

<논문> SAE NO. 933755

# 알루미나 세라믹스 부품의 최적화 연삭 가공공정에 관한 기초적 연구

-기계적 특성치에 의한 최적 가공 기법의 판명-

## An Experimental Study on the Optimum Grinding of Alumina Ceramic Parts

강 재 훈,\*      김 원 일\*\*  
J. H. Kang,      W. I. Kim

### ABSTRACT

Recently, engineering ceramics called as the 3<sup>rd</sup> material have been concerned significantly with some excellent mechanical properties and many functions as new materials for high precision mechanical components and engineering parts for at large. Then, for designing engineering parts using engineering ceramics, bending strength value data with high reliability is more essential than any other mechanical properties.

But, because of brittleness and structural characteristic, it is very hard to grind with conventional tools, and the generation of cracks and various defects of engineering ceramics parts during grinding machining process are serious problems. Thus, in present study, surface grinding experiments with various machining conditions using resin bond diamond wheels are carried out to obtain the most excellent quality of testpiece surface and optimum step of grinding process for the high efficient stock removal rate to save running time.

As the results from grinding experiments and 3-points bending strength test of ground Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics parts on Korean Standard, manufactured in our country and Japan, basic technology and know-how to develop the optimum grinding machining conditions and also high bending strength values with high reliability are obtained.

주요기술용어 : Engineering ceramics(엔지니어링 세라믹스), surface grinding, diamond wheel(평면 연삭), bending strength(다이아몬드), Alumina ceramics(알루미나 강도), high reliability(알루미나 세라믹스), Weibull plotting(고 신뢰성)

### 1. 서    론

근래에 들어 항공·우주 산업, 정보·통신기기 산업, 광전자 산업 등 미래지향적 고부가가치의

첨단 산업 전반에 대한 경쟁적인 신제품 개발 연구가 가속화되면서, 가혹한 분위기 하에서도 고신뢰도의 우수한 기계적 특성치와 다양한 기능성을 발휘할 수 있는 고경도 기계·구조용 엔

\* 정회원, 한국기계연구원 기계자동화연구부 가공기술연구실 선임연구원

\*\* 경남대학교 공대 기계공학과 교수

지니어링 세라믹스(High Strength Engineering Ceramics)에 대한 소재 대체화가 강력히 요구되어지고 있다.<sup>1,2,3,4)</sup> 그런데 이러한 세라믹스 소재를 기계 요소 부품이나 구조물의 부재 등으로 활용하기 위해선 설계 기법상 기계적 특성치, 그중에서도 특히 굽힘 강도치 데이터(Bending strength value)와 강도 보증을 위한 신뢰성이 반드시 필요하다.

최근엔 국내에서도 G7 연구과제의 도출 등 21세기를 위한 첨단 산업 개발 목표가 설정되면서 단순한 성형, 소결 제품인 전자기용 세라믹스 부품 용도에서 탈피하여 고정도의 기계구조용 세라믹스 가공 부품 개발을 위한 자립적인 연구 추진이 시급하게 되어졌다. 그런데 소결 공정에 의한 변형 발생이 불가피한 바, 불필요한 부위의 제거나 규격에서 제시하고 있는 치수 및 형상 정도, 상하면 품질 등을 만족시키기 위해서는 후가공이 필수적인 바, 고정도와 취성의 난삭성을 타개할 수 있는 고능률적 가공 기법이 우선적으로 요구된다.<sup>5,6,7,8)</sup> 그러나 세라믹스는 소재 구조상의 차이로 금속에 비해 가공 조건에 의한 강도 저하 내지는 표준 편차가 매우 크다고 알려져 있다. 따라서 동일한 소재로도 최적 가공 조건을 사용하게 되면 가공 결함이나 가공 변질층 등을 최대한 억제할 수 있고 결과적으로 기계적 특성치를 최대한 발휘할 수 있게 되므로 소재의 고품위화를 추구할 수 있게 된다고 볼 수 있다.<sup>9,10)</sup>

본 연구는 알루미나 세라믹스(Alumina ceramics)소재의 굽힘 강도 측정용 시험편을 비교적 단순한 가공 부품으로 선정하여 신연삭공구인 다이아몬드 연삭 스톨(Diamond grinding wheel)을 이용한 고능률적 연삭 가공을 실행함에 있어, 가공 소요시간의 절감 및 시험편의 기계적 특성치의 최대 발휘 효과를 동시에 얻을 수 있는 소위 최적 가공 기법을 확립하는데 기초적 지침이 될 수 있는 연삭 가공 조건을 정립하고자 실험적으로 수행한 것이다.

## 2. 고능률적 평면 연삭 가공 실험을 위한 조건 설정의 이론적 배경

### 2.1 고능률적 제거 가공시의 최적화 기법의 필요성

세라믹스의 기계적 특성 평가를 위한 굽힘 강도 시험편에 대한 규격은 KS L1591 “고성능 요업 제품의 굽힘 강도 시험 방법”에 잘 명시되어 있다. 한편, 국내의 세라믹스소재 제조 업체들은 아직 성형, 소결후 그대로 혹은 가공 방법이나 조건에 대한 별다른 인식없이 가공, 제작하여 특성 데이터시험을 함으로써 일본등의 선진국 제품과 거의 동등한 소재를 생산해내면서도 최대 특성치를 얻지 못하고 있다. 초기 원재의 변형이나 불필요한 부위를 제거 가공하여 우선 요구 치수 및 형상으로 제작하기 위해선 고능률이 고려되어야 하며, 강도 보증을 위해선 가공으로 인한 결함이 최대한 억제된 가공면 품위가 창출되어야 한다. 마치 미소한 파피의 연속 발생으로 이뤄지는 듯한 세라믹스의 기계적 제거 가공에 있어서 파피로 야기되어 발생, 성장되어지는 크랙 침투 선단이 강도치에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 최적화 기법을 통한 고능률적 평면 연삭을 수행함으로써 이러한 문제를 해결해야만 한다.

### 2.2 고능률적 연삭을 위한 실험 조건 설정의 이론적 배경

공작물 이송 속도의 고속화가 실상 어렵다고 할 수 있는 평면 연삭의 경우에 있어서는, 느린 속도로 공작물을 이송시킨다 해도 연삭 가공 질 입량을 크게 해줌으로써 우선 고능률을 얻을 수 있지만 연삭 공구가 공작물과 접촉하게 되어지는 접촉호의 길이가 자연히 길어지게 된다. 따라서 그 연삭 저항이 커지게 되는 한편 현저한 취성 파괴 현상을 야기시키게 됨으로써, 결국 가공면의 표준 조도도 상대적으로 악화시키게 되어진다. 그리고 이러한 연삭 과정에 있어선 연삭 공정시의 냉각수 공급 역시 어려워지게 되어 연삭 발생 열이 역시 증대되어짐으로써 표면 품위를 저하시키기도 한다.

