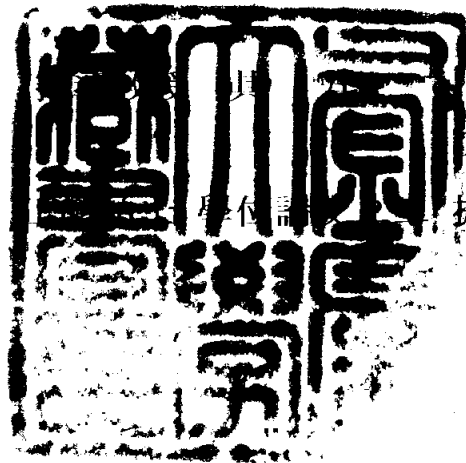


工学碩士學位論文

LM가이드 내경연삭을 위한
CBN숫돌 선정 및 가공특성 평가

이 論文을



學位論文

提出함

2004年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學部 機械設計・生産者動化専攻

許 定 式

許定式の 工學碩士 學位論文을 認准함

2003年 12月 日

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



목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 고찰	4
2.1 연삭력	4
2.2 CBN 연삭숫돌 입자의 종류	6
2.3 연삭숫돌의 선정법	9
2.4 연삭균열 검출법 및 방지법	11
2.5 연삭연소	15
2.6 표면거칠기	16
3. CBN 입자별 연삭 특성 평가	17
3.1 실험목적	17
3.2 가공시스템	18
3.2.1 CNC 선반	18
3.2.2 연삭숫돌	19
3.2.3 숫돌 고정용 퀴(quill)	22
3.2.4 고속 스펀들	23
3.2.5 피삭재	24
3.3 실험방법 및 조건	25
3.3.1 실험방법	25
3.3.2 실험조건	26
3.4 실험결과 및 고찰	27
3.4.1 초대파쇄 숫돌의 연삭특성	27
3.4.2 미소파쇄 숫돌의 연삭특성	30

3.4.3 연삭유제와 슷돌 주속의 변화에 따른 연삭특성	33
3.4.4 종합적 고찰	35
4. 미세 흙의 연삭가공 기술개발	36
4.1 실험목적	36
4.2 가공시스템	37
4.2.1 성형연삭기	37
4.2.2 연삭스틀	39
4.2.3 피삭재	40
4.3 실험방법 및 조건	41
4.3.1 실험방법	41
4.3.2 실험조건	42
4.4 실험결과 및 고찰	43
4.4.1 CB120M150V스틀의 연삭특성	43
4.4.2 CB120M100V스틀 및 CB140M100V스틀의 연삭특성	49
4.4.3 CB170M100V스틀 및 CB230M100V스틀의 연삭특성	52
4.4.4 종합적 고찰	54
5. 결 론	55
참고문헌	56
Abstract	59
Nomenclature	61

1. 서 론

최근, 나노테크놀로지로 대표되는 전자·광학 등의 정보 통신이나 고부가가치의 기계산업에서는 미세·고정밀의 가공기술개발에 대한 요구가 해마다 높아지고 있다. 종전에는 이러한 분야의 기계 부품들은 특수가공이나 초정밀 가공에 의해 제작되어 왔는데, 가공속도가 느리고 설비투자가 고액이어서 생산성과 비용의 문제를 피할 수 없었다. 이러한 생산성과 비용의 문제를 동시에 해결하기 위한 돌파구는 고능률의 공작기계를 사용하거나, 새로운 가공기술을 개발하는데 있다. 현재 마무리 공정으로는 래핑이나 폴리싱 등의 가공이 많이 이용되고 있으나 생산 원가가 상당히 높아 경제성을 얻지 못하고 있다. 그리므로 마무리 가공 방법을 적가이면서 고정도의 표면과 치수정밀도를 얻을 수 있는 고능률 연삭가공으로 대처하려는 연구는 아주 활발히 전개되고 있다.^{1)~3)} 이러한 사례로 위치제어시스템의 액츄에이터로써 주로 사용되고 있는 LM가이드(Linear Movement guide)가 대표적이다. LM가이드는 빠른 주행과 높은 정밀도를 갖추어야 만하기 때문에 LM 가이드의 블록 양측면 불 안내부의 정밀도의 중요도는 상당히 높다. 이러한 불 안내부의 마무리 가공으로 현재 WA(White Alundum)숫돌을 이용한 연삭가공이 행하여지고 있다. 하지만 LM가이드 연삭에서 가이드 블록 표면상에 칩탄 처리가 되어 있어, 가이드 표면이 잘 연삭되지 못하는 난삭 재료이기 때문에 일반 WA계열의 숫돌을 사용하면 공구의 마모로 인한 제품의 정밀도 저하되고, 작업 중 잦은 트루잉(truing) 실시로 인한 공정수가 증가하는 단점을 지니고 있다. 연삭가공 중 숫돌의 입자는 가공이 진행되는 동안 마모가 진행되면서 숫돌의 날끝 형상이 변하게 되고, 숫돌의 형상변화는 제품의 형상정밀도를 저하시키는 중요한 인자로 작용하며, 특히 정밀 이송기구의 미

소형상부품에서는 그 영향이 아주 절대적이라 할 수 있다. 따라서, 미소 흠의 연삭 가공에서 수명이 긴 스톨의 개발과 이리헨 스톨의 수명을 연장시킬 수 있는 가공방법의 개발이야말로 정밀 가공의 당면 과제라 할 수 있다.

CBN(Cubic Boron Nitride) 연삭스톨의 적용범위는 공구를 연삭하는 초보적인 작업에서부터 위치 제어용 정밀 액츄에이터 등에 사용되는 경화강 부품이나 침탄강 등의 정밀 연삭에 까지 다양하며, 난삭재 연삭에 있어서 일반 연마재보다 훨씬 더 높은 가공 능률을 지니고 있다.^[4,5] 연마재의 입자가 취약하여 가공압력과 연삭열을 견디지 못한다면, 비록 연마재의 경도가 높다 할지라도 이 입자는 무의미하게 된다. 그러나 CBN 결정은 우수한 경도에 상응하는 인성도 갖추고 있기 때문에 일반 연마재보다 오랫동안 날카로운 절삭날을 유지할 수 있고, 또한 절삭날의 마모도 천천히 진행된다. 일반 연삭날로 난삭재를 연삭할 시에는 입자가 빠르게 마모되어 날끝이 쉽게 무디어진다. 이로 인하여 재료 제거율은 감소하게 되고 부품의 정밀도와 형상 치수를 유지하기 어렵게 된다. 아울러 CBN 입자는 우수한 연삭능률과 함께 높은 일전도율을 지니고 있으므로, 열의 축적을 방지하여 스톨의 눈베움(loading)현상과 피삭재의 금속학적 손실을 최소화 할 수 있다. 따라서, 최근에 새롭게 개발된 CBN 입자에 대한 적정 사용법 및 적정 조건을 찾아내는 연구는 끊임없이 진행되고 있다. 특히 일본에서는 기존의 CBN 입자를 더욱 발전시킨 나노크리스탈린(nanocrystalline) CBN을 개발^[6]하여, 이를 초정밀 연삭 가공에 적용함으로써 공작물 표면의 정밀도를 나노(nano)까지 향상시키는데 크게 기여하였고, Malkin은 “초연마재의 연삭 기술 이론과 적용”^[7]에서 CBN입자의 내마모성의 우수성을 나타내었으며, 또한 CBN 입자의 연삭 특성을 분석하고 CBN 입자별 사용 조건을 제시하였다.^[8]

본 연구에서는 여러 가지 CBN숫돌 중에서 고능률 정밀연삭을 위한 적정 CBN숫돌을 선정하기 위하여 조대파쇄의 CBN입자와 미소파쇄의 CBN 입자 두 종류를 선택하고, 다시 입자의 결합도 및 집중도를 달리하여 총 4종류의 숫돌을 선택한 뒤 각각의 연삭 숫돌에 대하여 연삭특성을 분석하였다. 연삭 작업조건은 공구의 이송, 연삭유체의 종류 등을 변수로 하였으며, 가공면의 표면 거칠기 및 공작물의 외관검사 그리고 숫돌의 마모량 등을 검사하였다. 이러한 실험의 결과, LM가이드 내경연삭을 위한 적정 CBN숫돌로는 조대파쇄의 숫돌이 가장 우수하게 나타났으며, 이러한 연삭특성을 토대로 하여 실제 공정에서 사용할 수 있는 조대파쇄 CBN숫돌 7종류를 제작하였다. 제작된 숫돌들의 상용성을 입증하기 위하여 최종 정삭공정의 테이블 이송, 1회 절입량 및 매 조건마다의 트루잉 유무를 변수로 하여, 각 변수에 따른 가공면 성상의 표면거칠기, 가공면 품위 그리고 연삭작업의 안정성과 흠의 곡률 정밀도를 실험하였다. 이러한 실험의 결과 LM가이드 내경연삭에서 기존의 WA숫돌을 대체 할 숫돌로 CB120Q100V숫돌이 가장 적절하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 연삭력

연삭가공에서 연삭력은 법선력이 지배적인 영향을 미친다. 법선력은 식 (2.1)에서와 같이 공작물을 절삭하는 힘(cutting force, F_c)과 미끄럼을 일으키는 힘(sliding force, F_s)의 합으로 나타낼 수 있다.^{19,10)}

$$F_n = F_c + F_s \quad (2.1)$$

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

$$F_n = F_c + \bar{p} \cdot A_n \quad (2.2)$$

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

여기서, b 와 D 는 스톨의 폭과 직경을 나타내고, t 와 A 는 절입깊이와 길보기 접촉면적이다. 또한 비절삭에너지(u)를 이용하여 F_c 를 나타내면 다음과 같은 식이 완성된다.

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

위 식에서 이론적인 연삭력의 수직성분은 공작물의 속도(v)가 빨라질수록 증가하고, 연삭스톨의 속도(V)가 빨라질수록 연삭력은 감소함을 알 수 있다. 또 절입깊이와 절삭폭이 커질수록 연삭력은 증가하고, 평균접촉 응력의 영향을 반응을 알 수 있다. 또한 연삭력은 Fig. 1과 같은 단일 절삭단(grain edge)의 절삭 모형을 이용해서 이에 작용되는 접선방향 연삭분력과 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.^{11,12)}

$$\begin{aligned}
 f_t &= f_t' + f_t'' \\
 &= k_s \cdot a_m + \mu \cdot k_n \cdot a_g
 \end{aligned}
 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}
 f_n &= f_n' + f_n'' \\
 &= \lambda \cdot k_s \cdot a_m + k_n \cdot a_g
 \end{aligned}
 \quad (2.6)$$

이때, $a_m = \frac{1}{n_\tau} \cdot \frac{v}{V} \cdot \sqrt{\frac{t}{d_e}}$ 이다.

여기서, k_s : 공작물의 비절삭항력 (kg/mm^2)
 k_n : 공작물의 항복압축강도 (kg/mm^2)
 λ : 공작물과 마모면 사이의 마찰계수
 μ : 칩 생성을 위한 2분력비
 a_m, a_g : 절삭날의 절삭면적 및 마모평탄면적
 n_τ : 절삭날의 밀도 ($1/mm^2$)

또한 공작물에 연삭비닝이 발생하기까지의 전체 연삭지향은

$$F_t = n_\tau \cdot b \cdot l_c \cdot f_t \quad (2.7)$$

$$F_n = n_\tau \cdot b \cdot l_c \cdot f_n \quad (2.8)$$

의 식으로 나타낼 수 있다.^[13,14]

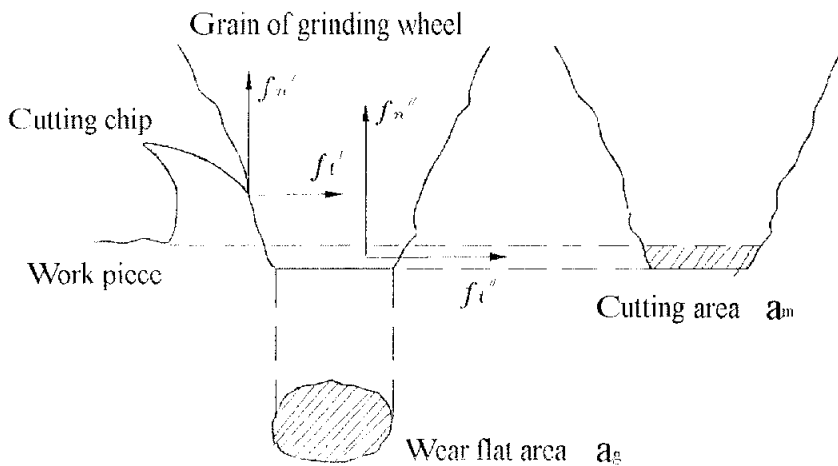


Fig. 1 Cutting model of grain edge

2.2 CBN연삭숫돌 입자의 종류

CBN숫돌의 시초는 1957년 GE사의 연구팀에서 자연에는 존재하지 않는 새로운 초연마재 입방정질화붕소(CBN)를 개발하고 보라존 CBN이라는 제품명으로 시판하기 시작한 것이 CBN숫돌의 시초인 것이다. 그 이후 다이아몬드숫돌과 마찬가지로 CBN숫돌도 적용분야별로 다양하게 제조되었고 적절한 용도에 맞추어 사용되어 오고 있다. 그러나 다이아몬드숫돌과는 달리 CBN연삭숫돌은 금속가공산업에서 많이 사용되고 있는 실정이다. CBN숫돌을 선정할 때는 본드 시스템과 연삭형태와 재료제거율에 따라서 각각의 용도와 범위에 알맞은 입자의 선정에서부터 시작된다. 그러므로 이러한 숫돌입자의 종류를 정확하게 파악하는 것은 숫돌의 설계시 우선되는 작업이다.

현재 공급되는 CBN입자의 종류는 7가지로, 타입 I, 타입 II, 타입 500, 타입 510, 타입 550, 타입 560, 타입 570이 있다.^[15] 타입 I은 중간 정도의 연성을 갖는 단결정 CBN 입자로, 비트리파이드 본드, 메탈본드, 전착 연삭형에 사용되도록 설계되었다. 그러나 결정의 표면이 매끈하기 때문에 레진본드에 단단히 결합시킬 수 없는 결점이 있다. 따라서 레진본드 시스템에 사용하려면 니켈코팅이 필요하게 되어 타입 II를 개발하였다. 타입 II는 타입 I의 결정에 60wt%의 니켈코팅을 한 것으로, 레진본드 시스템에 적합하게 설계되었다. 타입 II는 CBN 입자중 가장 많이 사용되고 있으며, 가공중에 날카로운 절삭날이 계속 생성된다. 타입 500은 고인성의 단결정 CBN 입자로, 비트리파이드 본드와 전착용으로 적합하고, 타입 510은 타입 500에 얇은 티타늄코팅을 한 제품이다. 코팅의 목적은 금속본드나 비트리파이드 본드 시스템에서 타입 500 결정의 결합력을 향상시키기 위한 것으로, 높은 재료제거율 하에서는 높은 본드 결정간의 결합력이 필요한 숫돌이다. 보라존 CBN 타입 I, 타입 II, 타입 500, 타입 510 제품은 단결정 CBN인데, 단결정 CBN은 파쇄가 일어나면서 수많은 벽개면을 발생시킨다. 이러한 조대파쇄는 입자가 무너졌을 때

날카로운 절삭날을 발생시키기 위하여 꼭 필요한 것이다. CBN의 수명이 다하기까지 이러한 조대파쇄는 여러번 계속되므로 CBN 입자는 재료 제거과정에 필요한 날카로운 절삭날을 계속 유지한다. 타입 550은 인성이 매우 높은 미립결정입자로 비트리파이드 또는 메탈 본드 시스템을 필요로 하는 대부분의 연삭작업에 사용되도록 설계되었다. 타입 550은 다른 CBN 입자보다 열안정성이 좋으므로 메탈본드나 비트리파이드 본드 연삭휠의 제작 및 사용시 특별한 이점이 있다. 타입 560은 타입 550에 60 wt% 니켈코팅한 제품으로 레진 본드 연삭휠에 적합하다. 타입 570은 타입 550 결정을 특수 표면처리한 제품으로, 전작휠에 적합하게 설계된 것이다. 보라존 타입 550, 560, 570은 미세결정 CBN 입자로, 조대파쇄가 아닌 미소파쇄에 의하여 절삭날을 생성시킨다. 각 입자는 미크론 크기의 수천개 CBN 결정들이 서로 단단하게 결합되어 100% 밀도를 갖도록 구성되어 있다. 각 입자의 날카로운 절삭날이 마모되기 시작하면, 연삭력에 의해 CBN 결정에 매우 작은 크기의 벽개가 발생한다. 이 미소파쇄로 인해 각 연마입자는 마모될 때마다 연속적으로 날카로운 절삭날을 발생시킴으로써 마찰열을 최소화하여 연삭작업을 일정하고 효과적으로 만든다. Table 1에 CBN숫돌 입자의 종류와 특징을 나타내었다.

