

<論 文>

새로운 急速 工具壽命 試驗法에 관한 研究(Ⅱ)

—階段切削에 의한 試驗法 開發—

吳 良 均* · 鄭 東 潤**

(1986年 10月 17日 接受)

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

—The Development a New Testing Method of Step-Cutting—

Yang Kyun Oh and Dong Yoon Chung

Key Words: Step Cutting Method(계단 절삭법), Quick Tool-Life Testing Method(급속 공구 수명 시험법), Tool-Life Curve(공구수명 곡선), Wear Curve(마멸 곡선), Wear Criterion(마멸 한계치)

Abstract

In the previously reported Part I, 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 the following general equation was obtained

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

In this study the following step-cutting formula for the constants a, b and m in the above general model is derived by using step-cutting data

$$W_f = b(\tau - \tau_k) V^{m+1} + b \sum_{i=1}^k (\tau_i - \tau_{i-1}) V_i^m + a V_1^m$$

To check the validity of the above formula, the comparison is made between the tool-life equation inferred in this method and that inferred in the conventional tool-life testing method, when the wear criterion is 0.3 mm.

The equation obtained in the present method is

$$V(T')^{0.57} = 1763$$

whereas the equation obtained in the conventional tool-life testing method is

$$V(T)^{0.56} = 1605$$

The results of the above two formula are satisfactory and also verify the validity of the present research.

* 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

1. 緒 論

切削試驗을 통한 工具壽命試驗法에 대하여 近來의 研究動向은 工具의 磨滅機構를 근본적으로 해석하여 工具壽命을 예측하려는 노력과^(1~4) 함께 切削實驗에 소요되는 時間, 經費 및 努力을 줄이려는 試驗方法의 改善^(5~7)에 집중되어 왔다. 또한 産業의 발달에 의한 제품 의 고급화와 加工機械의 數值制御 추세에 따라 工具 磨滅의 in-process 計測方法에 대한 研究도 활발히 진행되고 있으나 現場에서 具備할 수 있는 공기현미경을 이용하여 간편하게 工具壽命을 구할 수 있는 방법이 되지 못하고 있다.

本 研究은 이와같은 問題의 해결을 목적으로 시작되 었으며 第 I 報⁽⁸⁾에서는 前 段階로서 既存 工具壽命試驗 法으로 얻은 實驗資料를 分析하여 切削時間에 대한 側面磨滅曲線의 一般모형을 구하였다. 工具의 磨滅은 매우 복잡한 현상이나 일반적으로 側面磨滅이 加工物의 表面粗度, 精密度 및 切削動力에 미치는 영향과 측정 상의 便宜 때문에 工具壽命을 지배하는 主 磨滅因子로 취급되고 있다.

本 研究은 第 I 報⁽⁸⁾의 결과를 이용하여 切削速度가 서로 다른 경우의 工具磨滅量을 單一工具에 集積하여 測定할 수 있는지의 가능성 여부를 검토한 후, 切削速度를 段階別로 변화시키면서 單一工具로 측정한 各 切削 速度에서의 磨滅量(段階切削資料라 한다)을 이용하여 側面磨滅曲線의 一般모형 常數를 결정할 수 있는 段階 切削公式을 유도하였다. 또한 결정된 一般모형 常數를 이용하여 Taylor 指數와 常數를 구할 수 있는 修正 Taylor 방정式을 제시하고, 工具壽命曲線을 구하였다 그리고 本 研究結果의 信賴性을 檢證하기 위하여 SM 45 C, P 20, 0.3 mm/rev., 1.5 mm(절삭깊이)의 절삭 조건에서 切削時間과 速度를 變數로 한 既存 試驗法의 결과와 비교하였다.

