

<論 文>

# 새로운 급속 工具壽命試驗法에 관한 研究 (I)

—超硬工具의 磨滅舉動 分析—

吳 良 均\* · 鄭 東 潤\*\*

(1985年 12月 9日 接受)

## A Study of New Quick Tool-Life Testing Method(I)

—The Analysis of the Wear Behavior for Carbide Tool—

Yang Kyun Oh and Dong Yoon Chung

**Key Words:** Tool Life(공구수명), Uniform Wear(정상마멸), Flank Wear(측면마멸), Wear Factor(마멸인자), Carbide Tool(초경공구)

### Abstract

During the past decade, the Quick Tool-Life Testing Method has been studied. However, a generalized theory and testing method for the quantitative measurement of tool wear have not been developed yet.

Among many factors to affect the tool wear, the flank wear is regarded as a main factor.

In this study, the behavior of the flank wear for carbide tool was studied as a preceding step to present a simple method for Quick Tool-Life Testing, and it was found that the flank wear varies in direct proportion to cutting time, and the following general equation is obtained for the flank wear curves with respect to cutting time and velocity.

$$W_f = (a + bt) V^n$$

### 1. 序 論

工具壽命的 급속 試驗法에 대한 研究는 오래전부터 시작되어 왔으나 아직 一般化된 方法이 제시되지는 못하였다. 또한 定量的으로 工具磨滅을 측정할 수 있는 통일된 理論式이 아직 없으며 實驗에 의한 다양한 計

測方法 및 統計的인 처리방식이 사용되고 있으나 이중 많은 方法은 장비를 갖춘 研究室에서만 행할 수 있어 現場과의 連繫性이 부족하다. 이런점을 감안하여 本 研究에서는 工具현미경을 이용하여 간편하게 工具壽命을 구할 수 있는 方法을 제시하기 위한 前 段階로서 工具의 磨滅舉動에 대하여 研究하였다. 工具의 磨滅은 매우 복잡한 현상이며 대부분의 경우 主로 磨滅의 累增이 工具를 破損에 이르게 한다. 磨滅의 形態중 磨滅 (abrasion wear)과 粘着에 의하여 발생되는 側面磨滅이 加工物의 表面粗度, 精密度 및 切削動力에 미치는 영향

\* 正會員, 陸軍士官學校 機械工學科

\*\* 正會員, 陸軍士官學校 兵器工學科

과 측정상의 便宜 때문에 工具壽命을 지배하는 主磨減 因子로 취급되고 있다. 따라서 切削時間에 대한 工具의 側面磨減 거동을 분석하여 超硬工具의 側面磨減曲線의 직선모형을 구하고, 側面磨減曲線의 一般모형을 확립하였다.

## 2. 側面磨減曲線의 直線모델

切削時間에 대한 工具의 側面磨減曲線은 일반적으로 세 단계로 구분하고 있다<sup>(1-3)</sup>. (1) 제 1 단계는 切削初期에 급격한 溫度상승으로 인하여 예리한 절삭날이 마멸되는 짧은 期間의 過渡현상이며, 마멸이 급속히 진행되어 일정한 마멸랜드(wear land)를 형성한다. (2) 제 2 단계는 “the temperature insensitive zone”으로서 마멸율이 일정한 영역이며<sup>(4-6)</sup> 磨減曲線은 直線에 가깝다. (3) 제 3 단계는 急速磨減영역이며 “the temperature sensitive zone”으로서 磨減率은 온도에 따라 급격히 증대되고 工具는 破損에 이르게 된다. 실제 切削의 경우 工具傾斜면과 칩의 접촉면의 온도는 切削條件에 따라 많은 차이가 있으나 工具側面의 온도는 限界 온도에 훨씬 못미치며<sup>(7)</sup> 따라서 마멸은 마멸 및 粘着에 지배되고 단위 길이당의 磨減率은 일정하다. 그러므로 超硬工具의 제 1 단계 이후의 定常磨減은 切削速度를 고정하였을 때

$$\frac{dW_f}{dt} = b_1$$

이며 磨減幅은

$$W_f = b_0 + b_1 t \quad (1)$$

의 直線모델로 가정할 수 있다. 여기서  $b_0$ 는 初期過渡磨減에 의한 常數이다. 側面磨減率이 급격히 증가되는 제 3 단계 磨減온도에 도달하면 크레이터(crater) 부분의 온도가 이며 工具의 軟化온도를 초과하게 되므로 工具가 破損될 것이다. 이 단계의 磨減은 超硬工具의 경우 매우 짧은 기간에 국한되며 실제 관찰의 경우도 그러하다.

