

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 (지방대학육성) 학술연구 조성비에 의하여 연구 되었음.

SUS304의 切削性에 관한 研究

임 경 연*, 유 기 현*, 정 진 용*, 서 남 섭**

A Study on the Machinability of SUS304

Kyoung-Yeon Lim*, Ki-Hyun Yu*, Chin-Yong Cheong*, Nam-Seob Seo**

ABSTRACT

SUS304 is wellknown as difficult-to-machine materials. It is easy to appear workhardened, and workhardening is one of the causes of groove wear on the tool. In this paper, the author would like to compare the width of flank wear with that of groove wear, and to find whether the groove wear can be used as a criterion of a tool life. The design of the twelve tests provides three levels for each variable (speed : 200m/min, 118m/min, 70m/min; feed : 0.3mm/rev, 0.17mm/rev, 0.1mm/rev; depth of cut : 0.4mm, 0.28mm, 0.2mm). The study of tool-life testing by statistical technique follows usual most scientific sequence. So the tool-life predicting equation is calculated by the method of least squares. The overall adequacy of the model can be verified by the analysis of variance. The results obtained are as follows : 1) When SUS304 is cut in 200(m/min), the width of flank wear is much larger than that of groove wear. 2) In cutting speed 118m/min, flank wear is a little larger than groove wear and in the cutting speed 70m/min, the latter is a little larger so that it is reasonable to determine the tool life according the criterion by groove wear in the low cutting speed (less than 70m/min). 3) Owing to the burr the depth of engagement along the cutting edge is extended toward the shank.

Key Words : Difficult-to-Machine Material (난삭재), Workhardening (가공경화), Depth of engagement (물림깊이)

1. 서 론

최신의 切削加工 技術의 발달로 일반 가공 재료의

절삭에서는 自動化 및 無人化가 급속도로 정착하고 있다. 그러나 절삭 데이터가 풍부하지 못한 難削材의 경우는 그러하지 못하며, 난삭재는 시대의 발전에 따라

* 전북대학교 대학원 기계과

** 전북대학교 기계과 (정회원)

新素材라는 이름으로 계속 出現한다.

따라서 항공기 산업, 우주 산업, 화력 발전, 원자력 발전이나 석유 화학 플랜트분야에 많이 쓰이는 난삭재의 절삭에 있어서도 自動化 생산시스템의 효율적 운용과 고도의 정밀도를 위해 工具壽命의 예측은 이 시대의 필수 불가결한 요청이다. 통상의 공구수명 기준인 크레이터(crater) 마멸과 플랭크(flank) 마멸의 사용으로 다른 부위의 손상은 간과되고 있는 실정이다. 신소재의 개발에 따라 최근에는 크레이터 마멸 또는 플랭크 마멸량에 의한 통상적 공구수명 판정법을 일괄적으로 적용하기 보다는 신소재의 화학적, 물리적 및 기계적 성질에서 기인되는 공구마멸 특성에 따른 별도의 공구수명 판정법과 재래의 판정법을 포함하여 종합적으로 판정하는 것이 보다 합리적이라는 주장이⁽¹⁾ 일고 있다.

용도가 다양한 스테인레스강의 일종의 SUS304는 난삭성 재료의 일종으로서 톱니형칩을 생성시키며, 이로 인하여 切削力의 변동이 심하고, 加工硬化가 생기기 쉬워 그루브 마멸(groove wear)이 심한 것으로 알려져 있다. Ueda등은 티타늄 합금과 SUS304등의 절삭에서 톱니형 칩이 발생할 경우 공구마멸 및 난삭성에 대하여 연구를 수행하여 왔다. 그동안 그루브 마멸의 형성에 관한 논문⁽²⁾은 다수 있으나 그루브 마멸의 진전과 플랭크 마멸의 진전도의 비교에 의한 공구수명 판정의 가능성을 타진한 논문은 찾아보기가 힘든 실정이다.

따라서 本 研究에서는 그루브 마멸의 진행과정과 공구수명 기준으로써의 가능성과 절삭력의 변동⁽³⁾에 관하여 論하고자 한다. 또한 절삭에서 중요한 인자들에 의한 공구수명의 豫測을 統計學의 方法⁽⁴⁾에 따라 導出하고자 한다.

