SSW2의 피삭성에 관한 연구(제1보)
-표면거칠기, 절삭저항의 특성 및 칩파단영역-
A Study on the Machinability of SSW2 Steel(1st Report)
-Surface roughness, characteristics of cutting resistance and chip breaking range-

최 만 성,* 최 대 봉**
M. S. Choi, D. B. Choi

ABSTRACT

The turning tests with sintered carbide tools have been conducted on typical high strength SSW2 railway wheel steel and its machinability were examined in terms of the cutting resistance, the roughness of turning surface, the chip disposal and others. Some results obtained in this paper are as follows : (1) The cutting resistance is not affected by the cutting speed (in this paper these were 23-78 m/min). (2) The roughness of finished surface is found to be largely dependent on cutting conditions and tool geometry. (3) There exists the explicit relation between the tool geometry and the effective breaking range of chip. (4) The experimental equations which relates between cutting conditions (cutting speed, feedrate, and depth of cut) and independent variables(cutting resistance, surface roughness) are derived.

1. 서 론

철도차륜용 탄소강인 SSW 2강은 공구가 고속도강공구로 절삭가공하였던 시대에 개발된 재료이기 때문에 그 피삭성은 고속도강공구에 의한 저속절삭에 있어서는 양호하지만 초경공구나 세라믹공구에 의한 고속절삭에 대해서는 반드시 양호하다고 말할 수는 없다.

최근 철도차륜 탄소강의 절삭가공에 있어서 전용기계의 CNC 화가 활발하게 이루어지고 있으며 고속절삭되는 경우도 증가하기 때문에 이에 따른 절삭자료의 데이타 베이스화가 필요한 실정이다.

금속재료의 피삭성은 피삭재와 공구의 화학성분, 기계적 성질과 절삭조건으로부터 공구수명, 가공면거칠기, 절삭동력(절삭저항), 칩생성에 따른 칩형태 등을 아는 것을 목표로 하고 있지만[1-3] 본 연구에서는 우선 보통강보다 인장강도 및 경도가 수 배 이상 높은 철도차륜용 탄소강의 절삭에 있어서 각종 절삭조건에 따른 표면거칠기, 절삭저항, 칩처리 등을 실험하여 안정된 절삭가공을 할 수 있는 절삭조건을 검토해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 범용선반의 주축과 이송기구를

* 정회원, 한국기술교육대학 생산기계공학과
** 정회원, 한국기계연구소 공작기계실

DC 모터 구동시스템으로 개조하여 절삭속도와 이송속도를 독립적으로 무단변속할 수 있도록 Fig.1 처럼 만든 선반에서 행하였다.

이에 따른 실험기기의 내용은 Table 1과 같다.

절삭력은 공구동력계를 통해 나오는 신호를 동적변형율 증폭기(dynamic strain amplifier)로 증폭시켜 오실로그래퍼(oscillographer)로써 측정하였다.

본 실험에 사용된 피삭재인 철도차륜용 탄소강인 SSW 2강의 화학적 성분은 Table 2와 같다.

Table 3은 실험에 사용된 공구의 형상을 나타낸다.

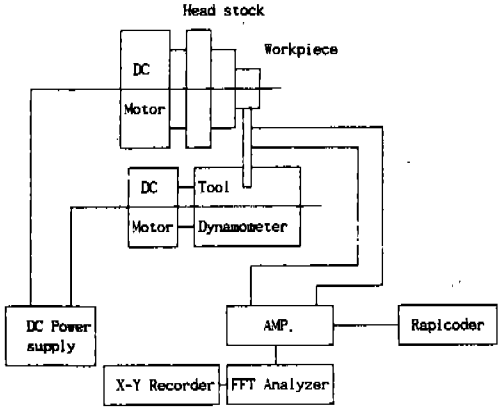


Fig. 1 Structure of experimental equipments and apparatus

Table 1 Experimental equipments and apparatus

Name	Model	Mfg
Lathe	TSL-550	TAKISAMA (Japan)
Tool dynamometer	TD-500KA	KYOWA (Japan)
Dynamic strain amplifier	DPM-310A	KYOWA (Japan)
Rapicoder	RHV-510	KYOWA (Japan)

Table 2 Chemical composition (wt %)