Table 1 Types and characteristics of CBN abrasives

Abrasive type	Characteristics	Recommend Wheel
Type I	Basic CBN abrasive, black. knoop hardness is 4700, middle friability	Vitrified bond wheel Electro-deposition wheel
Type II	Add nickel coation 60wt% at type I generally use type II	Resin bond wheel
Type 500	CBN abrasive having more toughness than type I	Electro-deposition wheel
Type 510	To improve bonder at metal bond and vitrified bond, coated CBN abrasive	Metal bond wheel Vitrified bond wheel
Type 550	Poly crystal CBN abrasive with no plane of cleavage excellent hardness high resistance against heat crack	Metal bond wheel, Vitrified bond wheel
Type 560	Except Nickel coation 60wt% from type 550, usually use at resin bond wheel for good surface roughness	Resin bond wheel
Type 570	Except heat treatment from type 550 at electro deposition wheel	Electro-deposition wheel

2.3 연삭숫돌의 선정법

적절한 숫돌을 선정하기 위해서는 첫째 숫돌 손실량이 작아야하고 둘째 숫돌 수명이 긴 숫돌을 선정하여야 한다. 숫돌의 손실량은 직접적으로 공작물의 다듬질형상 및 다듬질 지수에 변화를 일으키고, 숫돌의 수명을 짧게 만들며 드레싱을 필요로 하게 한다. 그러므로 적절한 숫돌을 선정하는 일은 연삭공정을 실행하기 전 아주 중요한 공정이라 할 수 있다. 가선정한 숫돌의 숫돌 손실량이 적을 시에는 입도가 작고, 경도가 큰 숫돌을 선정할수록 좋은 선정이라 할 수 있다. 이렇게 선정된 숫돌은 다듬질면의 표면거칠기에 대하여 좋은 영향을 미친다. 다음은 선정한 숫돌의 입도 및 경도가 숫돌수명에 미치는 영향을 실험식으로 나타낸 것이다.^[16,17]

$$T = (B - 8) + (0.225 - 0.0014B^2) M \quad (2.9)$$

여기서, M = 숫돌의 입도번호,

B = 경도번호

T = 숫돌의 수명시간(min)

이 실험식에 의하여 숫돌수명을 숫돌경도를 가로축으로 취하고, 입도를 변수로 하여 도시한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2와 같이 입도번호가 클수록 수명은 길게 되고, 입도가 일정할 경우 어떤 경도에 있어서 수명은 극대값을 나타낸다. 이 경우의 숫돌입도 M 과 경도번호 B 와의 사이에는 식 (2.9)로부터

$$BM = 357 \quad (2.10)$$

인 관계가 성립된다. 더욱이 이것을 만족하는 실용입도 및 경도를 구해보면 Table 2와 같은 결과로 나타난다. 즉, 입도번호가 클수록 연한 숫돌의 것에 있어서 수명값이 최대로 된다. 한편, 숫돌수명을 가능한 길게 유지시키기 위해서는 우선 입도가 세밀한 숫돌로, 그리고 입도에 대응하는 경도를 Table 2에서 결정하면 좋다. 그러나, 이와 같이 하여 결정한 경도가 서서히 낮게 되면 숫돌 소모량이 많게 되며 불안하기 때문에 실제로는 그것 보다 어느 정도 강한 숫돌을 사용하는 것이 좋다.

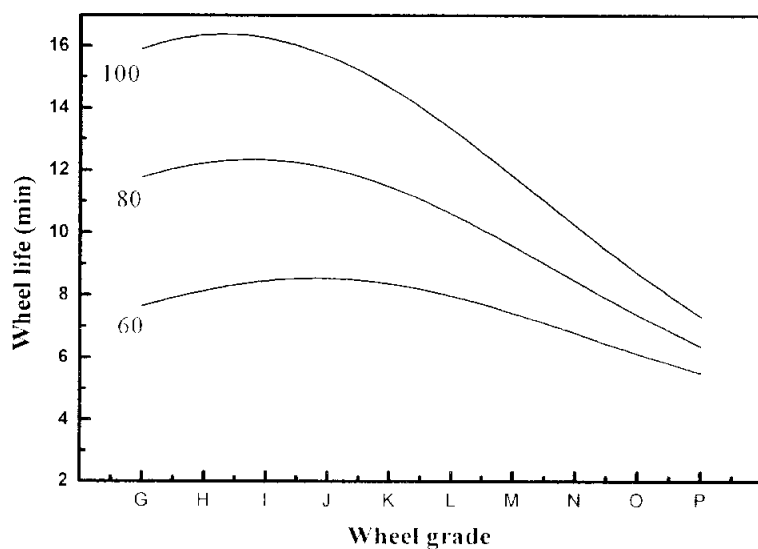


Fig. 2 The relation of wheel life and wheel grade

Table 2 The relation of grain size and wheel grade

grain size	24	30	36	46	54	60	80	100
wheel grade	S	P	N	L	J ~ K	J	H ~ I	H

2.4 연삭 균열 검출법 및 방지법

연삭가공된 제품의 연삭균열을 검출하는 방법은 맥나프혹스법, 부식법, 형광 침투법으로 구분할 수 있다. 맥나프혹스법은 시료를 자화시킨후, 미세한 분말로된 자성체 분말을 시료표면에 살포하면, 분말이 균열부분에 집중되므로 이로서 크랙의 존재를 알 수 있다. 시료를 산화시키면 크랙 양벽이 자극이 되므로 이부분에 자성분말이 강하게 끌어당겨져 연삭 흠 등에 방해받아 보이지 않았던 작은 크랙도 뚜렷이 판정할 수 있다. 부식법은 시료를 5%의 초산수용액 속에 약 15분간 부식시킨 다음 깨끗이 수세하여 건조시키면, 크랙속에 남아있던 초산액이 겉으로 배어 나오면서 크랙주위를 변색시키므로 이로서 육안으로도 크랙의 유무를 쉽게 알아보게 된다. 형광 침투법은 초경금속 등의 연삭균열을 검출하는데 사용한다. 연삭면의 균열속에 형광물질을 침투시켜놓고, 그것을 자외선으로 자극시키면 형광을 발하므로 크랙의 존재를 알 수 있게 된다.

연삭가공의 표면성상에 영향을 주는 인자중의 하나는 잔류응력이다.^{[18],[19]} 이렇게 연삭가공면에 나타나는 잔류응력은 재료표면의 성질, 특히 내피로성에 상당한 영향을 주며 표면에 인장응력이 존재할 경우는 피로강도를 감소시키는 것으로 알려져 있다. 또한 잔류응력이 할 경우는 공작물에 경년변화를 가져다 주어, 때로는 후에 일어나는 표면균열의 원인이 되므로 연삭가공할 때는 이러한 표면균열에 충분히 주의하여야한다.

잔류응력의 크기를 현장에서 손쉽게 판단하는 방법에 부식균열검사법, 에치크랙법이 있다. 이것은 연삭에 의해 표면에 인장응력이 발생한 담금질된 강마위를 황산 또는 염산용해로 부식시키면, 그 표면에 균열이 생기므로 그 균열정도로 잔류응력의 대소를 비교하는 방법이다. 담금질한 방간공구류를 평면연삭할 경우의 특정조건으로 연삭된 시료의 표면에 생긴 균열의 총길이를 측정하여 그래프화 한 것이 Fig. 3이다. 여기서 균열의 길이 값이 클수록 연삭면의 잔류응력이 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 연삭깊이가 약 $25\mu m$ 이상에서는 응력이 급격히 상

증하고 약 $70\mu m$ 에서 최대치를 취하며, 그 이상의 연삭깊이에서는 약간 내려가 일정한 값에 접근한다. 응력이 최대치를 나타내는 것은 이 연삭깊이 이상에서는 증대된 연삭저항 때문에 스톨입자가 스톨표면에서 탈락하여 공작물에 미치는 연삭압력이 저하하기 때문이다.

Fig. 4는 스톨속도의 영향을 나타낸 것으로서, 그림의 아래곡선은 저온의 황산액에서 부식시킨 결과이다. 이에 의해서 생긴 크랙은 비교적 높은 잔류응력을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 속도 $1500m/min$ 이하에서는 에치크랙이 전혀 나타나지 않는다. 그 이상이 되면 비로소 에치크랙이 생겨서 높은 잔류응력이 존재함을 나타내고 있다. 비교적 낮은 잔류응력을 알아보기 위해 고온 황산액으로 부식시킨 결과를 나타낸 것이 그림의 위쪽곡선이고 $1500m/min$ 이하의 속도일 경우에도 낮은 잔류응력이 존재함을 표시하고 있다. 그러나 이 정도의 잔류응력은 공작물 사용에는 거의 지장이 없다.

Fig. 5는 스톨 결함도의 영향을 표시한 것이다. 일반적으로 스톨 결함도가 낮을수록 잔류응력이 작다. 결함도 G의 스톨일 경우는 연삭 잔류응력에 관한한 아무런 장애가 없다고 말할 수 있다. 한편 연삭가공으로 공작물 표면에 생긴 응력이 그 재료의 강도보다도 커지면, 표면에 균열이 생겨서 응력을 완화시켜 평형을 유지하게 된다. 따라서 연삭균열을 방지하려면 연삭스톨의 종류와 기타의 연삭조건을 적절한 것으로 선택함으로써 연삭시 발생열량을 최소한으로 발생하도록 하여야 한다. 연삭깊이와 스톨속도를 작게 하여도 그 효과를 어느 정도는 얻을 수 있다. 그런데 담금질 강처럼 조직변화를 일으키기 쉬운 재료는, 그의 열적 성질도 작으므로 연삭온도가 높아져, 한층 더 많은 연삭균열이 생길 가능성도 있으므로 충분히 주의해야 한다. 연삭온도 상승을 방지하기 위하여 연삭액을 사용한다. 수냉식 냉각제일 경우는 $200^{\circ}C$ 이하의 온도에서 오히려 균열이 발생하기 쉬운 경향이 있어 역효과를 가져오는 경우가 있으니 주의해야 한다. 냉각액을 사용하는 경우는 국부적인 냉각법이 아니라 분무식 냉각법에 의한 전면냉각법을 택하는 것이 바람직하다.

