

◆ 특집 ◆ 렌즈/미러 가공 및 소재기술

단결정 사파이어 광학소자의 ELID 경면연삭 가공 특성

Properties of ELID Mirror-Surface Grinding for Single Crystal Sapphire Optics

곽재섭¹, 김건희², 이웅철³, 오오모리 히토시⁴, 곽태수^{5,✉}
Jae-Seob Kwak¹, Geon-Hee Kim², Yong-Chul Lee³, Hitoshi Ohmori⁴ and Tae-Soo Kwak^{5,✉}

¹ 부경대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ.)

² 한국기초과학지원연구원 (Korea Basic Science Institute)

³ 연암공업대학 컴퓨터응용기계과 (Department of Computer aided mechanics, Yonam Institute of Digital Technology)

⁴ 이화학연구소 소형재공학연구소 (Materials Fabrication Laboratory, RIKEN)

⁵ 경남과학기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: tskwak@gntech.ac.kr, Tel: 055-751-3317

Manuscript received: 2012.1.17 / Accepted: 2012.1.31

This study has been focused on application of ELID mirror-surface grinding technology for manufacturing single crystal optic sapphire. Single crystal sapphire is a superior material with optic properties of high performance as light transmission, thermal conductivity, hardness and so on. Mirror-surface machining technology is necessary to use sapphire as optic parts. The ELID grinding system has been set up for machining of the sapphire material. According to the ELID experimental results, it shows that the surface of sapphire can be eliminated by metal bonded wheel with micron abrasives and the surface roughness of 60nmRa can be gotten using grinding wheel of 2,000 mesh in 4.5 μ m, depth of cut. In this study, the chemical experiments after ELID grinding also has been conducted to check chemical reaction between workpiece and grinding wheel on ELID grinding process. It shows that the chemical reaction has not happened as the results of the chemical experiments.

Key Words: Single Crystal Sapphire (단결정 사파이어), ELID Grinding (전해연속드레싱 연삭), Optics (광학소자), Mirror Surface Grinding (경면가공), Surface Roughness (표면조도), Metallic Oxide (금속산화물)

1. 서론

사파이어는 알루미늄과 산소가 결합된 화합물인 알루미늄(Al_2O_3)가 2,050 $^{\circ}C$ 이상에서 녹은 후 응고되는 과정에서 육각형 격자 형태의 결정구조($\alpha-Al_2O_3$)¹를 가지고 한 방향으로 응고된 단결정화 된 물질이다. 사파이어는 빛의 투과성이 가장 우수한 재료 가운데 하나로서 뛰어난 광학적 특성을 가지고 있으며, 세라믹 재료 중에서 금속과 맞먹는 열전도도를 가지고 있는 우수한 열적 특성을 보이고

있고 극저온에서 초고온까지 상변태 없이 매우 안정된 저온 및 고온 안정성을 가지고 있다. 또한, 우수한 기계적 성질과 경도가 모스(Mohs) 9 로써 다이아몬드 다음으로 높다. 이러한 광학적, 기계적, 물리적 우수성으로 인해 광학 평판, 특수 광학창, 광학필터, 전자셀 커버, 프리즘, 레이저, 구경조리개 등 고기능성 광학부품에 활용되고 있다. 하지만 사파이어 재료는 기계적 강도 및 경도가 매우 높으므로 광학 부품에 요구되는 서브 마이크론 수준의 형상정밀도와 나노 수준의 표면조도를 얻는데