## 3. 實驗材料 및 實驗方法

本 研究에 사용된 材料는 炭素鋼 SM 35C 와 SM 45C 로서, 그 化學的, 機械的 性質은 Table 1 과 같다. 被削材料의 均質化를 위하여 노오말라이징(normalizing) 열처리 하였으며, 切削중 필립을 고려하여 試驗片은  $L=300\text{mm}$ ,  $d=130\text{mm}$  로 제작 사용하였다. 切削實驗은 試片을 Fig. 1 과 같이 head stock 쪽의 끝부분에

Table 1 Chemical and mechanical properties of cutting materials

Chemical composition(w/o)					
Elements	C	Si	Mn	P	S
SM 35 C	0.380	0.280	0.640	0.004	0.010
SM 45 C	0.440	0.280	0.700	0.017	0.017

Mechanical properties					
Items	Yield st. (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile st. (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elonga. (%)	Reduction of area (%)	Hardness (H <sub>B</sub> )
SM 35 C	38.0	62.0	29.0	50	180
SM 45 C	38.0	68.0	25.0	44	200

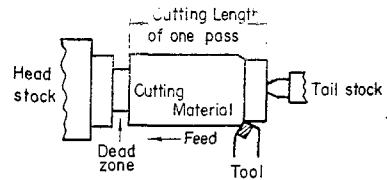


Fig. 1 Shape of cutting material

dead zone 을 설치하여 한 패스의 절삭길이를 일정하게 유지하였고 工具를 보호하는 열할도 수행하게 하여 NC 선반을 이용하였다. 側面磨減幅의 測定은 工具의 側面을 水平으로 유지하도록 SCEA 와 SRA 를 보정할 수 있는 지그를 만들어 사용하였다. 磨減은 약 10분 간격으로 측정하였으며, 側面磨減이 正常的인 경우의 限界까지 측정하였다.

本 實驗에서 사용한 切削工具는 超硬 P20 工具와 超硬 Insert 工具이며, 移送率은 0.3mm/rev., 절삭길이는 1.5mm 로 하여 切削速度 80~160m/min 로 절삭하였다. 實驗資料의 처리를 위하여 HP9826 컴퓨터와 플로터를 사용하였다.

## 4. 實驗結果 및 考察

### 4.1 直線모델에 의한 實驗結果 分析

切削工具를 超硬 P20 工具로 하고 材料를 SM 35 C 와 SM 45 C 로 변경시켰을 때와, 材料를 SM 35 C 로 하고 切削工具를 超硬 insert 工具로 변경시켰을 때 얻어진 實驗結果로 側面磨減曲線의 直線모델(식 1)의 타당성을 검토하였다. 즉 各 切削速度에서 切削時間에 대한 實驗資料의 最適回歸모델을 검토하기 위하여 다음과 같은 다항식에

$$W_t = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n \quad (2)$$

정방법으로 택하였다. 회귀모델에 의한 標準偏差는 다  
 資料를 대입하여 1차식에서 4차식까지 回歸分析하였  
 차식일수록 작아지며 이는 回歸理論과 일치한다. 統計  
 다. 回歸의 精密度를 검정하기 위하여 標準偏差를 검  
 學的으로 회귀모델의 次數가 증가하면 회귀모델과 資

