

공작기계 특성을 고려한 최적연삭조건 설정방법

김 건희*, 이 재경**, 최 창용*

Establishment Method of Optimum Grinding Conditions Considering with Machine Tool Characteristics

Gunhoi KIM*, Jaekyung LEE**, Changyong CHOI*

Abstract

In order to utilize the information of well-known grinding data or grinding machine, a database needs to be designed by considering the delicate property of the machine tools for the high precision and quality of the demanding specification. Among the machine tools, machining conditions of the grinding are various and knowledge repeatability obtained from the grinding process are less credible. Therefore it is desirable for D/B, which is used to set the grinding conditions, to utilize the maximum machine tool capability.

The present paper studied occurrence limit of chatter vibration and burn considering the characteristics of machine tool. And also basic experiments were performed to establish optimum grinding conditions which can maximize the machining efficiency.

Key Words: Machine Tool Characteristics, Database, Optimum Grinding Conditions, Fuzzy Linear Regression Model, Chatter Vibration, Grinding Burn

1. 序 言

공작기계중에서도 연삭가공은 가공조건이 多様하고, 연삭공정에서 얻어진 데이터의 再現性에 대한 신뢰가 적기때문에 가공조건 설정을 위한 D/B에 있어서도 공작기계의 성능을 최대한으로 활용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 특히 요구하는 사양이 超精密·高品位인 경우에는 공작기계가 갖고있는 미묘한 성질을 고려한 Database가 설계되어야 한다.

따라서, 본연구에서는 공작기계의 특성을 고려한 Chatter vibration의 발생한계, Grinding burn의 발생영역을 검토하고, 拘束條件으로 비교적 定量的 評價에 신뢰성을 갖는 表面粗度を 기준으로한 加工能率의 극대화를 위한 최적연

삭조건을 설정을 위한 기초적 연구를 하였다.

2. 최적가공조건 설정을 위한 관계설정

숙련자는 공작물의 표면조도 등의 加工品位나 연삭반 주축모터의 허용동력 등의 물리적 제약이나 연삭눌음(Burning), 振動(Chatter vibration) 등의 트러블 등의 拘束條件에서 가공능률을 극대화하고, 가공비용을 최소화할 수 있는 최적가공조건을 설정한다. 그러나 실제로 이와같은 多様な 요구조건을 만족할 수 있도록 조건설정을 하는 것은 매우 至難하며, D/B를 설계할 수 있다하여도 설계된 시스템의 효율성을 재고할때 Time-in-variant의 상태에서는 매우 어렵다.

* 전주대학교 기계공학과

** KIMM 자동화연구부

2.1 加工條件과 加工能率의 關係

원통연삭에 있어서 주요한 가공조건으로 연삭숫돌의 절입깊이 h , 工作物周速度 V_w , 연삭숫돌의 周速度 V_g 와 드레싱 조건인 드레싱시의 절입깊이 t_d 와 드레싱시의 이송속도 f_d 등이 다. 이 중에서 가공능률을 극대화하기 위해서는 공작기계가 갖고있는 성능중, 연삭숫돌의 주축회전수는 최대한으로 활용하는 것이 바람직하다⁽¹⁾.

따라서 이들 파라미터를 가공능률과의 관계로 표현하면

$$Z = f(V_g, V_w, h, B, f_d, t_d) \quad (1)$$

와 같이 되며, 드레싱 절입깊이(t_d)와 드레싱 이송속도(f_d)도 일의적으로 주어진다면 식(1)에서 加工能率을 단위시간당의 研削量 Z 로 정의하면

$$Z = B \cdot h \cdot V_w \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 여기서, B 는 연삭폭이다. 그런데 식(2)에서 B 을 正規化한 單位幅 · 單位時間當의 연삭량을 Z' 로 표현하면 아래와 같다.

$$Z' = h \cdot V_w \quad (3)$$

따라서, 식(3)에서와 같이 가공능률을 극대화하기 위해서는 연삭숫돌의 절입깊이 h 와 工作物周速度 V_w 을 크게 하면 된다.

