

“이 논문은 1986년도 문교부 대학 부설 연구소 지원 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음.”

應答表面法에 의한 切斷바이트의 工具壽命式에 關한 研究

A Study of Cut-off Tool Life Equation by Response Surface Methodology

金元鎰*, 李允景*, 南俊祐**, 宋地復***, 崔萬聖****
W. I. Kim, Y. K. Lee, J. W. Nam, J. B. Song, M. S. Choi

ABSTRACT

This paper presents a study of tool-life equation on cut-off test by the statistical approach, referred to as response surface methodology instead of a conventional one-variable at a time method. It is the merit of response surface methodology that the test time is reduced to minimize the size and accurate analysis can be done. The reliability of such an equation can also be estimated. Two independent variables, cutting speed and feed rate, were investigated. A first order modeling equation is presented in this project.

The results of this study are as follows that tool-life in cut-off operation is affected by cutting speed more than feed, and first order tool-life predicting equations are in good agreement with experimental results.

1. 緒 論

最近의 切削工具에는 高速切削의 必要性으로부터 切削力에 견딜 수 있도록 耐熱성이 좋은 材種이 많이 나오고 있다.

이러한 工具材로서는 超硬TiC系, Cermet 및 Ceramic 工具가 있고 共通點으로서는 靱성이 弱하고 工具壽命의 變動이 심하다는 것이다. 現在 全 生産라인의 自動化에의 研究는 設計에서부터 品質管理 그리고 出荷까지 完全 컴퓨터制御를 하도록 하는데까지 이르고 있다. 그러나 自動工程에서 重要한 切削工具의 有用

壽命을 決定하는데 있어서는 지난 수십년동안 이렇다 할만한 뚜렷한 成果가 없는 實情이다.

金屬切削加工에 있어서 工具壽命資料의 固有特性이라 할 수 있는 것은 그 變動幅이 매우 크다는 것이다. 이 變動幅은 工具壽命 模型과 工具壽命을 豫測하는데 매우 複雜한 要因으로 作用한다.

이런점으로 볼 때 加工의 經濟的 最適化를 꾀하기는 매우 어렵고 많은 實驗으로 이 變動幅을 줄이고자 하는 方法이 모색되어 왔다. 그러나 방대한 實驗을 하기 위해서는 實驗費用이 크게 增大하므로 工具壽命을 模型化하고

* 慶南大學校 機械工學科

** 國民大學校 機械設計學科

*** 釜山大學校 精密機械工學科

**** 釜山大學校 大學院

豫測할 수 있는 數學的 方法을 開發하여 工具壽命 變動幅을 줄일 수 있는 研究가 必要하다.

아울러 旋削의 切斷加工 側面에서 볼 때 工具壽命 變動뿐만이 아니고 그 自體의 특이한 메카니즘으로부터 切斷工具의 壽命은 그 變動幅이 매우 크므로 適切한 獨立變數 및 從屬變數에 따른 最通 工具壽命方程式을 만들지 않으면 안된다.

이제까지 工具壽命에 관한 研究는 F. W. Taylor 이래로 R. E. Devor⁽¹⁾ 등에 의해 행하여져 왔고 그들의 一般의인 傾向은 旋削의 境遇 加工變數와 工具壽命과의 關係를 나타낸 것이었다.

한편 S. M. Wu,⁽²⁾ K. S. Taraman,⁽³⁾ 등은 G. E. P. Box⁽⁴⁾가 提案한 應答表面法을 切斷加工實驗에 導入하여 이제까지의 研究보다 적은 量의 實驗으로 正確한 工具壽命式을 提案한 바 있다.

따라서 本 研究에서는 G. E. P. Box에 의해 開發된 應答表面法을 利用하여 切斷加工에서의 工具壽命方程式을 求한다.

2. 理論的 解析

G. E. P. Box에 의해 처음 提案된 應答表面法은 적은 量의 實驗으로 正確한 解析을 하기 위한 方法이다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 이 應答表面法에서는 目的函數의 從屬變數와 獨立變數사이의 關係를 나타내는 數學的 모델이 必要한데 이 모델의 開發에는 中央中疊設計(Central Composite Design)가 利用되었다.

