論文 한국공작기계학회지 제 7 권 제 5 호 1998. 10.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

공작기계 특성을 고려한 최적연삭조건 설정방법

김 건 희*

Establishment Method of Optimum Grinding Conditions Considered with Machine Tool Characteristics

Gunhoi Kim*

Abstract

In order to utilize the information of well-known grinding database or grinding machine characteristics, 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 repeatance obtained from the grinding process are less credable. Therefore it is desirable for database, which is used to set the grinding conditions, to utilize the maximum machine tool capability.

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

Keywords: Optimum Grinding Conditions(최적연삭조건), Machine Tool Characteristics (공작기계 특성), Chatter Vibration Limit(자려진동 한계), Grinding Burning Limit (연삭눌음 한계), Grinding Quality(연삭품위), Grinding Database(연삭가공 데이터 베이스)

1. 서 론

가공데이터로써 공표되어 있는 지식이나 일반적인 연삭가공에 관한 지식을 데이터 베이스로서 활용하는데 있어, 특히 요구하는 사양이 超精密·高品位인 경우에는 공작기계가 갖고 있는 정교한 특성을 고려한 데이터 베이스가 설계되어야 한다. 공작기계중에서도 특히 연삭가공은 가공조건이 다양하고, 연삭공정에서 얻어진 데이터의 재현성에 대한 신뢰가 적기 때문에 가공조건 설정을 위한 데이터 베이스에 있어서도 공작기계의 성능을 최대로 활용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

따라서, 본연구에서는 공작기계의 특성을 고려한 自勵振動(chatter vibration)의 발생한계, 연삭눌음(grinding burn)의 발생영역을 검토하여, 구속조건으로 비교적

* 전주대학교

定量的 評價가 용이하고 데이터의 신뢰성을 갖는 표면거칠기를 기준으로 工作機械 特性을 고려한 自勵振動과 연삭눌음의 發生限界 領域을 고려하여 加工能率을 극대화할 수 있는 최적연삭조건의 설정을 위한 데이터 베이스의 활용을 위한 알고리즘을 제시한다.

2. 최적가공조건 설정을 위한 관계설정

숙련자는 공작물의 표면조도 혹은 가공칫수 등의 加工品位나 연삭기 주축모터의 허용동력 등 물리적 제약이나 연삭눌음, 自勵振動 등의 트러블을 발생시킬 수 있는 拘束條件을 배제하면서 가공능률을 극대화하고, 가공비용을 최소화할 수 있는 拘束條件下에서 최적가공조건을 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 실제적으로 이와같은 다양한 요구조건을 만족할 수 있도록 조건설정에 고려하는 것은 매우 어렵고, 데이터 베이스를 설계할 수 있다고해도 설계된 시스템의 효율성을 재고할때 동적시스템 상태에서는 매우 곤란하다.

따라서, 구속조건으로 비교적 定量的 評價가 신뢰성을 갖는 표면거칠기를 기준으로한 工作機械 特性을 고려한 自勵振動, 연삭눌음을 加工能率 極大化을 달성하기 위한 최적연삭조건 설정방법을 제시한다.

2.1 加工條件과 加工能率의 關係

원통연삭에 있어 주요한 가공조건으로 연삭숫돌의 절입깊이량(wheel depth of cut), 工作物周速度(workpiece velocity), 연삭숫돌의 周速度(wheel velocity)와 드레싱조건인 드레싱시의 절입깊이량(dressing depth of cut)와 드레싱시의 이송속도(dressing lead) 등이다. 이중에서 가공능률을 극대화하기 위해서는 工作機械가 갖고 있는 성능중, 가공능률의 극대화라는 측면에서 연삭숫돌의 주축회전수는 최대회전수를 활용하는 것이 바람직하다[1].

따라서 이들 파라메터를 가공능률과의 함수관계로 표현하면

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

와 같이 되며, 드레싱 절입깊이량(t_d)과 드레싱 이송속도(f_d)가 주어지며, 식(1)에서 加工能率을 單位時間當의 硏削量 Z로 정의 하면

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

와 같이 표현된다. 여기서, B는 연삭숫돌폭(grinding wheel width), h는 절입깊이량(wheel depth of cut), V_w는 공작물주속도(workpiece velocity)이다. 한편 식(2)에서 연삭폭을 正規化한 單位幅·單位時間當의 연삭량인 Z′로 표현하면 아래와 같다.

