

◆ 특집 ◆ 세라믹 초정밀 가공 기술

## 세라믹스의 제거가공 기술 동향

### Review of Technology Trends for Ceramics Removal-Machining

곽재섭<sup>1</sup>, 곽태수<sup>2,✉</sup>  
Jae-Seob Kwak<sup>1</sup> and Tae-Soo Kwak<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 부경대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University)

<sup>2</sup> 경남과학기술대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: tskwak@gntech.ac.kr, Tel: +82-55-751-3317

Manuscript received: 2013.11.2 / Accepted: 2013.11.18

*Ceramic materials are classified by oxide, nitride and carbide material and have high brittleness, strength and hardness. Ceramic materials are strong in compression but weak in shearing and tension. This review paper has focused on technology trends and mechanism analysis of ceramics removal machining. The ceramic materials have superior mechanical, physical and chemical properties, but it is very hard to machining and the use of ceramics has been limited because of high strength and brittleness. In this paper, technology trends of ceramic removal-machining was introduced for types of machining technology, abrasive machining, cutting process, laser machining and so on.*

Key Words: Ceramics (세라믹스), ELID Grinding (ELID 연삭), Polishing (폴리싱), Machinable Ceramics (가공성세라믹스), Laser Machining (레이저가공)

#### 1. 서론

세라믹스는 열팽창 계수가 낮고, 내전압 특성이 양호하며 내마모성, 내식성등 우수한 물리적, 화학적 특성을 부가하는 것이 가능하므로 기능성 재료로서 반도체 공정을 비롯한 각종 첨단산업 분야에 활용성이 높다. 특히, 구조용 세라믹스는 우수한 화학안정성, 고경도, 고내열 특성 등으로 고온, 고진공, 고응력과 같은 극한 환경하에서 내마모 부품 재료의 후보 물질로 주목 받고 있다. 그러나 이러한 세라믹 재료들의 우수한 기계적, 화학적, 열적 특성에도 불구하고 금속재료에 비해 경도가 높고, 취성이 강하므로 기계가공이 어려운 특징을 가지고 있어 응용성에 제한을 받고 있다.<sup>1</sup>

세라믹 부품은 소결에 의한 방법으로 제조되며

소결 방법으로 제작된 세라믹스는 소결 후의 재료 수축을 정확하게 예측할 수 없으므로 정밀 부품에서 요구되는 치수 정밀도를 소결 공정에서 맞추는데에는 한계가 있다. 따라서 치수정밀도를 높이기 위한 세라믹스는 소결 후 기계가공을 반드시 필요로 한다. 그러나 세라믹스의 기계가공을 어렵게 하는 것은 금속재료에 비하여 강도와 경도가 높을 뿐만 아니라 고유의 취성으로 인해 야기되는 문제 때문이다.<sup>2</sup> 일반적으로 기계적 제거 가공에 있어서 파괴기구는 연성파괴와 취성파괴로 대별되며 가공량과 가공속도에 의하여 파괴 기구는 변화된다. 비교적 가공량 및 가공속도가 낮은 경우에 연성파괴에 의존하는 제거가공이 이루어지며 고온면을 가진 제품의 제작이 가능하나, 그 반대인 경우에는 취성파괴에 의존하는 제거가공이 이루어 지며



Fig. 1 Configuration of SiC light-weight mirror machined by ELID grinding technology and jig of static pressure supporter

로 비교적 거친면을 가진 제품이 만들어진다. 세라믹스의 기계 가공에 있어서 칩형성은 공구와 공작물 사이의 가공 저항에 기인하고 있으며, 세라믹 고유의 취성으로 인해 가공시 발생하는 미세균열의 급속한 전파로 인한 취성파괴에 크게 의존하고 있다. 따라서 치수정밀도가 높은 세라믹스 부품의 초정밀 가공은 가공면에서의 취성파괴 비율을 줄이는 것이 필수적이다. 세라믹스의 제거 가공 기술로는 고정지립을 이용한 연삭가공과 유리 지립을 이용한 연마가공, 기하학적 형상을 정의할 수 있는 공구를 이용한 절삭가공, 고에너지를 이용한 특수 가공 등으로 대별된다.

본 논문에서는 대표적인 난가공 소재인 기능성 세라믹스의 응용성을 높이기 위하여 세라믹가공을 위한 기초 이론을 정리하고, 국내 세라믹 가공 기술 현황을 연삭/연마 가공, 절삭가공 및 특수가공 등 가공 기술 별로 소개한다.

## 2. 세라믹스와 제거가공

### 2.1 세라믹스의 응용분야

일반적으로 경취성 재료에는 다이아몬드 및 사파이어와 같은 결정재료와 글라스와 같은 비정질 재료 그리고 알루미늄, 지르코니아 등의 세라믹스 등을 포함하고 있다. 또한 파인 세라믹스는 fine grained ceramics와 technical ceramics의 의미를 포함하고 있다. 즉 고도로 염선된 원료를 사용하고 화학조성이 균일하며 공업적 고성능을 가진 세라믹스를 의미한다. 파인 세라믹스를 화학조성에 따라 분류하면 산화물계와 비산화물계로 대별되며 산화물계는 1성분계, 2성분계, 3성분계로 세분화 되고 비산화물계는 탄화물, 질화물로 세분화하고 있다. 세라믹스의 응용분야를 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1 Application field of ceramics

