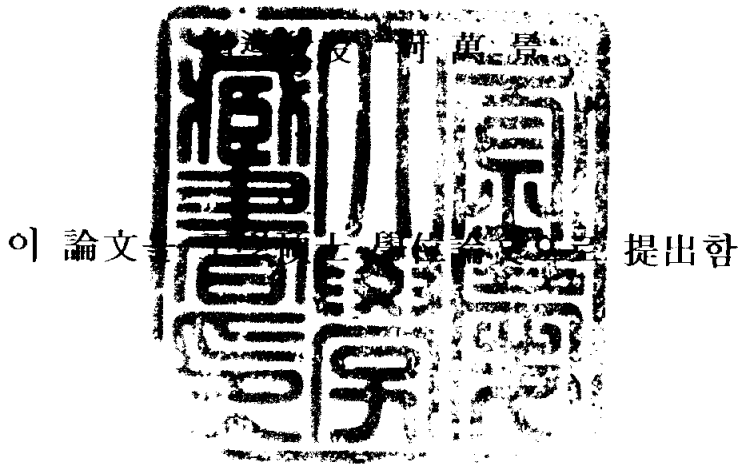


工學碩士 學位論文

SCM440 표면경화강의 원통연삭에서 연삭조건 선정 및 특성평가



2004年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學部 (機械設計·生産自動化專攻)

張 玟 碩

張玟碩의 工學碩士 學位論文을 認准함

2003年 12月 26日

主	審	工學博士	具	洋
委	員	工學博士	郭	在 燮
委	員	工學博士	河	萬 景



목 차

Abstract

Nomenclature

1. 서 론	1
2. 이론적 고찰	3
2.1 원통연삭의 기하학	3
2.1.1 연삭입자의 절삭깊이	3
2.1.2 접촉호의 길이	6
2.1.3 연삭숫돌의 절삭 방향	8
2.2 표면거칠기 이론	10
2.3 회귀분석 이론	12
2.4 홀 효과와 홀센서	16
3. 실험장치 및 방법	18
3.1 연삭숫돌 및 공작물	18
3.2 실험장치 및 실험방법	19
4. 실험결과 및 고찰	25
4.1 연삭동력	25
4.2 표면거칠기 변화	35
4.3 스파크아웃 효과	39
4.4 회귀분석 결과	43
5. 결 론	49
참고문헌	50

Selection of Grinding Conditions for Surface Hardened SCM440 and Evaluation of Characteristics at Cylindrical Grinding

Hyun-Seok, Chang

**Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University**

Abstract

Generally the grinding which is applied in the net shape manufacturing is an important process that influences directly the accuracy and integrity of products. This paper deals with conditions considered in cylindrical grinding such as grinding power, surface roughness, table speed, grinding direction, workpiece speed and depth of cut.

In order to measure vibration of grinding power and surface roughness, an experiment was made. In this experiment, equipments like hydraulic cylindrical grinding machine, hall current sensor, A/D convertor, PC, surface roughness measuring instrument and so on were used. The specimen, SCM440 which is widely used at shaft material was low frequency heat-treated for hardness.

In this experiment, shows variation of grinding power and surface roughness according to the grinding condition such as surface roughness, table speed, grinding direction, workpiece speed and depth of cut. Also, examined grinding power and surface roughness into spark-out effect observed for machining quality of workpiece. Besides, practice regression analysis and make numerical formula

for forecast R_a , R_{max} and grinding power without experiment. With the experimental investigation, suggest effective grinding conditions for surface hardened SCM440.

Key words : Cylindrical grinding(원통연삭), Hall current sensor(홀 센서)

Nomenclature

A	Area (mm^2)
a	Average distance of grain (mm)
a_m	Average area of chip (mm^2)
b	Wheel width (mm)
D	Wheel diameter (mm)
d	Workpiece diameter (mm)
g	Maximum grinding depth (mm)
k	Grinding direction
l	Length of contact arc (mm)
l_p	Length of contact arc in plunge grinding (mm)
l_i	Length of contact arc in inside grinding (mm)
l_c	Length of contact arc in cylindrical grinding (mm)
Q	Grinding capacity (m^3/min)
q	Grinding mass per grinding (m^3/min)
R	Wheel radius (mm)
r	Workpiece radius (mm)
R_a	Average surface roughness (μm)
$R_{\max}$	Peak to valley height (μm)
s	Table speed (m/min)
t	Depth of cut (μm)

V	Wheel velocity (m/min)
v	Workpiece velocity (m/min)
W	Grinding power (w, A-V)
Δ	Surface roughness of grinding (R_a , μm)
Z	Grinding depth (mm)

1. 서 론

최근, 기계가공산업에는 고정밀·고속가공으로 인하여 항공, 의료산업과 같은 다방면의 산업분야에서 고정도, 고품질의 부품을 요구하는 경향이 증가하고 있으며, 특히 선진공업국들을 중심으로 정보기기, 메카트로닉스, 항공우주산업 등 미래지향적 고부가가치의 첨단 산업분야에 많은 연구가 진행되고 있다.^[1,2] 이러한 첨단산업은 기계적 성질이 우수한 특수합금강, 스테인리스강, 알루미늄합금 그리고 표면경화강 등을 기계 부품의 요소로 주로 사용하고 있고, 이 재료들에 대한 정밀가공을 완성함으로써 고부가가치를 창출하게 된다. 그러나 이러한 재료는 가공이 매우 어려운 난삭재이기 때문에 고정도의 표면과 치수정밀도를 얻을 수 있는 연삭가공이 널리 이용되고 있다.

그러나, 연삭가공은 우수한 가공표면을 얻을 수 있으나, 다른 가공과는 달리 동일한 조건에서도 재현성이 어렵고 트러블 발생시 직접적인 원인 규명이 힘들며, 과학적이고 정량적인 지식이 부족하여 대부분의 작업이 숙련공의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 이는 연삭공정이 많은 가공변수와 연관되어 있고, 그 각각의 변수 상호관계가 정량적으로 명확히 규명되어 있지 않아 올바른 조건을 설정하기가 쉽지 않기 때문인데, 근래에 이르러 최적의 연삭가공 조건을 선정하기 위하여 Kazunori^[3]는 연삭작업을 위한 전문 시스템을 개발하였고, Inasaki^[4]는 퍼지 회귀모델을 이용하여 최적 연삭조건을 수립하였으며, 맹희영^[5]은 연삭가공조건 최적화에 대한 연구를 하는 등의 연구활동이 활발하게 진행중이다.

연삭공정에서의 연삭저항은 가공 도중에 발생하는 가공상태의 변화가 직접적으로 나타나기 때문에 연삭버닝(burning)이나 채터진동(chatter vibration) 발생의 검출에 매우 유용하다. 이러한 연삭버닝과 채터진동은

공구의 수명을 단축시키고 가공공정의 생산성과 공작물의 가공품위를 저하시키는 요인이 된다.

본 연구에서는 원통연삭(cylindrical grinding)에서 WA숫돌을 사용한 SCM440 표면경화강의 연삭특성을 파악하기 위하여 주축 모터의 전원 공급선에 홀센서를 장치하여 테이블의 이송속도와 절삭깊이의 가공 조건 변화에 따른 연삭동력을 측정하여 평가하였다. 또한, 상향연삭과 하향연삭의 특성을 파악하고자 공작물의 회전방향을 변화시켜 각각의 산출된 데이터를 비교하였고, 연삭가공 후 공작물의 표면거칠기(R_a , R_{max})를 측정하여 표면의 품위에 미치는 영향과 스파크아웃(spark out) 효과 등의 결과를 분석하였으며, 산출된 데이터를 이용한 회귀분석을 통하여 SCM440 표면경화강의 원통연삭가공에 있어서 최적의 가공조건을 제시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 원통연삭의 기하학

2.1.1 연삭입자의 절삭깊이

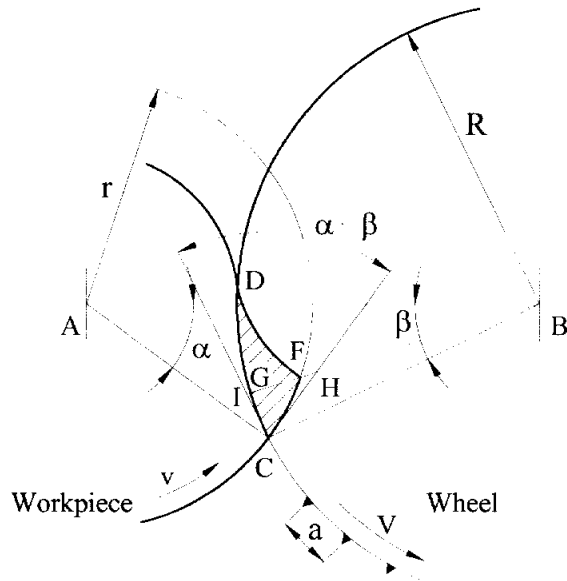


Fig. 1 Cutting depth of grinding grain

Fig. 1은 원통외면연삭의 경우의 연삭작용 부위를 표시한 그림이다. 겉보기 연삭깊이 Z 로 연삭할 때 연삭숫돌 원통의 연속절삭날의 평균간격을 a 라고 하면, 1번 절삭날이 절삭한 궤적은 DF이고 2번 절삭날이 절삭할 때까지 공작물은 CF만큼 회전하므로 2번 절삭날의 절삭면적은 사선으로 표시한 원호 CDF이다. 입자가 공작물에 접촉 시작시에는 절삭깊이가 0이며, 회전함에 따라 깊어져서 FG의 최대 깊이가 된 후에는 다시 감소하여 0이 된다.

그림에서 최대연삭깊이 g 에 대해서 고찰하면 다음과 같다.

$$g = a \frac{v}{V} 2\sqrt{Z} \sqrt{\frac{d+D}{dD}} \quad (2.1)$$

또 원통의 길이 방향의 이송속도를 s 라고 하면 공작물상의 1점의 합성속도는 $\sqrt{s^2 + v^2}$ 이므로 식(2.1)은 다음과 같다.

$$g = a \frac{v}{V} \sqrt{1 + \left(\frac{s}{v}\right)^2} 2\sqrt{Z} \sqrt{\frac{d+D}{dD}} \quad (2.2)$$

이 식으로부터 단일연삭의 최대연삭깊이 g 는 연삭조건에 따라 다음과 같은 영향을 받는다.^[6]

① 연속절삭날의 평균간격 a 가 클수록 g 가 커진다. 여기서 a 는 숫돌 표면상의 단순한 절삭날의 평균간격이 아니고 숫돌 표면상에서 숫돌 회전 방향의 동일원주선상에 정렬하고 있는 절삭날간의 간격으로서 연속절삭날 간격(successive cutting point spacing)이라고 한다. 이 간격은 절삭날의 높이의 차, 각절삭날 끝의 모양의 상위, 옆 절삭날의 간섭 등의 이유로 정해진 값이 아니며, 연삭가공조건 및 연삭숫돌의 명세에 따라 다르지만, 연속절삭날 간격이 평균 입자간격보다 훨씬 크며, 입도가 크고 결합도가 낮을수록 연속절삭날 간격이 크다.