2.1 擴張 Taylor 工具壽命式

獨立變數인 切削速度, 移送速度, 切削깊이와 從屬變數인 工具壽命과의 函數關係를 擴張된 Taylor 工具壽命方程式으로 表現하면 다음과 같다.

$$T = KV^\alpha f^\beta d^\gamma \dots\dots\dots (1)$$

단, 여기서 K, α, β, γ 는 實驗에 의해 결정되는 常數이다.

式(1)을 對數化해서 置換하면 切削速度 V , 移

送速度 f , 切削깊이 d 를 決定하므로써 工具壽命을 測定할 수 있게 된다.

$$\eta = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + B_3 x_3 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 η 는 對數形으로 나타낸 工具數命의 實際應答이고, X_1, X_2, X_3 는 V, f, d 를 各各 對數變換한 것이다. 또한 式(2)를 간단히 하면 다음과 같다.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \dots\dots\dots (3)$$

여기서 y 는 實驗에서 測定된 工具壽命의 對數값, b_0, b_1, b_2, b_3 는 各各 媒介變數 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 의 推定值이며 ϵ 는 實驗誤差이다.

2.2 媒介變數의 決定

앞절의 式(3)을 행렬形態로 쓰면 다음과 같다.

$$Y = X \cdot b + \epsilon \dots\dots\dots (4)$$

이때 誤差 ϵ 이 同一偏差 σ^2 , 즉 $\text{Var}(\epsilon) = I \cdot \sigma$ 이라하면 媒介變數 b 의 最少自乘計算값은 다음과 같다.

$$\hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T Y \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{또한 } \text{Var}(\hat{b}) = (X^T X)^{-1} \sigma^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Var}(\hat{Y}_0) = X_0 (X^T X)^{-1} X_0^T \sigma^2 \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $Y_0 = X_0 b$ 는 X_0 의 切削條件에서 工具壽命 推定값이다.

따라서 媒介變數 b 는 式(5)에 의해 獨立의 으로 決定되며 加工變數의 對數 變換값에 의한 수준(Level)이 決定되면 工具壽命式은 求해진다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置 및 實驗材料

實驗에 使用된 旋盤은 NC 旋盤(VARIANT-10)으로 普通旋盤보다 切削速度를 正確하고 一定하게 維持할 수 있을 뿐만 아니라 移送도 아주 작은 範圍에서부터 큰 範圍까지 多樣하게 할 수 있는 長點이 있다.

摩耗의 測定은 JENA 製 工具顯微鏡과 NI-

KON製 OPTIPHOTO-M組織顯微鏡을 사용했다. 또한 사용된 工具는 INSERT TYPE인 GV503이며 그 Tool Holder는 GVR2020-3이다. 被削材는 SM45C鋼으로 그 直徑과 길이는 $\phi 65 \times 500 \text{ mm}$ 로 하였으며 Tables 1, 2는 各各 그 化學成分과 機械的 性質을 表示한 것이다.

Table 1 Chemical composition of SM45C

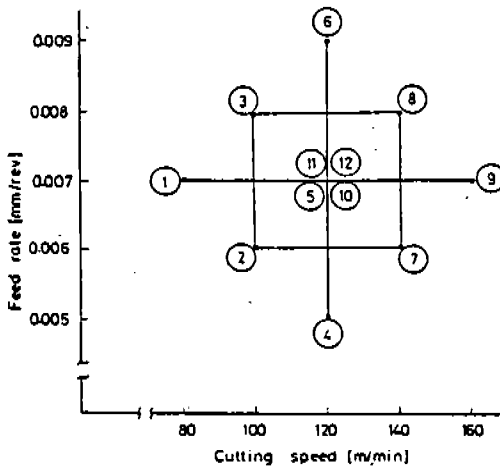
Composition	C	Si	Mn	P	S
Weight(%)	0.47	0.25	0.05	0.022	0.028

Table 2 Mechanical Properties of SM45C

Tensile Strength (kg/mm^2)	Yield Strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Hardness (HB)
71.3	36.45	18.6	206

3.2 實驗方法

中央中疊設計에 의한 切斷加工 實驗의 모델은 2變數로써 Fig.1과 같이 2次元이 되며 그 두개의 加工變數인 切削速度와 移送에 對하여 各各 5個의 수준을 두었다.