C	S_i	M_n	P	S
0.60 ~0.75	0.15 ~0.35	0.05 ~0.90	0.45 이하	0.05 이하

Table 3 Tool geometries in experiment

Tool (T.A holder)	PSBNR 2020K12	PTGNR 2020K16
(T.A tip)	SNMG 120408 KTP 20	TNGG 160404 KTP 20
Back rake angle	6°	−6°
Side cutting edge angle	75°	90°
Side rake angle	−6°	−6°
Nose radius angle	0.8 (mm)	0.4 (mm)

2.2 절삭과정의 모델화

실험결과에 의하면 절삭조건에 따른 절삭력의 특성은 다음과 같은 실험식으로 주어질 수 있다.

$$F_i = C_i\ V^{a1}\ f^{a2}\ d^{a3} \qquad (1)$$

여기서 F_i는 주분력, 배분력, 이송분력을 나타내고 있으며 $C_i = e^{a0}$, a_1, a_2, a_3 등은재료상수에 해당한다. 또한 V는 절삭속도, f는 이송속도, d는 절삭깊이를 나타낸다.

식(1)의 양변에 log를 취하여 1차 모델을 구성한다.

$$Y_i = a_0 X_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \qquad (2)$$

여기서 $Y_i = \ln F_i$, $X_0 = 1$, $X_1 = \ln V$, $X_2 = \ln f$, $X_3 = \ln d$, C_i, a_1, a_2, a_3 등은 최소자승법에 의해 결정되고 F-검점에 의해 그 신뢰여부를 평가한다.

본 연구에서는 실험을 효과적이고 데이타의 처리가 용이하도록 하기 위해서 Table 4에 나타나 있는 바와 같이 Factorial design에 의한 실험계획법을 도입하였다.

절삭조건의 Coding은 다음과 같은 식을[6-8] 통해 결정하였다.

$$X_{1C} = \frac{2(\ln V - \ln 78)}{\ln 78 - \ln 23} + 1$$

$$X_{2C}=\frac{2(\ln f-\ln 0.073)}{\ln 0.073-\ln 0.146}+1 \qquad (3)$$

$$X_{3C}=\frac{2(\ln d-\ln 1.5)}{\ln 1.5-\ln 0.5}+1$$

절삭조건에 따른 표면거칠기(R_{max} : Peak to Valley Value)의 특성은 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다.[5,6]

$$R_{max}=C_r V^{b1} f^{b2} d^{b3} \qquad (4)$$

여기서 $C_r=e^{b0}$, b_1, b_2, b_3는 재료상수이다. 식(4)의 양변에 log를 취하면 다음과 같다.

$$R_{max}=b_0 X_0+b_1 X_1+b_2 X_2+b_3 X_3 \qquad (5)$$

Table 4 Cutting condition coding

Level	Cutting Speed: V (m/min)	Feed: f (mm/rev)	Cutting Depth: d (mm)	Coding X_{1C}, X_{2C}, X_{3C}
High	78	0.227	1.5	1 1 1
Center	50	0.146	1.0	0 0 0
Low	23	0.073	0.5	-1 -1 -1

2.3 회귀식의 적합

절삭모델링의 (2)식과 (5)식을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$y=X\beta+\varepsilon \qquad (6)$$

여기에서 각각

$$y=\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ . \\ y_n \end{vmatrix} \qquad x=\begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \cdots x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \cdots x_{k2} \\ . & . & . \quad . \\ . & . & . \quad . \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \cdots x_{kn} \end{vmatrix}$$

$$\beta=\begin{vmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ . \\ . \\ \beta_k \end{vmatrix} \qquad \varepsilon=\begin{vmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ . \\ . \\ \varepsilon_k \end{vmatrix}$$

이다.

최소자승법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면

$$S=y'\ y-2\beta X'\ y+\beta X'X \qquad (7)$$

가 되며 이를 β로 미분하여 영으로 놓으면 다음의 결과를 얻는다.

$$X'X\beta=X'\ y \qquad (8)$$

식(8)의 양변에 $(X'X)^{-1}$을 곱하면

$$\hat{\beta}=\begin{vmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ . \\ . \\ \hat{\beta}_k \end{vmatrix}=(X'X)^{-1}X'\ y \qquad (9)$$

을 얻게 된다.