Ceramics	Oxide			Nitride	Carbide
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	BeO	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC
Electronic	Substrate IC Package Chip carrier Insulation	Fuel cell Solid electrolyte Heating unit Oxygen sensor	Receptacle of semiconductor Electron tube Heat sink Circuit board	Electric insulator Jig for high frequency treatment	Substrate Electric insulator Fixture for heat treatment
Mechanic	Parts of mechanical seal pump Nozzle, Dies, Shaft Kit for precision measurement Ceramic ball Cutting tool	Dies for hot extrusion Nozzle, dies Parts for diesel engine Shaft Cutting tool Guide roller	-	Parts for gas turbine Parts of automobile engine Dies, nozzle, shaft, roller Cutting tool	Mechanical seal Shaft, roller Parts for automobile engine Parts for gas turbine Cutting tool
Chemical/Bio-chemical	Anticorrosion plate Parts for absorption Lining	Piece for dispersion/mixture of paint, Ink Parts for Anticorrosion Bio-materials	Reflecting materials for nuclear reactor	Parts for Anticorrosion Lining Parts for chemical pump Chemicals Vessel	Plumbing anticorrosion Liquid Reaction pipe for Pump, lining
Thermal	Heat resisting plate Reactor core pipe Protecting tube Nozzle Crucible	Crucible for heat-resist alloy Hot plate for gas turbine Fire proof material	Crucible Protecting tube	Crucible TIG welding Nozzle Die-casting Thermocouple Protection seal	High-temp. measurement devices Heating furnace framework Reactor core pipe Heat exchanger devices
Optic/Etc.	Light emitting tube for high-pressure sodium lamp Window for high-temp. reactor	Scissors Sporting goods	Laser components	-	-

### 2.2 세라믹스의 제거가공 기구

취성 재료의 연삭 또는 랩핑 가공은 지립과 공작물간의 간섭부분에서 생기는 흠에 의해서 제거가공이 이루어지며 이것은 재료가 가진 취성을 이용한 가공법이다. 세라믹스와 같은 취성 재료의 경도 시험에서 압입력이 0.01N 또는 굽기 깊이가 0.1μm수준에 있어서는 취성 재료에 소성유동 파괴, 즉 연성파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 가공력 또는 가공 깊이로 연삭 또는 절삭가공을 하는 경우에 취성 소재의 공작물에 흠과 같은 형태로 공구의 형상을 전사(轉寫)하는 것이 가능하다. 따라서 소성유동 파괴 영역에서 취성 재료를 제거 가공하면, 금속의 제거가공에서 공구형상과 운동궤적이 공작물에 전사되는 것과 같이 취성 재료의 가공에서도 동일한 효과를 얻을 수 있다. 실제로 취성 재료의 연삭 가공에서 변형파괴가 충분히 미소하여 연성파괴에 의해 생성된 가공면은 매우 고우며 높은 치수정밀도와 표면조도가 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 연성파괴 영역에서 제거가공을 하는 경우에 제거량을 어느 정도 미소하게 하는가에 따라 전사정밀도 및 가공면의 손상 깊이가 결정된다. 이것을 가공분해능이라고 하며 가공분해능이 미소할수록 가공 정밀도는 향상된다.

### 3. 세라믹 가공 기술

#### 3.1 세라믹 연삭 가공

##### 3.1.1 연삭가공 기술의 응용

세라믹에 일반적으로 적용되는 기계가공은 다이아몬드 슷돌을 이용한 연삭과 폴리싱에 크게 의존하고 있다. 특히, 세라믹은 대부분 고경도 취성 재료이기 때문에 연삭 가공이라 할지라도 용이하지 않으므로 고능율적인 연삭가공법의 개발이 요구되고 있다. 고경도 세라믹으로서 대표적인 알루미늄( $Al_2O_3$ ), 지르코니아( $ZrO_2$ ), 탄화규소( $SiC$ ), 질화규소( $Si_3N_4$ )를 대상으로 다이아몬드 슷돌로 고능율 연삭 가공을 위한 세라믹스의 연삭가공 특성 연구<sup>3</sup>에서는 크리프피드 연삭까지 포함한 폭넓은 연삭조건 범위에서 평면연삭을 수행하여 연삭저항, 표면조도, 연삭비 등을 비교 검토한 결과, 파인세라믹의 연삭 기구는 통상 연삭범위(4~36m/min)에 있어서는 미소취성파괴가 주체이나 크리프피드 연삭 범위(20~240mm/min)로 이동할수록 소성적 연성파괴가 지배적임을 확인한 바 있다. 또한, 평면 연삭가공 실험에서 세라믹스 소재를 대상으로 다이아몬드 연삭 공구의 트루잉과 드레싱 방법 및 각종 조건이 가공물의 형상정밀도에 미치는 영향을 고찰하였다.<sup>4</sup> 트루잉 및 드레싱 방법으로 연강연삭법, 임플라이 드레싱법, 브레이크 트루잉법 등을 적용한 결과, 피삭재의 표면조도는 다이아몬드 연삭 슷돌의 가공면의 형상도 및 요철 정도에 크게 좌우됨을 확인하였다. 각종 트루잉 및 드레싱 방법에 대한 성능 평가 실험을 한 결과, 연강연삭법은 연삭저항값이 작아 절미성능은 양호하나 우수한 가공면을 기대하기 어렵고, 브레이크 트루잉법은 비교적 절미성능도 양호하고 가공물의 표면조도도 향상시킬 수 있는 방법임을 확인하였다. 또한 세라믹의 종류에 따라 연삭 동력을 실험한 결과 재질에 관계없이 절입량의 증가에 따라 거의 선형적인 증가 추세를 보이며 절입량에 따른 연삭비는 알루미늄이 가장 낮음을 확인하였다. 이와 같은 연구에서는 각종 세라믹스에 대하여 연삭가공 조건에 따른 표면조도와 연삭저항 등 세라믹스의 연삭가공 특성을 파악하였을 뿐 만 아니라, 트루잉 및 드레싱 방법에 따른 다양한 실험적 기초 데이터를 제공하였다는데 큰 의미가 있다. 광 커넥터용 세라믹 페룰가공 기술 개발에 관한 연구<sup>5</sup>에서는 지르코니아 소재를 대상으로 외경 연삭 및 미세구멍 가공 기술의 개발에서 미세구멍 가공은

팅스텐 또는 피아노선 주위에 다이아몬드 분말을 묻혀 통과시켜 구멍의 치수를 맞춰나가는 방식을 제안하였으며, 외경연삭은 센터리스 연삭방식이 생산성 측면에서 적절함을 제안하고 입도 #400 ~ #600 다이아몬드 슷돌을 사용하는 경우 표면조도는  $1\mu mR_{max}$  이하로 낮출 수 있음을 확인하였다.