2. 階段切削理論

2.1 側面磨滅曲線의 一般모형

第 I 報⁽⁸⁾에서는 工具側面磨滅의 직선모형이 時間軸 의 한 점을 原點으로 하여 放射되는 直線群으로 가정될 수 있음을 밝혔으며, 이 경우 Taylor 工具壽命式

$$VT^n = C \tag{1}$$

의 Taylor 상수 C 가 마멸기준을 포함하고 있으므로 시간 이 고정될 때 마멸은 切削速度의 指數倍에 비례하

게 된다. 따라서 第 I 報⁽⁸⁾에서는 절삭시간 (t)와 속도 (V)를 함수로 하는 側面磨滅의 일반모형을 式 (2)와 같이 가정하였으며

$$W_f = (a + bt) V^m \tag{2}$$

既存 工具壽命試驗法에 의한 절삭실험자료의 수치해석 결과 式 (3)과 같은 결과를 얻었다.

$$W_f = (0.77263 \times 10^{-5} + 0.62515 \times 10^{-6} t) V^{1.7362} \tag{3}$$

2.2 階段切削公式의 展開

本 研究에서 전개할 階段切削理論은 單一工具에 여러 절삭속도의 磨滅을 集積하여 측정할 수 있다는 가정하에 展開된다. 이와같은 가정은 磨滅이 직선거동을 하므로 前 段階의 磨滅이 後 段階의 磨滅에 영향을 미치지 않을 것이라는 예측과 超硬工具의 性質을 근거한 것이다. Fig. 1(a)는 初期의 과도 磨滅에 의하여 wear land가 형성된 工具을 이용하여 高速 (V_1)에서 低速 (V_5)으로 切削速度를 變化시키면서 切削試驗을 수행하여 얻어진 時間 (τ)에 대한 工具磨滅曲線이다. 切削速度의 變化는 旋盤의 회전수를 고정하고 원통절삭을 할 때 얻을 수 있는 實驗의 편의상 高速에서 低速으로 하였다. Fig. 1(b)는 式 (2)의 一般 모형에 의한 各 切削 速度의 推定 磨滅曲線에 Fig. 1(a)에 의한 段階磨 滅量을 중첩시킨 것이다.

Fig. 1을 참조하여 式 (2)의 一般모형 상수 a, b 및 m 을 段階切削資料인 時間 τ 와 이에 대응하는 磨滅量 W_f 를 대입하여 段階切削 公式을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} (1) \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1 \text{ 이면} \\ t = \tau \end{aligned} \tag{4a}$$

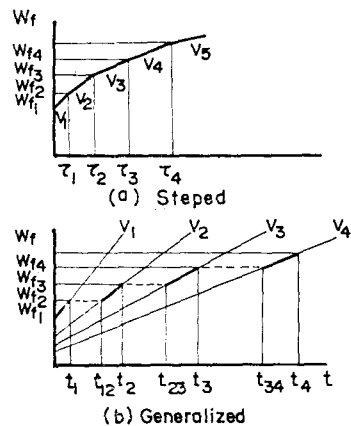


Fig. 1 Tool wear curve showing fit of step-cutting data

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \tau_1 \\
 W_f &= (a + bt) V_1^m \\
 &= (a + b\tau) V_1^m
 \end{aligned} \tag{4 b}$$

(2) $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ 이면

$$\begin{aligned}
 \tau &= t - t_{12} + t_1 \\
 t &= \tau + t_{12} - \tau_1 \\
 t_2 &= \tau_2 + t_{12} - \tau_1
 \end{aligned} \tag{5 a}$$

이며

$$\begin{aligned}
 W_f &= (a + bt) V_2^m \\
 &= [a + b(\tau + t_{12} - \tau_1)] V_2^m
 \end{aligned} \tag{5 c}$$

그런데 Fig.1(a)와 Fig. 1(b)에서 W_{f1} 은 V_1 과 V_2 의 경계값이므로

$$\begin{aligned}
 W_{f1} &= (a + bt_1) V_1^m = (a + bt_{12}) V_2^m \\
 \text{윗 식을 } t_{12} \text{로 정리하고 식 (4 a)를 이용하여 } t_1 \text{을} \\
 \tau_1 \text{으로 바꾸면} \\
 t_{12} &= \frac{1}{b} \left[(a + b\tau_1) \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^m - a \right]
 \end{aligned} \tag{5 d}$$

식 (5 d)를 식 (5 c)에 대입하여 정리하면

$$W_f = b(\tau - \tau_1) V_2^m + (a + b\tau_1) V_1^m \tag{5 e}$$

이 된다.