한편, 평면 연삭 가공에 있어서의 표면 조도 특성 방정식은 다음과 같이 나타내 볼 수 있다.

$$R_{max} = \frac{1}{16} \left( \frac{1}{d_s} + \frac{1}{d_w} \right) \left( \frac{V_w}{V_s} a \right)^2 + \frac{1}{8} \frac{b^2}{r} \left( \frac{f}{b} \right)^2 \quad (1)$$

- $d_s$  : 슷들의 직경
- $d_w$  : 공작물의 직경
- $a$  : 연속 절인 가격
- $b$  : 가공 표면에 남은 흔적
- $f$  : 1회전당 이송 거리
- $B$  : 슷들의 너비

평면 연삭에 있어서 단위 지립이 배출하는 chip의 기하학적 형상에 의한 최대 절입 깊이량  $g$ 값은,

$$g = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\Delta} \cdot \sqrt{\frac{1}{d_s} \cdot \left( \frac{V_w}{V_s} \right)} \quad (2)$$

접촉호의 길이  $l_b$ 는,

$$l_b = \sqrt{\Delta} \cdot \sqrt{d_s} \cdot \left( 1 + \frac{V_w}{V_s} \right) \quad (3)$$

이다.

- $d_s$  : 슷들의 직경
- $\Delta$  : 공작물 1회전 당의 슷들 절입량

이 이론식들로부터 가공 조건들이 가공면의 표면조도에 미치는 영향을 간단히 추정해 볼 수 있다. 즉, 이 식들을 연관시켜 보면  $R_{max}$ 는  $g$ 와  $l_b$ 값들에 의해, 그리고  $g$ 와  $l_b$ 값은  $V_{ws}$ 과  $\sqrt{\Delta}$  값들에 의해 좌우되는 함수임을 알 수 있다. 따라서 표면 품질을 해치지 않는 범위 내에서 가공 능률을 높이기 위해서는 임의의  $g$ 값을 설정한 후 이에 대한  $V_w$ ,  $V_s$ 과  $\Delta$ 값들을 결정하면 된다고 할 수 있다. 반면에 실질적으론 속도비  $V_w/V_s$ 과 연삭 깊이  $\Delta$ 값을 크게 할수록 가공 능률은 향

상되어지지만  $g$ 값이 증대되어짐에 따라 가공면은 거칠어지고 슷들 작업면 상의 각 지립들이 받는 부하가 커지게 된다.

본 실험에 있어선 연삭 슷들 및 공작물 주속도 등의 다양한 연삭 가공 조건 변화에 따른 여러 소재의 세라믹스에 대한 연삭 가공 특성에 대해선 이미 보고한 바와도 같이 다양하게 파악해 본 바 있으므로, 절입량과 테이블 이송 속도의 변화에 따른 연삭 저항, 가공면 표면조도, 연삭력 등의 경향을 우선 간단히 살펴보고, 속도비  $V_w/V_s$ 는 일정하게 하되 일반 범용 연삭반을 사용하는 가공임을 고려하여 그 허용 범위 내로 절입량  $\Delta$ 값의 조건을 여러 가지로 변화시켜 보는 것을 주로 하는 고능률적 연삭을 실행해본 후, 이 둘에 대한 각각의 강도치들을 구하여 비교해 보았다. 그리고 동일 사양의 한, 일 알루미늄 세라믹스 소재에 대한 특성치를 평가, 비교해보고 절입량을 크게한 전공정에 의하여 야기될 수 있는 가공면 상의 결함들을 미세 절입량을 제어하는 후가공으로써 과연 억제할 수 있는 효과를 얻을 수 있는가에 대해서도 검토해 보았다.

### 3. Diamond wheel을 사용한 고능률적 평면 연삭 가공 실험

#### 3.1 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 시험편은 국내와 일본서 각각 주문 제작한 동일 사양의 순도 99.7% 알루미늄 세라믹으로서, 성형 소결한 디스크형 원재의 크기는 (D)80×(t)4mm이다. 연삭반은 특별 사양 설계후 주문 제작한 횡축 평면 연삭반으로서, 1.5Kw급 모터 구동용 주축을 제작하고 동강 성적 보안을 위한 column 보강화 설계 및 제작을 하였으며, 연삭 주속도의 무단 변속화를 위한 장치를 장착하였다. 또한, 비자성체인 세라믹스 칩의 효율적인 제거를 위하여 원심 분리식과 paper filtering의 절삭칩 제거 장치를 추가로 부착하였다. 가공 공구로는 설계, 주문 제작한 resin bond계 diamond wheel을 사용하였다.

원재를 우선 diamond wheel을 사용한 low speed

Table 1. Comparison of grinding wheel spec. and depth of cut

(unit : micron/pass)

testpiece group No.	Mesh of diamond wheels and depth of cut			
	#80	#140	#270	#600
1	20			
2	5			
3	20	5		
4		5		
5	5	5		
6	10	5		
7	10	10	5	
8	10	10	5	2

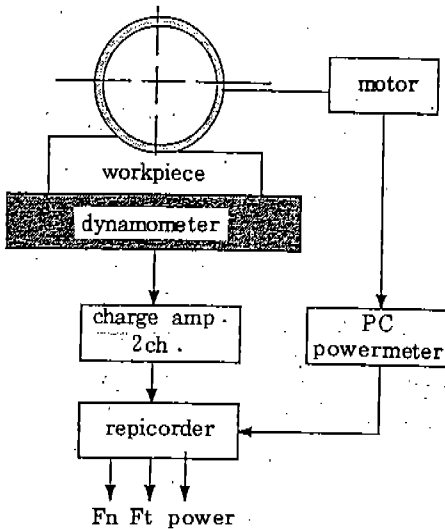


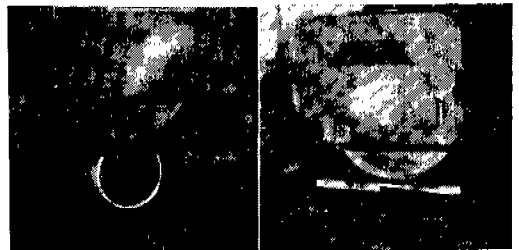
Diagram of experiment system



Photograph of experimental system

cutting M/C으로 한 번이 시험편 길이인 40mm의 정사각형 판재로 만들었다. 그리고 연삭가공으로 그 상하면을 KS규격대로 4×3×40mm stick 형이 되도록 제거 가공 및 다듬질 가공을 하였다. 이때의 절입량 가공 조건을 변화시켜본 각 경우를 비교하여 Table. 1에 나타내 보았다.