② v 의 증가와 V 의 감소는 g 를 증가시키고 입자 1개당의 연삭력이 증대하여 입자가 탈락하기 쉬우며, 따라서 숫돌은 무르게 작용하는 결과가 된다. v 의 감소와 V 의 증가는 반대로 숫돌은 경하게 작용하게 된다. 이와 같이 본래의 결합도와는 별도로 사용상태에 있어서의 연삭입자 탈락의 난이도를 동적경도(effective hardness)라고 한다.

③ 겉보기 연삭깊이 Z 가 증가하면 g 도 증가하고 숫돌은 무르게 작용한다.

④ 연삭숫돌과 공작물의 직경이 g 에 영향을 미친다. 숫돌과 공작물의

직경이 적어질수록 g 는 커지고 슛돌은 무르게 작용한다.

⑤ g 는 $v\sqrt{Z}$ 에 비례하고 단위시간의 연삭량은 vZ 에 비례한다. 따라서 동일연삭량에 대해서는 v 를 감소시키고 Z 를 증가시키는 것이 g 를 적게하고 슛돌은 경하게 작용하여 슛돌의 마멸이 적다.

2.1.2 접촉호의 길이

1개의 절삭날이 공작물에 접촉하기 시작해서 접촉이 끝날 때까지 깎고 가는 궤적의 길이를 접촉호의 길이라고 한다. Fig. 2에서 원호 EC가 접촉호의 길이이다.

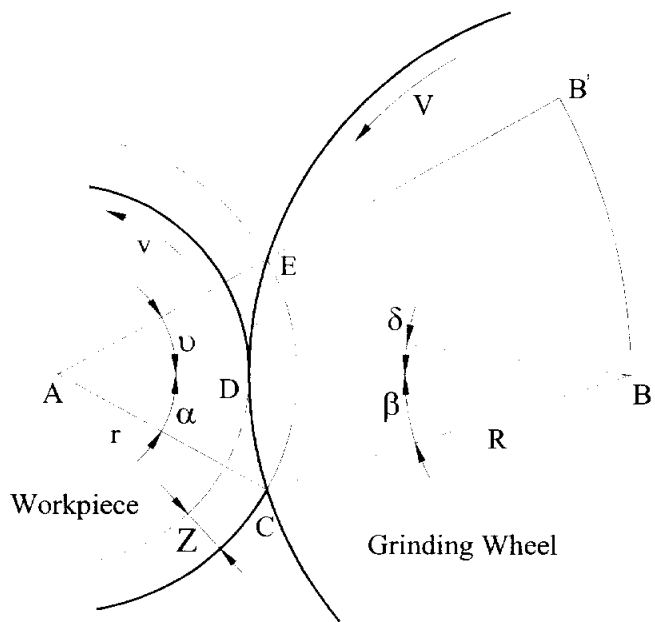


Fig. 2 Contact arc in cylindrical grinding

일반 연삭조건에서는 $v \ll V$ 이므로 입자가 원호 EC를 통과하는 동안 공작물의 회전각 θ 도 매우 작다. 따라서 ED도 매우 짧으므로 입자 궤적은 슛돌바퀴 외주와 일치한다고 가정해서 접촉호의 길이를 DC라고 보고 다음과 같이 계산된다.

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2AB \times BC \times \cos \beta \quad (2.3)$$

$$AC = r, AB = R + r - Z, BC = R, \cos \beta \doteq 1 - \beta^2 / 2$$

를 대입하면 β 는 다음과 같다.

$$\beta = \sqrt{\frac{2rZ}{R(r+R)}} \quad (2.4)$$

접촉호의 길이 $l = R\beta$ 에 대입하면 다음과 같다.

$$l = \sqrt{2Z} \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \quad (2.5)$$

공작물속도 v 가 클 경우에는 Fig. 2의 원호 DC는 트로코이드 곡선 (trochoid curve)이 되므로, 이런 경우 DC의 길이 l_c 는 근사적으로 다음 식으로 구해진다.

$$l_c \doteq l + V \cdot \frac{l}{V} = \sqrt{2Z} \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \left(1 + \frac{v}{V} \right) \quad (2.6)$$

이 식에서 $\frac{v}{V}$ 의 값은 보통 10^{-2} 정도이므로 이것을 무시하면 식 (2.5)

가 된다. 또 v 가 매우 크고 Z 가 미소할 경우에는 Fig. 2에서 ED를 무시할 수 없으므로 식 (2.6)은 다음과 같이 계산된다.

$$l_c = K \sqrt{2Z} \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \left(1 + \frac{v}{V} \right) \quad (2.7)$$

(단 $1 \leq K \leq 2$)

2.1.3 연삭숫돌의 절삭 방향

Fig. 3과 같이 연삭숫돌의 회전방향과 공작물의 회전 방향에 따라 상향연삭(up-grinding)과 하향연삭(down-grinding)이 있다.

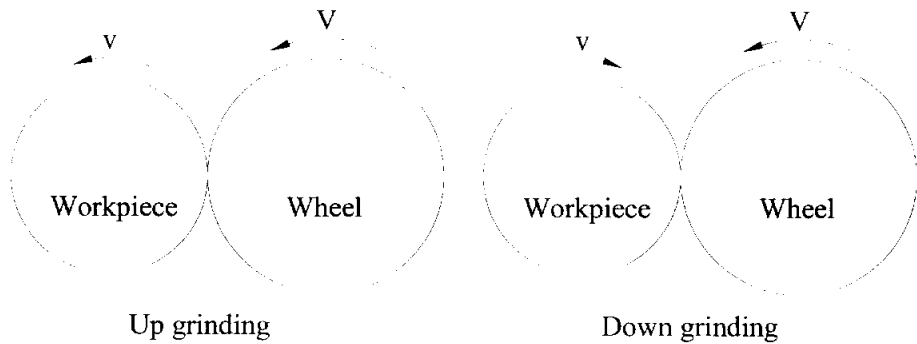


Fig. 3 Antithesis up-grinding and down-grinding

연삭 숫돌의 회전 방향과 공작물의 회전 방향이 반대일 때, 즉 숫돌의 입자가 절삭을 시작할 때 칩이 가장 얇으며 가공이 끝날 때 가장 두껍게 되는 연삭을 상향연삭이라 하며, 숫돌의 회전방향과 공작물의 회전 방향이 같은 때, 즉 절삭 초기에 칩의 두께가 가장 두껍고 가공이 끝날 때에 가장 얇게 되는 연삭을 하향연삭이라 한다.

상향연삭은 숫돌과 공작물의 회전 방향이 서로 상반되므로 공회전 현상(idle)이 제거되는 장점이 있지만, 가공 초기에 이송이 적으면 숫돌의 마모가 쉽게 되는 경우가 많다. 반면에 하향연삭은 공작물을 누르면서 가공을 하므로 상향연삭에서와 같은 슬라이딩이 없지만, 테이블 이송기구의 백래쉬에 의하여 적은 공회전 현상이라도 있으면 채터가 발생하게 된다.^[7]

Wager^[8]는 상향연삭이 하향연삭에 비해서 연삭력이 낮고, 표면의 최대온도도 비교적 낮지만, 상향연삭과 하향연삭에서의 연삭력이 같을 경

우에는 상향연삭시의 표면온도가 더 높다고 하였다. 또한 이러한 표면 온도의 분포와 표면거칠기는 관계가 있음을 밝혔다.

2.2 표면거칠기 이론

가공된 공작물의 평가는 크게 치수와 표면품질(integrity)의 두가지 관점에서 생각할 수 있다. 가공치수는 가공물의 미시적 관점에서 본 크기를 나타낸 것이고, 표면품질은 표면층의 기계적, 금속학적인 변화, 그리고 표면거칠기 등을 표시한다.

연삭가공시의 표면거칠기는 여러 많은 요인에 의해 영향을 받는데, 크게 분류하면 다음과 같다. 첫째, 연삭숫돌 입자의 크기, 숫돌의 직경, 입도, 결합제의 종류 등 연삭 숫돌에 의한 요인, 둘째로 숫돌의 드래싱 상태, 숫돌 마모, 공작물의 종류에 의한 요인과 마지막으로 가공속도, 이송속도, 연삭유제의 종류와 공급방법에 기인한 가공조건 등에 의해서 분류할 수 있다. 연삭가공에서 얻어진 가공면 거칠기의 최대골바닥 높이에 관한 식은 다음과 같이 주어진다.^[9]

$$H = 0.97 \nu^{6/5} (\cot \gamma)^{2/5} \left\{ \frac{\nu}{V} \sqrt{\frac{1}{D} + \frac{1}{d}} \right\}^{2/5} \quad (2.8)$$

여기서, 숫돌입자 1개가 점하는 체적은 ν^3 이며, 연삭 가공면은 숫돌 입자로 깎여지므로 표면거칠기를 절삭가공면과 같이 연삭방향의 거칠기와 이것과 직각 방향의 거칠기로 나누어 원통연삭인 경우에 연삭숫돌 입자간의 거리를 a , 연삭숫돌의 반경을 R , 연삭숫돌의 원주속도를 V , 공작물의 원주속도를 ν 라고 할 때, γ 는 다음과 같다.^[10]

$$\gamma = \frac{\nu}{V} \cdot \frac{a}{R} \quad (2.9)$$

표면거칠기의 측정은 일반적으로 촉침식 조도계를 이용하고, 정량적인 평가를 위해 충분한 표본수를 획득할 수 있는 샘플 길이를 선택한다. 연삭 가공과 같은 다듬질 가공된 표면거칠기 측정에 사용되는 샘플 길이는

0.8mm 정도가 일반적이다.^[11]

2.3 회귀분석 이론

회귀분석은 실험 데이터를 이용하여 작업조건의 최적화를 설정하는 방법으로 다음과 같이 전개된다.^[12,13]

x 라는 변량과 y 라는 변수 사이에 함수관계가 있을 때, 그 함수를

$$y = a + \beta x \quad (2.10)$$

라는 형태로 표시할 수 있으며, 이것은 단순회귀분석을 실시함으로써 데이터로부터 이 식을 추정할 수 있다. 그러나 실제로 실험이나 측정에는 오차가 수반되는 것이 일반적이므로, 그 오차 ϵ 가 평균 0, 분산 σ_E^2 를 갖는 정규분포를 따르는 것으로 생각하여,

$$y = a + \beta x + \epsilon \quad (2.11)$$

이라는 형태로 표시하게 된다. 여기서 회귀계수 a, β 는 각각 절편과 기울기를 의미한다. 실험을 n 번 반복하여 얻은 결과로부터 a, β 의 추정치를 계산하여

$$Y = a + bx \quad (2.12)$$

이라는 회귀식을 구할 수 있다. 물론 이것에는 추정오차가 포함되어 있으므로 i 번째의 측정치 y_i 와, 식 (2.12)로부터 추정되는 Y 값들이 같게 된다고 할 수 없다. 따라서

$$S_{(xy)} = \sum_i (y_i - Y_i)^2 \quad (2.13)$$

라 하면, 이것이 추정오차를 표시하는 제곱합이 되고,

$$S_{(yy)} = b^2 S_{(xx)} + S_{(xy)} \quad (2.14)$$

인 관계가 성립한다. 여기서 $S_{(xx)}, S_{(yy)}$ 는 각각 x, y 의 제곱합, $\bar{x}, \bar{y}$ 를 각각 x, y 의 평균이라 하면 식 (2.15)가 된다.

$$\begin{aligned}
S_{(xx)} &= \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \\
S_{(yy)} &= \sum_i (y_i - \bar{y})^2
\end{aligned} \tag{2.15}$$

회귀식 $y = a + bx$ 를 $S_{(xy)}$ 의 값이 최소가 되도록 구한다고 하면, 식 (2.13)으로부터 구해진

$$\begin{aligned}
S_{(xy)} &= \sum_i (y_i - a - bx_i)^2 \\
\sum_i y_i &= a \cdot n + b \sum_i x_i \\
\sum_i x_i y_i &= a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2
\end{aligned} \tag{2.16}$$

을 풀면 된다. 그것에 의하여 아래의 식 (2.17)이 얻어진다.

$$a = \bar{y} - b \bar{x}, \quad b = \frac{S_{(xy)}}{S_{(xx)}} \tag{2.17}$$

a 와 b 는 각각 식 (2.11)에서의 α 와 β 의 추정치이다. 여기서 $S_{(xy)}$ 는

$$S_{(xy)} = \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

가 된다.