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

식(3)에서와같이 가공능률을 극대화하기 위해서는 연삭숫돌의 절입깊이량 h와 工作物周速度 V_w을 극대화하는 加工條件의 組合으로 결정한다.

2.2 加工條件과 표면거칠기와의 관계

표면거칠기를 평가하기 위한 지표로서 최대높이거칠기(maximum surface roughness) R_{max}로 하면, K. Sato[2]는 숫돌 작업면에 있어서 규칙적으로 분포된 일정형상의 砥粒先端이 運動軌跡대로 공작물을 연삭하고, 砥粒先端의 輪廓이 그대로 轉寫된다고 하여

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

으로 표현했다. 여기서, R과 r은 연삭숫돌 및 공작물의 半徑, a는 연속절입깊이, b는 연삭면에 남는 평균연삭궤적폭, f는 공작물 1회전당의 이송량, B는 연삭숫돌 폭, ρ는 지립날끝반경, B/f는 공작물의 동일점을 연삭하는 횟수, V_g는 연삭숫돌의 주속도, V_w는 공작물주속도이다. 또한, K. Kono[3]는 절입형상이 3차원적으로 일정한 분포로 간주한 경우에 대하여 最大谷底높이 Hv는 다음과 같이 유도하였다.

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

여기서, ν는 입체적인 砥粒間隔, ψ는 砥粒先端角, D는 연삭숫돌의 直徑, d는 공작물의 직경, V_g는 연삭숫돌의 주속도, V_w는 공작물주속도이다.

그리고, 織岡貞次郎[4]는 숫돌작업면에 작용하는 입자가 공작물 표면거칠기에 미치는 영향이 불규칙하다고 간주하

고, 이를 確率論을 이용하여 공작물표면 임의의 점이 높이 Y을 초과하는 경우의 확률 P(Y)을 구해서 해석하고 있다. 그리고 砥粒分布와의 관계를 理論的, 實驗的인 검토를 보완하여 연삭숫돌 절입방향에 抛物線分布가 되는 입자수를 측정하여 自乘平均平方根 거칠기 Rrms로 나타냈다.

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

여기서, j는 동일점의 연삭횟수, c는 숫돌표면의 단위면적내의 입자수, α는 平均粒子先端角, H_0는 입자선단에 분포하는 깊이, D는 연삭숫돌의 直徑, d는 공작물의 直徑, V_g는 연삭숫돌의 주속도, V_w는 공작물주속도이다.

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

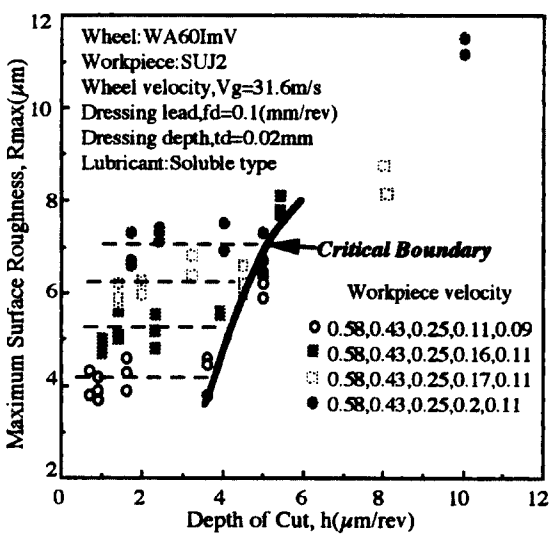

Fig. 1 Relationship between Maximum Surface Roughness and Grinding Depth of Cut

따라서, 본연구에서는 Fig.2와 같은 연삭깊이량에 주목한 최대표면거칠기와 가공조건을 고려하기 위해 幾何學的 硏削理論에서 도출된 최대지립절입깊이 g에 관해서 검토하였다. 최대 지립절입깊이 g는

