

◆ 특집 ◆ 세라믹 초정밀 가공 기술

알루미나 세라믹스 ELID 연삭면의 자기연마 가공 특성

Application of Magnetic Assisted Polishing for ELID Ground Surface of Aluminum Oxide Ceramics

이용철¹, 정명원², 김태규², 곽태수^{2,✉}
Yong-Chul Lee¹, Myung-Won Jung², Tae-Kyu Kim², and Tae-Soo Kwak^{2,✉}

¹ 연암공업대학 컴퓨터응용기계과 (Dept. of Computer Aided Mechanics, Yonam Institute of Digital Technology)
² 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

This study has focused on the application of magnetic assisted polishing for ELID ground surface of aluminum oxide ceramics. Aluminum oxide ceramics has been widely used as advanced materials for electric, optic, mechanic, chemical usage and so on. In this study, ELID grinding and magnetic assisted polishing technology was adopted for high-effective manufacturing and high quality surface of ceramic parts. The characteristic of MAP machining have been evaluated by the value of surface roughness and surface profile before and after magnetic assisted polishing. As the results of experiments, the surface roughness after magnetic assisted polishing has shown a significant improvement and the surface roughness was more improved when the feed rate of tool became slow.

Key Words: Magnetic Assisted Polishing (자기연마), ELID Grinding (ELID 연삭), Aluminum Oxide (산화알루미늄)

1. 서론

세라믹 소재는 내마모성, 내열성을 비롯한 기계적, 전자기적, 화학적 성질 등의 우수한 특성을 가지고 있어 첨단 기계의 핵심 부품 및 극한 상황에서 작동되는 중요 소재 부품으로 오늘날 급속한 산업 발전과 더불어 그 용도는 날로 증가하고 있다. 그러나 세라믹 소재는 경도가 높고 취성이 강하여 기계적 가공이 어려운 난삭재로 분류되고 있을 뿐만 아니라 가공의 어려움으로 인해 세라믹의 용도가 제한적이었다. 최근에는 세라믹 가공기술에 관한 연구가 활발히 진행되어 그 용도의 폭을 넓혀가고 있다. 알루미나 세라믹스는 기계적 강도, 내열성, 내마모성, 내식성 등이 우수하기 때문에

전기, 전자, 광학, 기계, 화학 등 여러 분야에서 첨단소재로 널리 사용되고 있다. 파인세라믹스용으로 사용되는 고순도 알루미나는 일반적으로 99.5% 이상의 순도를 가지며, 평균 입자크기가 1 μm 이하인 미세한 분말로서 이루어져 있다. 반도체 공정용 부재를 비롯하여 세라믹공구, 전자부품, IC기판, 내마모자기 등에 적용되고 있으며 이 외에도 알루미나는 정형 및 부정형 내화물, 연마재, 유리 원료 등 산업적 활용가치가 높은 재료이다. 세라믹 소재의 제거 가공은 다이아몬드 지립을 이용한 연삭 또는 연마 가공에 주로 의존하고 있다. 연삭 가공은 연마 공정에 비해 가공능률이 높고 표면의 형상정밀도가 높은 반면 취성이 높은 세라믹 소재의 제거 가공에서는 칩핑 현상 등으로 인해 제조

공정의 안정화를 도모하는 것이 쉽지 않다. 세라믹과 같은 취성 재료의 제거가공을 위해서는 미소한 절입량과 낮은 절삭저항으로 가공할 수 있는 기술이 요구된다.