일반적으로 회귀분석에서는 독립변수 x 를 요인으로 잡고 설명변수라고 하고, 종속변수 y 를 결과로서 특성으로 잡고 목적변수 또는 반응변수라고도 한다. 단순회귀분석에서는 설명변수가 1개이고 1차만을 생각할 수 있으나, 한 설명변수에 대해서 2차까지를 고려한 2차 회귀를 생각하면 아래의 식 (2.18)의 회귀식이 구해진다.

$$Y = a + b_1x + b_{11}x^2 \tag{2.18}$$

이때는 식 (2.18)을 x 로써 미분하여 0이라두면 최대값이 구해지고, y

를 최대 또는 최소로 하는 x 의 값이 얻어진다. 최적조건을 구하는 방법으로 이용되는 경우도 있다.

설명변수의 수가 많을 때는 다중회귀분석을 실시하고, 이 때도 아래의 식 (2.19)와 같은 중회귀식을 얻을 수 있다.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_px_p \quad (2.19)$$

단순회귀일 때는 스칼라량으로서 식 (2.16)의 정규방정식을 이용해서 구했으나, 이와같은 다중회귀분석에서는 행렬로 설명하는 편이 간단하다. n 조의 측정치를

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & \cdots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix}$$

이라하면

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 & \cdots & \sum x_p \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1x_2 & \cdots & \sum x_1x_p \\ \sum x_2 & \sum x_1x_2 & \sum x_2^2 & \cdots & \sum x_2x_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \sum x_px_p \\ \sum x_p & \sum x_1x_p & \sum x_2x_p & \cdots & \sum x_p^2 \end{bmatrix}$$

$$X'y = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum x_1 y \\ \vdots \\ \sum x_p y \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix}$$

가 된다. 이로부터 다음의 행렬을 얻을 수 있다.

$$X'Xb = \begin{bmatrix} b_0 n + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + \dots + b_p \sum x_p \\ b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + \dots + b_p \sum x_1 x_p \\ b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + \dots + b_p \sum x_2 x_p \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \dots \quad \quad \quad \vdots \\ b_0 \sum x_p + b_1 \sum x_1 x_p + b_2 \sum x_2 x_p + \dots + b_p \sum x_p^2 \end{bmatrix}$$

이것으로부터 정규방정식은 식 (2.20)이 되고,

$$X'y = X'Xb \quad (2.20)$$

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.21)$$

이것을 풀면 식 (2.21)로부터 각각의 편회귀계수 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ 들이 구해진다. 여기에 b_0 는 단순회귀일 때 a 로 표시한 것이다.

고려해야 하는 설명변수의 수가 많이 있는 경우, 그 모든 것이 목적변수에 같은 정도로 영향을 준다고는 할 수 없다. 그래서 이들의 설명변수에 대한 편회귀계수를 구하고, 그 분산을 오차분산으로 나누어 F값을 구하여서, 그 값이 큰 것부터 순차적으로 회귀식에 포함시키는 방법이 있다. 이때 F값의 기준을 설정하고 그것에 도달할 때까지의 몇 개의 설명변수를 선택할 수 있는데, 이것은 변수 선택법중에 하나이다.

2.4 홀 효과와 홀센서

홀 효과는 1879년 미국의 물리학자인 E. H. Hall에 의해 발견되었으며, 금속이나 반도체 등의 고체를 자기장 속에 놓고, 자기장의 방향에 직각으로 고체 속에 전류를 흘리면, 두 방향 각각에 직각방향으로 고체 속에 전기장이 나타나는 현상이다. 이것을 홀 기전력이라 하는데 전하를 띤 입자가 자기장 속을 운동하면, 로렌츠의 힘을 받아 운동방향이 굽어진다. 따라서 고체 속의 전류의 흐름이 한쪽으로 치우쳐 전하의 분포가 비평형이 되기 때문에 전기장이 나타나게 된다.

전류가 같은 방향이라도 전하의 음양에 따라 발생하는 전기장의 방향이 달라진다. 또 입자의 농도에 따라서도 전기장의 세기가 달라지는 성질이 있다. 이 효과를 이용해서 고체 속에서 전류를 운반하는 전자의 농도나 움직이기 쉬운 정도를 측정하고, 특히 반도체에서는 자유전자와 함께 자유양공에 대한 식별 및 측정도 할 수 있다.^[14,15]

이러한 홀 효과를 이용한 센서가 홀센서이며, 홀 센서의 종류는 크게 회로의 종류에 따라서 개루프(open loop) 형태와 폐루프(closed loop) 형태의 두 종류로 구분된다. 개루프 형태는 개방형 회로로 구성되어 측정 전류 대비 출력신호가 전압신호로서 출력되는 특징이 있으며, 이는 센서 내부의 연산증폭기를 통해서 측정전류와 동일한 형상과 비례값의 신호로 출력되므로 A/D 변환기나 연산증폭기 및 제어회로의 입력단으로 특별한 구성을 첨가하지 않고 손쉽게 연결할 수 있다는 장점이 있다. 이에 반해서 폐루프 형태의 홀센서는 무자속밀도(zero flux) 개념으로 구성되며, 이는 자성체의 자속밀도가 항상 0 상태를 유지시키는 방법으로 측정전류의 흐름과 반대인 출력신호의 전류를 역으로 흘림으로서 자성체의 특징에 의존하지 않고, 보다 높은 주파수 대역과 응답성, 자성체의 온도 변화

특성을 현저히 개선시키는 장점이 있다.

Fig. 4에 홀센서(hall sensor)의 개념도를 나타내었다. 그림에서 I_c 는 제어전류이며, B 는 자속밀도, v_h 는 홀 전압, I_f 는 측정하고자 하는 전원을 나타낸다.

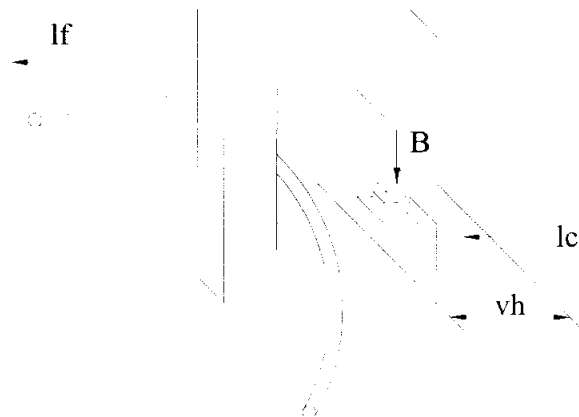


Fig. 4 Schematic diagram of hall sensor

3. 실험장치 및 방법

3.1 연삭숫돌 및 공작물

본 실험에 사용한 연삭숫돌은 알루미나 계열의 WA로 비트리파이드 본드를 사용하였으며, 입도 #80, 결합도 K이다. 숫돌은 직경 320mm, 폭 38mm로 원통연삭을 하였다.

공작물은 축의 재료로 널리 사용되고 있는 SCM440 표면경화강을 직경 (Ψ) 120mm, 길이(L) 150mm로 선반가공 후에 경도를 높이기 위하여 저주파 열처리를 하여 경도는 H_{RC} 60으로 균일하게 제작하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 공작물의 화학적 조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the workpiece

Workpiece	SCM440
Chemical composition (%)	C(0.38), Si(0.27), Mn(0.8), Cu(0.11), Ni(0.12), Cr(1.09), P(0.016), S(0.018), Al(0.015) V(0.004), Ti(0.004), Mo(0.19)

3.2 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 연삭기는 유압구동식 원통연삭기(Minaguchi Seisakusho, MGU-65-264)로서, 연삭숫돌은 Al_2O_3 계의 WA로 KmV(제일연마, $320 \times 38 \times 50.8$ mm) 평형숫돌을 사용하였다.

실험조건의 변경시마다 연삭숫돌의 입자를 고르게 하기 위해서 단석 다이아몬드로 드레싱을 하였다.

Photo. 1과 Photo. 2는 실험장치의 구성을 나타낸 것으로 공작물의 연삭가공시 발생하는 연삭저항력을 측정하기 위해서 모터에 홀센서(한국센서, SMA040-12)를 주축 구동 모터의 전원 케이블에 연결하여 설치하고, 공작물 연삭가공시 홀센서에서 검출된 연삭동력 신호는 오실로스코프(oscilloscope, Agilent 54624A)와 A/D 변환기를 거쳐 디지털화되어 개인용 컴퓨터로 전송되고, 소프트웨어를 사용하여 신호를 연산 처리를 한 다음 연삭저항력의 경향을 판단하였으며, 그 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 연삭 가공된 공작물의 표면거칠기를 측정식 표면조도계(Mitutoyo, SURF-TEST 301)로 측정하였으며, Photo. 3에 표면조도계의 사진을, Table 2와 Photo. 4는 홀 센서의 성능과 사진을 나타내었다.

모든 연삭가공시 상향, 하향연삭을 모두 적용하였으며, 습식연삭을 실시하였다. 숫돌의 원주속도는 1800rpm으로 일정하게 적용하였고, 절삭깊이를 20, 25, 30, 35 μ m, 테이블의 이송속도를 1.46, 2.14, 2.31m/min, 공작물의 회전수는 52, 64, 76rpm 까지 단계별로 변화시키면서 실험하였다. 모든 실험은 1회, 3회, 6회 왕복 가공한 후, 홀 센서를 통해서 얻어진 전기 신호를 동력으로 환산하여 공작물을 가공할 때 주축 모터에 작용하는 동력 측정 및 표면거칠기를 측정하였다.

