切削速度法則의 擴張

9-1 chip斷面의 細長比

切削速度法則의 확장에서는 移送에 대한 물림깊이의 比의 영향에 대하여 논의하고자 한다. 이 比를 細長比 또는 chip形狀이라 하며 동일 chip斷面積에 대하여 細長比 G가 크다는 것은 d/f가 크다는 의미이다. 실제에서 존재하는 細長比를 조사하기 위하여 여러 工具製作會社가 추천하는 물림깊이와 移送의 組合을 분석하여 보았다. Fig. 94는 Carboloy會社가 추천한 이들 조합을 나타낸 것이며, 兩對數方眼紙의 x軸에 물림깊이를 나타내고 y軸에 移送을 나타내었다. Fig. 94에서 斜線친 부분은 물림깊이 및 移送의 허용 범위이고 대각선의 交點은 이들의 平均값을 나타낸다. 물림깊이 0.016 in~0.8 in 내에서 이상의 交點을 이으면 직선이 되며, 이 직선의 기울기에서 移送은 물림깊이의 3乘根에 비례한다는 어림셈을 할 수 있다. Fig. 94에 각각의 chip斷面積 A와 細長比 G가 표시되어 있으며 細長比 G는 점선으로 표시된 것을 제외하고는 어림셈으로 chip斷面積의 平方根에 비례하여 증가하는 경향이 있다. 예를 들면

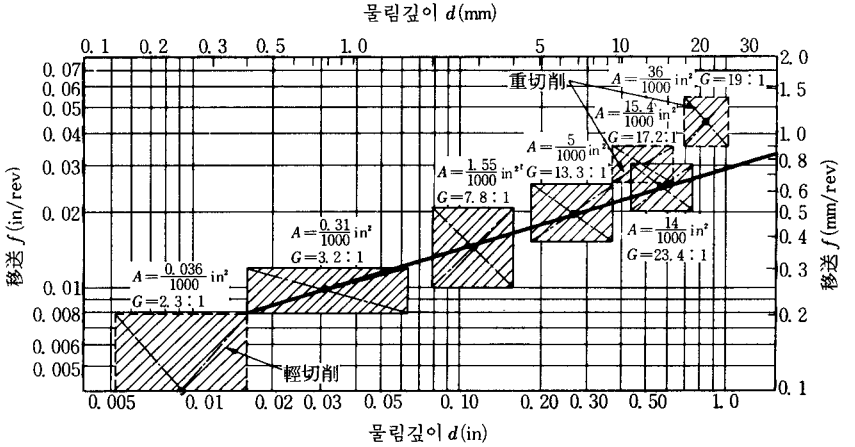


Fig. 94 실용 범위의 물림깊이 및 移送(旋削)

$$\sqrt{\frac{1.55}{1000}}\Big/\sqrt{\frac{0.31}{1000}}=2.24$$

$\therefore A=\frac{1.55}{1000}$ in²인 chip의 G는 $A=\frac{0.31}{1000}$ in²인 chip의 G에 2.24를 곱하면 된다.

즉, $G=3.2\times2.24=7.2$로 되어 Fig. 94에 표시된 $G=(7.8:1)$에 대한 어림값이라고 할 수 있다. 어림계산에 의하면 移送은 右側에서는 증가하고 左側에서는 감소한다는 것을 알 수 있다. 著者는 실용 범위에서의 細長比의 사용 빈도를 조사하여 Table 34를 발표하였다.

Table 34

細 長 比 $G(d/f)$	실용빈도(%)
$(2:1)>G$	5
$(2:1)\leq G\leq(4:1)$	25
$(4:1)<G\leq(10:1)$	48
$(10:1)<G\leq(20:1)$	20
$(20:1)<G$	2

이 Table에는 Kennametal Corp. (Reports of Kennametal Performance)에서 발표한 data도 포함되어 있다.

細長比 $G=(5:1)$인 경우가 가장 많았으며(전체의 12.5%) 旋削에서 移送이 물림깊이보다 큰 경우의 추천값은 한 건도 없었다. 이와 같이 移送이 물림깊이보다 큰 경우가 이론적으로는 가능하나 著者는 합리적이 아닌 것으로 생각하여 여기에서는 고려하지 않기로 한다. 모서리角이 큰 正面 milling에서는 細長比가 旋削에서 보다 큰 경우가 가끔 발생한다. 著者는 이와 같은 영향에 대한 실험을 1937년경에 이미 수행하였으며, 차후에 그 결과에 대하여 논의하기로 한다.

細長比 (5:1)이 실용상에서 빈도가 크기 때문에 標準값으로 택하고자 한다. 앞으로 切削力 및 切削速度를 가능하면 이 細長比와 관련시키려 한다.

Fig. 95는 細長比 G, chip斷面積 A, 물림깊이 d, 移送 f를 상호 관련시킨 것으로서 現場

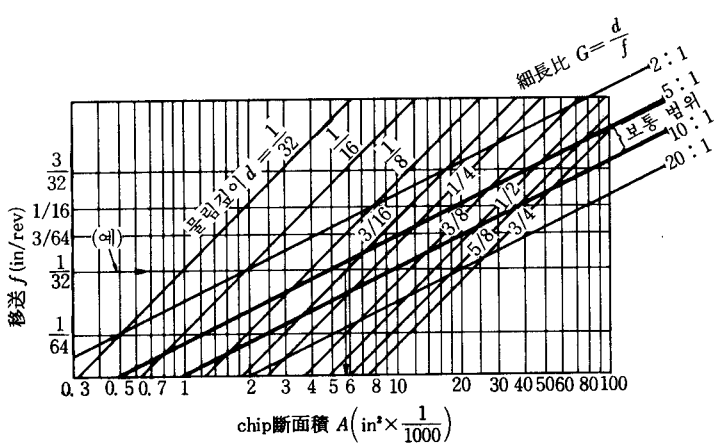


Fig. 95 chip斷面積과 細長比의 결정

에서 이용할 수 있을 것이다. 移送 f와 물림깊이 d의 일반적인 組合의 범위는 Fig. 95에서 굵은 線으로 표시하였다.

9-2 확장된 切削速度法則의 導出

9-2-1 獨立量으로서 移送 및 물림깊이

확장된 切削速度法則이란 chip斷面積 외에 細長比까지 포함한 식으로 정의하고자 한다〔식 (116)과 비교 바람〕. 우선 移送과 물림깊이를 독립된 量으로 포함하는 切削速度基本法則을 확장하는 연구를 하고, 그 다음에 chip斷面積과 細長比를 포함하도록 切削速度法則을 확장하려 한다.

meter系의 다음 一般式이 切削速度가 移送과 물림깊이의 指數函數인 경우에 적용된다.

$$v_m=\frac{C_{vm}{}^*}{s^p\cdot t^q} \tag{121}$$

단, p와 q : 移送 s (meter系) 및 물림깊이 t (meter系)에 대한 각각의 指數, C_{vm}은 $s=1.0$ (mm/rev), $t=1.0$ (mm)에 대한 切削速度 (m/min) 이다.

切削速度基本法則의 常數 C_v (英式系)는 chip斷面積 $A=0.001\,\text{in}^2$〔식 (116)〕에 대한 切削速度로서 對數直線이 切削速度의 軸과 교차하는 점의 속도이다(Fig. 87b).

확장된 切削速度法則의 常數도 $A=0.001\,\text{in}^2$, $G=(5:1)$일 때의 切削速度라 할 수 있다. 다시 말하면 확장된 切削速度法則의 常數 C_v는 細長比 $G=5:1$, chip斷面積 $A=0.001\,\text{in}^2$, 工具壽命 60 min에 대한 對數直線의 切片값이다. chip斷面積 A와 細長比 G에서 移送 f와 물림깊이 d는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$A=d\cdot f \text{에서 } f=\frac{A}{d},\quad d=\frac{A}{f} \tag{122}$$

$$G=\frac{d}{f} \text{에서 } f=\frac{d}{G},\quad d=f\cdot G \tag{123}$$

식 (122)와 식 (123)에서

$$\frac{A}{d}=\frac{d}{G},\quad \frac{A}{f}=f\cdot G$$

$$\therefore\ d=(A\cdot G)^{\frac{1}{2}} \tag{124}$$

$$f=\left(\frac{A}{G}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{125}$$

---

* 移送과 물림깊이가 獨立된 量으로 나타나는 切削速度常數

이다.

식 (124)와 식 (125)에서 參考 data $A=0.001\,\text{in}^2$, $G=(5:1)$일 경우의 물림깊이 및 移送의 크기를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_0=(A\cdot G)^{\frac{1}{2}}=(0.001\times 5)^{\frac{1}{2}}=0.0707\,\text{in} \tag{126}$$

$$f_0=\left(\frac{A}{G}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{0.001}{5}\right)^{\frac{1}{2}}=0.0141\,\text{in} \tag{127}$$

$d_0\cdot f_0=0.001\,\text{in}^2$이고 $\frac{d_0}{f_0}=(5:1)$로서 원래의 條件값이 된다. meter系의 상수 C_{vm}(m/min)을 英式系 상수 C_v(ft/min)로 환산하려면 C_{vm}에 3.28을 곱해야 하고, 英式系의 移送 f(in/rev)에 25.4를 곱하면 meter系의 移送 s(mm/rev)로 변환된다. $f_0=0.0141\,\text{in}$, $d_0=0.0707\,\text{in}$에 대한 식 (121)의 s^p 및 t^q의 값은 각각 $s^p=(25.4\times 0.0141)^p$, $t^q=(25.4\times 0.0707)^q$이다.

이상의 관계를 식 (121)에 대입하여 정리하면 $A=0.001\,\text{in}^2$, $G=(5:1)$일 때의 두 系에 대한 切削速度常數의 관계를 나타내는 식이 얻어진다.

$$v=C_v=\frac{3.28\,C_{vm}}{(25.4\times 0.0141)^p\cdot(25.4\times 0.0707)^q}=\frac{3.28\,C_{vm}}{25.4^{p+q}\times 0.0141^p\times 0.0707^q}$$

$$=\frac{3.28\,C_{vm}}{25.4^{p+q}\cdot f_0^p\cdot d_0^q} \tag{128}$$

각각 주어진 移送과 물림깊이에 대한 확장된 切削速度法則은 工具壽命比$(T_L/60)^y$를 도입하면 다음과 같다.

meter系의 速度式 $v_m=\frac{C_{vm}}{s^p\cdot t^q}$을 英式系로 나타내면 $v=\frac{C_{v_1}}{f^p\cdot d^q}$으로 되며 $f=0.0141\,\text{in}=f_0$, $d=0.0707\,\text{in}=d_0$, $T_L=60\,\text{min}$일 때

$$v_{60}=C_v=\frac{C_{v_1}}{0.0141^p\times 0.0707^q}$$

$$\therefore\ C_{v_1}=C_v\times 0.0141^p\times 0.0707^q$$

$$\therefore\ v_{60}=\frac{C_v\times 0.0141^p\times 0.0707^q}{f^p\cdot d^q}$$

이다.

또 $v=\frac{C_T}{(T_L/60)^y}$에서 $T_L=60\,\text{min}$일 때

$$v_{60}=C_T$$

$$\therefore\ C_{v_1}=C_T=v_{60}$$

$$\therefore\ v=\frac{C_T}{(T_L/60)^y}=\frac{v_{60}}{(T_L/60)^y}=\frac{C_v\times 0.0141^p\times 0.0707^q}{(T_L/60)^y\cdot f^p\cdot d^q}$$

$$=\frac{C_v\cdot f_0^p\cdot d_0^q}{(T_L/60)^y\cdot f^p\cdot d^q} \tag{129}$$

식 (129)에서 英式系 速度常數 C_v 대신에 식 (128)로 표시된 meter系 常數를 대입하면

$$v=\frac{3.28\,C_{vm}}{25.4^{p+q}\cdot f^p\cdot d^q\cdot(T_L/60)^y} \tag{130}$$

이다.

9-2-2 chip斷面積과 細長比로 표시된 移送 및 물림깊이

앞에서 導出된 切削速度의 擴張法則에 因子인 移送과 물림깊이를 chip斷面積과 細長比로 간단히 대체할 수 있다. 이와 같이 chip斷面積과 細長比를 이용하여 許容切削速度를 설명하는 것이 편리할 때가 많다.