ELID(Electrolytic In-process Dressing) 연삭 가공은 가공 중 눈매움 현상을 저감하여 연삭 저항을 줄여주는 가공 기술로서 세라믹스와 같은 취성 재료의 연삭 가공에서 효과적으로 활용되고 있으며,^{1,2} 자기연마(Magnetic Assisted Polishing) 가공은 자성연마재와 혼합한 연마 지립의 운동과 자기력을 이용하여 연마력을 얻는 방법으로서 낮은 절삭저항으로 공작물의 미세 표면 가공이나 미세 버 제거에 우수한 능력을 보여주는 기술이다. 연삭 가공 후에 생성되는 표면변질층이나 연삭가공흔(痕)의 제거에도 응용되고 있다.³⁻⁵ 공작물이 비자성체인 경우에는 극성제어를 통해 자기력을 변화시켜 자기연마 효율이 현저히 떨어지는 문제를 극복할 수 있다.⁶ 낮은 절삭저항에도 불구하고 ELID 연삭은 슷돌에 의한 가공 방식이므로 공작물의 표면에는 미세한 연삭가공흔이 슷돌에 전사되어 나타나게 된다. 이러한 연삭가공흔을 제거하는데 자기연마 기술을 활용할 수 있다.

본 연구에서는 반도체 공정용 부재로서 사용되는 알루미늄이나 세라믹스를 대상으로 일정한 범위내의 표면조도를 충족시키면서 내마모성이 우수한 표면 품위를 얻기 위하여 고능율 연삭 공정과 고품위 연마 공정을 조합한 가공 기술을 제안하고 실험을 통해 그 효율성을 검증하고자 한다. 즉, 고능율 연삭 가공을 위해 ELID연삭 기술을 적용하여 시편을 제작하고, 가공 시편의 표면다듬질에는 자기연마를 활용함으로써 고능율 제거 가공 및 우수한 표면 품위를 얻고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험 방법

알루미늄이나 세라믹스의 자기연마 가공 특성을 분석하기 위해 ELID연삭으로 4인치 크기의 원형 알루미늄 시편을 제작하였다. ELID 연삭에서 주철 결합제 다이아몬드 지립의 슷돌을 사용하였으며, 원형 시편을 좌우로 나누어 입도 325번 및 2000번으로 각각의 평활면을 제작하였다. ELID연삭 가공면의 자기연마 가공 특성을 분석하기 위해 Fig. 1 과 같이 연마 지립의 크기와 공구의 이송속도를 달리하여 자기연마 실험을 수행하고 각각의 표면

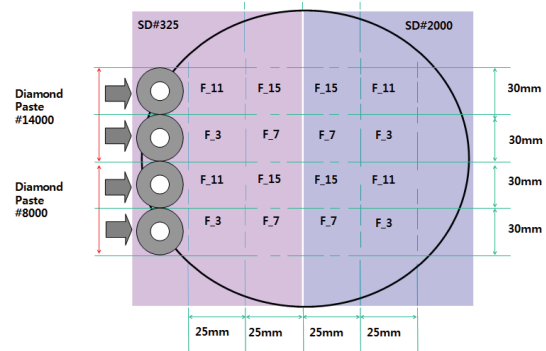


Fig. 1 Schematic diagram for experimental method

Table 1 Condition of magnetic assisted polishing

Tool shape and size	Flat end and slit type, Ø25mm
Magnetic abrasive	Fe powder(#100, #325) + Diamond paste(#8000, #14000)
Polishing conditions	Gap : 0.8mm Magnetic flux density : 0.5T
Tool revolution	700rpm
Tool feed rate	3, 7, 11, 15mm/min
Polishing iteration	1 time

에 대해 표면조도를 측정하고 피삭 특성을 분석하여 자기연마에 의한 알루미늄이나 세라믹의 연마 상태를 관찰하였다. 자기연마를 위한 슬러리는 철분말(Ferrite powder)과 다이아몬드 지립(Diamond Paste) 그리고 연삭유를 적절한 비율로 구성 및 배합하여 사용하였으며, 다이아몬드 지립은 입도 8000번과 14000번을 각각 사용하였다. 자기연마 실험에서 직경 25mm의 공구를 이용하여 공작물간의 간격을 0.8mm로 일정하게 유지하였다. 자기연마를 위한 실험 조건은 Table 1과 같다. 공구의 회전수는 700rpm으로 하였다. 자성연마재가 공구에 고르게 부착되기 위해 1.37A의 전류와 9.6V의 전압으로 설정하였으며 이때의 자력세기는 0.5T이다. 자기연마 후 가공표면의 변화를 분석하기 위해 이송속도를 각각 3mm/min부터 15mm/min까지 4mm/min 간격으로 증가시켜 4종류의 연마 실험을 수행하였다.

