工學碩士 學位論文

금형강(STD11)의 평면연삭 가공에 있어서 최적조건 선정

指導敎授 河 萬 景

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2002年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

李 英 碩

李英碩의 工學碩士 學位論文을 認准함

2000年　12月　　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

1. 서 론

현대산업에서 기계제작 및 부품의 생산공정은 고도의 정밀도를 요구하고 있으며 정밀가공 방법 중 연삭가공(Grinding operation)은 무수히 많은 예리한 입자의 연삭숫돌(Grinding wheel)을 고속으로 회전시켜 공작물을 깍아서 면을 곱게 하고 고정도의 완제품을 만드는 절삭공정으로 초경합금 등과 같은 고경도강에서 경질고무 등의 비교적 연질재료까지 광범위한 공작물을 가공할 수 있다. 또한 아주 적은 양의 절입깊이를 사용하므로 형상 및 가공정밀도가 높고, 가공품위와 표면거칠기가 양호한 마무리 가공법으로 적합하며 제품의 생산공정 측면에서도 기계가공의 최종단계에 놓여 있기 때문에 가공정밀도가 제품의 품질에 직접 영향을 미치는 중요한 공정이다.[1-2]

연삭가공은 우수한 가공표면을 얻을 수 있으나 다른 가공과는 달리 동일한 조건에서도 재현성이 어렵고 트러블 발생시 복잡한 파라메타들간의 직접적인 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 연삭가공 조건을 설정하기란 쉽지 않기 때문인데, 근래에 이르러 최적의 연삭가공 조건을 설정하기 위한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.[3-5]

연삭공정에서의 연삭저항은 가공 중에 발생되는 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 WA숫돌을 사용한 금형강(STD11)의 연삭특성을 파악하기 위하여 테이블의 이송속도와 절삭깊이의 가공 조건변화에 따른 연삭저항(F_n, F_t)을 측정하여 그 형상의 변동에 따른 연삭저항의 데이터

를 정량화 시킨 후 빈도수에 따른 분포도를 바탕으로 동적 연삭저항을 평가하였다. 또한 연삭저항의 연삭력비와 가공횟수의 증가에 따른 연삭저항의 변화를 고찰하여 연삭숫돌의 수명을 예측하고자 하였으며, 연삭가공 후 공작물의 표면거칠기(R_a, R_{max})를 측정하여 가공조건이 공작물의 가공품위에 미치는 영향과 스파크아웃(spark-out) 효과 등의 결과를 통해서 STD11의 연삭가공에 있어서 최적의 가공조건을 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 연삭력 이론

연삭가공에서 연삭력은 법선력이 지배적인 영향을 미친다. 법선력은 식 (2.1)에서와 같이 공작물을 절삭하는 힘(Cutting, F_c)과 미끄럼(Sliding, F_s)을 일으키는 힘의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F_n = F_c + F_s \tag{2.1}$$

위 식을 평균접촉 응력($\bar{p}$)과 실접촉면(A_a)의 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_n = F_c + \bar{p}A_a \tag{2.2}$$

$$A_a = b(D \cdot t)^{1/2}A \tag{2.3}$$

여기서, b와 D는 숫돌의 폭과 직경을 나타내고, t와 A는 절입깊이와 겉보기 접촉면적이다. 또한 비절삭에너지(u)를 이용하여 F_c를 나타내면 다음과 같은 식이 완성된다.

$$F_n = \frac{k \cdot u \cdot v \cdot b \cdot t}{V} + \bar{p} \cdot b \cdot (D \cdot t)^{1/2} \cdot A \tag{2.4}$$

위 식에서 이론적인 연삭력의 수직성분은 공작물의 속도(v)가 빨라질수록 증가하고, 연삭숫돌의 속도(V)가 빨라질수록 연삭력은 감소함을 알 수 있다. 또 절입깊이와 절삭폭이 커질수록 연삭력은 증가하고, 평균접촉 응력의 영향을 받음을 알 수 있다.[6]

2.1.1 Shimamune와 Ono의 이론식

島宗勉와 小野浩二[7]는 그의 연구 논문에서 Fig. 1과 같은 단일 절삭날(Grain edge)의 절삭 모형을 이용해서 이에 작용되는 접선방향 연삭분력

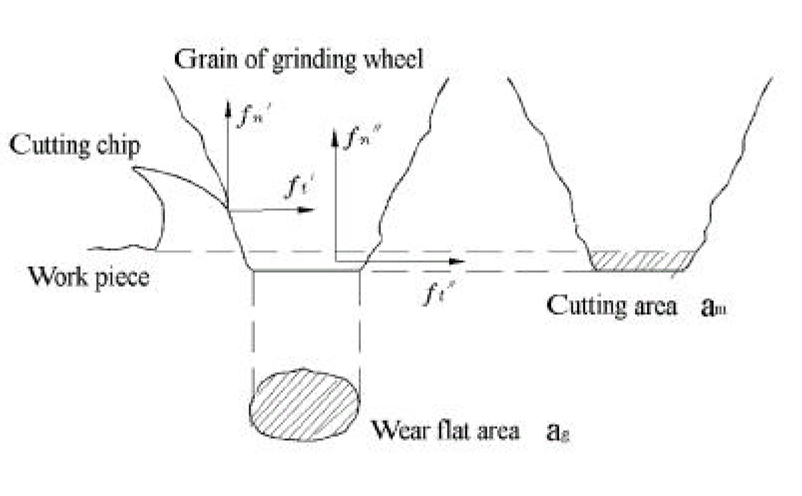

Fig. 1 Cutting model of grain edge

과 법선방향 연삭분력(f_t, f_n)은 절삭저항 성분(f_t', f_n')과 마찰저항 성분 (f_t'', f_n'')의 합과 같다고 볼 수 있으므로 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned} f_t &= f_t' + f_t'' \\ &= k_s\, a_m + \mu\, k_n\, a_g \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned} f_n &= f_n' + f_n'' \\ &= \lambda\, k_s\, a_m + k_n\, a_g \end{aligned} \tag{2.6}$$

이때 $a_m = \dfrac{1}{n_z}\dfrac{v}{V}\sqrt{\dfrac{t}{d_e}}$ 이다.

여기서

k_s : 공작물의 비절삭항력 (kg/mm^2)

k_n : 공작물의 항복압축강도 (kg/mm^2)

μ : 공작물과 마모면 사이의 마찰계수

λ : 칩 생성을 위한 2분력비

a_m, a_g : 절삭날의 절삭면적 및 마모평탄면적

n_τ : 절삭날의 밀도 ($1/mm^2$)

또한 공작물에 연삭버닝이 발생하기까지의 전체 연삭저항은

$$F_t = n_\tau \, b \, l_c \, f_t \tag{2.7}$$

$$F_n = n_\tau \, b \, l_c \, f_n \tag{2.8}$$

의 식으로 나타낼 수 있다.

2.1.2 단위 체적당 연삭 에너지(Specific grinding energy)

M.C. Shaw는 평면연삭시 접선 연삭력과 수직 연삭력을 스트레인 게이지로 정밀하게 측정하여 연삭 칩(Chip)의 파괴에 대한 이론[8]을 발표하였는데 우선 플런지 연삭(Plunge grinding)에서의 연삭된 금속의 단위 체적당 에너지

$$E_s = \frac{F_t \; V}{A \;\; v} \tag{2.9}$$

동일한 방법으로 평면연삭에서의 단위 체적당 에너지

$$E_s = \frac{F_t \; (V \pm v)}{v \cdot b \cdot t} \tag{2.10}$$

식 (2.10)에서 + 는 상향연삭(Up-grinding), - 는 하향연삭(Down-grinding)에 적용되는 부호이며 $v \ll V$ 이므로 식 (2.10)은 다시

$$E_s = \frac{F_t \; V}{v \cdot b \cdot t} \tag{2.11}$$

의 식으로 표현될 수 있다.

2.1.3 연삭저항의 해석

연삭저항에서 연삭속도방향(접선방향)의 분력 F_t는 연삭 소요동력에 직접 관계하고, 보통 연삭저항이라 하면 이 분력을 의미할 때가 많다. 접촉면상의 법선방향 분력 F_n는 동력에는 직접 관계가 없지만 그 크기는 F_t의 2배 정도이며, 숫돌의 굽힘, 진동의 유발, 스파크아웃, 공작기계의 강성과 다듬질 정도에 관한 문제에서는 중요하게 취급된다. 특히, 연삭입자의 무딤(Glazing), 눈메움(Loading)의 상태에서는 F_n이 현저히 크게 나타난다. 다시 말하면 절삭에서는 $F_n = \frac{1}{3} F_t$인데 대하여 연삭에서는 $F_n = 2F_t$인 특징을 갖는다.

이송분력 F_f는 이송에 비례하지만 F_n 및 F_t에 비하여 극히 작다. 연삭입자 1개의 연삭작용에 대하여 생각하면 F_f는 상당히 크게 될 것이지만, 각 입자는 음양의 불규칙한 경사각을 갖게되어 이송분력이 서로 상쇄되므로, 전체 연삭분력으로서는 작게 나타난다고 볼 수 있다. 연삭기구의 해석을 충분히 할 수 없으므로, 이상적인 가정에 기초를 두고 연삭저항을 정성적으로 파악하면, 우선 숫돌입자 1개의 절삭상태를 Fig.2와 같이 모델화한다.[9] 숫돌입자의 선단이 숫돌의 동일원주상에 배열되어 있고, 숫돌입자의 원추각이 일정하고, 숫돌입자의 중심축은 숫돌의 반지름 방향으로 향하며, 숫돌입자의 평균절삭깊이 $\overline{g}$에 평행면을 절삭한다고 하자. 절삭방향으로 ψ만큼 기울어진 미소면적 OAB(면적 ds)를 생각하고, 여기에 작용하는 절삭저항을 계산해 본다. 숫돌 입자면에 마찰동력이 없다고 하면 원추면상의 수직하중을 dp로 하면

$$dF_t = dp \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi \qquad (2.12)$$

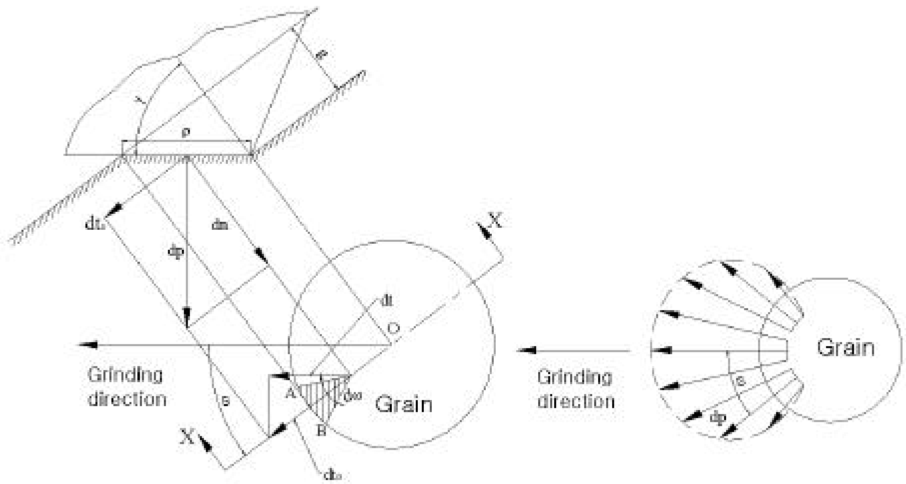

Fig.2 Grinding force of cutting abrasive

$$dF_f = dp \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = dp \cdot \sin\gamma \tag{2.13}$$

다만, dF_t 및 dF_f 는 각각 dp 의 절삭방향 및 그것과 수직방향의 성분이고 2γ 는 원추의 정각이다.

