로서 절삭각의 증가와 더불어 변질층도 깊어지며, 특히 절삭각이 90° 가까이 되면 변질층 깊이가 급증한다.

[2] 切削温度的 영향

그림 7-35에서와 같이 절삭온도의 상승에 따라 變質層의 깊이는 얇아지고 풀림온도 근처



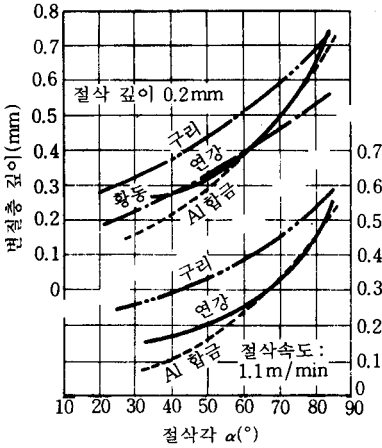


그림 7-34 절삭각과 변질층 깊이

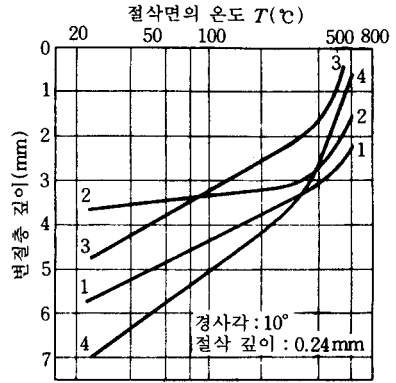


그림 7-35 절삭온도와 변질층 깊이

에서 0이 된다.

[3] 물림깊이와 移送(feed)의 영향

그림 7-36은 물림깊이와 이송에 대한 변질층의 변화를 나타낸 것이며, 주로 이송의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 표면조도가 물림깊이보다는 이송의 영향이 크다는 것과도 관련이 있다.

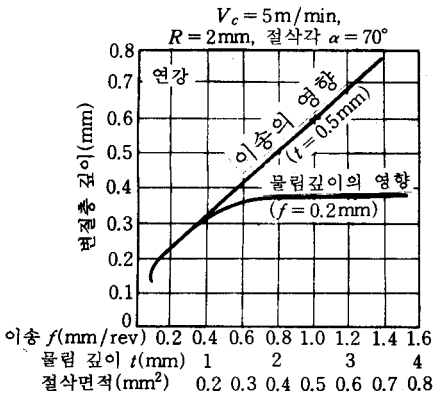


그림 7-36 물림깊이와 이송이 변질층 깊이에 미치는 영향

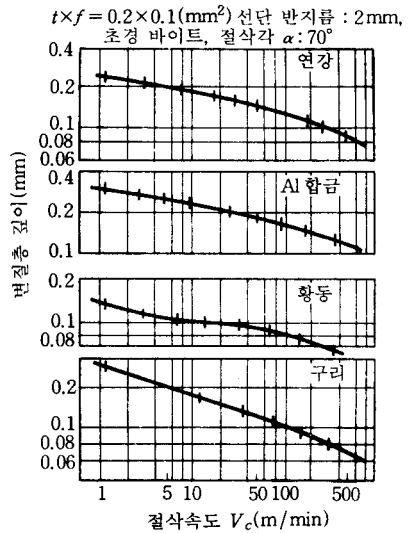


그림 7-37 절삭속도와 변질층 깊이

[4] 切削速度的 영향

그림 7-37은 절삭속도와 변질층 깊이의 관계이며, 절삭속도가 증가하면 변질층 깊이가

對數的으로 감소되는 것을 알 수 있다.

[5] 切削抵抗의 영향

그림 7·38은 절삭저항과 변질층 깊이가 비례관계에 있음을 보여 준다. 즉, 가혹한 절삭조건에서 변질층의 깊이가 커지는 것은 당연하다.

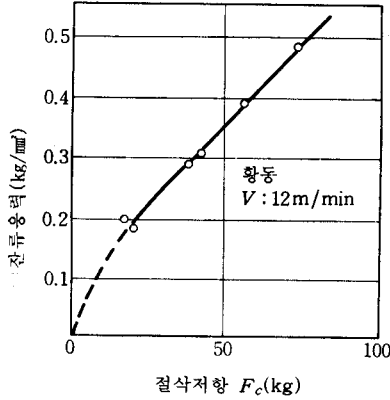


그림 7·38 절삭저항과 변질층 깊이

7·3 殘留應力

가공면의 잔류응력(residual stress)을 구하기 위하여 非破壞的 方法으로 결정격자의 strain을 측정할 수 있는 X-線回折法과 전단 strain에 의한 magnetic strain을 이용하는 방법이 있다. magnetic strain 현상에는 사용되는 주파수가 영향을 주며, X-선법은 부식에 의하여 내부응력 분포를 구하는 경우, 새로 생긴 표피에 주목하여 측정하므로 실제의 것과 다르게 나타나는 것이 결점이다. 또, 부식변형법은 시편의 형상에 제한을 받는다.