2.2 실험 및 측정장치

자기연마 실험은 자기연마 시스템을 CNC 밀링기 또는 머시닝센터에 장착하여 사용할 수 있다. 자기연마 공구 시스템은 전자석과 철심으로 만들어진 연마공구, 직류전원장치 그리고 자성연마재로 구성되어 있다. 공구선단과 공작물 표면 사이

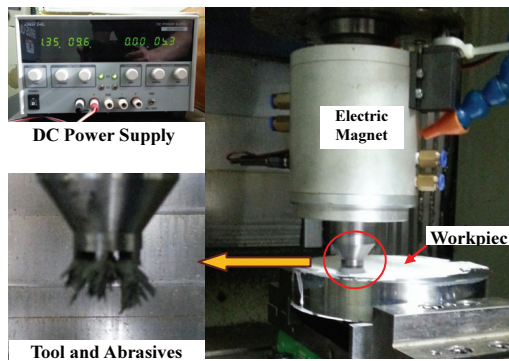


Fig. 2 Experimental set-up for magnetic assisted polishing

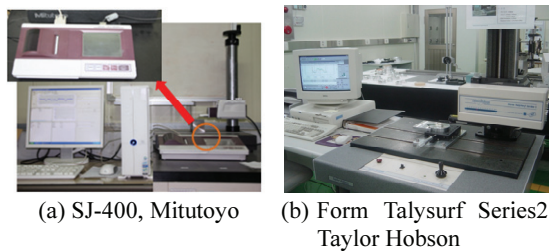


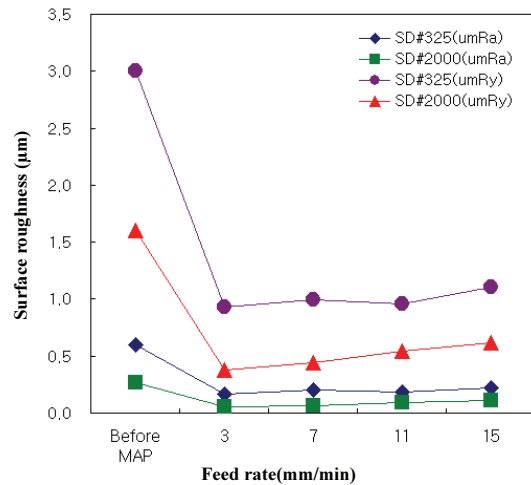
Fig. 3 Measurement system for surface roughness and surface profile

에 일정한 간극을 유지하고 이 간극에 자성연마제를 채운 다음 직류 전류를 흘리면 자성연마제는 자화되어 공구 선단부터 공작물 표면까지 브러쉬 모양으로 정렬이 된다. 이것이 유연성을 가진 연마지립 역할을 하게 된다. Fig. 2는 자기연마 실험을 위해 구성한 실험 장치의 사진이다. 자기연마 실험 후 시편의 표면조도와 표면형상을 측정하여 연마가공 특성을 분석하였다. 표면조도 측정에는 접촉식 표면조도 측정기(SJ-400, Mitutoyo co. ltd.)를 이용하였으며, 시편 표면의 형상을 분석하기 위해서는 접촉식 표면형상측정기(Form Talysurf Series2, Taylor Hobson co. ltd.)를 이용하였다. 또한 이송속도에 따른 가공 표면의 변화와 가공 모드를 확인하기 위하여 광학식 표면관찰현미경(IMS-M-345)을 이용하여 시편의 표면을 확대 관찰하였다. Fig. 3은 본 실험에서 사용된 측정 기기의 사진이다.