이것은 chip斷面積이 chip形狀(細長比)보다도 許容切削速度 및 切削力에 미치는 영향이 훨씬 크기 때문이다. 이러한 사실을 실증하기 위하여 여러 사람이 연구한 수많은 data를 소개하기로 한다.

$$A_0=0.001\,\text{in}^2,\quad G_0=5,\quad z=\frac{1}{2}(p+q),\quad g=\frac{1}{2}(p-q) \tag{131a~131d}$$

라 하면 식 (124)와 식 (125)에서 다음과 같은 一般關係式을 얻을 수가 있다.

$$f_0^p\cdot d_0^q=\left(\frac{A_0}{G_0}\right)^{\frac{p}{2}}\cdot(A_0\cdot G_0)^{\frac{q}{2}}=A_0^{\frac{p+q}{2}}\cdot G_0^{\frac{q-p}{2}}=A_0^{\frac{p+q}{2}}\cdot G_0^{-\frac{p-q}{2}}$$

$$=A_0^z\cdot\frac{1}{G_0^g}=\left(\frac{1}{1000}\right)^z\cdot\frac{1}{5^g}=\frac{1}{1000^z\cdot5^g}$$

따라서

$$f^p\cdot d^q=\frac{A^z}{G^g}=\frac{0.001^z(1000\,A)^z}{5^g\cdot(G/5)^g} \tag{132}$$

이다.

이상의 관계를 식 (129)에 대입하면

$$v=\frac{C_v\cdot f_0^p\cdot d_0^q}{(T_L/60)^y\cdot f^p\cdot d^q}=\frac{C_v\cdot\left(\frac{G}{5}\right)^{\frac{p-q}{2}}}{(1000\,A)^{\frac{p+q}{2}}\cdot(T_L/60)^y}=\frac{C_v\cdot\left(\frac{G}{5}\right)^g}{(1000\,A)^z\cdot(T_L/60)^y} \tag{133}$$

(切削速度의 擴張式)

식 (133)으로부터 아주 중요한 결론을 얻을 수 있다. chip斷面積 A가 細長比 G보다 許容切削速度에 미치는 영향이 훨씬 크며, 이것은 A의 指數가 $\frac{p+q}{2}$인데 대하여 G의 指數는 $\frac{p-q}{2}$이기 때문이다.

식 (133)에 대응하는 meter系의 切削速度擴張式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_m=\frac{C_{vm}\cdot(G/5)^g}{F^z\cdot(T_L/60)^y} \tag{134}$$

식 (134)는 2개의 無次元量($G/5$, $T_L/60$)을 제외하면 식 (114a)와 같으며, 이 無次元量은 $G=5$이고 $T_L=60$ min일 경우에는 meter系에서 英式系로 變換할 때 관계없는 量이다. 60 min 또는 120 min의 工具壽命에 대한 切削速度를 v_{60}, v_{120} 등과 같이 더 이상 표기하지 않기로 한다. 여기에서 因子 $(T_L/60)^y$는 工具壽命의 변화를 의미한다.

切削速度의 擴張法則에서 물림깊이가 영향을 주지 않는 data도 찾아볼 수 있다. 즉 $q=0$인 경우로서 식 (131c)와 식 (131d)에서 $z=g$의 관계가 있다.

이러한 방법에 의하여 切削速度에 영향을 미치는 여러 因子를 포함하는 하나의 식이 導出되었다. 이와 같은 利點은 출처가 상이한 결과들을 서로 비교하는 데에도 아주 중요한 역할을 한다는 것이다. 실험에 의하여 細長比 G의 指數가 $g=0.085\sim0.20$의 범위에서 변한다는 것을 알았으며, 이 문제는 차후에 상세히 논의하기로 한다. 평균값 $g=0.14$를 취하여 細長比의 변화가 許容切削速度에 미치는 영향을 조사하여 보기로 한다. 예로써 chip形狀 G를 (5 : 1)에서 (20 : 1)로 증가시키면 $\left(\frac{G}{5}\right)^g=\left(\frac{20}{5}\right)^{0.14}=1.215$로 되어 許容切削速度는 21.5%만큼 증가한다. 반면에 G의 逆比(4 : 1)로 chip斷面積을 감소시키고 合金鋼에 대한 斷面指數 $z=0.57$이라 하면 $4^{0.57}=2.2$가 되어 許容切削速度는 120% 만큼 증가한다. $g=0.14$일 때 여러 細長比에 대한 許容切削速度의 변화를 乘數로써 Table 35에 나타내었다.

Table 35

細 長 比 G	許容切削速度의 乘數 $(G/5)^{0.14}$
2	0.88
5	1.00
10	1.102
20	1.215

9-3 切削速度方程式과 變換因子의 요약(*)

meter系	英 式 系	meter系-英式系의 變換因子	備 考
$v_m=\frac{C_{vm}}{F^z}$ 식 (114a)	$v=\frac{C_v}{(1000A)^z(T_L/60)^y}$ 식 (116)	$C_v=3.28\cdot(1.55)^z\cdot C_{vm}$ 식 (115)	切削速度基本法則
$v_m=\frac{C_{vm}^*}{s^p\cdot t^q}$ 식 (121)	$v=\frac{C_v\cdot0.0141^p\cdot0.0707^q}{f^p\cdot d^q(T_L/60)^y}$ 식 (129)	$C_v=\frac{3.28C_{vm}}{25.4^{p+q}\cdot0.0141^p\cdot0.0707^q}$ 식 (128)	移送 및 물림깊이의 函數로서 확장된 切削速度法則
$v_m=\frac{C_{vm}\cdot(G/5)^g}{F^z(T_L/60)^y}$ 식 (134)	$v=\frac{C_v\cdot(G/5)^g}{(1000A)^z(T_L/60)^y}$ 식 (133)	$C_v=3.28\cdot(1.55)^z\cdot C_{vm}$ 식 (115)	chip斷面積과 細長比의 函數로서 확장된 切削速度法則

(*) : meter系의 切削速度常數 C_{vm}과 英式系의 常數 C_v가 切削速度基本法則과 확장된 法則에서 반드시 동일하지 않아도 된다.

9-4 細長比와 主切刃角

主切刃角(Fig. 65에서 角 c, 正面 milling에서 모서리角 c)의 변화가 許容切削速度에 미치는 영향은 細長比 G를 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 96으로부터 chip幅 b와 물림깊이 d에 대하여 다음 관계를 쓸 수 있다.

$$b=\frac{d}{\cos c} \tag{135}$$

移送 f와 chip 높이 h 사이에는

$$h=f\cdot\cos c \tag{136}$$

식 (135)를 식 (136)으로 나누면 細長比 G_x를 主切刃角의 函數로 나타낼 수 있다.

$$G_x=\frac{b}{h}=\frac{d}{f\cdot\cos^2 c}=\frac{G}{\cos^2 c} \tag{137}$$

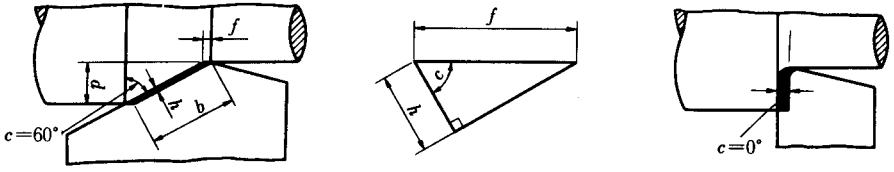


Fig. 96 chip斷面의 幅과 높이

따라서 細長比 G_x는 主切刃角의 餘弦(cosine)값의 自乘에 逆比例하여 변한다고 할 수 있다. 主切刃角이 許容切削速度에 미치는 영향은 chip斷面積 A를 일정하게 할 때 확장된 切削速度法則에서 다음과 같이 설명할 수 있다. 예로써 여기에서도 $g=0.14$라 하면 식 (133)에서 切削速度는

$$v=F[(G/\cos^2 c)^{0.14}]$$

로 되어 $(G/\cos^2 c)^{0.14}$의 함수에 따라 변한다.

主切刃角이 변한다 하여도 G가 일정하므로 主切刃角의 변화에 대한 切削速度의 변화를 Table 36과 같이 계산할 수 있다.

Table 36

主 切 刃 角 c (°)	切削速度의 乘數 $(1/\cos^2 c)^{0.14}$	$c=45°$인 乘數에 대한 比
0	1.0	0.900
15	1.017	0.915
30	1.042	0.935
45	1.110	1.000
60	1.210	1.090

Table 36의 3번째 欄에서 主切刃角 $c=0\sim60°$일 때 許容切削速度는 $c=45°$일 때에 비하여 약 ±9% 만큼 변한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이론적 결과는 실제 실험에서 因數가 0.900이었던 carbide工具에 대한 AWF의 추천값과 잘 일치하고 있다. c가 切削速度에 미치는 영향이 적다는 관점에서 다른 data를 $c=45°$인 경우에 관련시킨다면 Table 36의 3번째 欄의 변화는 무시할 수 있다. c가 60° 이상인 경우는 正面 milling에서 흔히 있으며, 이 때에는 角에 따른 변화를 고려하여야 한다.

9-5 확장된 切削速度法則의 數値 data

International Nickel Co.가 nickel合金鋼을 절삭하여 발표한 data[135]에서 필요한 數値를 구할 수 있다. Fig. 97은 方程式을 유도하기 위한 것으로서 兩對數方眼紙의 垂直軸에 切削速度를 표시하고 위의 水平軸에 물림깊이를 나타내어 移送 $f=0.015\sim0.060$ in/rev에 대하여 평행선이 얻어졌으며, 그 기울기가 바로 물림깊이의 指數인 $q=0.259$이다. 이 평행선들을 右側으로 연장하면 $d=1.0$ in인 垂直軸과 교차한다. 이 切片을 field ①과 同一切削速度인 左側垂直軸에(field ②) 투영한다. field ②의 아래의 水平軸은 $f=0.01\sim1.0$ in/rev의 移送을 나타낸다. 투영된 data는 field ②의 직선상에 있으며 이 직선의 기울기가 移送의 指數인 $p=0.459$이다. Fig. 97에서 移送 f와 물림깊이 d가 독립적으로 표시되었기 때문에 International Nickel Co.의 data에 대한 切削速度法則을 확장하기 위하여는 식 (129)를 적용시켜야 한다. 우선 切削速度常數 C_v를 정하는 것이 필요한데 圖表에 의해서 구할 수도 있고 계산 방법에 의하여 구할 수 있다. 圖表에 의하여 C_v를 구할 경우에는 field ②의 직선상의 $f=0.0141$in/rev에 대한 절삭속도(F로 표시)를 field ①의 $d=1.0$ in(D로 표시)에 투영한다. 이 때 D를 지

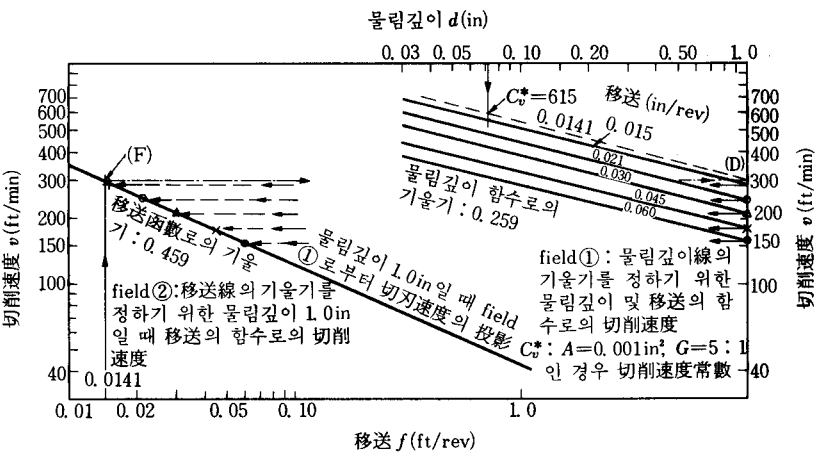


Fig. 97 移送 및 물림깊이의 함수로 切削速度公式의 圖式的 유도

나는 平行線이 식 (129)의 參考移送인 $f=0.0141$ in에 대한 移送線이 된다. 이 線이 切削速度 $v=615$ ft/min에서 $d=0.0707$ in인 垂直軸을 지나며, 정의에 따라 이 때의 속도가 C_v값이다. 따라서 식 (129)에 의하여 切削速度의 擴張式은 다음과 같다.

$$v=\frac{C_v\cdot f_0^p\cdot d_0^q}{f^p\cdot d^q\cdot (T_L/60)^y}=\frac{615\times 0.0141^{0.459}\times 0.0707^{0.259}}{f^{0.459}\cdot d^{0.259}\cdot (60/60)^y}=\frac{615\times 0.071}{f^{0.459}\cdot d^{0.259}} \qquad (138)$$