절삭방향에 수직인 단위 면적당의 절삭저항인 비연삭저항(K_s)이 일정하다면

$$dp = K_s \cdot (ds \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi) = K_s \cdot ds \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi \tag{2.14}$$

이것은 dp 의 분포가 Fig. 2의 점선과 같이 되는 것을 의미한다. 원추 모선의 길이를 ρ라 하면

$$ds = \frac{1}{2}\rho^2 \cdot d\psi \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = \frac{1}{2}\rho^2 \cdot \sin\gamma \cdot d\psi \tag{2.15}$$

식 (2.15)를 식 (2.14)에 대입하면

$$dp = \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot d\psi \tag{2.16}$$

식 (2.16)을 식 (2.12) 및 (2.13)에 대입하면

$$dF_t = \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\gamma \cdot \cos^2\psi \cdot d\psi \tag{2.17}$$

$$dF_f = \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin^2\gamma \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot d\psi \tag{2.18}$$

따라서, 연삭입자의 연삭저항 F_t 및 F_f 는

$$F_t = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\gamma \cdot \cos^2\psi \cdot d\psi$$

$$= \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\gamma \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2\psi + 1}{2} \cdot d\psi$$

$$= \frac{1}{4}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\gamma \left[\frac{\sin 2\psi}{2} + \psi\right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}$$

$$= \frac{1}{4}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\gamma \cdot \pi$$

$$= \frac{\pi}{4} K_s \cdot \sin\gamma \cdot (\rho \cdot \cos\gamma)^2$$

$$= \frac{\pi}{4} K_s(\overline{g})^2 \cdot \sin\gamma \tag{2.19}$$

$$F_f = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin^2\gamma \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot d\psi$$

$$= \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin^2\gamma \cdot \cos\gamma \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\psi \cdot d\psi$$

$$= \frac{1}{2}\rho^2 \cdot K_s \cdot \sin^2\gamma \cdot \cos\gamma \,[\sin\psi]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}$$

$$= \rho^2 \cdot K_s \cdot \sin^2\gamma \cdot \cos\gamma$$

$$= K_s \cdot (\rho \cdot \cos\gamma)^2 \cdot \sin^2\gamma \cdot \frac{1}{\cos\gamma}$$

$$= K_s \cdot (\overline{g})^2 \cdot \sin\gamma \cdot \tan\gamma \qquad (2.20)$$

비연삭저항 K_s**는 치수효과가 현저하며,** $\overline{g}$ **(㎛)에 대하여 다음 식으로 표시된다.**

$$K_s = 42 \times 10^3 (\overline{g})^{-1.24} (kg/mm^2) \qquad (2.21)$$

2.2 표면거칠기 이론

2.2.1 표면거칠기 이론식

가공된 공작물의 평가는 크게 가공 치수와 표면품위(Integrity)의 두 가지 관점에서 생각할 수 있다. 가공치수는 가공물의 미시적 관점에서 본 크기를 나타낸 것이고, 표면품위는 표면 층의 기계적, 금속학적인 변화, 그리고 표면거칠기 등을 포함한다.

Fig. 3은 표면거칠기를 기하학적으로 도시한 것으로 연삭가공시의표면거칠기는 여러 많은 요인에 의해 영향을 받는데 크게 분류하면 다음과 같다. 첫째 연삭숫돌 입자의 크기, 숫돌의 직경, 입도, 결합제의 종류 등 연삭숫돌에 의한 요인, 둘째로 숫돌의 드레싱 상태, 숫돌마모, 공작물의 종류

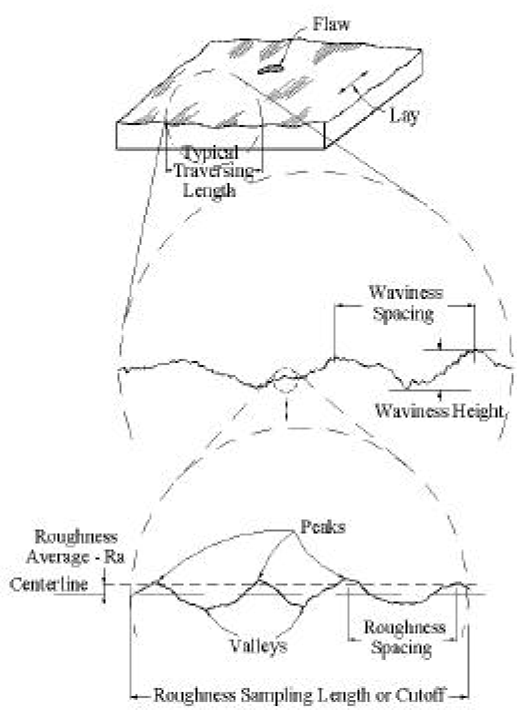

Fig. 3 Schematic diagram of surface roughness

에 의한 요인과 마지막으로 가공속도, 이송속도, 연삭유제의 종류와 공급 방법에 기인한 가공조건 등에 의해서 분류할 수 있다. 연삭가공에서 얻어진 중심선 표면거칠기의 이론식은 다음과 같이 주어진다.[10]

$$R_a = \frac{1}{9\sqrt{2}} \left(\frac{v \cdot a}{V \cdot d^{1/2}} \right)^2 \tag{2.22}$$

여기서, V와 v는 숫돌의 원주속도와 공작물의 속도이고, d와 a는 각각 숫돌의 직경과 숫돌외주면에 분포한 절삭입자들의 평균간격이다.

표면거칠기의 측정은 일반적으로 촉침식 조도계를 이용하고, 정량적인 평가를 위해 충분한 표본수를 획득할 수 있는 샘플 길이를 선택한다. 연삭가공과 같은 다듬질 가공된 표면의 거칠기 측정에 사용되는 샘플 길이는 0.8㎜ 정도가 일반적이다.[11]

2.2.2 표면거칠기 실험식

연삭 다듬질 가공면의 거칠기에는 대단히 많은 인자 즉, 숫돌의 절입깊이와 테이블의 이송속도 등의 가공조건 외에 숫돌종류 및 숫돌의 표면상태, 드물게는 기계의 진동 등이 복잡하게 관계된다.

여기서, 먼저 연삭표면거칠기를 실험에 의해 확정하고 표면거칠기와 각종 연삭조건과의 관계를 실험식으로 나타내어 알 수 있게하는 많은 시도가 있어왔다. Optiz는 차원해석에 의한 실험식을 정립하였고 특히 渡邊[12] 등의 연구자는 연삭표면거칠기 H_{th}는 각종 연삭조건의 거듭제곱 지수 함수형으로 나타낸 것으로 각각의 실험식을 구하였다. 그것을 정리하여 일반적으로 나타내면 다음과 같다.

$$H_{th} = k \cdot t^a \cdot V^{-b} \cdot v^c \cdot s^d \cdot b^{-e} \tag{2.23}$$

식 (2.23)에 있어서 각 지수치를 나타낸 것이 Table 1이며, 이에 따른 일

Table 1 Eexperimental coefficients formular of ground surface roughnesss

Researcher	a	b	c	d	e
salje	0.15	1.0	0.18	0.47	0.47
Watanabe	0.25	0.5	0.5	0.38	0.38
Werner	0.26	0.51	0.51	-	-
Masslow	0.4	-	0.6	0.45	-

반적인 경향으로 숫돌절입깊이 t, 공작물 속도 v, 트래비스 이송 s의 증가는 모두 거칠기를 크게 하고, 숫돌 원주속도 V, 숫돌폭 b의 증대는 거칠기의 값을 작게 하는 요인이 된다.

2.2.3 연삭 표면조도에 대한 이론

연삭 가공면은 숫돌 입자로 깎여지므로 표면조도를 절삭가공면과 같이 연삭방향의 조도와 이것과 직각 방향의 조도로 나누어 원통 연삭인 경우에 연삭숫돌 입자간의 거리를 C, 연삭숫돌의 반경을 r, 연삭숫돌의 원주속도를 V, 공작물의 원주속도를 v 라고 할 때,

$$\gamma = \frac{v}{V} \cdot \frac{C}{r} \tag{2.24}$$

의 식이 성립된다.

또한 절삭깊이와 상대조도 및 연삭숫돌의 직경(D)와 공작물의 직경(d)에 따른 표면조도에 관한 이론식은 다음과 같다.

$$\varDelta = C \frac{v}{V} \sqrt{t\left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d}\right)} \tag{2.25}$$

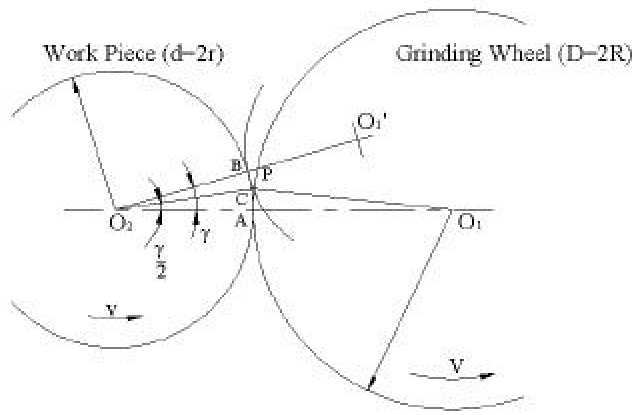

Fig. 4 Ralative motion between grinding wheel and workpiece in cylindrical grinding

식 (2.25)는 원통 연삭인 경우의 관계식이므로 평면 연삭일 때 적용하면 $d = \infty$ 이므로

$$\Delta = C \frac{v}{V} \sqrt{\frac{t}{D}} \tag{2.26}$$

따라서 표면 조도는

$$\Delta = \alpha \sqrt{t} \quad (\alpha\text{는 상수}) \tag{2.27}$$

의 관계가 성립된다.

2.3 선형회귀분석 이론

도표화된 데이터를 시각적으로 조사한 후에 점들을 통과하는 최적의 선을 그려내는데 있어서 완전한 직선상에 정의할 수 없는 경우는 보간법이 널리 사용된다. 여기에서 주관성을 배제하고 적합한 곡선을 긋기 위한 한 가지 방법이 데이터점들과 곡선의 거리차를 최소화시키는 곡선을 유도하는 것인데, 이 목적을 성취하는 기술을 최소제곱회귀분석(Least-squares regression)이라 한다.

최소제곱 근사의 가장 간단한 예는 (x_1, y_1), (x_2, y_2), $\cdots\cdots$, (x_n, y_n) 의 관측치에 직선을 적합시키는 것이다. 이 직선에 대한 수학적인 표현은,

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + e_i \tag{2.28}$$

이고, a_0은 절편, a_1은 기울기, e는 관측치와 모델값의 오차이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_i = y_i - a_0 - a_1 x_i$$

데이터의 흐름을 나타내는 최적의 직선을 구하는 방법 중 하나는 오차의 합을 최소화시키는 것이다. 즉, n 이 점들의 개수를 나타낼 때 잔차의 제곱의 합 S_r을 다음과 같이 최소화 할 수 있다.

$$S_r = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \tag{2.29}$$

a_0 와 a_1 값을 결정하기 위해 식 (2.29)를 각각의 계수에 대하여 편미분을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2\sum[(y_i - a_0 - a_1 x_i)x_i]$$

도함수가 0이라는 사실은 S_r 을 최소화한다는 의미로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$0 = \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i$$

$$0 = \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2 \tag{2.30}$$

$\sum a_0 = n a_0$이므로 이 식은 a_0, a_1에 대한 2원 1차 방정식으로 주어진다.

$$n a_0 + \sum x_i a_1 = \sum y_i \tag{2.31}$$

$$\sum x_i a_0 + \sum x_i^2 a_1 = \sum x_i y_i \tag{2.32}$$

이것을 정규방정식(Normal equation)이라 부르며, 이 방정식을 풀면 다음과 같이 된다.

$$a_1 = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{2.33}$$

이 결과를 식 (2.31)에 대입하면

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \tag{2.34}$$

을 얻는다. 여기서 $\bar{y}$와 $\bar{x}$는 각각 y의 평균과 x의 평균이다.[13]
본 연구에서는 이러한 선형회귀분석 이론을 표면거칠기와 연삭저항과의 상관관계를 규명하는데 적용하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 연삭숫돌 및 공작물

본 실험에 사용한 연삭숫돌은 알루미나계의 WA로 비트리파이드(V) 본드를 사용하였으며, 입도 #100, #220, #300, 결합도 K이다. 숫돌은 직경 ϕ250 mm, 폭 15mm로 평면연삭을 하였다.