세라믹스의 비자성 때문에 금속 마운트에 접착제 등으로 세라믹스 사각판을 부착하여 테이블에 고정시켰으며, multi-cutting M/C(일본 MARDO Co.제, Ceramicron MX-833)을 사용하여 시험편 칩수 너비대로 절단 가공한 후, 경우에 따라 모떼기 성형용 전용기(일본 MARDO Co.제, MG401)상에서 다이아몬드 래핑 디스크를 사용하여 정확하게 45도의 모떼기 가공을 실행함으로써 최종 시험편을 완성한 후 간이 측정 시스템을 장착한 만능 재료 시험기 상에서 급힘 강도 측정 시험을 시행하였다.



Truing process : Dressing process

Fig.1 Diagram and photograph of experimental system

Fig.2 Photograph of truing and dressing process

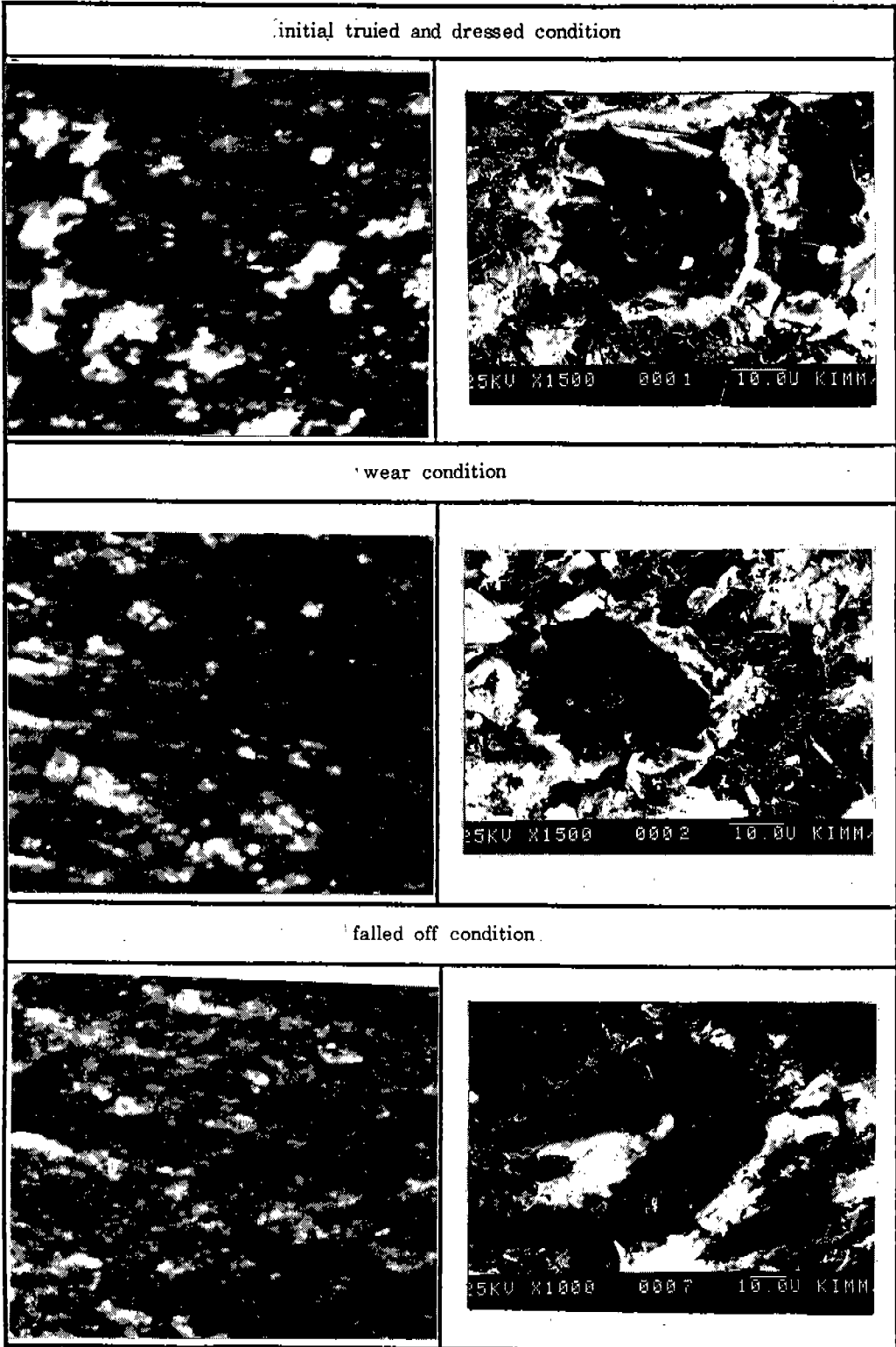


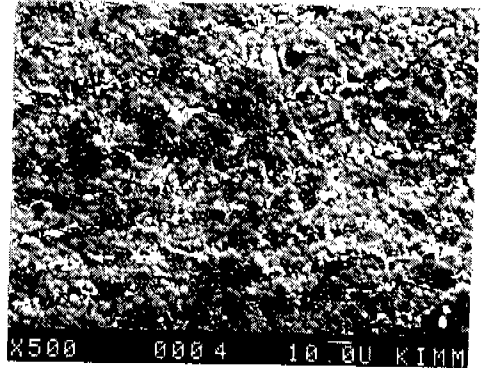
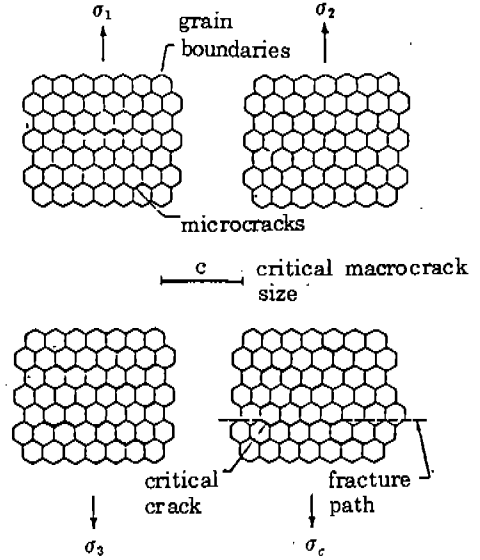
Fig.3 Comparison of wheel surface and diamond grain cutting edge with various condition

연삭 저항과 연삭력을 In-process로 측정하기 위하여 tool dynamometer(스위스 키슬러 Co.제, piezoelectric type, 9207 A형), Charge amplifier(스위스 키슬러 Co.제, 504A, 2 channel), PC power meter(일본 YOKOGAWA Co.제, P201), Repicorder(일본 SANEI Co.제, A2101)등으로 실험 측정 시스템을 구성해 보았으며 이에 대한 그림과 diagram을 Fig.1에 나타내 보았다. 또한, 가공면의 표면 조도, 표면 형상 및 가공 결함 등의 가공 품질을 측정해보고자 표면조도 측정기(영국 Taylor-Hobson Co.제, 촉침식, Surtronic-3형)와 Stereoscopic microscope(일본 Nikon Co.제, 카메라 부착형) 및 SEM 등을 활용하였다. Fig.2에는 트루잉 및 드레싱의 공정 사진을 나타내 보았다.