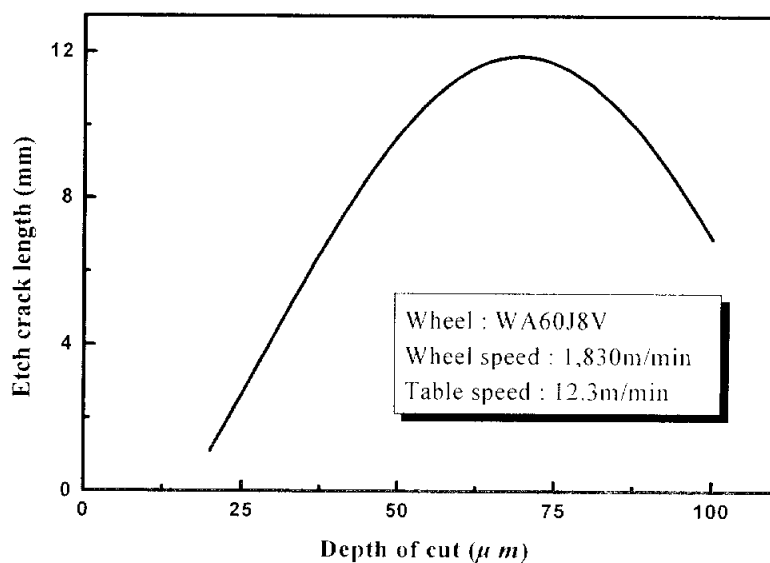


Fig. 3 Etch crack length according to depth of cut

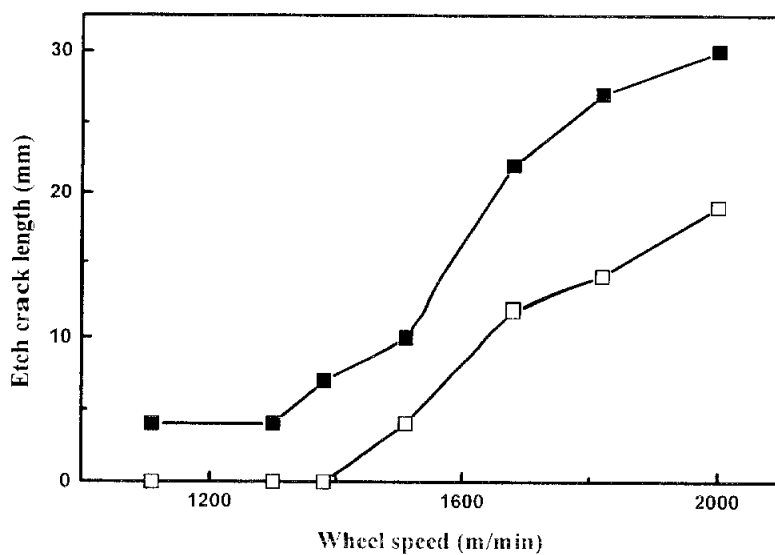


Fig. 4 Etch crack length according to wheel speed

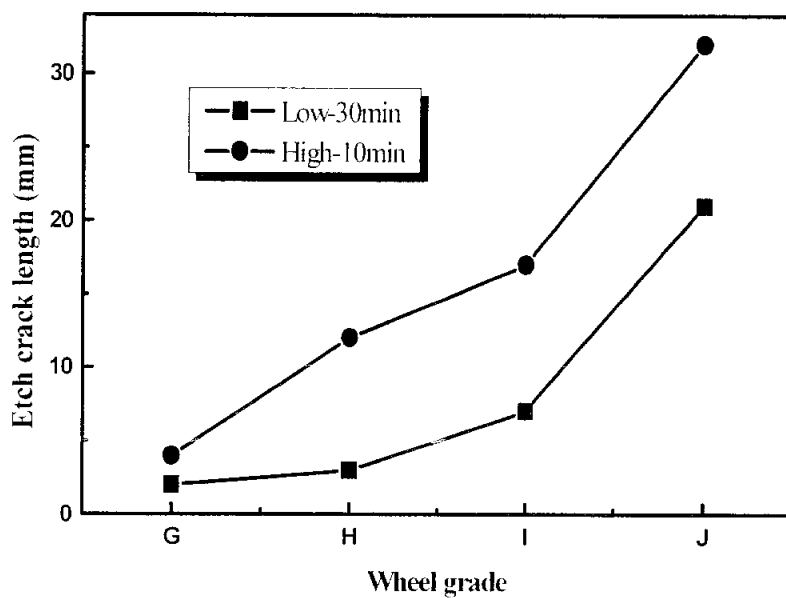


Fig. 5 Etch crack length according to wheel grade

2.5 연삭연소

연삭연소란, 다듬질면이 연삭으로 말미암아 순간적이긴 하지만, 대단히 고온으로 가열되기 때문에 표면이 산화하여 변색되는 현상을 말한다.^{[20][21]} 그러면 구체적으로 연삭연소가 어떤 상태에서 발생하는지, 다듬질면의 연삭연소 상태를 관찰한 결과를 Table 3에 나타내었고, 이것은 육안으로 판정된 연삭 연소상태와 연삭온도의 비교이다. 연삭연소는 비교적 높은 온도에서 순간적으로 가열되어 발생하는 것으로서 연삭깊이가 작을 때는, 연삭 다듬질면이 일반적인 금속광택을 내므로 특별한 연삭연소를 인지하지 못한다. 그러나 어느 정도 연삭깊이가 커짐에 따라 황금색의 산화색깔을 띄는데, 이때서야 비로소 연삭연소를 육안으로도 알아보게 된다. 이후 연삭깊이가 증가함에 따라 연삭연소 색깔은 갈색, 적갈색, 자색, 청색의 순으로 진행되고, 접촉면 온도도 연삭깊이와 더불어 점차 높아지는데, 황금색의 연삭연소가 확인될 경우의 최고온도는 이미 약 1000℃에 달한 것이다. 이처럼 높은 온도로 가열되면 다듬질면 내부에도 상당한 조직변화가 일어날 것임은 충분히 추측되는 일이다. 연삭연소가 생긴 다듬질면에는 미세한 균열이 많이 생기고, 연삭 홈집도 불규칙하게 흐트러져 다듬질면으로서의 품질이 매우 불안하게 된다고 한다. 따라서 연삭작업에서는 연삭연소가 생기지 않도록 특히 주의하여야 한다.

Table 3 Grinding burning and temperature according to depth of cut

Depth of cut (μm)	Grinding burning color	Contact point average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Contact point high temperature ($^{\circ}\text{C}$)
17		513	770
24		565	847
38	golden yellow	672	1010
50	brown	672	1015
90	reddish brown	715	1070
110	purple	840	1255
150	blow	870	1300

2.6 표면거칠기 측정

표면거칠기의 측정법에는 두가지가 있다. 하나는 표준표면에 대한 비교측정이고, 다른 하나는 측정기에 의한 직접측정이다. 전자는 최종가공이 다른 경우에는 오판을 가져올 경우가 있으므로, 같은 제작공정의 공작물 또는 같은 종류의 공작물을 다수 비교할 때에 사용한다. 후자의 직접측정법에는 촉침법, 광절단법, 공기마이크로미터에 의한 측정법 등이 있으며, 표준편 또는 비교편을 필요로 하지 않는다.

일반적으로 많이 사용하는 촉침법에서는 표면거칠기의 실제의 정량적 측정을 위하여 촉침식 측정기가 사용된다. 예리한 다이아몬드 촉침이 압의 일탄에 고정되어 주어진 속도로 표면 위를 전후로 운동하며, 행정을 조정하여 표준 길이를 선택한다. 촉침이 표면 위를 통과 할 때 표면거칠기에 비례하여 상하로 움직이며, 이 때 상하의 움직임이 확대되어 기록되는 것이다. 광절단법은 필터에서 만들어진 가는 광속을 측정면에 경사지게 두사하여 생긴 단면을 확대경으로 측정하는 방법으로서 측정면과 물리적인 접촉이 없어 측정면에 손상을 주지 않으므로 연질재료의 측정에 적합하고 또한 조작이 간편하고 신속히 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나 배율을 크게 하면 시야에 나타나는 범위가 극부적이고, 배율이 크면 빛의 윤곽이 불투명하므로 $10\mu m$ 이하의 조도 측정에는 부적합한 결점을 지니고 있다. 공기마이크로미터에 의한 측정법은 치수의 변화를 공기의 유량·압력의 변화로 바꾸고, 유량·압력의 변화량을 측정하여 치수를 재는 비교측정기이다. 공기를 집어넣고, 물탱크를 사용한 정압제어장치로 일정압을 유지하여 지름이 약 $1mm$ 인 작은 구멍을 통해서 지시실에 넣어 노즐로부터 분출시킨다. 노즐 가까이에서 피측정물을 놓고, 노즐과의 틈새를 높이로 하면, 이 높이가 변화할 경우 지시실내의 압력이 변화한다. 이러한 원리를 이용하여 압력을 측정함으로써 표면거칠기를 측정할 수 있다. 또한 그밖에도 간섭현미경, 전자현미경, 투과전지 현미경, 광전 광택도 기록계 등을 이용하여 조도를 측정할 수 있으며 각각의 용도에 따라 적절한 표면 조도 측정법을 사용한다.

3. CBN 입자별 연삭 특성 평가

3.1 실험목적

연삭가공 중에서 고려해야 할 사항으로는 사용할 연삭기, 연삭숫돌, 공작물의 재질, 공작물의 형상, 연삭유 등 매우 다양하다. 그러나 그 중에서도 제품의 표면거칠기와 형상정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 사용하는 연삭숫돌의 종류이다. 즉 연삭가공에서는 숫돌의 종류에 따라 표면거칠기와 형상정밀도가 좌우된다. 따라서 이러한 연삭숫돌의 연삭 특성을 파악하는 것은 정밀 연삭 공구 설계의 최우선 작업이라 할 수 있다. 본 연구에서는 WA계열 숫돌을 대신할 입자로 CBN을 선정하고 미세홈 가공에 적절한 CBN숫돌을 선정하기 위하여 조태파쇄 연삭숫돌 2개와 미소파쇄 연삭숫돌 2개의 총 4개의 CBN 연삭숫돌을 이용하여 주축, 절입깊이, 테이블 이송속도 등 다양한 조건변화에 따른 표면거칠기의 변화를 비교·분석하였고 이를 기초자료로 하여 미소 홈의 정밀 연삭에 가장 적절한 CBN연삭 숫돌을 선정하는데 그 목적이 있다.

3.2 가공시스템

3.2.1 CNC 선반

원통내면 연삭기를 대신하여 CNC선반 PUMA-6S(대우공작기계)의 터릿(turret) 중 일부를 개조하여 원통내면 연삭이 가능할 수 있도록 하였다. 터릿의 내·외경 공구지지장치 중 일부를 제거하고 여기에 별도의 치구(fixture)를 설계·제작하여 내면 연삭용 공구가 장착될 수 있도록 하였다. CNC선반은 $1\mu m$ 의 이송계 정밀도를 보장하고 있으며, 380계열의 컨트롤러(controller)를 내장하고 있다. Photo. 1은 본 실험에 사용한 CNC 선반의 사진이다.

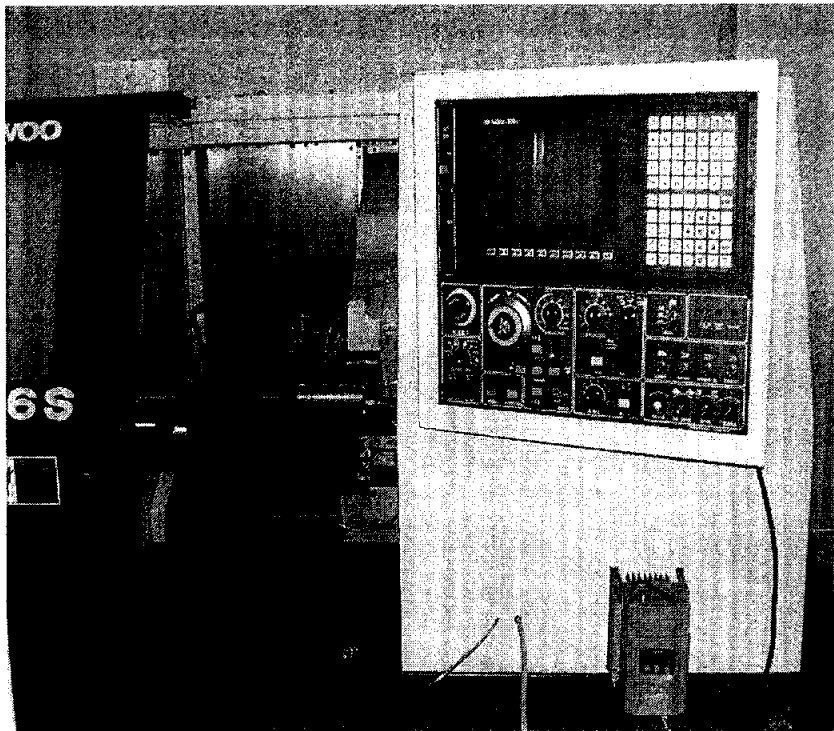


Photo. 1 CNC machine

3.2.2 연삭숫돌

본 실험을 위하여 4종류의 원통내면 연삭용 CBN 입자를 비트리파이드 본드재를 사용하여 숫돌을 설계·제작하였으며, Table 4와 Fig. 6은 숫돌의 사양과 외관이고, Photo. 2는 숫돌입자의 현미경사진상을 표시한다. 단결정 CBN은 파쇄가 일어나면서 수많은 벽개면(cleavage plane)을 발생시킨다. 이러한 벽개면의 생성을 조대파쇄(macrofracture)라 하며 입자가 무디어졌을 때 날카로운 절삭날을 유지하기 위하여 꼭 필요한 것이다. 한 개의 CBN입자가 수명을 다하기까지 이러한 조대파쇄는 여러 번 계속되므로 입자는 재료제거 과정에 필요한 날카로운 절삭날을 계속 유지할 수 있게 된다. 미세결정 CBN입자는 미세파쇄(microfracture)에 의하여 절삭날을 생성시킨다. 각 입자의 날카로운 절삭날이 마모되기 시작하면, 연삭지향에 의하여 CBN결정에 매우 작은 크기의 벽개(cleavage)가 발생한다. 이 미소파쇄로 인하여 각 연삭입자는 마모될 때마다 연속적으로 날카로운 절삭날을 발생시킴으로써 마찰열을 최소화하면서 연삭작업을 수행한다. 일반적으로 CBN숫돌은 높은 원주속도에서 최상의 성능을 발휘할 뿐 아니라, 모든 형태의 강 또는 합금강과 같은 난삭재 등의 연삭에 효과적이다. 난삭재의 연삭가공과 같은 극한 환경에서 숫돌의 연삭작용을 보장해 줄 수 있는 결합재는 비트리파이드 본드이며, 본 연구에서도 이를 본드재로 선정하였다. 이 본드재는 높은 내마모성이 필요한 연삭가공에 사용하며, 레진본드보다 강하기 때문에 입자의 탈락 없이 높은 집중도의 CBN입자를 사용할 수 있다.

Table 4 Condition of grinding wheel

Abrasive	Characteristics	Type of wheel	Bond	Color of cutting plane
CBN	macrofracture	CB120Q100V	vitrified	gray
		CB120M150V		
	microfracture	CB120Q100V		brown
		CB120M150V		

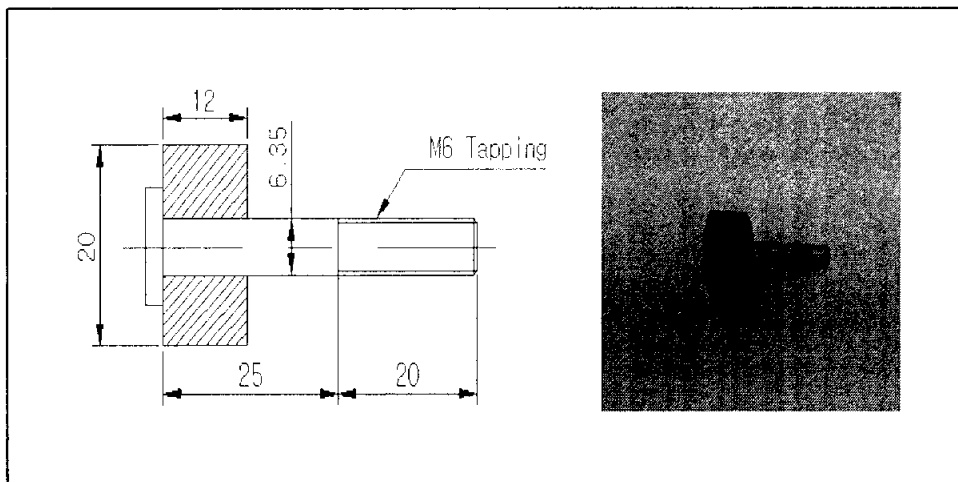
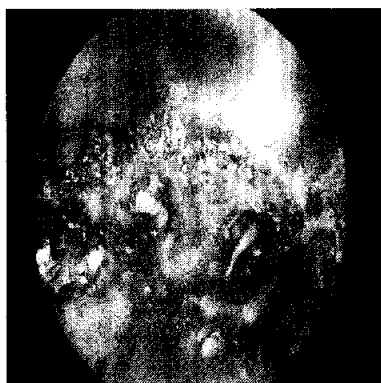
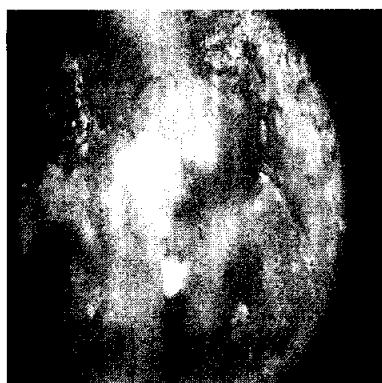
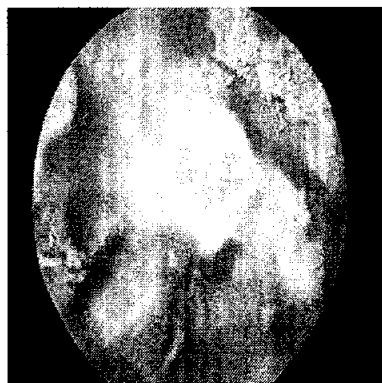
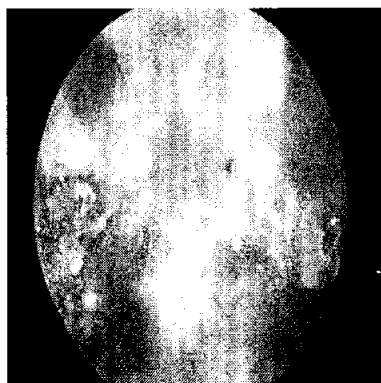


Fig. 6 Shape of grinding wheel



(a) CB120Q100V - macrofracture (b) CB120M150V - macrofracture



(c) CB120Q100V - microfracture (d) CB120M150V - microfracture

Photo. 2 Microscopic photograph of CBN wheels

3.2.3 슷돌 고정용 췌(quill)

설계·제작한 슷돌을 고정할 뿐 아니라 고속 슷핀들의 회전을 슷돌에 전달하고, 또한 연삭 중 저항을 유지할 수 있도록 SCM415로 췌를 제작하여 열처리한 후, 그 떨림을 $15\mu m$ 이내로 유지될 수 있도록 연마하였다. Fig. 7은 슷돌 고정용 췌의 설계도면을 나타낸 것이며, 가공 중 슷돌의 진원도 향상을 위하여 끝 단 나사부 이후에 스트레이트부를 두어 슷돌의 떨림을 최소로 유지할 수 있게 하였다.