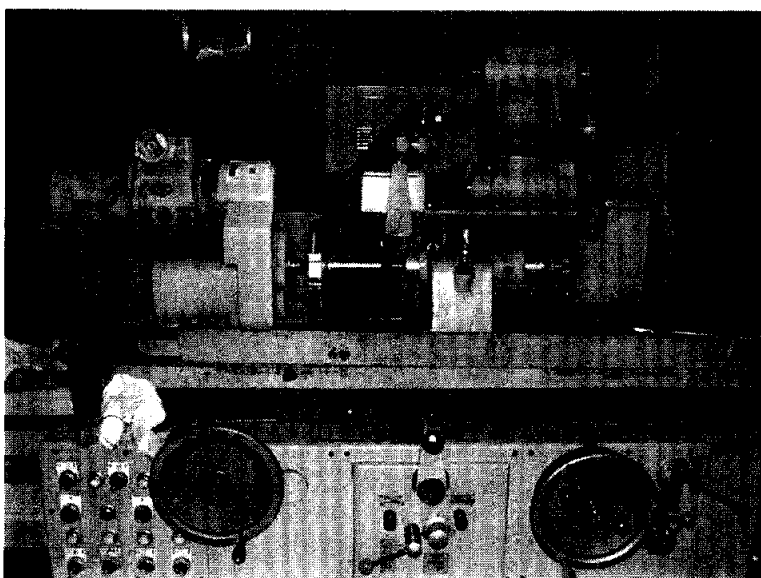


Photo. 1 Experimental setup (grinding machine)

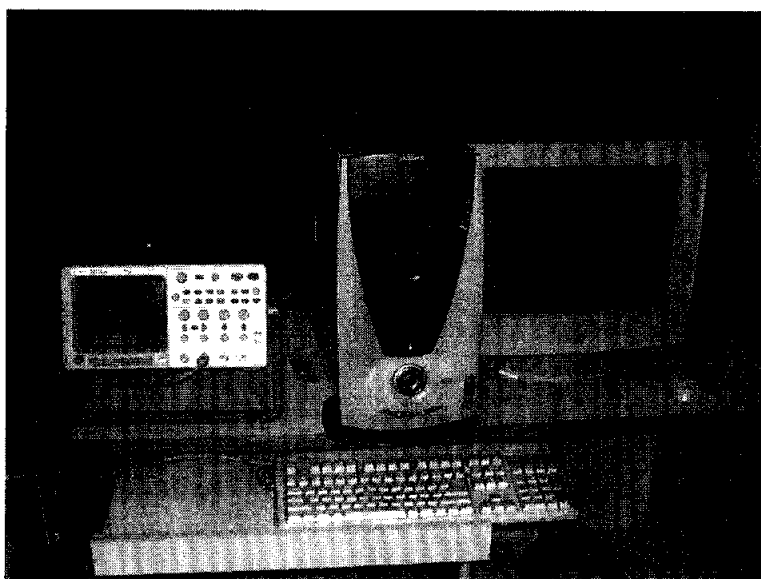


Photo. 2 Experimental setup (PC & oscilloscope)

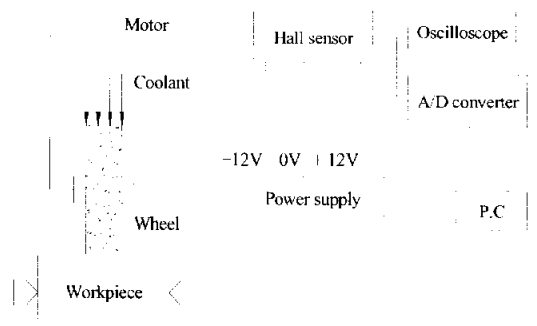


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

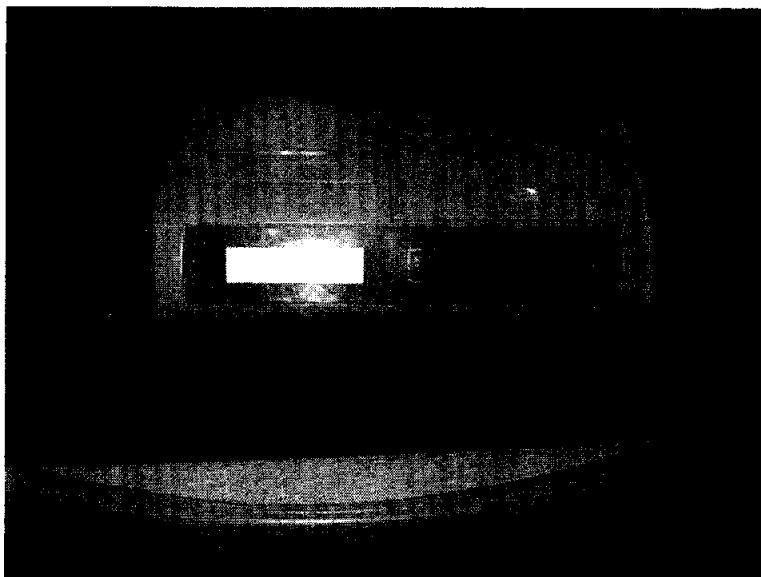


Photo. 3 Measurement of surface roughness

Table 2 SMA040-12 type hall sensor specification

Parameter	SMA040-12
rated current (If)	40 A
linear range	80 A
output voltage (Vh)	$\pm 4V \pm 1\%$ at If
zero current offset	within $\pm 20mV$ at If = 0
linearity of output	within $\pm 1.0\%$ of Vh at If
supply voltage	$\pm 12V \pm 5\%$
response time	5 μ sec max
frequency range	DC ~ AC 20kHz and 25kHz Max
output voltage temperature Coef.	within $\pm 0.1\%$ / $^{\circ}C$
zero offset voltage temperature Coef.	within $\pm 1.0mA$ / $^{\circ}C$
dielectric strength	2.5KV AC with 60Mhz $\times$ 1 minute
operating temperature	$-10 \sim +80^{\circ}C$
storage temperature	$-25 \sim +85^{\circ}C$

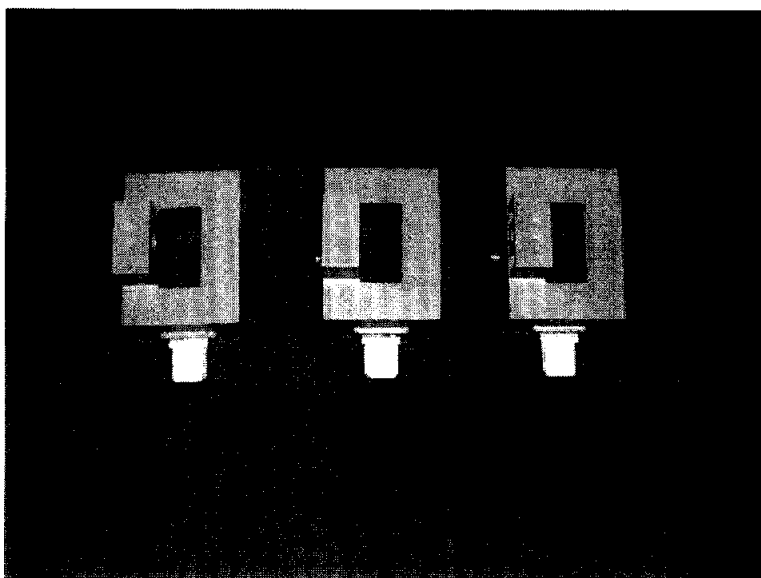


Photo. 4 Hall sensor

Table 3과 4는 본 실험에 사용된 실험장치와 실험조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Experimental equipments

Instrument	Model
grinding machine	HGU-65-264
grinding wheel	WA80KmV
workpiece	SCM440
hall sensor	SMA040-12
roughness tester	Mitutoyo SURFTEST-301
A/D converter	ADLINK 8112PG

Table 4 Experimental conditions

Item	Condition
wheel speed	1,800 (rpm)
table speed	1.46, 2.14, 2.31 (m/min)
depth of cut	20, 25, 30, 35 (μm)
coolant	water soluble semi chemical type (10:1)
dressing	single pointed diamond dressor
grinding type	traverse & up, down grinding & wet

4. 실험결과 및 고찰

본 장에서는 SCM440의 연삭특성을 알아보기 위하여 테이블의 이송속도를 1.19, 1.46, 2.14m/min 으로 변화시키고 절입깊이를 20, 25, 30, 35 μ m 까지 단계 변화시키면서 연삭가공 실험을 하였다. 우선 연삭동력을 측정하여 각각의 가공조건에 따른 연삭동력의 변화를 분석하였고, 이를 바탕으로 고품위의 가공물을 얻기 위하여 다중회귀분석을 하였으며, 스파크아웃 효과에 따른 연삭동력과 표면거칠기를 평가하였다.

4.1 연삭동력

연삭 슷돌을 구동하는 주축 모터에 공급되는 전류를 측정하여 동력을 산출하였다. 주축 모터는 3상 교류 전원이 공급되고, 슷돌이 공작물을 가공하면서 작용하는 부하량은 결과적으로 공작물을 연삭할 때 발생하는 연삭력과 같기 때문에 모터의 동력을 산출하여 나타내었다.

모터의 전류 변화는 10A 당 1V의 전압 신호를 출력하는 홀 센서에 모터에 전원을 공급하는 전선을 통과시키고, 홀 센서의 신호 출력 단자를 오실로스코프와 A/D 변환기에 연결하여 신호의 변화를 관찰하여 저장하고, 저장된 데이터를 전압 단위에서 와트(W)로 변환하여 나타내었다. Fig. 6에 와트 단위로 변환한 모터의 동력신호의 보기를 나타내었다.

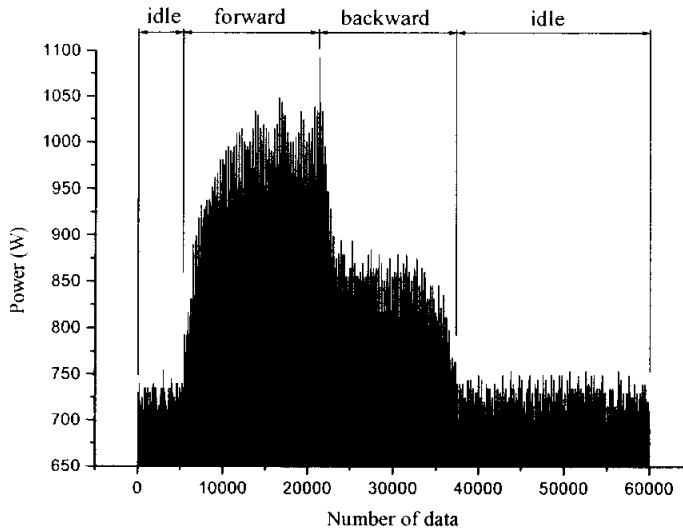
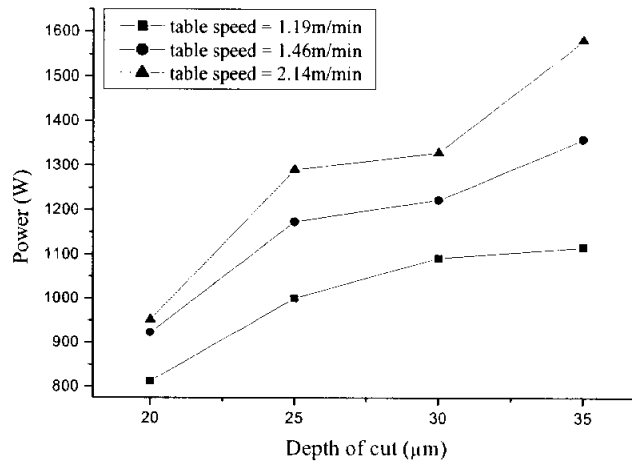


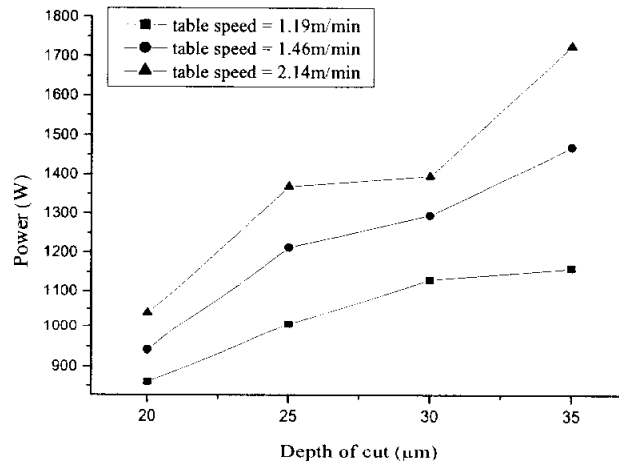
Fig. 6 Example of changed the current signal into watt

Fig. 7은 WA숫돌을 이용하여 SCM440을 상향연삭하고 이때 절입량에 따라 발생하는 동력을 측정한 것으로 (a), (b), (c)에 각각 공작물 회전수 52, 64, 76rpm의 결과를 나타내었다. 절입깊이를 20, 25, 30, 35 μ m, 테이블의 이송속도를 1.19, 1.46, 2.14m/min으로 단계변화 시키면서 실험한 결과이다.