切削速度常數 C_v는 切削速度 圖表에서 data를 선정하여 식 (129)를 C_v에 대하여 풀면 얻어진다. 예로써 $v=182$ ft/min, $f=0.045$ in/rev, $d=1$ in일 때 C_v를 계산하여 보면 圖表에서 구한 것과 같은 값을 얻을 수 있다. 즉

$$v=\frac{C_v\cdot f_0^p\cdot d_0^q}{f^p\cdot d^q\cdot (T_L/60)^y} \text{ 에서}$$

$$C_v=\frac{v\cdot f^p\cdot d^q\cdot (T_L/60)^y}{f_0^p\cdot d_0^q}=\frac{182\times 0.045^{0.459}\times 1^{0.259}}{0.0141^{0.459}\times 0.0707^{0.259}\times (60/60)^y}=615 \text{ ft/min}$$

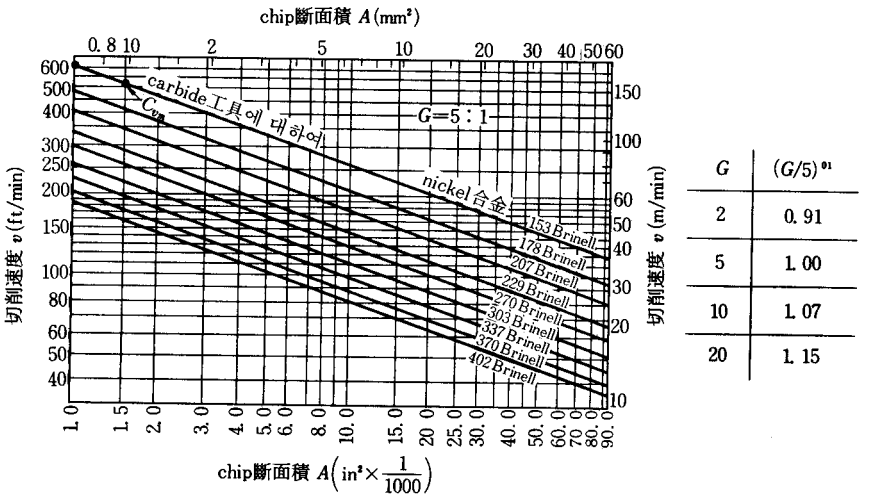
식 (133)을 식 (138)과 일치시켜서 다시 쓰면

$$z=\frac{p+q}{2}=\frac{0.459+0.259}{2}=0.36,\quad g=\frac{p-q}{2}=\frac{0.459-0.259}{2}=0.1$$

이 되므로

$$v=\frac{C_v\cdot (G/5)^g}{(1000A)^z\cdot (T_L/60)^y}=\frac{615\cdot (G/5)^{0.1}}{(1000A)^{0.36}\cdot (60/60)^y}=\frac{615\cdot (G/5)^{0.1}}{(1000A)^{0.36}} \qquad (139)$$

같은 방법으로 International Nickel Co.의 다른 data에 대하여도 평가할 수 있다. 切削速度가 Brinell硬度에 따라 9개의 group으로 되어 있는데, 이것은 인용된 문헌에 의하면 切削性이 硬度에 의존하기 때문이며, 이탈된 부분이 생기는 것은 微視組織 때문이다. Fig. 98



G	$(G/5)^{0.1}$
2	0.91
5	1.00
10	1.07
20	1.15

Fig. 98 nickel合金의 A-v관계 (from the data of International Nickel Co.) ($G=5:1$ 이외의 細長比에 대하여는 Fig. 98의 切削速度에 右側의 乘數를 곱하라)

은 著者가 이상의 값에 근거하여 그린 것이며 工具壽命은 지정하지 않았다. 어느 값의 Brinell 硬度에서도 chip斷面積이 감소하여 $\frac{1}{10}$이 된다면 식 (139)에서 $\left(\frac{1}{10}\right)^{0.36}$이 되어 切削速度는 130% 만큼 증가한다는 것을 알 수 있다. 반면에 細長比 G가 10배로 된다면 $(10)^{0.1}=1.16$이 되어 速度는 불과 16% 만큼 증가한다.

위에 인용한 data를 평가하여 얻은 carbide工具와 H.S.S.工具에 대한 常數 C_v가 Table 37에 소개되어 있다.

Table 37 nickel合金鋼의 切削에서 切削速度擴張式에 대한 常數 C_v와 指數

Brinell硬度	carbide工具의 C_v	H.S.S.工具의 C_v	指數		
			chip斷面積指數 z	細長比指數 g	工具壽命指數 y
153	615	182	0.36	0.10	?
178	490	147	0.36	0.10	?
207	404	121	0.36	0.10	?
229	338	101	0.36	0.10	?
270	302	90.5	0.36	0.10	?
303	258	77	0.36	0.10	?
337	226	67.8	0.36	0.10	?
370	202	60.6	0.36	0.10	?
402	187	56	0.36	0.10	?

American Society of Mechanical Engineers[136]와 Carboloy Co.[137]는 切削速度에 대한 다음 식을 발표하였다.

$$v=\frac{\cdot 29000}{d^{0.25}\cdot f^{0.42}\cdot (\mathrm{BHN})^{1.25}}$$

윗식의 f와 d 대신 식 (132)를 대입하면, 윗식은 切削速度法則의 擴張式으로 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$v=\frac{29000\cdot 5^{g}\cdot (G/5)^{g}}{0.001^{z}\cdot (1000A)^{z}\cdot (\mathrm{BHN})^{1.25}}$$

식 (131c)와 식 (131d)로부터 指數 z와 g는

$$z=\frac{1}{2}(p+q)=\frac{1}{2}(0.42+0.25)=0.335$$

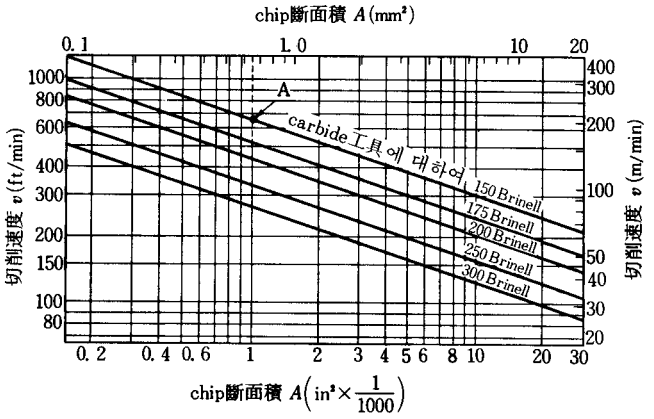
$$g=\frac{1}{2}(p-q)=\frac{1}{2}(0.42-0.25)=0.085$$

$$\therefore\ v=\frac{29\,000\times 5^{0.085}\cdot (G/5)^{0.085}}{0.001^{0.335}\cdot (1000A)^{0.335}\cdot (\mathrm{BHN})^{1.25}}$$

$$=\frac{336\,365\cdot (G/5)^{0.085}}{(1000A)^{0.335}\cdot (\mathrm{BHN})^{1.25}} \qquad (140)$$

常數 336 365는 다른 경우에서보다 대단히 높은 것처럼 보이나 이 경우에는 Brinell硬度를

포함하고 있다는 사실을 간과해서는 안 된다. Brinell 硬度가 150이라 하면 常數는 감소하여 $336\,365/150^{1.25}=640$ ft/min으로 된다. Fig. 99의 點 A는 chip斷面積 $\frac{1}{1000}$ in²에 대한 切削速度를 나타내고, 본그림에서는 細長比 $G=(5:1)$이지만 다른 細長比에 대한 切削速度는 Fig. 99의 切削速度에 Fig. 99의 右側에 있는 乘數를 곱하면 계산된다. 식 (140)은 細長比가 許容切削速度에 미치는 영향은 chip의 크기, 즉 chip斷面積이 미치는 영향보다 적다는 것을 다시 한 번 증명하고 있다. 細長比를 (2 : 1)에서 (20 : 1)로 10배 증가시키면 식 (140)에서 $10^{0.095}=1.216$으로서 切削速度는 21.6% 만큼 증가하고, chip斷面積을 0.010 in²에서 0.001 in²로 감소시키면 $\left(\frac{1}{10}\right)^{0.335}=\frac{1}{2.15}$로 되어 許容切削速度는 115% 만큼이나 크게 증가한다. 따라서 이 경우에서는 chip斷面積이 chip形狀(細長比)의 5배 이상의 영향을 切削速度에 미친다는 것을 알 수 있다.



G	$(G/5)^{0.095}$
2 : 1	0.93
5 : 1	1.00
10 : 1	1.06
20 : 1	1.13

Fig. 99 식 (140)에 대한 A-v관계(from data of Carboloy Co. and A.S.M.E.)

Carboloy Co.의 catalogue에 발표된 切削速度를 정리하여 Fig. 100a 및 Fig. 100b와 같이 圖表로 나타낼 수 있으며, 切削速度는 Fig. 94에 표시된 G의 평균값을 이용한 chip斷面積의 函數로서 나타내었다. 식 (140)과의 명확한 관계는 설명할 수 없으나 細長比의 微小한 영향을 무시한 것 같다. Fig. 100a 및 Fig. 100b에서는 chip斷面積의 指數 z가 각각 0.178과 0.10이다.

T.G. Digges[138]는 1930년 標準局(Bureau of Standards)에서 金屬切削實驗을 행하였는데 nickel 鋼(Ni $3\frac{1}{2}$%)을 carbide工具로 切削하였으며 工具壽命基準으로서 加工面의 광택 현상을 택하였다. 그런데 이 기준은 전에는 H.S.S.工具에 대해서만 이용되었다. 90 min의 工具壽命과 工具壽命指數 $y=0.2$에 대하여 다음 식이 유도되었다.

$$v=\frac{12}{f^{0.58}\cdot d^{0.2}} \tag{141}$$

切削速度의 擴張式으로 변환하기 위해 식 (131c)와 식 (131d)에서

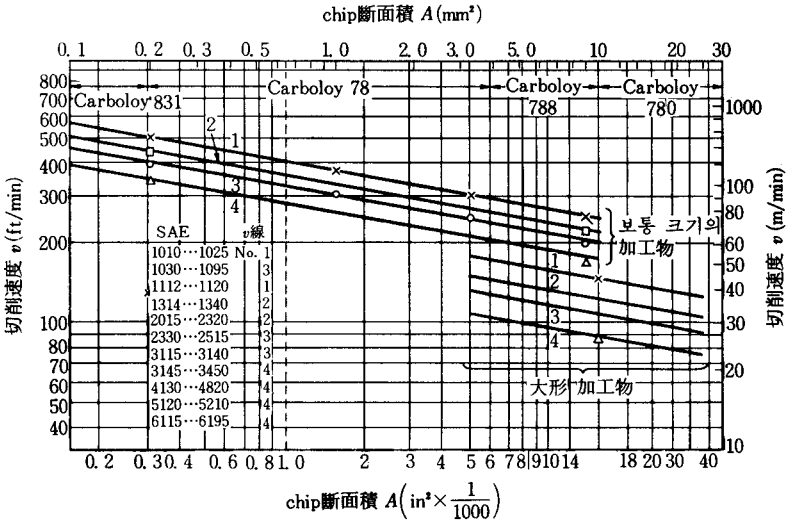


Fig. 100 (a) 鋼의 切削에서 A-v관계의 平均값(from data of Carboloy Co.)

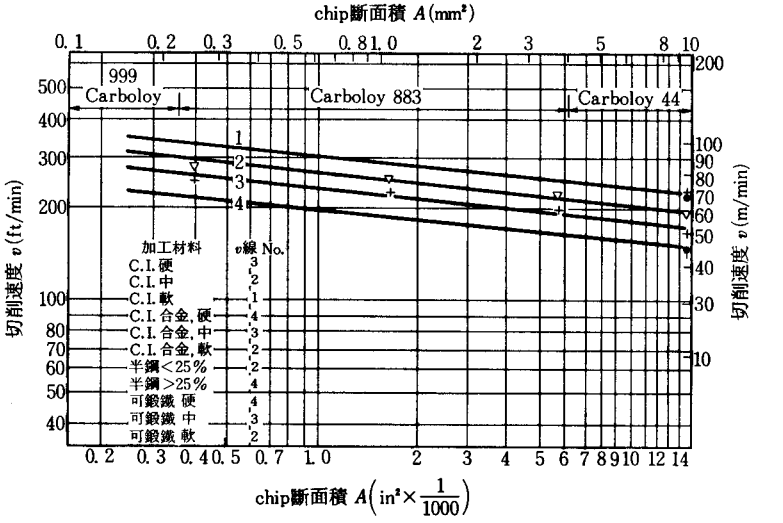


Fig. 100 (b) 鑄鐵의 切削에서 A-v관계의 平均값(from data of Carboloy Co.)

$$z=\frac{1}{2}(p+q)=\frac{1}{2}(0.58+0.2)=0.39$$

$$g=\frac{1}{2}(p-q)=\frac{1}{2}(0.58-0.2)=0.19$$

를 구한다.