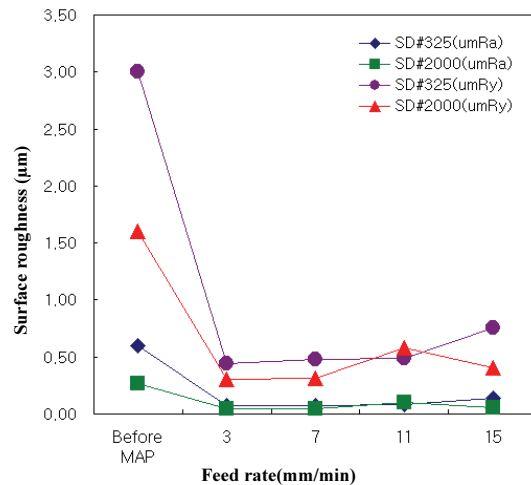
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 이송속도와 표면조도

자기연마 가공에서 공구의 이송 속도는 연마



(a) Grit number of diamond paste, #8000



(b) Grit number of diamond paste, #14000

Fig. 4 Comparison of measurement results for surface roughness

지립과 공작물과의 접촉 시간을 결정하는 요인 중 하나이다. 자기연마 공구의 이송속도가 느린 경우에는 공작물에 대한 지립의 연마작용 시간이 길어 지므로 일반적으로 연마량이 증가하게 되고 표면 조도는 개선되는 경향이 나타난다. 그러나 지나친 연마시간의 경과에는 형상정밀도를 오히려 악화시키는 경우도 있으므로 공작물의 연마특성을 고려한 적절한 이송속도를 선정하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 알루미늄 세라믹스의 자기연마에 있어서 적절한 자기연마 조건을 선정하기 위하여 이송 속도에 따른 표면조도를 측정하고 두 인자 간의 상관성을 분석하였다.

Table 2 Measurement results of surface roughness, μmRa

Feed Rate (mm/min)	Before MAP		After MAP			
	SD325	SD2000	Diamond #8000		Diamond #14000	
			SD325	SD2000	SD325	SD2000
3	0.595	0.266	0.166	0.056	0.070	0.046
7			0.202	0.066	0.076	0.049
11			0.187	0.088	0.084	0.104
15			0.225	0.111	0.138	0.058

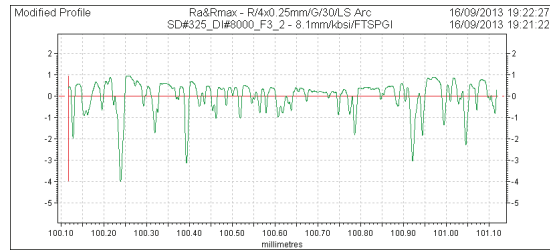
Table 3 Measurement results of surface roughness, μmRy

Feed Rate (mm/min)	Before MAP		After MAP			
	SD325	SD2000	Diamond #8000		Diamond #14000	
			SD325	SD2000	SD325	SD2000
3	2.992	1.591	0.932	0.375	0.440	0.305
7			0.999	0.444	0.475	0.314
11			0.962	0.542	0.487	0.580
15			1.104	0.614	0.759	0.409