2. 이론적 배경

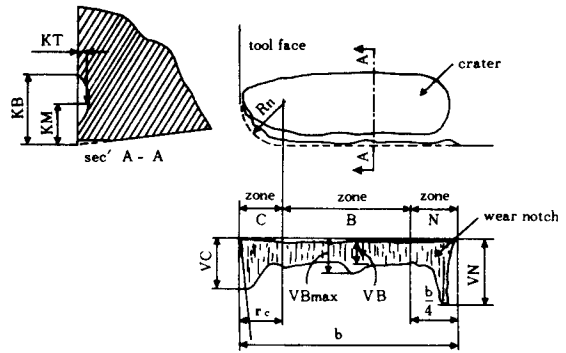
2-1. 절삭공구의 마멸 형태⁽⁵⁾

절삭시 절삭공구에 나타나는 대표적인 마멸은 chip이 공구 경사면을 유동할때 생기는 크레이터 磨滅과 가공면과의 摩擦에 의한 플랭크 磨滅이 있다. 다음의 Fig. 1은 공구의 일반적인 마멸 형태⁽⁶⁾를 보여준다.

2-2. 공구수명의 判定基準

공구수명의 판정기준으로는 다음과 같은 것이 권장되고 있다.

i 가공면의 光澤에 의한 판정



- VC : 공구 corner의 마멸폭
- VB : flank 마멸의 평균 마멸폭
- KT : crater의 최대 깊이
- KB : crater의 최대 길이
- VN : flank의 groove 마멸
- VB_{max} : flank의 최대 마멸폭
- KM : 인선에서 crater 중심까지의 길이

Fig. 1 Features of single-tool wear

ii 가공물의 치수변화에 의한 판정

iii 切削抵抗의 증대에 의한 판정

iv 공구의 크레이터 또는 플랭크 마멸에 의한 판정

이중에서 크레이터 磨滅과 플랭크 磨滅이 가장 보편적으로 사용되고 있는 공구수명 판정기준이다. ISO에서는 아래와 같은 상세한 기준을 추천하고 있다.

carbide 工具에 대하여⁽⁷⁾

- (a) B구역의 정상적인 마멸에 있어서 $VB=0.3(\text{mm})$
- (b) B구역의 비정상적인 마멸에 있어서 $VB_{\text{max}}=0.6(\text{mm})$
- (c) f를 移送(feed)이라 하면 $KT=(0.06+0.3f)(\text{mm})$
- (d) N구역에서 그루브마멸이 심한 경우의 추천값 $VN=1.0(\text{mm})$

2-3. 공구수명식의 수학적 모델

어느 특수 조건하에서 가공재료, 공구재료, 공구형상이 정하여 질때 공구수명에 가장 큰 영향을 주는 것은 절삭속도이다. 따라서 절삭의 최적 조건을 구하기 위해서는 공구수명과 절삭속도의 관계를 알아야 한다. 일찌기 Taylor는 다음과 같은 식을 발표하였다.

$$V T^n = C \quad (1)$$

여기서, n 및 c : 상수, V : 절삭속도, T : 공구수명이다.

그러나, 공구의 기하학적 형상, 이송 및 물림깊이

등을 일정하게 하는 조건에서 성립되는 식으로서 실험실의 실험적 의미 외에는 실제에 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 본연구에서는 이송과 물림깊이를 인자로 포함시키므로써 Taylor식을 다음과 같이 확정하였다.

$$V T^n f^m d^p = C \quad (2)$$

여기서 T는 공구수명, C는 상수이며 n, m, p는 지수로서 절삭조건에 따라서 변하는 상수이다. 식(2)의 양변에 대수를 취하면,

$$\ln V + n \ln T + m \ln f + p \ln d = \ln C \quad (3)$$

이다.

식(3)를 $\ln T$ 에 관해 정리하고 각각 y 는 $\ln T$, α_0 는 $(1/n) \ln C$, α_1 는 $-(1/n)$, α_2 는 $-(m/n)$, α_3 는 $-(p/n)$ 이다. 또 x_1, x_2, x_3 는 속도, 이송, 물림깊이의 대수값이다.