90 min의 工具壽命을 60 min의 것으로 환산하기 위하여 $(T_L/60)^y=(90/60)^{0.2}=1.084$의 관계값을 식 (132)와 함께 식 (141)에 대입하면 다음과 같다.

$$v=\frac{12\times 1.084}{f^{0.58}\cdot d^{0.2}}=\frac{12\times 5^{g}\times(G/5)^{g}\times 1.084}{0.001^{z}\cdot(1000A)^{z}}=\frac{12\times 5^{0.19}\times(G/5)^{0.19}\times 1.084}{0.001^{0.39}\cdot(1000A)^{0.39}}$$

$$=\frac{241\cdot(G/5)^{0.19}}{(1000A)^{0.39}}\times 1.084$$

∴ 식 (133)의 형태로 나타내면

$$v=\frac{241\cdot(G/5)^{0.19}}{(1000A)^{0.39}\cdot(T_L/60)^{0.2}} \tag{142}$$

이다.

여기에서 유도된 金屬切削法則들의 이점은 Digger의 실험을 International Nickel Co.에서 발표한 data로부터 계산된 Table 37과 비교함으로써 분명히 나타난다. chip 斷面積의 指數 0.36은 0.39와 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있고, 細長比의 指數는 각각 0.10과 (0.19≒) 0.20으로서 서로 다르게 나타난다. chip斷面積의 영향이 細長比에 비하여 현저하게 크다는 사실은 앞의 두 가지 고찰에서 이미 확실히 들어났다. Digger의 實驗材料는 대략 Brinell 硬度 210이었고, 따라서 그의 常數는 International Nickel Co.의 것의 약 반에 불과하기 때문에 다른 조건이 같다면 切削速度는 역시 반으로 된다.

AWF-120에서의 切削速度는 Fig. 101에서 보는 바와 같은 arc형 chip의 切削 전 상당 chip 두께의 函數로 주어지며, 이 개념은 Leyensetter[139]가 도입한 것이다.

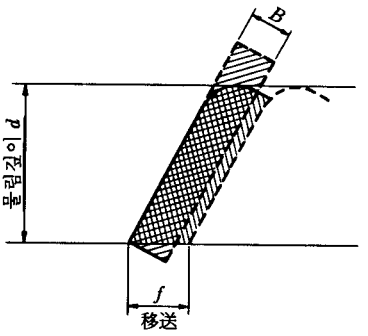


Fig. 101 chip두께의 계산(矩形 chip斷面積=arc形 chip斷面積)

Table 38은 主切刃角 $c=45°$, 工具先端半徑 $r=0.120$ in의 조건에서 각 data를 고찰한 결과이다.

이들 값을 兩對數方眼紙에 표시하면 직선상에 있게 된다. Table 38의 B에 대한 식에서 常數를 B_0라 하면 $B=B_0\cdot f^{0.963}$이 된다. 이들 常數 ($B_0=0.29\sim0.597$)를 물림깊이의 函數로 표시하면 $B_0=0.87d^{0.264}$가 된다. 따라서 後者를 前者에 대입하면 主切刃角 $c=45°$, 先端半徑 $r=0.120$ in인 arc 형상 chip에 대한 다음의 상당 chip두께식을 얻는다.

$$B=0.87\cdot d^{0.264}\cdot f^{0.963} \tag{143}$$

Table 38의 B식에 대한 常數는 다음과 같은 次元解析法에 의하여 meter系로부터 구할 수 있다. Table 38의 첫째줄의 식을 meter系로 쓰면 $B=0.35\cdot s^{0.943}$이 되며 移送 s와 B의 단위는 mm로서 길이의 次元(L)을 갖는다. meter系 常數(0.35)를 英式系로 변환하기 위한 乘數를 k라 하고 p를 移送指數라 하면

$$L=k\cdot L^{p}$$

Table 38

물림깊이 d(in)	移送 f(in/rev)	arc형상 chip의 상당 chip두께 B(in)	f의 함수로서 B의 兩對數指數	각각의 물림깊이에서 f의 함수로 표시되는 B의 식(in)
0.040	0.004 0.040	0.00158 0.0138	0.943	$B=0.29\cdot f^{0.943}$
0.080	0.004 0.040	0.00197 0.0177	0.955	$B=0.39\cdot f^{0.955}$
0.120	0.004 0.040	0.0022 0.0197	0.951	$B=0.426\cdot f^{0.951}$
0.200	0.004 0.040	0.0024 0.0236	0.993	$B=0.586\cdot f^{0.993}$
0.400	0.004 0.040	0.00272 0.0256	0.973	$B=0.597\cdot f^{0.973}$
		평균	0.963	

$$\therefore\ k=L^{1-p} \tag{144}$$

이다.

식 (144)는 mm로 표시된 L을 英式相當數(1 mm=0.040 in)로 변환할 필요가 있을 때만 이용된다. 즉

$$k=(0.040)^{1-0.943}=0.833$$

$$\therefore\ B=0.35\times0.833\times f^{0.943}=0.29f^{0.943}$$

그러나 變換이 항상 앞의 예처럼 간단한 것은 아니다. 앞에서 열거한 B_0의 식에서 常數의 變換은 물림깊이와 移送에 의존하며, 이에 대응하는 meter系 식 $B_0=0.37\cdot t^{0.264}$는 移送 $f=1.0$이라는 것을 내포하고 있다. 단, t : 물림깊이(mm)

$$\therefore\ L=k\cdot L^q\cdot L$$

$$\therefore\ k=1/L^q=1/(0.040)^{0.264}=1/0.425$$

乘數 k를 meter系의 B_0식에 대입하면

$$B_0=\frac{0.35}{0.425}\cdot d^{0.264}=0.87\cdot d^{0.264}$$

이다.

여기에서도 식 (143)과 같은 결과가 나왔으며, 이제는 arc형상 chip의 상당 chip두께 B의 函數로 切削速度法則을 유도하여 보기로 한다.

金屬切削 AWF委員會에서는 工具壽命 240 min 및 480 min에 대한 A-v관계 線圖[140]를 발표하였다. Table 39에 있는 식들은 이상의 線圖에서 구한 것이며, 상이한 재료에 대하여도 指數는 거의 같으며 평균 0.275이다.

Table 39

加 工 材 料		arc 형상 chip의 상당 chip 두께의 函數로서 切削速度	
獨 逸 記 號	유사한 美國材料記號	(m/min)	(ft/min)
St. 50. 11	SAE 1030	$v_{240}=\frac{130}{B^{0.275}}$	$v_{240}=\frac{175}{B^{0.275}}$
St. 50. 11	SAE 1030	$v_{480}=\frac{117}{B^{0.275}}$	$v_{480}=\frac{158}{B^{0.275}}$
St. 60. 11	SAE 1045	$v_{240}=\frac{110}{B^{0.275}}$	$v_{240}=\frac{149}{B^{0.275}}$
St. 70. 11	SAE 1060	$v_{240}=\frac{87}{B^{0.275}}$	$v_{240}=\frac{118}{B^{0.275}}$
St. 85. 11	SAE 1095	$v_{240}=\frac{75}{B^{0.275}}$	$v_{240}=\frac{101}{B^{0.275}}$

Table 39의 meter系 切削速度式은 일괄해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v=\frac{C}{B^{0.275}} \quad (\text{meter系})$$

切削速度는 (m/min)로 측정되고 B는 (mm)로 측정되므로 또 다른 형태의 次元變換을 맞게 된다. 英式系에서는 切削速度는 (ft/min), B는 (in)로 측정된다. 따라서 길이次元 L은 하나의 單位로 통일할 수 없다. 時間次元을 T라 하면

$$v=L_1/T=\frac{C}{L_2^{0.275}} \tag{145}$$

常數 C에 대한 乘數 k를 구하면

$$k=3.28\times(0.04)^{0.275}=1.35$$

$$\therefore\ v=\frac{1.35\,C}{B^{0.275}} \quad (\text{英式系},\ C:\text{meter系의 data})$$

240 min 및 480 min의 각각의 工具壽命에 대한 SAE 1030의 常數를 비교하여 보면, $\frac{175}{158}=1.11$로 되어 工具壽命을 480 min에서 240 min로 감소시킬 때 切削速度는 11% 만큼 증가한다는 결론이다. 식 (97)을 이용하면 이 때의 工具壽命指數 y도 계산할 수 있다.

$$y=\frac{\log(v_2/v_1)}{\log(T_{L_1}/T_{L_2})}=\frac{\log(175/158)}{\log(480/240)}=0.15$$

切削速度와 arc 형상 chip의 상당 chip 두께 사이의 관계는 Table 39의 식에 식 (143)을 대입하고 常數를 C_x라 하면

$$v_x=\frac{C_x}{B^{0.275}}=\frac{C_x}{(0.87\cdot d^{0.264}\cdot f^{0.963})^{0.275}}=\frac{C_x}{0.96\cdot d^{0.073}\cdot f^{0.2}} \tag{146}$$

이다. 단, x는 각 常數에 해당하는 工具壽命을 나타낸다.

식 (146)을 확장된 切削速度法則으로 변환하기 위하여 식 (146)의 d 및 f에 식 (124)와 식

(125)를 대입하면

$$v_x=\frac{C_x}{0.96\,d^{0.073}\cdot f^{0.2}}=\frac{C_x}{0.96\cdot[(A\cdot G)^{\frac{1}{2}}]^{0.073}\cdot[(A/G)^{\frac{1}{2}}]^{0.2}}$$

$$=\frac{C_x}{0.96\,A^{0.0365+0.1}\cdot G^{0.0365-0.1}}=\frac{C_x}{0.96\cdot A^{0.1365}\cdot G^{-0.0635}}$$

이다.

英式單位의 d와 f를 독립된 量으로 갖는 方程式을 식 (133)과 같은 英式單位로 된 切削速度의 擴張式을 얻기 위하여는 다음의 乘數가 필요하다.

$$M=\frac{C_x\cdot 5^g\cdot 1000^z}{(T_L/T_x)^y} \tag{147}$$

단. T_L : 요구되는 工具壽命, T_x : C_x가 적용되는 工具壽命이다.

이 分母를 도입함으로써 C_x가 관계하는 工具壽命에 관계없이(60 min의 工具壽命에 적용되는) 同一常數 C_v를 구하여 본다. 이 관계는 Table 40의 첫째줄에서 알 수 있으며, 指數 g =0.096의 지배를 받는 細長比가 z=0.169의 영향을 받는 chip斷面積보다 切削速度에 미치는 영향이 훨씬 적다는 것을 알 수 있다.

Table 40 切削速度擴張式에 대한 常數 C_v 및 指數

(arc形狀 chip의 相當 chip 두께와 carbide工具에 근거하여 AWF參考 data No. 120에서 계산됨)

加工材料	Table 39의 C_x	工具壽命 T_x	60 min의 工具壽命에 대한 C_v	指數		
				chip斷面積의 指數 z	細長比의 指數 g	工具壽命指數 y
SAE 1030	175	240	865	0.169	0.096	0.15
SAE 1030	158	480	865	0.169	0.096	0.15
SAE 1045	149	240	735	0.169	0.096	0.15
SAE 1060	118	240	585	0.169	0.096	0.15
SAE 1095	101	240	500	0.169	0.096	0.15

Fig. 102는 切削速度와 arc형상 chip(AWF 120)의 相當두께 사이의 관계를 나타내는 앞의 식에서 導出된 chip斷面積의 函數인데 SAE 1060(St. 70.11)의 切削速度를 나타내며, 工具壽命 T_L=480 min~60 min에 대하여 細長比는 G=(20 : 1)~(2 : 1)로 하였다. 예로써 G=5 : 1, T_L=60 min에 대한 常數 C_v=585는 작은 4角形으로 표시되어 있고 C_{vm}=164는 圓形點으로 표시되어 있다.