2.2 加工條件과 表面粗度와의 關係

표면조도를 R_{max} 로 하면, K. Sato⁽²⁾는 숫돌 작업면에 있어서 규칙적으로 분포된 일정형상의 粒子先端이 運動軌跡대로 공작물을 연삭하고, 粒子先端의 輪廓이 그대로 轉寫된다고 하면

$$R_{max} = \frac{1}{8} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) \left(\frac{V_w}{V_g} \right)^2 a^2 + \frac{1}{8} \frac{b}{\rho} \left(\frac{f}{B} \right)^2 \quad (4)$$

으로 표현했다. 여기서, R 과 r 은 숫돌 및 공작물의 半徑, a 는 연삭절입깊이, b 는 연삭면에 남는 平均條痕幅, f 는 공작물 1회전당의 이송량, B 는 연삭숫돌 폭, ρ 는 粒子先端半徑, B/f 는 공작물의 동일점을 연삭하는 횟수를 의미한다.

K. Kono⁽³⁾는 절입형상이 3차원적으로 일정한 분포로 간주한 경우에 대하여 最大谷底높이 H_v 는 다음과 같이 주어진다.

$$H_v = \left(\frac{15}{16} \right)^{2/5} \nu^{2/5} (\cot \phi)^{2/5} \left[\frac{V_w}{V_g} \sqrt{1/D+1/a} \right]^{2/5} \quad (5)$$

여기서, ν 는 입체적인 粒子間隔, ϕ 는 粒子先端角이다.

또한 織岡貞次郎⁽⁴⁾는 숫돌작업면에 작용하는 입자를 確率論을 이용하여 粒子分布와의 관계를 理論的, 實驗的인 검토를 보완하여 숫돌 절입 방향에 拋物線 分布가 되는 입자수를 측정하여 自乘平均平方根 粗度 R_{rms} 로 나타냈다.

$$R_{rms} = 0.328 \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{a} \right)^{1/9} \left(\frac{V_w}{V_g} \right)^{2/9} \left(\frac{1}{j c} \right)^{2/9} \left(\frac{1}{2\alpha} \right)^{2/9} H_0^{2/3} \quad (6)$$

여기서, j 는 동일점의 연삭횟수, c 는 숫돌표면의 단위면적내의 입자수, 2α 는 平均粒子先端角, H_0 는 입자선단에 분포하는 깊이이다.

이와같이 이들의 식에서 보면 표면거칠기에 대한 다양한 연구가 시도되고 있으나 연삭숫돌의 절입깊이를 고려한 것은 없다. 그러나 Fig.1과 같은 실험결과를 검토해보면 숫돌의 절입깊이가 표면거칠기에 미치는 영향은 어느 연삭조건보다도 큼을 알 수 있다.