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 \quad (4)$$

식(4)를 본 실험에서는 coding을 위하여 x_1, x_2, x_3 을 포함한 식으로 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (5)$$

여기에서 y 값은 실험되어진 공구수명 값이며, 실험결과에 의한 상수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 는 最小自乘法로 구할 수 있다.

3. 실험조건 및 실험

3-1. 被削材 및 工具

本 실험에서 사용된 피삭재는 오스트나이트(austenite)계인 SUS304 ($\phi 80 \times 500$ mm)이며, 주요化學的 組成은 다음의 Table 1.에서와 같다.

Table 1. Chemical compositions of SUS304 (wt, %)

Chemical compositions						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	1.00	2.00	0.45	0.03	8.0-10.0	18.0-20.0

切削工具는 throw-away carbide insert tip을, 공구홀더는 top-clamping type을 사용하였다. 공구각을 변환시킬 수 있는 준 이차원 적삭용 치구에 의해 형성된 공구경사각은 5° , 여유각은 6° 이다. 아래의 Table 2.는 공구와 공구홀더의 규격을 보여준다.

Table 2. Specification of tool

	Standard	Grade
tip	TPGN 160304 A. S. A. 321	P20
holder	CTGPR 2020 K16	

3-2. 實驗裝置

本 실험에서 사용된 실험장치 및 기기로는 고속 정밀 선반, 절삭저항을 측정하기 위하여 압전형, 공구동력계(tool dynamometer), 증폭기(charge amplifier), 공구각을 바꿀 수 있는 치구, A/D converter, 절삭저항의 data-acquisition을 행하기 위한 computer, 마멸량을 측정하기 위한 공구현미경과 SEM, 물림깊이의 조정을 위한 정밀도가 1/1000mm인 dial indicator가 있다.

3-3. 實驗 條件의 設定

3-3-1. 실험 디자인

공구수명에 영향을 미치는 절삭속도(v), 이송(f), 물림깊이(d)를 3 因子로 하여 실험 계획 하였다. 정육면체로 이루어진 x_1, x_2, x_3 의 3방향 입체좌표에서 因子效果의 분석을 위하여 2개의 block으로 나눈 후, 그 중심에 원점을 정한 후 실험조건을 설정한다.

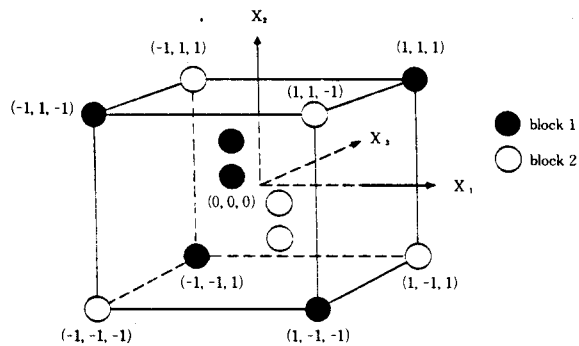


Fig. 2 Design of cutting conditions

3-3-2. 實驗 條件의 選擇

실험 조건은 3개의 因子에 각기 3개의 水準을 설정하여 이들의 조합으로 설정하였다. 다음의 Table 3.은 실험 조건을 보여주고 있다.

coding을 위한 각각의 식은 다음과 같다. x_1, x_2, x_3 는 각각 속도, 이송, 물림깊이의 coding 값이다.

Table 3. Cutting conditions and codings of experimental factors

level	velocity (m/min)	feed (mm/rev)	depth of engagement (mm)	coding		
				X ₁	X ₂	X ₃
high	200	0.3	0.4	1	1	1
center	118	0.17	0.28	0	0	0
low	70	0.1	0.2	-1	-1	-1

Table 4. Design of cutting conditions

velocity (m/min)	feed (mm/rev)	depth of engagement (mm)	coding		
			X ₁	X ₂	X ₃
200	0.1	0.2	1	-1	-1
		0.4	1	-1	1
	0.3	0.2	1	1	-1
		0.4	1	1	-1
70	0.1	0.2	-1	-1	-1
		0.4	-1	-1	1
	0.3	0.2	-1	1	-1
		0.4	-1	1	1
118	0.17	0.28	0	0	0

$$X_1 = \frac{2(\ln V - \ln 200)}{(\ln 200 - \ln 70)} + 1 \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{2(\ln f - \ln 0.3)}{(\ln 0.3 - \ln 0.1)} + 1 \quad (7)$$

$$X_3 = \frac{2(\ln d - \ln 0.4)}{(\ln 0.4 - \ln 0.2)} + 1 \quad (8)$$

3-3-3. 實驗 條件의 選擇

정육면체의 중심선을 기준으로 낮은 수준을 -1로 하고, 높은 수준을 1로하여 Table 4. 와 같은 실험인자를 구성한다.