그림 7·31 에서와 같이 일반적으로 工具刃이 그 前方의 材料를 압축하면서 진행하고, 後方의 표피는 인장되므로 절삭 후에 가공면에는 압축응력이 남아 있는 경우가 있다.

잔류 응력층의 깊이는 변질층의 깊이와 대략 일치한다.

Okushima의 연구에 의하면 잔류 응력층의 깊이  $H[\text{mm}]$ 와 잔류응력  $\sigma_r[\text{kg/mm}^2]$  사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \text{bite 가공에서} : \sigma_r &= (60\sim 100) \cdot H^{0.61} \\ \text{milling 에서} : \sigma_r &= (40\sim 70) \cdot H^{1.72} \end{aligned} \tag{7·26}$$

일반적으로 잔류응력은 가공면이 거칠수록, 공구면의 절삭각이 증가할수록 증가된다. 그림 7·39에서는 절삭속도가 클수록 잔류응력이 증가하나, 어느 속도범위를 넘으면 감소한다.

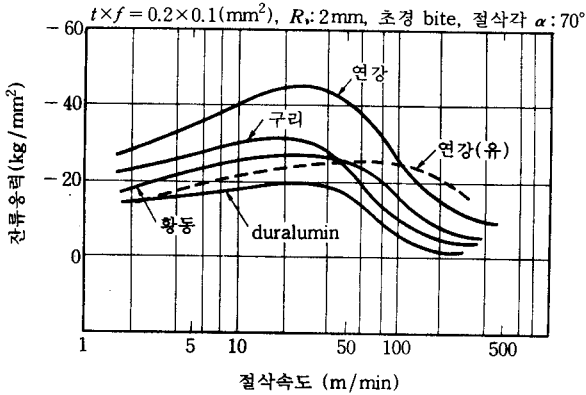


그림 7.39 절삭속도와 잔류응력

즉, bite 및 milling cutter에 의한 가공에서 절삭속도  $V_c = 10 \sim 30 [\text{m/min}]$ 일 때 잔류응력이 최대이고 그 이상에서는 감소한다. 이런 사실에서 잔류응력은 절삭저항과도 직접적인 관계가 없다는 것을 알 수 있다(그림 2.58 참조). 또한, 변질층의 경우와 마찬가지로 같은 절삭면적에서 절삭깊이보다는 이송의 영향이 크다.

일반적으로 절삭유제를 사용하면 잔류응력은 30~50[%] 정도 감소한다. 200[°C]에서 12시간 정도 低温 풀림하면 잔류응력이 반감된다는 사실이 보고되었다. 그러나, 잔류응력의 깊이에는 거의 영향이 없다고 한다. 절삭 후 시간이 경과하면 잔류응력이 감소하지만, 그 감소는 指數函數的이며 100시간 정도 후에는 일정하다고 한다.


**연습문제**

1. 선단 반지름  $R = 0$ 을 갖는 선삭공구의 主切刃角은  $60^\circ$ 이고 이송은  $0.05[\text{mm}/\text{rev}]$ 이다. 이론적 평균조도를  $3[\mu\text{m}]$  이하로 하려면 副切刃角을 얼마로 하여야 하는가?      **답**  $15.37^\circ$
2. 이상적 旋削條件下에서 이송을  $0.25[\text{mm}/\text{rev}]$ 로 할 때, 평균조도  $R_a = 10[\mu\text{m}]$ 을 얻기 위해서는 공구의 선단 반지름을 얼마로 하여야 하겠는가?      **답**  $0.2101[\text{mm}]$
3. slab milling cutter의 바깥 지름이  $150[\text{mm}]$ , 잇수가 10개이고 이송속도를  $1.5[\text{mm}/\text{sec}]$ 로 할 때 이론적 평균조도  $R_a$ 를 구하라. 단, cutter의 회전수는  $3[\text{sec}^{-1}]$ 이다.      **답**  $1.07 \times 10^{-3}[\mu\text{m}]$
4. 표면조도 표시법의 종류를 들고 각각에 대하여 간단히 설명하라.
5. 선단 반지름  $R = 0$ 과  $R \approx 0$ 인 bite 및 milling cutter의 가공에 의한 이론적 표면조도를 나타내는 식을 쓰고 설명하라.
6. 절삭가공에서 표면조도에 영향을 주는 인자를 들어라.
7. 절삭가공에서 가공물의 변질층과 잔류응력에 대하여 써라.