많은 어려움이 있다. 형상정밀도를 높이기 위해서는 고가의 가공 장치를 필요로 하며, 또한 표면조도를 높이기 위해서는 다듬질 공정에 상당한 가공 시간이 소요된다. 사파이어 광학소자의 초정밀 미세가공은 고정(固定)지립을 이용한 낮은 입도의 연삭 스톨로 가공한 후에 유리(流離)지립을 이용한 래핑(Lapping) 또는 폴리싱(Polishing)으로 많은 시간을 투자하여 원하는 표면조도와 형상정밀도를 달성하고 있다.² 이러한 유리지립에 의존하는 후가공 공정은 형상 정밀도를 제어하기가 힘들고 작업 시간이 많이 걸리며, 작업 환경이 나빠지는 등 공정상의 어려움이 있다. 사파이어와 같은 고경도 재료를 대상으로 보다 안전하게 가공효율을 높이기 위한 가공 방법은 수 마이크론(micron)에서 서브 마이크론 크기의 미세 지립을 이용한 초미세 지립 연삭 스톨에 의한 경면 가공을 하는 방법이다. 스톨 가공에 의한 미세한 표면잔류 응력을 제거할 필요가 있는 경우에 유리지립에 의한 최소한의 다듬질로 원하는 표면 정밀도를 달성할 수 있다. 이러한 방식은 형상정밀도를 높일 수 있으며 전체 가공 시간을 크게 단축하는 등 많은 장점이 있다. 연삭 공정에서 초미세 지립 연삭 스톨을 사용하기 어려운 것은 스톨의 눈메움>Loading) 현상으로 칩의 배출이 원활하지 않기 때문이며, 지나치게 잦은 드레싱이 요구된다. 이로 인해 연삭 가공을 지속적으로 수행하기 어려워 지므로 초미세 지립 연삭 스톨을 사용하기 위해서는 적절한 드레싱 방법이 필수적이다.

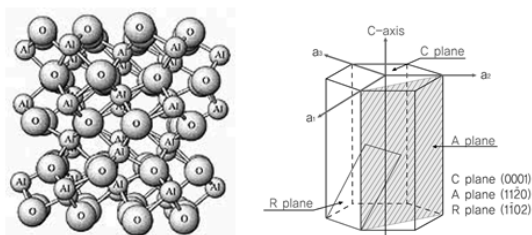


Fig. 1 Molecular structure and crystal structure of sapphire material

ELID(Electrolytic In-Process Dressing)³⁻⁵ 연삭법은 전해 연속 드레싱의 영문 약자로 CBN 또는 다이아몬드와 같은 초경질 입자를 갖는 스톨을 연삭 가공중에 전해 방식으로 드레싱하는 방법이다. ELID 연삭에서는 연삭과 드레싱이 병행되므로 연

삭 스톨의 눈메움>Loading)현상을 방지하므로 지속적으로 연삭이 가능하며 초미세 지립 연삭 스톨을 사용할 수 있는 장점이 있다.⁶

본 연구에서는 특수 광학소자로서 활용되는 고경도 사파이어 소재를 대상으로 ELID 연삭법을 적용하여 고효율 나노표면 가공 특성을 평가하였다. 실험은 로터리식 수평축 ELID 평면연삭 장치와 왕복식 수평축 평면연삭기를 개조한 ELID 연삭가공 장치에서 수행하고 사파이어 광학소자의 피연삭가공 특성을 비교 검토하였다.

2. 실험 및 평가 방법

ELID 연삭가공은 주철을 결합재료로 한 도전성 연삭 스톨과 펄스파형을 발생하는 전원장치, 비선형 전해현상을 동반하는 수용성 연삭액 등으로 구성되어 있다. 이를 이용하여 가공 중 스톨표면에 산화피막을 형성시켜 눈메움 현상을 저감하고 연속적으로 드레싱이 이루어지도록 함으로서 지립과 피가공물 간의 피삭특성을 향상시키는 기술로서 초미세 지립 연삭 스톨을 이용할 수 있는 경면 연삭 가공 기술이다.

2.1 실험 장치의 구성

본 실험에 사용된 시편은 단결정 사파이어이며, 실험장치 및 실험 조건은 Table 1 과 같다. 스톨은 실험 장치에 따라 결합체가 각기 다른 두 종류를 사용하였다. 왕복식 수평축 평면연삭기(YGS-63A)에서는 주철 결합체 다이아몬드 스톨로서 직경 150mm 와 160mm, 스톨 폭 10mm 를 사용하였고, 로터리식 수평축 평면연삭기(SANSEI)에서는 청동 결합체 다이아몬드 스톨로서 직경 300mm, 스톨 폭 10mm 를 사용하였다. 왕복식 수평축 실험장치는 평면연삭기에 ELID 전원공급 장치를 연결하여 ELID 연삭 가공이 가능하게 하였다.