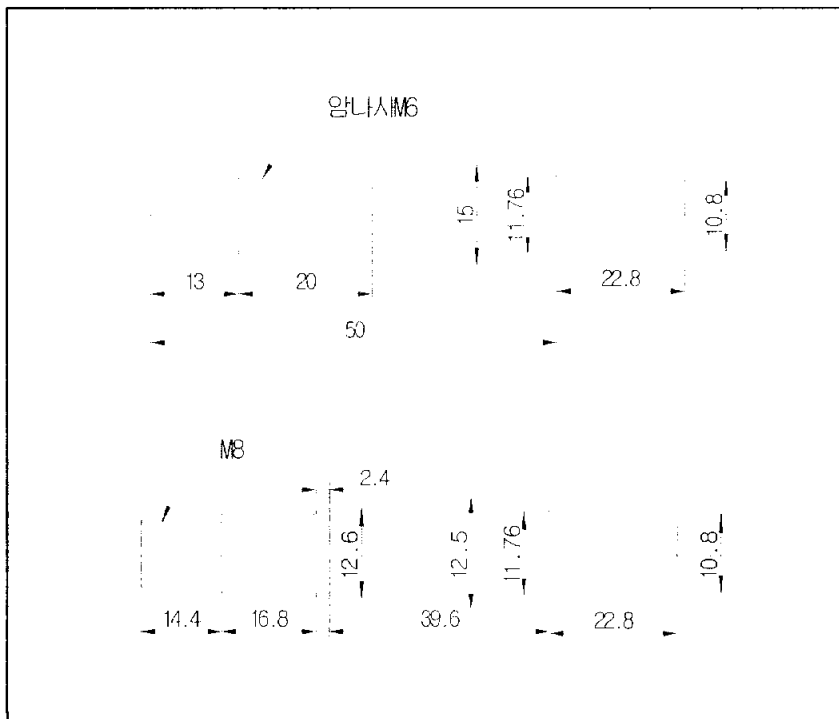
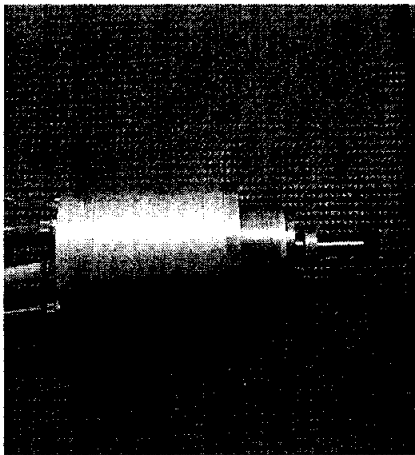


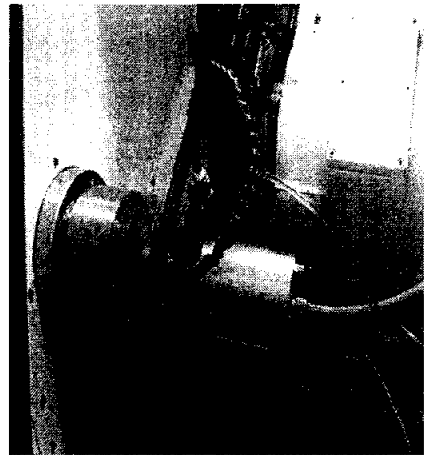
Fig. 7 Drawing of quill for fixing the grinding wheel

3.2.4 고속 스피들

원통내면 연삭은 공작물 및 공구에 회전을 주어야 하지만, 예비실험에 적용한 CNC 선반으로는 공구축에 회전을 줄 수 없기 때문에 최고 25000rpm까지 회전할 수 있는 2극 고속 스피들을 제작하여 사용하였다. 회전수의 조절은 5Kw용 인버터를 사용하였다. Photo. 3의 (a)는 고속 스피들의 형상을 보여주며, Photo. 3의 (b)는 CNC 선반에 장착되어 가공 중인 고속 스피들의 모습을 나타낸다. 이 스피들은 스피들 회전 중 냉각을 위한 장치 그리고 가공 중 칩의 스피들 속으로의 유입방지를 위한 공기압 배출장치를 갖추고 있다.



(a) Shape of spindle



(b) Fixed spindle at CNC machine

Photo. 3 High speed spindle

3.2.5 피삭재의 외관

흡 가공용 연삭기술개발을 위한 실험에 적용된 시험편은 볼스크류(ball screw)용 너트의 재료인 표면침탄열처리강(SCM420H)을 사용하였으며, 경도는 HRC 60이다. Photo. 4는 본 실험에 사용된 피삭재의 사진을 나타낸다.

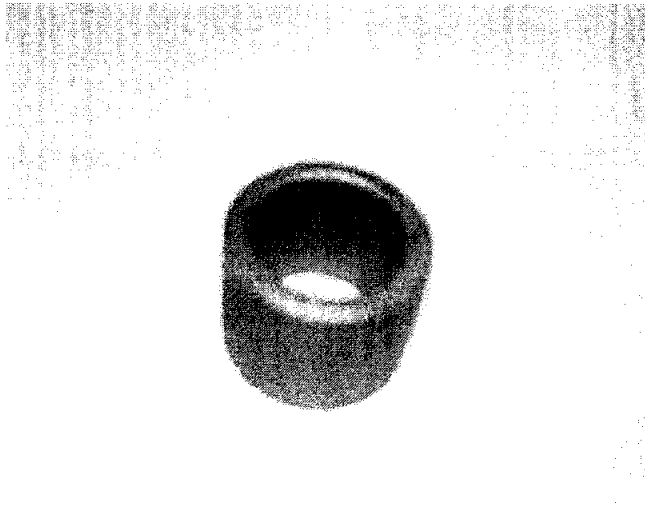


Photo. 4 Shape of workpiece

3.3 실험방법 및 실험조건

3.3.1 실험방법

먼저 슛돌 입자는 난삭재 가공에서 그 성능을 발휘하는 CBN입자로 정하고, 결합재는 고속회전에서도 CBN입자의 성능을 유지할 수 있는 비트리파이드로 하였으며, 실험전용의 연동척(soft jaw)을 사용함으로써 피삭재의 착·탈시 공작물의 진원도의 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 매 조건별로는 GC(Green Corundum)스틱으로 드레싱을 함으로써 실험의 진행에 관계없이 연삭 슛돌의 상태를 동일하게 유지하였다. 연삭액은 일정하게 공급하였고, 동일한 피삭재를 실험함으로써 피삭재의 불균일에 의한 영향을 배제하였다. 실험은 미리 준비된 피삭재로 내면연삭을 실시하였고, 가공 중 이상현상을 확인하였다. 가공된 피삭재는 측정에 앞서 육안검사를 통하여 표면결함을 조사했을 뿐 아니라 공구의 치수 등 형상변화도 관찰하였다. 특히, 슛돌 고정용 킬의 직경을 충분히 확보하지 못하였으므로 이에 대한 영향을 고려하면서 피삭재의 외관검사에 대한 원인을 분석하였다. 각 조건별 실험이 완료되면 피삭재를 척으로부터 분리하여 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기는 피삭재의 원둘레를 등간격으로 4등분하여 각 포인트 별로 측정하였다. 4포인트의 측정값 중 가장 높은 값과 낮은 값은 제외하고, 나머지 2포인트의 평균을 그 조건에서의 표면거칠기로 결정하였다.

3.3.2 실험조건

본 실험에서는 피삭재가 고경도의 난삭재임을 고려하여 초연마제인 CBN입자로 결정하였다. CBN입자 중 같은 입도에서 자생작용시 파쇄특성이 다른 2종류를 선정하여 그 절삭성을 검토한다. 본도제는 미소 흠연삭용 슷돌임을 고려하여 고속회전에 적합한 비트리파이드로 결정하였으며, 입자는 120 메쉬로 하였다. Table 5에 연삭조건을 나타내었다.

Table 5 Conditions of grinding

Lubrication type	Wheel type	Depth of cut ($\mu m / pass$)	Table speed (mm/s)	
Watersoluble lubrication W 2 - 3 Cooledge 39 [castrol (aspac oilkorea)] 10% dilute	CB120Q100V	10	1.6, 4.0, 6.4	Macrofracture
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120M150V	10	1.6, 4.0, 6.4	
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120Q100V	10	1.6, 4.0, 6.4	Microfracture
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120M150V	10	1.6, 4.0, 6.4	
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
Watersoluble lubrication W 2 - 1 (sincool co.) 10% dilute	CB120Q100V	10	1.6, 4.0, 6.4	Macrofracture
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120M150V	10	1.6, 4.0, 6.4	
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120Q100V	10	1.6, 4.0, 6.4	Microfracture
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	
	CB120M150V	10	1.6, 4.0, 6.4	
		15	1.6, 4.0, 6.4	
		20	1.6, 4.0, 6.4	

3.4 실험결과 및 고찰

3.4.1 조대파쇄 슷들의 연삭특성

Fig. 8은 조대파쇄의 특성을 지닌 CBN입자로 메쉬 120, 집중도 100, 결합도가 Q인 슷들을 사용하여 테이블 이송에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 9는 조대파쇄의 CBN 메쉬 120, 집중도 150, 결합도가 M인 슷들을 사용하여 테이블 이송에 따른 표면거칠기의 변화로도시한 것이다. 슷들의 회전수는 7600rpm으로 슷들의 주속은 8000mm/s로 공작물의 회전수는 190rpm으로 고정하였다.

Fig. 8에서 테이블 이송의 증가함에 따라 연삭깊이에 관계없이 가공면 표면은 거칠어지고, 1회 연삭깊이가 적을수록 가공면이 양호해 지는 것을 알 수 있다. 이는 테이블 이송속도가 빨라지면 표면거칠기의 값이 증가된다는 일반적인 연삭이론과 동일하다. 그러나, 슷들 이송의 변화에 따른 1회 연삭깊이에 대한 표면거칠기의 값은 비슷해 지는 경향을 파악할 수 있다. 이러한 현상은 이송속도가 증가할수록 슷들입자당 부담해야 하는 연삭면적이 증가하면서 눈매음 현상이 급격히 진행되기 때문이다.

Fig. 9에서는 집중도 100의 경우와 달리 테이블 이송속도의 증가에 따라 표면거칠기의 값이 감소하고 있다. 특히 1회 연삭깊이 10 μ m, 테이블 이송속도 4.0mm/s의 조건에서 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었고 가장 안정적인 연삭을 실시 할 수 있었다. 1회 연삭깊이 15 μ m, 20 μ m에서는 테이블 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 감소하고 있지만, 연삭깊이가 15 μ m 일 경우에는 표면거칠기가 10 μ m 보다 좋지는 않았고, 연삭깊이가 20 μ m 이고 테이블 이송 속도가 6.4mm/s에서는 채터링의 흔적이 나타났다. 부가 실험을 통하여 테이블 이송을 6.4mm/s이상으로 좀더 증가시켜 가공해본 결과 더 이상 표면거칠기의 값이 좋아지지 않았으며, 채터링 현상만 더욱 증가하여 나타났다. 즉 CB120M150V 슷들에서는 테이블 이송을 증가시키면 일정 범위 내에서는 표면거칠기 값이 좋아지나 테이블 이송속도가 한계속도 이상으로 빨라지면 다시 나

빠지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 채터링의 문제는 연삭깊이 과다로 인하여 톨의 강성(stiffness)이 충분치 못하여 일어나는 것으로 추측된다.

조대과쇄 CB120Q100V숫돌과 CB120M150V숫돌의 실험결과로부터, 모든 조건이 동일한 상태에서 단지 집중도의 차이만으로 가공면 거칠기의 경향이 다르게 나타나는 것은 본드재의 단위체적당 입자량이 다르기 때문이다. 집중도가 높으면 동일 가공면적을 절삭할 때 개별입자에 걸리는 부하가 작기 때문에 표면거칠기가 향상되는 것이다. 이러한 현상은 이송이 적을 경우에는 그 차이가 미미하지만 단위시간당 연삭면적이 증가할수록 그 영향은 커질 수 있을 것으로 사료된다. 또한 표면거칠기는 집중도 150의 경우가 우수한 것으로 나타났으나 그 차이는 극히 미약하였다. 그러므로 숫돌의 가격과 바모을 등의 경제적 측면과 피삭재의 결함 등을 고려할 때 집중도 100 숫돌에 비하여 바람직한 숫돌은 아닌 것으로 판단된다.

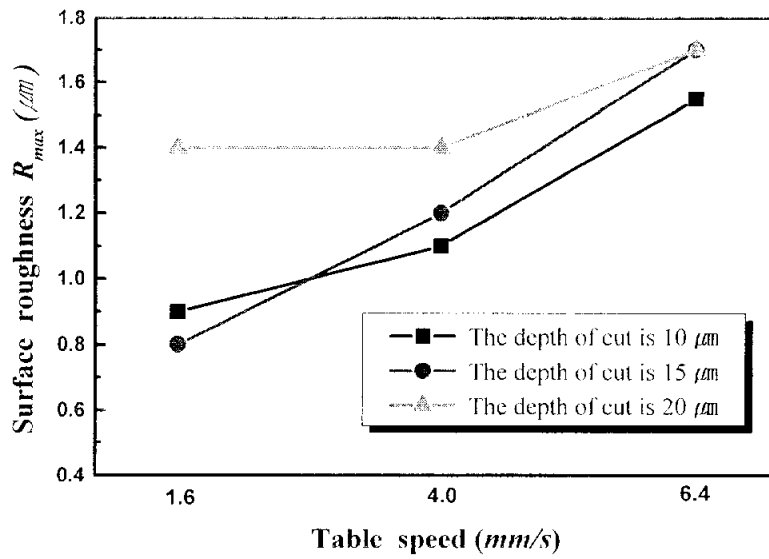


Fig. 8 Surface roughness according to table speed at CB120Q100V

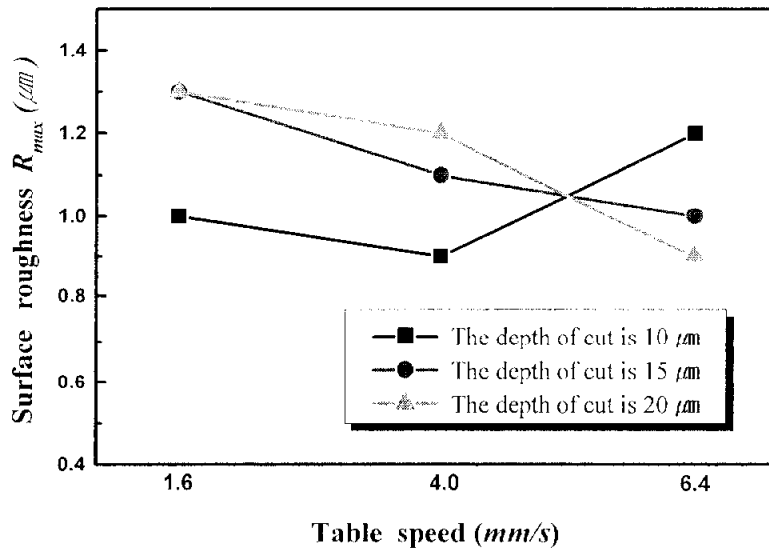


Fig. 9 Surface roughness according to table speed at CB120M150V

3.4.2 미소파쇄 슷돌의 연삭특성

Fig. 10은 미소파쇄 입자의 CBN입자로 메쉬 120, 집중도 100, 결합도가 Q인 슷돌을 사용하여 테이블 이송에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 11는 미소파쇄 입자의 CBN 메쉬 120, 집중도 150, 결합도가 M인 슷돌을 사용하여 테이블 이송에 따른 표면거칠기의 변화를 도시한 것이다. 슷돌의 회전수는 7600rpm으로 슷돌의 주속은 8000mm/s로 공작물의 회전수는 190rpm으로 고정하였다.