추정된 회귀방정식의 정도(precision)를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 측도(measure)로써는 분산분석표에 의한 F-검정을 이용하였다.

Table 5 Analysis of variance for regression

요 인	제 곱 합	자 유 도	제곱평균	F	$F(\alpha)$
회 귀	SSR	k	MSR	MSR/MSE	$F(k, n-k-1; \alpha)$
잔 차	SSE	$n-k-1$	MSE		
계	SST	$n-1$			

Table 5는 F-검정을 위한 분산분석표이다.

Table 5에서 MSR은 SSR을 k로 나눈 값으로 회귀제곱평균(Regression mean square)이고, MSE는 SSE를 $n-k-1$로 나눈 값으로 잔차제곱평균(Residual mean square)이다.

만약 F=MSR/MSE의 값이 $F(k, n-k-1; \alpha)$보다 크면 귀무가설이 기각되며 추정된 회귀방정식이 유의하다. F의 값이 크면 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다.

3. 절삭실험 및 고찰

3.1 절삭저항 및 표면거칠기

선삭가공에서 공작물의 표면거칠기는 이송량과 공구의 인선반경(nose radius)에 의해서 기하학적으로 결정되지만 실제 측정된 값과는 상당한 편차가 있게 된다.

이는 절삭조건의 변화에 따라서 발생하는 칩의 형태, 구성인선(built-up edge), 공구마모, 공작물과 공구의 진동 등의 요인에 의해 이루어진다.

Fig.2~Fig.4에서 보는 바와 같이 보통의 절삭상태에서는 절삭속도의 증가, 이송량의 감소, 절삭깊이의 감소에 따라 표면거칠기는

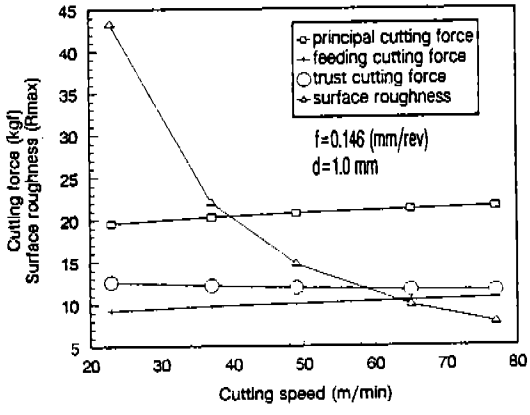


Fig. 2 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of cutting speed V in tool tip TNGG

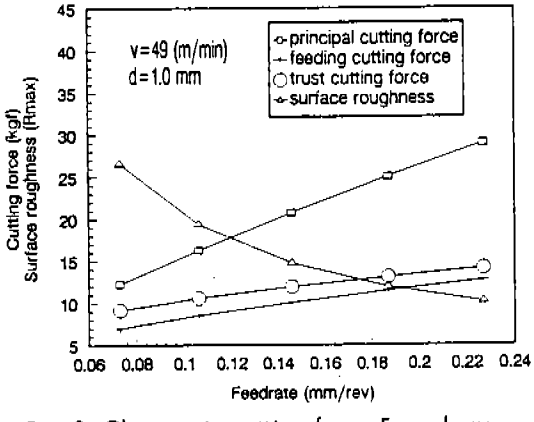


Fig. 3 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of Feedrate f in tool tip TNGG

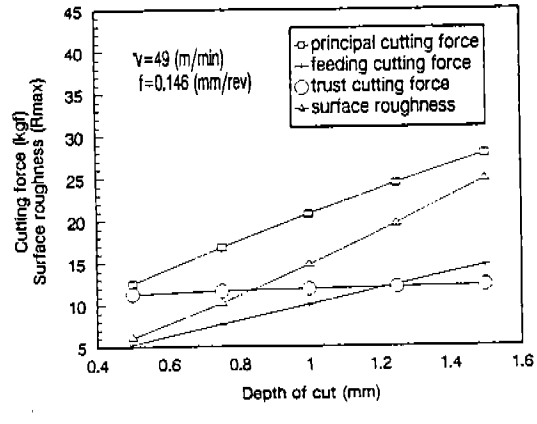


Fig. 4 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of depth of cut d in tool tip TNGG