Table 1 Specification of experimental equipments

Machine		YGS-63A	SANSEI
Grinding Wheel	Mesh No.	#170,#2000	#400,#1200
	Abrasive	Diamond	
	Bonding material	Cast iron	Bronze
Power Supply		ED-910	
Grinding Fluid		CG-7	
Workpiece		Sapphire	

Fig. 2 및 Fig. 3 은 사파이어 실험을 위해 구성된 ELID 연삭 실험 장치의 사진이다. Fig. 2 는 왕복식 수평축 평면연삭기에 ELID 연삭 시스템을 구성한 것이며, Fig. 3 은 로터리식 수평축 평면연삭기에 ELID 연삭 시스템을 구성한 것이다.

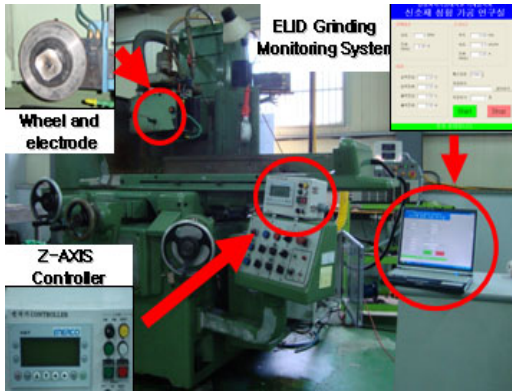


Fig. 2 Experimental setup for ELID grinding system using reciprocal surface grinding machine

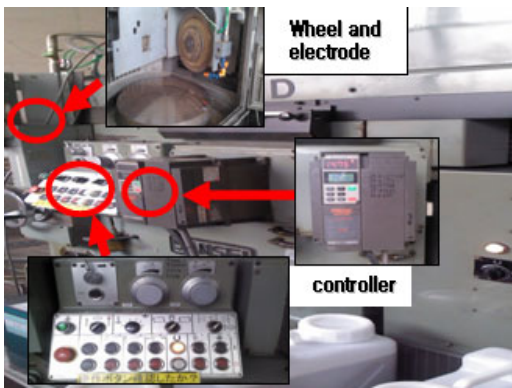


Fig. 3 Experimental setup for ELID grinding system using surface grinding machine with rotary table

표면조도(surface roughness) 측정은 두 종류의 접촉식 표면조도 측정기(DIAVITE_DH-6, Mitutoyo_sj-400)를 사용하였다. 모바일 타입의 표면조도계(DIAVITE_DH-6)는 가공 중 표면상태를 평가하는데 활용하였으며, 가공 후 시편 표면조도의 정량화는 고정식 표면조도계(Mitutoyo_SJ-400)의 결과값을 활용하였다. 또한 피가공면의 표면을 분석하기 위해서 표면구조현미경을 활용하여 사진을 촬영하고 분석하였다. 한편, ELID 연삭은 가공 중 슛돌 내 결합제의 산화가 진행되므로

스�돌표면에 생성된 금속산화물이 사파이어의 시편 표면에 확산될 가능성이 있다. 따라서 가공 전과 가공 후에 각각 주사전자현미경(JSM-5600LV)을 이용하여 사파이어 소재의 성분을 분석함으로써 가공표면에 금속산화물의 확산 여부를 확인하였다.