Fig. 10의 경우 표면거칠기의 경향은 조대파쇄 집중도 100 입자의 표면거칠기와 어느 정도 값의 차이는 있지만, 테이블 이송 증가에 따른 표면거칠기의 변화 경향은 동일하다. 테이블 이송의 증가함에 따라 연삭깊이에 관계없이 가공면 표면은 거칠어지고, 1회 연삭깊이가 적을수록 가공면이 양호해 진다. 그러나 Fig. 11의 경우에는 집중도 150입자의 조대파쇄의 경향과는 달리 테이블 이송속도가 증가함에 따라 표면이 거칠어지고 있다. 이는 연삭가공 진행하면 할수록 계속적으로 예리한 입자를 유지하기 위하여 입자상에서도 미소파쇄가 동반되어 진행되는데, 1회 연삭량이 많으면 많을수록 테이블 이송 속도가 빠르면 빠를수록 파쇄되어 생성된 입자 또한 많아진다. 이렇게 생성된 많은 미소입자로부터 눈때움현상은 나타나고 그로인해 표면거칠기는 나빠지게 된다. 즉 테이블 이송 속도를 증가하면 할수록 연삭가공중에 떨어져서 생성된 미소입자로부터 기인된 눈때움현상을 극복하지 못하여 표면이 거칠어지는 것이다. 또한, 연삭 중 슷돌면과 가공면에서 청음의 연삭음이 아닌 소음이 발생되었다. 가공 후 공작물 표면 또한 연삭된 자국이라기보다 뜯겨진 것 같은 무늬를 다수 발견할 수 있었다. 특히 이송 4.0mm/s 이상의 연삭에서는 슷돌웬이 연삭저항을 이기지 못하고 밀려나는 현상도 발생되었으며 가공 후 슷돌의 직경이 상당량 감소되었다. 따라서 미소파쇄입자는 황·중삭용 고능률 연삭에는 적당하지 않음을 알 수 있었다.

미소파쇄 CB120Q100V스�돌과 CB120M150V스�돌의 실험결과로부터, 표면거칠기는 집중도가 높은 CB120M150V스�돌로 연삭한 것이 우수하지만,

표면성상의 관점에서는 집중도 100의 CB120Q100V숫돌의 경우가 훨씬 더 우수한 연삭가공이 가능하였다. 이것은 가공 중의 연삭음 그리고 가공 후의 피삭재 외관검사에서도 확인할 수 있었다. 또한, CB120M150V 숫돌을 사용하여 1회 연삭량 $10\mu m$ 이상으로 연삭하는 것은 피삭재에 많은 결함을 나타내어 비효율적이며, 이송도 $1.6mm/s$ 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 즉, 집중도 100이상의 숫돌은 마무리 연삭에서 사용해야 할 것이다.

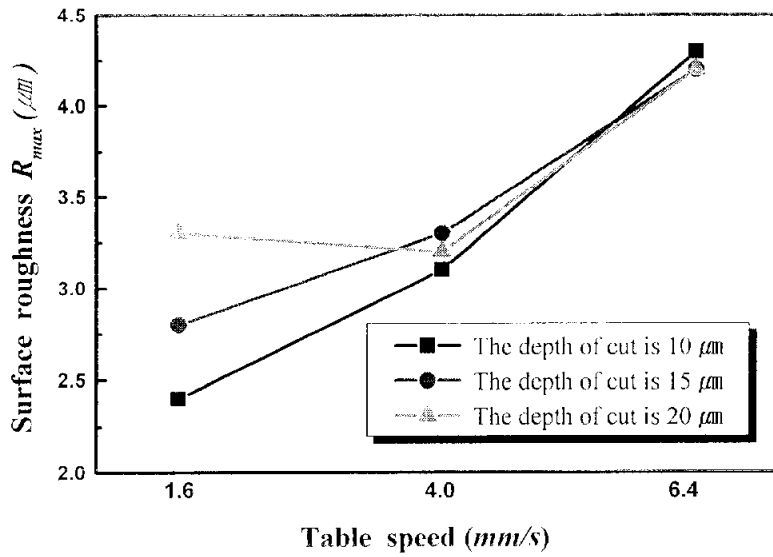


Fig. 10 Surface roughness according to table speed at CB120Q100V

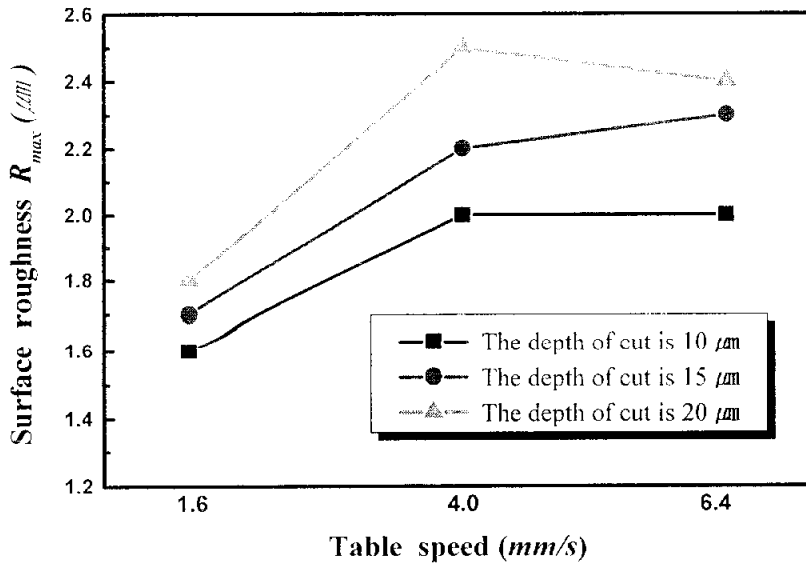


Fig. 11 Surface roughness according to table speed at CB120M150V

3.4.3 연삭유제와 슷돌 주속의 변화에 따른 연삭특성

Fig. 12는 연삭유제의 종류에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 W2종 1호와 W2종 3호의 두 종류의 연삭유를 사용하였다. Fig. 12에서와 같이 연삭유 종류에 따른 표면거칠기 변화는 거의 발견할 수 없다. 그러나 두 연삭유의 밀도 차이로 인하여 가공 중 연삭유제의 비산형태는 다소 차이가 있었다. 녹색을 띄며 가격이 싼 W2종 1호 연삭유는 가공 중 비산되는 양이 많아 작업에 다소 불편을 끼쳤으며, 가격이 비싸며 투명한 색을 띄는 W2종 3호 연삭유는 비산되는 양이 적어 작업환경이 좋아지는 장점을 지니고 있었다.

Fig. 13은 슷돌 주속의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 슷돌 주속이 증가함에 따라 표면거칠기는 약간의 감소 후, 다시 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이것은 슷돌 주속 8000mm/s 까지는 슷돌 고정용 켈의 길이와 직경 등을 고려한 진척도가 주어진 조건 아래에서 가공가능영역 이내의 떨림을 유지하였다고 판단되며, 그 이후의 급격한 증가는 슷돌의 절삭성에 의한 영향이라기 보다는 켈의 상태에 의한 현상으로 보는 것이 타당할 것이다. 어떤 연삭조건에서도 1회 연삭깊이를 증가시키면 피삭성을 해치고 있다. 이는 통상적인 연삭가공 현상과 동일하다.

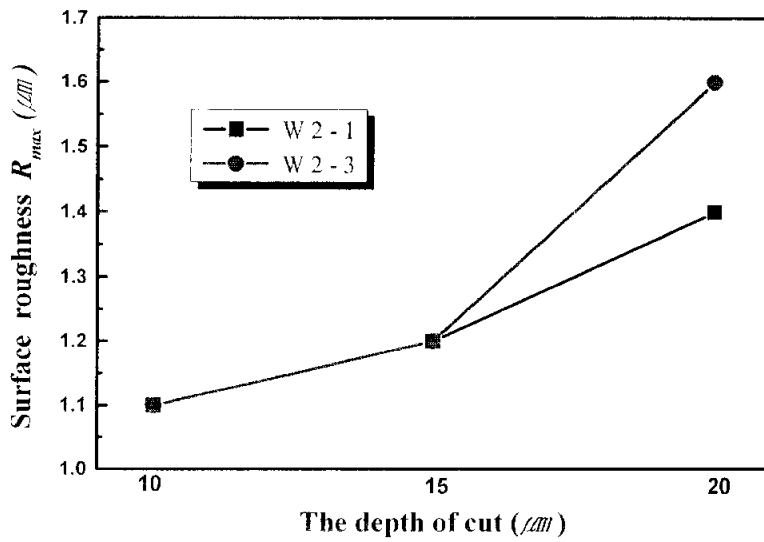


Fig. 12 Surface roughness according to lubrication type

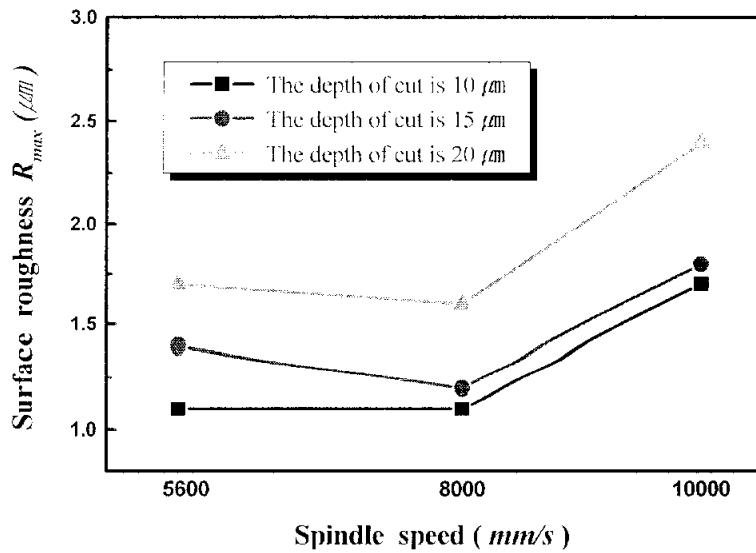


Fig. 13 Surface roughness according to spindle speed at CB120Q100V

3.4.4 종합적 고찰

미소파쇄 입자로 연삭한 면이 우수해야 함에도 불구하고 반대의 현상이 발생하는 것은 본 실험의 작업조건이 고능률 연삭에 맞추어져 있으므로 미소입자의 슷돌은 과다한 연삭면적을 극복하지 못한다는 것을 의미한다. 입자가 초연마재라 하더라도 100 이상의 집중도의 슷돌은 마무리 연삭에 적용하는 것이 바람직하며, 1회 연삭량이나 테이블 이송도 적으면 적을수록 우수한 표면성상을 얻을 수 있다. 각 슷돌의 가공특성을 다음과 같이 요약·정리할 수 있다.

1. 조대파쇄 CB120Q100V 슷돌에 의한 연삭이 본 연구에서 설정한 조건 내에서 가장 우수한 피삭성을 발휘하고 있었으며, 이송은 가능한 적게 취하는 것이 우수한 표면성상을 얻을 수 있다.
2. 조대파쇄 CB120M150V 슷돌은 1회 연삭량 $20\mu m$ 이상에서는 불연속적인 채터링 현상이 발생하였으며, $4.0mm/s$ 이상의 이송은 피삭재 외관검사에 의해 적절하지 못한 조건으로 판단되었다.
3. 미소파쇄 CB120Q10V 슷돌을 사용하여 $4.0mm/s$ 이상의 이송으로 연삭하면 웬이 밀려나는 현상이 발생하였으며, 조건별 가공 후 슷돌직경이 상당량 감소하였다.
4. 미소파쇄 CB120M150V 슷돌의 경우, 수시로 드레싱을 해야만 연삭가공이 가능하였고, 가공면도 뜯어낸 듯한 아주 나쁜 표면성상을 나타내었다.
5. 연삭유제에 대한 영향은 없었으나, W2종 1호는 가공 중 비산량이 많아 작업환경을 오염시키는 결과를 확인하였으며, 슷돌의 주속도 증가에 따른 가공면 지칠기의 악화는 CBN입자의 가공특성이라기 보다는 웬의 강성과 관련된 전직도 등의 문제로 판단된다.

4. 미세 흠 가공기술개발

4.1 실험목적

현재 생산현장에서 적용하고 있는 흠가공 기술은 대부분이 WA계열의 입자를 레지노이드 본드로 결합하여 사용하고 있기 때문에, 흠가공 중 슷들의 단면보정을 위하여 수시로 드레싱을 실시하고 있다. 가공하는 도중에 실시하는 이러한 드레싱 공정은 제품의 생산량을 상당히 줄어뜨리게 만든다. 즉 WA계열 슷들을 이용한 미세 흠 가공에서는 생산성의 문제에 직면하고 있는 것이다. 그리하여 초미립자를 이용한 미세 흠의 연삭가공 기술개발은 활발하게 진행되고 있다. 그러나 지금까지는 적절한 슷들, 개발된 슷들의 가격, 초미립자에 맞는 트루아 등 여러 문제점 해결이 미흡하다보니 국내뿐만 아니라 일본에서조차도 WA계열의 입자를 이용하여 미세 흠을 가공하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 적절한 초미립자 슷들과 트루아를 개발하고, 여기에 맞는 가공방법을 찾아 상당한 부가가치를 얻는데 그 실험목적들을 두고 있다. 특히 슷들 입자는 가공이 진행되는 동안 마모가 진행되면서 슷들의 날끝 형상이 변하게 된다. 슷들의 형상변화는 제품의 형상정밀도를 저하시키는 중요한 인자로 작용하며, 정밀이송기구의 미소형상부품에서 그 영향은 절대적이라 할 수 있다. 따라서 미소 흠의 연삭가공에서 수명이 긴 슷들의 개발과 슷들의 수명을 연장시킬 수 있는 가공방법의 개발 즉 상용조건을 찾는 일은 슷들의 개발과 더불어 중요한 연구 목적중 하나이다.

4.2 가공시스템

4.2.1 성형연삭기

Photo. 5는 본 실험에서 사용한 주식회사 삼익에서 자체 개발한 흙 가공 전용의 고성능 다축성형연삭기이다. 미세 흙 연삭용 스톤의 드레싱을 위하여 다이아몬드 트루어를 장착하고 있으며, X축과 Y축으로 2개의 스펀들을 장착한 고성능 흙 가공용 연삭기이다. 최대 20,000rpm까지 스펀들을 회전시킬수 있을 뿐 아니라, 미소 이송량을 1 μm 까지 보장할 수 있는 고속 유정압 주축을 내장하고 있는 정밀 CNC 공작기계이다. 공작기계 및 제어부의 사양은 Table 6과 Table 7에 나타내었으며, 연삭액은 수용성 연삭원액을 수도수에 희석하여 사용하였다.