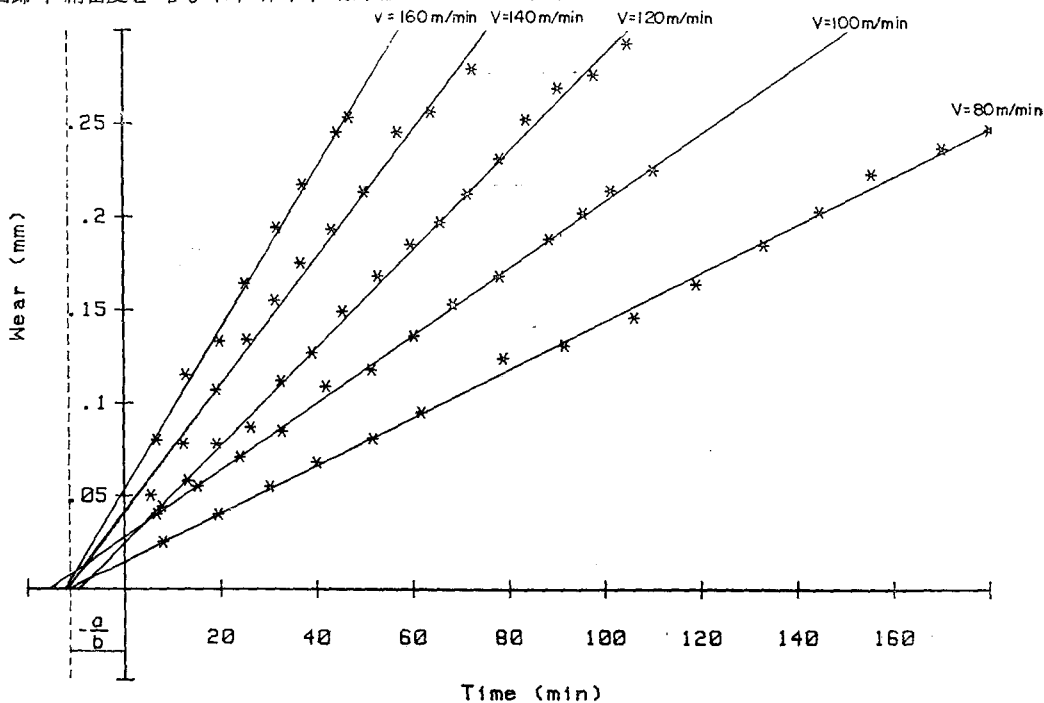


Fig. 2 Flank wear curves at different velocities. (P20, SM45C)

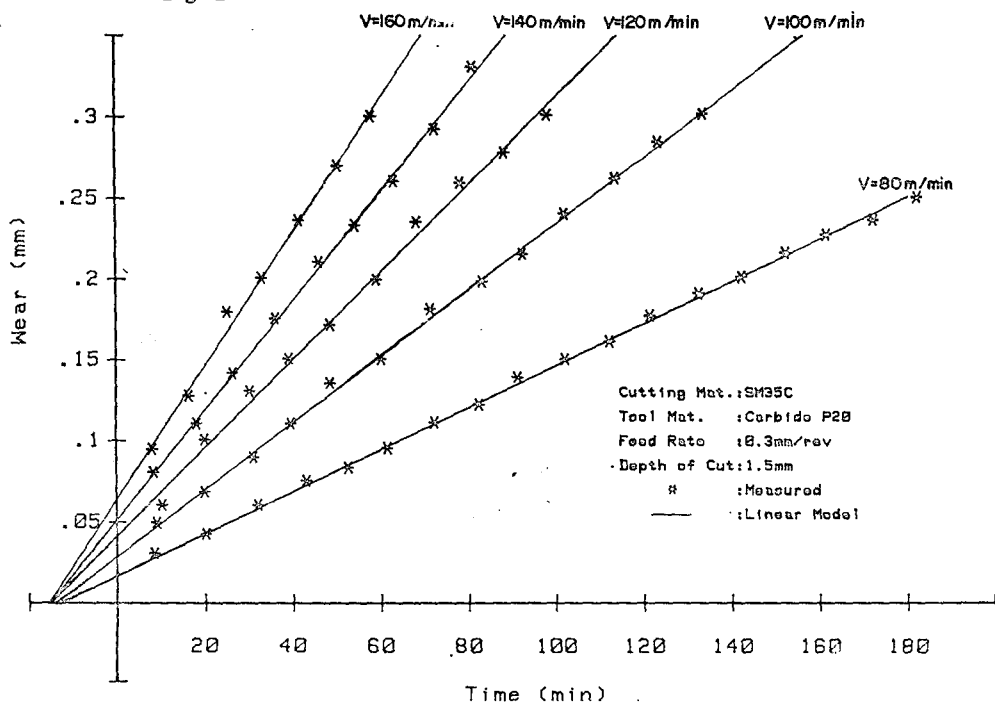


Fig. 3 Flank wear curves at different velocities (Carbide Insert, SM35C)

Table 2 Results of regression analysis (P20, SM45C)

