

自動車 엔진 部品用 高强度 세라믹스의 機械 加工에 關한 研究

A Study on Machining of High Strength Ceramics for Automobile Engine Parts

康 宰 勳*
Jae-Hoon, Kang

ABSTRACT

Advanced Ceramics have some excellent properties as the material for the mechanical component. It is, however, very difficult to grind ceramics with high efficiency because of their high strength, hardness and brittleness.

In this study, various machining experiments are carried out to obtain the basic knowledge of grinding High Strength Ceramics with high efficiency and precision for the purpose of application to Automobile parts. Advanced Engineering Ceramics such as Si_3N_4 , SiC , ZrO_2 , Al_2O_3 are ground with diamond wheels using conventional grinding machine.

Results obtained in this study provide some useful informations to attain the high efficiency grinding of Advanced Ceramics.

Key words: High Strength Engineering Ceramics, Automobile parts, Diamond wheels, Grinding force, Grinding power, Surface roughness, Grinding Stiffness

1. 머리말

근래 우리나라의 자동차산업 분야가 급격히 성장, 발전하면서 전세계 시장으로의 도약을 하기에 이르렀다. 자체적인 소형화, 연료비절감을 위한 연비향상 등의 기술개발이 지속적으로 이뤄지면서 한편으론 자동차부품이나 재료에 대한 요구도 나날이 고도화되어, 그 내용도 복잡하고 보다 더 가혹한 분위기를 필수적으로 하게 되었다.

최근 각광을 받고 있는 화인 세라믹스 신소재는 자동차산업 분야 역시 큰 기대를 지니게끔 하고 있다. 즉, 종래 금속이 사용되어지던 엔진 부품을 세라믹스로 대체하게 되면 보다 더 고온에서의 작동을 가능하게끔 할 것이며, 고경도 등의 특성을 살려 동력 전달계 부품에 적용하게 되면 내마모성이나 내구성을 향상시키는 효과를 얻을 수 있게 된다. 또한, 경량화나 단열 등의 측면을 고려한 적용 등에 관한 연구들이 진행되어지고 있기도 하다.

* 正會員, 韓國機械研究所 加工技術研究室

한편, Electronics 화의 여과 역시 자동차에도 영향을 주어 차의 고급화에 중요한 역할을 하고 있다. 그 중에서 눈이나 귀의 역할을 해내는 각종 센서가 그 대표적인 예라고 할 수 있다.

이와 같은 것들은 화인 세라믹스의 우수한 특성과 기능성을 충분히 활용하는 노력들로서 이미 가까운 일본과 같은 선진국의 경우는 얼마전 세라믹스 엔진을 탑재한 승용차의 시험주행이 성공리에 끝나 곧 시판이 이뤄질 전망이다.

그런데 SiC, Si₃N₄ 와 같은 엔진부품 소재용 High Strength Engineering Cermics 는 고경도와 취성 등의 문제점으로 난삭재에 속해 이를 정밀 부품화시키기 위해서는, 첨단 가공기술이라 할 수 있는 초지립 연삭공구를 사용한 신가공기술로서 소결 공정후 제거 가공을 필수로 하는 마, 비이전 선진기술국 보유기술로 인해 국내의 자체적인 기술 개발 및 정립으로 대외 경쟁력을 향상시킬 필요가 시급하여 실지 부품화 가공을 위한 그 기초적인 실험적 연구가 요구되어지게 되었다.

2. 기계적 제거가공실험

화인 세라믹스 소재에 대한 여러 후가공방법이 있긴 하나, 대부분이 절연체의 비금속 무기물질이며 고경도와 취성 등을 갖는 관계로 기계적인 제거 가공법이 널리 사용되며, 그 중에서 다이아몬드 연삭 슛들을 사용한 절단 및 연삭가공과 래핑가공 등이 주류를 이루고 있는 실정이다.

본 연구에서는 선진국에서와 같은 전용기가 아닌 범용 공작기계로서 평면, 원통 연삭가공 실험을 수행함으로써, 소재별 피연삭성을 조사해보고 그 가공조건을 정립코자 하였으며, 또한 가능한 최고의 표면품질과 형상 장성을 얻고자 하였다.

2.1 평면연삭가공

2.1.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용되어진 세라믹스 시편은 국내에서는 아직 구입이 불가능한 고경도의 화

인 세라믹스인 관계로 일본내 A, B 두 생산업체로부터 구입하였으며, 그 특성은 다음 표 1 과 같다.

시편의 크기는 피연삭성 측정 뿐만아니라 가공 시스템 자체의 진동 및 강성도 측정 가능하도록 50×100×20 mm로 정하였다. 비자성 재료 인해 magnetic table에 그대로 고정하여 사용할 수 없으므로 접착제나 보조용 치구를 사용해야 하는데, 동력계와의 부착과 시편의 크기 등의 문제점으로 연삭재의 보조용치구를 설계, 제작하여 사용하였다.

실험에 사용된 평면 연삭반은 서독 ELB사의 것으로 주축 동력은 4.25/5.18Kw이며, 주축 회전수는 1680/3360 rpm으로서 선택형이다. 테이블 구동방식이 유압 구동식인 부분 유압 구동식 연삭반으로 연삭 슛들의 최소 절입량은 2μm/pass 까지 가능하다. 연삭반 및 실험 시스템은 그림 1에 나타냈으며, 그 사양 및 성능은 표 2에 나타내었다.

연삭 슛들은 국내 모 다이아몬드 연삭공구 전문 생산업체에 주문, 제작하여 사용하였으며, resin bond계의 1Al tape 으로 다이아몬드 층의 두께는 3mm, 가공면의 폭은 10mm로 정하였다.

연삭저항은 Piezo-electric type의 3-components dynamometer (Swiss Kistlar Co., model 9257)를 사용하여 집선과 법선의 두 저항 성분을 측정하였다. 연삭동력은 PC power-meter(일본 황하복진전기사제, model 2503)를 사용하여 측정하였으며, 이와 같은 3가지 성분을 구하여 Rapicorder(일본 SA-NEI Co., model A2101)에 기록하였다. 그림 2에 평면 연삭가공의 In-process 측정 시스템 diagram을 나타내어 보았다.

가공 실험후의 가공면에 대한 표면조도는 촉침식 표면조도측정기(영국 Taylor-Hobson Co., model Surtronic-3 tape, 서독 Mahr Co., PMKtape)를 사용하여 측정하였다. 형상도는 형상 측정기(영국 Taylor-Hobson Co., model Talysurf 4)를 사용하여 측정하였다.

또한, Stereoscopic microscope 와 부착 카메라를 통하여 가공면 상태를 확인해 보았으

표 1 시편의 기계적 특성

특 성	Al ₂ O ₃		ZrO ₂		SiC		Si ₃ N ₄	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Vickers hardness (Gpa)	16	15	13		25	24	15	15
Young's modulus (Gpa)	344	350	206		392	398	294	293
Bending strength (Mpa)	304	295	980		490	479	588	589
Density (g/cm ³)	3.8	3.7	5.9		3.1	3.0	3.2	3.2
Poission's ratio	0.25	0.26	0.31		0.16	0.17	0.28	0.28
기계 구조용 부품 으로의 적용-사례	<ul style="list-style-type: none"> • 자동차산업 : Plug, port liner • 산업장비 : Injection mold- ing machine High tempera- ture fluid controller • 공 구 : Cutting tool 				<ul style="list-style-type: none"> • 자동차산업 : Piston, piston crown, cylinder liner combustor, super charger, valve lifter, cam • 산업장비 : Die for wire elongation, Al die casting machine, spinn- ing frame, injection mold- ing machine • 가스터빈 : Rotor blade, stator blade, shroud, heat exchanger, hose cone 		<ul style="list-style-type: none"> • 자동차산업 : Valve lifter Thermal reactor, cam • 산업장비 : Spinning frame Al die casting madhine • 가스터빈 : Rotor blade, stator blade, nose cone • Nuclear reactor Fution reactor 	

며, 가공흔적의 비교를 위하여 SEM 촬영도 시도해 보았다.