Table 6 Conditions of grinding machine

Table size (mm)	Axis-number	Wheel size (mm)	Maximum revolution (rpm)	Deviation from straightness	Adapted model
1,800 × 400	five-axis spindle	Ø 20 ~ 60	20,000	1 μm / 300mm	LM Guide groove grinding

Table 7 Conditions of controller

Controller	Software	Hardware	CPU card	I/O card	Additional function
Tubo PMAC	Visual C++	ACP-4000	PCA-6179	PCL-730	Touch monitor

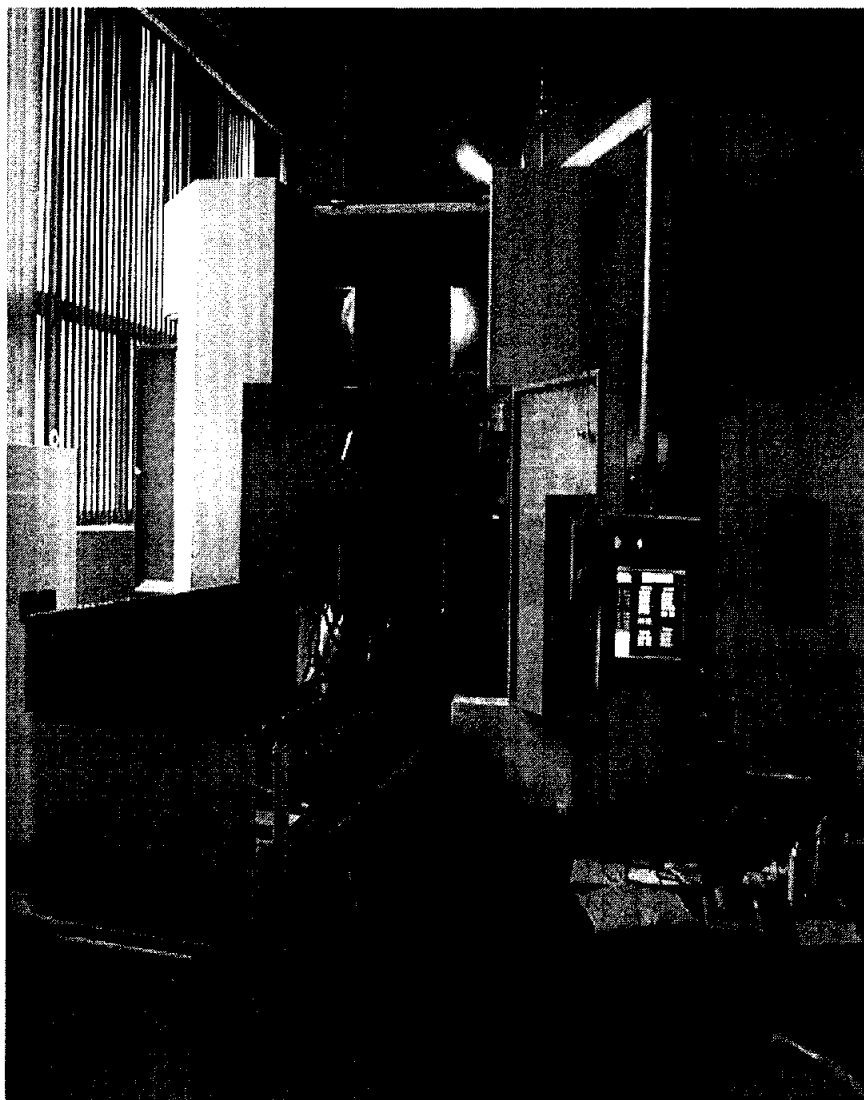


Photo. 5 Precision grinder

4.2.2 연삭숫돌

본 실험에서 사용된 숫돌은 CBN 입자별 연삭가공 특성실험을 통하여 CBN 단결정 입자가 난삭재의 연삭에 적합함을 알았으므로 단결정 입자만을 선택하였다. 그러나 집중도는 입자의 밀도가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 입도 120 및 140의 숫돌에 대하여서는 각각 100, 125 그리고 150으로 결정하였다. 그러나 입도 170 및 230과 같은 미세한 숫돌에서는 집중도 조차 높게 되면 눈매움의 영향이 클 것으로 생각되어 집중도를 100으로 한정하였다. 그리고 흙 가공에서 숫돌입자의 형상지지능력의 검토하기 위하여 입자의 결합은 비트리파이드 본드재를 사용하였다. 아래의 Table 8은 연삭숫돌의 사양을 나타낸다. Photo. 6은 숫돌의 사진을 나타낸다.

Table 8 Conditions of grinding wheel

Abrasive	Grain size	Grade	Concentration	Bond
Single crystal CBN	120	M	100	Vitrified
			125	
			150	
	140		100	
	125			
	170		100	
	230		100	

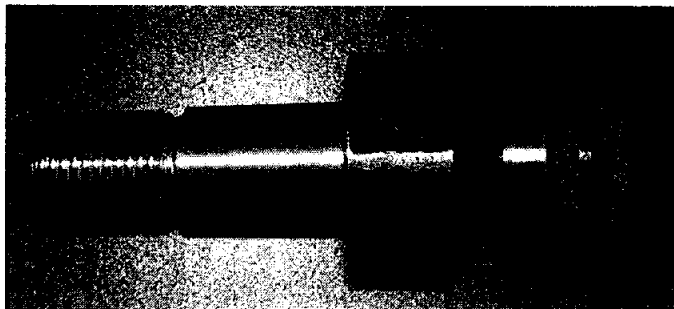


Photo. 6 shape of grinding wheel

4.2.3 피삭재

피삭재는 현재 LM 가이드에 사용되고 있는 침탄열처리강 SCM415를 선택하였으며, 그 화학적 성분을 Table 9에 나타내었다. 또한 피삭재의 형상을 Fig. 14에 도시하였다.

Table 9 Chemical composition of SCM415(wt,%)

Cr	Mn	Si	In	Lu	Al	Mg	hardness(HRC)
1.29	0.70	0.44	0.42	0.30	0.25	0.24	68



Fig. 14 Shape of workpiece

4.3 실험방법 및 실험조건

4.3.1 실험방법

본 실험에서의 주요한 가공특징은 절입위치를 10단계까지 임의로 설정할 수 있는데 있다. 그러므로 완전한 가공이 이루어질 가상의 위치를 0(zero)으로 하고 제품의 가공여류를 계산하여 최초의 황삭 가공 위치를 설정한 후 주어진 공정에 따라 지정된 절입량으로 연삭작업을 실시하였다. 또한 시험편은 침탄 열처리한 재료이므로 동일 시험편의 연속된 가공은 침탄층 이하까지 가공될 우려가 높기 때문에 매 가공마다 시험편을 교체하였으며 숫돌의 트루잉은 매 실험시 실시하는 것을 원칙으로 하였지만, 특별한 목적에 의하여 실시하지 않을 때도 있다. 홈 부위의 최종연삭위치를 일정하게 하기 위하여 시험편은 치공구에 의하여 매 실험시 동일한 장소에 위치될 수 있도록 하였다. 트루어(truer)는 다이야몬드 입자를 사용하였으며 그 홈은 사용할 숫돌의 형상곡률과 일치시켜 제작하였다. 기계본체에 장착된 트루어는 3단계로 회전수를 조절할 수 있으며, 기계본체에서 절입량과 절입횟수 및 스파크 아웃 시간도 조절할 수 있다. 본 실험에서 적용한 트루잉 조건은 1회 절입량 $2\mu m$, 절입횟수 4회 그리고 스파크 아웃 시간 0.5초로 하였다.

4.3.2 실험조건

본 실험에서는 연삭숫돌의 개발과 아울러 상용을 목적으로 하기 때문에 연삭조건을 고정조건과 가변조건으로 구별하여 결정하였다. 고정조건으로는 원주속도, 테이블 이송속도를 주었으며, 테이블 이송속도는 앞의 실험을 기초로 황삭 공정에서는 3.3mm/s 로 중삭에서는 2.0mm/s 로 결정하였다. 그리고 가변조건으로 현장에서 요구되어지는 중심선 평균거칠기 $0.2\mu\text{m}$ 이내를 만족할 수 있도록 입도 120번의 숫돌을 기준으로 140, 170 및 230번의 숫돌을 사용하는 하였으며, 입자의 집중도가 표면거칠기와 연삭특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 집중도의 숫돌을 선정하였다. 또한, 정삭 테이블 이송은 제품의 가공면에 절대적인 영향을 미친 것으로 예측되어 몇 단계로 변화시켜서 그 경향을 검토하여 고능률 연삭조건을 찾고자 하였다. 연삭조건은 고정인자와 가변인자로 구별하여 Table 10과 Table 11에 구체적으로 나타내었다.

Table 10 Fixed conditions of grinding

Circumferential speed(mm/s)		16,700		
Table speed (mm/s)	Roughing grinding	3.3	3.3	3.3
	Finishing grinding	2.0		

Table 11 Variable conditions of grinding

Wheel type	Depth of cut (μm)							Fine finishing table speed (mm/s)	Concentration	Spark-out
CB120M	150	100	50	5	0			1	100	execution or not
	150	100	50	10	0				125	
	150	100	50	15	0				150	
	150	110	70	30	0	0		1.5		
CB140M	150	110	70	30	10	0		2	100	
	150	110	70	30	15	0			125	
CB170M100V CB230M100V	150	120	90	60	30	5	0	2		

4.4 실험결과 및 고찰

4.4.1 CB120M125V 슷돌의 연삭특성

Fig. 15와 Fig. 16은 슷돌의 원주속도를 $16.7m/s$, 황·중삭의 연삭절입공정은 $50\mu m - 50\mu m - 45\mu m$ ($40\mu m$ 또는 $35\mu m$)의 3공정으로 하고 정삭 절입량을 5, 10, 15(μm)로 변환시키면서 스파크 아웃(spark out) 유·무에 따른 표면거칠기와 LM가이드 블록의 홈 반경변화를 나타낸 것이다. 실험은 초기 트루잉 후 추가 트루잉 없이 한 개의 시험편에 한 조건씩 실시하였다. 테이블 이송속도 $1mm/s$ 의 경우, 절입량 증가에 따라 표면거칠기가 다소 상승하고 있지만 그 크기는 무시할 수 있는 양이다. 스파크 아웃을 실시하면 표면거칠기는 좋아진다. 그러나 스파크 아웃을 실시하면 1개의 공정이 증가되는데 그로인한 시간의 증가는 2분이상이 소요된다. 따라서 스파크 아웃의 시행이 가공 시간의 증가를 보상 할 정도로 가공면의 개선이 이루어져야하나, 표면거칠기의 상승은 이루어지지 않았다. 또한 홈 반경의 변화는 불규칙한 거동을 하고 있다. 이는 가공 중 여러 인자의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 생각된다. 하지만 본 실험에 적용한 이송범위 내에서 홈 곡률반경의 최대변화폭이 $20\mu m$ 이내에서 변화하고 있음을 확인된다. 테이블 이송속도 $1.5mm/s$ 의 실험과정에서는 절입량의 증가에 따라 표면거칠기가 증가하고 있으나, 스파크 아웃을 한 경우의 표면거칠기가 그렇지 않은 경우에 비하여 오히려 거칠게 나타나고 있다. 이러한 현상은 초기 드레싱 후 추가 드레싱 없이 실험을 진행하여 슷돌에 많은 눈매움이 발생되었기 때문이다. 테이블 이송속도 $2.0mm/s$ 의 경우에는 테이블 이송속도 $1.5\mu m$ 의 경우와 거의 흡사한 경향을 나타낸다. 즉 동일 절입량에서 이송의 증가에 따라 표면거칠기는 증가하여 나타난다.

Fig. 17과 Fig. 18은 슷돌의 눈매움을 확인하기 위하여 원주속도를 $16700mm/s$, 황·중삭의 연삭절입공정은 $50\mu m - 50\mu m - 40\mu m$ 의 3공

정으로 하고 정삭 절입량을 $10\mu m$ 로 하여 표면거칠기와 LM가이드 블록의 홈 반경변화를 나타낸 것이다. 이렇게 슛돌의 눈매움 현상을 관찰하는 이유는 한번 트루잉 후 가공 가능한 작업량을 계산하여, 불필요한 트루잉의 공정을 배제하여 생산의 능률성을 올리기 위하여 실시하였다. 본 실험에서는 슛돌의 초기 트루잉 후 16개의 시편을 가공하였다. 연삭 횟수가 늘어남에 따라 눈매움 현상이 발생하여 표면거칠기 값은 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 홈의 곡률반경 변화는 이러한 눈매움 현상의 영향을 작게 받으며 다소 증가는 하고 있으나 일정한 값을 유지하고 있다.

최종 연삭 절입량에 변화에 대한 눈매움 경향을 검토하기 위하여, 절입량 10, 15, $30\mu m$ 에 대한 표면거칠기와 홈 반경을 Fig. 19와 Fig. 20에 나타내었다. 테이블 이송속도를 $1.5mm/s$ 로 고정하였고, 배회 실험 전에 초기 트루잉을 실시하였다. 최종 절입량이 $30\mu m$ 일 경우에 가공전 트루잉을 실시하였음에도 불구하고 표면 거칠기의 증가구배가 크게 나타났다. 이는 홈 반경에도 영향을 주어 표면거칠기와 비슷한 변화경향을 보이고 있다. 그러나, 다소 큰 절입량이라 하더라도 최종 절입 후 스파크 아웃을 실시함으로써 표면거칠기의 증가구배를 크게 억제 할 수 있음을 스파크 아웃을 실시한 경우의 실험 결과 통하여 알 수 있다.

Fig. 21은 CB120M100V 슛돌을 사용하여 최종 절입량 $15\mu m$ 에서의 표면거칠기와 홈 반경의 결과를 나타내며, 이를 토대로 눈매움의 영향을 검토하기 위한 것이다. 테이블 이송은 $1mm/s$ 로 고정하고 $50 \rightarrow 50 \rightarrow 35 \rightarrow 15 \rightarrow 0\mu m$ 의 절입 공정수를 6공정으로 하여 가공을 실시하였다. 가공횟수 증가에 따라 표면거칠기는 증가하였고, 가공횟수가 증가할수록 표면거칠기의 상승구배도 크게 나타나고 있다. 이는 눈매움이 점차 중첩되고 있음을 나타낸다.