Vel.		Coefficient	Max. error	Std. error
80	1	$b_0=0.1460898 \text{ E}-01$ $b_1=0.1298698 \text{ E}-02$	$0.7157534 \text{ E}-02$	$0.3616650 \text{ E}-02$
	2	$b_0=0.1629877 \text{ E}-01$ $b_1=0.1244426 \text{ E}-02$ $b_2=0.2888555 \text{ E}-06$	$0.7950038 \text{ E}-02$	$0.3540128 \text{ E}-02$
100	1	$b_0=0.2787906 \text{ E}-01$ $b_1=0.1812707 \text{ E}-02$	$0.4951000 \text{ E}-02$	$0.2276426 \text{ E}-02$
	2	$b_0=0.2822208 \text{ E}-01$ $b_1=0.1795992 \text{ E}-02$ $b_2=0.1417939 \text{ E}-06$	$0.5059958 \text{ E}-02$	$0.2272582 \text{ E}-02$
120	1	$b_0=0.2493304 \text{ E}-01$ $b_1=0.2630135 \text{ E}-02$	$0.7421210 \text{ E}-02$	$0.4469352 \text{ E}-02$
	2	$b_0=0.1873827 \text{ E}-01$ $b_1=0.2928421 \text{ E}-02$ $b_2=-0.2539484 \text{ E}-05$	$0.7334545 \text{ E}-02$	$0.3784789 \text{ E}-02$
140	1	$b_0=0.4024941 \text{ E}-01$ $b_1=0.3457571 \text{ E}-02$	$0.1130095 \text{ E}-01$	$0.6898560 \text{ E}-02$
	2	$b_0=0.2367640 \text{ E}-01$ $b_1=0.4644051 \text{ E}-02$ $b_2=-0.1530047 \text{ E}-04$	$0.6759226 \text{ E}-02$	$0.2788672 \text{ E}-02$
160	1	$b_0=0.5307937 \text{ E}-01$ $b_1=0.4341718 \text{ E}-02$	$0.6826892 \text{ E}-02$	$0.4092243 \text{ E}-02$
	2	$b_0=0.4919720 \text{ E}-01$ $b_1=0.4717141 \text{ E}-02$ $b_2=-0.6859191 \text{ E}-05$	$0.7707492 \text{ E}-02$	$0.3935768 \text{ E}-02$

料사이에 偏差의 자승합이 감소하게 되며  $F$  기준<sup>(9)</sup>을 이용하여 회귀모델의 最適次數를 결정하였다. 검정결과 SM 45 C에 대한 切削速度 140m/min의 경우를 제외하고는 直線모델의 적합성을 판정하고 있다. 비록 切削速度 140m/min에서의 回歸모델이 直線이 아니긴 하나 直線모델에 대한 標準偏差의 값이 測定時의 지시 눈금 값의 오차의 범위를 넘지않고 있으므로 자료측정의 잘못에 기인된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 1차 직선모델과 2차곡선모델을 95% 確率度에서  $F$  검정을 실시하였다. Table 2~4에 回歸分析結果가 나타

나 있으며 Fig.2~Fig. 4에 회귀분석결과에서 얻어진 1차 직선모델에 의한 磨滅線圖가 나타나 있다. Fig. 5는 側面磨滅이 ISO에서 권장하는 磨滅基準인 0.3mm가 되었을 때 위의 각 경우에 대한  $V-T$  관계를 log-log 그래프로 나타낸 것으로서 직선관계를 보이고 있다. 이상의 實驗資料 分析결과와 Eigomayel<sup>(9)</sup>, Hitomi<sup>(10)</sup>의 자료를 검토한 결과를 종합하여 볼 때 超硬工具의 磨滅曲線을 直線모델로 가정한 것이 타당함을 알 수 있다. Fig. 6은 工具의 側面磨滅의 발달과정을 切削時間 13, 45분에 촬영한 것이다.

Table 3 Results of regression analysis (P20, SM35C)