고경도의 엔지니어링 세라믹스는 가공시에 발생하는 micro crack에 의해 재료강도에 큰 영향을 받을 수 있으며 chipping의 발생이 간혹 부품의 불량에 주요원인이 될 수 있으므로 가공조건이나 가공분위기가 주요 관건이 된다.

따라서 본 실험에서는 각종 세라믹스를 다양한 연삭조건으로 가공할 때의 피연삭성을 연삭저항, 가공물의 표면조도, 연삭력 등을 주요 관점으로 하여 비교 검토해 보았다.



그림 1 평면 연삭반 및 실험 시스템

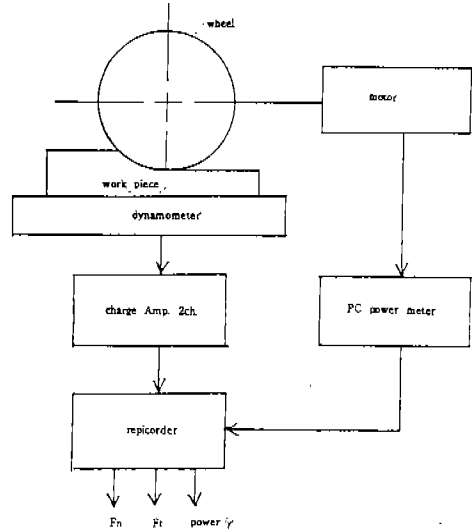


그림 2 실험 장치의 Diagram

표 2 연삭반의 사양 및 성능

모 델 명		S W N 6
테이블의 마그네틱 고정부		900 × 300 mm
최대작업범위		600 × 350 × 375 mm
테이블 속도		2 ~ 28 m/min
최대 cross traverse		320 mm
cross feed	rapid trans. traverse	1.2 m/min
	automatic cross feed	1 ~ 60 mm/ stroke
	1 graduation on handwheel	20 μm
vertical feed	1 revolution	3 mm
	vertical rapid traverse	0.15 m/min
	automatic downfeed	2 ~ 60 μm
grinding wheel	1 graduation on handwheel	2 μm
	1 revolution	0.2mm
	grinding wheel dimensions	60 cycle 경우 1680/3360 rpm
(dia. × width × bore)		300 × 50 × 76 mm
motor		grinding spindle 용 4.25/5.18 kw

또한 다이아몬드 연삭공구를 사용하는 연삭 가공에서는 특히 슷들의 작용면에 따라 가공물의 표면 형상이 그대로 재현되는 모성 가공이 되어서므로 truing, dressing 기술의 최적조건과 방법이 요구되어, 4 가지 간단한 공구를 사용한 실험을 통해 “Brake truer를 사용한 truing 및 dressing” 방법이 가장 적법임을 구하였다. 4 가지 방법의 슷들 조정법 실험조건은 표 3 과 같다.

2. 1. 2 실험결과 및 고찰

그림 3 은 각 실험조건으로 4 가지 방법의 슷들 조정을 마친후 표 3 의 가공조건으로 평면 연삭 시행후의 표면조도로서, 트레이스 방식의 연삭가공을 할 때 연삭 슷들의 전진 이송량은 고정화된 공작물의 이송속도를 변화시킬 경우의 공작물 표면조도이다.

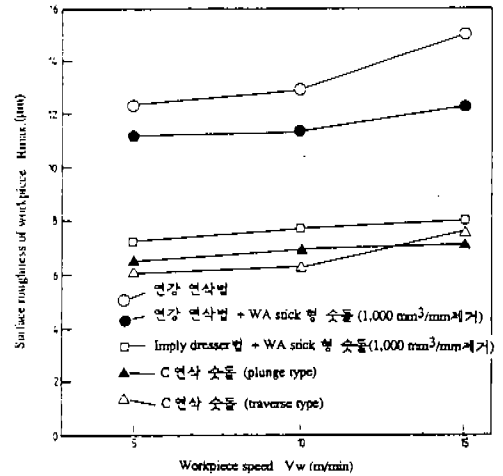


그림 3 각종 트루잉, 드레싱 방법에 있어서의 공작물 이송속도 변화에 따른 가공물 표면조도의 변화

Grinding tool : SDC 170N100B
 Vg = 1,600 m/min
 fg = 3 mm/pass
 t = 10μm

표 3 Truing 및 Dressing 방법들과 그 조건

방 법	연 강 연 삭 법	Imple dresser 법	Brake truing 법 (1 호 평형 C 砥石)	
			traverse style	plunge style
트루잉	• 연강 HB 122 • 100 ^L × 50 ^W × 20 ^t mm • V _t = 10 m/min • t = 20 μ/1st	• 환형 (φ 10. #80) resin bond diamond imple dresser 사용 • f = 75 μ/rev • t = 5 μ	• C 60 K 7VGW 砥石 사용 • 75 × 25 × 12.7 mm • f = 75 μ/rev • t = 20 μ	• C 60 K 7VGW 砥石 사용 • 75 × 25 × 12.7 mm • V _t = 0.6 mm/min
			• WA 220H 6V Stick 砥石 사용 • 21 × 20 × 200 mm • 1000 mm ³ /mm 제거 거친연삭 V = 100 mm/min t = 1 mm/1st 고운연삭 V = 10 m/min t = 50 μ/1st	
드레싱	※ 트루잉 및 드레싱 동시효과방법			

* 연삭스틀 주속도 Vg = 1600 m/min

표 4 슷돌 조정상태의 평가를 위한 연삭조건

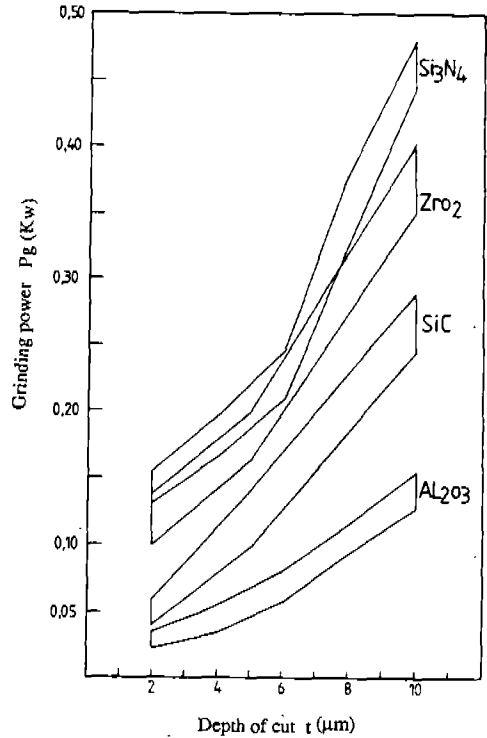
연삭 슷돌의 주속도	1,600 m/min
공작물 속도(테이블속도)	3~17 m/min
절 입 량	10 μ m
연삭 슷돌의 전진이송량	0.5~3.0 mm/pass
공 작 물	Si ₃ N ₄

공작물의 이송속도가 높아질수록 공작물의 표면조도는 거칠다. 연강 연삭법의 경우는 다른 방법들보다 표면조도가 현저히 나쁘며, WA stick형 슷돌을 어느정도 연삭했을 경우는 약간 표면조도가 개선되긴 하나 그다지 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 연강 연삭법에 의한 드레싱시 배출되는 절분(chip)에 의해 받게되는 슷돌 가공면 부위의 흠이 좀처럼 없어지지 않기 때문으로 생각된다.