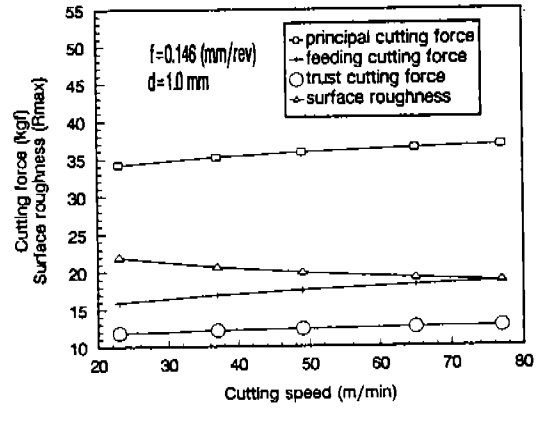


Fig. 5 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of cutting speed V in tool tip SNMG

양호해진다. 이것은 절삭속도가 증가하면 균열형이 전단형 혹은 전단형이 유동형의 칩생성기구로 변화하고 이와 같은 칩생성 기구의 변화 때문에 절삭저항의 변동폭이 감소하여 공구와 피삭재 사이의 상대진동이 작아지기 때문이라고 생각한다. 그러나 Fig.5에서는 특이현상으로 절삭속도의 증가에도 불구하고 표면거칠기가 거의 일정한 현상을 보이고 있는데 이것은 절삭속도의 증가에 관계없이 연속형 칩이 생성되기 때문이라 생각된다.

Fig.2에서 절삭 배분력, 이송분력의 변화는 절삭속도와 관계없이 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 보통 절삭속도가 증가하면 전단각의 감소와 더불어 칩의 두께가 얇아지고 절삭저항이 감소하는 것이 일반적인데 절삭주분력은 약간의 증가 추세를 보이고 있다. 이와 같은 현상은SSW2강을 TNGG 공구팁으로 절삭할 때 공구여유면 부착물의 생성이 현저하기 때문이라 생각된다.[9]

Fig.3, Fig .4에서 절삭저항은 이송속도와 절삭깊이에 따라 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 공구팁 SNMG로 절삭실험한 Fig.5～Fig.7에서의 절삭저항의 변동은 보통강의 절삭속도와 거의 같은 경향을 보여주고 있다.

절삭모델화에 따라 회귀분석한 회귀계수를 Table 6에 나타낸다.

Table 5에서 알 수 있드시 공구팁 TNGG, SNMG로 절삭하였을 때 절삭력에 크게 영향을 미치는 것은 절삭속도와 절삭깊이이고, 이송속도는 상대적으로 영향이 작음을 알 수 있

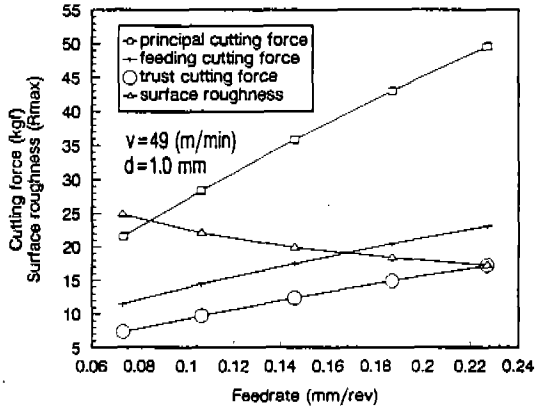


Fig. 6 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of feedrate f in tool tip SNMG

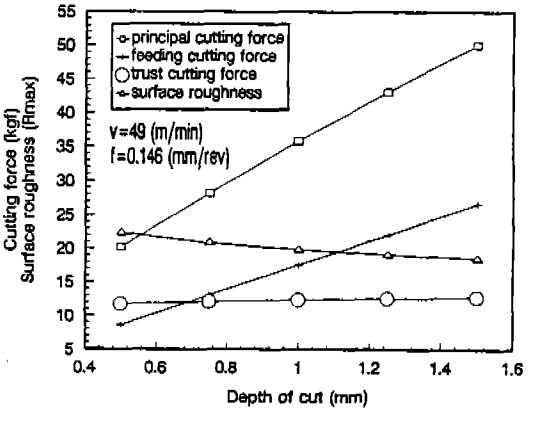


Fig. 7 Changes in cutting force F_i and surface roughness R_{max} as a function of depth of cut d in tool tip SNMG