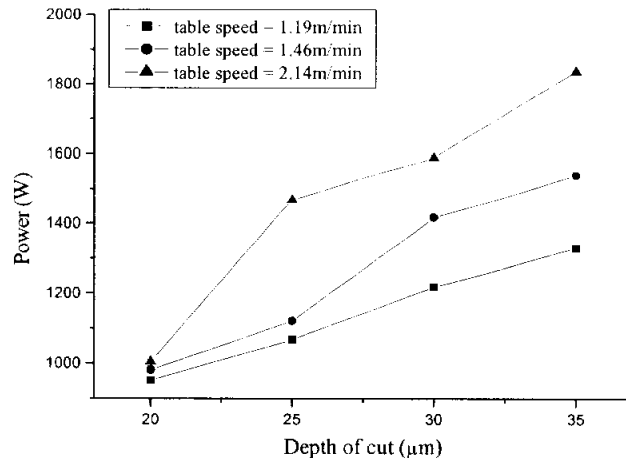
Fig. 7에서 나타난 바와 같이 절입량이 많을수록, 공작물의 회전 속도가 빠를수록 연삭동력이 크게 나타남을 알 수 있다. 같은 절입깊이라 하더라도 공작물의 회전속도가 빠를수록 연삭동력이 더 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 공작물과 숫돌과의 상대속도가 더 크기 때문으로 판단된다. 또한, 테이블의 이송속도의 증가에 비례하여 연삭동력의 증가는 공작물의 1회전당 숫돌 이송량의 차이 때문이다.



(a) workpiece speed : 52rpm



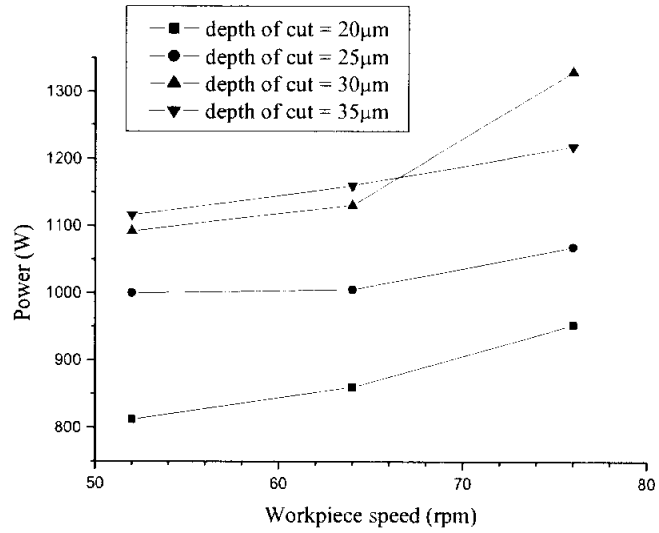
(b) workpiece speed : 64rpm



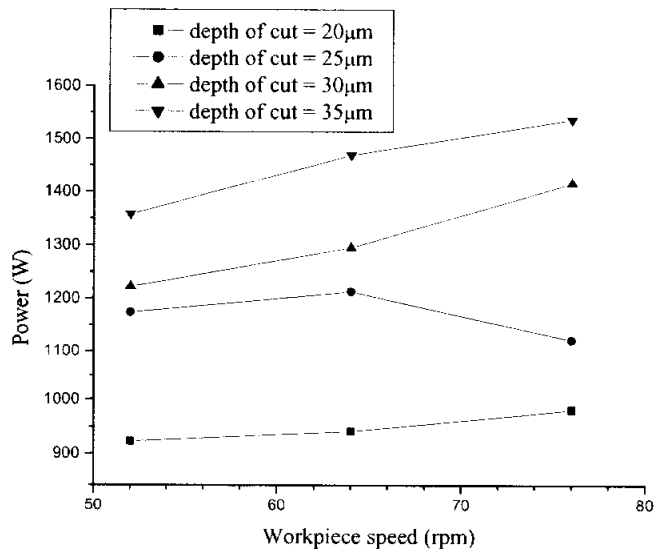
(c) workpiece speed : 76rpm

Fig. 7 Power versus depth of cut (up-grinding)

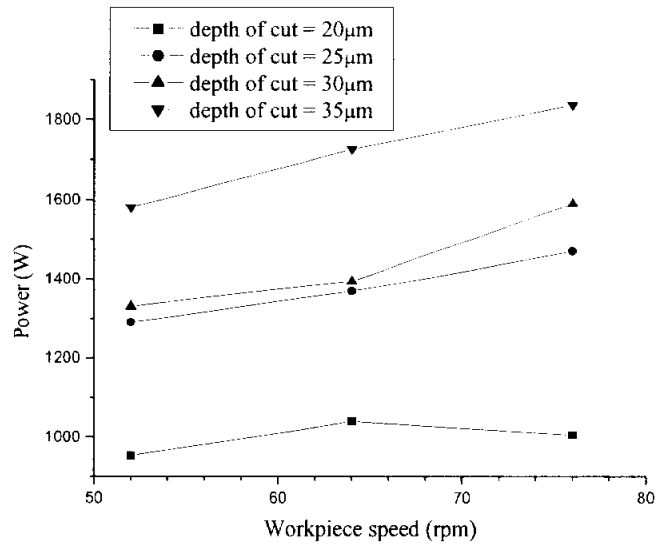
Fig. 8은 상향연삭에서 테이블 이송속도가 같을 경우, 공작물 회전속도에 따른 연삭동력을 측정하여 나타낸 그래프이다. 상향연삭에서는 공작물의 분당 회전수가 많아지면 연삭동력이 증가하였으며, Fig. 8(a), (b), (c)에서 보는바와 같이 테이블의 이송속도가 빨라짐에 따라서도 연삭동력이 증가하였다. 이와 같은 결과는 상향연삭에서는 공작물과 연삭숫돌과의 상대속도가 공작물의 분당 회전수가 증가함에 따라서 더 빨라졌기 때문이며, 테이블의 이송속도가 증가하면 공작물 1회전당의 숫돌 이송량의 증가로 인하여 결과적으로 더 많은 체적의 공작물을 제거하기 때문이다.



(a) table speed : 1.19m/min



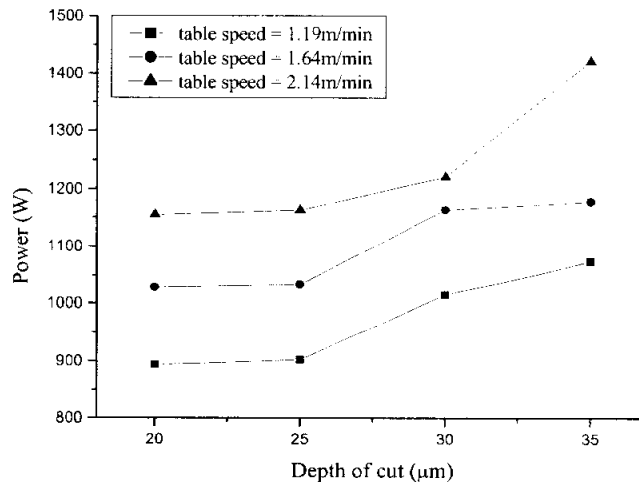
(b) table speed : 1.46m/min



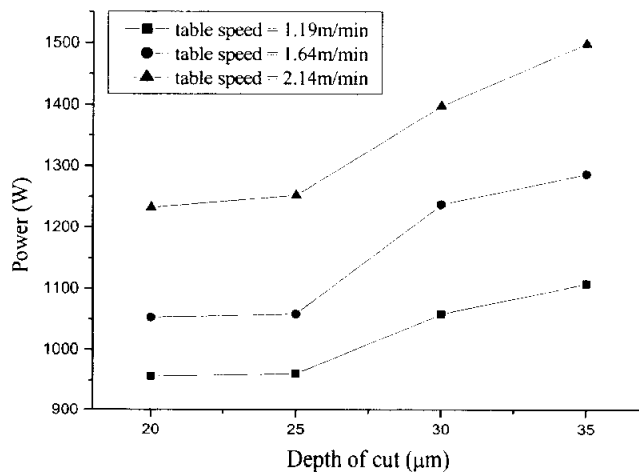
(c) table speed : 2.14m/min

Fig. 8 Power versus workpiece speed (up grinding)

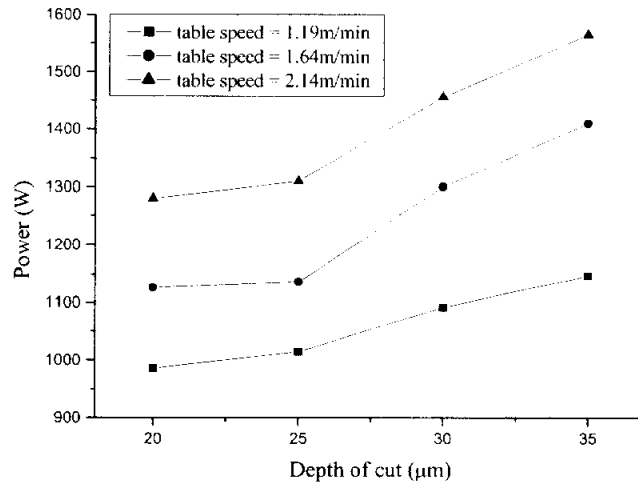
하향연삭은 상향연삭과 테이블 이송속도, 공작물의 분당 회전수, 절입 깊이 등의 조건은 동일하게 설정하고 단지 공작물의 회전방향을 바꾸어 실험을 하였다. 하향연삭은 공작물과 스톤의 회전방향이 서로 같기 때문에 상대속도가 느리다. 하향연삭에서도 절입량이 많을수록, 테이블의 이송속도가 빠를수록 동력은 증가한다는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 그러나, 하향연삭에서는 연삭동력의 증가량이 상향연삭에 비해서 작은 것을 확인 할 수 있는데, 이는 같은 연삭조건에서의 상대속도가 낮으므로 상대속도로 인한 연삭저항이 낮기 때문이다.