Vel		Coefficient	Max. error	Std. error
80	1	$b_0=0.1718044 \text{ E-01}$ $b_1=0.1297862 \text{ E-02}$	0.3708002 E-02	0.1969873 E-02
	2	$b_0=0.1785433 \text{ E-01}$ $b_1=0.1282040 \text{ E-02}$ $b_2=0.6488642 \text{ E-07}$	0.3740834 E-02	0.1998735 E-02
100	1	$b_0=0.2899027 \text{ E-01}$ $b_1=0.2054866 \text{ E-02}$	0.6317606 E-02	0.31487714 E-02
	2	$b_0=0.2834475 \text{ E-01}$ $b_1=0.2078844 \text{ E-02}$ $b_2=-0.1562260 \text{ E-06}$	0.6168853 E-02	0.3280532 E-02
120	1	$b_0=0.4200596 \text{ E-01}$ $b_1=0.2705521 \text{ E-02}$	0.8399047 E-02	0.6301679 E-02
	2	$b_0=0.3155434 \text{ E-01}$ $b_1=0.3229053 \text{ E-02}$ $b_2=-0.4820309 \text{ E-05}$	0.6554655 E-02	0.5431844 E-02
140	1	$b_0=0.5073994 \text{ E-01}$ $b_1=0.3380537 \text{ E-02}$	0.4981546 E-02	0.3427796 E-02
	2	$b_0=0.5192506 \text{ E-01}$ $b_1=0.3307986 \text{ E-02}$ $b_2=0.8076300 \text{ E-06}$	0.4399348 E-02	0.3671414 E-02
160	1	$b_0=0.6366837 \text{ E-01}$ $b_1=0.1420417 \text{ E-02}$	0.1115513 E-01	0.5784116 E-02
	2	$b_0=0.5378681 \text{ E-01}$ $b_1=0.4916046 \text{ E-02}$ $b_2=-0.1197938 \text{ E-04}$	0.8574927 E-02	0.6123152 E-02

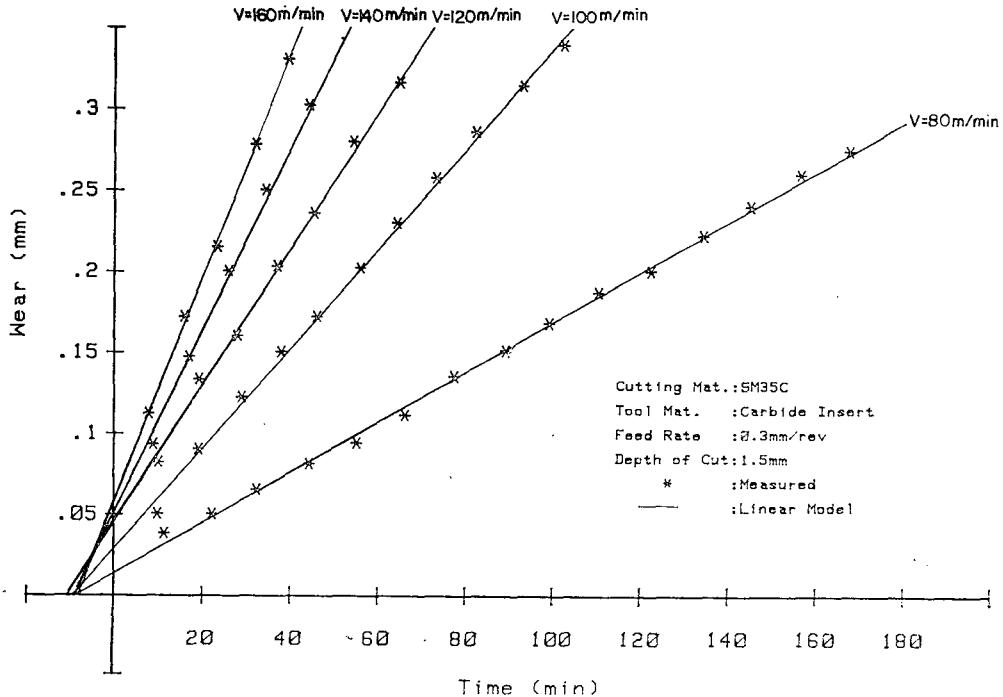


Fig. 4 Flank wear curves at different velocities (P20, SM35C)

Table 4 Results of regression analysis (Insert, SM35C)