C연삭 슷돌을 장착한 brake truiet법은 트래버스나 플런지방식 모두 비슷한 값을 보이며, imply dresser를 사용하는 방법과도 그다지 큰 차이는 없었으나, 가공면의 형상 창성면에서는 월등히 우수했다.

연삭반의 주축계에 걸리는 부하 용량을 알아보고 연삭반계의 강성을 예측하기 위하여 4 종류의 고경도 세라믹스를 대상으로 연삭동력을 측정해 보았다. 먼저 실험에 들어가기전에 절입만을 제외한 실제 실험시와 동일한 조건으로 공회전시켰다. 실험 시작 바로 직전에 연삭 슷돌의 공회전 부하용량은 약 0.7 Kw였다. 플런지 방식의 연삭으로 절입량을 일정하게 증가시켜가며, 그 연삭 동력값을 각 5회에 걸쳐 측정한 값(실제치에서 공회전값을 뺀값)을 그림 4에 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 Al₂O₃ 세라믹스의 경우가 현저히 작은 값을 보이고 Si₃N₄를 비롯한 나머지 3가지 세라믹스는 비슷하게 큰 값을 보이고 있을뿐, 그 표준편차를 고려해볼 때 뚜렷한 경향을 단정지을 수 없었다.

또 최대 절입량 10 μ m 경우에 있어서의 주축에 작용하게 되는 부하용량도 주축동력에 훨씬 못미치는 값으로 실험에 있어 충분한 절입량 범위라고 할 수 있었다.



Grinding wheel : SDC 170N100B

Vg = 1,600 m/min

Vw = 10 m/min

그림 4 각종 세라믹스의 절입량과 연삭력의 관계

그림 5는 각종 세라믹스에 대한 比研削剛性(단위폭당의 연삭 강성)을 측정한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 절입량이 비교적 작아(10 μ m 이내) 절입량과 법선 연삭 저항과의 관계가 거의 선형적 비례 구간에 드는 범위를 구했으므로 비연삭강성 역시 비교적 선형으로 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있다. 공작물의 이송속도가 높을수록 비연삭강성이 증가하며, Si₃N₄의 경우가 역시 다른 세라믹스에 비하여 확실히 큰 값을 보이고 있다.

그림 6은 공작물의 이송속도를 10m/min으로 한 경우의 각종 세라믹스에 대한 절입량과 접선 연삭저항과의 관계를 비교해 본 것이다. Si₃N₄, ZrO₂, SiC는 거의 비슷한 값으로써 절입량이 증대할수록 접선 연삭저항이 증가하는 경향을 보이며 Al₂O₃ 세라믹스는 그

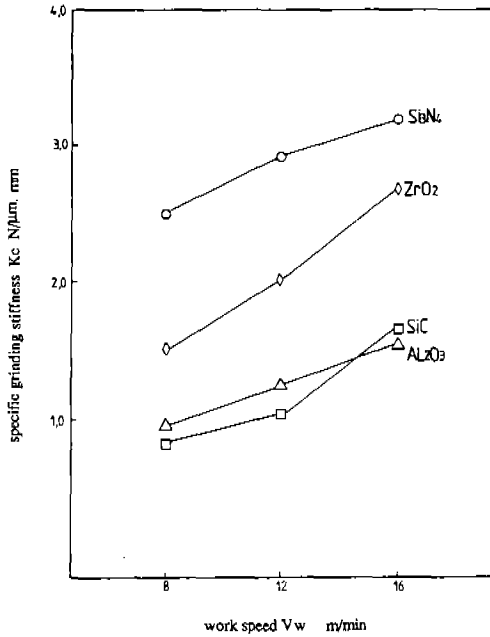


그림 5 각종 세라믹스의 연삭 강성

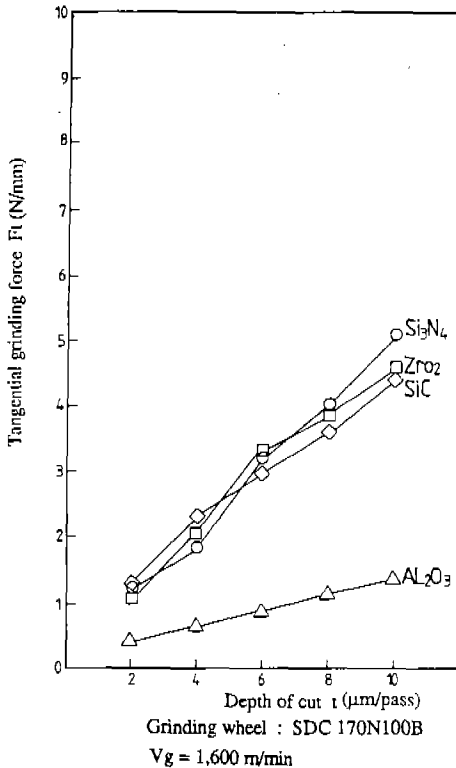


그림 6 각종 세라믹스의 절입량과 접선 저항과의 관계

보다 매우 낮은 값을 가지며 증가하는 경향을 보이고 있다.

그림 7은 그림 6과 동일한 연삭조건 하에서 구한 각종 세라믹스에 있어서의 절입량과 법선 연삭저항과의 관계를 비교해 본 것이다. 그림 6에서와 같이 접선 연삭저항은 세라믹스재질에 따라 그 구분이 명확하지 않으나 법선 연삭저항의 경우엔 그림 7에서와 같이 재질별 차이가 명확히 나타났다. 역시 Si₃N₄ 세라믹스가 가장 큰 연삭저항을 나타내고 있으며, Al₂O₃, SiC 세라믹스는 약간 Al₂O₃의 경우가 SiC경우 보다 큰 값을 보이나 그 차가 그다지 크게 나타나지 않으므로 결국 세라믹스에 대한 연삭저항은 그 연삭 분력비로 구하여 재질의 차이에 따른 경향을 살펴봄이 좋을듯 싶다.