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

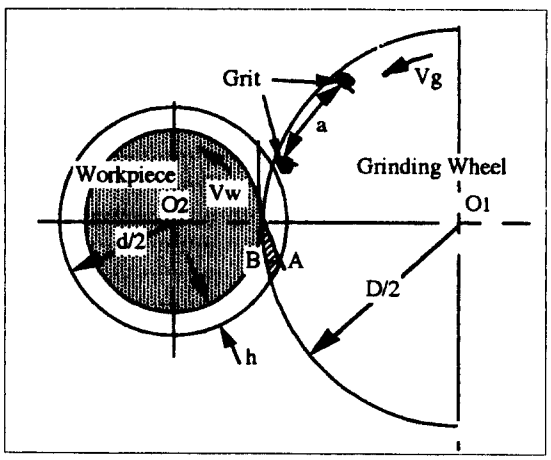

Fig. 2 Geometric Diagram of Maximum Depth of Cut

으로 주어진다. 여기서, a는 평균연속지립의 간격, D와 d는 연삭숫돌과 공작물의 직경, h는 연삭절입깊이량, V_g는 연삭숫돌의 주속도, V_w는 공작물주속도이다. 기하학적으로 유도된 식(7)은 砥粒의 先端形狀이 일정하게 숫돌면에 규칙적으로 같은 높이로 배열되었다하여도 공작물에는 지립입자가 가공된 상태로의 硏削軌跡(grinding mark)이 성립된다는 과정을 상정한 것으로, 주로 연삭숫돌이나 공작물의 운동조건 등의 영향을 비교하는데는 도움이 된다. 따라서 식(7)에 고려된 파라메터의 組合을 고려하여 이를 ψ라하면 최대표면거칠기 R_{max}와 가공조건과의 관계식을 유도할 수 있고, 이는

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

로 표현할 수 있다. 윗식 (8)은 공작물과 연삭숫돌의 종류에는 관계없고 加工條件 및 工作機械 特性만을 고려한 파라메터이다. 또한 최대높이표면거칠기 Rmax와 ψ와의 相關關係을 검토하기위한 실험결과를 보면

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

로 直線回歸式으로 표현되며, 식(9)의 상관관계 γ

=0.935로 매우 높게 나타났다. 그러나 이러한 상관관계는 연삭기의 剛性에 의하여 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 연삭기의 剛性이 클수록 상관관계는 크고, 작을수록 상관관계는 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

2.3 工作機械 剛性에 의한 自勵振動 特性

연삭가공중에 발생하는 自勵振動은 工作物加工面의 작업공정의 不安定에의한 再生效果, 숫돌작업면의 재생효과 및 공작기계의 강성 등에 기인하며, 연삭가공에 있어서는 진동제어를 위해 시스템에 피드백제어를 적용한다고하여도 가공계가 不安定하기때문에 시스템의 안정을 도모하는 데는 공작기계 특성을 강화하는 것이 바람직하다. 시스템이 가능한한 안정된 영역에서 작업할 수 있는 조건을 부여하기 위해서는 연삭기가 갖고있는 剛性 및 固有振動數와의 관계를 분석한 자료를 데이터 베이스화하여 활용함으로써 어느정도 안정된 加工系의 실현이 가능하다고 본다.

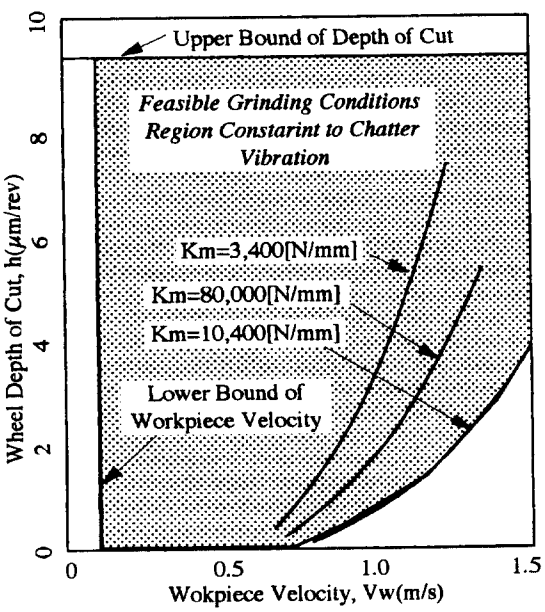

Fig.3 Chatter Vibration Limit According to Machine Tool Stiffness

Fig.3은 圓筒硏削(cylindrical grinding)에 있어서 機械系의 等價靜剛性에 따른 진동발생의 한계로 等價靜剛性이 높을수록 안정영역은 넓어져 시스템의 안정성이 커짐을 알 수 있다. 즉 機械系의 等價靜剛性 Km이 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 μ에 따른 安定·不安定領域으로 나타낸 것이 Fig.4이다.