공작물은 금형재료로 널리 사용되고 있는 합금공구강(STD11)을 지그에 물릴 수 있도록 길이(L) 100mm, 폭(W) 60mm, 높이(H) 20mm로 절단하여 사용하였다. Table 2는 본 실험에 사용된 공작물의 조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Conditions of the workpiece

Workpiece	STD11
Size	100 mm × 30 mm× 5 mm
Chemical composition	Cr(12%), C(1.5%), Mn(0.6%), Ni(0.5%), Si(0.4%), P(0.03%), S(0.03%)
Hardness(H_B)	255(kg_f/㎟)

3.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 연삭기는 유압 구동형 평면 연삭기(Surface grinding machine ; NAGASE SGH-6, Japan)였으며, 연삭숫돌은 Al_2O_3 계의 WA로 KmV(제일연마, 225×15×50.8 mm) 평형숫돌을 사용하였다.

실험조건의 변경시마다 연삭숫돌의 입자를 고르게 하기 위해서 단석 다이어몬드 드레사로 20 30㎛정도 드레싱을 실시하였다.

Photo.1은 실험장치의 구성을 나타낸 것으로 공작물의 연삭가공시 발생되는 연삭저항력의 측정을 위해 압전형 공구동력계(Piezo-electric type tool dynamometer, Kistler, 9257B)를 연삭기 테이블 위에 설치하고 그 위에 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다. 공작물 연삭가공시 공구동력계에서 발생된 신호는 다채널 증폭기(Multichannel charge amplifier, Kistler, 5019B)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 디지털화되어 개인용 컴퓨터로 전송되고, 연삭력 소프트웨어를 사용해 실험에서 얻어진 연삭저항을 측정하였으며 그 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 연삭된 공작물의 표면거칠기(R_a, R_{max})를 촉침식 표면조도계(Mitutoyo, SURF-TEST 301)로 측정하였으며, Photo. 2는 표면거칠기 측정 사진이다.

모든 연삭가공시 상향절삭 한 방향으로 수용성 유제를 사용한 습식으로 실시하였다. 숫돌의 원주속도는 1800 rpm 으로 일정하게 적용하였고, 절삭깊이를 5, 10, 20, 30㎛, 테이블의 이송속도를 1.4, 2.5, 3.4, 4.6m/min까지 단계별로 변화시키면서 실험하였다. 모든 실험은 1회 가공한 후 연삭저항과 표면거칠기를 측정하였으며, 스파크아웃의 횟수에 따른 연삭저항과 표면거칠기도 구하였다.

Photo. 1 Experimental set-up for experiment

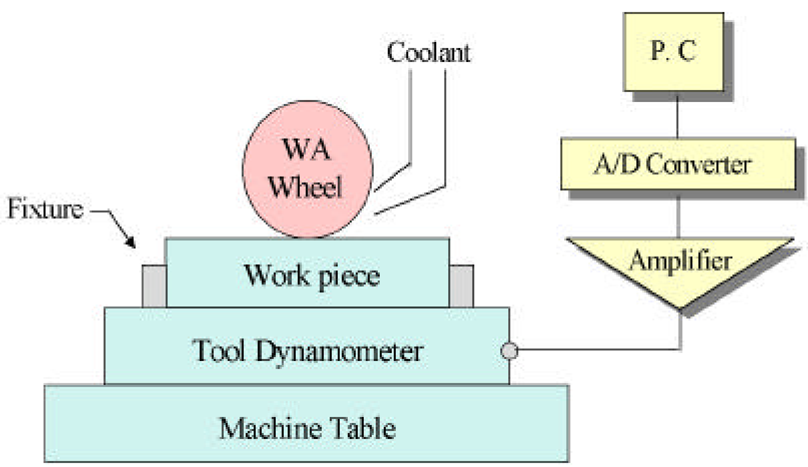

Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up

Photo. 2 Measurement of surface roughness

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

Table 3 Experimental equipments

Instrument	Model
Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
Grinding wheel	WA100KmV, WA220KmV, WA300KmV
Workpiece	STD11(100×60×20 mm)
Tool dynamometer	Kistler 9257B
Roughness tester	MITUTOYO社 SURFTEST-301
Charge amplifier	Kistler 5019B
A/D converter	ADLINK 8112PG
Personal Computer	PentiunⅡ(Samsung M6000)

Table 4 Experimental conditions

Item	Condition
Wheel speed	1,800rpm
Table speed	1.4, 2.5, 3.4, 4.6(m/min)
Depth of cut	5, 10, 20, 30(㎛)
Coolant	Shell lubricant(soluble type 25:1)
Dressing condition	Single pointed diamond dresser
Grinding type	Plunge & Up-grinding & Wet

4. 실험결과 및 고찰

본 장에서는 금형강(STD11)의 연삭특성을 알아보기 위하여 입도가 각각 #100, #220, #300인 WA숫돌을 이용하여 테이블 이송속도를 1.4 4.6m/min으로 변화하고 절입깊이를 5 30㎛까지 단계 변화시키면서 연삭가공 실험을 실시하였다. 우선 연삭저항을 측정하여 가공조건 변화에 따른 연삭저항의 특성을 살펴보았으며, 연속적으로 획득한 연삭저항 신호를 정량의 데이터로 분류한 후 연삭저항의 크기에 따른 빈도수를 나타냄으로서 동적인 연삭저항의 특성을 고찰하였다. 그리고 법선연삭저항과 접선연삭저항의 연삭력비와 가공횟수의 증가에 따른 연삭저항의 변화를 통해서 연삭숫돌의 수명을 예측하고자 하였다. 또한, 조건변화에 따른 표면거칠기의 비교를 통해서 고품위의 가공물을 얻기 위한 기초자료로 제시하고자 하였으며, 연삭저항과 표면거칠기의 스파크 아웃의 효과에 대해서도 살펴보았다.

4.1 연삭저항

연삭저항은 정적연삭저항과 동적연삭저항으로 크게 분류하여 고찰하였다. Fig. 6에서 (a)는 이송테이블 위에 공구동력계를 설치하여 받은 연삭저항 신호를 A/D 변환기를 통해서 컴퓨터에 저장한 연삭저항의 예를 나타낸 것이고, (b)는 이러한 신호를 Digital Filtering해서 Smooding 곡선으로 나타내어 정적 연삭저항을 구했으며, 이러한 획득된 데이터를 정량화하여 순간 요동에 따른 연삭저항의 크기에 따른 빈도수를 통해서 동적인 연삭저항 특성을 분석하고자 하였다.

그림에서 P_{flu}는 동적연삭저항의 순간요동(Fluctuation of instant dynamic grinding force)을 나타내는 것으로 연삭버닝과 채터진동에 민감한 반응을 일으키는 중요한 요인이 된다. 또한, T_s는 정착시간(Settling time)을 나타내며, P_s는 정착 연삭저항(Settling grinding force)를 나타낸다.

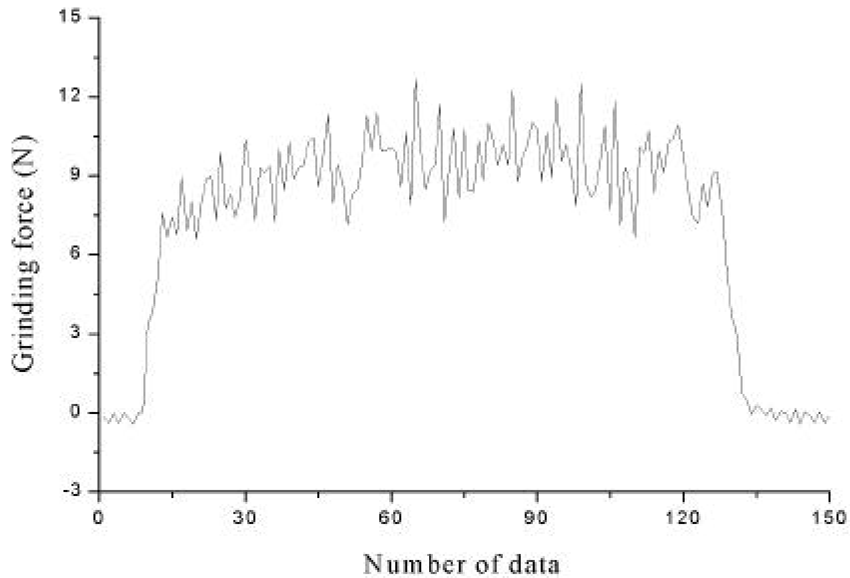

Fig. 6(a) Obtained force signal

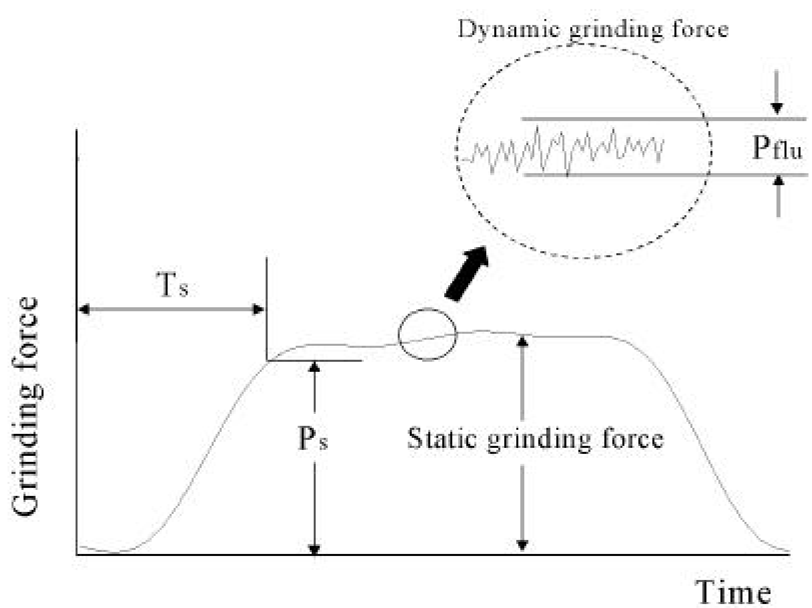

Fig. 6(b) Definition of static and dynamic grinding force

4.1.1 정적 연삭저항

Fig. 7은 WA숫돌을 이용하여 금형강을 연삭하고 이때 발생되는 법선방향과 접선방향의 연삭저항(F_n, F_t)을 측정한 것으로 (a), (b), (c)에 각각 #100, #220, #300의 연삭숫돌에서의 결과를 나타냈다. 이때 절입깊이를 5, 10, 20, 30㎛, 테이블의 이송속도를 1.4, 2.5, 3.4, 4.6m/min으로 단계변화시키면서 실험한 결과이다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 숫돌입도가 낮은 거친 입자일수록 연삭저항이 크게 나타남을 알 수 있다. 절입깊이의 변화에 따른 연삭저항력의 변화를 살펴보기 위해 절입깊이를 5, 10, 20, 30㎛으로 변화시키며 연삭 실험한 결과 모든 숫돌에서 절입깊이가 증가함에 따라 연삭저항이 비례적으로 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 이때 증가하는 비율은 #300 연삭숫돌에 비해서 #100의 연속숫돌이 더 큰 비율로 증가하였다.