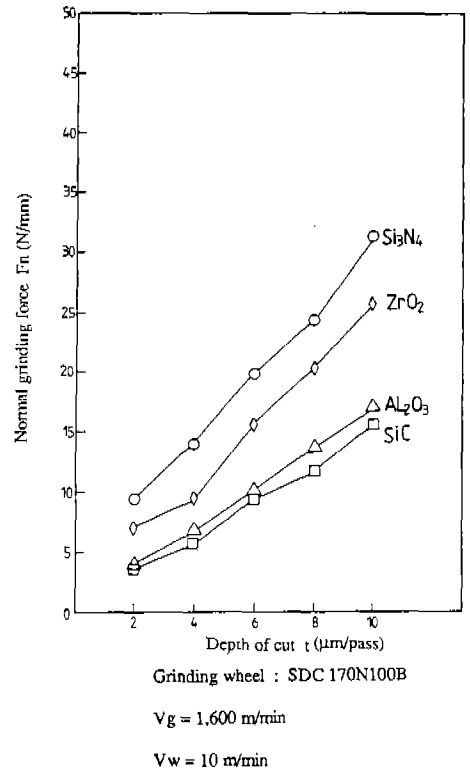


그림 7 각종 세라믹스의 절입량과 법선 연삭 저항과의 관계

그림 8은 resin bond 다이아몬드 연삭 슷돌로 Si_3N_4 와 S45C 강재를 연삭했을 때의 법선 연삭저항과 접선 연삭저항과의 분력비를 나타내고 있다. 동일한 접선 연삭저항의 경우 Si_3N_4 세라믹스가 S45C보다 법선 연삭저항이 현저하게 크게 나타난다. 이는 고경도 재료를 연삭할 때의 특징을 염두해둔다면, 연삭 슷돌 입자의 절인이 고경도 재료를 관입하기 힘들기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또 S45C의 경우가 Si_3N_4 세라믹스의 경우보다 연삭비 F_t/F_n 가 훨씬 큼도 알 수 있다. 그리고 두 경우 모두 실험을 통한 최대절입량 10 μm 의 범위내에선 연삭 분력비가 거의 선형적으로 증가하는 경향을 띄고 있다고 할 수 있다.

그림 9는 Al_2O_3 를 resin bond 다이아몬드 연삭 슷돌로 평면 연삭 가공할 경우, 가공면 단위 폭당의 법선 연삭저항과 접선 연삭저항

을 비교해 나타낸 것이다. 공작물의 이송속도를 변화시켜 가며 각 절입량마다의 F_n , F_t 값을 측정해 보았다. 공작물의 이송속도가 높아질수록 절입량 증대에 따른 연삭저항의 증가율이 커짐을 알 수 있다.

그림 10은 Si_3N_4 세라믹스를 대상으로 그림 9의 경우와 동일한 조건으로 실험한 결과이다. 역시 공작물의 이송속도가 증가할수록 연삭저항이 증가하는 경향을 보이고 있다.

그림 11은 다이아몬드 연삭 슷돌의 사양중 입도만을 변화시킨 두 연삭 슷돌로 Si_3N_4 세라믹스를 연삭가공할 때의 두 연삭 저항치를 측정해 본 결과이다. 입도차에 따라 큰 차이는 안 나타나나 이것이 입도의 차이가 크지 않아 생기는 결과인지는 추후에 더 실험을 실행함으로써 알아보아야 할 것으로 생각된다.