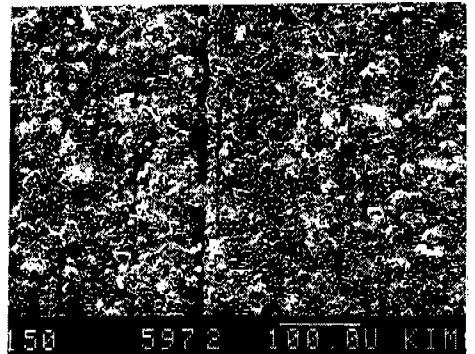
3.1.1 연삭 저항, 연삭력, 가공면 조도 경향 등에 대한 분석

다이아몬드 연삭 입자의 절인(cutting-edge)이 트루잉, 드레싱 과정을 통하여 창성되어지고 누적 가공량이 증가함에 따라 변화되어 가는 형태를 Fig.3에 비교하여 나타내 보았다. Fig.3은 다이아몬드 연삭 입자가 트루잉, 드레싱 직후 (a)와 같이 적당히 잘 돌출되어지고(연삭 입자 크기의 약 1/3 - 1/2 정도가 결합체 층으로부터 돌출되어진 상태가 최적임) 절인이 형성되어진 상태에서 가공시간의 누적에 따라 (b)와 같이 마멸이 진행되어져 돌출 높이가 작아진 후, 결국엔 (c)와 같이 탈락 되어져 연삭 입자가 위치했던 자리가 비워진 상태를 비교하여 보여주는 것이다. 따라서 고능률적인 제거 가공을 위해선 주기적으로 슷돌 가공면을 재조정함으로써 절인들을 재창출할 필요가 있음을 알 수 있다.

국내 업체가 제작한 경우와 본 실험을 통해 제작한 경우의 시험편 가공면을 SEM 촬영하여 Fig.4에 비교해 나타내 보았다. Fig.4의 (a)는 업체들이 연삭의 개념없이 소결한 세라믹스를 래핑만 하여 KS 규격대로 만든것으로 고경도 소재에 대한 강한 압입부가력으로 인해 크랙 등의 결함이 눈에 띄는 것을 나타낸 것이다. 소재의 matrix 구조상 grain boundary에 걸쳐 크랙이 전진되고 있음을 보이기 위해 (b)의 그림과 배율을 달리하였으며, 크랙 발생 부위는 그림에 표기하



(a) surface of testpiece machined at manufacturing company



(b) surface of testpiece ground by our team

Fig.4 Comparison of surface quality of testpieces ground by our team and machined at manufacturing company

였다. (b) 그림의 가공 조건은 슷돌 주속도 1,600 m/min, 테이블 이송 속도 8m/min, 철입량 6 $\mu$ m/pass이며, SDC140N1004W-3.0의 슷돌을 사용하여 습식으로 실행하였다. 전자의 경우엔 표기한 바와 같이 crack 등의 결함을 지니고 있어 이로 인한 강도치 저하가 현저히 나타날 수 있다고

보인다. 다이아몬드 휠을 사용하는 세라믹스 연삭 가공시 가공면에 그림과 같은 빗살 무늬가 발생 되어짐을 알 수 있는 바, 이는 상호 고경도의 공구와 공작물 간에 발생되어지는 무기 재료 특유의 모성 창성 과정에 기인한 것으로 볼 수 있다. 양 경우에 대한 시험편 표면의 가공면조도를