Fig. 103은 數種材料의 AWF-120에 근거한 chip斷面積과 G=(5 : 1), T_L=60 min인 標準條件의 切削速度 사이의 관계를 나타낸다. 이상에서 설명한 방법으로 Leyensetter[141]의 실험 data를 著者가 평가하여 얻은 식(英式系)을 소개하면 다음과 같다.

St. C. 60.61을 H. S. S. 工具로 切削할 때 :

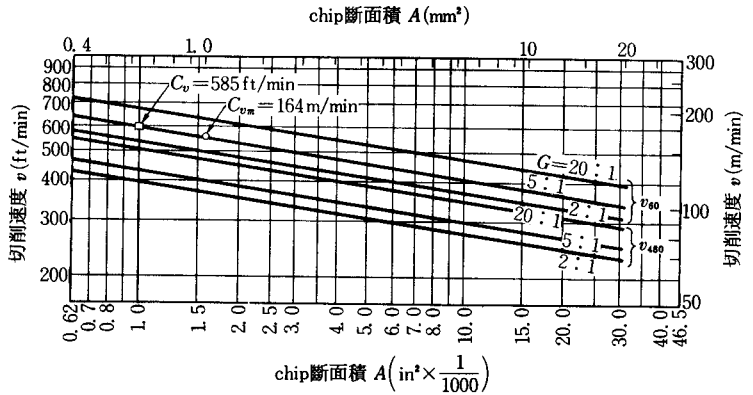


Fig. 102 carbide工具로 SAE 1060鋼을 切削할 때 A-v관계
(from data AWF-120 for arc-shaped chips)

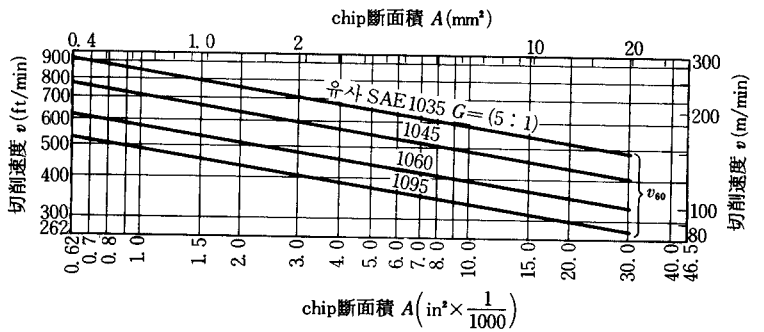


Fig. 103 carbide工具로 數種의 鋼을 切削할 때 A-v관계
(from data AWF-120 for arc-shaped chips)

$$v_{60}=\frac{8.5}{f^{0.53}\cdot d^{0.167}},\quad v=\frac{130\cdot(G/5)^{0.18}}{(1000A)^{0.35}\cdot(T_L/60)^{0.117}} \tag{148a}$$

EN 15(유사 SAE 2115)를 H.S.S.工具로 切削할 때 :

$$v_{60}=\frac{55}{f^{0.3}\cdot d^{0.12}},\quad v=\frac{272\cdot(G/5)^{0.09}}{(1000A)^{0.21}\cdot(T_L/60)^{0.117}} \tag{148b}$$

VCN 25h를 H.S.S.工具로 切削할 때 :

$$v_{60}=\frac{12.6}{f^{0.45}\cdot d^{0.15}},\quad v=\frac{126\cdot(G/5)^{0.15}}{(1000A)^{0.30}\cdot(T_L/60)^{0.117}} \tag{148c}$$

St. 85. 11 (유사 SAE 1095) 을 carbide工具로 切削할 때 :

$$v_{60}=\frac{223}{f^{0.2}\cdot d^{0.063}},\quad v=\frac{715\cdot(G/5)^{0.117}}{(1000A)^{0.141}\cdot(T_L/60)^{0.226}} \tag{148d}$$

Table 41의 指數에 의하면 切削速度에 미치는 영향에서 chip斷面積이 chip 형상(細長比)보다 크다는 사실을 다시 한번 확인하게 된다. 또한 carbide工具의 壽命指數 y가 H.S.S.工具

Table 41

加工材料	工具	C_v	指數		
			chip斷面積의 指數 z	細長比의 指數 g	工具壽命指數 y
St. C. 60. 61	H.S.S.	130	0. 35	0. 18	0. 117
EN 15	H.S.S.	272	0. 21	0. 09	0. 117
VCN 25h	H.S.S.	126	0. 30	0. 15	0. 117
St. 85. 11	carbide	715	0. 141	0. 117	0. 226

의 壽命指數보다 크다는 것을 볼 수 있으며, 이것은 바로 이미 7장 Table 20d에서 언급한 바와 같이 carbide工具가 H.S.S.工具보다 切削速度의 변화에 대하여 잘 견딘다는 것을 의미한다.

Plagens는 H.S.S.工具로 물림깊이가 許容切削速度에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험을 하였는데, 그는 물림깊이의 증가에 따라 切削速度가 감소하는 직선 관계를 얻었다. 만일 물림깊이가 切削速度와 工具壽命에 영향을 주지 않는다면 물림깊이를 표시하는 x軸에 평행한 선이어야 했을 것이다.

AWF 參考 data No. 158에서는 물림깊이를 무시하고 切削速度를 移送에 대해서만 관련시켰다. 그러나(carbide工具를 포함) 물림깊이가 간접적으로 고려되었다고 볼 수 있다. 그 이유는 최적의 切削速度를 얻기 위해서는 移送보다는 물림깊이의 증가를 AWF-158에서 추천하고 있기 때문이다. 이러한 추천은 最適切削性能을 위하여는 물림깊이보다는 移送을 증가시키는 것이 흔히 좋다고 하는 美國의 추천과는 거의 반대되는 현상이다.

Fig. 104는 AWF-158 參考 data에 의한 切削速度와 移送의 관계를 나타낸다.

여기에서는 獨逸標準 S1, S2, S3의 carbide工具만을 사용하였고(附錄의 Table A 11a를 참조), 線圖의 左側에는 炭素鋼 및 鑄鐵, 가운데 線圖에는 合金鋼, 右側에는 工具壽命이 각각 표시되어 있다. 예에서 移送 0. 016 in/rev, 引張強度 120 000 psi～140 000 psi (85kg/mm²～

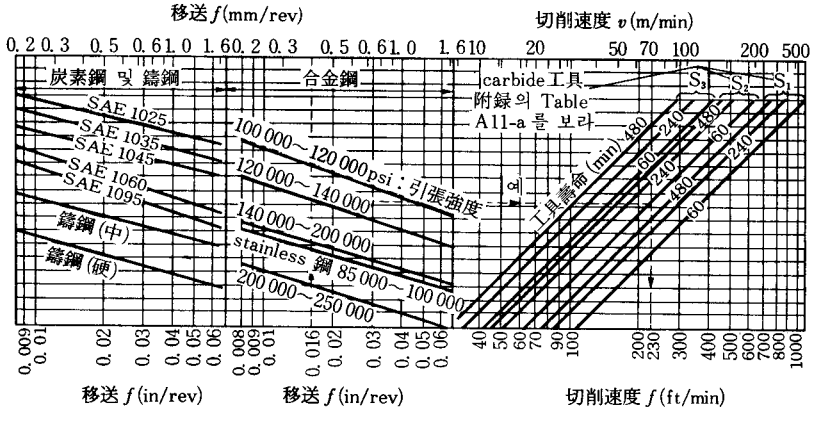


Fig. 104 carbide工具로 數種의 鋼을 切削할 때 f-v관계(from data AWF-158)

100 kg/mm²), carbide工具 S2 및 工具壽命 60 min의 조건에서 切削速度가 230 ft/min라는 것을 알 수 있다.

Fig. 105는 H.S.S.工具로 60 min의 工具壽命에서 數種의 鋼을 절삭할 때 移送과 切削速度의 관계를 나타낸다. Fig. 105의 切削速度에 0.7 및 0.6을 곱하면 工具壽命 240 min 및 480 min에 대한 切削速度를 각각 나타낸다.

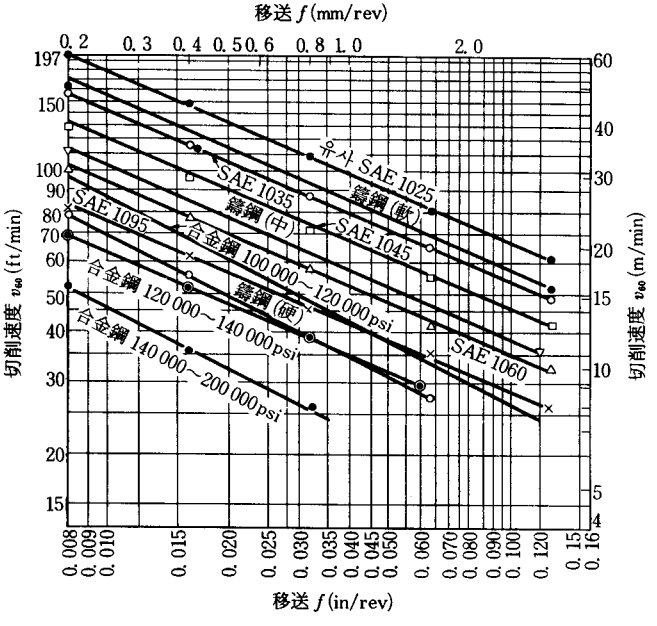


Fig. 105 H.S.S.工具로 鋼을 切削할 때의 f-v관계 (from AWF-158 data)

Fig. 106은 60 min의 工具壽命에서 鑄鐵을 切削할 때에 대한 AWF-158의 評價圖이며, 다른 工具壽命에 대해서는 Fig. 106의 상단에 있는 乘數를 곱하면 되는데 左側은 carbide工具에 대한 것이고 右側은 H.S.S.工具에 대한 것이다. Fig. 107은 非鐵金屬에 대한 f-v관계로서 左側은 carbide工具에 대한 것이고 右側은 H.S.S.工具에 대한 것이다. 工具壽命 指數는 線圖 Fig. 76a를 이용한 乘數 M에 의해 정할 수 있다.

Fig. 108 및 Fig. 109는 AWF-158 參考 data를 切削速度擴張式을 導出하기 위한 數値로 환산하여 그려진 것으로서, 左側은 carbide工具에 대한 것이고 右側은 H.S.S.工具에 대한 것이다. AWF-158에서 얻은 常數 및 指數(C_v, z, g, y)가 Table 42에 나와 있으며, 이것은 다른 切削速度와 비교하는 데에도 이용될 수 있고, 식 (133)에 대입하여 AWF-158 參考 data를 계산 근거로 택할 때 許容切削速度를 chip斷面積과 細長比의 函數로서 계산할 수 있다.

American Society of Mechanical Engineers가 1939년에 出刊하고 1952년에 再出刊한 金屬切削 data[142]에는 네 가지의 工具形狀과 35개의 상이한 鋼에 대한 切削速度가 실려 있으며,

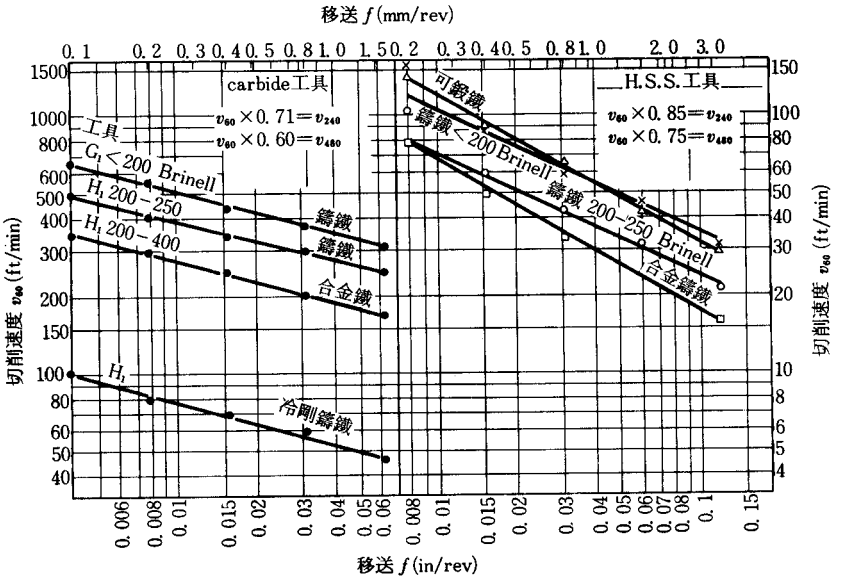


Fig. 106 鑄鐵을 切削할 때의 f-v관계 (from AWF-158 data)

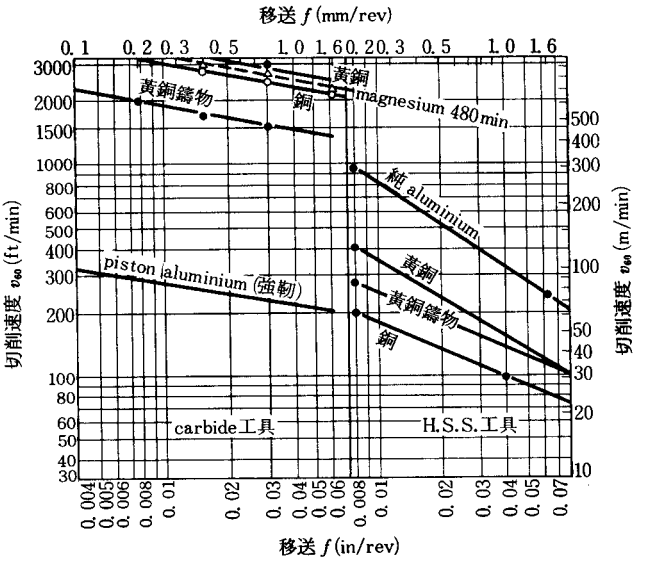


Fig. 107 非鐵金屬을 切削할 때의 f-v 관계 (from AWF-158 data)

그 속도는 H.S.S. 18-4-1工具로 乾切削을 행한 移送과 물림깊이의 函數이다. carbide工具에 의한 鑄鐵과 非鐵金屬의 切削에 대한 data도 거기에 나와 있다.