3-4. 실험

실험은 고속 정밀선반에 가공물을 물리고, 자유로이 공구각을 바꿀 수 있는 공구 홀더에 공구동력계를 장착하고 throw-away-insert tip을 사용하여 SUS304를 선정된 절삭조건에 따라 진식절삭을 행하였다. 공구동력계와 A/D converter를 이용하여 매 절삭시 0.1초 동안에 256개의 절삭력 data를 받아들여 8bit computer로 plot 하도록 프로그램 되어져 있다. 마멸의 진행과정을 알아보기 위하여, 일정시간 후에 tip의 측면에

발생하는 플래그마멸의 평균폭을 공구현미경을 사용하여 0.001mm까지 측정하였다. 측정에서 얻어진 실험 data를 16 bit computer에서 시간에 대한 마멸량 또는 절삭력을 그래프화 하였으며, 통계적 방법에 의해 공구수명식을 유도하였다. 정해진 조건의 값으로 이송과 물림깊이는 일정한 값을 유지했으나, 절삭속도는 가공물 직경의 변화에 따라 절삭속도가 변하므로 선반 주축의 회전수를 조절하여 5% 정도의 오차범위를 유지하였다.

4. 실험결과 및 고찰

VB=0.3(mm)을 기준으로한 각 조건에서의 실측 데이터에 의한 공구수명 값은 Table 5. 와 같다.

이 실측값을 토대로 회귀분석에 의해 추정된 회귀모형과 공구수명식은 다음과 같다.

$$y = 2.5044 - 1.4205 X_1 - 0.7592 X_2 - 0.3759 X_3 \quad (9)$$

식(9)을 대수형으로 고치면 식(10)으로 전환할 수 있다.

$$\ln T = 11.6324 - 2.7060 \ln V - 1.3817 \ln f - 1.0826 \ln d \quad (10)$$

식(10)을 식(2)의 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$V T^{0.37} f^{0.51} d^{0.40} = e^{4.30} \quad (11)$$

식(11)로부터 얻을 수 있는 예상 공구수명으로부터 Table 6과 같이 95% 신뢰도를 갖는 공구수명 구간을 구하였다.

Table 7.은 추정된 회귀방정식의 정도를 측정하기 위하여 작성한 분산분석표이다.

F-검정의 결과는 $F_0 = 7.2948 / 0.0772 = 94.487 > 4.070$ 이므로 회귀변동은 有意하다. 決定係數 $R^2 = 0.9726$ 으로 총변동중에서 공구수명식에서 나타난 바와 같이, 속

Table 5. Measured tool lives under the given conditions

velocity (m/min)	feed (mm/rev)	depth (mm)	coding			tool-life (min)
			x ₁	x ₂	x ₃	
200	0.1	0.2	1	-1	-1	7.5
		0.4	1	-1	1	4.0
	0.3	0.2	1	1	-1	1.7
		0.4	1	1	1	0.8
70	0.1	0.2	-1	-1	-1	130.0
		0.4	-1	-1	1	64.0
	0.3	0.2	-1	1	-1	32.5
		0.4	-1	1	1	13.0
118	0.17	0.28	0	0	0	16.5
						17.0
						16.0
						17.5