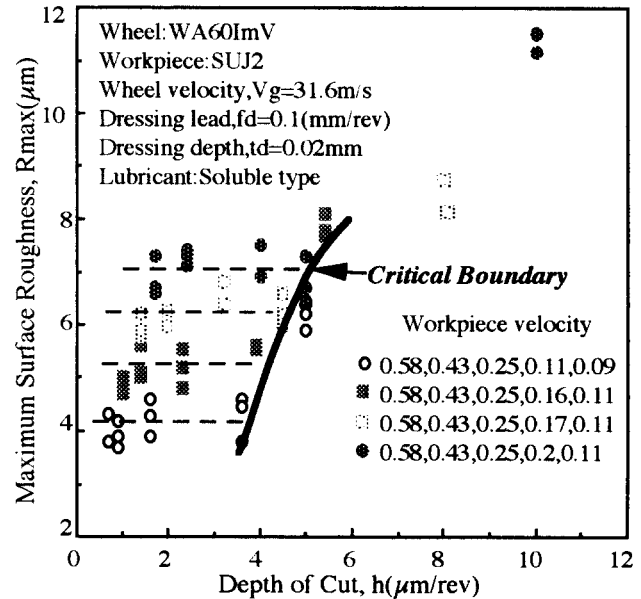


Fig.1 Relationship of Maximum Surface Roughness and Depth of Cut

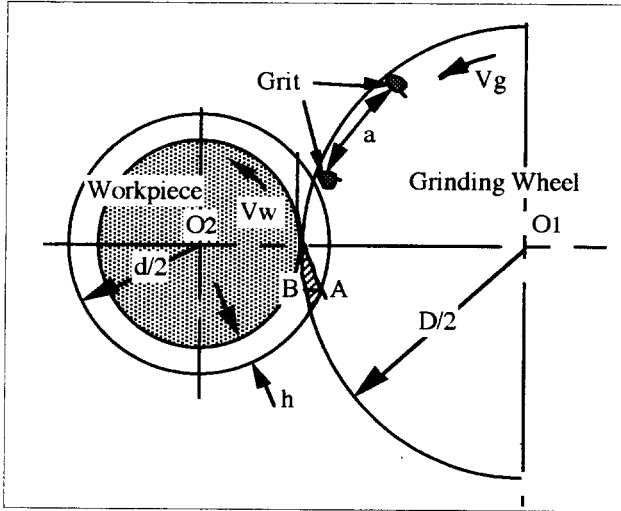


Fig.2 Geometric Diagram of Maximum Depth of Cut

따라서 본연구에서는 Fig.2와 같은 연삭깊이에 주목한 R_{max} 와 幾何學的 研削理論에서 도출된 최대지립절입깊이 g 에 관해서 검토하였다. 최대지립절입깊이 g 는

$$g = 2a \frac{V_w}{V_g} \sqrt{h(1/D + 1/d)} \quad (7)$$

으로 주어진다. 여기서, a 는 평균연속지립의 간격이다. 따라서 식(7)에 고려된 파라메타의 組合을 고려하여 이를 ψ 라하면 최대높이 표면조도 R_{max} 와 가공조건과의 관계식을 유도할수 있고, 이는

$$\psi = \frac{V_w}{V_g} \sqrt{h(1/D + 1/d)} \quad (8)$$

로 표현할수 있다. 윗식 (8)은 공작물과 연삭숫돌의 종류에는 관계없고 가공조건 및 공작기계의 특성만을 고려한 파라메타이다. 또한 최대높이 표면조도 R_{max} 와 ψ 와의 相關關係을 검토하기위해 실험결과를 보면

$$R_{max} = -0.69 + 9.6\psi \quad (9)$$

로 直線回歸式으로 상관관계 $\gamma=0.935$ 이다. 그러나 이러한 상관관계는 연삭반의 강성에 의하

여 多少 차이가 있다. 즉 연삭반의 剛性이 클수록 상관관계는 크고 작을수록 상관관계는 상대적으로 작아진다.

2.4 공작기계 강성에 의한 진동특성

시스템이 가능한한 안정된 영역에서 작업할 수 있는 조건을 부여하기 위해서는 연삭반이 갖고있는 剛性 및 固有振動數와의 관계를 고려한 데이터를 D/B화함으로써 안정된 가공시스템의 실현이 가능하다.

Fig.3은 機械系의 等價靜剛性에 따른 진동발생의 한계로 等價靜剛性이 높을수록 안정영역은 넓어져 시스템의 안정성이 있음을 알 수 있다. 즉 機械系의 等價靜剛性 K_m 이 비교적 약한 3,800[N/mm]일때에 비해서 연삭반의 等價靜剛性이 큰 12,300[N/mm]일때는 安定領域이 비교적 크게됨을 알 수 있다. 또한 이와같은 데이터를 重疊法을 이용하여 重疊係數 μ 에 따른 安定·不安定領域으로 나타낸 것이 Fig.4이다.