실제에는 거의 사용되지 않는 數種의 工具形狀을 제외하고는 물림깊이를 감안하여야 한다는 것이 AWF-158과 대조적임이 밝혀졌다.

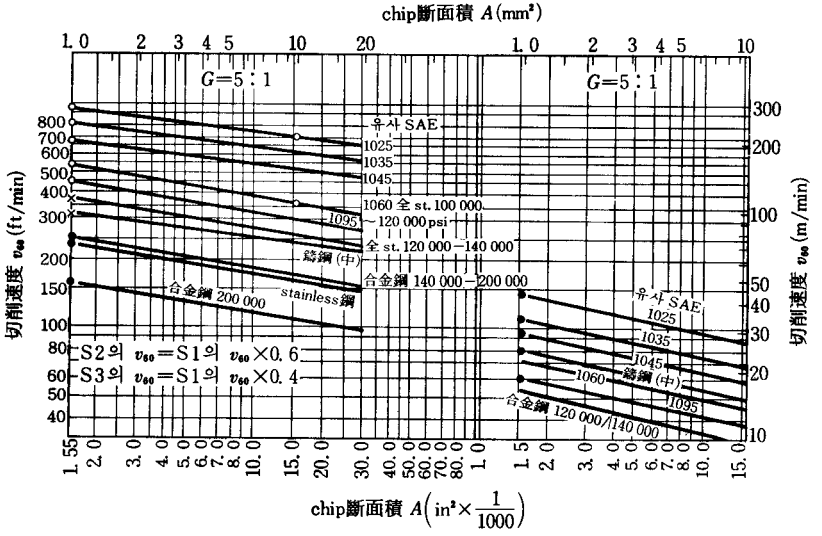


Fig. 108 鋼을 切削할 때의 A-v관계 (from AWF-158 data)

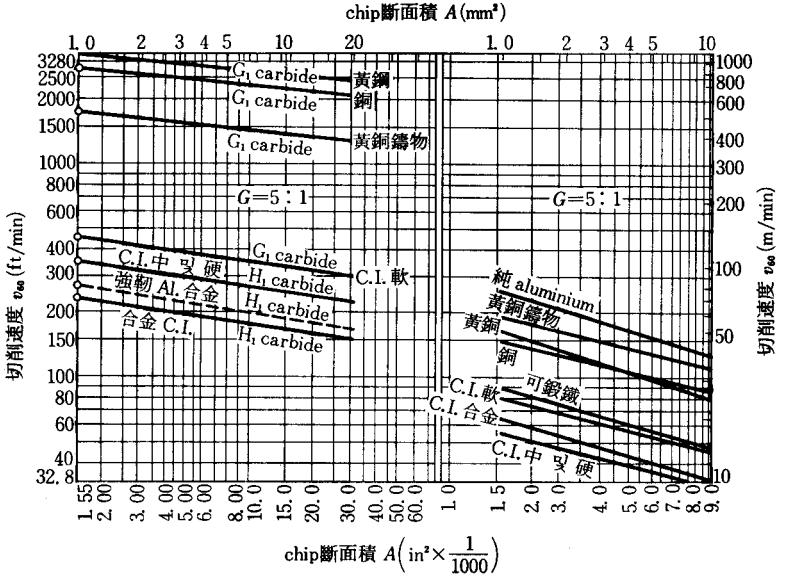


Fig. 109 鑄鐵 및 非鐵을 切削할 때의 A-v관계 (from AWF-158 data)

Fig. 110, Fig. 111 및 Fig. 112는 SAE *X* 1335와 3개의 상이한 工具形狀 (Fig. 113)에 대한 切削速度, 移送 및 물림깊이의 관계를 보인다. 工具의 先端半徑이 아주 작을 경우에만 移送이 작을 때 물림깊이의 영향을 무시할 수 있고, 移送이 증가하면 Fig. 110의 右側에서 보는 바와 같이 물림깊이의 영향이 나타난다. 그러나 이러한 조건은 실제에 있어서 거의 사용되지 않는다. 그 이유는 工具先端의 半徑이 그 정도로 작으면 切削刃이 쉽게 파손되기 때문

Table 42 切削速度擴張式에 이용할 常數 C_v 및 指數(from AWF-158)

加工材料*	carbide工具*						H.S.S.工具			
	常數 C_v			指數			常數	指數		
	carbide S1	carbide S2	carbide S3	z	g	y	C_v	z	g	y
42.11 (SAE 1020)	1000	600	400	0.125	0.125	0.167	157	0.21	0.21	0.25
50.11 (SAE 1030)	850	510	340	0.125	0.125	0.167	120	0.21	0.21	0.25
60.11 (SAE 1045)	720	430	287	0.125	0.125	0.167	106	0.21	0.21	0.25
70.11 (SAE 1060)	565	340	224	0.165	0.165	0.167	81	0.21	0.21	0.25
85.11 (SAE 1090)	480	290	192	0.165	0.165	0.167	66	0.21	0.21	0.25
St. G 50/70 (鑄鋼)	340	205	137	0.125	0.125	0.167	88	0.21	0.21	0.25
合金鋼										
70/85 (>200 BHN)	565	340	224	0.165	0.165	0.167	71.5	0.25	0.25	0.25
85/100 (>245 BHN)	404	242	161	0.165	0.165	0.167	60.5	0.25	0.25	0.25
100/140 (>285 BHN)	268	161	106	0.165	0.165	0.167	—	—	—	—
140/180 (>400 BHN)	170	103	67	0.165	0.165	0.167	—	—	—	—
stainless鋼 60/70 (>170 BHN)	250	150	99	0.165	0.165	0.167	—	—	—	—
C_v比	1.0	0.6	0.4							
鑄鐵	carbide G1	carbide H1								
Ge 1291 (>200 BHN)	465	—	—	0.125	0.125	0.25	91	0.24	0.24	0.25
Ge 1891 (200-250 BHN)	—	364	—	0.125	0.125	0.25	61.6	0.24	0.24	0.25
可鍛鐵	—	364	—	0.125	0.125	0.25	104	0.28	0.28	0.25
合金鑄鐵	—	244	—	0.125	0.125	0.25	63	0.28	0.28	0.25
非鐵金屬										
구리	2900	—	—	0.095	0.095	?	162	0.225	0.225	0.13
黃銅鑄物	1830	—	—	0.095	0.095	0.25	206	0.225	0.225	0.22
黃銅	3420	—	—	0.095	0.095	?	192	0.305	0.305	0.22
純 aluminium	5620	—	—	0.095	0.095	0.41	288	0.29	0.29	0.41
aluminium合金(強靭)	273	—	—	—	0.095	0.41	—	—	—	—

* 상당 美國의 加工材料 및 工具材料에 대해서는 附錄 Table A11 및 A11a를 참조

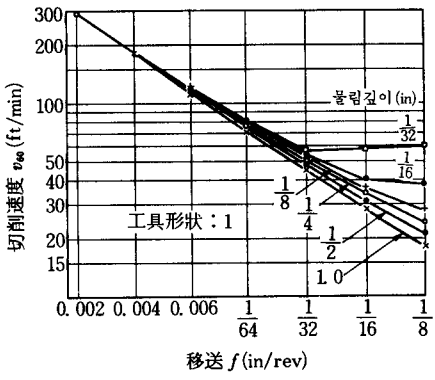


Fig. 110 SAEX 1335의 切削에서 切削速度, 移送 및 물림깊이의 희귀한 관계(from A.S.M.E. data)

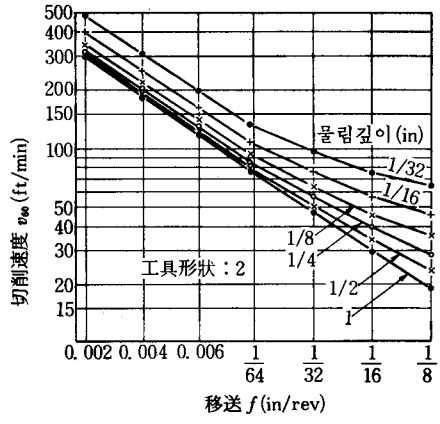


Fig. 111 SAEX 1335의 切削에서 移送 및 물림깊이가 切削速度에 미치는 영향(from A.S.M.E. data)

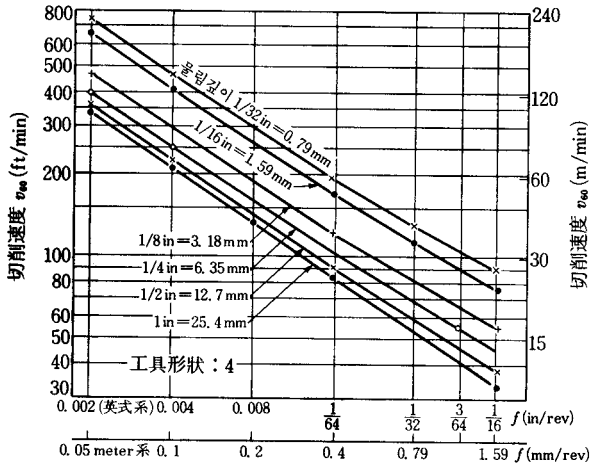


Fig. 112 SAEX 1335의 切削에서 切削速度, 移送 및 물림깊이의 對數直線關係 (from A.S.M.E. data) (Fig. 110과 비교 바람)

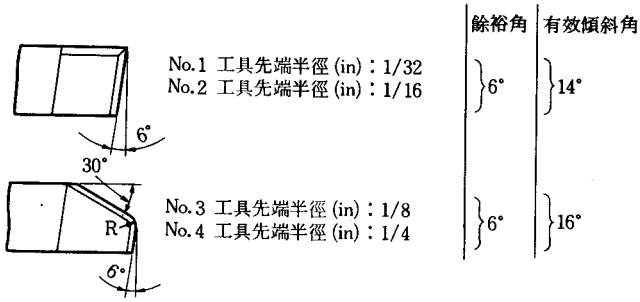


Fig. 113 A.S.M.E. 旋削工具形狀

이다. 보통 사용되는 工具先端半徑에서는 Fig. 111에서 보는 바와 같이 물림깊이의 영향이 보다 확연히 나타난다. 즉, 여기에서는 물림깊이를 나타내는 線이 작은 移送에서도 서로 분리되어 나타난다. Fig. 112의 兩對數方眼紙에서는 물림깊이를 나타내는 線이 한층 더 분리되고 서로 평행하여 앞에서 설명한 내용과도 일치하고 있다.

Fig. 110에서 線이 서로 포개어져서 나타나는 희귀한 현상은 工具의 幾何學 때문인 것으로 著者는 생각한다. 工具先端半徑이 작을 때에는 切削刃의 위치에 따른 工具의 有效傾斜角이 거의 일정하게 되나 曲線切刃에는 5장 식 (84)에서 얻은 결론에서와 같이 切削刃의 각 위치에 따라 有效傾斜角이 변하게 된다.