Table 6. Estimated tool-from confidential intervals

TL	Y	EY	(Y-EY) ²	IY	IT
7.5	2.01	2.219	0.04168	1.79-2.65	5.96- 14.19
32.5	3.48	3.542	0.00364	3.11-3.98	22.37- 53.27
64.0	4.16	4.308	0.02230	3.87-4.74	48.15-114.66
0.8	-0.22	-0.051	0.2954	-0.48-0.38	0.62- 1.47
16.5	2.80	2.549	0.06494	2.36-2.73	10.63- 15.39
17.0	2.83	2.549	0.28471	2.36-2.73	10.63- 15.39
130.0	4.87	5.060	0.03706	4.63-5.49	102.13-243.18
1.7	0.53	0.701	0.02888	0.27-1.13	1.31- 3.11
4.0	1.39	1.467	0.00655	1.03-1.90	2.81- 6.69
13.0	2.56	2.790	0.05050	2.36-3.22	10.55- 25.12
16.0	2.77	2.549	0.22413	2.36-2.73	10.63- 15.39
17.5	2.86	2.549	0.09839	2.36-2.73	10.63- 15.39

TL : measured tool life

Y : logarithmic scale of TL

EY : logarithmic scale of estimated tool life

(Y-EY)² : square of residuals

IY : logarithmic scale of estimated tool life from confidence intervals

IT : estimated tool life from confidence intervals

Table 7. Analysis of Variance (95% confidential interval)

	S	ψ	V	F _o	F (0.05)
R	21.8844	3	7.2948	94.487	4.070
E	0.6176	8	0.0772		
T	22.5021	11	R ²	0.9726	

도, 이송, 물립깊이의 크기 순으로 영향을 미침을 알 수 있다. 마멸의 형태면에 있어서 속도가 200(m/min)인 경우에 뚜렷한 삼각모양의 마멸을 형성하며, 속도 118(m/min)와 속도 70(m/min)의 경우는 다소 전형적인 플랭크 마멸을 형성한다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 시간에 대한 플랭크 마멸과 그루브 마멸의 성장을 나타낸 그래프이다.

마멸의 성장면에서 속도가 200(m/min)일 때에는 거의 그루브 마멸이 형성되지 않고, 속도 118(m/min)와 70(m/min)일 때에는 예상처럼 급속한 그루브 마멸을 형성하지 않고, 경향에 있어서 플랭크 마멸의 성장과 유사하다. 또 이 속도면에서 처음 몇분은 그루브 마멸

이 플랭크 마멸보다 약간 큼을 알 수 있다. 加工硬化나 凝着으로 기인하는 그루브 마멸은 burr의 발생원인이 되고, burr의 발생과 성장은 다시 그루브 마멸 영역을 확대시킨다. I. S. O.에서는 그루브 마멸이 심한 경우에는 $VB_N=1.0$ (mm)를 공구수명 기준으로 추천하고 있으나 본 실험에서는 적용할 수 없음을 알 수 있다. Fig. 7에서 Fig. 15까지는 시간에 대한 플랭크 마멸과 절삭력에 대한 그래프이다. 切削力의 경우에 주절삭력 F_c (kg)과 이송분력 F_f (kg)은 그다지 변화가 없으며, 배분력 F_r (kg)의 경우에 2.5배 가량 증가함은 예측한 바와 같다.