또한, 범용연삭기에서 알루미늄, 탄화규소, 질화규소의 고품위 연삭<sup>6</sup>을 위해 레진 본드계 다이아몬드 슷돌을 사용하였다. 연삭비 향상을 위한 연삭 슷돌의 적절한 주속도 범위를 제시하고 거친 연삭시 발생할 수 있는 크랙등의 가공 결함과 변질층을 충분히 제거할 수 있는 3단연삭 기법을 제안하였다. 그리고 경취성의 구조용 세라믹 재료인 질화규소의 연삭가공시 슷돌의 마멸상태를 예측<sup>7</sup>하기 위하여 실시간으로 음향방출 신호를 측정하여 간접적으로 연삭스틀의 마멸상태를 예측하고 입도에 따른 표면조도와 굽힘응력 측정으로 가공면의 특성을 파악하는 시도를 하였다. 이를 통해 슷돌의 드레싱 시기를 음향방출 신호로서 결정하는데 필요한 기준을 제시하였다. 초음파 진동을 하는 다이아몬드 연삭 공구를 이용하여 알루미늄 세라믹의 연삭 가공에 대한 연구<sup>8</sup>에서는 20kHz의 주파수를 가진 진동을 진착스틀 연삭 공구에 중진동 모드로 적용하고 공구의 진폭을 측정된 결과 4~58 $\mu m$  범위로 발생되는 것을 확인하였으며, 초음파 진동 공구를 사용하는 경우 가공시 연삭 슷돌의 배분력은 3~20%가 감소되는 것을 확인하였다.

##### 3.1.2 ELID 연삭가공 기술

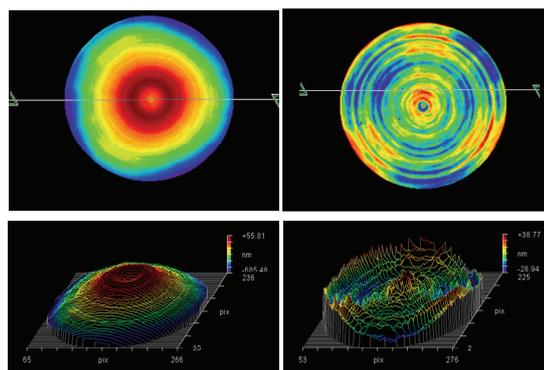
ELID(Electrolytic In-Process Dressing) 연삭법은 CBN또는 다이아몬드와 같은 초경질 입자를 가진 슷돌을 전해방식으로 연속 드레싱하는 기술로서 슷돌의 눈메움(*loading*)현상을 방지하고 연삭 저항을 낮춤으로서 열처리 경화강, 소입강, 스테인리스강 등 금속재료의 연삭 가공뿐만 아니라 각종 세라믹스, 유리, 초경합금 등의 경도가 높은 소재 및 고분자 플라스틱 재료의 초정밀 연삭 가공에도 활용되고 있다. 특히, 취성이 높은 세라믹스에 대해 피가공 특성을 조사한 결과 고능율 연삭가공법으로서 응용성이 높다는 사실이 연구논문을 통해 실증된 바 있다.<sup>9</sup> ELID연삭가공 기술이 세라믹 재료의 초정밀 가공에 응용한 사례는 다음과 같다. 가공성 세라믹( $Si_3N_4$ -BN계)의 초정밀 래핑가공에 전해연속드레싱 기술을 응용<sup>10</sup>하여 질화붕소의 함유량이 증가할수록 표면거칠기도 높아지는 것을 확

인하였다.

기계적 및 광학적으로 우수한 물성을 가진 탄화규소와 화학증착 탄화규소(CVD-SiC) 세라믹을 광학부품으로 활용<sup>11</sup>하기 위하여 초정밀 가공기를 이용한 ELID연삭 가공을 수행하고 자성유체연마(MRF) 기술을 응용하여 광학용 탄화규소 반사경을 제작하는데 적용하였다. 실험 결과에 따르면 고강도 경량 반사경용 탄화규소에 대해 실험 및 수치계산으로 가공 변형량을 예측하고 입도 #2000 다이아몬드 스톨을 사용하여 ELID연삭법을 적용한 결과 형상정밀도 0.067 $\mu$ mPV, 10nmRMS를 달성하였으며, CVD-SiC에 대해서는 입도 #4000 다이아몬드 스톨을 사용하여 ELID 연삭한 결과 0.041 $\mu$ mPV, 9.8nmRMS를 얻었으며 3분간의 자성유체연마 기술을 병행하여 연삭에 의한 미세한 가공 변질층을 제거할뿐만 아니라 형상정밀도 0.021 $\mu$ mPV, 2.9nmRMS를 달성한 바 있다.

한편, 인공위성에 장착되어 사용되는 천체, 우주망원경용 광학소자로서 탄화규소와 글라스 세라믹(Zerodure)을 적용하여 ELID연삭가공에 의해 초정밀 가공을 수행하였다.<sup>12</sup> 인공위성에 장착되는 우주망원경용 주경은 경량성과 강도를 확보할 수 있는 물성이 요구되므로 이를 위한 소재로서 탄화규소와 글라스 세라믹을 적용하였다. ELID연삭법 및 기상계측 기술, 전용 지그 제작 등을 통해 반사경 소재에 적용한 결과 직경 360mm소결 탄화규소 구면 반사경의 형상정밀도는 0.9 $\mu$ mPV를 달성하였으며, 직경 300mm천체용 글라스 세라믹의 대구경 구면 반사경 제작에 ELID연삭 실험을 수행하고 보정가공 기술을 적용한 결과 입도 #4000 다이아몬드 스톨에서 12nmR<sub>a</sub>의 경면을 달성하였다.

초정밀 가공을 위한 구조세라믹스의 미세구조 분석에 관한 연구<sup>1</sup>에서는 세라믹스의 고효율 가공을 위해 알루미늄 구조용 세라믹 소재를 개발하고 이에 대한 미세구조 분석 및 연삭성을 평가하였다. 제조 시편에 대해서 굽힘 강도, 표면경도와 결정립 크기, 미세구조 등을 분석하여 ELID 연삭 실험을 통해 연삭성을 분석한 결과, 평균입경은 세라믹 소재의 경도 및 강도와 밀접한 상관관계를 가지고 있으며 연삭특성에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 알루미늄 세라믹의 ELID연삭에서 표면조도는 평균입경의 크기와 반비례하고, 굽힘강도는 입내 파괴가 발생하는 경우 평균입경의 크기와 비례하나 입계 파괴가 발생하는 경우에는 굽힘강도는 현저하게 낮아지는 것을 확인하였다. 입도



(a) Before compensation (0.741 $\mu$ mPV, 340nmRMS) (b) After compensation (0.067 $\mu$ mPV, 10nmRMS)

Fig. 2 Surface profile measurement results before and after compensation grinding by ELID grinding<sup>11</sup>

#200의 다이아몬드 스톨을 이용한 연삭 실험에서 표면조도(Ry)는 시편에 따라 결정립 평균입경의 50~72%수준이 되는 것을 확인하였다.