(3) $\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3$ 이면

$$\tau = t - t_{23} + t_2 - t_{12} + t_1 \tag{6 a}$$

이며 윗 식에 (4a), (5b)를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 \tau &= t - t_{23} + \tau_2 \\
 t &= \tau + t_{23} - \tau_2 \\
 t_3 &= \tau_3 + t_{23} - \tau_2
 \end{aligned} \tag{6 b}$$

가 된다. 이를 식 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned}
 W_f &= (a + bt) V_3^m \\
 &= [a + b(\tau + t_{23} - \tau_2)] V_3^m
 \end{aligned} \tag{6 c}$$

그런데 W_{f2} 는 역시 V_2 와 V_3 의 경계값이다. 그러므로

$$\begin{aligned}
 W_{f2} &= (a + bt_2) V_2^m = (a + bt_{23}) V_3^m \\
 \text{이며 이에 식 (5 b), 식 (5 d)를 대입하여 } t_{23} \text{로 정리} \\
 \text{하면} \\
 a + bt_{23} &= b(\tau_2 - \tau_1) \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^m \\
 &+ (a + b\tau_1) \left(\frac{V_1}{V_3} \right)^m
 \end{aligned} \tag{6 d}$$

이 된다. 식 (6 d)를 식 (6 c)에 대입하여 정리하면

$$W_f = b(\tau - \tau_2) V_3^m + b(\tau_2 - \tau_1) V_2^m + (a + b\tau_1) V_1^m \tag{6 e}$$

가 된다. 이런 과정을 계속하면 t 를 τ 로 환원한 일반 모델의 변형된 방정식을 얻을 수 있으며 이를 階段切削公式이라 정의하여 일반적인 경우로 표시하면 식 (7)과 같다.

$$W_f = b(\tau - \tau_k) V_{k+1}^m + b \sum_{i=1}^k (\tau_i - \tau_{i-1}) V_i^m + a V_1^m \tag{7}$$

즉, 식 (4 b), (5 e) 및 (6 e)는 윗 식 (7)의 특수한 경우임을 알 수 있다.

식 (7)은 一般모델식인 식 (2)에 各切削速度를 연속적으로 變化시키면서 單一工具에 集積하여 階段切削實驗으로부터 측정된 임의의 시간 τ 에 대응되는 資料를 代入하여 a, b 및 m 을 구하는 식이다.

2.3 一般모델 常數에 의한 工具壽命의 解法

선정된 磨滅의 한계치(wear criterion) W_{cr} 을 側面磨滅의 一般모델식에 대입하면 各切削速度 V 에 따른 工具壽命 T 를 구할 수 있다.

이제 Taylor 방정식과 식 (2)의 一般모델식을 비교하기 위하여 식 (2)에 W_{cr} 과 T 를 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$T + \frac{a}{b} = \frac{W_{cr}}{bV^m} \tag{8}$$

일정한 切削條件에서 a, b 는 常數이므로

$$T + \frac{a}{b} = T'$$

라고 하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 된다.

$$V(T')^{1/m} = \left(\frac{W_{cr}}{b} \right)^{1/m} \tag{9}$$

식 (9)와 Taylor 방정식을 비교하면 Taylor 지수 n 과 Taylor 상수 c 는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{1}{m} \\
 c &= \left(\frac{W_{cr}}{b} \right)^{1/m}
 \end{aligned} \tag{10}$$

그러므로 本 研究에서 제시한 一般모델식은 工具壽命 결정에 있어서 종래의 Taylor 理論에도 위배되지 않으며, 一般모델의 常數만 구하면 쉽게 工具壽命式을 구할 수 있다.

3. 切削實驗

實驗方法是 第 I 報⁽⁸⁾와 동일하다. 단, 單一工具에 여러 切削速度의 工具磨滅을 集積할 수 있다는 가정을 확인하기 위하여 切削速度 80, 100, 120, 140 및 160 m/min 을 연속적으로 임의로 變化시키면서 磨滅量을 單一工具에 集積하였다.