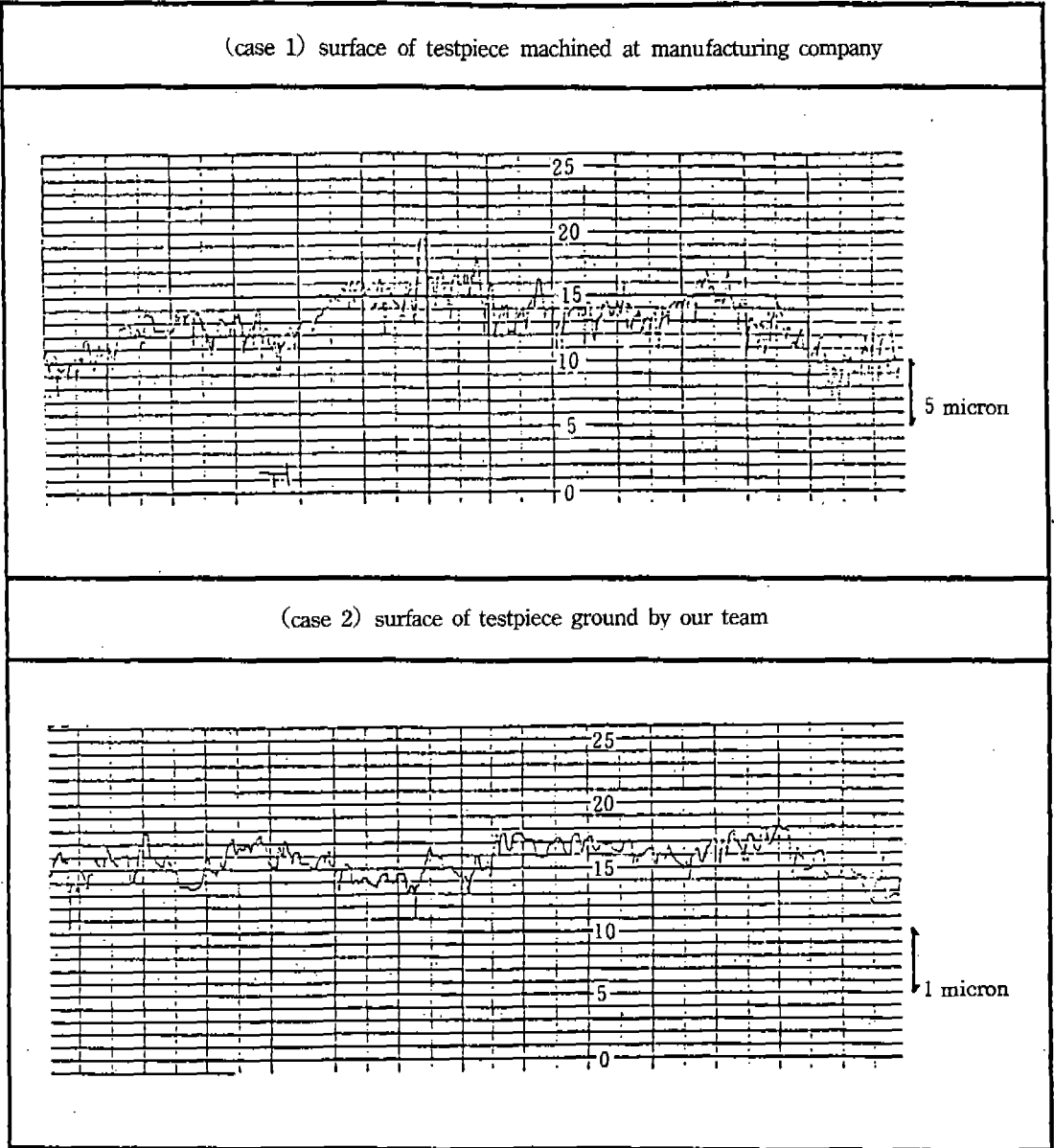


Fig.5 Comparison of surface roughness and wave from

표본 측정하여 Fig.5에 비교하여 나타내 보았다. Fig.5의 (case 2)가공 조건은 Fig.4의 (b)경우와 동일하며 단, spark-out을 4회 부가하여 실시하였다. 표면조도의 차이는 업체에서 제작한 경우의 것은 제거 가공성이 비교적 낮은 래핑 가공만을 약간 실시했던 관계로 가공면 상의 초기 결합이 아직 상당량 잔재했기 때문이라고 생각되어지며, 역시 전자의 경우에 표면조도(surface roughness)나 표면형상(surface waveform) 측면에서 모두 불량함을 알 수 있었다.

금속과 세라믹의 연삭 저항 분력비( $F_t/F_n$ )를 측정하여 Fig.6에 비교해 나타내 보았다. Fig.6은 연삭 가공성 평가를 위한 실험 수행시 구했던 데이터들 중의 하나로서, 가공 조건은 슛돌 주속도 1,600m/min, 테이블 이송 속도 10m/min, 절입량 10 $\mu$ m/pass이며, SDC140N100RW-3.0의 슛돌을 사용하여 습식으로 실행하여 구한 것이다. 그리고 가공 데이터의 편차는 세라믹스 소재의 경우에 상대적으로 약간 크게 나타났다. 분력비가 알루미늄이나 세라믹스의 경우에 약 3배 이상 상대

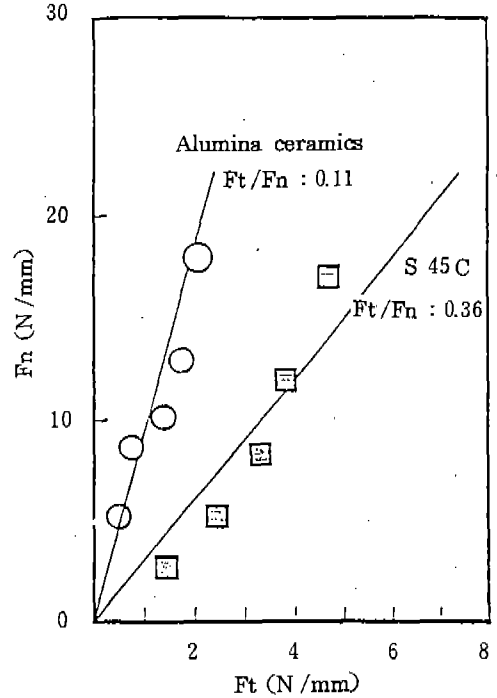


Fig.6 Comparison of grinding force ratio( $F_t/F_n$ )

Table 2. Experimental machining conditions

Grinding condition	grinding wheel speed : $V_w=1,600$ m/min table speed : $V_s=6, 10, 14$ m/min depth of cut : $\Delta 2,4,6,8,10,15,20$ $\mu$ m/pass using, grinding wheel : 1A1 type straight wheel resin bond diamond wheel (D)180 $\times$ (d)31.75 $\times$ (W) $\times$ (t)3mm SDC 80 N 100 RW-3.0 SDC 140 N 100 RW-3.0 SDC 270 N 100 RW-3.0 SDC 600 N 100 RW-3.0
Truing condition	using, brake type truer : C60K7VGW, 75 $\times$ 25 $\times$ 12.7mm feed-rate : $f_d=75$ $\mu$ /rev.of workpiece depth of cut : $t=20$ $\mu$ /pass
Dressing condition	using, stick type honing stone : WA220H6V(21 $\times$ 21 $\times$ 200mm) table speed : $V_s=100$ mm/min depth of cut : $t=1$ mm/pass total removed volume : 1,000mm <sup>3</sup> mm using, soluble type coolant



적으로 큰 값을 나타내 보이고 있는 바, 연삭 배분력(normal grinding force :  $F_n$ )의 값이 이렇게 큰 것은 고경도의 피삭재에 대한 숫돌 절입의 절입이 상당히 어렵기 때문이라 여겨진다. 이는 세라믹 소재에 대한 연삭 가공이 미세(micro level) 파괴 현상에 의해 이뤄지는 것임을 감안할 때, 취성재의 가공면으로부터 그 만큼 깊이 파괴 결함을 잔재하도록 하는 요인이 될 수 있다고 생각할 수 없다.

Fig.7,8,9는 모두 본 실험에서 사용한 알루미늄 세라믹 시험편에 대한 데이터들로서, 우선 절입량과 테이블 이송 속도의 변화에 따른 연삭 저항값의 경향을 Fig.7에 나타내 보았다. 절입량을 크게 할수록, 테이블 이송 속도를 빠르게 할수록 연삭 저항값이 상대적으로 더 크게 증가했으며, 주분력  $F_t$ 보다는 배분력  $F_n$ 의 경우에 그 증가 경향이 두드러지게 나타났다.

절입량의 변화에 따른 가공면의 표면조도 경향을 Fig.8에 나타내 보았다. 절입량을 크게 할수록 표면조도  $R_a$ 값은 그다지 큰 악화 경향을 보이지 않지만  $R_{max}$ 값은 큰 폭으로 악화되어지며, 약  $\Delta 6\mu\text{m/pass}$  정도의 절입량을 임계로 비교적 큰 절입량을 가하는 경우엔 상대적으로 그 표준편차도 커짐도 알 수 있었다. 이러한 경향들은 모두 절입잔재량이 그 만큼 더 커지고 있음을 나타내 주는 것으로 보인다.

절입량의 변화가 연삭력에 미치는 경향을 Fig.9에 나타내 보았다. 연삭 저항의 경향과 마찬가지로 절입량을 크게 할수록 연삭력이 증가하였으며, 큰 절입량일수록 증가 폭과 표준편차가 커짐을 알 수 있었다.

### 3.1.2 기계적 특성치 경향에 대한 분석

만능 재료시험기 3점 굽힘 강도 측정용 간이 시스템을 설계, 제작하여 부착한 후, KS 규격대로 측정 실험을 하여 얻은 결과치들을 굽힘 강도 계산식과 표준편차 계산식에 대입하여 각 데이터를 얻었다.