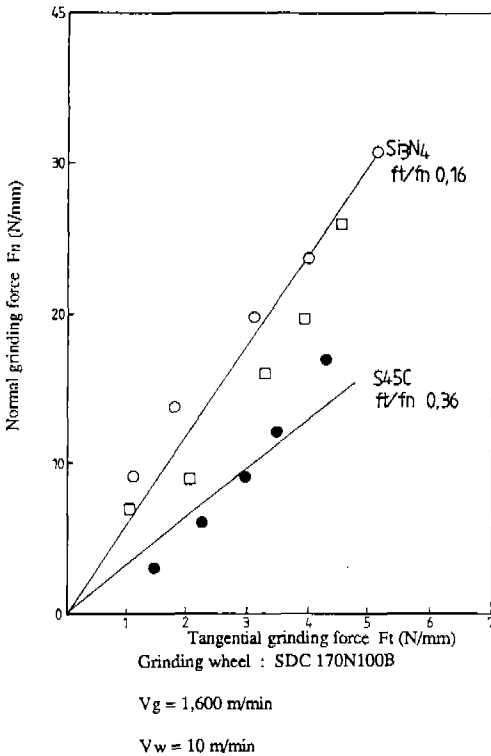


그림 8 고정도 세라믹스와 연강연삭의 연삭 분력비 비교

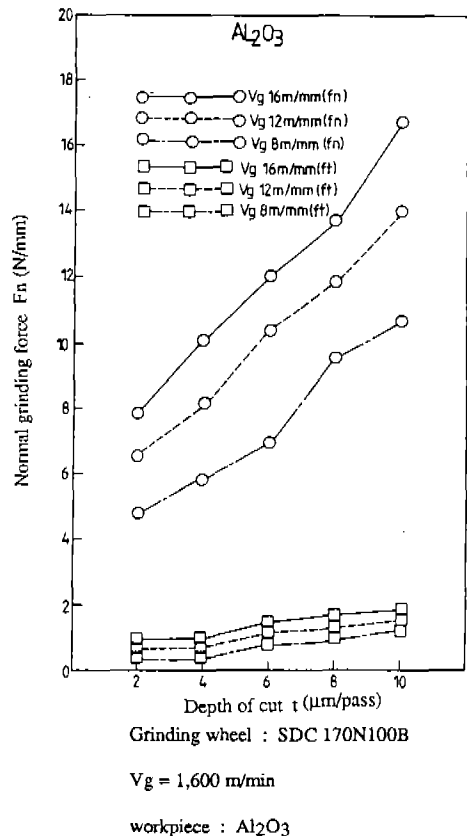


그림 9 공작물의 이송속도에 따른 연삭저항 값의 변화

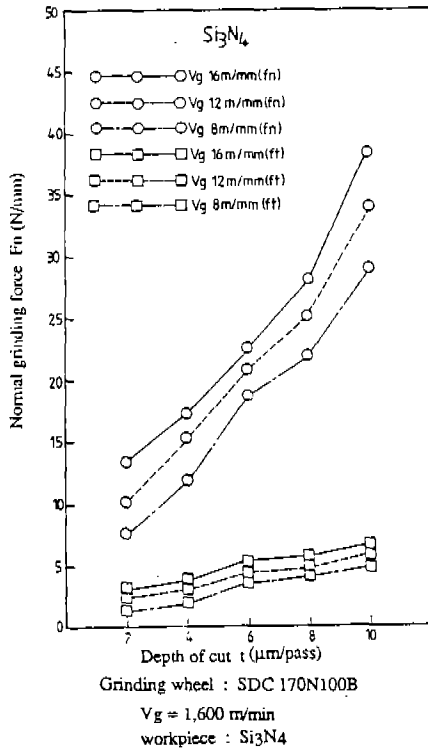


그림 10 공작물의 이송속도에 따른 연삭저항의 변화

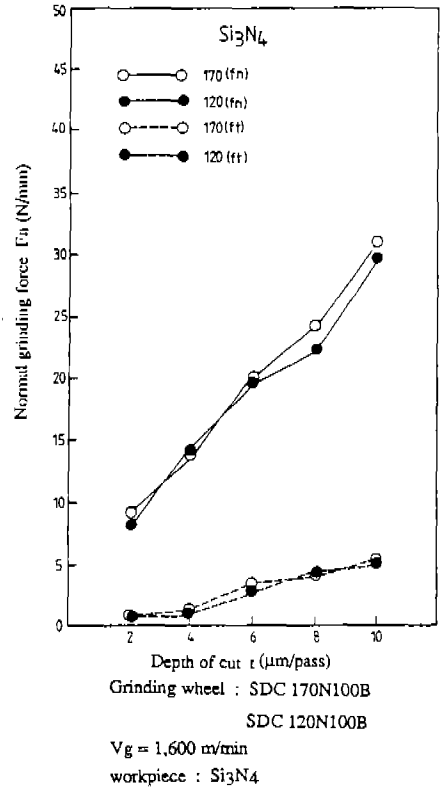


그림 11 슷돌 입도 변화에 따른 연삭저항값의 변화

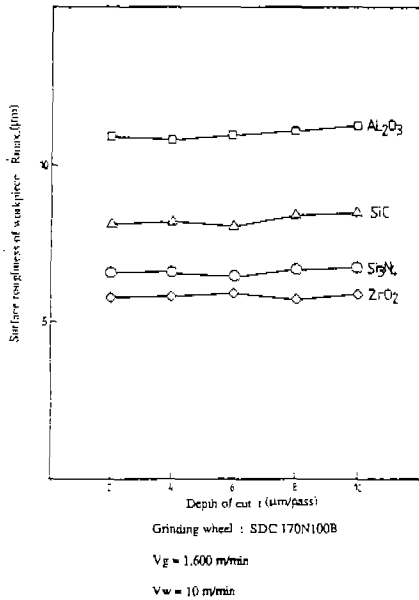


그림 12 각종 세라믹스의 표면조도 (R_{max}) 비교 (spark-out 실시한 경우).

그림 12는 각 세라믹스 가공면의 표면조도 R_{max}를 측정하여 비교해본 것이다. 표면조도 R_{max} 역시 Al₂O₃ 세라믹스의 경우 가장 좋지 않았으며 절입량 변화에 따라 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. Spark-out을 실행함으로써 금속의 경우와 마찬가지로 표면조도값의 개선을 가능하게 할 수도 있었다.

2.2 원통연삭실험

2.2.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 화인 세라믹스의 기계적 특성은 표 5와 같다. 일본 K사 제품으로 강재 아머를 제작, 체결하여 사용하였다. 가공기로는 일본 T사의 초정밀 만능 연삭반을 사용하였으며, 그 사양 및 성능을 표 6에 나타내었다. 연삭공구인 다이아몬드 연삭 슷돌은 국내 모 전문 생산업체에 주문, 제작하였으며 결합체는 resin bond 계로서 입도는 #

표 5 화인 세라믹스의 기계적 특성 비교

소재 종류	보통 소결	보통 소결	보통 소결
	질화 규소	탄화 규소	지르코니아
특성	Si ₃ N ₄	SiC	ZrO ₂
dimension (mm)	φ60×45×15	좌 동	좌 동
hardness (HRA)	7.7	8.4	Hv=1300
bending strength (MPa)	620	450	1180
density	3.2	3.05	6.02

표 6 연삭반의 사양

* 기계 명칭 : 초정밀 안능 연삭반 (모델명 : GUX 25 * 100)	
* 제작 회사 : 일본 TOYODA기공 (주) , 1981 년제.	
양 센터 간의 거리	1030 mm
최대 연삭 직경	100 mm
숫돌대의 자동 절입 가능 범위	0.0005-0.025 mm
표준 사용 숫돌의 칩수	405(외경) * 5 (폭) * 1.27 (내경) mm
숫돌 회전수 (주속도)	1475(1800 rev/min)
테이블 이송 속도 범위	10-5000 mm/min
주축대 회전수 (회전축 최대 부하)	30-700(60kg)
주축대 및 심압대 센터 형상	Morse taper No. 3
전동기 용량	숫돌축 (3.7), 주축대 (DC0.55) Kw

* TOYODA static bearing 을 사용한 유압 구동식 원통 연삭반임.

표 7 각종 트루잉, 드레싱 방법의 조건

종류	트루잉 공구 사양 및 조건	드레싱 공구 사양 및 조건
1	<ul style="list-style-type: none"> * 전삭 diamond roll dresser. o 60(D)×27(d)×45(W) o # 80 o 1A1 type o 국산 모회사 주문 제작 * 조건 : o traverse 연삭형 o 주속도 (Vd) : 24.5mm/rev, 130rpm, q=60. o 절입량 (ld) : 2.5μm/pass (양끝절입) o traverse 속도 : 0.04 mm/rev. of workpiece o 연삭유량 : 많이 강하게 	<ul style="list-style-type: none"> * GC wheel o 85(D)×27(d)×30(W) o # 80 o 1A1 type o 국산 모회사 주문 제작 * 조건 : o traverse 연삭형 o 주속도 (Vd) : 10mm/min, 37rpm, q=150. o 절입량 (ld) : 10μm/pass (양끝절입) o traverse 속도 : 5mm/rev. of workpiece o 연삭유량 : 적게 약하게.
2	<ul style="list-style-type: none"> * Imply diamond dresser. o 10(D)×10(L), metal bond o # 80 o 국산 모회사제 * 조건 : o traverse 연삭형 o 절입량 (ld) : 2.5μm/pass (양끝절입) o traverse 속도 : 0.04mm/rev. of workpiece o 연삭유량 : 많이 강하게 	<ul style="list-style-type: none"> * WA stick type honing stone o 20×20×200 o # 220 o 국산 모회사제 * 조건 : o plunge 연삭형 o Infeed rate : 1.0μm/rev. of wheel o 총절입량 : 1000mm³/mm o 250μm/회식 자동 plunge o 연삭유량 : 적게 약하게
3	<ul style="list-style-type: none"> * Single point diamond dresser. o 국산 모회사제 * 조건 : o traverse 연삭형 o traverse 속도 : 0.06mm/rev. of workpiece o 절입량 (ld) : 2.5μm/pass (양끝절입) o 연삭유량 : 매우 많이 강하게 	<ul style="list-style-type: none"> * WA stick type honing stone o 21×20×200 o WA180H6V o 일본 모회사제 * 조건 : o plunge 연삭형 o Infeed rate : 1.0μm/rev. of wheel o 총절입량 : 1000mm³/mm o 250μm/회식 자동 plunge o 연삭유량 : 적게 약하게

140, 270, 집중도 역시 100 및 75의 2종류를 택하였다. 숫돌의 형상은 1A1 tape 으로 다이아몬드 지립층의 두께는 3mm, 칩수는 400(외경)×10(폭)×127(내경)mm로 정하였다. 실험 시스템과 Diagram은 그림 13, 14에 나타내 보았다. 연삭저항의 검출은 심압대 센터에 부착하여 사용하는 것으로 piezo-electric tape 이다.

연삭실험은 공히 일정한 조건의 트루잉, 드레싱을 거친 후 원통 plunge형 연삭을 한 것이다. 3가지의 간단한 공구를 사용한 연삭공구 조정법의 영향을 알아보기 위하여 표 7의 조건으로 우선 실행하여 보았다.

설정 숫돌 절입량 및 연삭 주속도 등의 가공조건이 피역삭성 및 표면조도 등의 연삭결과에 미치는 영향을 알아 보았다. 그리고 각 조정법들이 표면조도, 가공면의 형상정도, 진원도 등에 어떠한 결과를 미치는가를 알아봄으로써, 본 실험에 사용되어진 가공시스템 및 가공조건 등의 분위기하에서 얻을 수 있는 최상의 결과를 얻고자 하였다. 가공부위의 진원도 형성정도의 초기상태를 비교해보기 위하여 3차원 측정기를 사용하였다. 또한, 가공부위의 상태를 알아보기 위하여 stereoscope microscope를 사용, 사진 촬영해 보았으며, 강제 경우와의 가공면 상태를 비교해보기 위하여 SEM촬영도 실시하였다. 피삭재 가공면의 표면조도는 축척식 표면조도 측정기를 사용하여 구하였다.