4. 結果 및 分析

4.1 單一工具에 集積한 側面磨減

Table 1은 절삭실험의 Case 별로 공구의 側面磨減 量을 나타낸 것이다. Case II와 Case III에서 나타난 바와 같이 한 工具에 集積하여 측정 한 동일 속도의 磨減 率은 前歷에 관계없이 거의 같다. 다만 Case I과 Case IV가 이들과 차이가 있는 것은 工具材의 均質性의 차이인 것으로 사료된다. Case I은 Case II, III와 동일 Lot.였으나 Case IV는 이들과 다른 Lot.였다. 그러나 측정에 사용한 공구현미경의 최소읽음 단위가 1/1000 mm 인 것을 감안하면 이들의 차이는 무시할 수 있으며 따라서 한 工具에 여러 切削速度帶의 磨減을 集積하여 측정하려는 가정은 타당한 것으로 사료된다.

Table 1 Comparison of wear rate on a tool

Cutting condition	Case	Wear rate (mm/min)
SM 45C Carbide P20 Velocity 120m/min Feed rate 0.3mm/rev Depth 1.5mm	I	2.885×10^{-3}
	II	2.818×10^{-3}
	III	2.793×10^{-3}
	IV	2.517×10^{-3}

(Note) Case I : The wear rate by the cutting conditions of 120m/min
 Case II : The wear rate by the cutting conditions of 120m/min (7.2min)→100m/min(10.75min)→120m/min(6.03min)
 Case III : The wear rate by the cutting condition of 120m/min(10.38min) after random cutting process, 140m/min→160m/min→80(m/min)→130m/min→90m/min
 Case IV : The wear rate with another Lot. of tools by the cutting conditions of 120m/min→180m/min →160m/min→140m/min→120m/min(11.92min)

4.2 階段切削 公式에 의한 一般모델의 常數 決定

식 (7)의 階段切削 公式에서 상수 a, b 및 m 을 구하기 위하여 實驗한 階段切削 資料는 Table 2와 같다. 식 (7)은 階段切削 速度의 順序에 관계가 없으므로 일반적인 경우의 해석을 목적으로 切削速度의 順序를 무작위로 선정하면서 실험하여 Table 2의 결과를

Table 2 Velocity, cutting time and wear relationship by step cutting method

	Velocity (m/min)	Time (min)	Wear (mm×10 ⁻³)
1	120	7.200	51
2	100	17.950	72
3	120	23.983	89
4	140	30.016	109
5	160	34.549	131
6	80	45.299	150
7	110	53.732	168
8	130	60.332	184
9	90	77.199	215
10	120	87.582	244
11	150	92.115	256

Feed rate 0.3 mm/rev. depth of cut 1.5 mm

얻은 것이다.

식 (7)이 Table 2의 實驗資料를 가장 가깝게 만족하는 상수 a, b 및 m 을 구하기 위하여 측정된 磨減值 (W_r)_{k+1}와 식 (7)에 의하여 추정된 磨減值 (\bar{W}_r)_{k+1}의 差의 제곱합을 식 (11)로

$$\phi_0 = \sum_{k=0}^k [(W_r)_{k+1} - (\bar{W}_r)_{k+1}]^2 \quad (11)$$

표시하자. 여기서 k 는 實驗資料의 數이다. 식 (11)을 최소로 하는 a, b 및 m 을 구하기 위하여 第 I 報⁽⁸⁾와 같이 Suh와 Radcliffe가 개발한 Program PCON을 수정하여 사용하였으며, 數值計算上의 不安定을 제거하기 위한 조건도

$$\begin{aligned} -1 < b \\ -1 < m < 10 \end{aligned}$$

으로 하였다. 數值計算에 의한 常數 a, b 및 m 과 數值計算의 反應檢定 ($1 \pm 0.05 \sqrt{\phi_0}$)의 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 constants and its verification by numerical analysis

a, b, m	$(1 \pm 0.05) \times \sqrt{\phi_0}$
$a = 0.7459 \times 10^{-5}$	0.7224 0.7565
$b = 0.62236 \times 10^{-6}$	0.6190 0.6285
$m = 1.75067$	1.7497 1.7518

이 결과는 식 (3)의 결과와 비교하여 큰 차이가 없

으며 본 數值解析의 프로그램에도 모순이 없음을 보여 주고 있다.