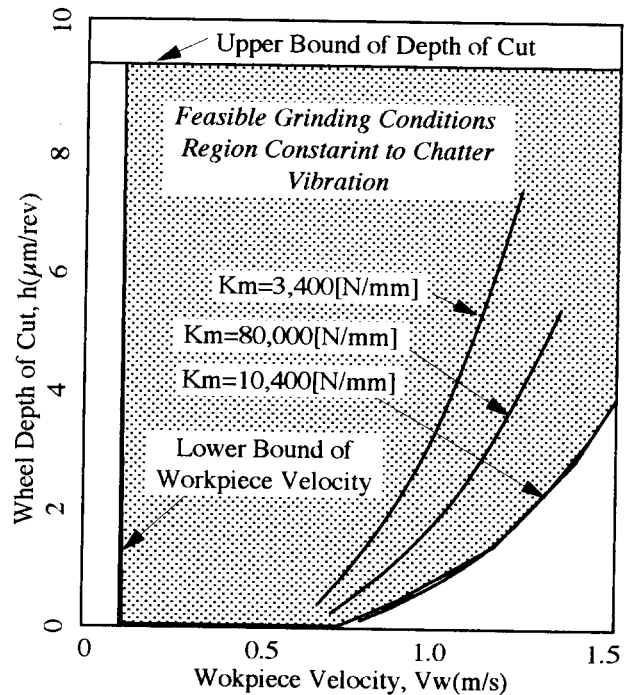


Fig.3 Chatter Vibration Limit according to Machine Tool Stiffness

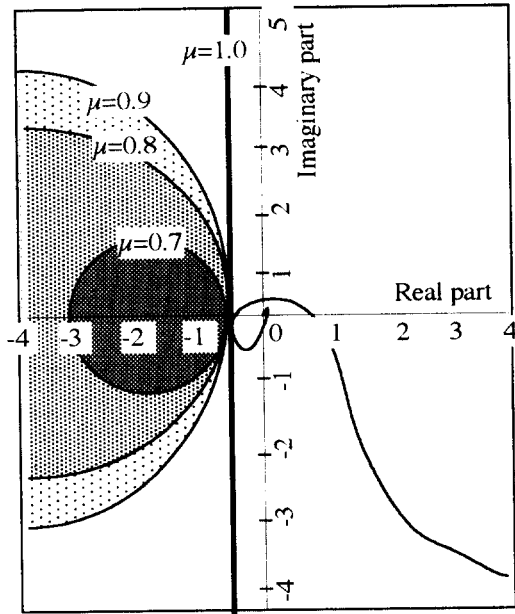


Fig.4 Stable Region of Chatter Vibration

2.5 공작기계에 의한 연삭늘음 특성

근년에 와서 공작기계의 가공능률을 극대화하기 위한 일환으로 主軸을 고속화하는 경향이 있다⁽¹⁾.

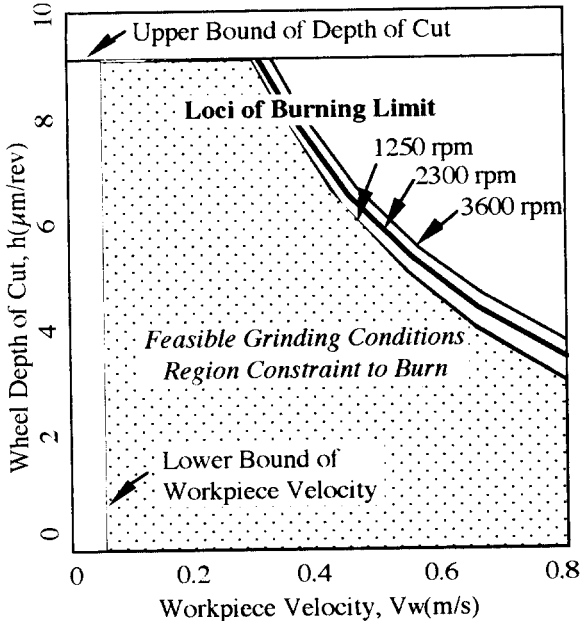


Fig.5 Grinding Characteristic of Burn

본연구에서와 같이 加工能率을 단위시간당의 공작물 제거량으로 상정한 경우에 있어서는 연삭숫돌의 주축회전수에 따른 연삭늘음 (Grinding burn)의 발생영역을 규명하여 최적 가공조건 설정시의 데이터로 활용할 필요가 있다. 따라서 실험을 통해 얻은 결과가 Fig.5이다. 즉, 연삭숫돌의 주속도가 클수록 Grinding burn의 발생은 억제되는 것으로 나타났다.

3. 데이터 베이스의 活用方法

데이터 베이스에 활용하기위한 알고리즘으로 본연구에서는 아래와 같은 2가지 實驗式을 도입했다.

$$\psi = f_1(R_{max}) \quad (9)$$

$$h = f_2(R_{max}) \quad (10)$$

그러나 실제로 식(9)와 식(10)은 연삭가공의 재현성이 적기 때문에 2가지 식 모두 偏差가 큰 식이된다. 이러한 편차를 觀測誤差로 취급하지 않고 연삭가공 공정의 퍼지성에서 기인한다고 하면 위 두식은 可能性線形回歸 모델⁽⁵⁾을 적용하여 回歸分析式을 D/B에 적용할수 있다.