Block	Test Number				
I	1, 3, 4, 5, 7, 10				
II	2, 6, 8, 9, 10, 12				

Fig. 1 Central Composite Design used for Tool-Life Experiments

切斷加工된 試片의 形狀은 Fig.2와 같고 切削깊이는 10 mm로 一定하게 限定하여 實驗하였으며 加工時의 熱影響으로 인한 組織의 變化를 고려하여 切斷홈 사이의 間隔을 Insert 넓이(3 mm)以上으로 維持하였다.

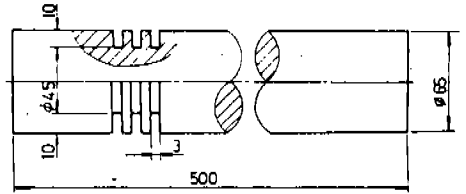


Fig.2 The test piece after cut-off operation

切削條件으로서는 平均 切削速度가 80, 100, 120, 140, 160 m/min이며 移送는 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009 mm/rev이다. 切削速度는 式(8)에 의한 平均切削速度, 즉 各各의 回轉數에 對해 $\phi 60 \text{ mm}$ 일때의 速度이다.

$$V = \frac{((D_i + D_o)/2)N}{1000} \dots\dots\dots (8)$$

Table 3은 各 切削條件에 對應하는 Coding 값을 나타내고 있다.

Table 3 Levels of variable and coding identification

Level	cutting speed		feed rate	Coding	
	$V(\text{m/min})$	$N(\text{rpm})$	(mm/rev)	X_1	X_2
Highest	160	878	0.0009	-2.326	-2.267
High	140	768	0.0008	-1.000	-1.000
Center	120	658	0.0007	-0.083	-0.072
Low	100	548	0.0006	1.000	1.000
Lowest	80	439	0.0005	1.794	1.819

4. 實驗結果 및 考察

4.1 切斷加工에 있어서의 플랭크摩耗

切斷加工에 있어서의 플랭크摩耗로 인한 工具壽命은 切削速度와 移送의 加工變數에 의해 決定된다. 여기서 플랭크摩耗는 工具側面(flanck or clearance surface)의 摩耗로써 切削方向과 平行한 摩耗幅을 形成하게 되고 摩耗된 部位의 平均幅으로 表示한다.

일반적으로 切削을 행한 工具는 再研削의 經濟性이나 加工面의 거칠기 등을 고려하여 工具壽命을 決定하는 바 여기에서는 超硬切斷

工具에 있어서 現場에서 많이 사용되는 工具 壽命基準인 JIS 의 0.2 mm의 플랭크 摩耗幅을 適用하였다.

實驗資料 Table 4 에 의해 各 切削條件에서 구한 플랭크 摩耗의 進行曲線의 例가 Fig. 3 이다. 그림에서 볼 때, 切斷加工에서 移送를 各各 0.006, 0.007, 0.008 mm/rev 으로 하였을 때 切削速度의 變化에 따른 플랭크 摩耗幅 V_B 는 切削時間 T 에 대해 거의 直線의 으로 增加하고 있다. 이 경우 모델식(1)의 適合性은 切削速度 100-140 m/min 범위내에서 式(1)에 近似시킬 수 있다고 생각된다. 實驗條件은 다르지만 他文獻^{(1),(2),(7),(8)}에서 이와 같은 傾向이 보여지고 있다.