磨減量을 한 工具에 集積한 階段切削 實驗에 의하여 구한 側面磨減曲線의 一般모델식은 위 값을 대입하여 식 (12)와 같으며

$$W_s = (0.74059 \times 10^{-5} + 0.62236 \times 10^{-6}t) V^{1.75067} \quad (12)$$

Fig. 2는 이 식에 의하여 추정한 磨減曲線과 第I報⁽⁸⁾에서 나타낸 實測值를 비교한 것이다. Table 4는 식 (12)에 의하여 測定值와의 편차를 구한 것으로서 최대편차가 읽음오차의 범위를 벗어나고 있으나 標準편차는 읽음오차 범위내에 있으며 비록 같은 Lot.의 工具를 사용 하였더라도 工具와 가공물의 조건이 변경되었음을 감안하면 Table 4의 결과는 비교적 정확한 것이다. 따라서 本 研究에서는 工具壽命 試驗法의 한 방법으로서 側面磨減의 一般모델과 階段切削公式에 의한 解析法을 제안한다. 本 研究의 방법은 다음과 같은 두 가지 장점이 있다. 첫째, 有段變速 선반에는 무한걸이의 시편을 사용하지 않는 한 切削速度를 일정하게 유지하기가 매우 어렵다. 그러나 階段切削을 하면 旋盤 회전수를 고정하고 계속하여 같은 切削깊이의 원통切削을 하면 이 때의 移送방향 1 Pass의 切削이 한 階段의 切削에 해당된다. 그러므로 實驗이 매우 간편하다. 둘째, 한 切削速度에서의 부분적인 切削資料에 의

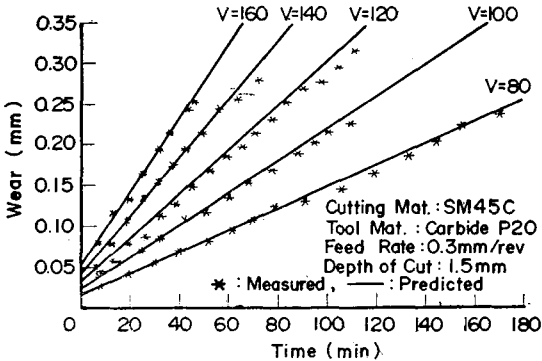


Fig. 2 Wear curves calculated by step-cutting results

Table 4 Error analysis by the step-cutting results

Velocity	Std. error	Max. error
80	0.0016	0.012
100	0.0021	0.016
120	0.0033	0.023
140	0.0027	0.023
160	0.0023	0.023

하여 全 切削速度를 지배하는 磨減曲線의 방정식을 구할 수 있으므로 實驗에 드는 經費를 크게 줄일 수 있다.

4.3 工具壽命의 決定

식 (12)의 W_s 값에 ISO에서 권장한 側面磨減의 限界值 $W_{cr}=0.3$ mm를 대입하면 切削速度 V 에 대한 工具壽命 T 의 관계는 식 (13)으로 표시되며 식 (9)에 의하여

$$0.3 = (0.74059 \times 10^{-5} + 0.62236 \times 10^{-6}T) V^{1.75067} \quad (13)$$

Taylor 방정식은 식 (14)로

$$V(T')^{1/1.75067} = \left(\frac{0.3}{0.62236 \times 10^{-6}} \right)^{1/1.75067} \quad (14)$$

표시된다. 식 (13)은 階段切削 公式으로 구한 工具壽命 曲線方程式이며 식 (14)는 식 (13)을 Taylor方程式으로 수정한 것이다. 위의 두 식에서 T 는 T' 에서 $-\frac{a}{b} = -11.9$ min.을 수정한 값이다. 이는 第I報⁽⁸⁾의 Fig. 2와 같이 각 速度에 대한 磨減曲線이 $-\frac{a}{b}$ 의 수정된 좌표점에서 放射되는 直線群으로 가정하는데서 기인된 것이다.