Vel.		Coefficient	Max. error	Std. error
80	1	$b_0=0.1357543 E-01$ $b_1=0.1553133 E-02$	0.843835 E-02	0.3782752 E-02
	2	$b_0=0.1882637 E-01$ $b_1=0.1387384 E-02$ $b_2=0.9265256 E-06$	0.7358249 E-02	0.3222096 E-02
100	1	$b_0=0.2879846 E-01$ $b_1=0.3082058 E-02$	0.9726912 E-02	0.4199371 E-02
	2	$b_0=0.2485669 E-01$ $b_1=0.3236880 E-02$ $b_2=-0.1094804 E-05$	0.7228532 E-02	0.4072392 E-02
120	1	$b_0=0.4473847 E-01$ $b_1=0.4212216 E-02$	0.6207562 E-02	0.9575671 E-02
	2	$b_0=0.3878319 E-01$ $b_1=0.4547495 E-02$ $b_2=-0.3525377 E-02$	0.6969385 E-02	0.1054944 E-01
140	1	$b_0=0.5025417 E-01$ $b_1=0.5617429 E-02$	0.9719850 E-02	0.1602664 E-01
	2	$b_0=0.3750193 E-01$ $b_1=0.6477468 E-02$ $b_2=-0.1070020 E-04$	0.8891135 E-02	0.1156655 E-01
160	1	$b_0=0.5647129 E-01$ $b_1=0.6937813 E-02$	0.4475137 E-02	0.3857255 E-02
	2	$b_0=0.6328446 E-01$ $b_1=0.6253481 E-02$ $b_2=0.1315864 E-04$	0.5244509 E-02	0.3843119 E-02

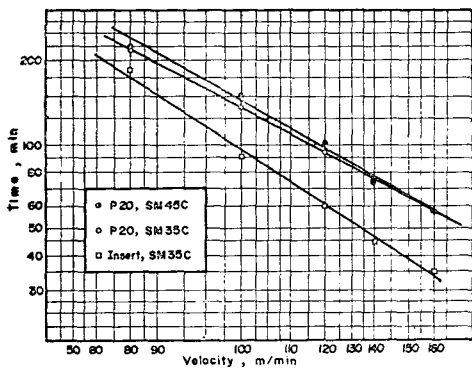


Fig. 5 Velocity versus time relation when  $W_{cr}$  is 0.3mm

#### 4.2 側面磨減曲線의 一般모델

전체 切削速度영역을 지배할 수 있는 磨減曲線式的 일반모델을 정하기 위하여 超硬 P20 工具로 SM45C를 절삭하여 얻은 Fig. 2를 이용하였다. Fig. 2(Fig. 3, Fig. 4)는 時間軸 절편이 다소 불규칙하게 분산되는 경향을 보이고 있으나 그 분산의 폭이 本研究의 切削時間 범위인 50~180min의 긴 시간에 비하면 매우 적은 값이다. 따라서 이는 直線모델이 時間軸의 한 점을 原點으로 하여 放射되는 直線群으로 가정될 수 있음을 뜻하며 또한 Taylor의 工具壽命式

$$VT^n=C \tag{3}$$

에서 Taylor 常數 C는 磨減基準를 포함하고 있으므로 時間이 고정될 때 磨減은 切削速度의 [지수배에 비례해야 한다. 이 결과 本研究는 切削時間과 速度를

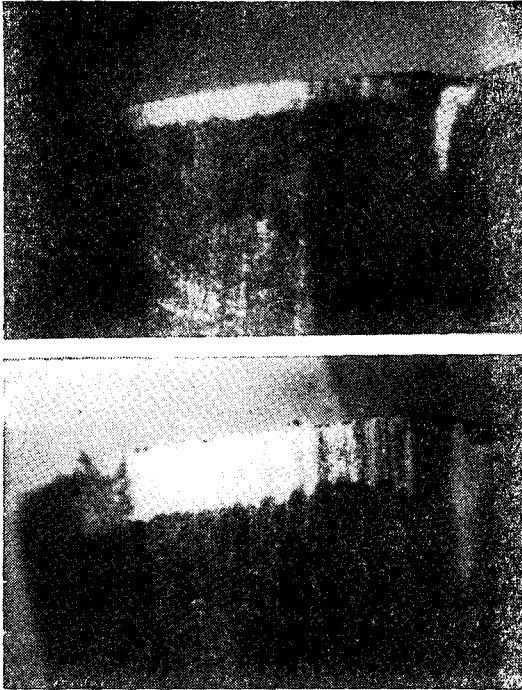


Fig. 6 Gradual wear of carbide tool(P20, SM45C 120m/min, 13min, 45min)

함수로 하는 직선磨減의 一般모형을 다음과 같이 가정하였다.

$$W_f = (a + bt)V^m \quad (4)$$

식(1)의 직선모형의 절편  $b_0$ 와 식(4)의 일반모형의 절편  $aV^m$ 은 같은 값이며, 또한 직선모형의 기울기  $b_1$ 은 일반모형의  $bV^m$ 과 같은 값이다. 즉

$$(b_0)_i = aV_i^m, (b_1)_i = bV_i^m$$

이다. 여기서  $i=80, 100, 120, 140, 160$ m/min이다. 저速도의 직선모형에서 구한  $b_0, b_1$  값을 위 식에 대입하