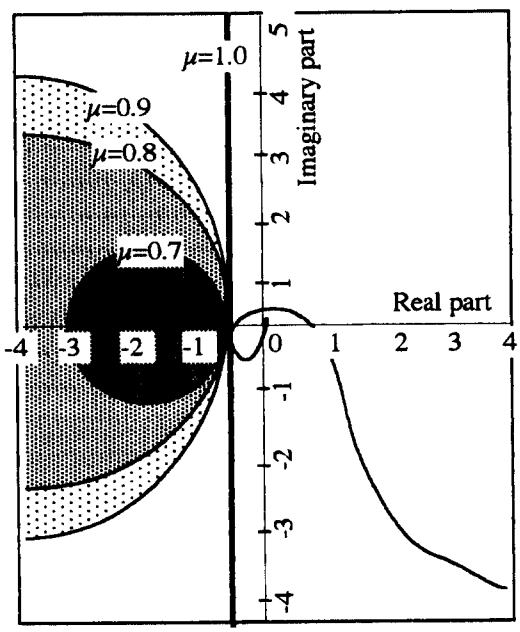

Fig.4 Stable Region of Chatter Vibration for Cylindrical Grinding

2.4 공작기계에 의한 연삭눌음 특성

최근에 와서 공작기계의 가공능률을 극대화하기 위한 일환으로 主軸을 고속화하는 경향이 있다[1]. 주축고속화에 따른 加工物品位, 즉 표면거칠기, 가공치수, 熱的損傷 등에 관한 연구[6]에서 보면 고속화에 따른 이와같은 영향은 오히려 향상된다. 따라서, 본연구에서와 같이 加工能率을 단위시간당의 工作物除去量으로 상정한 경우에 있어서는 연삭숫돌의 주축회전수에 따른 연삭눌음의 발생영역을 규명하여 최적가공조건 설정시의 데이터로 활용할 필요가 있다. 따라서 실험을 통해 얻은 결과가 Fig.5이다. 즉, 연삭숫돌의 주속도가 클수록 연삭눌음의 발생은 억제되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼때 될 수 있는한 주축을 고속화하는 것이 바람직하다.

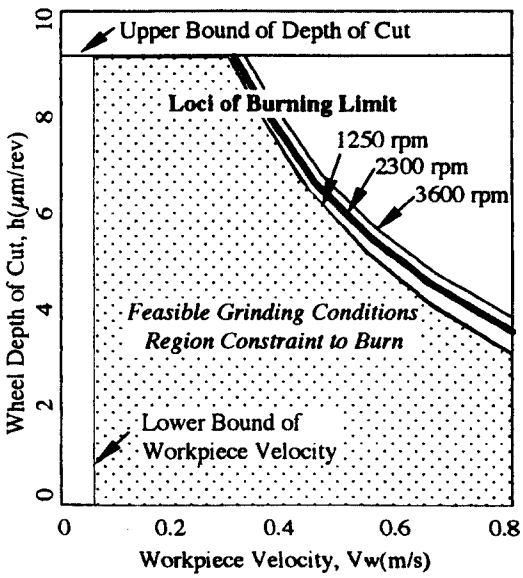

Fig.5 Grinding Characteristic Considered with Burn Limit

3. 데이터 베이스의 活用方法

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

$$\psi = f1(R_{max}) \quad (9)$$

$$h = f2(R_{max}) \quad (10)$$

그러나 실제로 식(9)와 식(10)은 연삭가공의 재현성이 적기 때문에 2가지식 모두 偏差가 크다. 이러한 편차를 觀測誤差로 취급하지 않고 연삭가공 공정의 퍼지성(fuzziness)에서 기인한다고 하면 윗 두식은 可能性線形回歸 모델[5]을 적용하여 回歸分析한 실험식을 데이터 베이스에 적용할 수 있다.