한편, 탄화규소, 질화알루미늄(AlN), 알루미늄 세라믹을 대상으로 ELID연삭 장치를 구성 및 실험하여 스톨의 입도에 따른 표면조도 변화와 소재별 피연삭 특성을 분석하였다.<sup>13</sup> 알루미늄 세라믹에 대해서는 가공표면의 3차원표면형상 사진을 통해 가공 모드를 분석하고, 동일한 입도(#4000)의 지립에 대해서 ELID연삭가공 표면과 화학기계적 연마(CMP) 가공면을 비교하였다. SiC, AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편에 대해 동일한 ELID연삭조건에서 입도 #170, #2000, #4000 스톨로 실험한 결과 표면조도는 AlN이 가장 나쁘게 나타났으며, 알루미늄 세라믹스에 대해 ELID 및 CMP공정을 비교한 결과 중심선평균거칠기(R<sub>a</sub>)는 CMP가공면(0.41nmR<sub>a</sub>)이 우수하였으나 PV(Peak to Valley)와 십점평균거칠기(R<sub>z</sub>)는 ELID가공면(0.056 $\mu$ mPV, 0.054 $\mu$ mR<sub>z</sub>)이 우수하였다.

또한, 우주항공, 군사용 등의 첨단산업에서 고기능성 부재로서 개발되고 있는 금속기지 세라믹 복합소재<sup>14</sup>를 대상으로 ELID연삭 가공 특성을 평가하였다. 금속기지 세라믹 복합소재는 세라믹스에 인성을 부여하고 세라믹의 우수한 물성을 활용할 수 있는 장점이 있으므로 고기능성 재료로서 개발되고 있다. 실험에 사용된 복합소재 시편으로는 알루미늄에 탄화규소 입자를 분포시킨 Al-SiC와 흑연입자를 분포시킨 Al-graphite, 마그네슘에 탄화규소 입자를 혼합하여 소결한 Mg-SiC를 대상으로 적외선 반사경으로 활용하기 위한 ELID경

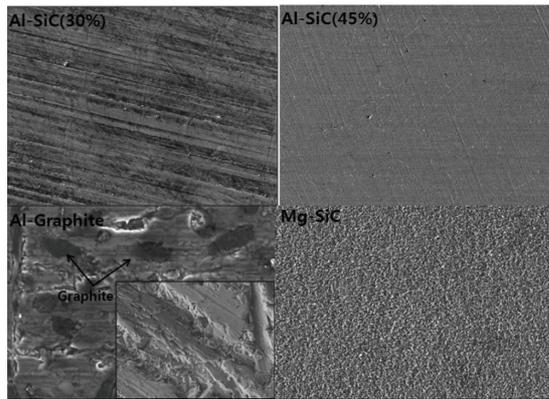


Fig. 3 SEM pictures of ELID ground surface using #4000 grinding wheel<sup>14</sup>

면연삭 가공 실험을 수행하고 피가공 특성을 분석하였다. 금속기지 세라믹 복합재료 시편 각각에 대해서 동일한 가공조건으로 입도 #170, #2000, #4000, #8000 슷들을 각각 사용하여 ELID경면 연삭 실험한 결과 Al-SiC(45wt%)의 경우에 0.021 $\mu$ m Ra로 가장 우수한 표면조도를 얻었다. Al-SiC의 경우 SiC의 함유량이 30%에서 알루미늄의 인성으로 인한 연성모드 가공이 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, Al-graphite는 가공 중에 취성이 강한 섬유상의 graphite입자가 탈락하여 표면조도가 나빠지는 것을 확인하였다. Mg-SiC의 경우에는 ELID연삭시 습식공정으로 인해 마그네슘과 연삭액의 수산화 이온이 반응하여 연삭 흔적이 다시 제거되는 현상을 확인하였다. 본 연구를 통해 ELID연삭은 금속기지 세라믹 복합소재의 경면연삭에도 효과적임을 밝혔다.

### 3.2 연마 슬러리 가공 기술

연마가공에는 고정(固定)지립을 이용하여 공작물을 원하는 형상을 가공하는 연삭 가공과 유리(流離)지립을 이용하여 공작물을 가공 하는 랩핑, 폴리싱 등의 연마 가공으로 구분할 수 있다. 세라믹은 높은 취성으로 인해 가공시 공작물에 높은 압력을 가하는 고정지립의 연삭 슷들을 이용하는 방식보다는 건식 또는 습식으로 유리지립 슬러리를 이용하여 공작물에 낮은 가공 압력을 부여하는 랩핑 또는 폴리싱에 대한 의존도가 매우 높다. 슷들 등 고정지립을 이용한 방식은 가공효율이 비교적 높고 형상정밀도가 우수한 가공표면을 얻을 수 있으나 공작물에 가해지는 가공압력이 비교적 높

아 세라믹 가공시 칩핑이 자주 발생하므로 가공조건을 관리하는데 많은 어려움이 있다. 이에 비해 유리지립 슬러리를 이용한 랩핑, 폴리싱 가공은 비교적 가공시간이 길지만 표면조도가 우수하고 가공압력이 낮아 세라믹 공작물의 칩핑에 의한 파손은 거의 발생하지 않으므로 각종 세라믹 부품의 가공에 활발히 적용되고 있다. 자성유체 연마법을 이용한 세라믹 볼 베어링 가공장치를 개발<sup>15</sup>하였다. 자성유체 연마법은 비자성체인 세라믹 연마제와 자성유체를 혼합하여 자장을 가하면 자성유체 내의 비자성 물질은 부력이 작용하는 Rosensweig, R.E.의 이론<sup>16</sup>에 근거한 것으로서 비교적 가공 속도가 빠르고 표면조도가 우수한 제품을 얻을 수 있는 장점이 있다. 자성유체 연마법으로 질화규소를 비롯한 세라믹 볼의 연마 가공에 적용한 결과, 질화규소볼의 경우 40%자성유체에 20~30 $\mu$ m의 다이아몬드 파우더 10%를 첨가하고 3시간 정도 가공하여 크기가 일정한 베어링용 볼을 가공하였다. 이는 기존의 기계적 연마 방식에 비해 월등히 빠른 가공속도로 사료된다. 한편, 알루미늄과 ZTA볼 역시 단시간 내에 가공이 가능하였으나 가공된 볼의 표면조도와 진구도를 향상시켜야 하는 부분은 미제로 남아있다.