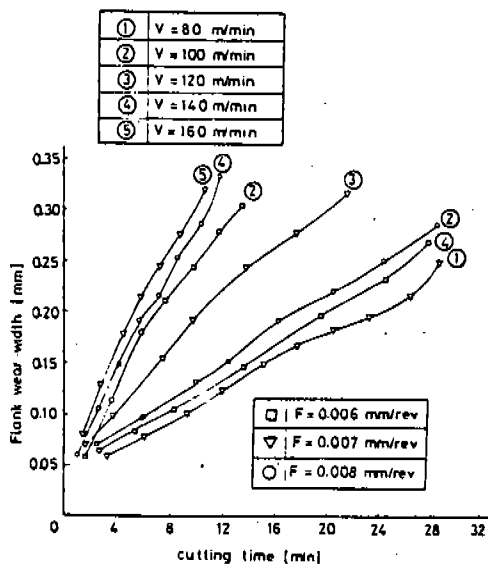


Fig. 3 Crater wear width versus cutting time at various cutting speed

Table 4 Cutting time and Flank were width

1. $V = 80 \text{ m/min}$ $F = 0.007 \text{ mm/rev}$			
T [min] cutting time	V_B [mm] wear width	T [min] cutting time	V_B [mm] wear width
2.933	0.077	17.600	0.174
5.866	0.087	20.533	0.182
8.800	0.118	23.466	0.194
11.733	0.127	26.400	0.221
14.666	0.158	29.333	0.249

2. $V = 100 \text{ m/min}$ $F = 0.006 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
2.750	0.062	19.250	0.206
5.500	0.081	24.750	0.243
8.250	0.102	27.300	0.272
13.750	0.142		

3. $V = 100 \text{ m/min}$ $F = 0.008 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
2.050	0.062	20.500	0.219
6.150	0.092	24.600	0.250
10.250	0.131	28.700	0.285
14.350	0.151	32.800	0.335
16.400	0.189		

4. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.005 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.517	0.058	16.683	0.256
4.550	0.088	19.717	0.270
7.583	0.127	22.750	0.294
10.617	0.174	24.267	0.323
13.650	0.224		

5. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.007 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.967	0.067	13.767	0.239
3.933	0.093	17.700	0.275
7.867	0.152	21.633	0.314
9.833	0.188		

6. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.009 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
2.800	0.787	14.000	0.257
5.600	0.129	16.800	0.291
8.400	0.187	19.600	0.324
11.200	0.225		

7. $V = 140 \text{ m/min}$ $F = 0.006 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.933	0.059	9.667	0.240
3.867	0.112	11.600	0.276
5.800	0.177	13.533	0.301
7.733	0.208		

8. $V = 140 \text{ m/min}$ $F = 0.008 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.483	0.059	7.417	0.212
2.967	0.106	8.900	0.252
4.450	0.148	10.383	0.287
5.933	0.190	11.867	0.328

9. $V = 160 \text{ m/min}$ $F = 0.007 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.450	0.083	7.250	0.249
2.900	0.131	8.700	0.275
4.350	0.179	10.150	0.323
5.800	0.213		

10. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.007 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.417	0.053	12.753	0.242
4.251	0.096	15.587	0.268
7.085	0.157	18.421	0.302
9.919	0.185	21.255	0.324

11. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.007 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.350	0.047	12.150	0.224
4.050	0.077	14.850	0.238
6.750	0.132	17.550	0.279
9.450	0.189	20.250	0.313

12. $V = 120 \text{ m/min}$ $F = 0.009 \text{ mm/rev}$			
T	V_B	T	V_B
1.483	0.057	13.347	0.236
4.449	0.088	16.313	0.258
7.415	0.132	19.279	0.289
10.381	0.198	22.245	0.327

여기서 볼 때 切削速度가 100 m/min 일 때 工具壽命은 17.5 min으로 140 m/min 일 때의 工具壽命 17.15 min 보다 約 2.4 배임을 보여주고, 切削速度가 80, 120, 160 m/min 일 때 工具壽命은 各各 24.15, 10.20, 5.45 min으로 切削速度 160 m/min에 대하여 4.4, 1.9 배로 나타났으며, 切削速度 100, 140 m/min에 대한 工

具壽命은 各各 17.15, 6.50 min으로 100 m/min 일 때가 140 m/min 일 때보다 約 2.6 배 가량 길었음을 보여준다. 또한 Fig. 4는 100, 120, 140 m/min의 切削速度에 대해 移送이 0.005 - 0.009 mm/rev일 때의 플랭크 摩耗幅과 切削時間과의 結果를 나타낸 것으로서 最終摩耗量은 平均 0.311 mm이다. 이 摩耗量은 보통의 旋削加工에서 구한 摩耗量의 0.267 mm⁽⁹⁾ 보다 매우 크다는 것을 알 수 있다.