Table.34는 각 10개씩의 시험편을 대상으로 시험하여 얻은 굽힘 강도치 데이터들의 일례를 보여주는 것으로, (1)은 국내 업체서 연삭 가공 없이 제작한 시험편의 경우, (2)는 본 실험 조

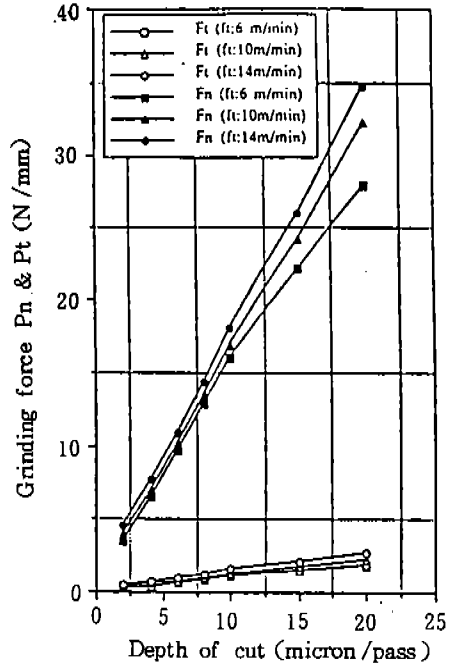


Fig.7 Effects of depth of cut & table speed on the grinding forces  $F_n$ ,  $F_t$

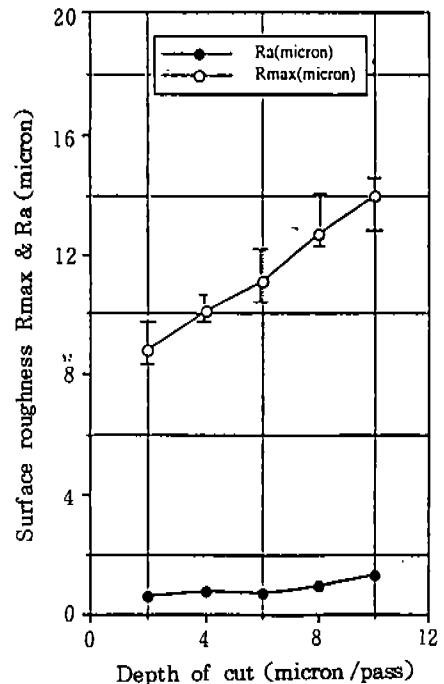


Fig.8 Effect of depth of cut on the surface roughness  $R_{max}$  &  $R_a$

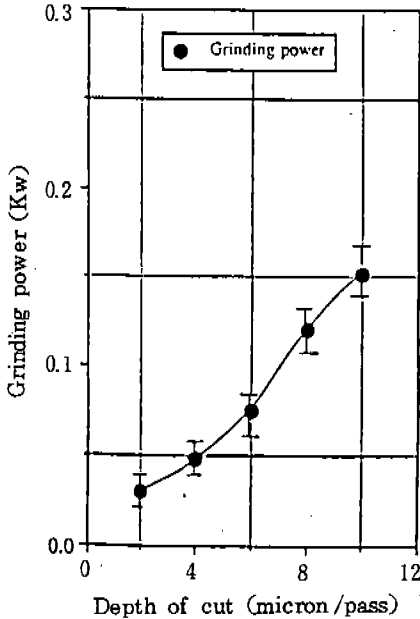


Fig.9 Relation of between depth of cut and grinding force

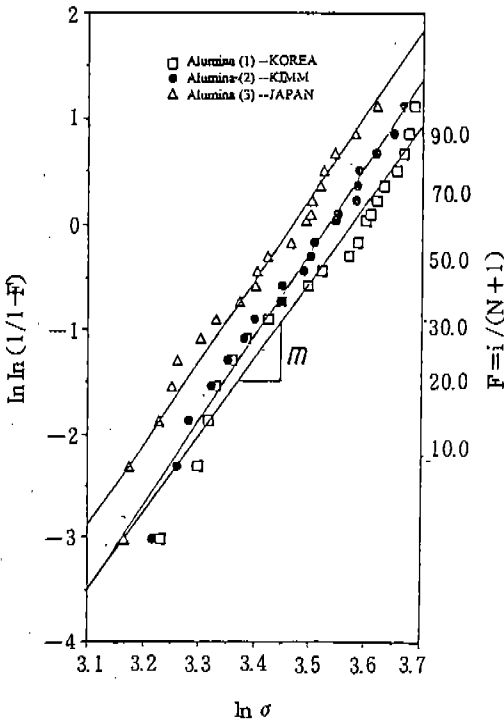


Fig.10 Weibull plotting graph for comparison of testpieces machined with various grinding conditions.

건들중 슷돌 주속도 1,600m/min, 테이블 이송 속도 8m/min, 절입량 5 $\mu$ m/pass이며, SDC140N100 RW-3.0의 슷돌을 사용하여 습식 연삭으로 실행한 시험편의 경우이고, (3)은 일본에 (2)와 동일한 연삭 가공 조건으로 주문, 제작하여 구입한 시험편의 경우에 대한 각각의 데이터들이다. Table.3으로부터 알 수 있듯이 우선 본 실험을 통하여 얻은 각 집단들의 평균 굽힘 강도치들이 약 30~34kg/mm<sup>2</sup>의 범위으로써, 동일 사양의 일본제 소재 경우(약 33~36kg/mm<sup>2</sup>)보다는 약간 낮은 분포를 보이고 있는 바, 소재 제조상의 문제가 이에 영향을 미치는 것으로 사료되지만 아직 확실히 단정지어 말할 수는 없다고 생각된다. 단, 최소 요구치 25kg/mm<sup>2</sup> 보다는 월등히 양호하며, 일반 제조업체에의 시험편으로 부터 측정된 강도치들(약 30kg/mm<sup>2</sup>이하)에 비해서 매우 우수한 결과치라고 단정지어 말할 수 있다. 이것은 각각의 가공제작 방법에 따라 굽힘 강도치의 변화가 많이 발생되어질 수 있다는 것을 보여주기도 하는 것이다.

가공 조건의 우위성에 대해서는 평균 강도와 표준 편차 및 Weibull 계수 m(도표상의 직선 기울기 값으로 값이 클 경우 표준 편차가 작으므로 우수함) 등을 기준으로 평가할 수 있다. Table.3과 Fig.10으로부터 알 수 있듯이 표준 편차 및 Weibull 계수 면에 있어 Table.1의 시험편 집단 8의 경우는 일본 유명 제조업체가 제시하는 데이터와 거의 동등하며 단, 평균 강도에 있어 약간 뒤지는 것으로 나타나고 있다.