한편, 랩핑 및 폴리싱 등의 전통적인 연마가공은 가공 효율이 낮으므로 이를 보완하기 위하여 연마 슬러리에 초음파 진동을 인가하여 가공능력의 향상을 시도하는 연구가 보고되었다. 알루미늄 세라믹의 초음파가공 특성 연구<sup>17</sup>에서 초음파가공을 통해 소재제거율(MRR)과 양호한 표면정밀도를 얻을 수 있는 가공조건을 분석하기 위해 지립의 크기, 슬러리 비 및 정압력을 가공변수로 하여 초음파 가공 특성을 규명하였다. 또한, 초음파 폴리싱 가공에 따른 세라믹 재료의 표면거칠기에 관한 연구<sup>18</sup>에서는 세라믹스를 보다 고능율적으로 가공하기 위해 20kHz의 초음파 진동을 공구에 가하도록 초음파 폴리싱 장치를 구성하고 지르코니아와 알루미늄 질화규소를 폴리싱한 후 연삭가공 표면과 비교한 결과, 범용 연삭 가공면에 비해 약 15% 우수한 표면조도를 얻었으며 공구의 이송속도가 증가할수록 표면거칠기 값이 증가하는 것을 확인하였다. 초음파 진동을 이용한 세라믹 소재의 마이크로 홀 가공에 관한 연구<sup>19</sup>에서 지름 30, 50, 100  $\mu$ m의 초경공구를 제작하고 공구에 30kHz의 초음파 진동을 인가 함으로서 연속적으로 공급되는 SiC 또는 다이아몬드 슬러리에

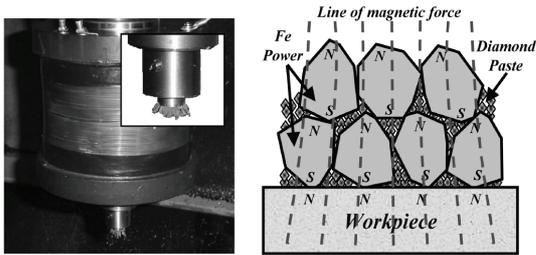


Fig. 4 Tools and schematic diagram of magnetic fields in magnetic assisted polishing for mirror surface<sup>20</sup>

초음파 진동을 야기하는 방법으로 0.3mm두께의 알루미늄 세라믹에 마이크로 홀을 가공하는데 성공하였다. 세라믹 소재의 관통 가공시 공작물과 지지하판과의 밀착성 부족으로 인해 가공 끝단에서 취성 파괴 현상이 나타났으나 최적 가공조건을 선정하고 가공압력을 일정하게 제어한 결과 지름 30 $\mu$ m의 미세공구로 33 $\mu$ m 크기의 마이크로 홀 제작에 성공하였다.

또한, 자성연마 슬러리를 이용한 초미립 초경합금의 나노급 경면가공 특성 연구<sup>20</sup>에서는 ELID 연삭법과 자성연마 슬러리를 이용한 자기연마법을 적용하여 나노급 경면가공을 위한 초경합금의 피삭 특성을 분석하였다. 자기연마법은 입상(粒狀)의 자성연마 입자에 자장을 인가하여 수직력을 부여하고, 공구를 회전시켜 접선력을 부여하는 연마 방법이다. 연삭가공 또는 절삭가공 등으로 형상가공된 부품에 적용하여 단시간에 우수한 표면조도를 얻을 수 있는 고능률 연마가공 기술이다. 본 연구에서 자성연마 슬러리는 자성입자로서 페라이트 분말과 입도 #8,000과 #14,000의 다이아몬드 페이스트를 오일에 혼합하여 사용하였다. ELID연삭가공에서 입도 #1200, #4000, #8000 슷돌을 사용하여 각각의 연삭가공 표면을 제작한 후 자기연마를 수행한 결과, 입도 #1200 슷돌의 ELID연삭가공 표면(13.5nmR<sub>a</sub>)은 자기연마 후(5.1nmR<sub>a</sub>)에 평균 85%가 개선되어 표면조도가 현저히 개선됨을 확인하였다. 입도 #4000과 #8000 슷돌의 ELID 연삭가공 표면에 대해서는 각각 자기연마 전후에 2.5nmR<sub>a</sub>에서 1.7nmR<sub>a</sub>, 1.8nmR<sub>a</sub>에서 1.6nmR<sub>a</sub>로 변화되었음을 보고하여 자기연마법은 표면조도의 향상과 함께 낮은 입도의 슷돌을 이용한 연삭가공면의 표면변질층을 효과적으로 제거할 수 있는 방법임을 보여 주었다.