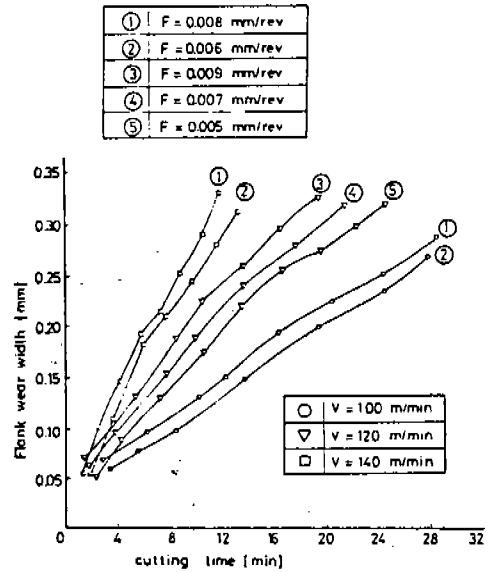


Fig. 4 Crater wear width versus cutting time at various feed rate

여기서 볼 때 100 m/min의 切削速度에 대해 移送이 0.005, 0.007, 0.009 mm/rev 일 때의 工具壽命은 各各 12.90, 10.20, 9.85 min임을 보여주고 있으며, 切削速度 140 m/min 일 때 移送 0.006, 0.008 mm/rev로 하였을 때는 工具壽命이 各各 7.25, 6.50 min임을 보여준다.

따라서 Figs. 3.4에서 알 수 있듯이 工具壽命은 切削速度에 따라 크게 影響을 받으며 移送의 變化에 대해서는 影響이 적음을 알 수 있다.

4.2 工具壽命 方程式

앞절의 Figs. 3.4에서 알 수 있듯이 切斷加工에 있어서 工具壽命은 移送보다는 切削速度

에 더 민감함을 알 수 있다.

Table 4를 理論解析에서와 같은 方法으로 求한 1차모델의 工具壽命式은 다음과 같다.

$$\hat{y} = 2.582 - 0.266X_1 + 0.059X_2 \dots\dots\dots (9)$$

Table 5는 實驗結果인 工具壽命 T와 式(9)로부터 求한 工具壽命 T'를 나타내고 있으며

Fig. 5는 $X_2 = 0.072$ ($f = 0.007$ mm/rev)에서 X_1 의 變化에 대해 實際實驗으로 測定된 工具壽命 T와 應答表面法에 의한 工具壽命값 T'를 圖示하고 있고, Fig. 6에서는 $X_1 = 0.083$ ($V = 120$ m/min)일때 X_2 의 變化에 대해 T와 T'를 圖示하고 있다.

여기서 알 수 있듯이 實際의 工具壽命과 理

論적으로 求한 工具壽命과는 거의 一致함을 볼 수 있다.

5. 結 論

旋削에 있어서 切斷加工의 摩耗實驗으로 應答表面法에 의한 工具壽命式을 誘導해 내었으며 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 切斷加工의 工具壽命은 移送보다는 切削速度에 의해 더 크게 影響을 받는다.
- 2) 應答表面法에 의해 적은 量의 實驗으로 正確한 切斷加工時의 工具壽命式을 求할 수 있다.
- 3) 實驗으로 求한 工具壽命값과 1차모델式에 의한 工具壽命값은 잘 一致하였다.