3.1 가공조건의 설정방법

연삭숫돌 주속도는 숫돌의 遠心破壞, 硏削機 特性(모터용량, 베어링 및 主軸剛性, 주축의 最大回轉數 등)을 고려해서 最高許容速度을 선택하기위해 ψ가 一定하고 V_g가 결정되면, 식(3)의 加工能率을 極大化하기 위해서는 h와 V_w의 파라메터 관계의 조합에 의해 결정된다. 여기서 ψ을 一定으로하면, 工作物周速度 V_w는

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

식(11)을 식(3)에 대입하면

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

으로 표현되며, 식(12)을 V_w로 나타내면

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

로 표현된다.

Fig.6은 ψ가 일정할때의 절입깊이량 h와 공작물주속도 V_w와의 관계를 나타낸다. ψ가 일정하면 식(12)와 식(13)으로부터 h가 증가할수록, 또한 V_w가 감소할수록 加工能率 Z'는 증가한다. 즉, Fig.6의 ψ가 일정의 曲線에서는 숫돌의 절입깊이량 h와 공작물주속도 V_w와의 組合에서 左上部 領域일때 Z'는 크게된다.

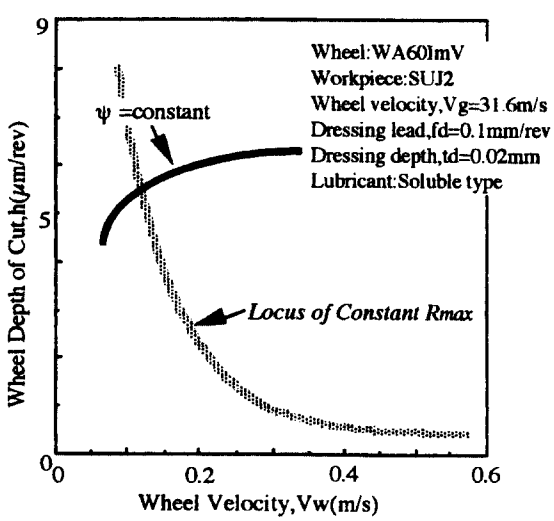

Fig.6 Locus of Constant Surface Roughness

이를 검증하기 위해 ψ가 一定한 값을 갖는 (h, V_w)의 조합조건에서 실험을 하여, 그결과가 拘束條件인 최대표면거칠기에 미치는 영향을 검토하였다. 그결과 Fig.8와 같이 理論的으로 ψ을 一定으로하면 최대표면거칠기가 일정으로 되어야 하나, 임의영역에서는 설정된 최대표면거칠기를 초월하는 限界領域이 존재함을 알 수 있다. 즉 요구되는 최대표면거칠기를 만족하면서 加工能率을 달성하기 위해서는 연삭숫돌의 절입깊이량를 Fig.7의 波線附近에서 설정하면 가공능률을 극대화할 수 있다.

3.2 可能性線形回歸 모델의 導入

퍼지집합의 한가지 해석으로서 멤버쉽 함수(membership function)을 가능성 분포로 간주할 수 있다[5]. 가능성분포함수로 삼각형퍼지수를 도입하면, 삼각형퍼지수 A의 멤버쉽 함수은

$$\mu_A(X) = 1 - |X-a|/c \tag{14}$$

로 표현되고, 係數 A=(a, c)로 한다. 여기서, a는 中心을, c는 可能性幅을 의미한다.

이와같은 가능성 선형회귀모델을 線形計劃 問題로 취급하면

$$\begin{aligned} &\min J(c) = \Sigma c^t |xi| \\ &y_i \le x_i^t\, a + (1-k)c\ |xi| \\ &y_i \ge x_i^t\, a - (1-k)\ c|xi| \\ &c_i \ge 0,\ i=1,2,\cdots,N \end{aligned} \tag{15}$$

으로 된다. 이 가능성선형 모델은 주어진 데이터 전부를 포함하는 區間線形 모델이 되어 旣存의 回歸分析과 같은 중심경향적 해석과는 달리 데이터가 갖는 性質과 特性을 적용할 수 있다. 본연구에서는 가능성회귀모델을 적용하면 식(9), (10)은