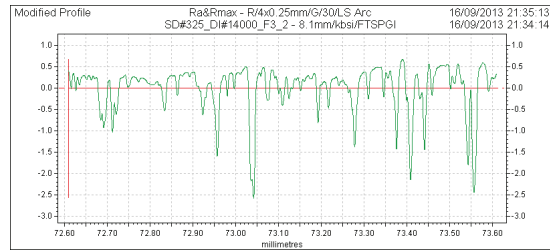
Fig. 4는 자기연마 전의 표면조도와 각 이송 속도에 따른 가공 시편의 표면조도를 접촉식 표면조도측정기에서 측정한 결과를 보여주고 있다. ELID 연삭으로 제작된 알루미늄 시편의 표면조도는 입도 325번 슷돌을 사용한 경우에 $0.595\mu\text{mRa}$ 로 나타났다, 입도 2000스톨인 경우에는 $0.266\mu\text{mRa}$ 이었다. Table 2와 Table 3은 입도 325번 슷돌과 2000번 슷돌을 이용하여 제작된 ELID연삭면에 대해서 8000번 및 14000번의 다이아몬드 지립을 이용하여 이송속도 별로 자기연마를 수행한 후 가공표면의 표면조도를 측정한 결과이다. 실험결과에서 자기연마 전 시편의 표면조도가 우수할수록 자기연마 후에도 우수한 표면조도를 얻을 수 있었으며, 이송속도가 느릴수록 표면조도는 개선되었다. ELID 연삭으로 제작된 시편을 대상으로 자기연마를 수행한 결과 325번 슷돌 연삭 가공면에 대해서는 표면조도가 $0.595\mu\text{mRa}$, $2.992\mu\text{mRy}$ 에서 $0.070\mu\text{mRa}$, $0.440\mu\text{mRy}$ 로, 2000번 슷돌 가공면에 대해서는 $0.266\mu\text{mRa}$, $1.591\mu\text{mRy}$ 에서 $0.046\mu\text{mRa}$, $0.305\mu\text{mRy}$ 로 크게 향상되었다.

3.2 자기연마 표면형상 분석

한편, 자기연마 후 알루미늄 소재의 표면형상 변화를 확인하기 위하여 접촉식 표면형상측정기 (From Talysurf Series2, Taylor Hobson co. ltd.)를 이용하여 측정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 입도 325번 및 2000번 슷돌을 이용한 ELID 연삭면에 대해서 자기연마 후에 표면 형상을 측정한 것이다. 측정 결과 그래프에서 기준선을 중심으로 아래쪽에 있는

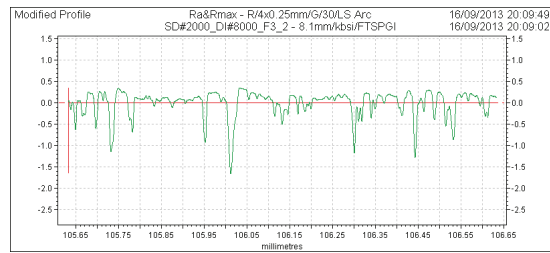


(a) Grit number of diamond paste, #8000

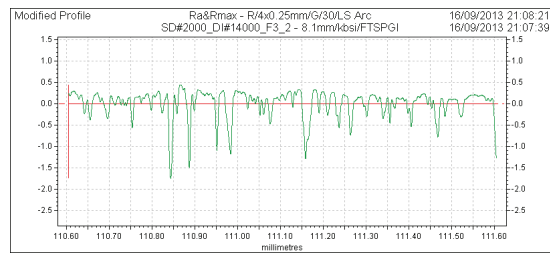


(b) Grit number of diamond paste, #14000

Fig. 5 Measured surface profile after magnetic assisted polishing by feed rate, 3mm/min on the ELID ground surface using #325 grinding wheel



(a) Grit number of diamond paste, #8000



(b) Grit number of diamond paste, #14000

Fig. 6 Measured surface profile after magnetic assisted polishing by feed rate, 3mm/min on the ELID ground surface using #2000 grinding wheel

곡은 매우 깊게 형성되어 있는 반면, 기준선 위로 돌출된 산의 형상은 낮고 편평한 모양을 하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 자기연마 전 연삭 공