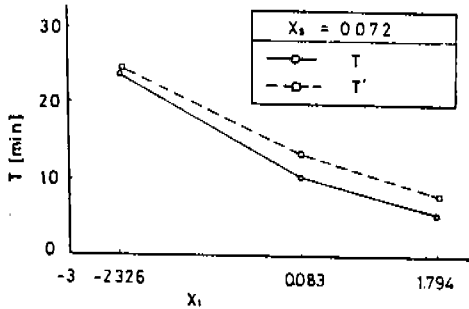


Fig. 5 Tool Life-cutting speed's coding

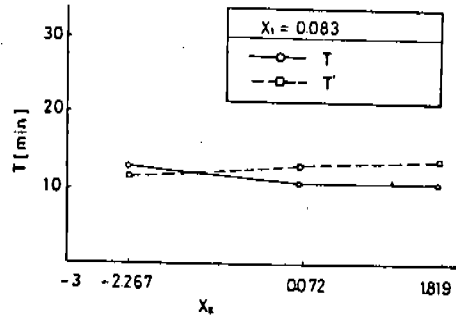


Fig. 6 Tool Life-feed rates coding

Table 5 Cutting conditions, codings and tool-Life results

Block No	Test No	cutting speed [m/min]	feed rate [mm/rev]	coding		T	y	T'	y'	
				X ₁	X ₂					
I	1	80	0.007	-2.326	0.072	24.15	3.184	24.65	3.205	
	3	100	0.008	-1.000	1.000	17.15	2.842	18.30	2.907	
	4	120	0.005	0.083	-2.267	0.072	12.90	2.557	11.30	2.426
	5	120	0.007	0.083	0.072	10.20	2.322	13.00	2.564	
	7	140	0.006	1.000	-1.000	7.25	1.981	9.55	2.257	
	10	120	0.007	0.083	0.072	10.10	2.313	13.00	2.564	
II	2	100	0.006	-1.000	-1.000	19.00	2.944	16.30	2.789	
	6	120	0.009	0.083	1.819	9.85	2.287	14.40	2.667	
	8	140	0.008	1.000	1.000	6.50	1.872	10.75	2.375	
	9	160	0.007	1.794	0.072	5.45	1.696	8.20	2.109	
	11	120	0.007	0.083	0.072	10.30	2.332	13.00	2.564	
	12	120	0.007	0.083	0.072	10.50	2.351	13.00	2.564	

REFERENCES

1. R.E. Devor, "Tool Life Variation and its influence on the Development of Tool Life Models", Trans. ASME, Vol.99, pp.578-584 (1977)
2. S.M. Wu, "An Exploratory Study of Taylor's Tool Life Equation by Power Transformations", Trans. ASME, Vol.88, pp.81-92 (1966)
3. K.S. Taraman, "Application of Response Surface Methodology to the Selection of Machining Variable", Trans. AIIE, Vol.4, pp.111-115 (1972)
4. G.E.P. Box, "The Exploration and Exploitation of Response Surface, Some General Considerations and Examples", Biometrics, Vol.10, p.16 (1954)
5. A. Bhattacharyya, "Analysis of Tool Wear Part I, Part II", Trans. ASME, Vol.91, pp.790-798, Vol.92, pp.109-114 (1969, 1970)
6. E. Lenz, "Investigation of the Flank Wear of Cemented Carbide Tools", Trans. ASME, Vol.98, pp.246-250 (1976)
7. S.M. Wu, "Tool Life Testing by Response Surface Methodology", Parts I and 2, Trans. ASME, Vol.86, pp.105-116 (1964)
8. 藤井 義也, "切削工具の逃げ面摩耗からみた壽命變動の解析", 精密機械, 445 號, pp. 77 ~ 83 (1978)
9. 佐久間 敬三, 瀬戸雅 之, "切削様式が異なる場合の工具逃げ面摩耗特性", 日本機械學會論文集, 47 卷, 414 號, pp. 211 ~ 222 (1981)
10. Wager, J.G., and Barash, M.M., "Study of the Distribution of the Life of HSS Tools", Trans. ASME, Vol.93, pp.1044-1050 (1971)
11. Y. Koren, "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", Trans. ASME, Vol.100, pp.103-109 (1978)
12. M.M. Tseng, "On the Measurement and Propagation of Flank Wear in Cutting Tools", Trans. ASME, Vol.101, pp.109-115 (1979)