### 3.3 가공성 세라믹(Machinable Ceramics)의 절삭 가공

세라믹스를 정밀도가 높은 구조부품으로 응용할 경우 원하는 형상과 치수를 최종적으로 맞추기 위해 기계가공이 필요하다. 그러나 대부분의 구조용 세라믹스는 취성 및 경도가 크기 때문에 금속재료에서와 같은 절삭가공은 불가능하다. 그러나 절삭가공시 세라믹스의 균열방향을 공구의 진행방향으로 유도하는 방법으로 가공성 세라믹스를 개발하여 가공 능률을 높이는 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 대표적인 가공성 세라믹스인 AlN계와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 세라믹스의 절삭가공과 관련된 연구개발 현황을 살펴보았다. AlN-BN계 가공성 세라믹은 판상형태의 h-BN입자의 벽개면을 따라 파괴저항이 크게 저하되어 절삭공구의 인선에서 발생한 균열이 재료 내부로 진행되는 것을 막고 공구의 진행방향으로 유도되도록 하여 절삭가공이 가능하게 한 것이다. J.S. Gam<sup>21</sup> 등은 10~40wt%의 BN을 함유하는 조성에서 AlN의 사용 소결제인 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 CaO를 3wt% 첨가 또는 무첨가하여 시편을 제조한 후 선삭에 의한 기계가공성과 피삭 특성을 조사하였다. 실험 결과로부터 AlN-BN계 세라믹스의 절삭저항과 강도는 BN함량이 증가함에 따라 감소하며, 소결조건에 따라 첨가여부 및 종류에 따른 차이는 미미함을 확인하였다. 30wt% BN 조성에서 연강보다 우수한 피삭성을 나타내기 시작하고, 인장강도는 150~160 MPa, 선삭가공면의 표면조도는 입도 #800의 다이아몬드 슷돌로 연삭한 면과 유사한 표면을 얻었음을 확인하였다. 또한, 가압소결 방향에 따라 현저한 강도 값의 차이가 나타났는데, 이는 BN입자들이 가압소결 방향에 대해 벽개면이 수직하게 배향된 미세구조를 가지기 때문임을 확인하였다. 열간가압소결에 의해 제조한 AlN-BN계 복합재료에 대하여 미세조직과 기계적 성질에 영향을 미치는 h-BN첨가의 영향<sup>22</sup>을 체계적으로 조사하여 우수한 기계가공성을 갖는 가공성 세라믹의 제조를 시도하였다. 실험 결과로부터 BN의 첨가량이 10vol% 이상에서 양호한 기계가공성이 나타났으며, 10vol%의 h-BN첨가한 복합재료의 경우, 절삭속도가 증가함에 따라 주분력과 배분력 모두 증가하였으나 15vol% 이상 첨가한 경우에는 큰 차이가 나타나지 않았다. AlN-hBN 가공성 세라믹스에 대해 hBN첨가에 따른 엔드밀 가공조건 하에서 절삭력을 측정하고, 가공 후 표면조도를 조사하였다.<sup>23</sup> 열간가압소결에 의해 hBN 함량을 0~20vol%로 조성을 변화

시켜 AlN-hBN세라믹 복합재료 시편을 제조하고 기계가공성을 평가한 결과, hBN첨가량이 증가할수록 가공성 세라믹스의 상대밀도와 굽힘강도, 탄성계수는 감소하는 것을 확인하였고, hBN의 함량이 증가할수록 절삭력이 감소하여 양호한 절삭성능을 나타냄을 확인하였다.

한편, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN계 가공성 세라믹스에 관한 연구 논문을 살펴보면, S.M. Jang<sup>2</sup> 등은 반도체 장비용 부품, 브라운관 제조용 치구 등에 응용되는 세라믹의 대량생산을 위해 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN계 세라믹을 제작하여 기계적 특성과 가공특성을 평가하였다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>세라믹에 BN을 5~30vol% 혼합하여 시편을 제작하고 2날 엔드밀을 사용하여 절삭성능을 평가한 결과, h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 기계적 성질은 약화되지만 취성에 기인한 절삭 메커니즘에서 전단소성 변형에 의한 연속칩의 발생 비율이 증가하였고 가공 후 기계적 강도의 변화는 적음을 확인하였다. BN함유량이 20vol% 이상에서 절삭력은 크게 감소되었다. 또한, 균열크기에 대한 파괴인성을 보여주는 R-곡선 거동을 통해 취성파괴와 연성파괴 정도를 평가하였으며 h-BN 입자의 첨가량이 증가함에 따라 R-곡선이 증가하였으며 금속 재료의 성질에 다소 유사하게 연성이 증가하는 것으로 나타남을 보여주었다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN계 가공성 세라믹 시편을 제조하고 마이크로 드릴을 이용한 마이크로 홀 가공시의 기계가공 특성 조사<sup>24</sup>에서 직경 0.15, 0.25, 0.4mm의 마이크로 드릴을 각각 사용하고 15,000~30,000rpm, 10 step의 가공 조건으로 실험하여 절삭력을 측정할 결과, h-BN 함량이 증가할수록 절삭력은 감소하고 우수한 절삭성을 나타냄을 확인하였다. 또한, 고속가공기를 활용하여 비구면 안경렌즈 유리금형용 세라믹코어 가공 기술 개발에 관한 연구<sup>25</sup>에서 안경렌즈 금형에 사용되는 가공성 세라믹(Al-O-C-Cr-Si)를 대상으로 실험계획법을 이용하여 실험을 통해 얻어진 표면조도 측정데이터를 분산분석하고 공구의 종류, 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이에 대한 최적 절삭조건을 제시하였다.

### 3.4 특수가공 기술

세라믹스의 가공을 위한 특수가공 기술로서 방전 가공, 샌드 블라스트 절단, 레이저 고에너지 가공 등이 있다. 세라믹스는 도전성을 갖고 있지 않으므로 방전가공은 불가하나, 비록 낮은 정도이지만 도전성을 가진 첨가상으로 복합체를 형성하는 방법으로 방전가공을 적용하는 것이 가능하다. 복

합세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 방전가공성 및 가공특성 실험 연구<sup>26</sup>에서 펄스시간 10~60μs, 피크전류 10~16A의 조건에서 양호한 방전가공이 가능함을 제시하였다. 펄스시간이 길어지고 피크전류가 높아지면 재료 표면에서 크랙이 발생하며 재료가 파단되는 경우도 발생함을 확인하였다. 그리고 초음파 진동 부가에 의한 세라믹 복합체의 형조방전 가공에 관한 연구<sup>27</sup>에서 알루미늄 세라믹에 전도성을 가진 탄화티타늄을 첨가하여 도전성 세라믹 복합체를 만들고 역극성으로 순도가 높은 구리를 사용하여 방전가공하고 초음파를 부가하여 칩의 배출을 원활하게 하여 세라믹스의 방전가공 특성을 조사하였다. 실험결과에서 공작물의 제거속도, 표면조도, 미세구조 및 꺾임강도 분석 등을 통해 방전가공시 피크전류와 듀티팩터의 증가보다 초음파를 부가하였을 때 공작물의 제거속도가 증가하였으나 표면조도는 나빠짐을 확인하였고, 가공면의 파단면은 초음파를 부가할 경우에 용융층 두께는 2~3μm로 방전가공시 용융층 두께 4~5μm보다 얇고 꺾임강도는 낮게 나타남을 확인하였다. 또한 꺾임강도에 따른 와이블 분포의 형상모수를 비교한 결과 초음파 부가 시 신뢰도는 향상되는 것을 보여주었다.