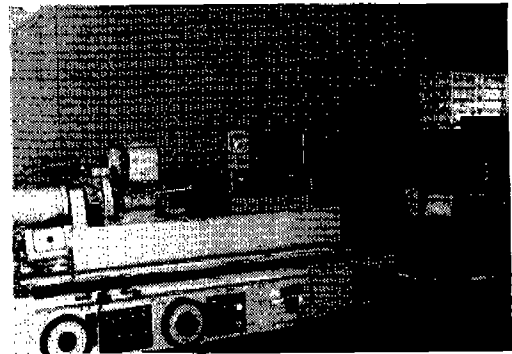


그림 13 실험장치 및 시스템

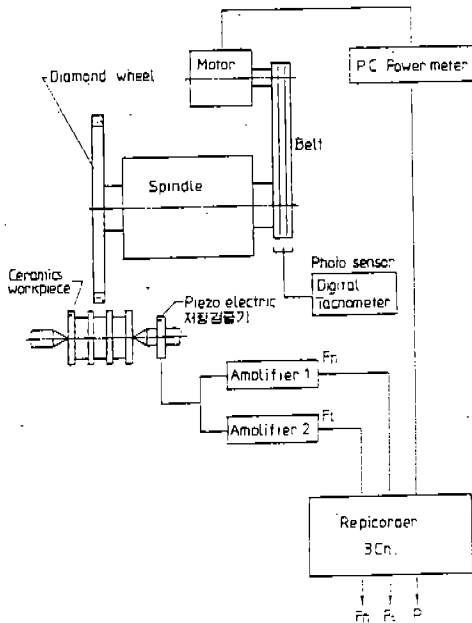


그림 14 실험장치의 Diagram

본 실험에서 트루잉, 드레싱 방법이 명기되어 있지 않은 결과는 “다이아몬드 진착 롤 드레서를 이용한 트루잉 + GC wheel 을 이용한 드레싱”을 수행한 후 얻은 것들이다. 또한 그 연삭 주속도가 명기되어 있지 않은 결과는 plunge 주속도 $4 \mu\text{m}/\text{rev. of workpiece}$ 로 실행한 것들이다.

2.2.2 결과 및 고찰

그림 15는 3가지의 방법 및 그 조건으로 트루잉, 드레싱을 실시한 후 2종류의 세라믹스에 대해 표면조도의 파형을 알아본 것이다. 트루잉 및 드레싱의 조건은 실험적으로 최적 조건을 구했으며 그림에서의 표면조도 파형은 트루잉 및 드레싱 실시 후직후의 것들로 spark-out 을 수행한 후의 가공면에 대한 것들이다.

어떠한 방법에 의한 Machinable Silicon Nitride의 경우에 상대적으로 표면조도 값이 떨어짐을 알 수 있다. Machinable ceramics란 취성 미세 파괴과정이 제어, 촉진되어짐으로서 고능률 가공을 수행할 수 있으나 고경도의 표면조도는 연기 곤란함을 보여주는 것이라 하겠다.

2, 3의 조정법으로 가공면의 평탄도가 불량해 트루잉 효과에 문제가 있으나, 고경도의 화인 세라믹스에 대한 2의 조정법으로는 양호한 표면조도를 얻을 수 있어 간단한 공구를 사용한 resin bond diamond wheel의 현장조정법으로 트레이스형 원통 연삭 등에 널리 이용될 수 있다고 보여진다.

1의 조정법으로 우수한 가공면의 평탄도와 비교적 양호한 표면조도를 얻을 수 있어, 특히 플런지형 원통 연삭 등에 널리 적용할 수 있는 최적 방법으로 보인다.

표 8은 앞의 3가지 조정법들과 강제 연삭법에 의한 3가지 화인 세라믹스 소재의 가공면에 대한 진원도를 측정할 결과이다. 진원도면에 있어서도 SiC , Si_3N_4 소재에 있어 1의 조정법에 의해 가장 우수한 값을 얻을 수 있었다. 강제 연삭법에 의한 ZrO_2 공작물의 경우에도 비교적 양호한 측정치를 나타내는 것으로 보아 이 방법에 의해서도 초기진동은 상당히 잡혀질 수 있다고 보여진다.

그림 16은 ZrO_2 세라믹스를 대상으로 plunge 연삭가공을 할 때에 있어 총절입량의 증가 및 plunge 속도 변화에 따른 연삭 배분력의 변화를 알아본 것이다. 실험은 “Imple dresser 를 이용한 트루잉 + GC wheel 을 이용한 드레싱” 직후에 실행한 것이며 각 실험 데이터는 3회 실시한 값들의 평균값들이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 절입이 시작한후 총절입량이 얼마 이뤄지지 않은 상태까지는 연삭 배분력값이 급격히 증가했으나 그후부터는 총절입량이 계속 누적해가도 큰 변화없이 일정한 추세를 나타냈다. 이는 총절입량 10-20 μm 정도까지는 다이아몬드 슷들과 공작물간의 미세한 탄성변화, 공작물의 미세 deflection, 공작물의 진원도 및 아머와의 동심도, 공작물과 공구의 초기 가공면 상태 등의 복잡한 여러 요인들에의 작용으로 인하여 점차적으로 급격히 연삭 배분력의 증가가 이뤄지기 때문인 것으로 보인다. 또한, 플런지 속도가 증가할수록 연삭 배분력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 처음 배분력값들이 급격히 증가하고 있는 구간에서도 플런지 속도가 높을수록 더

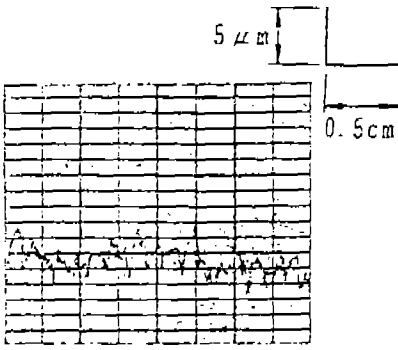
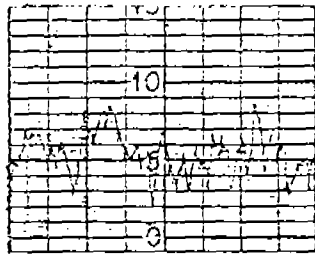
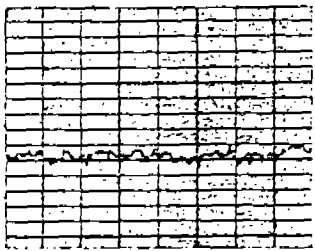
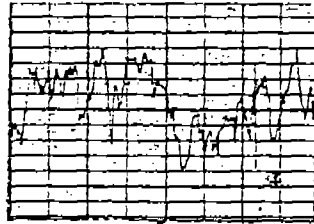
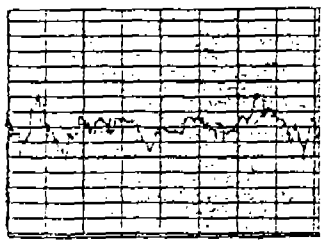
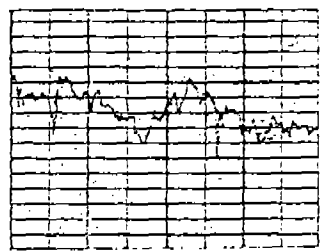
방법 \ 재질 방법 / 재질	Si ₃ N ₄	SiC
#80 Roll dresser 를 이용한 트루잉 + #80 GC wheel 을 이용한 드레싱		
#80 Imphy dresser 를 이용한 트루잉 + WA 220 H WA Stick 을 이용한 드레싱		
Single point diamond dresser 를 이용한 트루잉 + WA 220 H WA Stick 을 이용한 드레싱		

그림 15 트루잉, 드레싱 방법에 따른 화인 세라믹스의 표면조도 파형 비교

급격함을 볼 수 있는데 이는 그만큼 앞서 언급한 요인들이 빨리 감소되어지기 때문인 것으로 보여진다.