식 (10)에 의하여 本 切削條件의 Taylor指數 n 과 Taylor常數 C 는

$$n = 0.57$$

$$C = 1763$$

이며, 既存 工具壽命 試驗法으로 구한 이들 값은 $n = 0.56$ $C = 1605$ 이다. 이들 값의 비교에 의하여 本 研究의 階段切削理論으로 구한 工具壽命 資料가 상당한 신빙성을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 工具壽命 曲線으로서 點으로 표시된 既存 試驗值와 Taylor方程式에 의한 曲線이 階段切削 公式을 이용한 急速 工具壽命 試驗曲線과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

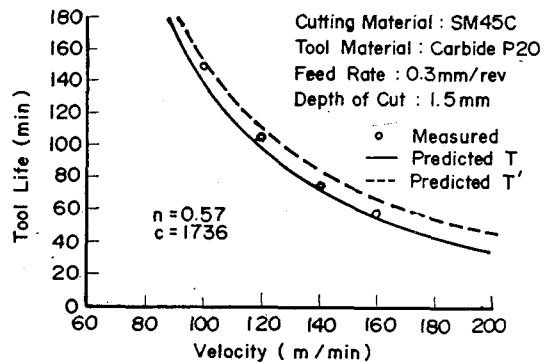


Fig. 3 Tool-Life curves calculated by step-cutting results

5. 結 論

參 考 文 獻

階段切削理論을 이용한 이상의 實驗과 考察을 통하여 本 研究는 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 切削速度는 旋盤 回轉數를 固定한 階段切削에 의하여 변화시키고 磨減量은 單一工具에 集積하여 측정하는 방법으로 실험한 階段切削公式는 다음과 같다.

$$W_f = b(\tau - \tau_k) V_{k+1} + b \sum_{i=1}^k (\tau_i - \tau_{i-1}) V_i^n + a V_1^m$$

(2) 側面磨減의 限界值(wear criterion) W_{cr} 이 결정되면 一般모델식에 의하여 工具壽命 T 와 切削速度 V 의 關係를 밝힌 Taylor 방정식은

$$V(T')^{1/m} = \left(\frac{W_{cr}}{b} \right)^{1/n} \quad \text{단, } T' = T + \frac{a}{b}$$

와 같으며 위 식에서 Taylor 指數 n 과 Taylor 常數 C 는 다음과 같다.

$$n = \frac{1}{m}$$

$$C = \left(\frac{W_{cr}}{b} \right)^{1/n}$$

(3) 本 研究의 階段切削公式에 의한 工具壽命 試驗法을 이용하면 既存 試驗法보다 훨씬 적은 노력과 經費로 工具壽命 資料를 구할 수 있다.

後 記

本 研究는 韓國科學財團의 研究費 지원을 받아 수행되었다.

- (1) H. Takeyama and R. Murata, "Basic Investigation of Tool Wear", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 85, No. 1, pp. 33~38, 1963
- (2) A. Bhattacharyya and I. Ham, "Analysis of Tool Wear Part I : Theoretical Models of Flank Wear," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 91, No. 3, pp. 790~798, 1969
- (3) A. Bhattacharyya, A. Ghosh and I. Ham, "Analysis of Tool wear Part II : Application of Flank Wear Models", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 92, No. 1, pp. 109~114, 1970
- (4) Y. Koren, "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 100, No. 1, pp. 103~109, 1978
- (5) G. Lorenz. "Determination of the Tool-Life Exponent from Quick Facing Tests", Annals of the CIRP, Vol. 12, No. 4, pp. 217~222, 1963
- (6) S.M. Wu, "Tool-Life Testing by Response Surface Methodology-Part I", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 86, No. 2, pp. 105~110, 1964
- (7) S.M. Wu, "Tool-Life Response Surface Methodology-Part II", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 86, No. 2, pp. 111~115, 1964
- (8) 吳良均·鄭東潤, "새로운 急速 工具壽命 試驗法에 관한 研究(I)", 대한기계학회논문집 제 10권, 제 2호, pp. 223~231, 1986