레이저 가공은 고밀도 에너지를 이용한 가공 방법으로서 높은 열에너지를 이용하여 소재를 증발시켜 제거 가공하는 방법으로 비교적 열영향부가 적어 높고 균일한 품질을 얻을 수 있다. 세라믹 소재의 미세가공을 위해 레이저 가공을 응용한 사례로서 알루미늄 세라믹의 미세구멍 가공시 레이저 가공조건과 보조가스가 미치는 영향 분석<sup>28</sup>에 대한 연구가 있다. Nd-YAG레이저로 발전과장 1.06μm, 최대평균출력 35W 조건에서 윗면구멍 75μm, 아래구멍 50μm 정도의 미세구멍 가공에 적절한 가공조건을 찾고자 한 결과, 레이저 에너지 0.08J, 주파수 30Hz, 조사시간 300us에서 윗면 82μm, 아래면 51μm의 미세홀 가공이 가능하였으며 보조가스로는 산소, 가스압력은 0.2~0.6kgf/cm<sup>2</sup>가 적합한 것으로 나타났다. 보조가스는 가스공급이 없는 경우 크기는 비교적 일정한 구멍을 얻었으나 형상이 매끄럽지 못하고, 가스압이 높은 경우에는 용융 후 재응고 과정에서 수축편차가 심하여 구멍의 편차가 비교적 컸으며, 열영향에 의한 손상은 보조가스가 산소인 경우에 가장 적게 나타남을 보여주었다. S.H. Kim<sup>29</sup> 등은 펄스 레이저를 이용하여 알루미늄 세라믹 기판의 정밀 마이크로

드릴링에 관한 연구를 수행하였다. 펄스 레이저는 광자에너지는 UV에 비해 낮지만, 매우 짧은 펄스폭에 의한 다광자 흡수를 통해 낮은 출력에서 높은 정밀도로 가공이 가능하므로 세라믹을 포함한 다양한 재료의 정밀 미세가공에 활발히 적용되고 있다. 알루미늄이나 세라믹 기판을 대상으로 펄스 레이저 가공 실험을 통해 가공된 홀의 진원도를 평가하고 가공홀은 주사전자현미경을 통해 가공표면을 분석하였다. 타이타늄-사파이어 레이저 시스템(파장 785nm, 펄스폭 185fs, 반복주기 1kHz)을 이용하여 가공시편은 표면이 연마된 두께 200~500 $\mu\text{m}$ 의 알루미늄 기판을 대상으로 실험하고, 시편 두께별로 각각 직경 20~500 $\mu\text{m}$ 의 미세홀을 가공하고 가공시간을 비교하였다. 가공된 마이크로 홀은 가시적인 표면손상없이 매끄러운 측면 벽과 깨끗한 테두리를 보여주었으며 100 $\mu\text{m}$  직경의 마이크로 홀은 갈바노 스캐너를 이용하여 약 60 $\mu\text{m}$ 의 최소 크기를 가지고 용이하게 가공할 수 있음을 보여주었다.

또한, 글라스 웨이퍼의 절단에는 다이아몬드 블레이드를 이용한 다이싱 또는 쏘잉, 레이저 또는 워터젯, 초음파 등의 방법이 활용되고 있으나 글라스 웨이퍼의 절단에는 샌드 블라스트가 가장 빠른 방법으로 알려져 있다. 샌드 블라스트를 이용하여 글라스 웨이퍼 절단 가공에 관한 연구<sup>30</sup>에서 가공시 영향을 미치는 인자들을 규명하여 샌드 블라스트 절단 가공의 최적조건을 도출하고자 하였다. 글라스 웨이퍼의 가공 표면과 수직으로 분사가 가능한 블라스트 노즐을 설치하여 노즐의 분사압력과 서보모터의 이송속도를 주요인자로 설정하여 실험한 결과, 절단 가공깊이에 크게 영향을 미치는 인자는 분사압력이며, 이방성 에칭과 마스크 침식에는 분사압력과 이송속도 모두 영향을 미치는 인자로 나타났으며 압력이 높을수록 이송속도가 낮을수록 이방성 에칭정밀도가 높고 마스크 침식이 적게 일어나는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

대표적인 난가공 소재인 기능성 세라믹스를 대상으로 세라믹 가공 기술 현황에 대하여 가공기술별로 살펴보았다. 세라믹스의 가공효율을 높이기 위하여 기존의 가공방식에 초음파 또는 자성유체 슬러리, 레이저, 방전가공 등을 복합화하거나 가공성 세라믹을 개발하는 등의 노력을 통해 세라믹의

취성으로 인한 칩핑 문제를 저감하고 짧은 가공시간을 달성하는 등 기술적 어려움을 해결하고 있다. 그러나, 세라믹스의 응용성을 보다 높이기 위해서는 세라믹 소재의 피가공 특성을 조사하고 분석 함으로서 전문화된 고능률 초정밀가공 기술의 개발은 지속적으로 요구되고 있다.