테이블 이송속도의 변화에 따른 연삭저항의 변화를 살펴보기 위해 테이블의 이송속도를 1.4, 2.5, 3.4, 4.6m/min으로 변화시키며 연삭 실험한 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 #100 숫돌에서는 이송속도가 증가함에 따라 법선저항과 접선저항의 두 연삭저항이 증가하는 경향을 나타내었으나, #220과 #300 숫돌에서도 전반적으로는 이송속도의 증가에 대해서 연삭저항이 증가하였으나, #220 숫돌에서는 2.5m/min일 때, #300 숫돌에서는 1.4m/min일 때 연삭저항이 다소 불규칙한 경향을 나타냈다.

연삭저항은 절입깊이와 테이블의 이송속도의 변화에 대해 #100 숫돌은 #220 숫돌보다 대략 1.5배, #300 숫돌보다 대략 2배정도 크게 나타났다.

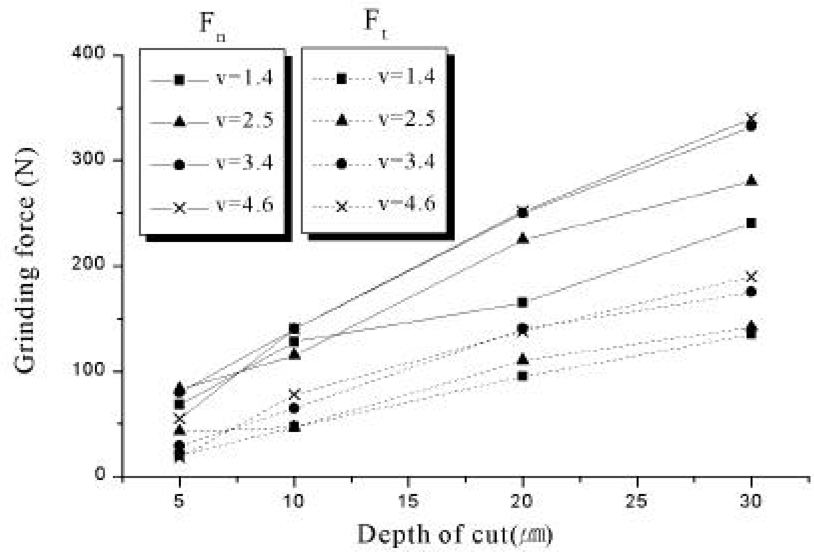

Fig. 7(a) Grinding force versus depth of cut for feedrate change (WA #100 wheel)

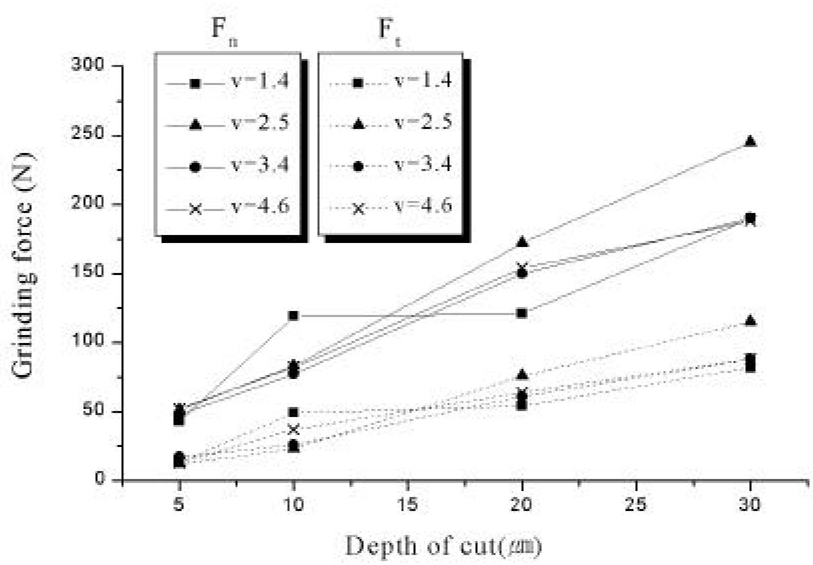

Fig. 7(b) Grinding force versus depth of cut for feedrate change (WA #220 wheel)

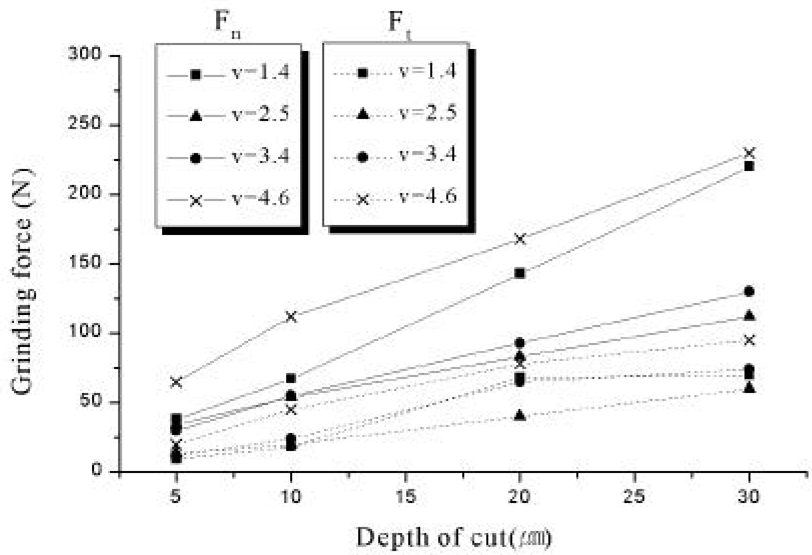

Fig. 7(c) Grinding force versus depth of cut for feedrate change (WA #300 wheel)

Fig. 8은 STD11을 여러 종류의 연삭숫돌로 연삭했을 때 숫돌입도에 의한 연삭저항의 상이에 대한 결과를 나타낸 것으로, 실험조건은 테이블 이송속도 2.5m/min, 절입깊이가 10㎛인 경우와 4.6m/min, 절입깊이가 20㎛인 두가지 조건에서 실험하였다. 전반적으로 연삭저항은 #100 숫돌에서 #220, #300의 숫돌로 숫돌입도가 낮아짐에 따라 법선저항과 접선저항의 연삭저항도 일정 비율로 함께 작아지는 경향을 나타내었으며, 이송속도가 빨라지고 절입깊이가 커질수록 법선저항과 접선저항의 차는 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

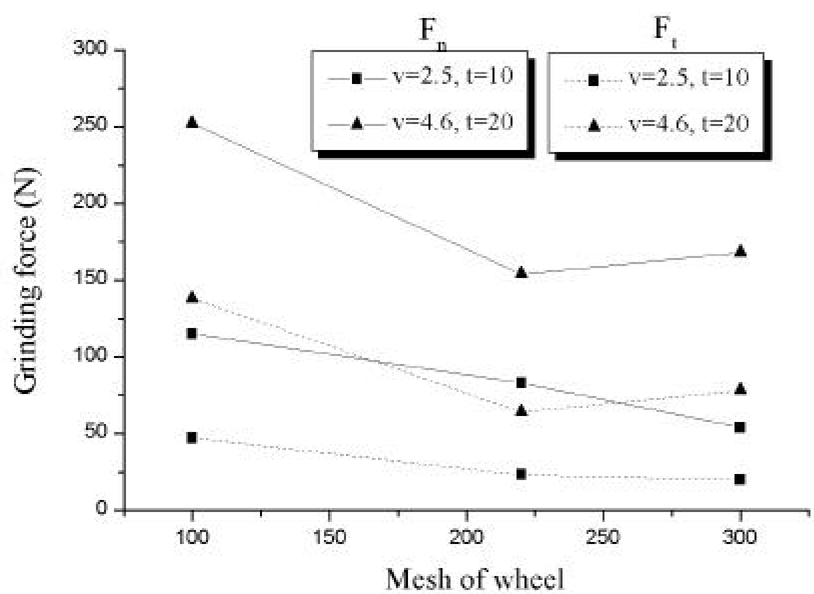

Fig. 8 Relation between grinding force and mesh of wheel

Fig. 9는 비슷한 금속제거율($Z = bvt$)에서의 연속가공 횟수에 증가에 따른 연삭저항의 관계를 살펴보기 위하여, $vt = constant$ 에 가까운 세가지 조건을 설정한 뒤 WA(#100) 연삭숫돌로 원주속도를 1,800rpm으로 일정하게 유지시킨 후 가공횟수를 10 120회까지 10회씩 증가시켰을 때의 결과를 나타낸 것이다.

연삭저항은 접선저항과 법선저항에서 다소 불규칙적인 경향을 나타내고 있으나, 가공횟수가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 상대적으로 법선저항에서 더 큰 증가 비율을 나타냈다. 그림에서 연삭저항은 60회에서 크게 상승했다가 감소하는 형태를 나타내었는데, 이는 숫돌의 무디짐이나 눈메움 현상으로 인해 연삭저항이 급격히 증가하였다가 숫돌의 활발한 자생작용으로 인해 다시 감소되어 나타난 결과로 판단되며, 이러한 실험결과를 바탕으로 연삭숫돌의 수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

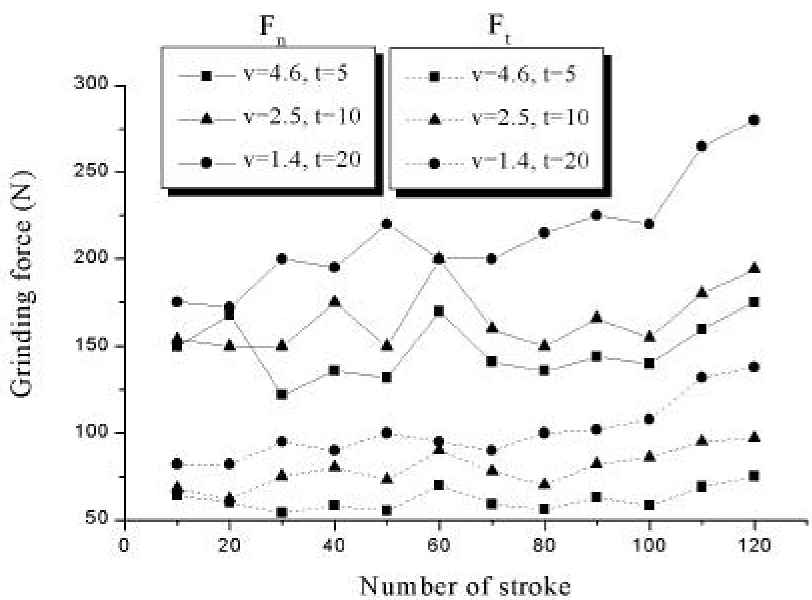

Fig. 9 Grinding force for number of stroke at vt=constant

연삭비는 법선연삭저항을 접선연삭저항으로 나눈값으로 $F_k = \frac{F_n}{F_t}$ 로 나타내었다. Fig. 10은 이러한 연삭비를 나타낸 결과로 테이블 이송속도와 절삭깊이의 변화에 따른 법선과 접선의 연삭저항의 연삭비를 숫돌입도에 따라 분류한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 연삭비는 테이블 이송속도에서는 값의 편차기 큰 불규칙한 경향을 나타내었으나, 모든 입도에서 절입깊이가 증가할수록 연삭비가 낮아지다 절입깊이가 20㎛를 기점으로 어느 특정값에 도달하는 경향을 나타내었는데, #100의 숫돌은 대략 2, #220의 숫돌은 대략 2.5로 나타냈으나, #300의 숫돌에서는 특정값에 도달하지 않고 연삭비가 감소하다 20㎛를 기점으로 다시 증가하는 결과를 나타냈다. 또한, 본 결과를 통해서 연삭비는 #100의 숫돌은 2.19, #220의 숫돌은 2.73, #300의 숫돌에서는 2.53로 나타났다.