3.1 가공조건 설정 방법

연삭숫돌의 주속도는 숫돌의 遠心破壞, 연삭반의 仕様(모터용량, Bearing, 剛性等)을 고려해서 最高許容速度을 선택하면, ψ 가 일정하고 V_g 가 결정되면 식(3)의 加工能率을 極大化하기위해서는 h 와 V_w 의 파라메타 관계의 조합에 의해 일의적으로 결정된다. 여기서 ψ 을 一定으로하면, 工作物周速度 V_w 는

$$V_w = \frac{V_g \psi}{\sqrt{h \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right)}} \quad (11)$$

식(11)을 식(3)에 대입하면

$$Z' = h \cdot V_w = \sqrt{h} \frac{V_g \psi}{\sqrt{\left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right)}} \quad (12)$$

으로 표현되며, 식(12)을 V_w 로 나타내면

$$Z = \frac{1}{V_w} \frac{V_g^2 \psi^2}{\frac{1}{D} + \frac{1}{d}} \quad (13)$$

로 된다.

Fig.6은 ψ 가 일정일때의 h 와 V_w 와의 관계를 나타낸다. ψ 가 일정하면 식(12)와 식(13)으로부터 h 가 증가할수록, 또한 V_w 가 감소할수록 加工能率 Z' 는 증가한다. 즉, Fig.6의 ψ 가 일정한 曲線에서는 숫돌의 절입깊이 h 와 공작물주속도 V_w 와의 組合에서보면 左上部일수록 Z' 는 높게된다.

이를 입증하기위해 ψ 가 一定의 값을 갖는 (h, V_w)의 조합조건에서 실험을 하여, 그결과가 拘束條件인 최대표면조도에 미치는 영향을 검토하였다. 그결과 Fig.6과 같이 理論적으로는 ψ 을 一定으로하면 최대표면조도가 일정이나, 표면거칠기를 초월하는 限界領域이 존재함을 알 수 있다. 즉 요구되는 最大表面粗度を 만족하면서 加工能率을 달성하기위해서는 연삭숫돌의 절입깊이를 波線附近에서 설정하면 가공능률을 극대화할수 있다.

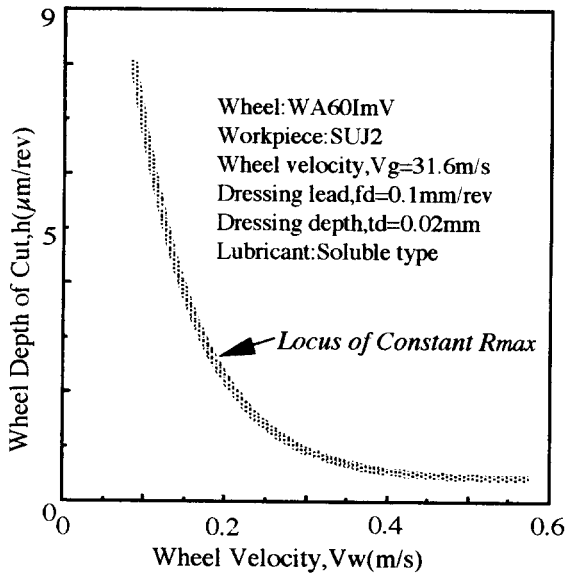


Fig.6 Characteristic of the Defined Parameter ψ

3.2 可能性線形回歸 모델의 導入

가능성분포함수로 삼각형퍼지수를 도입하면, 삼각형퍼지수 A의 Membership function은

$$\mu_A(X) = 1 - |X - a|/c \quad (14)$$

로 표현되고, 이를 $A=(a, c)$ 로 한다. 여기서, a 는 中心을, c 는 可能性幅을 의미한다. 이와같은 가능성 선형회귀모델을 線形計劃 問題로 취급하면

$$\begin{aligned} \min J(c) &= \sum c^i |x_i| \\ y_i &\leq x_i^t a + (1-k)c |x_i| \\ y_i &\geq x_i^t a - (1-k)c |x_i| \\ c_i &\geq 0, i=1,2, \dots, N \end{aligned} \quad (15)$$

으로 된다. 본연구에서는 가능성회귀모델을 적용하면 식(9), (10)은

$$\psi = A_0 + A_1 R_{max} \quad (16)$$

$$h = B_0 + B_1 R_{max} \quad (17)$$

로 표현할수 있다. 여기서, A_i, B_i 는 삼각형 퍼지수이다.