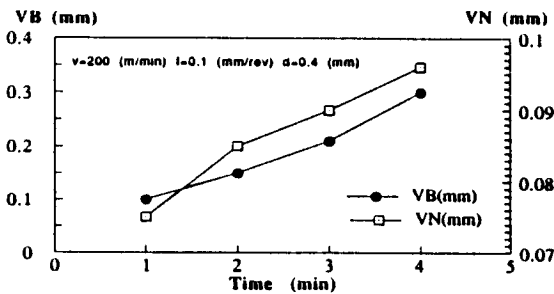


Fig. 3 VB(flank wear), VN(groove wear) versus time

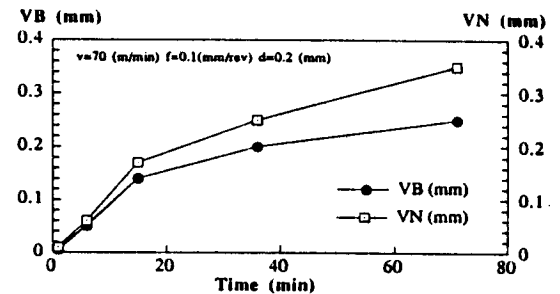


Fig. 5 VB(flank wear), VN(groove wear) versus time

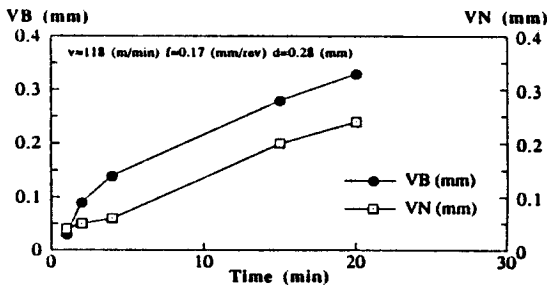


Fig. 4 VB(flank wear), VN(groove wear) versus time

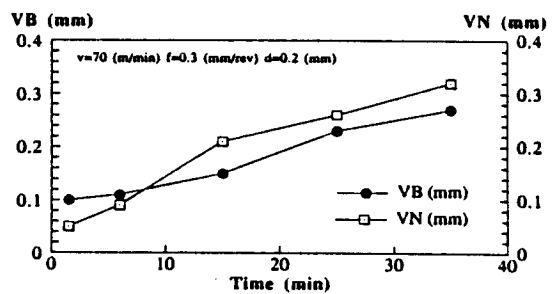


Fig. 6 VB(flank wear), VN(groove wear) versus time

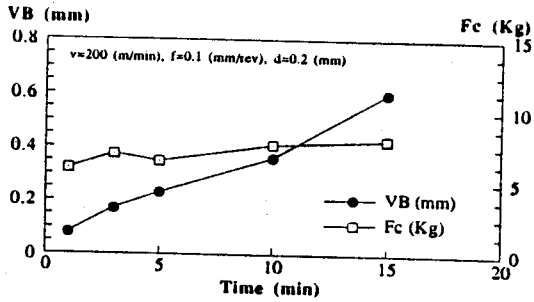


Fig. 7 VB(flank wear), Fc(kg) versus time

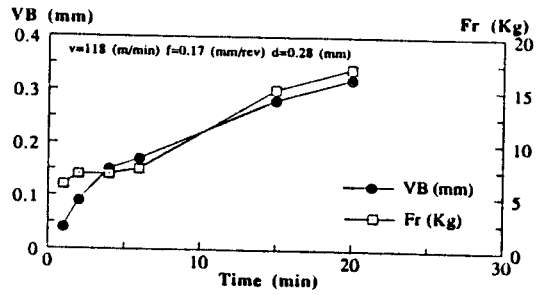


Fig. 11 VB(flank wear), Fr(kg) versus time

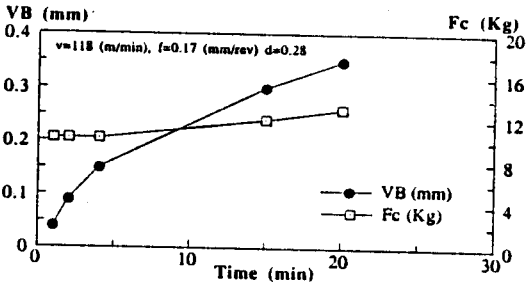


Fig. 8 VB(flank wear), Fc(kg) versus time

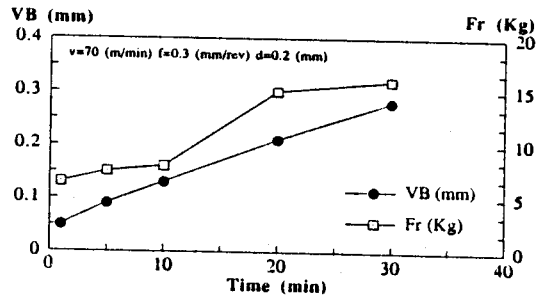


Fig. 12 VB(flank wear), Fr(kg) versus time

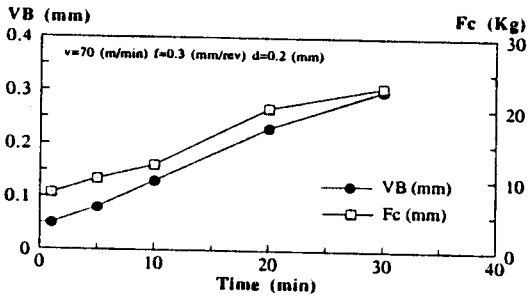


Fig. 9 VB(flank wear), Fc(kg) versus time

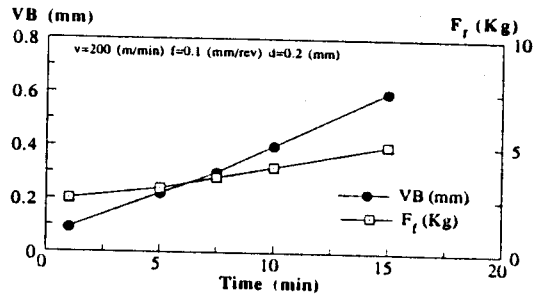


Fig. 13 VB(flank wear), Ft(kg) versus time

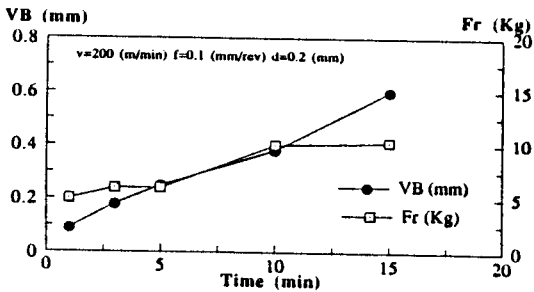


Fig. 10 VB(flank wear), Fr(kg) versus time

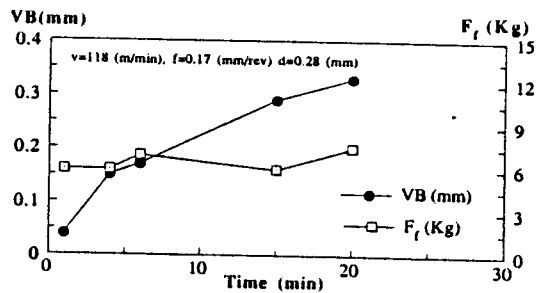


Fig. 14 VB(flank wear), Ft(kg) versus time

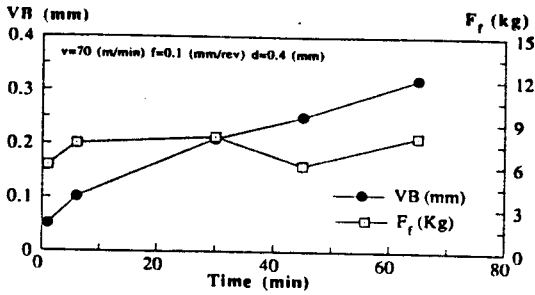


Fig. 15 VB(flank wear), F_f(kg) versus time

5. 결 론