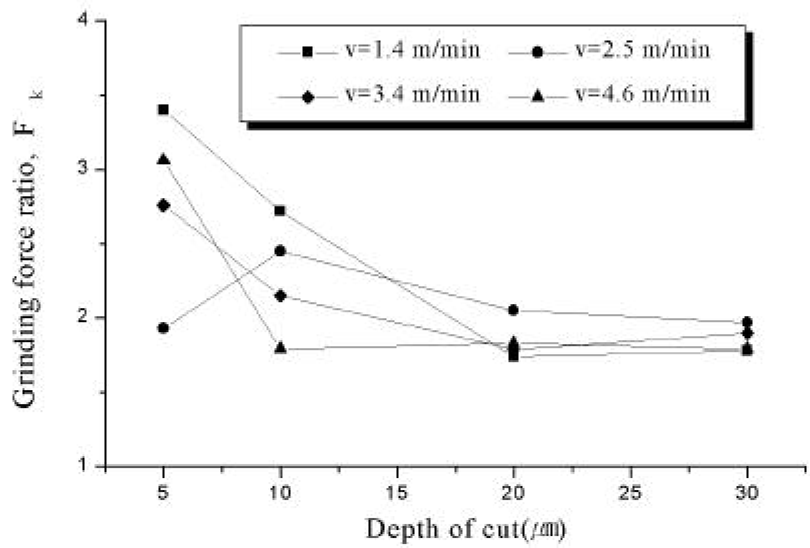

Fig. 10(a) Grinding force ratio versus depth of cut for feedrate change (WA #100 wheel)

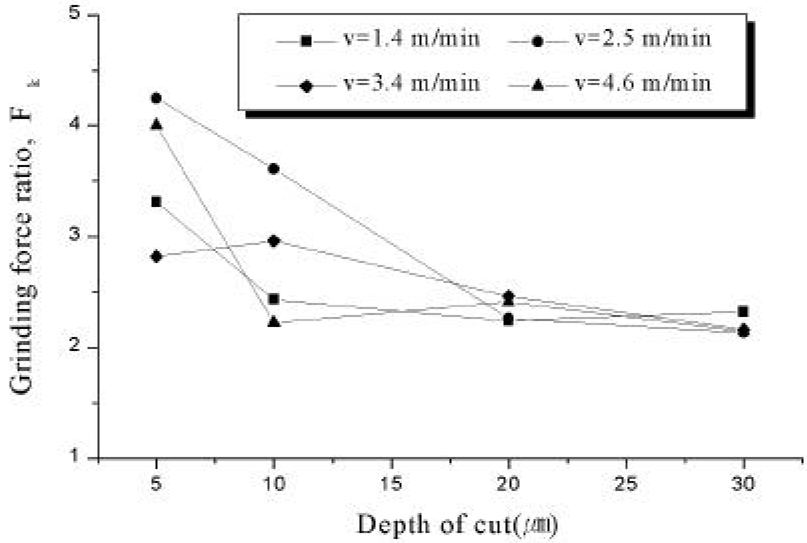

Fig. 10(b) Grinding force ratio versus depth of cut for feedrate change (WA #220 wheel)

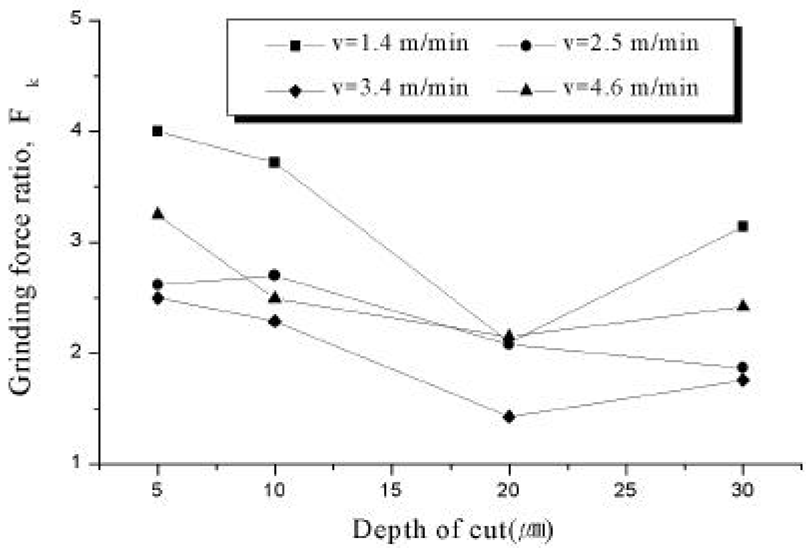

Fig. 10(c) Grinding force ratio versus depth of cut for feedrate change (WA #300 wheel)

다음은 절삭깊이와 테이블의 이속속도 조건변화에 따른 표면거칠기 (R_a)와 법선연삭저항(F_n)의 상관관계를 규명하기 위해 2.3**절의 선형회귀분석 이론을 활용하여 나타낸 것이다.**

$R_a = a_0 + a_1 F_n + e_i$ **에서**

$$a_1 = \frac{n\sum F_n R_a - \sum F_n \sum R_a}{n\sum F_n^2 - (\sum F_n)^2}$$

$$a_0 = \overline{R_a} - a_1 \overline{F_n}$$

를 위의 연산식에 의해 구했고, 각 항에 따른값을 아래에 나타냈다.

Mesh	$\sum F_n$	$\sum R_a$	$\overline{F_n}$	$\overline{R_a}$	a_1	a_0
#100	289.3	5.37	18.0813	0.3356	2.9272*10^{-3}	0.28267
#220	196.5	4.27	12.2813	0.2669	4.8727*10^{-3}	0.20706
#300	151.7	3.12	9.48125	0.195	2.4465*10^{-3}	0.17181

위 식을 정리하여 연삭저항과 표면거칠기의 관계를 선형회귀분석 이론을 이용한 직선식은 다음과 같으며, 그 결과를 Fig. 11**에 나타내었다.**

$$R_a = 0.28267 + 2.9272 \times 10^{-3} F_n \qquad \text{(\#100 Wheel)}$$

$$R_a = 0.20706 + 4.8727 \times 10^{-3} F_n \qquad \text{(\#220 Wheel)}$$

$$R_a = 0.17181 + 2.4465 \times 10^{-3} F_n \qquad \text{(\#300 Wheel)}$$

이 식의 결과에서 표면거칠기는 법선연삭저항과의 관계에서 모든 입도의 숫돌에서 기울기가 선형적으로 증가하는 직선식으로, 이는 Fig. 11**을 통해서도 확인할 수 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 숫돌의 입도가 커질수록 연삭저항이 작고 표면거칠기가 양호한 결과를 나타내었으며, 상**

대적으로 #220의 숫돌에서 연삭저항에 대한 표면거칠기의 상승폭이 크게 나타났다. 결과적으로 연삭저항이 증가함에 따라 표면거칠기도 비례적으로 거칠어지는 선형적인 형태를 나타냄을 알 수 있었다.

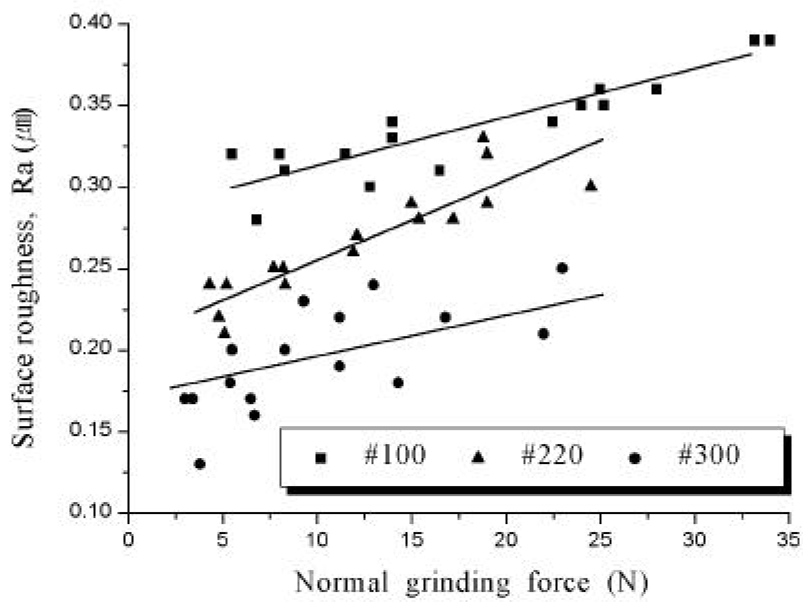

Fig. 11 Relation between surface roughness and normal grinding force

4.1.2 동적 연삭저항

WA숫돌의 STD11 연삭가공시 나타나는 동적 연삭저항의 특성을 파악하기 위해서 획득한 연삭저항의 데이터를 정량화한 후 연삭저항에 따른 빈도수를 Fig. 12에 나타내었다. 가공조건은 세종류의 연삭숫돌로 테이블의 이송속도를 3.4m/min으로 고정하고, 절입깊이가 5, 10, 20, 30㎛일 때의 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 연삭저항은 세종류의 연삭숫돌에서 절입깊이가 증가할수록 연삭저항이 커지면서 그 집중도가 낮아지고 분포가 넓어지는 경향을 나타내었는데, 거친 숫돌일수록 이러한 현상이 두드러지고 연삭력의 차도 크게 나타났다. 결국 넓은 분포도는 연삭저항의 요동이 심해진 정도를 나타낸 것으로, 이러한 심한 요동으로 인한 불안정한 연삭가공은 연삭열이 높아지는 결과를 초래하여 연삭버닝이 일어나서 공작물의 가공품위와 연삭 다듬질면의 결정조직, 경도변화, 잔류응력 등에 악영향을 끼치는 요인으로 작용할 것으로 사료된다.

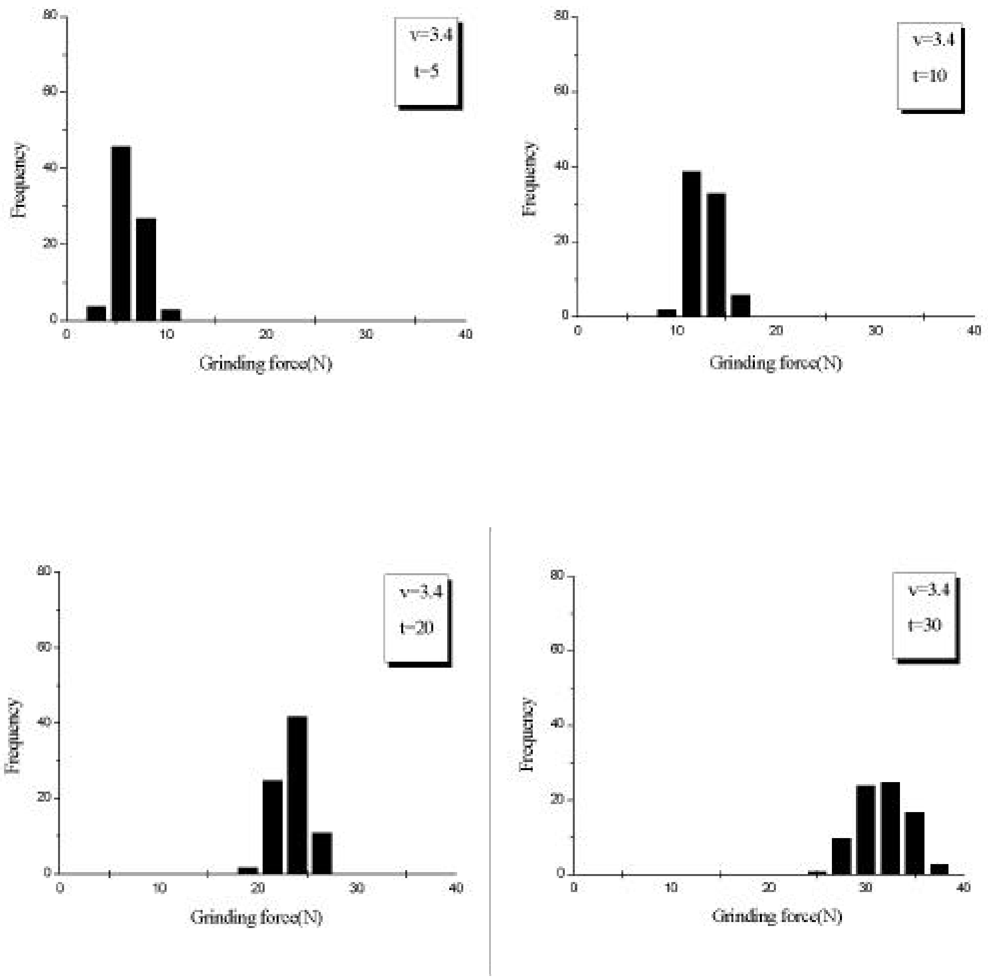

Fig. 12(a) The distribution of frequency versus grinding force
(WA #100 wheel)