$$\psi = A_0 + A_1\ R_{max} \tag{16}$$

$$h = B_0 + B_1\ R_{max} \tag{17}$$

로 표현할 수 있다. 여기서, A_i, B_i (i=0,1)는 삼각형퍼지수의 常數와 係數이다. 식(16), (17)을 적용하여 최적 연삭조건을 설정하는 흐름도가 Fig.7이다. 즉, 우선 입력된 가공사양으로 최대표면거칠기 R_{max}을 檢索한다. 연삭숫돌 주속도 V_g에 있어서는 사용하는 연삭기의 강성을 고려하여 最大許容速度을 결정한다. 다음에 입력된 R_{max}을 이용하여 식(16)으로부터 ψ을 계산한다. ψ에 있어서는 요구된 표면거칠기를 반드시 만족해야하므로 Fig.7의 ψ min을 구한다. 같은 방법으로 입력된 R_{max}을 이용하여 식(17)로 부터 연삭숫돌 절입깊이량 h을 삼각형퍼지수로 계산한다.

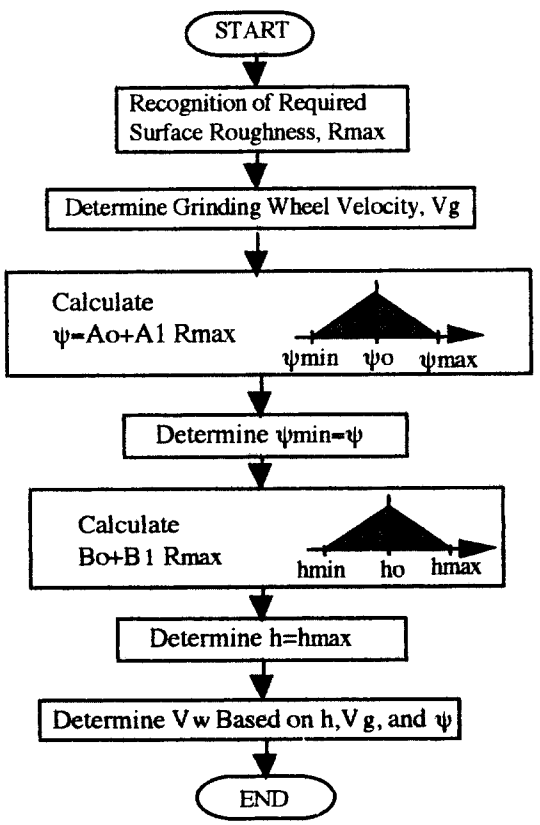

Fig.7 Flow-chart for Establishing the Optimum Grinding Conditions

본연구에서는 가공능률을 극대화하기위해 h을 되도록이면 최대화할 필요가 있으므로 Fig.7의 h_{max}을 h로 결정한다. 그다음 지금까지 구한 ψ와 h로부터 V_w을 결정하여 加工能率을 극대화할 수 있다.

4. 결 론

본연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 機械系의 等價靜剛性에 따른 진동발생의 한계로 等價靜剛性이 높을수록 안정영역은 넓어져 시스템의 안정성이 있으므로 공작기계의 강성을 고려한 조건설정이 가공능률의 향상을 도모할 수 있다.

(2) 연삭숫돌의 주속도가 클수록 연삭눌음의 발생은 억제되는 것으로 나타났다. 따라서, 가공조건 설정에는 공작기계가 갖고 있는 최대주축회전수를 고려하는 것이 바람직하다.

(3) 표면거칠기와 연삭조건에 관련된 파라메터 ψ와의 관계는 실험적으로 얻은 데이터에서 서로 상관계수가 0.93이상으로 상정한 파라메터의 유효성이 있음을 알 수 있다.

(4) 연삭공정의 재현성을 고려하여 가공조건설정에 이용한 가능성선형회귀 모델의 적용은 공작기계의 특성을 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

후 기

이 논문은 1998학년도 전주대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Gunhoi Kim, et al: "A Study on the Effect of Internal High-speed Grinding," 1st ABTEC Conference, JSGE, Seoul, Korea, Nov., 1993, P.99

(2) 佐藤健兒: "研削仕上げ面の粗さ", 精密機械, 第16券, 第5號, 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, 第63券, 第499號, 1960, p.1185

(5) 金建會, 稻崎一郎: "ファジィ回歸モデルによる最適研削條件の設定", 日本機械學會論文集, 第59券, 第566號, 1993, p.3186

(6) 김건회, 강재훈, 안상욱, 박종권: "內面研削의 加工能率 向上에 관한 연구", 제2권, 제6호, 1994, p.87