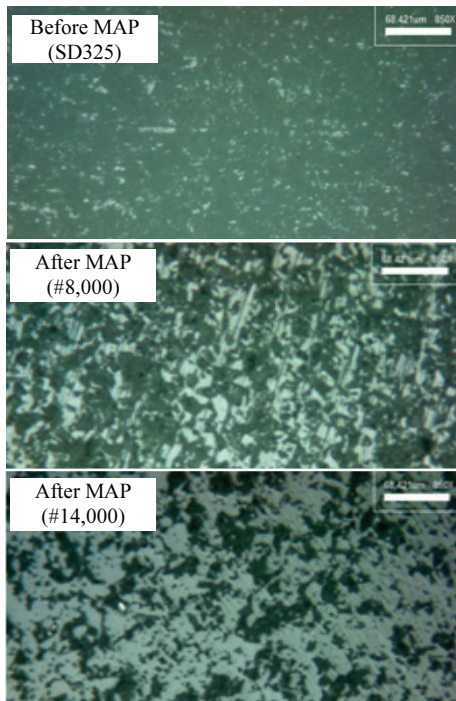


Fig. 7 Comparison of the surfaces before and after magnetic assisted polishing for ELID ground workpiece using grinding wheel of grit no. 325

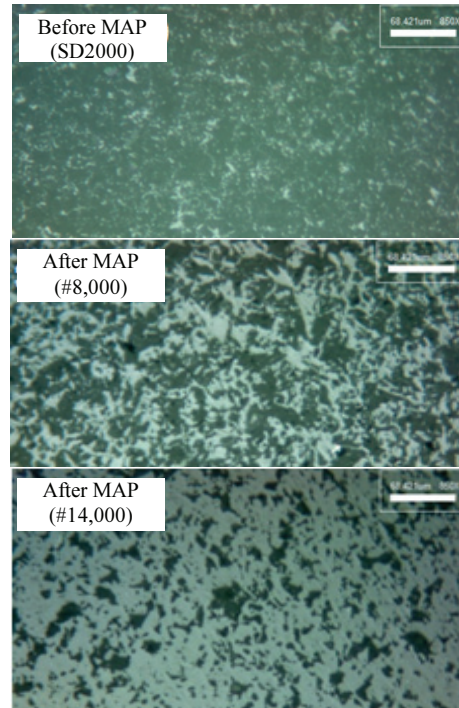


Fig. 8 Comparison of the surfaces before and after magnetic assisted polishing for ELID ground workpiece using grinding wheel of grit no. 2000

정에서 시편표면에 만들어진 산의 형상이 자기연마 가공 시에 다이아몬드 지립에 의해 잘려 나가면서 만들어진 형상이다.

자기연마 후 표면형상을 분석한 결과, 자기연마 후 표면조도가 큰 폭으로 향상되는 이유는 연삭 가공에서 만들어진 산이 자기연마에 의해 제거되면서 산의 높이가 낮아지기 때문인 것을 확인할 수 있었다.

3.3 가공모드 분석

대표적인 경취재료인 세라믹스는 절삭가공 시에 높은 취성으로 인해 공구의 절입시 취성 파괴에 기인하여 가공면이 형성되므로 공구의 전사면을 형성하는 것은 쉽지 않다. 그러나 절입량이 미세하고 가공압력이 낮은 경우에는 세라믹 소재 역시 전단소성변형에 기인하는 연성파괴로 인한 공구의 전사가공면이 형성될 수 있다. 따라서 자기연마 가공은 절입량이 미세하고 가공압력이 매우 낮으므로 공구의 전사가공면이 형성될 수 있다. 본 실험에서는 자기연마 전과 후의 표면을 광학식

표면관찰현미경을 이용하여 확대한 사진을 통해 자기연마에서의 가공 모드를 분석하고자 하였다.

Fig. 7은 입도 325번 숫돌로 가공한 시편의 ELID연삭면과 이 면에 대해서 8000번과 14000번의 다이아몬드 지립을 이용하여 각각 자기연마 실험을 수행한 후에 가공 표면을 촬영한 확대 사진이다. Fig. 8은 입도 2000번 숫돌로 가공한 시편에 대해서 동일한 방법으로 자기연마를 한 후에 촬영한 사진이다.