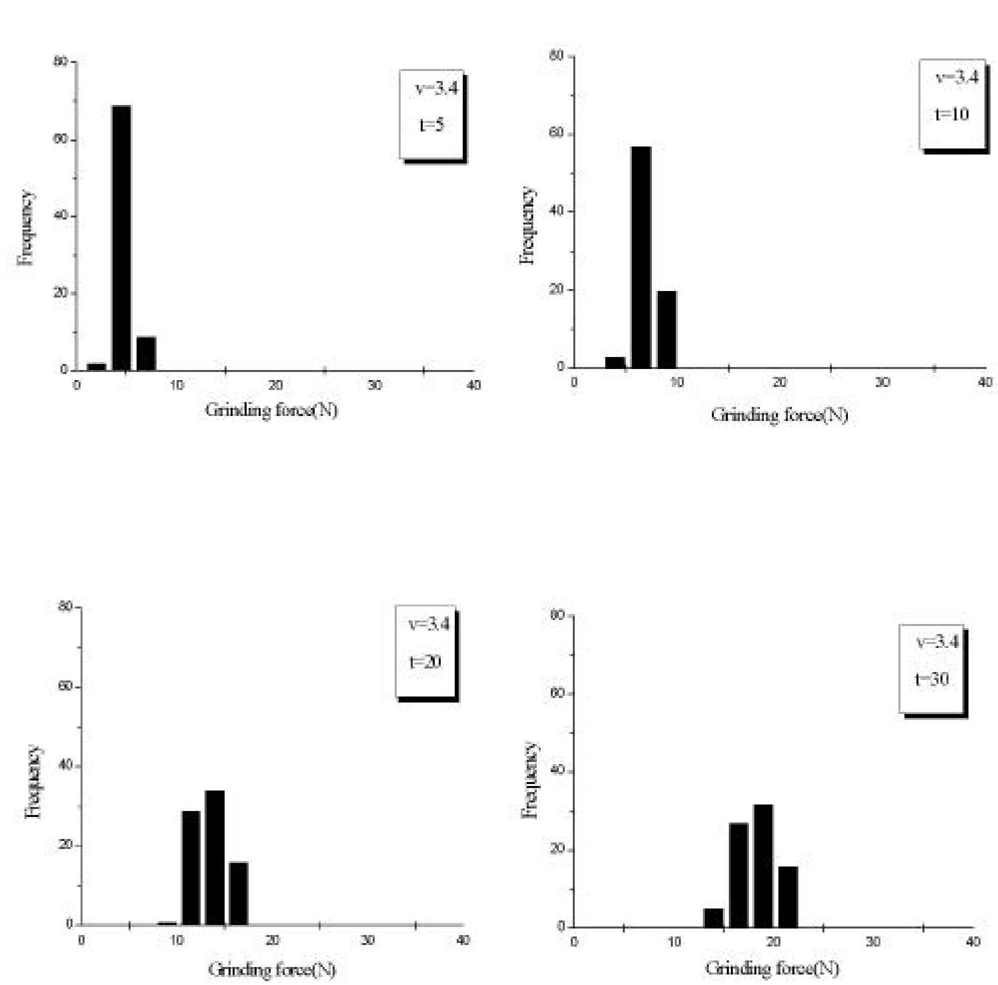

Fig. 12(b) The distribution of frequency versus grinding force (WA #220 wheel)

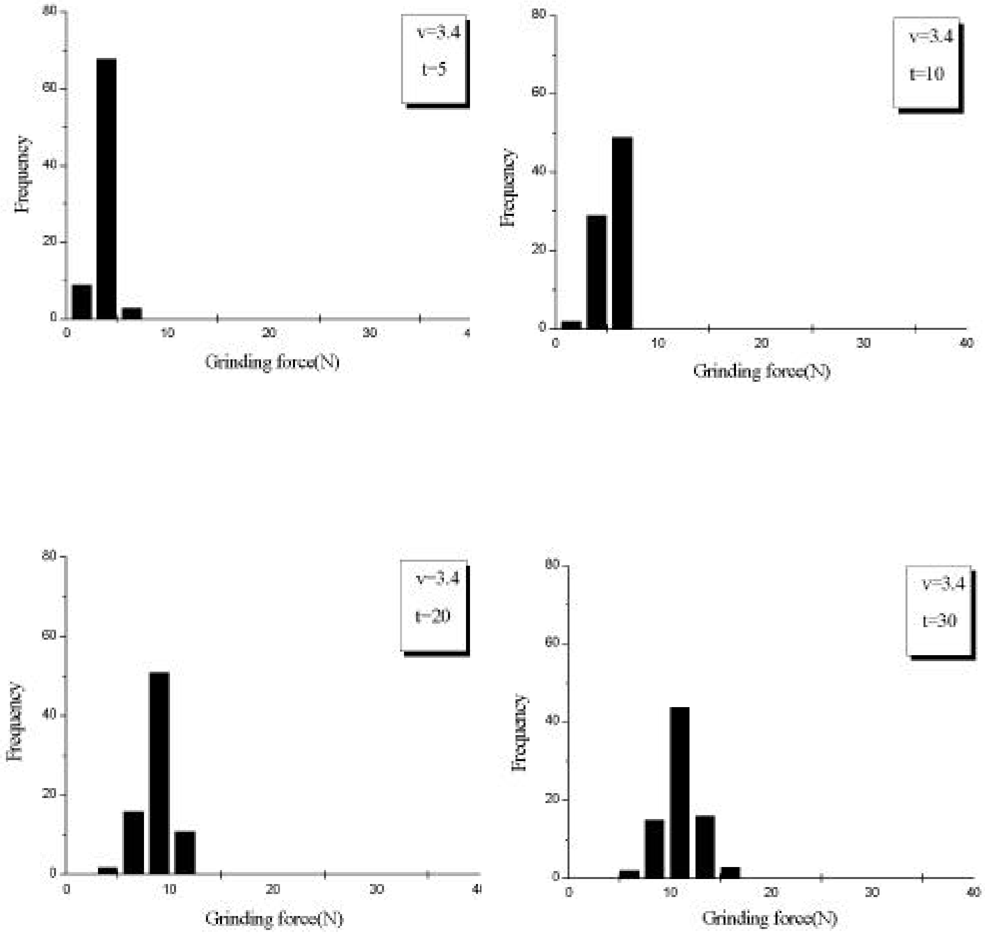

Fig. 12(c) The distribution of frequency versus grinding force (WA #300 wheel)

4.2 표면거칠기 변화

Fig. 13은 WA숫돌을 이용한 STD11을 연삭가공했을 때의 표면거칠기 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 13(a)는 절입깊이의 증가에 따른 표면거칠기 변화를 살펴보기 위해 테이블 이송속도를 2.5m/min으로 고정하고 세종류의 숫돌(#100, #220, #300)로 절입깊이를 5 30㎛까지 단계변화시켰을 때의 R_a와 R_{max} 값을 나타낸 것이고, Fig. 13(b)는 테이블 이송속도의 증가에 따른 표면거칠기 변화를 살펴보기 위해 절입깊이는 10㎛로 일정하게 유지하고 세종류의 연삭숫돌로 공작물의 이송속도를 1.4 4.6m/min까지 단계변화시키며 가공했을 때의 R_a와 R_{max} 값을 나타낸 결과이다. 그 결과 그림에서 나타난 바와 같이 R_a값은 절입깊이와 테이블 이송속도의 가공조건 변화에 대해서 변화가 거의없이 숫돌입도가 낮은 순서대로 거칠게 나타내었으며, R_{max}는 #100의 숫돌에서 상대적으로 거칠게 나타나고 #220과 #300의 숫돌에서는 비슷한 값의 표면거칠기를 나타내었으며, 전체적으로는 절입깊이와 테이블 이송속도의 증가에 대해서 비례적으로 거칠어지는 결과를 나타냈다.

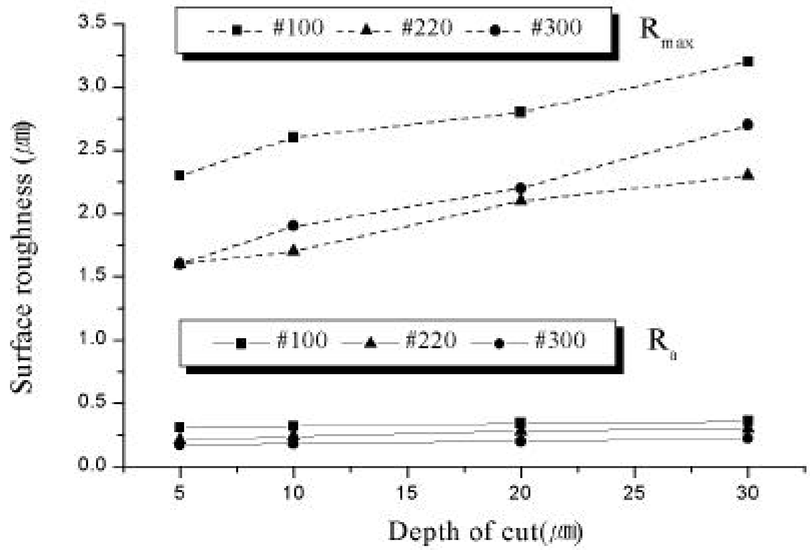

Fig. 13(a) Surface roughness of grinding direction for depth of cut

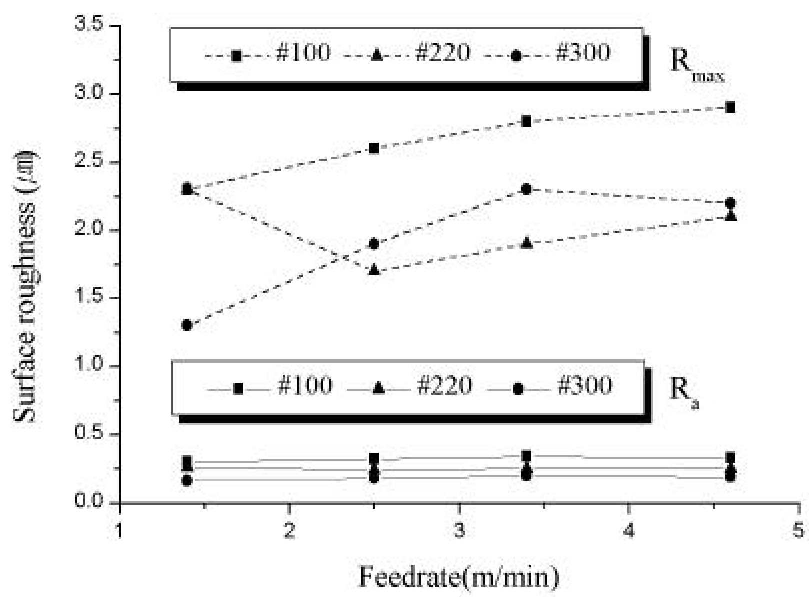

Fig. 13(b) Surface roughness of grinding direction for feedrate

다음은 절입깊이와 테이블 이송속도에 따른 중심선 표면거칠기(R_a)를 숫돌입도별로 나타낸 결과이다. 그 결과 Fig. 14에서 나타난 바와 같이 표면거칠기는 공통적으로 숫돌입도가 커질수록 거칠기가 향상되어 나타났고, 절입깊이가 증가하고 테이블의 이송속도가 빨라질수록 표면거칠기도 비례적으로 거칠어지는 경향을 나타내었다.