Fig. 65와 식 (84)에서 보는 바와 같이 主切刃角 c가 변하면 有效傾斜角이 변하는데, 이것은 加工物의 中心線에 수직인 방향과 工具刃이 이루는 角 c가 曲線刃의 위치에 따라 달라지기 때문이다. 이러한 사실은 Fig. 69에서도 설명되며, 변하는 有效傾斜角의 영향이 어느 정도인가 하는 것은 工具先端이 얼마 만큼 切削作用을 하느냐에도 달려 있다. 副切刃角의

附加되는 영향에 대해서도 고려하여야 한다.

管의 端面을 切削하는 실험에서 얻은 결과는 機械工場의 旋削作業에는 응용될 수 없는데, 그 이유는 管의 端面旋削에서는 工具先端이 切削作用을 하지 않기 때문이다. 加工物의 平削에도 적용될 수 없는 것은 마찬가지 이유에서이다. 공장의 旋削에서는 工具先端이 절삭 작용을 하게 되며, 그러한 상태에서는 항상 물림깊이가 切削速度에 영향을 준다.

Fig. 114는 A.S.M.E. data에 근거하여 切削速度方程式을 導出하기 위하여 그려진 것으로서 SAE 1020을 60 min의 工具壽命, 127 BHN (A.S.M.E. Table No. 141)의 조건에서 切削을 수행하였으며 切削速度는 다음과 같이 표시되는 指數를 갖는 移送의 증가와 더불어 감소한다.

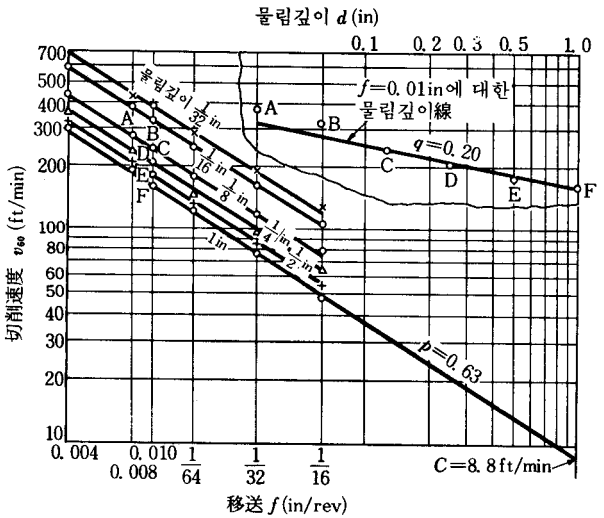


Fig. 114 SAE 1020을 H.S.S. 工具로 切削할 때 切削速度方程式의 導出을 위한 線圖 (from A.S.M.E. data)

$$p=\frac{\log(v_2/v_1)}{\log 10}=\log\left(\frac{162}{38}\right)=0.63 \tag{149}$$

v의 data點 A를 물림깊이의 函數로서 $f=0.01$ in/rev (Fig. 97과 비교 바람)에 대한 F에 대하여 (Fig. 114의 상단 右側에서와 같이) 투영하여 투영점 A에서 F를 통하는 평균직선을 그으면 물림깊이의 指數를 알 수 있다. 즉,

$$q=\frac{\log(v_2/v_1)}{\log 10}=\log\left(\frac{305}{192}\right)=0.20 \tag{150}$$

$d=1$ in가 될 때까지 線을 연장하여 $f=1$ in/rev 및 $d=1$ in에 대한 常數를 구하면 8.8 ft/min이며, 따라서 다음과 같은 豫備式을 쓸 수 있다.

$$v_{60}=\frac{8.8}{f^{0.63}\cdot d^{0.20}} \tag{151}$$

이 식으로부터 일반적인 조건에 의한 公式과 비교할 切削速度擴張式을 유도하기 위해 먼저

식 (131c) 및 식 (131d)에 의하여 指數 z와 g를 구하면

$$z=\frac{1}{2}(p+q)=\frac{1}{2}(0.63+0.20)=0.41$$

$$g=\frac{1}{2}(p-q)=\frac{1}{2}(0.63-0.20)=0.22$$

乘數 M은 식 (147)에 의하여

$$M=\frac{C_x\cdot 5^g\cdot 1000^z}{(T_L/T_x)^y}=\frac{8.8\times 5^{0.22}\times 1000^{0.41}}{(T_L/60)^{0.125}}=\frac{214}{(T_L/60)^{0.125}}$$

$$\therefore\ v=\frac{214\cdot(G/5)^{0.22}}{(1000\,A)^{0.41}\cdot(T_L/60)^{0.125}} \tag{152}$$

여기에서 흥미있는 것은 獨逸 data AWF-100 및 A.S.M.E. data에서 얻은 指數 z와 일치한다는 것이다. 즉 鋼의 切削에서 指數 z가 모두 0.41이라는 사실이다〔식 (152)와 Table 33의 AWF-100을 비교 바람〕.

Fig. 115는 工具壽命 T_L=60 min와 크기가 다른 細長比에 대하여 식 (152)를 線圖로 나타낸 것이며, 단, 點線은 T_L=240 min에 대한 것이다.

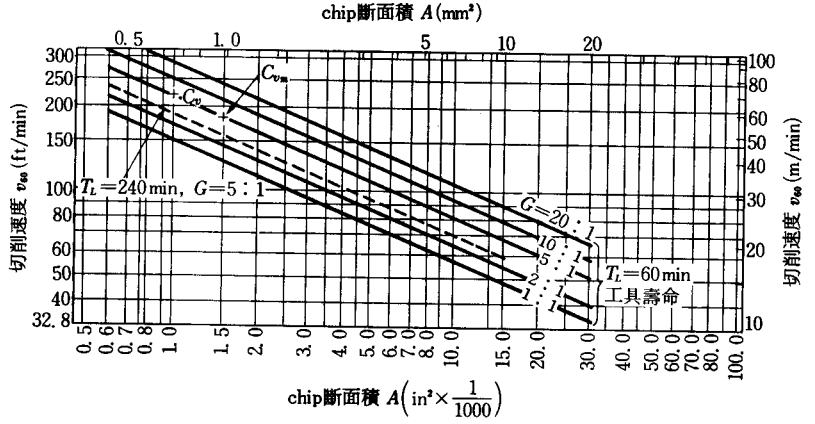


Fig. 115 H.S.S. 工具로 SAE 1020을 切削할 때 A-v관계 (from A.S.M.E. data)

Table 43은 A.S.M.E. data에서 구한 C_v, z 및 g의 값이다.

Fig. 116은 鑄鐵에 대한 A.S.M.E. data를 평가하여 그린 것이며, 여기에서 다음 식을 導出할 수 있다.

$$v_{60}=\frac{22}{f^{0.40}\cdot d^{0.16}}=\frac{184\,(G/5)^{0.12}}{(1000\,A)^{0.28}} \tag{153}$$

식 (153)의 z=0.28과 Table 33의 AWF-100에서의 指數 z=0.28은 앞에서 비교한 鋼의 경우에서처럼 완전히 일치하는 것을 볼 수 있다.

Table 44는 鑄鐵切削에 대한 諸값을 보인다.

앞에서 말한 金屬切削 data 외에 A.S.M.E.는 參考切削條件 (Reference Cutting Conditions)이라 하는 table을 수록하고 있는데, 이 table에는 Brinell硬度별로 鋼을 분류하고, 移送과

Table 43 鋼에 대한 A.S.M.E. data에서 평가된 切削速度擴張式의 常數 C_v 및 指數

加工材料	C_v	指數			BHN	풀림(a), 壓延(r) 또는 引抜(d)	A.S.M.E. No.
		chip斷面積의 指數 z	細長比의 指數 g	工具壽命의 指數 y			
炭素鋼							
SAE 1020	220	0.41	0.22	0.125	127	r	141
SAE 1020	154	0.41	0.22	0.125	160	d	142
SAEX 1020	250	0.41	0.22	0.125	126	r	143
SAEX 1020	234	0.41	0.22	0.125	156	d	144
SAE 1035	153	0.41	0.22	0.125	174	r	145
SAE 1050	110	0.41	0.22	0.125	201	r	146
SAE 1095	91	0.41	0.22	0.125	207	a	147
棒材							
SAE 1112	472	0.41	0.22	0.125	130	r	148
SAE 1112	305	0.41	0.22	0.125	167	d	149
SAEX 1112	414	0.41	0.22	0.125	183	d	150
Mn鋼							
SAEX 1315	362	0.41	0.22	0.125	120	r	151
SAEX 1315	216	0.41	0.22	0.125	161	d	152
SAET 1340	151	0.41	0.22	0.125	217	r	153
Ni鋼							
SAE 2310	181	0.41	0.22	0.125	?	a	154
SAE 2315	128	0.41	0.22	0.125	192	d	155
SAE 2330	80.3	0.41	0.22	0.125	223	d	156
SAE 2340	111	0.41	0.22	0.125	223	?	157
SAE 2512	155	0.41	0.22	0.125	?	?	158
Cr-Ni鋼							
SAE 3115	173	0.41	0.22	0.125	128	a	159
SAE 3115	147	0.41	0.22	0.125	163	d	160
SAE 3130	78	0.41	0.22	0.125	210	?	161
SAE 3140	120	0.41	0.22	0.125	190	a	162
SAE 3140	70	0.41	0.22	0.125	285	열처리	163
SAE 3240	134	0.41	0.22	0.125	170	?	164
Mo鋼							
SAE 4140	74.5	0.41	0.22	0.125	277		165
SAE 4340	65	0.41	0.22	0.125	302		166
SAE 4640	85.5	0.41	0.22	0.125	248		169
Cr鋼							
SAE 5120	150	0.41	0.22	0.125	149		171
SAE 5135	120	0.41	0.22	0.125	207		172
SAE 52100	116	0.41	0.22	0.125	187		173
Cr-V鋼							
SAE 6115	143	0.41	0.22	0.125	170		174
SAE 6140	122	0.41	0.22	0.125	187		175

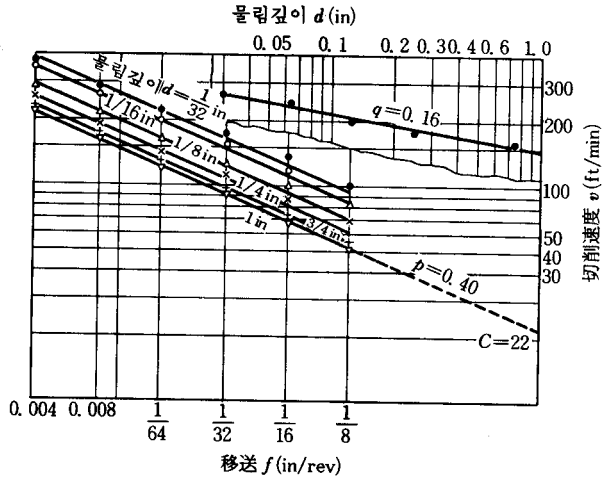


Fig. 116 H.S.S.工具로 鑄鐵을 切削할 때 切削速度方程式의 導出을 위한 線圖 (from A.S.M.E. data)

Table 44 切削速度擴張式의 용도로 H.S.S.工具 No. 4로 鑄鐵을 切削할 때에 대한 A.S.M.E. data에서 구한 C_v값 및 指數
(carbide工具의 C_v=Table 44의 C_v×3.5)

加工材料	C_v	指數		
		chip斷面積의 指數 z	細長比의 指數 g	工具壽命의 指數 y
鑄鐵				
軟	184	0.28	0.12	0.10
中	111	0.28	0.12	0.10
硬	67	0.28	0.12	0.10

물림깊이에 의존하는 60 min의 工具壽命에 대한 切削速度 data가 수록되어 있다. 그러나 切削速度를 비교하는 것이 그렇게 논리적인 것이 못된다. 그 이유는 鋼의 分類 group에 따라 물림깊이와 移送이 同一하지 않았기 때문이다.

切削速度擴張式이 편리한 것은 표준 chip斷面積 A=0.001 in²과 細長比 G=(5 : 1)에서 鋼 group의 切削性(주어진 工具壽命에 대한 切削速度)을 비교할 수 있다는 것이다. A.S.M.E. data에서는 chip斷面積과 細長比가 모두 변한다. Table 45는 切削速度擴張式에 대한 A.S.M.E. data와 常數 C_v값을 보여 주며, 예로써 Table 45 (줄 1 및 2에서)의 줄 1에서는 chip斷面積이 0.001 in²인데 반하여 줄 2에서는 이보다 50%가 더 큰 0.0015 in²이다. 鋼 group A에 대한 carbide工具의 切削速度는 225 ft/min이고 H.S.S.工具는 76 ft/min으로 되어 速度比가 2.95로서 carbide工具가 유리하다.