절입량의 크기가 굽힘 강도치에 미치는 경향을 알아보기로 동일한 입도의 다이아몬드 휠을 사용하면서 절입량을 변화시키는 경우의 강도치들을 Fig.11에 비교하여 나타내 보았다. 비교적 차이가 두드러지게 나타날 수 있을 것으로 생각되는 #80의 것을 사용하였으며, 시험편 집단 1과 2의 결과를 비교한 것이다. 평균 강도, 표준 편차 및 Weibull 계수(그래프 상의 직선 기울기 m) 등의 모든 면에서 거친 슷돌 #80의 경우 절입량이 작은 경우에 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 거친 슷돌 #80의 경우 절입량의 크기가 가공 결함에 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었으며, 따라서

Table 3. Calculated data of various factors for Weibull plotting

rank	Sic		A1203(1)		A1203(2)		A1203(3)		F=i/N+1	ln ln (1/1-F)
	$\sigma$	ln $\sigma$	$\sigma$	ln $\sigma$	$\sigma$	ln $\sigma$	$\sigma$	ln $\sigma$		
1	23.2	3.144	23.7	3.165	24.9	3.215	25.3	3.231	0.0476	-3.020
2	25.2	3.227	23.9	3.174	26.1	3.262	27.1	3.299	0.0952	-2.302
3	25.6	3.243	25.2	3.227	26.6	3.281	27.6	3.318	0.1429	-1.870
4	27.4	3.310	25.8	3.250	27.7	3.321	27.9	3.329	0.1905	-1.554
5	28.2	3.339	26.1	3.262	28.5	3.350	28.8	3.360	0.2381	-1.302
6	28.5	3.350	27.2	3.303	29.4	3.381	29.5	3.384	0.2857	-1.089
7	28.6	3.353	27.9	3.329	29.9	3.398	30.7	3.424	0.3333	-0.903
8	28.9	3.364	29.1	3.371	31.3	3.444	31.4	3.447	0.3810	-0.735
9	29.4	3.381	30.0	3.401	31.4	3.447	33.0	3.496	0.4286	-0.581
10	30.8	3.427	30.1	3.404	32.7	3.487	33.8	3.520	0.4762	-0.436
11	31.1	3.437	30.6	3.421	33.1	3.499	35.5	3.569	0.5238	-0.299
12	31.4	3.447	31.9	3.463	33.3	3.506	36.1	3.586	0.5714	-0.166
13	31.6	3.453	32.8	3.490	34.6	3.544	36.6	3.600	0.6190	0.036
14	32.4	3.478	33.1	3.499	34.7	3.547	36.9	3.608	0.667	0.094
15	33.4	3.509	33.2	3.502	35.9	3.581	37.3	3.619	0.7143	0.225
16	33.7	3.517	33.7	3.517	36.0	3.583	37.7	3.630	0.7619	0.361
17	33.9	3.523	33.9	3.523	36.1	3.586	38.6	3.653	0.8095	0.506
18	34.1	3.529	34.5	3.541	37.2	3.616	39.1	3.666	0.8571	0.666

Table 4. Comparison of average bending strength value and standard deviation value according to variation of machining conditions

(unit : micron)

Testpiece Group No.	Mesh of diamond wheel and depth of cut (mm/pass)				average bending strength value kgf/mm <sup>2</sup>	Standard deviation value $\sigma$
	# 80	# 140#	# 270	# 600		
1	20				30.4	3.3
2	5				31.6	2.1
3	20	5			30.8	2.5
4			5		30.5	2.7
5	5	5			32.4	1.7
6	10	5			31.9	1.9
7	10	10	5		34.3	0.9
8	10	10	5	2	32.6	1.7

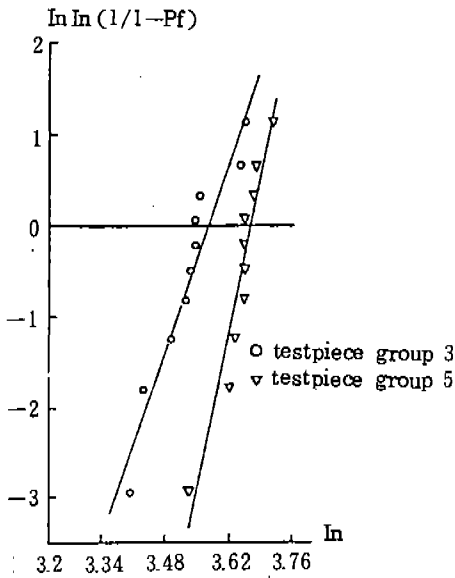


Fig.11 Weibull plotting graph (1) of bending strength values  
(Comparison of testpiece group 1 with group 2 of Table.1)

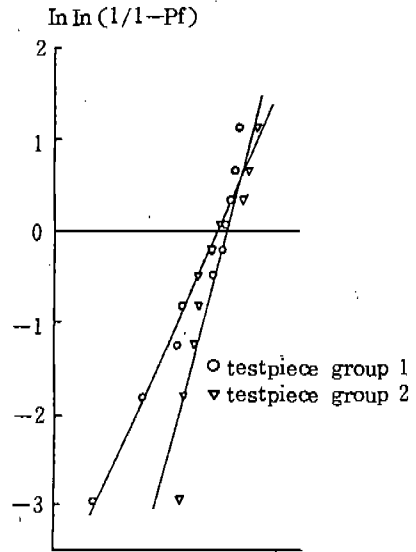


Fig.12 Weibull plotting graph (2) of bending strength values  
(Comparison of testpiece group 3 with group 5 of Table 1)

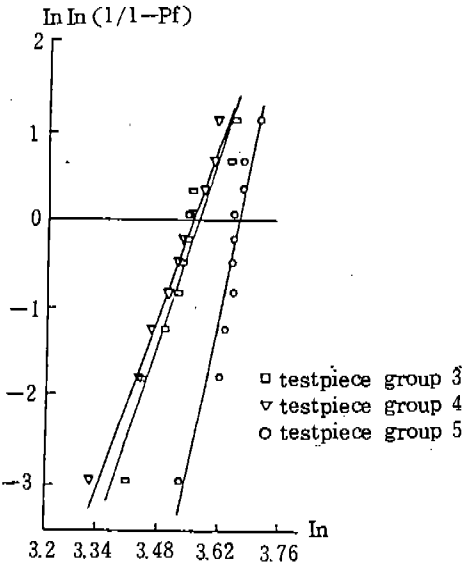


Fig.13 Weibull plotting graph (3) of bending strength values  
(Comparison of testpiece group 5 with group 3,4 of Table 1)

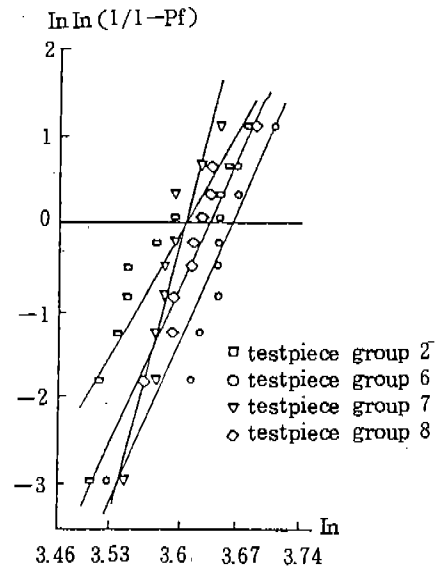


Fig.14 Weibull plotting graph (4) of bending strength values  
(Comparison of testpiece group 7,8 with group 2,6 of Table 1)

숫돌의 입도에 따른 절입량의 범위가 정해져야 할 것으로 보인다. 이는 곧 가공 결합이 굽힘 강도치에 미치는 영향을 알아본 것이다.