SUS304를 P20으로 준 2차원 선삭하였을 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속(200 m/min)의 경우 플랭크 마멸폭이 그루브 마멸 폭보다 훨씬 크다.
2. 118 m/min의 절삭속도에서는 플랭크 마멸이 그루브 마멸보다 약간 크게 나타났고 70 m/min의 절삭속도에서는 후자가 약간 크게 된 것으로 보아 저속에서는 (본 실험에서는 70 m/min 이하) 가공경화된 그루브 마멸로서 공구수명을 판정하는 것이 합리적이다.
3. 인선부에 burr로 인한 실질 물림깊이의 증가로 인하여 그루브 마멸이 인선의측으로 확대된다.

참고문헌

1. V. C. Venkatesh and M. Satchithanadam "A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes" Annals of the C. I. R. P. Vol. 29/January, pp. 19-22 (1980)
2. W. K. Luk and R. F. Scrutton, "The Origin of Groove Wear in the Turning Operation", The International Journal of Production Research, Vol. 6, No. 3 (1968)
3. J. E. Williams, E. F. Smart and D. R. Milner, "The Metallurgy of Machining-part-2: The Cutting of Single-Phase, Two-Phase and Some Free Machining Alloys" Metallurgia, Vol. 181, February, pp. 51-59 (1970)
4. S. M. Wu, "Tool-Life Testing by Response Surface Methology Part I, II" ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 86, May, pp. 105-110, 111-116 (1964)
5. N. H. Cook, "Tool Wear and Tool Life" ASME, Journal of Engineering for Industry, November, pp. 931-938 (1973)
6. 徐南變, 金屬切削理論, pp. 132-162, 1988
7. International standard I. S. O. 3685