(a) workpiece speed : 52rpm



(b) workpiece speed : 64rpm

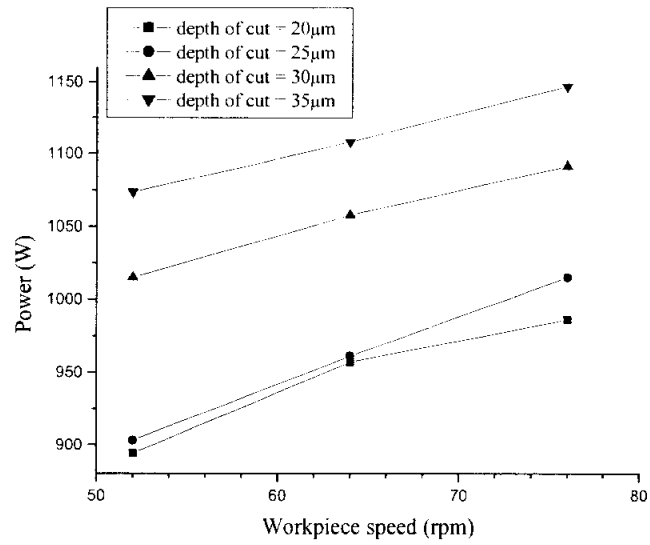


(c) workpiece speed : 76rpm

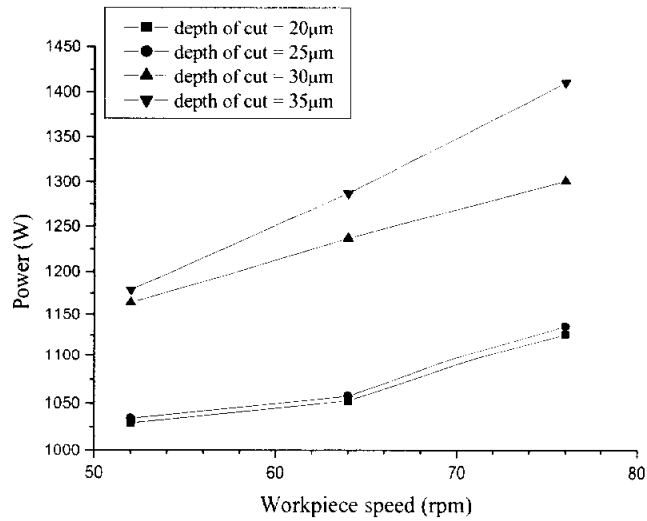
Fig. 9 Power versus depth of cut (down-grinding)

Fig. 10은 하향연삭에서 테이블 이송속도가 같을 경우, 공작물 회전속도에 따른 연삭동력을 측정하여 나타낸 그래프이다. 공작물의 분당 회전수가 많아지면 연삭동력이 증가하였으며, Fig. 10(a), (b), (c)에서 보는바와 같이 테이블의 이송속도가 빨라짐에 따라서도 연삭동력이 증가하였다. 그러나, 연삭동력의 증가폭은 상향연삭에 비해서 작다는 것을 확인할 수 있다.

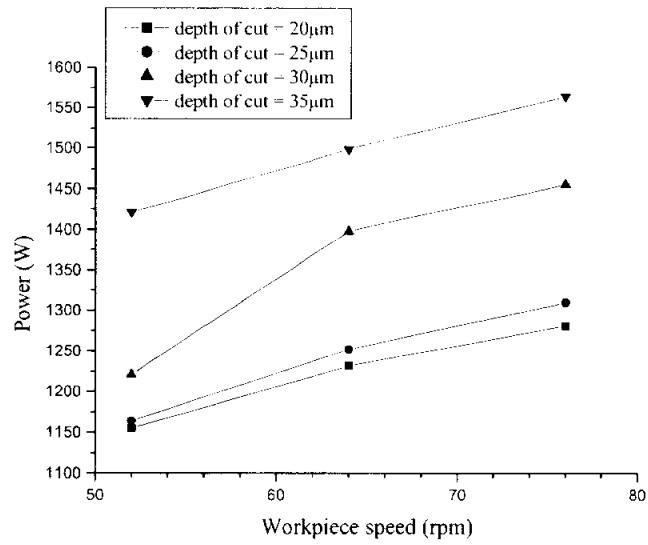
하향연삭에서 이와 같은 결과는, 2.1.4절에 언급한 상향연삭과 하향연삭의 메카니즘의 차이 때문으로 생각된다. 결과적으로 같은 연삭동력, 즉 연삭에 관여하는 에너지가 같은 조건에서는 하향연삭이 상향연삭보다 중절삭(연삭)이 가능함을 알 수 있다.



(a) table speed : 1.19m/min



(b) table speed : 1.46m/min



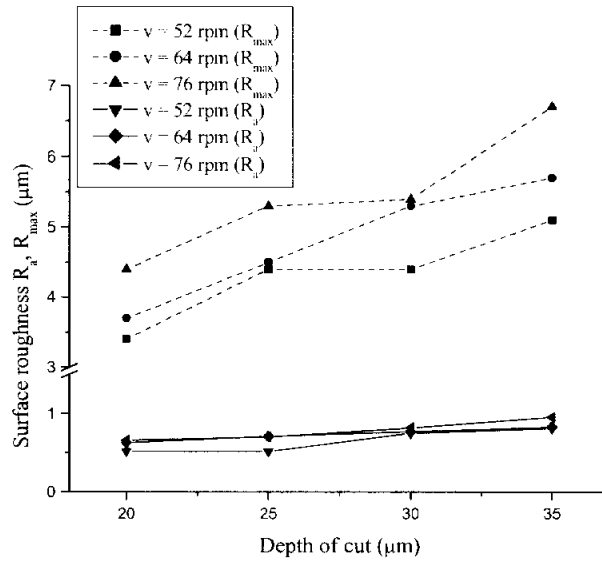
(c) table speed : 2.14m/min

Fig. 10 Power versus workpiece speed (down-grinding)

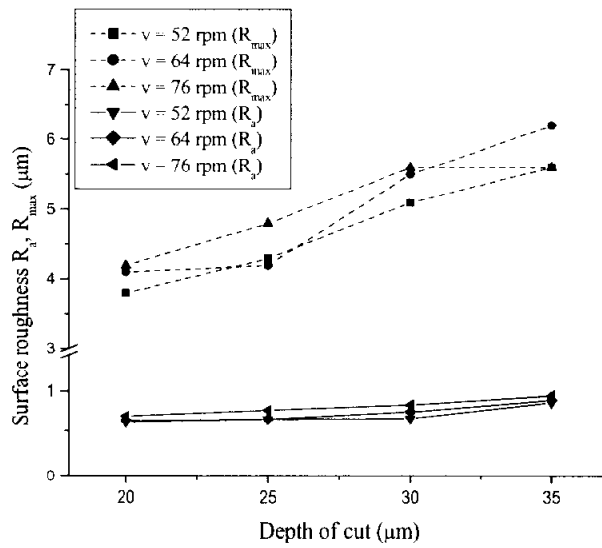
4.2 표면거칠기 변화

Fig. 11은 WA숫돌을 이용하여 SCM440을 연삭가공했을 때의 표면거칠기 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 11(a)는 상향연삭에서 절입깊이의 증가에 따른 표면거칠기 변화를 살펴보기 위하여 테이블 이송속도를 1.46m/min로 고정하고 공작물의 분당 회전수를 단계별로 증가시키고 절입깊이를 20, 25, 30, 35 μ m로 변화시켰을 때의 R_a 와 R_{max} 값을 나타낸 것이며, Fig. 11(b)는 하향연삭에서의 결과를 나타낸 결과이다.

그래프에서 나타난 바와 같이, R_a 는 공작물의 절입깊이의 영향을 적게 받았으며, 단지 공작물의 분당 회전수가 높은 순서대로 표면이 거칠게 나타났으며, 이는 하향연삭에서도 같게 나타났다. R_{max} 는 상향연삭과 하향연삭 모두 절입깊이에 대해서 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 공작물의 분당 회전수가 높을수록 표면이 거칠게 나타났다. 상향연삭에서의 R_{max} 값의 변동폭이 하향연삭보다 약간 더 크게 나타남을 알 수 있다.



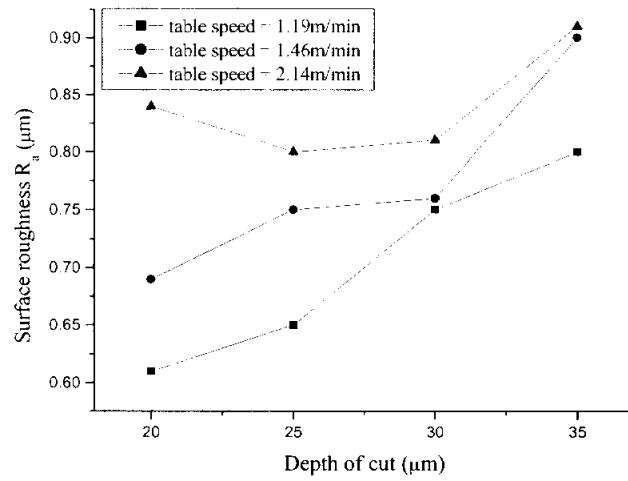
(a) up grinding



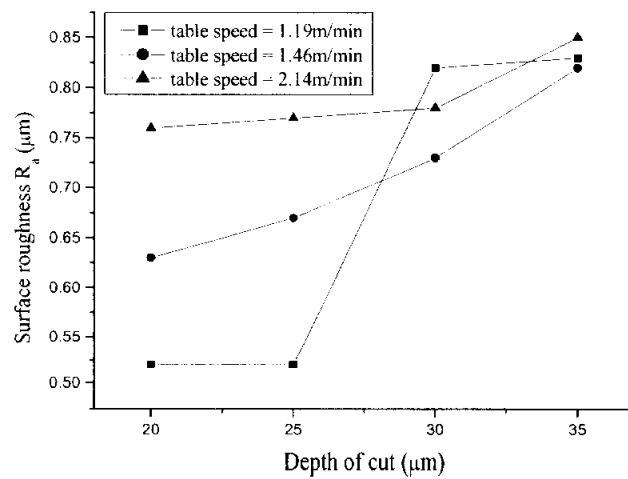
(b) down-grinding

Fig. 11 Surface roughness of table speed 1.46m/min

다음은 절입깊이와 테이블 이송속도에 따른 중심선 평균거칠기(R_a)를 나타낸 결과이다. 그 결과 Fig. 12에서 나타난 바와 같이 표면거칠기는 공통적으로 테이블의 이송속도가 느려질수록 거칠기가 향상되어 나타났고, 절입깊이가 증가할수록 거칠기는 거칠어지는 경향을 나타내었다.