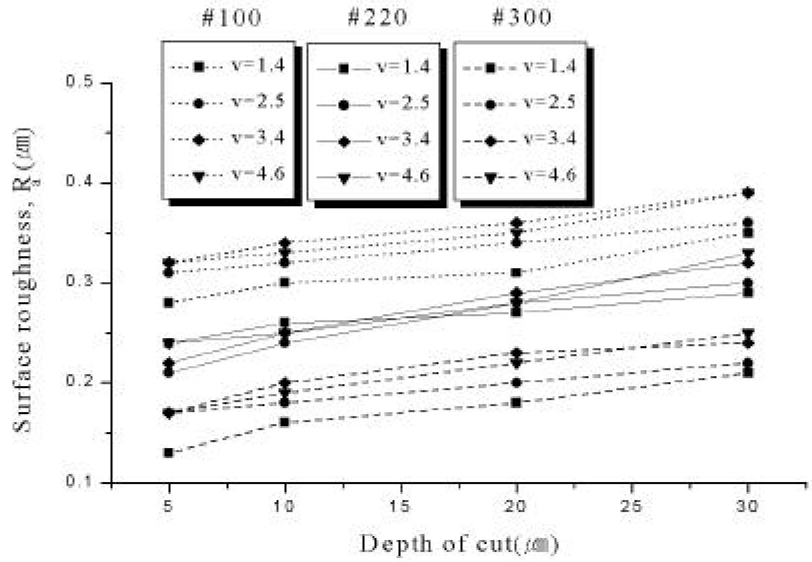

Fig. 14(a) Surface roughness(R_a) versus depth of cut for feedrate and mesh of wheel

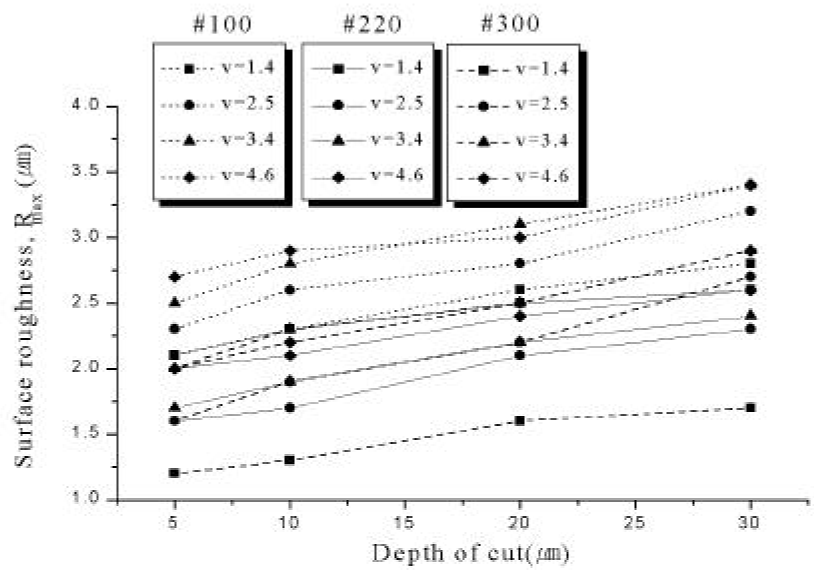

Fig. 14(b) Surface roughness(R_{max}) versus depth of cut for feedrate and mesh of wheel

4.3 스파크아웃 효과

다음은 STD11의 법선연삭저항의 스파크아웃 효과를 살펴보기 위한 것으로 1회와 5회를 실시하였을 경우의 결과이다. Fig. 15는 #100 숫돌로 테이블 이송속도가 1.4m/min와 4.6m/min일 때, 절입깊이의 증가에 따른 연삭저항을 나타낸 결과이다. 그 결과 그림에서 보는 바와 같이 스파크아웃은 1회보다 5회를 실시하였을 경우 법선연삭저항이 대략 2/3 정도 감소되어 나타남을 알 수 있다.

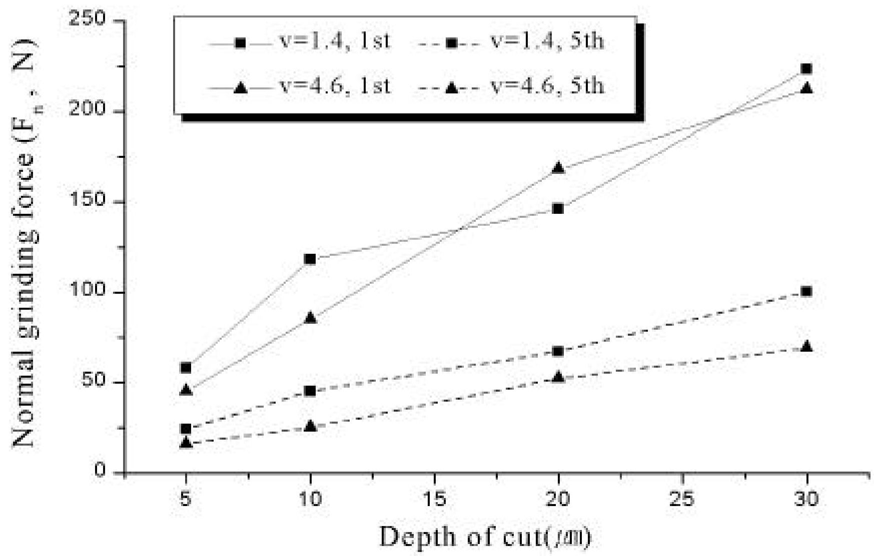

Fig. 15 Effect of spark-out on the grinding force

Fig. 16은 스파크아웃 횟수의 증가에 따른 공작물의 연삭저항을 살펴보기 위한 것으로 테이블 이송속도를 2.5m/min, 절입깊이를 10㎛로 유지시킨 후 연삭가공을 실시한 결과이다. 그 결과 스파크아웃의 횟수가 증가함에 따라 연삭저항이 크게 감소하다, 10회 이후부터는 값의 변화가 없는 일정한 형태를 나타냄으로 10회 이상의 공정은 불필요함을 알 수 있었다.

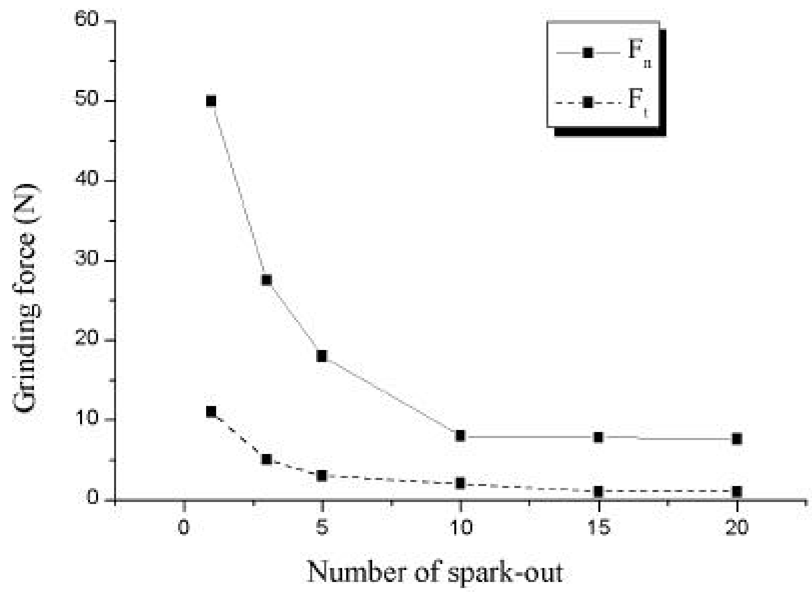

Fig. 16 Grinding force versus number of spark-out

다음은 STD11의 표면거칠기에 대한 스파크아웃 효과를 살펴보기 위한 것이다. Fig. 17은 #100 연삭숫돌을 사용하였고, 테이블 이송속도가 1.4m/min, 4.6m/min일 때의 절입깊이에 따른 스파크아웃을 1회와 5회 실시하였을 때의 표면거칠기 값을 나타낸 결과이다. 표면거칠기에 절입깊이가 깊어짐에 따라 10㎛를 기준으로 향상되다 거칠어지는 경향을 나타내었으며, 전반적으로 스파크아웃의 횟수가 1회보다 5회 실시하였을 경우에 표면거칠기가 10 20%정도 향상되는 결과를 나타냈다.

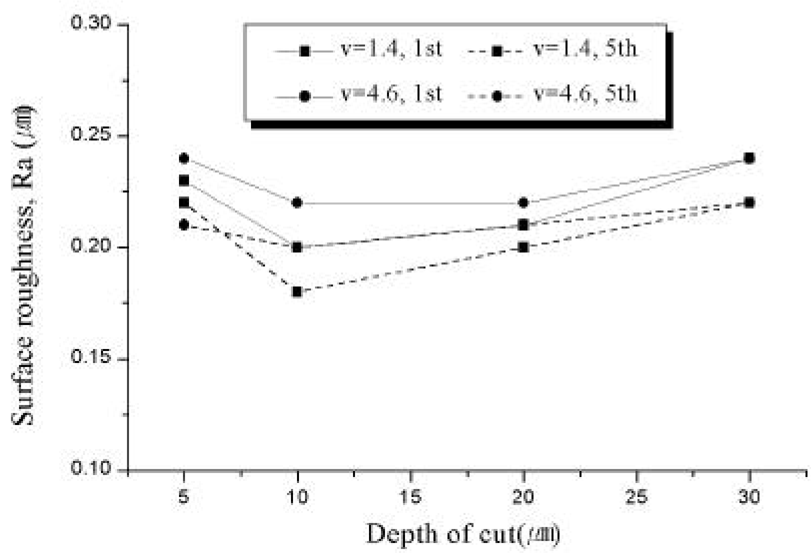

Fig. 17 Effect of spark-out on the surface roughness

다음은 STD11의 가공시 스파크아웃 횟수의 증가에 따른 표면거칠기 변화를 살펴보기 위한 것으로, 테이블 이송속도를 2.5m/min, 절입깊이를 10㎛로 유지하고 연삭가공을 실시한 결과이다. Fig. 18에 나타난 바와 같이 스파크아웃 횟수가 증가함에 따라 거칠기가 양호해지는 결과를 가져왔으며, R_a와 $R_{\max}$ 모두에서 절입깊이와 테이블 이송속도가 커질수록 거칠기의 향상정도가 커짐을 알 수 있었다. 또한, 표면거칠기는 스파크아웃 횟수가 증가함에 따라 향상되어지다, 10회를 지나면서 일정하게 나타나는 값의 변화가 거의없게 나타나므로, 10회 이상의 스파크아웃은 불필요한 공정임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 산업현장에서 작업시간 단축 등의 효율적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