그림 17은 ZrO_2 , Si_3N_4 2 종류의 세라믹스에 대해 plunge 연삭가공을 실행할 시, plunge 속도의 증가에 따른 연삭 배분력의 변화를 비교해본 것이다. 이 실험은 "diamond 전착 roll dresser로 트루잉+WA stick형 슷돌로 드레싱"한 직후의 가공실험이며, 각 데이터 공히 총절입 $200 \mu m$ 을 실시했을 경우의 값들이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 2종류 모두 plunge 속도가 증가할수록 연삭 배분력 역시 증가함을 알 수 있다. 단지 그 증가하는 추세가 약간 다를 뿐이다. Si_3N_4 에 비해 ZrO_2 의 경우에 거의 선형적인 증가경향을 보이며, plunge 속도 약 $4 \mu m/rev.$ of workpiece 이후부터는 Si_3N_4 의 경우가 ZrO_2 의 경우에 비해 약 2배정도의 연삭 배분력값을 갖는 것으로 보인다.

표 8 각종 트루잉, 드레싱 방법에 의한 확인 세라믹스 가공면의 전원도 비교

(단위: μm)

지점	Si_3N_4 Ceramics	SiC Ceramics	ZrO_2 Ceramics
1	initial surface		initial surface
	10.9	20.1	12.5
2	single point diamond dresser를 이용한 트루잉 + WA stick을 이용한 드레싱법		강재롤 이용한 트루잉, 드레싱 ($V_p: 6 \mu m/rev.$ of workpiece)
	6.0	1.42	5.3
3	initial surface		initial surface
	4.6	22.8	11.3
4	diamond 전착 roll dresser를 이용한 트루잉 + GC wheel을 이용한 드레싱법		강재롤 이용한 트루잉, 드레싱 ($V_p: 4 \mu m/rev.$ of workpiece)
	2.4	0.9	1.4
5	initial surface		initial surface
	7.8	32.2	27.8
6	imply dresser를 이용한 트루잉 + WA stick을 이용한 드레싱법		강재롤 이용한 트루잉, 드레싱 ($V_p: 8 \mu m/rev.$ of workpiece)
	2.5	0.9	1.8
7	initial surface		initial surface
	18.6	17.9	75.2

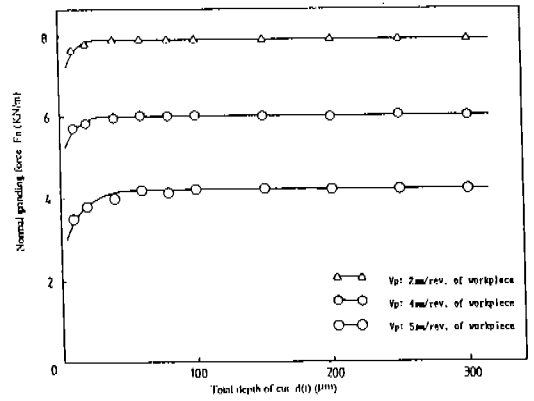


그림 16 총절입량 누적에 따른 연삭 배분력의 변화

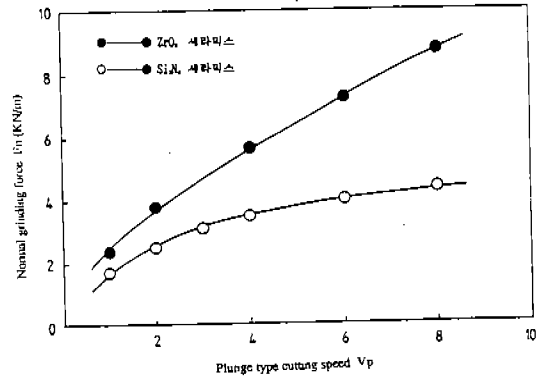


그림 17 Plunge 주속도에 따른 연삭 배분력의 변화

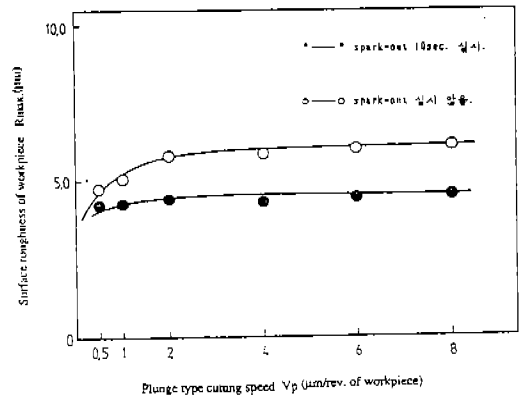


그림 18 플런지 속도의 증가에 따른 표면조도의 변화

그림 18은 ZrO_2 세라믹스에 대해 plunge 속도 변화에 따른 표면조도의 영향을 알아본 것이다. 실험조건 한도내에선 plunge 속도가 단계적으로 증가해도 표면조도에는 큰 영향을 주지 않는다. Plunge 속도가 극히 작은 $1\mu\text{m}/\text{rev. of workpiece}$ 이내의 범위에선 어떻게 보면 spark-out 과정과도 같은 미소 제거과정이 이뤄진다고 보여진다. 따라서 표면조도 역시 spark-out을 실행했을 경우와 거의 비슷한 경향을 보였다. 또한, 10초간의 spark-out을 실시한 바로는 20~30% 정도의 표면조도 개선이 이뤄짐을 찾아볼 수 있었다. 이 경우엔 plunge 속도에 무관하게 거의 일정한 표면조도값을 보였다.

그림 19는 다이아몬드 연삭 슷들의 입도를 #140, 270으로 변화시켜 ZrO_2 , Si_3N_4 두 종류의 세라믹스에 대하여 연삭 가공을 실시했을 경우의 연삭시간에 따른 슷돌 마멸량의 추이를 간접 측정해 알아본 것이다. 연삭 슷돌의 지립 돌출량이나 마멸량 등은 직접 측정방식으로 carbide steel ball tip을 이용한 방법 등을 구상해 보았으나 여기서는 고경도 폴리우레탄 수지에 전사시키는 간접 측정방식으로 근사값 만을 구해 보았다.