Table 5 Comparison of intercepts and slopes for each model

Velocity (m/min)	$W_f = b_0 + b_1 t$		$W_f = (a + bt) \cdot V^m$ $a = 0.74059 \times 10^{-4}$ $b = 0.62236 \times 10^{-4}$ $m = 1.7507$	
	Intercept ( $b_0$ )	Slope ( $b_1$ )	Intercept ( $aV^m$ )	Slope ( $bV^m$ )
80	0.014611	0.0012987	0.015895	0.0013357
100	0.027883	0.0018127	0.023491	0.0019740
120	0.024933	0.0026302	0.032324	0.0027160
140	0.040246	0.0034576	0.042338	0.0035580
160	0.053075	0.0043418	0.053488	0.0044950

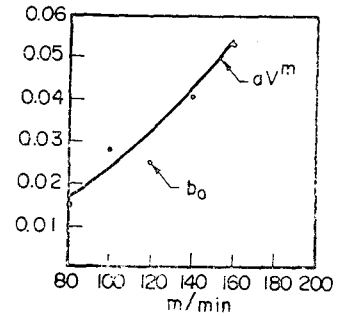


Fig. 7 Comparison of intercept  $b_0$  vs  $aV^m$

여  $a, b$  및  $m$ 을 구할 수 있으며 Table 5는 이렇게 구한 一般모형과 직線모형을 비교한 것이다. Fig. 7은 직線모형에 의한 磨減軸 절편  $b_0$ 와 一般모형에 의한 磨減軸 절편  $aV^m$ 을 비교한 것으로 점은  $b_0$ , 실선은  $aV^m$ 에 의한 것이다.  $aV^m$  추정치에 대한 직線모형의  $b_0$ 의 標準偏差는 0.004mm로 測定時의 지시눈금값의 오차 범위내에 있다. 그러므로 一般모형의 磨減軸 절편을  $aV^m$ 으로 가정한 것은 타당성이 있으며 따라서 저速度帶를 지배하는 側面磨減曲線의 一般모형을 식(4)로 가정할 수 있다.

### 4.3 一般모형의 타당성 檢討

식(4)에서 측정된 實驗資料를 가장 가깝게 만족하는 常數  $a, b$  및  $m$ 을 구하기 위하여 측정된 마멸치 ( $W_f$ )<sub>i</sub>와 식(4)에 의한 推定마멸치 ( $\hat{W}_f$ )<sub>i</sub>의 差의 제곱합을

$$\phi_0 = \sum_{i=1}^k [(W_f)_i - (\hat{W}_f)_i]^2 \quad (5)$$

으로 표시하자. 여기서  $i$ 는 실험자료의 수이다. Powell의 *nondervitive direct search method*를 이용한 數值解析 結果 식(5)를 최소화 하는  $a, b$ , 및  $m$ 을 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$a = 0.77263 \times 10^{-5}, b = 0.62515 \times 10^{-6}, m = 1.7392$$

이를 數值計算상의 반응검정을 위하여 信賴度 95%로 할 때 만족할 수 있었다. 이 결과 超硬 P20 工具를 사용하여  $f=0.3$ mm/rev.,  $d=1.5$ mm로 SM45C를 절삭할 때 切削時間과 速度에 대응하는 側面磨減式의 一般모형은 다음과 같이 표시된다.

$$W_f = (0.77263 \times 10^{-5} + 0.62515 \times 10^{-6}t) V^{1.7392} \quad (6)$$

식(6)에 의한 저 속도에서의 절편과 기울기 및 測定式에 대한 標準偏差는 Table 6과 같으며, 직線모형에 의한 결과와 비교하면 식(4)의 一般모형의 가정이 타당성이 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 測定值, 직線모형 및 一般모형에 의한 결과를 종합한 것이다.