切削速度擴張式에 근거한 평가(Table 45의 끝에 있는 欄)에 의하면, chip斷面積이 같을 때 역시 carbide工具는 高速切削에 사용하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다. 줄 1 및 2에서 常數 C_v의 比는 2.95로서 carbide가 유리하고, Table 45의 다른 鋼 group에 대하여도 거

의 같은 조건이 성립한다. 여기에 개입되는 金屬切削率과 動力消耗에 대하여는 다음 章에서 자세히 취급하기로 한다.

Table 45

줄	加工材料 분류	BHN	工具材料	A.S.M.E.에 따른* 移送 f (in/rev)	물림깊이 d (in)	chip斷面積 A (in²)	切削速度 v_{60} (ft/min)	Kronenberg의 평가 $A=0.001\,\text{in}^2$, $G=5:1$. 切削速度擴張式에 대한 C_v** ($T_L=60\,\text{min}$에 대한 C_v)
1	A	260	H.S.S.	0.010	0.100	0.0010	76	66
2	(合金鋼)		carbide	0.015	0.100	0.0015	225	256
3	B	220	H.S.S.	0.012	0.100	0.0012	88	84
4	(SAE 1045 HR)		carbide	0.020	0.100	0.0020	244	326
5	C	180	H.S.S.	0.015	0.050	0.00075	140	136
6	(SAE 1035 HR)		carbide	0.020	0.050	0.0010	435	505
7	D	160	H.S.S.	0.010	0.050	0.0005	200	151
8	(SAE 1025 HR)		carbide	0.015	0.050	0.00075	600	587
9	E	150	H.S.S.	0.012	0.050	0.0006	210	171
10	(SAE 1015 HR)		carbide	0.015	0.050	0.00075	680	660
11	F	140	H.S.S.	0.008	0.050	0.0004	400	262
12	(SAE 1112 CD HR)		carbide	0.012	0.050	0.0006	1240	1020

* *Manual on Cutting*, p. 298.

** 切削速度擴張式 $v=\dfrac{C_v\cdot(G/5)^{0.22}}{(1000\,A)^{0.41}(T_L/60)^{0.125}}$ (ft/min)에 이용됨

CD : 冷間引抜 (cold drawn) ; HR : 熱間壓延 (hot rolled)

9-6 常數 C_v와 Brinell硬度

切削溫度, 切削速度 및 剪斷強度 사이의 중요한 관계식을 次元解析法에 의하여 구할 수 있다는 것에 대하여는 本書의 理論篇〔식 (59), 식 (64), 식 (79)〕에서 이미 논의한 바 있다. 식 (59) 및 식 (73)에서 比切削力 k_s의 중요성을 고려할 때 切削速度常數 C_v는 다음과 같이 加工材料의 引張強度의 函數이어야 한다는 것을 쉽게 추측할 수 있다.

$$C_v=f\left(\frac{1}{k_z}\right)^{\frac{1}{1-2m}} \tag{154}$$

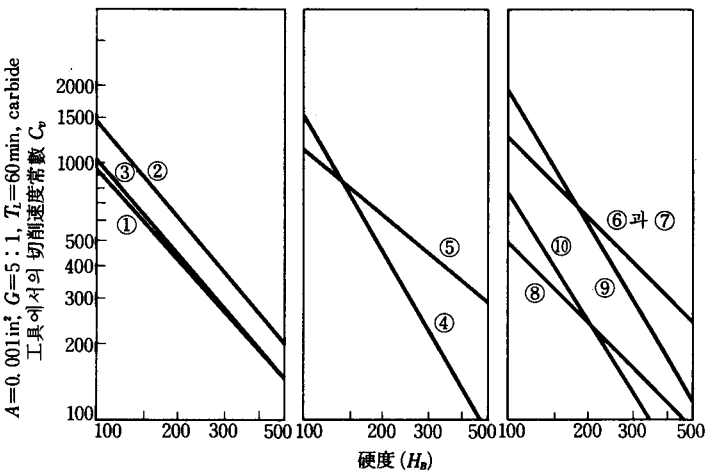
단, k_z : 引張強度 (psi)이다.

Table 8의 m값(=0.083)을 식 (154)에 대입하면 常數 $C_v=f\left(\dfrac{1}{k_z}\right)^{\frac{1}{1-2\times0.083}}=f\left(\dfrac{1}{k_z}\right)^{1.2}$로 되어 C_v는 $k_z^{1.2}$에 逆比例하고, $m=0.23$이라면 C_v는 $k_z^{1.85}$에 逆比例하게 된다.

鋼의 경우에는 Brinell硬度가 다음과 같이 引張強度 k_z에 관계된다.

$$\text{BHN}=\frac{k_z}{500} \tag{155}$$

따라서 前章에서 導出된 C_v값이 이론적으로 생각되는 것처럼 Brinell 硬度에 따라 변하는가를 次元解析法으로 살펴보는 것도 중요하다. 이러한 목적으로 Fig. 117과 같이 兩對數方眼紙에서 Brinell 硬度에 대한 C_v線圖를 그렸으며, 너무나 많은 線이 重疊되는 것을 피하기 위하여 3개로 나누어 그렸다. 이 방법으로 구한 C_v와 Brinell硬度의 관계에 대한 상세한 정보가 Table 46에 나와 있다.



①: International Nickel Co., ②: Carboloy炭素鋼(max),
③: Carboloy 炭素鋼(평균), ④: A.S.M.E의 분류 A…F(Table 45),
⑤: Curtiss-Wright C_{vR} (Table 17), ⑥: carbide S1의 AWF-120 및 158 炭素鋼,
⑦: carbide工具 S의 AWF-120 및 158炭素鋼, ⑧: 合金鋼에 대하여 上同,
⑨: carbide S3에 대하여 上同, ⑩: 合金鋼에 대하여 上同

Fig. 117 Brinell硬度의 函數로서 切削速度常數 C_v의 비교
(from data of various origins)

切削速度常數 C_v와 Brinell硬度를 서로 관련시킨 식에 의하면 BHN의 指數가 식 (154)에서 이론값의 범위에 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 이론과 실제가 잘 일치하고 있어 서로를 잘 확인하여 준다고 할 수 있다.

이와 같은 일치성은 예측되는 관계 및 실험 방법의 방향을 설정하여 주고, 앞에서 해석된 실험 결과를 보강하여 주는데 次元解析法이 유용하다는 것을 실증하여 주고 있다.

ceramic工具를 사용한 다른 실험 결과[143,144]를 평가하여 보면 Brinell硬度指數의 범위를 확인하게 되고, 이것은 예측한대로 次元解析法이 이 工具에도 적용된다는 것을 말해 주는 것이 된다. 후자에서는 指數가 각각 1.5와 1.6이라는 것을 알았다.

9-7 切削速度의 計算例

切削速度法則의 몇몇 數字와 附錄의 Table A1, A2, A3 및 A4에 있는 最適값에 어떤 값

Table 46 鋼을 切削할 때 C_v-Brinell硬度關係 및 指數(切削速度 擴張式)[1]

Brinell 硬度 (BHN)	引張強度 (psi)	carbide 工具									H.S.S. 工具			
		Intern. Nickel Co.[2]	carboloy		A.S.M.E. 분류 data[4]	Curtiss Wright[5]	AWF -120 series	AWF-158 series			Intern. Nickel Co.	A.S.M.E. 분류 data	AWF-158	
			최대[3]	평균				炭素鋼		合金鋼			炭素鋼	合金鋼
								S1공구	S3	S1	S3			
100	50 000		1450	1080	1500	1100	1230	1230	490				358	187	
150	75 000	605	860	665	726	800	810	810	322			206	173	119	
200	100 000	425	620	456	429	620	600	600	238	560	224	142	102	82.5	62
250	125 000	330	456	340	300	510	475	475	190	385	154	111	71	65	51
300	150 000	270	365	274	216	440				274	109	92	51		29
350	175 000	220		221		380				210	84	72.5			
400	200 000	188		190		340				168	67	65			
C_v와 BHN 관계의 평가 평균 $C_v=$		$\frac{212\,000}{(BHN)^{1.17}}$	$\frac{453\,000}{(BHN)^{1.25}}$	$\frac{340\,000}{(BHN)^{1.25}}$	$\frac{4\,700\,000}{(BHN)^{1.75}}$	$\frac{56\,000}{(BHN)^{0.85}}$	$\frac{156\,000}{(BHN)^{1.05}}$	$\frac{156\,000}{(BHN)^{1.05}}$	$\frac{61\,500}{(BHN)^{1.05}}$	$\frac{5\,450\,000}{(BHN)^{1.75}}$	$\frac{2\,190\,000}{(BHN)^{1.75}}$	$\frac{71\,500}{(BHN)^{1.17}}$	$\frac{1\,120\,000}{(BHN)^{1.75}}$	$\frac{21\,600}{(BHN)^{1.05}}$	
C_v의 比		3× H.S.S.	1.33 : 1		4.2× H.S.S.			2.5 : 1	2.85× H.S.S.	2.5 : 1					
chip斷面積의 指數 z		0.36	0.335	0.335	0.41		0.169	0.145 평균	0.145 평균	0.165	0.165	0.36	0.41	0.21	0.25
細長比의 指數 g		0.10	0.085	0.085	0.22		0.096	0.145	0.145	0.165	0.165	0.10	0.22	0.21	0.25
工具壽命指數 y					0.125	0.30 평균	0.15	0.167	0.167	0.167	0.167		0.125	0.25	0.25

[1] 實用추천값(附錄 Table A1을 참조)

[2] 工具壽命을 60min으로 가정했음

[3] carbide 370은 포함되지 않음

[4] 60min의 工具壽命으로 換算

[5] C_{vk} (Table 17을 참조)

을 곱하거나 나누어 주면, 앞에서 설명한 解析法을 現場 및 計算上에서 응용할 수 있다.

다음과 같은 예에서 나타나는 數學式의 과정을 실제에 있어서는 전부 거칠 필요는 없다.

예제 9-1. 切削速度의 基本法則 :

Brinell硬度 150인 鋼을 中級 carbide工具로 chip斷面積 $A=0.005\,\text{in}^2$되게 절삭할 때 切削速度를 정하라.

(解) Table A1 에서 150 BHN과 中級 carbide工具에 대하여 $C_v=625$

Table A2에서 $(1000\,A)^z=1.57$

∴ 切削速度基本法則 식(113) $v_{60}=\dfrac{C_v}{(1000\,A)^z}$에 의하여

$$v_{60}=\frac{625}{1.57}=398\,\text{ft/min}$$

예제 9-2. 切削速度擴張式〔식 (133)〕 $v=\dfrac{C_v\cdot(G/5)^g}{(1000\,A)^z\cdot(T_L/60)^y}$:

細長比 $G=8:1$, 工具壽命 $T_l=60\,\text{min}$일 때 예제 9-1의 조건에서 切削速度를 계산하라.

(解) Table A3에서 $(G/5)^{0.14}=1.068$

∴ 예제 9-1의 v_{60}에 1.068을 곱하면 보다 정확한 절삭속도를 나타낸다.

$$v_{60}=398\times1.068=425\,\text{ft/min}$$

예제 9-3. 切削速度擴張式 :

工具壽命 120 min에 대한 예제 9-2의 조건에서 切削速度를 계산하라.

(解) Table A4의 中級 carbide工具에서 $(T_L/60)^{0.30}=1.232$

∴ 예제 9-2의 v_{60}을 1.232로 제하면 $v_{120}=425/1.232=345\,\text{ft/min}$

예제 9-4. 切削速度擴張式 :

예제 9-3에서 中級 carbide工具를 高級 carbide工具로 대체할 때의 切削速度를 구하라.

(解) Table A1에서 高級 carbide工具에 대한 $C_v=830$과 앞에서 소개된 $(1000\,A)^z=1.57$, $(G/5)^g=1.068$, $(T_L/60)^y=1.232$를 식 (133)에 대입하면

$$v_{120}=\frac{830\times1.068}{1.57\times1.232}=458\,\text{ft/min}$$

예제 9-3과 예제 9-4를 비교하여 볼 때 中級 carbide工具를 高級 carbide工具로 대체하여 사용함으로써 切削速度를 33% 만큼이나 증가시킬 수 있다.