단일 가공 공정이 아닌 경우 전 공정의 절입량이 후 공정의 굽힘 강도치에 미치는 경향을 Fig.12에 나타내 보았다. 즉, #80의 숫돌에 의한 가공층의 결합들을 #270 숫돌로 제거할 수 있는가의 여부를 알아본 것이다. 시험편 집단 5의 경우가 세 가지 측면에서 모두 우위성을 나타내고 있어 가공 결합의 제거가 가능한 것으로 판명된다. 하지만 시험편 집단 3에서의 #270 숫돌의 사용량을 증대시키면, 즉 트레이스량을 많게 한다면 그 결과가 거의 같지 않을까 예상되는 바, 이는 추후 계속적인 실험을 통하여 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

#80 숫돌에 의한 가공의 필요성에 대해 알아본 것을 Fig.13에 나타내 보았다. 절입량을 상당히 크게 하지만 않는다면 고능률적 측면을 고려해 볼때 #80 숫돌의 사용이 반드시 필요함을 알 수 있다. 숫돌 입도 사양을 변화시켜가며 여러 공정으로 가공하는 경우에 입도의 변화 순서에 따른 굽힘 강도치의 경향을 비교하여 Fig.14에 나타내 보았다. 즉, 시험편 집단 2,6,7,8의 결과들을 비교해 본 것이다. 평균 강도는 그다지 큰 차이를 보이지 않으나, Weibull 계수 면에서 볼 때 시험편 집단 7의 경우가 가장 우위성을 보이고 있다. 집단 8의 경우에 7의 경우 보다 약간 저하됨은 가공응력 및 변질층의 잔류가 다소 형성되기 때문인 것으로 사료된다. 필요 이상의 가공은 오히려 좋지 않은 결과를 초래한다고 보여진다.

#### 4. 결 론

본 연구는 국내서 제조되는 엔지니어링 세라믹스 소재의 특성 평가용 시험편 제작을 최적화함으로써 기계적 특성치를 최대한 발휘하여 대외 경쟁력을 높이는 한편, 고능률과 고신뢰도의 측면을 만족할 수 있는 고품위의 연삭 가공 조건 및 공정을 정립함에 필요한 기초적인 가공 지식을 축적하고, 난삭재에 대한 제거 가공 시간의 절감을 통한 생산성 향상을 창출하기 위하여 실험

적으로 수행한 것으로서, 중요한 결과들을 항목 별로 요약하여 나타내면 다음과 같다.

- 1) #80, 140, 270 입도 순서의 다이아몬드 연삭 숫돌을 사용한 다듬질 가공 공정의 경우에 가장 우수한 굽힘 강도 결과치, 즉 평균 굽힘 강도치 34kg/mm<sup>2</sup> 표준편차 1.0 이하를 나타내 보였다. 또한 본 가공 실험에 의한 각 시험편 집단들의 평균 굽힘 강도치 및 표준편차, Weibull 계수 값들은 일본의 우수 제조 업체의 데이터들에 거의 준한 값들로 나타났다.
- 2) #80 정도로 낮은 입도의 다이아몬드 연삭 숫돌을 사용하는 경우엔 그 절입량의 크기에 따라 가공면의 가공 결합이 다량 발생되어질 수도 있다고 판단되어지므로, 숫돌의 각 입도에 따른 적절한 절입량의 범위를 정립해두는 것이 바람직하다고 보인다.
- 3) 전 연삭 공정에 의한 가공 결합을 후연삭 가공으로 제거할 수 있었다. 이는 단계별 가공 공정이나 조건의 변화로서 가공면 품질의 극대적이 향상을 얻을 수 있다는 것을 보여주는 한편, 가공 공정 설계와 가공 조건만 최적화되어진다면 고정도의 연삭 기법만으로도 후가공의 필요없이 세라믹스 시험편과 같은 부품들을 충분히 제작할 수 있을 수 있다는 가능성을 제시해주는 것이다.
- 4) #600 이상의 비교적 입도가 상당히 높은 다이아몬드 연삭 숫돌을 사용하여 미세형의 비교적 작은 절입량을 가하는 방식의 가공으로 본 실험의 경우에 있어 가공면 품질 향상 효과를 크게 기대할 수 없었으므로, 범용 연삭반을 사용하는 소위 일반적인 작업 분위기 하에서 정밀 연삭 가공을 수행코자 할 때는 반드시 필요한 가공 공정이라고 생각되지는 않는다. 즉, 고신뢰도의 미세 절입량을 재현할 수 있는 고강성의 초정밀 가공용 전용기에서의 연삭 가공이 아니라면 이보다 낮은 입도의 연삭 공구를 사용하는 가공에 비해 별다른 큰 효과를 얻기 힘들 것이라고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 岡田招次郎, 工作機械部品 へのセミシクスの應用(1) (2), 機械の研究, Vol.40, No.7, p.787-904, 1988.
2. 中川威雄, セラミクス機械部品への課題, 機械技術, Vol.32, No.8, p.26-30, 1984
3. ニコーセラミクス懇談會: セラミクスの超精密加工, 日間工業 新聞社, 1983.
4. 松井正己, セラミクス精密研削加工, 機械の研究, Vol.38, No.3, p.373-379, 1986.
5. 정윤교, 강재훈, 파인 세라믹의 연삭 가공 특성, 한국정밀공학회지, Vol.7, No.2, p.105-112, 1990.
6. 강재훈, 이재경, 화인 세라믹의 고능률적 평면 연삭 가공을 위한 실험적 연구(1), 한국정밀공학회지, Vol.7, No.4, p.40-54, 1990
7. 郷 康生, セラミクス研削用 タイヤモントホイール, セラミクス加工研究會例會資料, (第二回), p.1-13, 1987.
8. 中川威雄, 鈴木清, 鋼鉄ホントイヤモト研石によるセラミシクスの高能率研削加工, セラミクス加工研究會例會資料, (第四回) p.10-15, 1987.
9. 木本寛外 2名, カラスおよび多結晶セラミクスにおける缺陷寸法 と強度の關係, 日本機械學會論文集, Vol.51, No.47, p.2482-2489, 1985.
10. 紫坂敏郎, 燒結せい材料の加工損傷に関する研究(第一報), 日本精密工學會誌, Vol.56, No.3, p.129-134, 1900.
11. 강재훈, 이재경, 초지립연삭공구의 최적조정법에 관한 연구, '90한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, p.58-67