그림으로부터 알 수 있듯이 입도에 관계없이 어떠한 슷돌이던지 드레싱 작업으로 지립의 돌출을 마친 직후에 급격히 슷돌 마멸량이 증가하는 초기 마멸구간이 존재함을 알 수 있으며, 그 후엔 연삭시간에 관계없이 거의 선형적으로 마멸량이 증가하게 되는 정상 마멸구간이 존재함도 알 수 있다. 이는 트루잉후 드레싱 작업의 부족함이나 파잉으로 지립 개개의 절인이 너무 예리하게 형성되어질 수 있다는 점과 plunge 연삭과정의 칩수 생성과정으로부터도 알 수 있는 바와 마찬가지로 초기 과정에 축적된 연삭계의 탄성광과 공기과 피삭재간의 접촉 강성이 그 후 당분간 급작스럽게 풀어지기 때문인 것으로 보여진다. 여기서 입도가 낮을수록 슷돌의 마멸 속도가 높은 것은 다이아몬드 슷돌 입자가 클수록 연속 절인 간격이 길게 되어 피삭재의 절분역시 큰 형상을 띄게 되므로 각각의 절인에 작용하는 부하량도 증가하게 되어 슷돌의 마멸이 자연

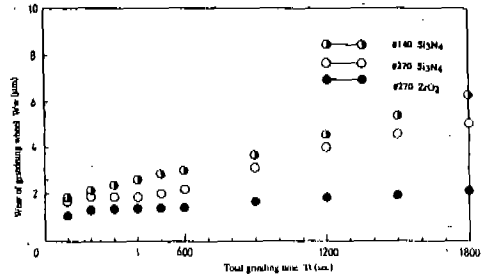


그림 19 다이아몬드 연삭 변화에 따른 슷돌의 마멸량 변화

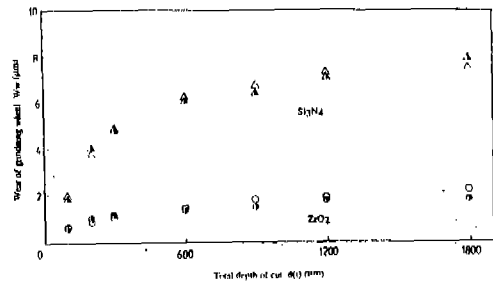


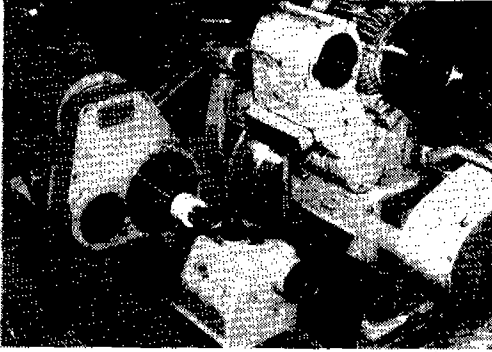
그림 20 슷돌대 총절입량의 증가에 따른 슷돌 마멸량의 변화

증가하게 되는것이 아닌가 하는 생각이 든다. 또한, 동일한 plunge 연삭 속도에서 Si_3N_4 가 ZrO_2 보다 슷돌의 마멸 정도를 높이게 된 것은 그만큼 경도가 높기 때문인 것으로 사료된다.

다이아몬드 연삭 슷돌의 집중도(concentration)가 화인 세라믹스의 가공 결과에 영향을 미치는가를 알아보기 위해 집중도값을 100과 75 두가지 택해 실험적으로 검토해 보았다.

그림 20은 Si_3N_4 와 ZrO_2 두가지 화인 세라믹스에 대해 집중도가 다른 두 종류의 다이아몬드 연삭 슷돌로 연삭하는 경우에 있어 슷돌 마멸량과 슷돌대 이동량과의 관계를 나타내본 것이다. 역시 슷돌의 드레싱 직후 슷돌 마멸량이 급격히 증가하는 초기 구간이 존재하고 연삭의 진행에 따라 거의 선형적으로 증가하는 정상 마멸구간이 존재함을 찾아볼 수 있었다.

다이아몬드 연삭 슷돌의 집중도 변화에 따른 슷돌 마멸량의 큰 차이는 찾아볼 수 없었다. 따라서 현장에서 다이아몬드 연삭 슷돌을



* Alumina ceramics의 정밀 원통 연삭 실험 예.



* Cylinder liner, gas turbine rotor, mechanical seal 등의 정밀 부품 예.

그림 21 본 연구의 단계와 선진국의 Automotive parts 개발 예.

사용해 화인 세라믹스를 가공할 때 생산비적인 측면을 고려한다면, 굳이 지립이 많이 첨가되었다고 공구값이 비싼 집중도 100 혹은 그 이상의 것들을 고집하여 쓸 필요는 없다고 보여진다.

3. 맺 음 말

이상과 같이 High Strength Engineering Ceramics의 대표적 및 소재에 대하여 Diamond wheel을 사용한 평면, 외경 원통 연삭

을 실험적으로 수행함으로써 고능률, 고정도의 가공 정립을 위한 기초적 지식을 얻을 수 있었다.

아울러 다음과 같은 몇가지 사항들의 결론을 내릴 수 있었다.

1) 고정도의 세라믹스 소재의 연삭 가공시 금속재의 경우와 달리 배분력이 주분력보다 월등히 커, 그 분력비가 2배 정도 이상에 달했다.

2) 화인 세라믹스 소재 역시 Spark-out 과정에 의해 표면조도 30%이상의 향상을 얻을 수 있었다.

3) Diamond wheel의 가공면에 대한 최적 조정법으로 평면 연삭의 경우엔 "C 슛돌의 Brake식 Truier를 이용한 traverse식 Truing + WA stick형 Honing stone을 이용한 Dressing", 원통 연삭의 경우엔 "Diamond 전착 Roll Dresser를 이용한 Truing + GC wheel을 이용한 Dressing" 방법을 실험적으로 구하였다.

4) Diamond wheel의 세라믹스 가공시, 집중도(Concentration)의 연삭결과에 대한 영향은 거의 찾아볼 수 없었다.

5) 본 실험조건내의 가공결과로서 표면조도는 최대 Rmax. 3-5 μ m, 진원도는 최대 2 μ m까지 얻을 수 있었다.

6) 가공 실험결과 및 데이터들은 Computer Simulation Program의 D/B화로, 기술도입 추진업체로의 지침서로서 활용 가능하다.

참 고 문 헌

1. 窯業協會, 세라믹스製品および半製品의除去加工, 세라믹스, 18-6(1983), p. 506.
2. 石油泰弘, 세라믹스研削加工, 工業材料, 28-12(1980), p. 29.
3. 稻崎, 最近の高能率研削技術, 87-783(昭和 59), p. 133.
4. 今中, ガラス, 세라믹스의砥粒加工, 精密加工, 41-7(昭和 50), p. 672.
5. 岡村健二郎外一人, 砥粒切れ刃による切削現象の研究(第六報), 精密機械, 33-5

- (1967), p. 312.
6. セラミックス加工ハンドブック編集委員会, セラミックス加工ハンドブック, 1988.
 7. 정윤교, 강재훈, 화인세라믹스의 연삭가공특성, 한국정밀공학회 '89 추계 학술대회초록집, 1989, p. 91.
 8. 이재경, 강재훈, 세라믹가공기술개발(1), 한국기계연구소제출보고서, 1989.
 9. 中尾 博, ダイヤモンド砥石によるセラミックスの加工, 機械と工具, 10, 1982, p.1.
 10. 伊藤政治, 窒化物系, 炭化物系構造用セラミックスの精密研削, セラミックス, 18-3 (1983), p. 479.
 11. A. G. Pinson, Diamond Grinding of Structural Ceramics-Shape of things to come, SME Tech. paper, MR83-195 (1983), pp. 1~8.
 12. 大原保之, ダイヤモンド砥石によるセラミックスの研削加工, 機械と工具, 8, 1979, p. 72.