(a) up-grinding

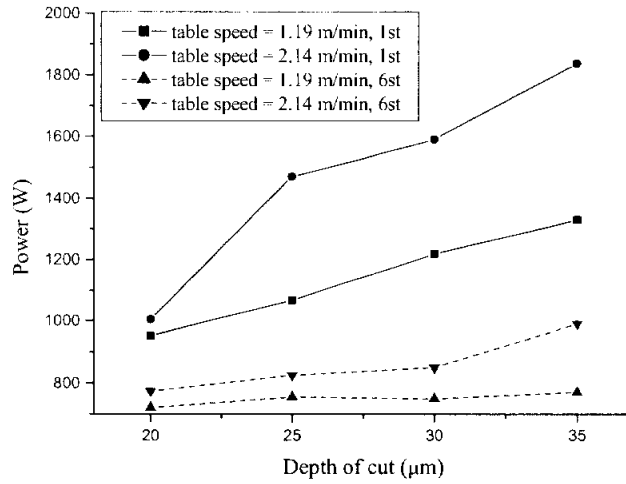


(b) down-grinding

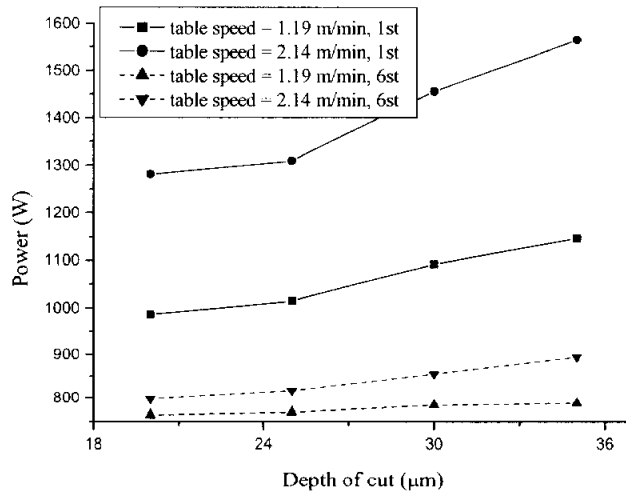
Fig. 12 Surface roughness versus depth of cut for table speed

4.3 스파크아웃 효과

다음은 SCM440의 연삭동력의 스파크아웃 효과를 살펴보기 위한 것으로 1회, 6회 왕복 가공을 실시하였을 경우의 결과이다. Fig. 13은 공작물 분당 회전수가 76rpm의 조건에서 테이블 이송속도를 1.19m/min와 2.14m/min일 때, 절입깊이의 증가에 따른 연삭저항을 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 스파크 아웃은 1회보다 6회 왕복 가공을 실시하였을 경우 연삭동력이 상당히 감소되었으며, 상향연삭과 하향연삭 모두 절입량이 많을수록 스파크 아웃의 횟수에 따른 연삭동력의 감소폭이 더 커짐을 알 수 있다.



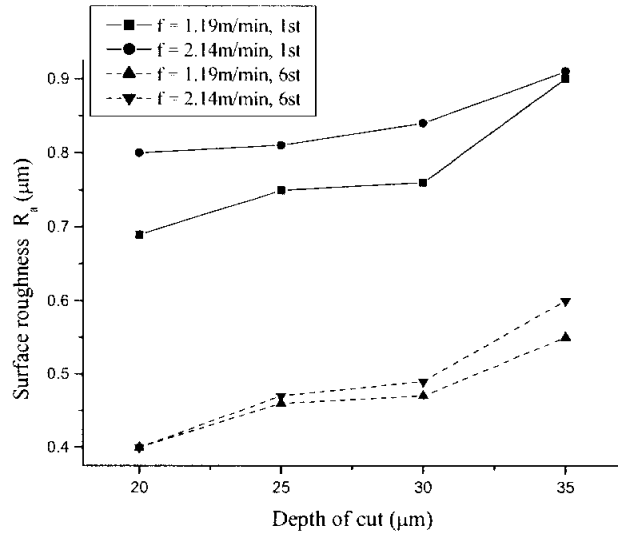
(a) up-grinding



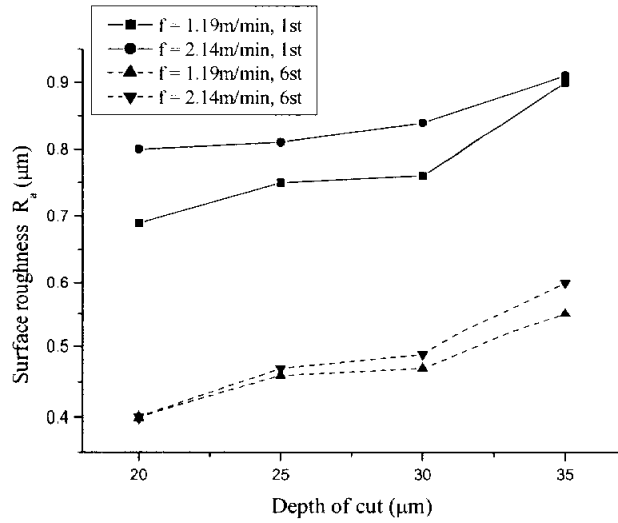
(b) down-grinding

Fig. 13 Effect of spark-out on the power

Fig 14는 표면거칠기에 대한 스파크 아웃 효과를 살펴보기 위한 것이다. 공작물의 분당 회전수를 76rpm으로 설정하고 테이블의 이송속도를 1.19m/min, 2.14m/min일 때의 절입깊이에 따른 스파크아웃을 1회와 6회 실시 하였을 때의 표면거칠기 값을 나타낸 결과이다. 절입깊이가 깊어짐에 따라서 6회 왕복 후 표면이 거친 경향을 나타내었으며, 전반적으로 1회 보다 6회의 스파크아웃을 거치는 동안 표면거칠기가 상당히 개선되는 결과를 나타내었다.



(a) up-grinding



(b) down-grinding

Fig 14 Effect of spark-out on the surface roughness

4.4 회귀분석 결과

절삭깊이, 테이블의 이송속도, 공작물의 회전수, 연삭 방향의 조건변화와 표면거칠기 R_a , R_{max} 연삭 동력 W 의 상관관계를 각각 규명하기 위해 선형회귀 이론에서 다중회귀분석을 활용하여 나타내었다. 각 조건의 경우의 수는 72가지이므로 동력과 표면거칠기 데이터를 데이터 시트로 정리를 하여 컴퓨터로 통계연산 처리를 하였다.

다중회귀분석을 하기에 앞서 실험을 통하여 수집한 동력과 표면거칠기 값이 정규성을 가지는가에 대한 검토를 실시하였다. 표면거칠기 값의 자료의 수는 72개이며, 표본평균은 0.7485, 표본표준편차는 0.1221로 정규성 검정의 가설은 자료가 정규분포 $N(0.748472, 0.1221^2)$ 에 적합함을 전제로 카이제곱 검정을 실시한 결과, 정규성을 가진다는 것을 확인했으며, 같은 방법으로 동력 데이터를 확인한 결과 역시 정규성을 가진다는 것을 확인하였다.

다중회귀분석은 각각의 실험조건을 독립변수로, 목표값인 표면거칠기와 동력을 독립변수로 설정하여 실시하였다. 우선 중심선 평균 표면거칠기 R_a 의 다중회귀분석 결과를 살펴보면, 다중상관계수는 0.9233, 결정계수는 0.8524, 추정값의 표준오차는 0.0483이며 추정회귀식은 아래에 나타내었다.

$$R_a = \frac{1}{1000} (-104.75 + 55.50 s + 5.69 v + 16.57 t - 36.94 k) \quad (4.1)$$

최대 표면거칠기 R_{max} 의 데이터를 분석한 결과, 다중상관계수는 0.9419, 결정계수는 0.8873, 추정값의 표준오차는 0.3388이며, 추정회귀식은 아래에 나타내었다.

$$R_{max} = \frac{1}{100} (-271.46 + 90.16 s + 7.03 v + 8.22 t - 31.67 k) \quad (4.2)$$

동력 W 의 경우 다중상관계수는 0.9142, 결정계수는 0.8357, 추정값의 표준오차는 89.182이며 추정회귀식은 다음과 같다.

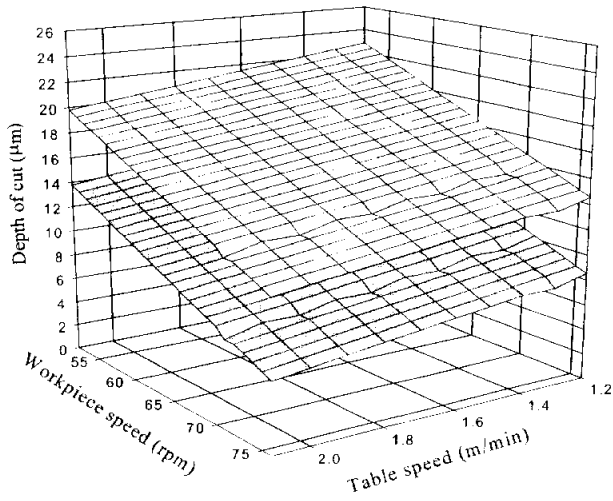
$$W = (-254.67 + 313.95 s + 5.6354 v + 24.148 t - 49.861 k) \quad (4.3)$$

위의 식에서 s 는 테이블 이송속도로 단위는 m/min, v 는 공작물 회전수를 나타내며 단위는 rpm, t 는 절입깊이 μm 이며, k 는 공작물의 연삭 방향을 나타내며 상향연삭일 경우에는 1을, 하향연삭일 경우에는 2를 대입하여 사용한다.

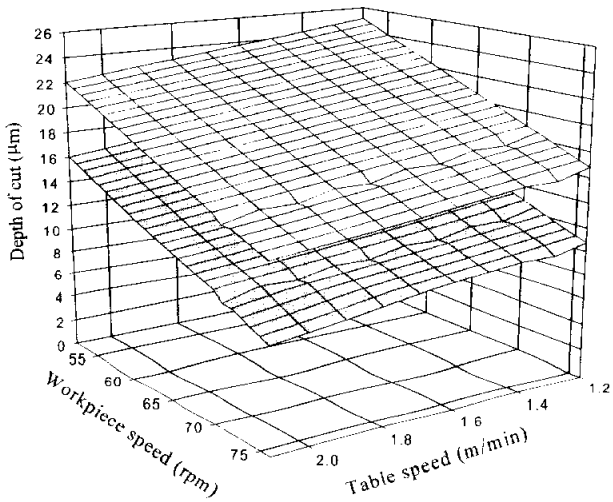
위의 다중회귀분석에서 다중상관계수는 각각의 독립변수들의 종속변수에 대한 연관관계의 측도를 나타내며 1에 가까운 값이며, 이는 독립변수와 종속변수와의 사이에 직선적인 관계가 있는 것을 알 수 있고, 그 관계식을 위에 명시해 놓았다. 회귀식의 신뢰도는 상관계수로 나타낼 수 있으며, 이는 표면거칠기와 연삭동력 각각 0.8524, 89.182로 1에 근접한 값이므로 신뢰할 수 있다고 사료되지만, 이는 제한된 기간내의 데이터를 계산하여 얻은 결과이므로, 장기간에 걸친 경향은 변할지도 모른다. 따라서 각각의 연삭조건을 특성으로 하는 관리도를 그리는 등 일상적으로 할 관리의 방법을 정해두는 것이 필요하다.