#### 참고문헌

1. Kwak, T., "Microstructure Analysis for Efficiency Grinding of Structural Ceramics," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 10, pp. 31-36, 2007.
2. Jang, S., Cho, M., Cho, W., and Lee, J., "Evaluation of R-curve Behavior Analysis and Machinability of Si3N4-hBN Machinable Ceramics," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 21, No. 1, pp. 61-70, 2004.
3. Jung, Y. and Kang, J., "Grinding Characteristic of Advanced Ceramics," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 7, No. 2, pp. 105-112, 1990.
4. Kang, J. and Lee, J., "Study on the Surface Grinding Machining of Fine-ceramics with high efficiency," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 7, No. 4, pp. 40-54, 1990.
5. Lee, E., Lee, S., Whang, K., Chung, M., and Choy, T., "Development of Manufacturing Technology of Ceramics Ferrule for Optical Fiber Connector," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 9, No. 3, pp. 67-72, 1992.
6. Kang, J. H., "A Study on the Grinding of Engineering Ceramics with High Quality using Conventional Grinding Machine," J. of the Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 11, No. 3, pp. 149-161, 1994.
7. Wang, D. H., Kim, W., and Shin, K., "Machining Characteristics according to the Wheel Wear in Surface Grinding for Structural Ceramics of Si3N4," J. Korean Soc. Machine Tool Eng., Vol. 12, No. 4, pp. 9-16, 2003.
8. Choi, Y., Song, K., Park, K., Hong, Y., Kim, K., Lee, S., and Choi, H., "A Study on a Ultrasonic Vibration Assisted Grinding of Alumina Ceramic with Diamond Grinding Tool," J. of the Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 11, No. 1, pp. 13-19, 2012.
9. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID(Electrolytic In-Process Dressing) Grinding

- with Superfine Grain Metallic Bond Wheels,” *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 287-290, 1995.
10. Won, J. and Lee, E., “Ultra Precision Lapping of Machinable Ceramic by In-process Electrolytic Dressing,” *J. of the Korean Soc. Machine Tool Eng.*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-7, 2003.
  11. Kwak, T. and Ohmori, H., “Nano-Level Mirror Surface Machining Technology for SiC Ceramics Mirror,” *J. of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 29-36, 2006.
  12. Kwak, T., Ohmori, H., Lin, W., Eto, H., and Uehara, Y., “Ultraprecision Machining of Large-aperture Mirror for Space and Astronomical Telescope,” *J. of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 24, No. 2, pp. 13-18, 2007.
  13. Kim, Y., Kwak, T., and Kim, K., “Mirror-surface Machining Properties of Structural Ceramics using Diamond Abrasives,” *J. of the Korean Ceram. Soc.*, Vol. 47, No. 4, pp. 290-295, 2010.
  14. Kwak, T., “Properties of Mirror-surface Grinding for Metal Matrix Ceramic Composites,” *J. of the Korean Ceram. Soc.*, Vol. 49, No. 1, pp. 90-94, 2012.
  15. Aum, H., Roh, B., Lee, S., and Jang, T., “Development of Machining Apparatus for Ceramic Ball Bearing,” *J. of the Korean Soc. Mechanical Eng. A series*, Vol. 22, No. 3, pp. 545-553, 1998.
  16. Rosensweig, R. E., “Fluid Magnetic Buoyance,” *J. AIAA*, Vol. 4, No. 10, pp. 1751-1758, 1966.
  17. Kang, I., Kang, M., Kim, J., Kim, K., and Seo, Y., “A Study on the Ultrasonic Machining Characteristics of Alumina Ceramics,” *J. of the Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 2, No. 1, pp. 32-38, 2003.
  18. Moon, H., Park, B., Lee, C., and Kim, S., “A Study on the Surface Roughness of Ceramics according to Ultrasonic Polishing,” *J. of the Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-21, 2003.
  19. Park, S., Lee, B., and Choi, H., “Micro Hole Machining for Ceramics (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Using Ultrasonic Vibration,” *J. Korean Soc. Machine Tool Eng.*, Vol. 13, No. 2, pp. 104-111, 2004.
  20. Kwak, T., “Machining Properties to Nano-Level Mirror Surface Finishing for Fine Grained WC-Co 18% Alloy using Magnetic Polishing Slurry,” *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 46, No. 1, pp. 102-107, 2009.
  21. Gam, J., Ha, J., Cheong, D., and Han, K., “Machinability and Strength of AlN-BN Ceramics,” *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 31, No. 2, pp. 177-184, 1994.
  22. Lee, Y., Kim, J., Cho, W., Cho, M., Lee, E., and Lee, J., “Effect of h-BN Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlN Ceramics,” *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 40, No. 9, pp. 874-880, 2003.
  23. Beck, S., Cho, M., and Cho, W., “Mechanical Properties and End-milling Characteristic of AlN-hBN Based Machinable Ceramics,” *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-81, 2008.
  24. Kim, D., Cho, M., Cho, W., Lee, E., and Lee, J., “A Study on the Micro Hole Drilling Characteristics of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-hBN Based Machinable Ceramics,” *J. of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 21, No. 4, pp. 48-56, 2004.
  25. Ryu, G., Kim, H., Kim, H., Yang, S., Jang, K., and et al., “Ceramic Core Processing Technology for the Glass Mold of Aspherical Lenses using High-speed Cutting Machine,” *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 11, No. 3, pp. 7-12, 2012.
  26. Yoon, B. and Kim, J., “A Study on the Machinability And Machining Properties of Composite Ceramics(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by EDM,” *J. Korean Soc. Machine Tool Eng.*, Vol. 4, No. 4, pp. 61-68, 1995.
  27. Wang, D., Woo, J., and Yun, J., “Die-sinking Electrical Discharge Machining with Ultrasonic Emission for Ceramic Matrix Composite,” *J. of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 16, No. 8, pp. 9-15, 1999.
  28. Youn, H., Lee, K., and Lee, D., “The Influence of Processing Condition and Assistance Gas in Microhole Machining of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics,” *J. Korean Soc. Machine Tool Eng.*, Vol. 8, No. 5, pp. 115-120, 2003.
  29. Kim, S., Sohn, I., Noh, Y., Lee, J., and Jeong, S., “Precision Microdrilling of Alumina Ceramic Substrates by Femtosecond Laser Ablation,” *J. Korean Soc. Laser Proc.*, Vol. 11, No. 1, pp. 25-31, 2008.
  30. Seo, W., Koo, Y., Ko, J., and Kim, G., “Optimization of Glass Wafer Dicing Process using Sand Blast,” *J. Korean Ceram. Soc.*, Vol. 46, No. 1, pp. 30-34, 2009.