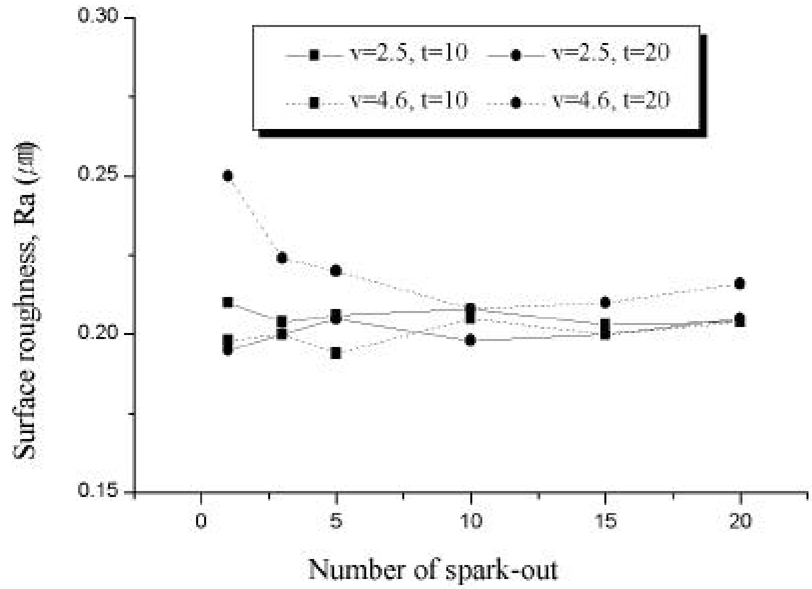

Fig. 18(a) Surface roughness(R_a) versus number of spark-out

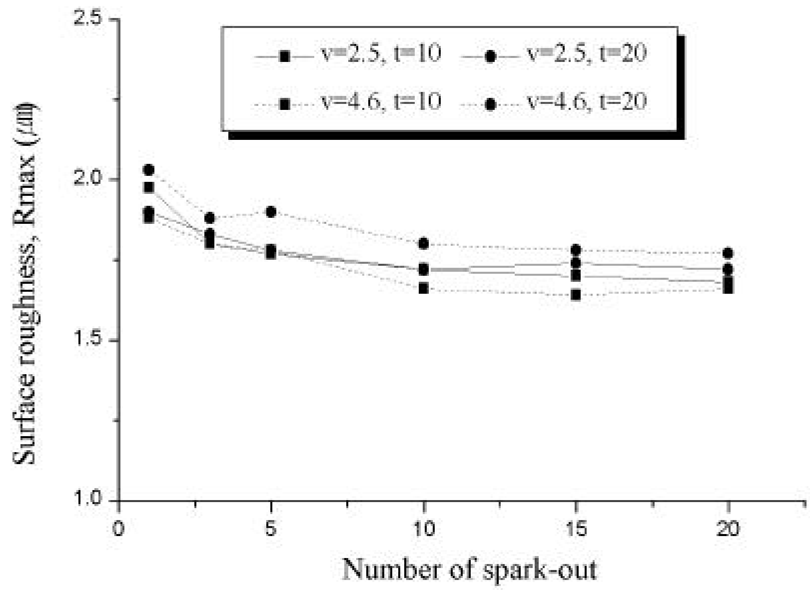

Fig. 18(b) Surface roughness(R_{max}) versus number of spark-out

5. 결 론

본 연구에서는 세종류의 WA숫돌(#100, #220, #300)을 사용한 평면연삭가공에서 금형강(STD11)을 공작물로 사용하여 테이블의 이송속도를 1.4 4.6m/min, 절입깊이를 5 30㎛까지 단계적으로 변화시키면서 연삭가공한 후 연삭저항, 표면거칠기 및 스파크아웃에 대해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연삭저항은 입도가 낮은 연삭숫돌에서 크게 작용하였고, #100 숫돌은 #220 숫돌보다 대략 1.5배, #300 숫돌보다 대략 2배정도 크게 나타났다. 또한 절입깊이와 이송속도의 증가에 대해서 비례하여 증가하였으며, 법선과 접선에서의 연삭저항은 이송속도가 빨라지고 절입깊이가 커질수록 그 차가 더욱 크게 나타났다.

2. 연속가공 횟수가 많아질수록 연삭저항은 증가하는 경향을 보였으며, 60회 정도에서 숫돌의 자생작용이 활발히 진행되었으며, 법선저항과 접선저항의 연삭비는 절입깊이가 증가함에 따라 감소하다 특정한 어떤 값에 도달하는 경향을 나타냈다.

3. 동적 연삭저항은 연삭저항의 빈도수에 따른 분포도를 통해서 모든 입도의 숫돌에서 절입깊이가 증가할수록 연삭저항이 커지면서 그 집중도가 낮아지고 분포가 넓어지며 심한 요동현상을 나타냈으며. 이러한 현상은 입도가 낮은 숫돌에서 그 경향이 더욱 크게 나타났다.

4. 표면거칠기는 #100, #220, #300의 순으로 거칠기가 양호하게 나타났고, 절입깊이와 테이블 이송속도가 증가할수록 거칠어지는 경향을 나타냈다. 또한 연삭저항이 커질수록 표면거칠기도 비례적으로 거칠어지는 상관관계를 확인할 수 있었다.

5. **연삭저항과 표면거칠기에서 스파크아웃를 실시한 결과 연삭저항이 감소하고, 거칠기가 양호해졌으나 10회 이상의 경우에는 값의 변화가 거의 없는 일정하게 나타났다. 따라서 본 연구에 있어서 최적의 스파크아웃 횟수는 10회가 됨을 알 수 있었다.**

참고문헌

1. 곽재섭, 송지복, "AE 신호를 이용한 연삭 가공물의 표면 거칠기 예측," 한국정밀공학회지, 제17권, 제4호, pp. 240-246, 2000.

2. 곽재섭, 김건회, 하만경, 송지복, 김희술, "신경회로망을 이용한 연삭가공의 트러블 검지(Ⅱ)," 한국정밀공학회지, 제13권, 제11호, 1996.

3. Kazunori Nagasaka, Yoshihiro Kita, and Akihiro Tanibayashi, "The Construction of Expert System for Grinding Process," Jaurnal of JSPE, Vol. 57, No. 7, pp. 141-146, 1991.

4. Ganhoi Kim and Inasaki, "Establishment of Optimum Grinding Conditions Utilizing the Fuzzy Regression Model," Journal of JSME, Vol. 59, No. 566, pp. 280-286, 1992.

5. 맹희영, "연삭가공조건의 최적화에 관한 연구," 서울대학교 공학석사학위논문, pp. 57, 1982.

6. S. Malkin, Grinding Technology-Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, 1989.

7. 島宗勉, 小野浩二; "砥石壽命に關する研究(研削抵抗の時間的變化)," (第1報), 日本精密機械學會論文集, Vol. 46, No. 11, pp. 1379-1385, 1980.

8. 井上英夫; "研削加工におけるびびう 振動 現象," 日本精密機械學會論文集, Vol. 53, No. 9, pp. 591-592, 1969.

9. 손명환, 절삭가공론, 문운당, 1996.

10. J.r. crookall, Milton C. shaw, Nam P. Suh, Principles of Abrasive Processing, Clarendon press · Oxford, 1996.

11. 이종찬, 초연마재를 이용한 연삭, 절삭가공, 문운당, pp. 41-160, 1998.

12. 허성중, 강재훈, 김원일, “금형용 WC-Co의 초정밀 연삭가공 조건에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제10권, 제1호, pp. 42-51, 1993.

13. 유해영, 이강섭, 공학도를 위한 수치해석, 희중당, 1994.

14. Kuo S, Computer Application of Numerical Methods, Addison Wesley, 1972.

15. K. Steffen, H.Follinger, “A New Approach for Investigating Dynamic Effects in Grinding,” Annals of CIRP, Vol. 34 , No. 1, 1984.

16. W. H. Backer and M. E. Merchant, “On the Basic Mechanics of the Grinding Process,” Transactions of the ASME, pp. 141-148, 1958.

17. K. V. Kumar, Mcoznina, Y. Tanaka, and M. C. Shaw, “A New Method of Studying the Performance of Grinding Wheels,” Trans. ASME, Vol.102, No.1, pp. 80-84. Fed. 1980.

Selection of Optimum Machining Condition Using STD11 Material in Surface Grinding

Lee, young-suk

Dept. 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 parameters considered in grinding such as grinding force, surface roughness, feedrate and depth of cut.

In order to measure variation of grinding force and surface roughness, an experiment was made. In this experiment, equipments like hydraulic surface grinding machine, dynamometer, charge amplifier, A/D convertor, PC, surface roughness measuring instrument and so on were used.

In this experiment variation of grinding force shows that analysis of static and dynamic peculiarity, the grinding force ratio and the number of stroke are took into consideration. Besides, the effect of spark-out examined and surface roughness is observed for machining quality of workpiece. With the experimental investigation, I suggest STD11's machining condition for effective grinding.

Key words : Grinding force(**연삭저항**), Depth of cut(**절삭깊이**)
Feedrate(**이송속도**), Surface roughness(**표면거칠기**)

Nomenclature

A : Cross cutting area of workpiece (mm^2)

a_g : Wear flat area of grain (mm^2)

a_m : Cutting area of grain (mm^2)

b : Wheel width (mm)

C : Distance between grain and other grain (mm)

D : Wheel diameter (mm)

d : Workpiece diameter (mm)

E_s : Specific grinding energy (kg/mm^2)

f_n : Normal component force in grain (kg)

f_t : Tangential component force in grain (kg)

F_n : Normal component of grinding force (kg)

F_t : Tangential component of grinding force (kg)

K_s : Specific cutting force in grinding (kg/mm^2)

k_n : Compressible yield stress in workpiece (kg/mm^2)

k_s : Specific cutting force in grinding (kg/mm^2)

μ : Friction coefficient between grain and workpiece materials

λ : Force component ratio in cutting

l_c : Contact length between wheel and workpiece (mm)

n_τ : Density of grain edge ($1/mm^2$)

P_{flu} : Fluctuation of instant dynamic grinding force

P_s : Settling grinding force (kg)

R_a : Center line average height roughness (µm)

r : Wheel radius (mm)

$R_{\max}$: Peak to valley height (㎛)

T_s : Settling time

t : Wheel depth of cut or downfeed (㎛)

v : Workpiece velocity ($m/\min$)

V : Wheel velocity ($m/\min$)

Δ : Surface roughness of grinding (R_a, ㎛)

Z : Metal removal rate ($mm^3/\sec$)

감사의 글

이제 2년간의 대학원 생활을 마무리 지으면서 그동안 은혜를 입었던 분들에게 지면으로나마 감사의 글을 전하고자 합니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 아낌없는 지도와 충고를 해주시며, 인생의 지혜와 학문하는 자세를 가르쳐 주신 하 만경 지도교수님께 마음속 깊은 존경과 감사를 드리며, 늘 따뜻한 격려와 관심을 가져주시고 부족한 저의 논문을 세밀하게 검토해 주시고 심사까지 맡아주신 구 양 교수님과 곽 재섭 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고, 학부에서 저를 지도해 주시고 평안하게 대학원 생활을 할 수 있도록 배려해 주신 권 순홍 교수님, 정 성원 교수님, 권 순구 교수님, 박 종민 교수님, 최 원식 교수님과 바쁘신 와중에도 제게 많은 관심과 도움을 주신 구재현, 심국상 선생님께도 지면으로나마 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

본 논문이 완성되기까지 실험실에서 동고동락을 했던 전 재억 선배와 진환, 재용, 태경, 현석이를 비롯한 하석회 회원에게도 감사와 행복한 미래가 함께하길 진심으로 바랍니다. 항상 자식처럼 보살펴주신 김순이 사장님과 상훈부부, 영호, 태경 및 일수 형, 인천, 황기, 효용부부, 석봉과 조교생활시절 함께 생활하며 많이 따라주었던 인규, 태봉이를 비롯한 저와 함께 해주신 다른 모든 분들에게 감사와 건강을 기원하며, 보다 좋은 결실을 갖고 미래에 이 영광된 시간을 함께 하길 희망합니다.

끝으로 부족한 자식을 언제나 믿고 묵묵히 지켜 보시면서 항상 제가 하고자 하는 일에 뒷바라지를 아끼지 않으셨던 아버님, 어머님과 형, 형수, 동생 그리고 사랑스런 조카 주현, 진옥이를 비롯한 가족·친지들과 이 기쁨을 함께하고 싶습니다. 오늘날의 제가 있기까지 주위에서 많은 도움을 주셨던 분들게 다시한번 감사함을 전하고 항상 성실하게 노력하는 삶을 살도록 하겠습니다.   감사합니다.

2002. 01.   .