Fig. 15는 앞에서 구해진 다중회귀분석 식을 이용하여 나타낸 그래프이다. 얻어진 회귀분석 식에서 종속변수 R_a 를 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 로 가공 목표구간으로 설정하고 회귀식을 이용하여 연산하면 그림과 같다. 그림의 좌표 공간에서 두 면은 사이의 값은 R_a 의 가공 목표구간이며, 그 공간상의 한 점을 선택할 경우 공작물의 회전속도와 테이블 이송속도를 알맞게 설정할 수 있다. Fig. 16은 마찬가지로 방법으로 R_{max} 값을 목표값으로, 가공이 끝난 후 표면거칠기의 목표구간을 $4.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 로 설정한 그래프이며, Fig. 17은 연삭가공시에 소모되는 동력구간을 $1000 \sim 1100\text{W}$ 로 설정하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 15~17이 의미는 테이블 이송속도와 공작물의 회전수를 작업자가 선정을 하면 연삭가공을 하기 이전에 가공 후의 표면상태를 예측할 수 있고, 반대로 표면상태의 목표값을 설정하면 그 목표값에 도달하기 위한 가공조건을 알아낼 수 있다는 것이다.

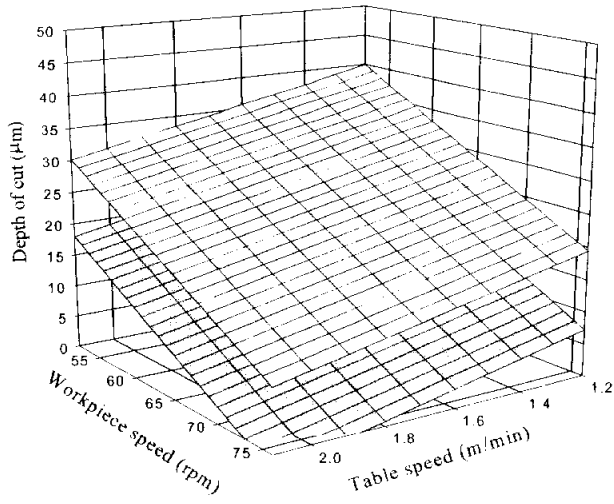


(a) up grinding

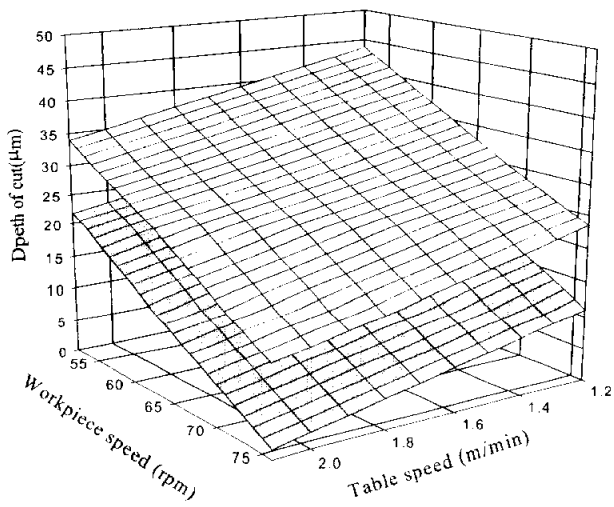


(b) down grinding

Fig. 15 Surface roughness R_a between 0.5 and $0.6\mu\text{m}$

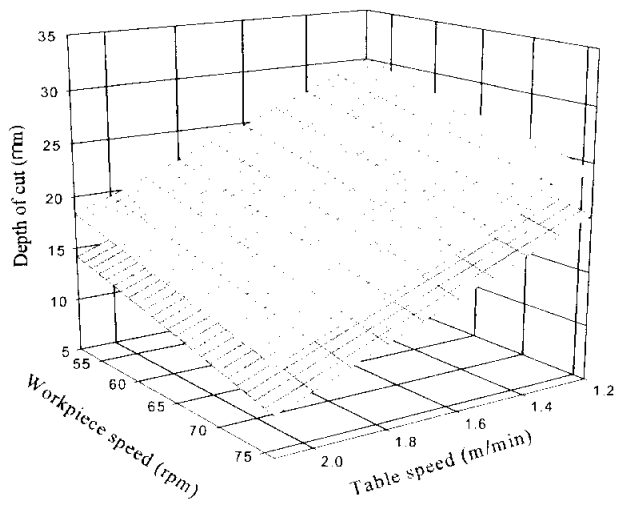


(a) up-grinding

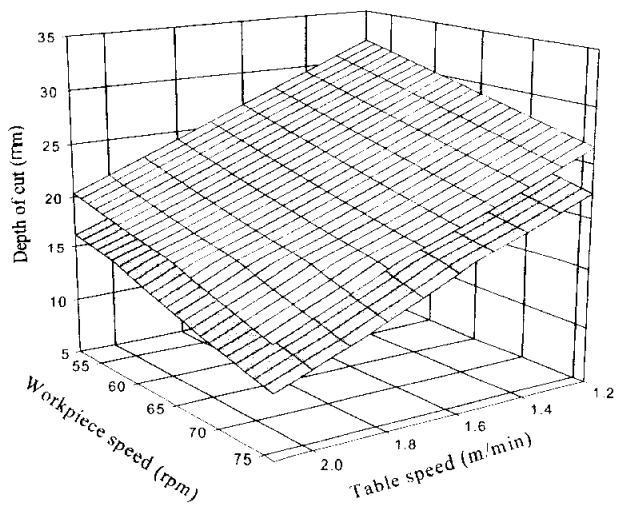


(b) down-grinding

Fig. 16 Surface roughness R_{max} between 4.0 and $5.0\mu\text{m}$



(a) up-grinding



(b) down-grinding

Fig. 17 Grinding power between 1000 and 1100W

5. 결 론

본 연구에서는 WA 슛돌을 사용한 원통연삭가공에서 SCM440을 공작물로 사용하여 테이블의 이송속도를 1.19, 1.46, 2.14m/min, 절입깊이를 20, 25, 30, 35 μ m, 공작물의 회전수를 52, 64, 76rpm, 연삭방향을 상향, 하향으로 변화시키면서 연삭가공한 후 연삭동력, 표면거칠기 및 스파크아웃에 효과에 대해서 고찰하고 각각의 실험 조건에서 얻어진 데이터를 바탕으로 다중회귀분석을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연삭동력은 상향연삭과 하향연삭 공정 모두 공작물의 분당 회전수가 증가할수록 크게 작용하였고, 절입깊이와 테이블 이송속도의 증가에 대해서 비례하여 증가하였으며, 같은 가공조건에서 상향연삭이 하향연삭보다 더 크게 작용하였다. 이는 같은 에너지를 소모하는 경우, 하향연삭이 상향연삭보다 중절삭이 가능하다는 것을 말한다.
2. 표면거칠기를 측정하여 분석한 결과 상향연삭과 하향연삭 공정 모두 공작물의 회전수, 절입깊이, 테이블 이송속도의 증가에 따라서 비례하여 거칠어졌으며, 같은 가공조건에서 상향연삭이 하향연삭보다 표면이 더 거칠게 나타났다.
3. 절입깊이, 테이블 이송속도, 공작물 회전수 및 연삭방향과 R_a , R_{max} , 연삭동력(W)과의 상관관계를 다중회귀분석을 이용하여 실험식을 구하였고, 이를 바탕으로 SCM440 표면경화강의 최적가공조건을 설정할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- (1) K. V. Kumar, Mcozninz, Y. Tanaka, and M. C. Show, "A New Method of studying the Performance of Grinding Wheels" , Trans. ASME, Vol. 102, No. 1, pp. 80~84, 1980.
- (2) S. Malkin, and T. W. Hwang, "Grinding Mechanisms for Ceramics", Annals of the CIRP, Vol. 45, No. 2, pp. 569~580, 1996.
- (3) K. Nagasaka, Y. Kita, and A. Tanibayashi, "The Construction of Expert System for Grinding Process", Juurnal of JSPE, Vol. 57, No, 7, pp. 141~146, 1991.
- (4) G. Kim and I. Inasaki, "Establishment of Optimum Grinding Condition Utilizing the Fuzzy Regression Model," Juurnal of JSME, Vol. 59, No, 566, pp. 280~286, 1992.
- (5) 맹희영, "연삭가공조건의 최적화에 관한 연구", 서울대학교 공학석사 학위논문, pp. 57, 1982.
- (6) 손명환, "절삭가공론", 문운당, pp. 315~321, 1993.
- (7) 서상변, "'표준 공작기계", 동명사, pp.124~126, 2000.
- (8) J. G. Wager, D. Y. Gu, "Influence of Up-Grinding and Down-Grinding on the Contact Zone", Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 323~326, 1991.
- (9) 손명환, "절삭가공론", 문운당, pp. 337~382, 1993.
- (10) 최종만, "연삭가공에 있어서 연삭력과 가공정도에 관한 연구", 단국대학교 공학석사 학위논문, pp.5~6, 1984.
- (11) 이종찬, "초연마재를 이용한 연삭·절삭가공", 문운당, pp. 42~160, 1981.
- (12) 김재주, "초보자를 위한 최적화수법", 자유아카데미, pp.23~29, 1992.

- (13) 김해경, "통계적 자료분석의 이론과 실제", 경문사, pp.119~176.
1998.
- (14) 박정호, "최신 물리전자공학", 진영사, pp.146~150, 2000.
- (15) 임병국, "센서 일렉트로닉스", 대광서림, pp.107~110, 1996.

감사의 글

학부 2학년 때 실험실 초기 멤버라는 새 마음으로 생산가공시스템 실험실에 들어온 제가 벌써 석사학위를 마치는 것을 보면, 세월의 흐름을 절감하게 되고 그 만큼 우리 실험실이 초기의 걸음마 단계를 거쳐 기틀이 마련되어 있음을 실감하게 됩니다. 2년간의 석사과정을 마무리 지으면서 은혜를 입었던 분들께 글로써나마 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

먼저 학부 2학년 때부터 인연을 맺어 학업과 학교생활에 많은 지도와 격려를 아끼지 않으시며 논문의 완성까지 세심한 신경을 써주신 하만경 지도교수님께 깊은 존경과 감사를 드리며, 항상 진취적인 사고로 학업에 새로이 눈을 뜨게 해주신 구 양 교수님과 박재섭 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문이 완성되기까지, 실험실에서 그리고 대학원 과정에서 동고동락을 해온 전재익, 박태경, 양재용, 최진환, 이성택, 김영국, 최성삼 선배, 허정식, 이경국 형을 비롯한 정진서, 박후명, 황영모, 이상진, 오상록, 지용주, 김성국 선생님께도 항상 평화와 행복이 깃들기를 진심으로 기원합니다.

부족한 자식을 언제나 믿고 묵묵히 지켜보시면서 항상 제가 하고자 하는 일에 뒷바라지를 아끼지 않으셨던 아버지, 어머니, 동생 그리고 맏손자, 맏조카기에 어릴적부터 더 많은 관심을 가져주신 할아버지, 할머니를 비롯한 가족 친지들과 기쁨을 함께하고 싶습니다.

실험을 도와준다고 애를 많이 먹었던 상훈이, 고등학교 때부터 항상 서로 격려를 아끼지 않는 영수, 그리고 광룡이형, 상훈이형, 명균이형, 상오, 경호, 정원, 상선, 상일, 경수, 일용이를 비롯한 동아리 동기들과 선후배들에게도 항상 건승을 기원합니다.

서기 이천사년 일월.