Table 6 Regression coefficient by regression analysis

Factor	Tool tip	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3
Principal force	TNGG	4.756	0.735	0.061	0.826				
	SNMG	4.188	0.757	0.077	0.723				
Feeding force	TNGG	3.533	0.614	0.132	1.028				
	SNMG	2.863	0.528	0.119	0.923				
Thrust force	TNGG	3.731	0.748	0.058	0.076				
	SNMG	3.510	0.379	-0.078	0.076				
Surface roughness	TNGG					2.871	-0.323	-0.130	-0.17
	SNMG					6.593	-0.853	-1.425	1.277

다. 그리고 공구의 형상에 따라서도 그 차이가 있음을 볼 수 있다. 이것은 공구각에 따라 발생하는 칩의 발생기구가 현저하기 때문이라 생각된다. 또한 가공면거칠기도 가공조건에 많은 영향을 받는데 특히 이송속도에 크게 좌우됨을 볼 수 있고 여기서 공구팁 SNMG가 공구팁 TNGG 보다 표면거칠기에 더욱 민감함을 알 수 있다.

Table 5에 의한 절삭 주분력, 이송분력, 배분력 및 공구팁 SNMG의 표면거칠기에 대한 중회귀분산분석에 의하면 귀무가설 H_0가 제1종의 과오를 범할 확률인 유의수준 α_0가 5% 이내, 공구팁 TNGG의 표면거칠기인 경우 유의수준 α_0가 10%일 때 $F-$검정에서 각 회귀방정식이 모두 유의(significant)하다. Table 6에 의한 표면거칠기에 관한 식은 다음과 같다.

$$R_{max}=18\,f^{-0.328}V^{-0.130}\,d^{-0.170}\text{(TNGG)} \quad (10)$$

$$R_{max}=730\,f^{-0.853}V^{-1.425}\,d^{1.277}\text{(SNMG)} \quad (11)$$

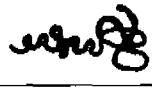
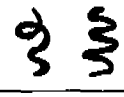
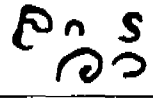
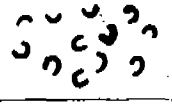
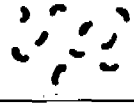
3.2 칩의 형태

절삭가공에서 절삭에너지의 대부분은 칩을 만들기 위해 사용되어지고 이때 생성된 칩을 귀찮은 존재로 되지 않게 배출하는 일은 능률적인 절삭가공을 유지하기 위해 절대 필요한 것이다.

Table 5는 본 실험에서 얻어진 각 형태의 칩을 Henriksen의 분류원칙에 따라 표시한 것이며 칩처리의 양부에 따라 "Useable"과 "Preferred"로 그 선택의 범위를 설정하였다.

강을 초고속 절삭하면 (a)형과 같이 직선형이 나타난다. 즉 직진하든가 극히 큰 반경으

Table 7 Chip classificatin by Henriksen

Type of chip	Form of chips obtained thorough experiment	
(a) Straight chips		
(b) Snarling chips		
(c) Infinite helices		Useable renge
(d) Regular intermittents		Preferred range
(e) Full turns		
(f) Half turns		
(g) Fragments & splinters		

로써 커얼링하는 칩이 나타난다. 이 상태로부터 절삭속도를 서서히 낮추고 이송량을 크게 하면 커얼반경은 점점 작아진다. 그러나 부분적으로 커얼반경이 크게 나타나는 경우도 있으므로 이때는 불균일한 지름의 연속형 칩이 생성된다. 이것이 (b)이다. 이 상태로부터 절삭속도를 낮추게 되면 커얼지름이 크게 차이나는 연속의 권상칩 (c)형이 생성된다.

이와 같은 기본형태의 칩을 내는 절삭조건으로부터 절삭깊이를 적게 하면 다시 불균일한 권상칩이 되는데 (b)형 보다 칩두께가 얇은 (d)형의 칩이 된다. 그런데 이러한 칩에 외력이 작용하면 그 상태는 바뀌게 된다.

예를 들면 칩브레이커로써 칩을 만곡시킬 때는 (c)형에서 (e), (f), (g)의 분단형 칩이 생성된다.