확대 사진에서 흰색으로 나타나는 부분은 자기연마 가공 시 다이아몬드 지립에 의해 편평하게 다듬어져서 빛이 반사되어 밝게 나타나는 것이다. 따라서 흰색이 많이 나타나는 것은 다듬질 가공이 많이 되어 표면이 편평해 졌다는 것을 의미한다. Fig. 7 및 Fig. 8에서 자기연마 전의 ELID 연삭면 사진에서는 어두운 색이 지배적이나 자기연마 이후의 사진에는 점차적으로 흰색의 비율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 14000번 다이아몬드 지립을 이용한 자기연마 가공면에서는 흰색의 비율이 확연히 많은 것을 알 수 있다. 또한, 8000번 지

립을 이용한 자기연마 사진에서는 연마 지립의 운동방향으로 남아 있는 연마 흔적을 비교적 뚜렷하게 볼 수 있는데 이것은 자기연마에 의해 알루미늄이나 세라믹스가 연성모드로 가공되고 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 고강도 소재로써 우수한 물성을 가진 알루미늄 세라믹스에 대하여 철분말과 다이아몬드 지립을 혼합한 자성연마재를 이용하여 자기연마 가공 실험을 수행하고, 알루미늄 세라믹스의 연마가공 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. ELID연삭으로 제작된 시편을 대상으로 자기연마 실험을 수행한 결과 325번 스톨 연삭 가공면에 대해서는 표면조도가 $0.595\mu\text{mRa}$, $2.992\mu\text{mRy}$ 에서 $0.070\mu\text{mRa}$, $0.440\mu\text{mRy}$ 로, 2000번 스톨 가공면에 대해서는 $0.266\mu\text{mRa}$, $1.591\mu\text{mRy}$ 에서 $0.046\mu\text{mRa}$, $0.305\mu\text{mRy}$ 로 크게 향상되었다.

2. 자기연마 전 시편의 표면조도가 우수할수록 자기연마 후에도 더욱 우수한 표면조도를 얻을 수 있었으며, 공구의 이송속도가 느릴수록 자기연마 후의 표면조도는 향상되었다.

3. 자기연마 후 표면형상을 분석한 결과, 표면조도가 큰 폭으로 향상되는 이유는 연삭 가공에서 만들어진 가공 표면에서의 산이 자기연마에 의해 제거되면서 산의 높이가 낮아지기 때문임을 확인할 수 있었다.

4. 표면관찰 현미경을 통해 자기연마 가공모드를 분석한 결과, 자기연마 후 가공 표면에 자기연마 지립이 남긴 흔적을 통해 자기연마에 의해 알루미늄 세라믹스가 연성모드로 가공되고 있음을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 경남과학기술대학교 2012년도 기성회 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kwak, T., "Machining Properties to Nano-Level Mirror Surface Finishing for Fine Grained WC-

Co18% Alloy using Magnetic Polishing Slurry," J. of the Korean Ceramic Society, Vol. 46, No. 1, pp. 102-107, 2009.

2. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-process Dressing," Annals of the Int. Academy for Prod. Eng., Vol. 37, No. 1, pp. 329-332, 1990.

3. Lee, Y., Kim, K., Kwak, T., and Lee, J., "An Experimental Study on Magnetic Assisted Polishing of Polycarbonate Plate for Recycling," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 1-6, 2013.

4. Lee, Y., Kim, G., and Kwak, T., "Investigation for Mirror-surface Machining Properties of Mold Core of Glass Molding Press by Parallel Grinding and Magnetic Assistance Polishing," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 12, pp. 22-27, 2010.

5. Kim, S., Ha, M., Kwak, J., Lee, Y., Park, H., and You, M., "Characteristic Evaluation of Magnetic Abrasive Polishing using the μ -MIP Equipment," Proc. of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering Spring conference, pp. 262-266, 2006.

6. Kwak, T. and Kwak, J., "Magnetic Abrasive Polishing and Its Application," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 3, pp. 266-272, 2012.