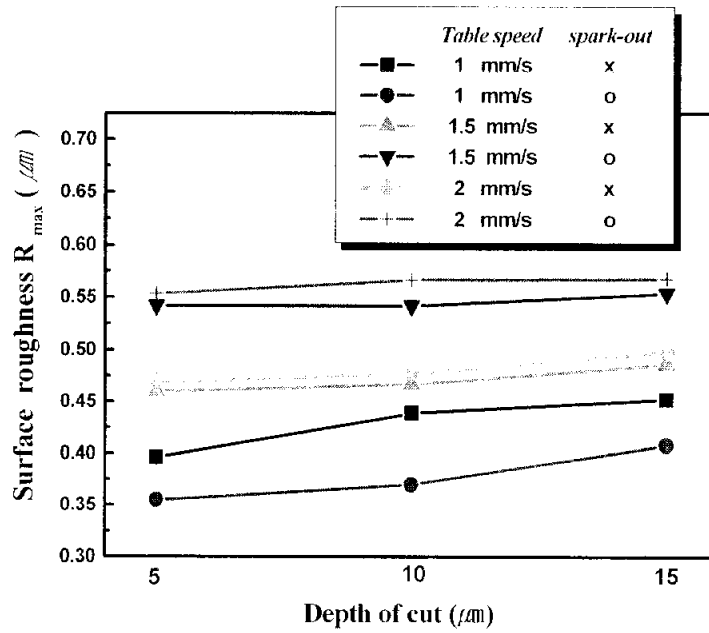


Fig. 15 Surface roughness according to depth of cut

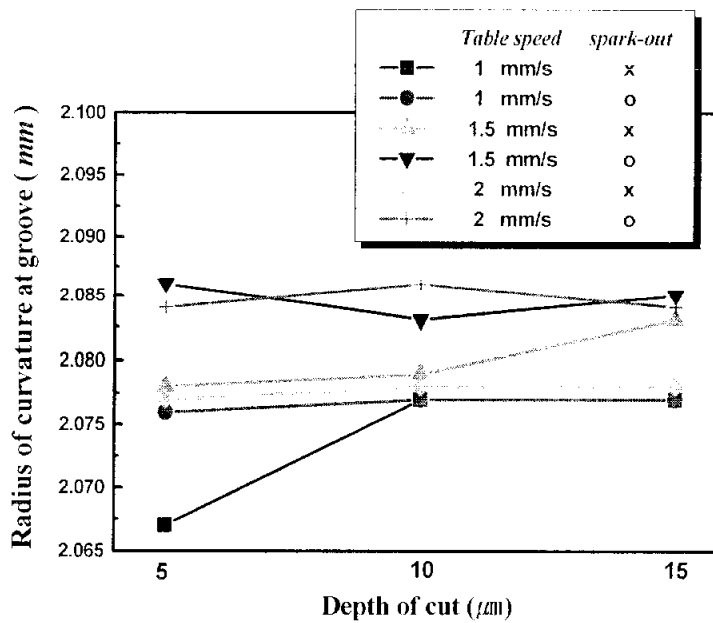


Fig. 16 Radius of corvature at groove according to depth of cut

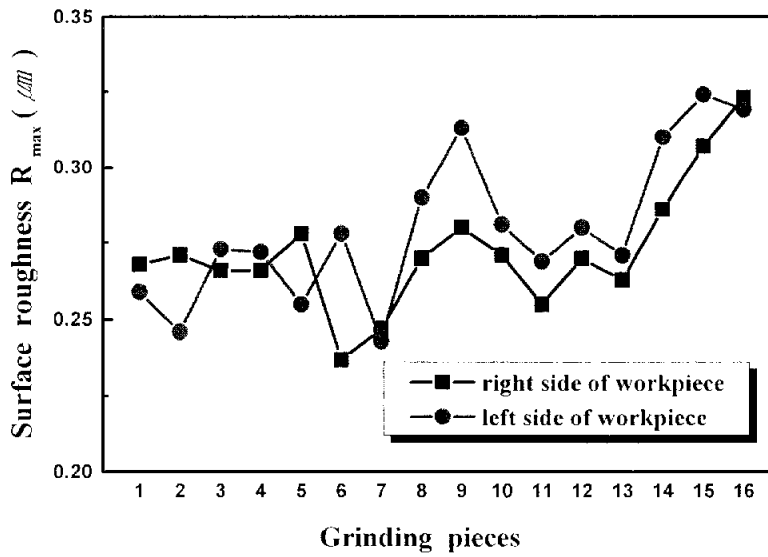


Fig. 17 Surface roughness according to grinding piece

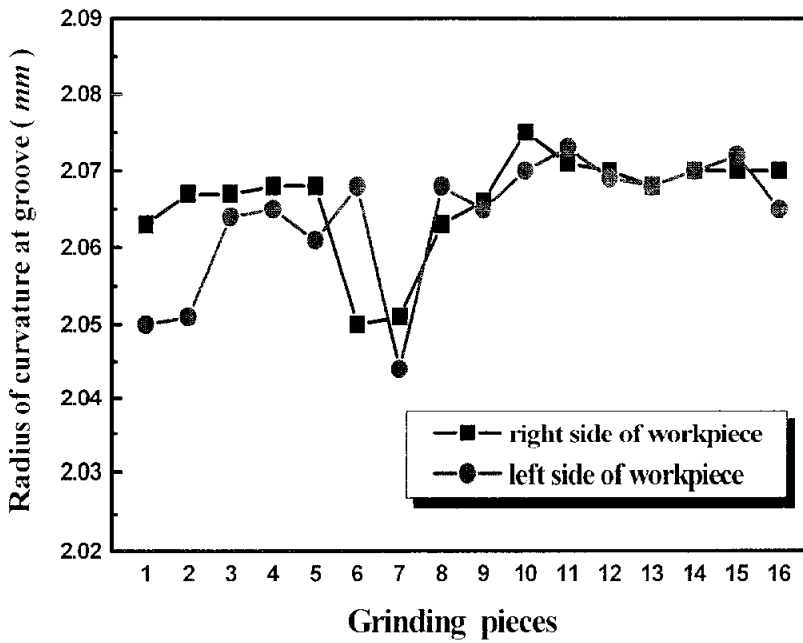


Fig. 18 Radius of curvature according to grinding pieces

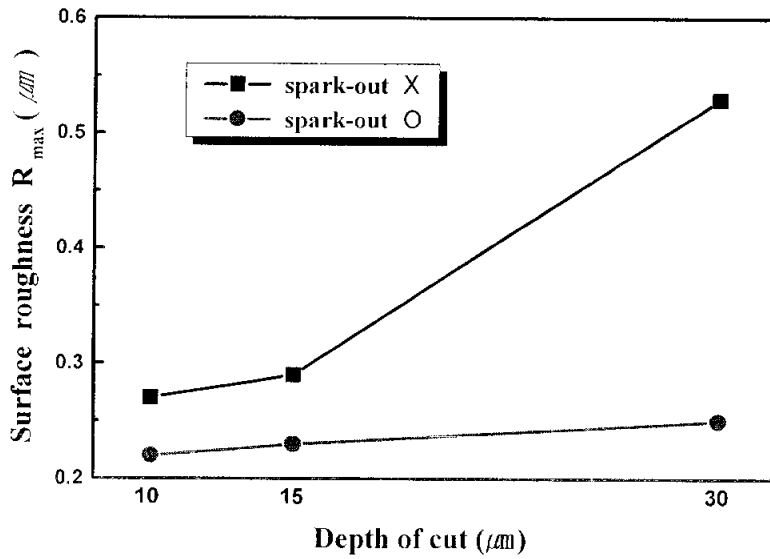


Fig. 19 Surface roughness according final depth of cut

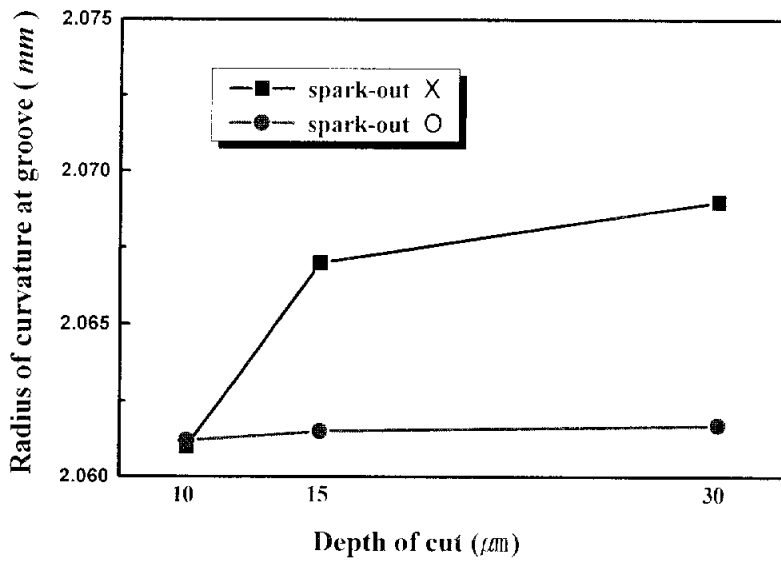


Fig. 20 Radius of curvature according to final depth of cut

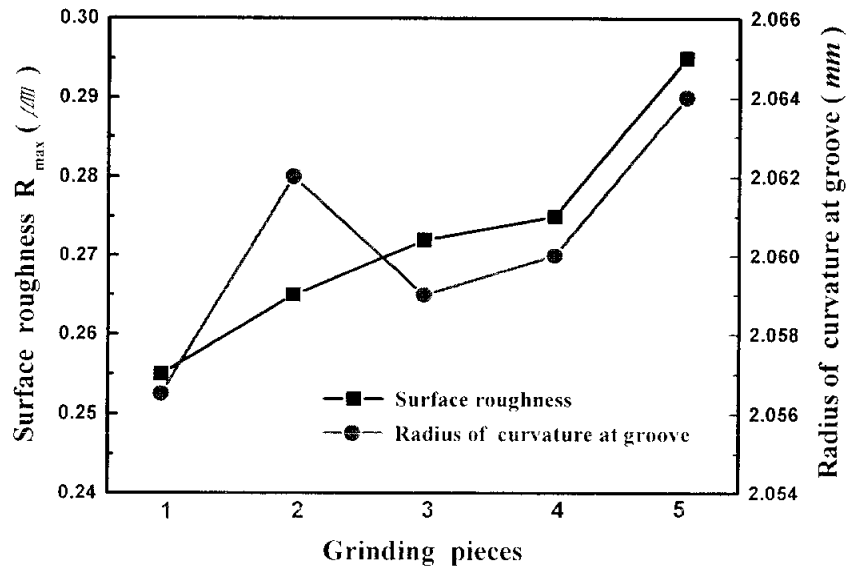


Fig. 21 Surface roughness and radius of curvature according to grinding pieces

4.4.2 CB120M100V 및 CB140M100V 슷돌의 연삭특성

Fig. 22과 Fig. 23은 CB120M100V 및 CB140M100V 슷돌을 사용하여 테이블 이송속도 1, 1.5, 2mm/s로 변화시켰을 때의 표면거칠기 및 곡률홈 반경을 나타내었다. 최종 연삭 절입량은 $15\mu m$ 로 하였으며 연삭 후 스파크 아웃을 실시고, 또한 가공전 배회 초기 드레싱을 실시하였다. 드레싱 조건은 1회 절입량 $2\mu m$, 총절입횟수 4회, 스파크 아웃 시간 0.5초로 하였다. CB120M100V 슷돌의 경우 표면거칠기의 변화는 테이블 이송속도의 증가에 따라 조금씩 감소하나 거의 변화하지 않는다. CB140M100V 슷돌의 경우에는도 동일한 경향을 나타낸다. 미세 홈 곡률반경에 대하여서는 CB140M100V 슷돌은 테이블 이송속도 1.5mm/s에서 가장 낮은 곡률반경 값을 가진다. 그러나 두 슷돌 모두 변화되는 폭이 아주 미세하다. 그러므로 미세 홈의 곡률반경은 테이블 이송속도에는 별다른 영향을 받지 않는다.

Fig. 24과 Fig. 25는 CB120M100V 슷돌과 CB140M100V 슷돌을 사용하여 테이블 이송속도를 1mm/s와 2mm/s로 변화시켰을 경우의 표면거칠기 및 홈 반경 변화를 나타낸 것이다. 두 슷돌 모두 초기 트루잉 후 추가 트루잉 없이 연삭가공을 실시하였다. CB120M100V 슷돌에 의한 실험에서는 표면거칠기에 대하여 스파크 아웃의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. CB140M100V 슷돌의 경우에는 스파크 아웃을 한 경우의 표면거칠기가 그렇지 않은 경우에 비하여 더 거칠게 나타났다. 즉 CB140M100V 슷돌은 입도가 미세할수록 눈매움의 발생이 용이하기 때문에 눈매움의 영향에 민감하게 반응한 것이다. 홈의 곡률반경은 스파크 아웃을 실시했을 경우에 스파크 아웃을 실시하지 않은 가공보다 테이블 이송속도의 증가에 관계없이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