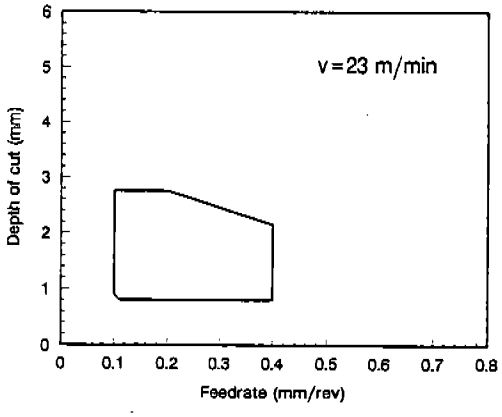


Fig. 8 Chip breaking limit by tool tip TNGG

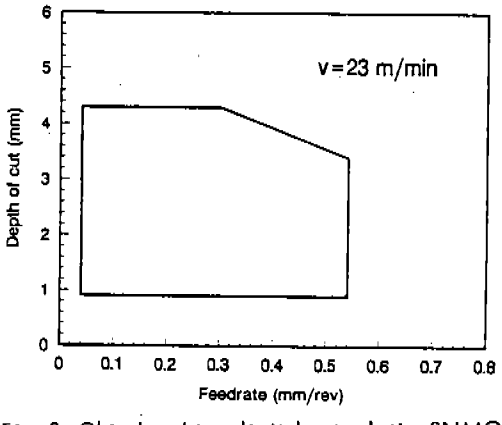


Fig. 9 Chip breaking limit by tool tip SNMG

Fig.8, Fig.9는 이러한 칩분류 하에 절삭속도 $V=23$ m/min일 때 이송속도와 절삭깊이에 따른 공구 TNGG, SNMG에 있어서 칩파단의 유효범위를 나타낸 것이다.

이 유효범위는 보통강의 경우와 별로 다른 점이 없고 이동속도 방향의 유효범위가 조금 넓어진 점이다. 또한 여기서 알 수 있듯이 공구의 형상에 따라 SSW2강의 칩파단 유효범위는 상당한 차이가 있기 때문에 칩처리 측면에서 공구선택을 신중히 할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

이상 요약하면 SSW2강을 초경공구 TNGG, SNMG를 사용하여 절삭실험한 결과 본 연구에서는 주로 절삭저항, 표면거칠기, 칩파단의 유효범위를 검토하였다.

결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) SSW2강의 절삭저항은 절삭속도의 증가에도 불구하고 거의 변화가 없다.

(2) 절삭조건에 따른 표면거칠기의 변화는 보통강의 경우와 같은 경향을 보이고 있다.

(3) 공구의 형상변화에 따른 칩의 유효파단 범위는 뚜렷이 다르다.

(4) 주어진 절삭조건에 따른 절삭저항 및 표면거칠기의 실험식을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 升田雅博, 黑島泰幸, 眞鍋貞弘, "炭素燒結體の被削性," JSPE Vol.53, No.12, pp.1924, 1987.
2. 鳴籠則顔, 山根八洲男, 白梧 年, "古俗切削における硫黃快削鋼 被削性," JSPE Vol.53, No.3, p.455, 1987.
3. 奧島啓式, 岩田一明, "金屬材料の被削性に關する研究," 日本機械學會論文集(第3部), Vol. 28, No.193, p.1034, 1962.
4. G.E.P. Box and K.B.Wilson, "On the Experimental Attainment of Optimum Condition," Royal Stat., B.13.1, 1951.
5. S.M.Wu, "Tool Life Testing by Response Sur-

face Methodology-Part I," Trans, ASME, Series B, Vol.86, p.105, 1964.
6. S.M.Wu, "Tool Life Testing by Response Surface Methodology-Part II," Trans, ASME, Series B, Vol.86, p.111, 1964.
7. B.N. Colding, "Machining of Metals and Maching Costs," MTDR. Pergamon Press, N.Y., Vol.1, pp.220, 1961.
8. S.M. Wu and R.N. Meyer, "Cutting-Tool Temperature Prediction Equation by Response Surface Methodology," Trans. ASME, Series B, Vol.86, p.150, 1964.
9. 人見勝人, 咸仁英, G.L. Thuering, "ノジュラー鑄鐵の被削性"(第1報), 日本機械學會論文, Vol.27, No.184, p.1913, 1961.