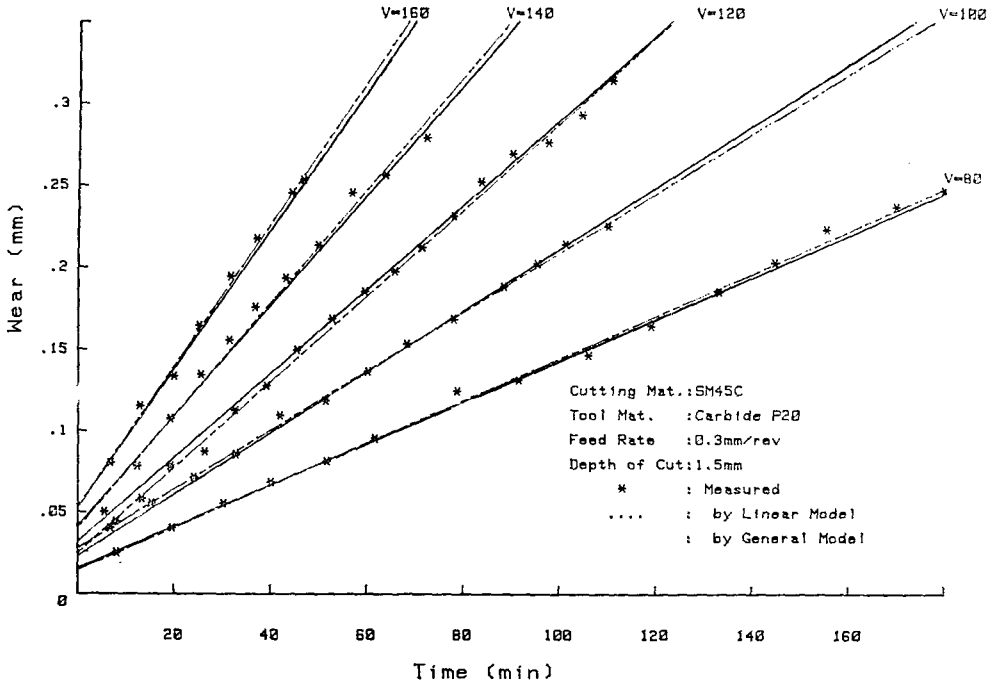


Fig. 8 Wear curves calculated by linear and general model (P20, SM45C)

Table 6 Intercepts, slopes and standard errors at different speeds

Velocity (m/min)	Intercept (mm) $0.77263 \times 10^{-5} V^{1.7392}$	Slope (mm/min) $0.62515 \times 10^{-6} V^{1.7392}$	Std. error
80	0.015770	0.0012760	0.0038
100	0.023247	0.0018810	0.0032
120	0.031922	0.0025828	0.0064
140	0.041737	0.0033770	0.0069
160	0.052647	0.0042598	0.0048

5. 結 論

이상과 같은 實驗 및 考察을 통하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 超硬工具의 切削時間에 대한 側面磨減거동은 切削初期의 非定常磨減을 제외하면 통상의 切削速度범위에서 直線이며

$$W_f = b_0 + b_1 t$$

로 표시된다.

(2) 超硬工具의 切削時間과 切削速度에 대한 側面磨減曲線의 一般모델은

$$W_f = (a + bt) V^n$$

으로 표시된다.

(3) 一般모델式에 의한 超硬工具의 側面磨減예측을 이용하여 急速工具壽命결정방법의 제시가 가능하다.

參 考 文 獻

- (1) E.J.A. Amarego and R.H. Brown, "The Machining of Materials", Prentice-Hall Inc., pp. 5~7, 1969
- (2) I. Ham, "Fundamentals of Tool Wear", ASTM Technical paper MR68-617, 1968
- (3) G. Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", McGraw-Hill, pp. 110~112, 1975
- (4) P.L.B. Oxley and W.F. Hastings, "Predicting Tool-Life from Fundamental Properties and Cutting Conditions", Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 33~38, 1976
- (5) Mavin F. Devries, "Carbide Cutting Tool Wear Models", SME Technical paper MR 73-912, 1973
- (6) H. Takeyama and K. Uehara, "New Attempts for short Time Tool-Life Testing", Annals of the



- CIRP, Vol. 22, No. 1, pp.23~24, 1973
- (7) A. Bhattacharyya and I. Ham, "Annalysis of Tool Wear Part I : Theoretical Models of Flank Wear", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 91, No. 3, pp.790~798, 1969
- (8) 이종원, 김광준, "DDS의 이론 및 응용(I)", 대한기계학회지, 제 22 권, 제 6 호, pp.456~462, 1982
- (9) Y.I. Eigomayel and A.A. Zakaria, "Statistical Correlation of Tool Wear Parameters", ASME Paper 73-PROD-8, 1973
- (10) K. Hitomi, N. Nakamura and S. Inoue, "Reliability Analysis of CuttingTools", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 101, No. 2, pp. 185~190, 1979