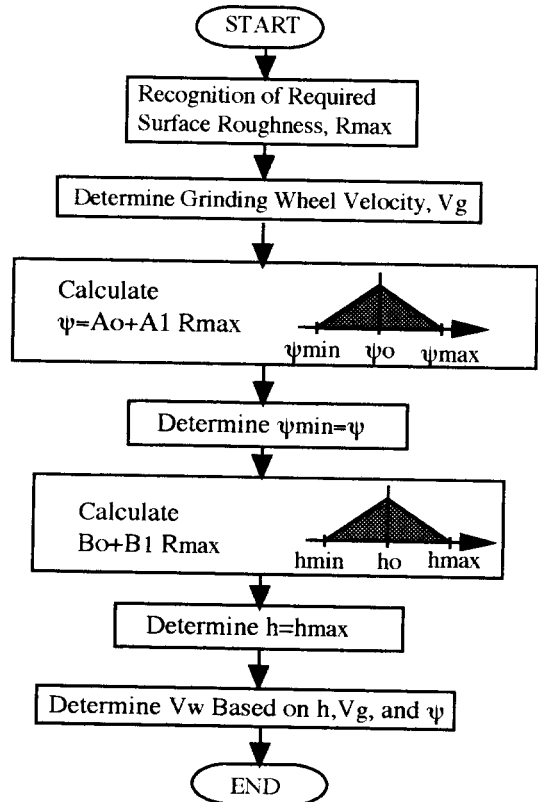


Fig.7 Flow-chart of the Optimum Grinding Conditions

식(16), (17)을 이용하여 최적연삭조건을 설정하는 흐름도가 Fig.7이다. 즉, 우선 입력된 가공 Specification으로서 최대표면조도 R_{max} 을 照合한다. 연삭숫돌 주속도 V_g 에 있어서는 사용하는 연삭반의 강성을 고려하여 最大許容速度를 결정한다. 다음에 입력된 R_{max} 을 이용하여 ψ 을 계산한다. ψ 에 있어서는 요구된 표면조도를 반드시 만족해야하므로 Fig.7의 ψ_{min} 을 구한다. 같은 방법으로 입력된 R_{max} 을 이용하여 식(17)로 부터 h 을 삼각형 퍼지수로 계산한다. 본연구에서는 가공능률을 극대화하기위해 h 을 되도록 이면 최대화할 필요가 있으므로 h_{max} 을 h 로 결정한다. 그다음에 지금까지 구한 ψ 와 h 로부터 V_w 을 결정한다.

4. 結 言

본연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 機械系の 等價靜剛性에 따른 진동발생의 한계로 等價靜剛性이 높을수록 안정영역은 넓어져 시스템의 안정성있어 공작기계의 강성을 고려한 조건설정이 가공능률의 향상을 도모할 수 있다.
- (2) 연삭숫돌의 주속도가 클수록 Grinding burn의 발생은 억제되는 것으로 나타났다. 따라서, 가공조건 설정에는 공작기계가 갖고있는 최대주축회전수를 고려하는 것이 바람직하다.
- (3) 표면조도와 연삭조건에 관련된 파라미터 ψ 와의 관계는 실험적으로 얻은 데이터에서 서로 상관계수가 0.93이상으로 상정한 파라미터의 유효성이 있음을 알 수 있다.
- (4) 연삭공정의 재현성을 고려하여 가공조건 설정에 이용한 가능성 선형회귀 모델의 적용은 공작기계의 특성을 고려할수 있는 가능성을 제시하였다.

參考文獻

- (1) G.H. Kim, et al: "A Study on the Effect of Internal High-speed Grinding," 1st ABTEC Conference, JSGE, Seoul, Lorea, Nov., 1993, p.99
- (2) 佐藤健兒: "研削仕上げ面の粗さ", 精密機械, 16, 4-5, 1950, p.117
- (3) 小野浩二: 研削仕上, Hata Press, 1962, p.68
- (4) 織岡貞次郎: "確率論を應用した研削仕上げ面創成の理論", 日本機械學會誌, 63, 499, 1960, p.1185
- (5) 金建會, 稻崎一郎: "ファジィ回帰モデルによる最適研削條件の設定", JSME, 59, 566, 1993, p.3186