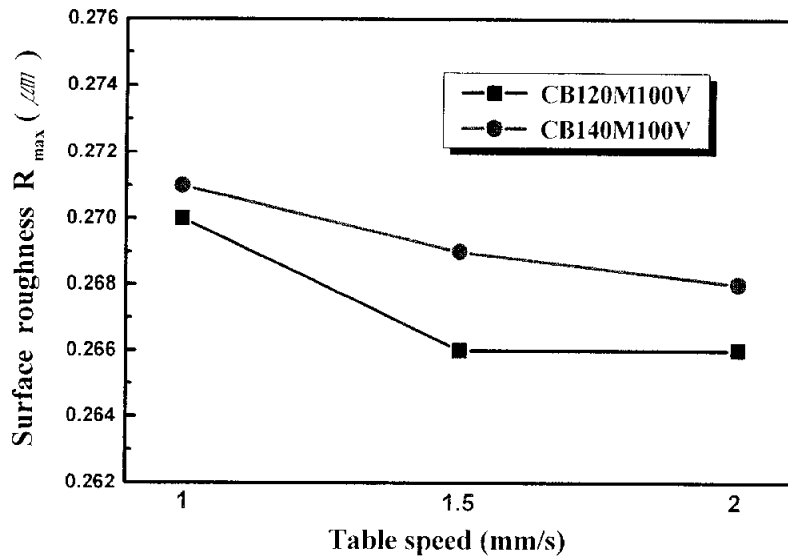


Fig. 22 Surface roughness according to table speed

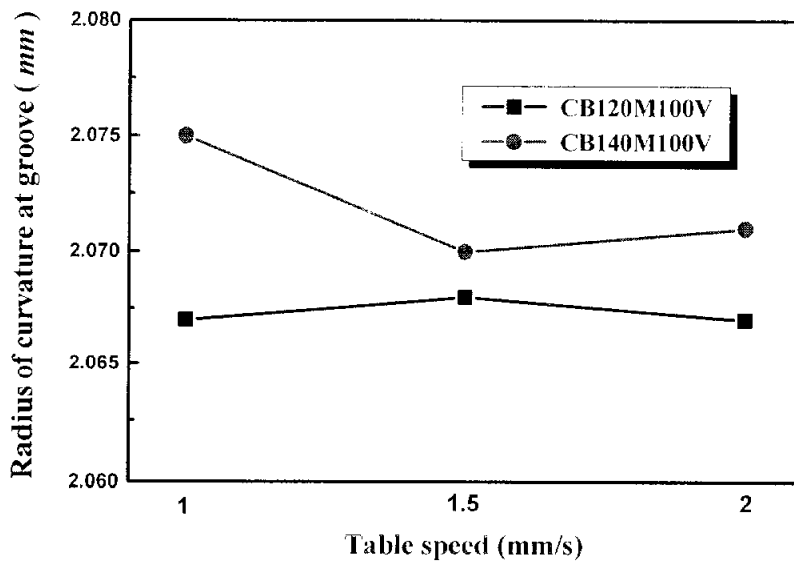


Fig. 23 Radius of curvature according to table speed

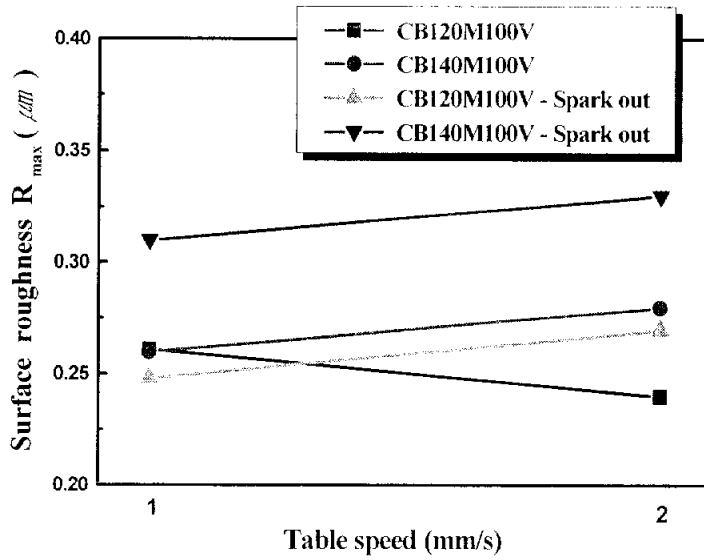


Fig. 24 Surface roughness according to table speed

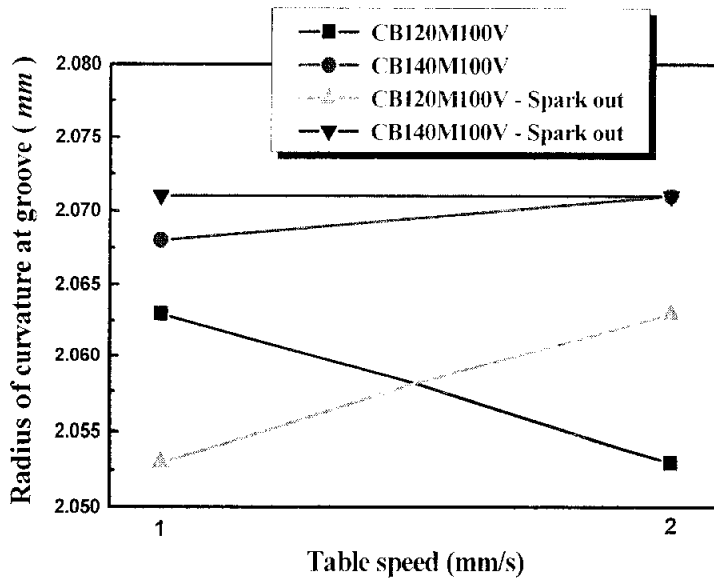


Fig. 25 Radius of curvature according to table speed

4.4.3 CB170M100V 및 CB230M100V 슷돌의 연삭특성

Fig. 26과 Fig. 27은 CB170M100V 슷돌과 CB230M100V 슷돌을 이용하여 슷돌의 주속도를 16000rpm, 테이블 이송은 황삭, 중삭, 정삭 모두 3.3mm/s로 일정하게 하고, 정삭의 1회 연삭량을 5, 10, 15 μm 로 변화하여 때의 표면거칠기와 흠 곡률반경 값을 나타낸다. 슷돌의 트루잉 작업은 각각의 공작물을 가공하기 전에 매회 실시하였으며, 트루잉 조건은 1회 트루잉 절입량 2 μm , 절입횟수 4회, 스파크 아웃 시간 0.5초로 하였다. 입도에 상관없이 표면거칠기는 1회 연삭량 증가와 관계없이 일정한 경향을 보이고 있다. 즉 매회 실시한 트루잉의 영향으로 눈매움 현상이 발생되지 않았다. 그러나 이러한 표면거칠기의 값이 CB120M100V 슷돌의 표면거칠기와 흠 곡률반경 값이 비슷하며 큰 차이가 나타나지 않는다. 즉 경제성의 입장에서 볼 때 CB170M100V 와 CB230M100V 슷돌보다는 CB120M100V 슷돌을 사용하는 것이 낫다.

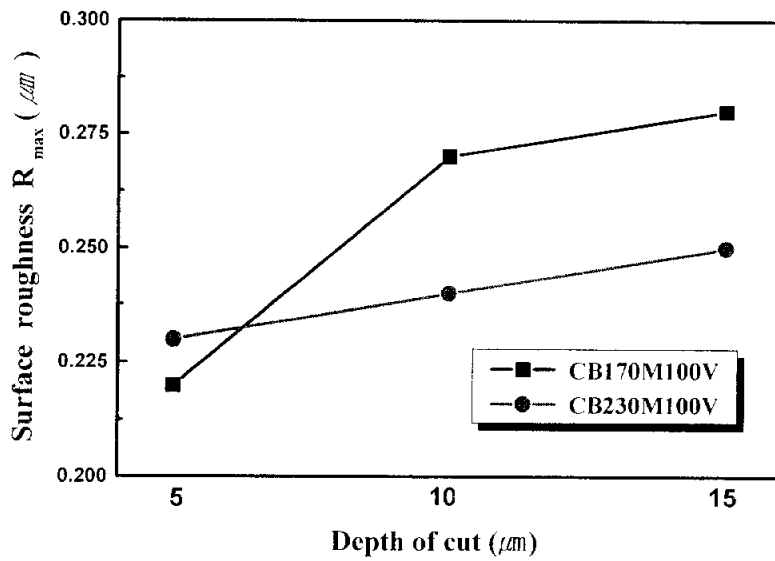


Fig. 26 Surface roughness according to depth of cut

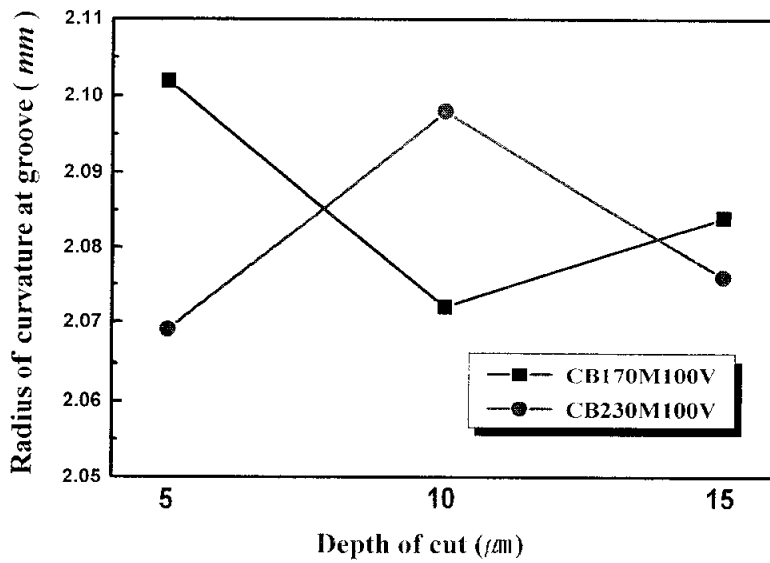


Fig. 27 Radius of curvature according to depth of cut

4.4.4 종합적 고찰

본 실험에서는 LM가이드 블록용 연삭공구로써 CBN입지를 사용할 수 있는가, 그리고 사용할 수 있다면 여기에 필요한 가공조건은 무엇인가를 찾기 위하여 실시하였고, 각 슷돌의 가공특성을 요약하면 다음과 같이 요약·정리할 수 있다.

1. CB120M125V 슷돌에 의한 연삭에서는 1회 연삭량 및 테이블 이송이 증가 할수록 표면거칠기는 값은 증가하였고, 눈매움에 대한 영향도 많이 받았다. 그러나 흠 곡률반경은 일정한 범위내에서 큰 차이 없이 나타났으며, 또한 스파크 아웃 없이 가공을 계속하면 급격한 눈매움의 영향을 받아 표면은 상당히 거칠어졌다.
2. CB120M100V와 CB140M100V 슷돌은 정삭공정의 테이블 이송속도 증가에 대하여 표면거칠기의 변화는 거의 없었으며, 슷돌입도에 대한 영향도 나타나지 않았다. 테이블 이송속도 $2mm/s$ 이하의 범위에서는 가능한 빠르게 테이블 이송속도를 설정하는 것이 효과적이다. 표면거칠기의 관점에서는 입도 120과 140의 차이가 거의 없었으며, 적절한 메쉬를 선택하여 사용하면 된다. 즉 미세 흠 가공에서 20메쉬 정도는 표면거칠기에 별다른 영향을 미치지 못한다는 것을 반영한다.
3. CB170M100V와 CB230M100V 슷돌에서는 1회 절입량 증가에 따라 표면거칠기는 다소 증가하나 그 양은 크지 않다. 표면거칠기는 입도 120과 140의 슷돌과 큰 차이가 없었으며, 동일 절입량을 가공함에 있어서, 입도가 증가할수록 표면거칠기가 나빠지는 것을 확인 할 수 있었는데 이는 높은 입도의 슷돌에서는 절입량을 감소시켜 눈매움에 대한 영향을 줄여야 한다는 것을 의미한다. 따라서 CB170M100V와 CB230M100V 슷돌보다는 CB120M100V와 CB140M100V 슷돌이 미세 흠 가공의 슷돌로는 적합하다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 미세 홈 가공에서 사용되는 WA계열 스톨을 대체할 수 있는 초미립자 스톨을 선정하고, 거기에 맞는 적절한 가공방법을 찾는데 그 목적을 두고 실험하였다. 표면거칠기의 값과 홈의 곡률반경 값의 변화에 가장 역점을 두었으며, 설계한 각각의 스톨에 대하여 적절한 가공공정을 찾기 위하여 절입깊이, 테이블 이송속도, 트루잉의 유·무 등 다양한 변수들을 두고 실험을 실시하였으며, 그러한 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경도는 HRC 60인 표면침탄열처리강(SCM420H)에 대하여 비소파쇄 스톨보다는 조대파쇄 스톨이 좋은 피삭성을 보였으며, 이송을 적게 할수록 양호한 표면성상을 얻을 수 있었다. 또한 조대파쇄 중에서도 CB120Q100V 스톨이 미세 홈 연삭가공에서 가장 우수한 스톨로 판명되었다.
2. 대표적인 난삭재 중의 하나인 SCM415 공작물의 미세 홈 가공에서 현재 사용되는 WA계열의 스톨보다는 조대파쇄의 CBN스톨을 사용하는 것이 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
3. CBN스톨 중에서 조대파쇄 CB170M100V스톨과 CB230M100V 스톨보다는 조대파쇄 CB120M100V와 CB140M100V 스톨이 미세 홈 연삭에 더 적합한 스톨이며, 경제성을 고려할 때 CB120M100V스톨이 가장 좋은 스톨로 판명되었다.
4. 조대파쇄 CB120M100V스톨에서는 테이블 이송속도 $2mm/s$ 이내에서 표면거칠기 변화가 거의 없으므로, 테이블 이송속도를 $2mm/s$ 로 하여, 가공시간을 줄임으로서, 생산량을 증가시킬 수 있다.

참고문헌

1. G. Warnecke, C. Barth, "Optimization of the Dynamic Behavior of Grinding Wheels for Grinding of Hard and Brittle Materials Using the Finite Element Method" Annals of the CIRP, Vol. 47, pp. 125-130. 1999.
2. H. K. Tonshoff, B. Karpuschewski, T. Mandrysch, "Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities" Annals of the CIRP, Vol. 46, pp. 96-102. 1998.
3. 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.
4. 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. 1980.
5. K. Subramanian, R.P. Lindsay. "A Systems Approach for the Use of Vitrified Bonded Superabrasive Wheels for Precision Production Grinding." Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 41-52. 1992.
6. Y. Ichida, K. kishi, "The Development of Nanocrystalline CBN for Enhanced Superalloy Grinding Performance" Journal of the ASME, Vol. 119, pp. 110-117. 1997.
7. S. Malkin, "Grinding Technology theory and applications of machining with abrasives," Ellis Horwood Limited No. 1, pp. 80-84. 1989.

8. S. kohl, C. Guo, S. Malkin, "Energy Partition to the Workpiece for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels." Journal of the ASME, Vol. 117, pp. 160-168. 1995.
9. 최성삼, 구양, 광재섭, 하만경, 박노광 "평면연삭에서의 연삭력 변화와 슷돌수명," 한국정밀공학회지, 제19권, 제3호, pp. 59-65, 2002.
10. 최성삼, "경취성 난삭재의 초입자 가공에 관한 연구," 부경대학교 공학 석사 학위논문, 2003.
11. R. Komanduri, M. C. Shaw, "*Scanning Electron Microscope Study of Surface Characteristics of Abrasive Materials*" Journal of ASME, Vol 96, pp. 145, 1974.
12. J. E. Ritter, "*Assuring Mechanical Reliability of Ceramic Components*," Journal of Japan Ceramic Society, No 93, pp. 341, 1985.
13. 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.
14. 손명환, 절삭가공론, 문운당, 1996.
15. 이종찬, 초연마재를 이용한 연삭, 절삭가공, 문운당, pp. 41-160, 1998.
16. R. K. Richard, E. H. John, O. M. Roland, T. W. Warren, "*Machine Tool Practices*," Prentice-Hall No. 5, pp. 671-747. 1995.

17. A. Yamamoto, "*Strength and Static Fatigue of Vitrified Grinding Wheels under Various Environments. II,*" Bull. Japan Soc. of Prec. Engg, No 10, pp. 45, 1976.
18. S. Malkin, R. B. Anderson, "*Active Grains and Dressing Particles in Grinding*" Proceedings of the International Grinding Conference, Pittsburgh, pp. 161, 1972.
19. T. Waida, K. Okano, "*Micro-grinding of Micro Machine Component,*" Journal of JSPE, Vol 61, No 10, pp. 1365-1368, 1995.
20. T. Nagai, A. Hirata, M. Yoshidawa, "*Preparation of Ceramic Micro Parts by Grinding,*" Journal of JSPE, Vol 63/6, pp. 884-888, 1990.
21. Kazunori Nagasaka, Yoshihiro Kita, Akihiro Tanibayashi, "*The Construction of Expert System for Grinding Process,*" Journal of JSPE, Vol. 57, No. 7, pp. 141-146, 1991.

Selection of CBN wheel at Internal Grinding for LM guide and Evaluation of Grinding Characteristics

Heo, Jung-Sik

**Dept. of Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University**

Abstract

To prevent the shape change of wheel, dressing can be executed at anytime, because WA wheel that had been bonded by resinoid usually have been used on grinding work at groove part of workpiece. Those derassing process that have been worked during the grinding cause the problem of productivity. Then technical improvement of grinding at groove parts using the abrasive and super-abrasive have been actively studying.

In this paper, to choose the optimum CBN wheel for high precision and efficiency, we have compared the grinding characteristics at the SCM420H that is one of difficult-to-cut materials due to the hardened-brittle, and analyzed the tendency of surface roughness from various working conditions such as spindle speed and depth of cut and table speed and also 4 CBN wheels and 2 types grinding lubrications have been used. The macrofracture wheels and microfracture wheels that have different grade and concentration have been used. through those characteristics. 5 wheels have been made by macrofracture

abrasive that have different grain size. To find the optimum grinding condition for designed wheels, the surface roughness and radius of curvature according to various working conditions such as the depth of cut and spark out have been measured and analyzed from precision, efficient and wheel life point of view.

Key words : CBN wheel(Cubic Boron Nitride wheel), Surface roughness (표면거칠기), Macrofracture(조대파쇄), Microfracture(미소파쇄)

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)
- 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_z : Density of grain edge ($1/mm^2$)
- R_a : Center line average height roughness (μm)
- t : Wheel depth of cut or downfeed (μm)
- v : Workpiece velocity (m/min)
- V : Wheel velocity (m/min)