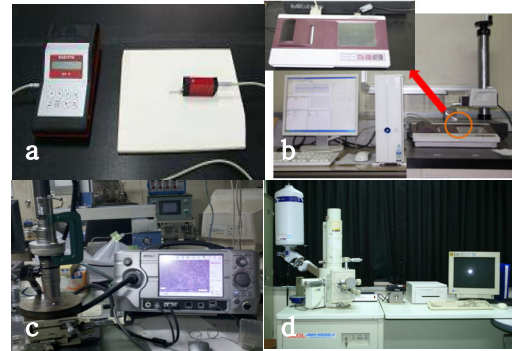


Fig. 4 Pictures of Measurement devices for evaluate of ground surface(a. DIAVITE_DH-6, Mobile surface roughness tester, b. Mitutoyo_SJ-400, surface roughness tester, c. Microscope, d. JSM-5600LV, SEM)

Table 2 ELID Grinding Condition

Wheel Binder	Mesh No.	Depth of cut	Grinding time	ELID Condition	
				IP(A)	Voltage
Cast Iron	#170	5um	60min	10	120
	#2000	2um	240min		
Bronze	#400	3um	90min		
	#1200	5um	180min		

2.2 실험조건

피삭 특성 실험은 슛돌의 입도가 낮은 것에서 높은 순으로 가공하였으며 슛돌의 입도에 따른 연삭조건은 Table 2 와 같다. 주철결합제인 경우에 입도 170 슛돌의 절입량은 5um, 입도 2000 슛돌의 절입량은 2um 으로 하고, 청동결합제인 경우에 입도 400 슛돌의 절입량은 3um, 입도 1200 슛돌의 절입량은 5um 으로 하였다. ELID 연삭 조건에서 초기 전압과 전류는 각각 120V, 10A 이며, 각 공정에서 연삭 개시 전 30 분 동안 초기 전해드레싱을 하고, 다듬질(#1200, #2000) 가공이 끝난 뒤에는 40 분간 슛돌을 공회전(Spark-out)시켜 공작물의 표면이 균일하게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슷돌 입도별 연삭성 평가

하이트 게이지를 이용하여 가공전과 후의 시편 높이를 측정하여 실제 절입량을 비교하였다. 입도 400 번 슷돌로 가공하였을 때 높이 변화는 33.5 μ m 으로 나타났으며, 입도 1200 번 슷돌로 가공하였을 때 높이 변화는 4.5 μ m 이었다. Fig. 5 와 Fig. 6 은 가공 전과 후에 측정한 높이 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 측정 결과로부터 다이아몬드 슷돌을 이용한 ELID 연삭법을 적용하면 사파이어는 연삭 가공에 의해 절입이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

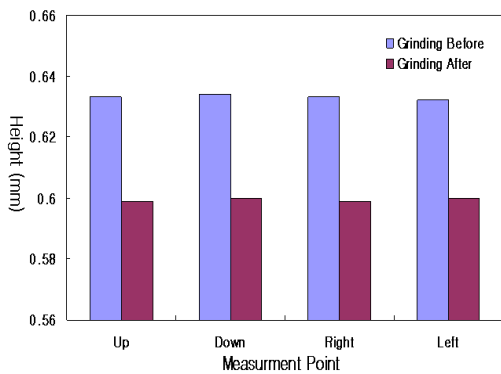


Fig. 5 Results of height measurement using #400 grinding wheel

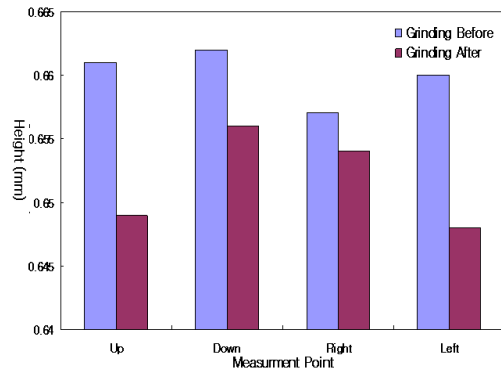


Fig. 6 Results of height measurement using #1200 grinding wheel

Fig. 7 은 표면구조현미경으로 입도 1200 슷돌을 사용하여 가공한 사파이어 시편의 표면을 촬영한 것이다. 표면 사진의 배율은 500 배로 하였으며,

가공표면에 슷돌의 다이아몬드 입자가 지나간 흔적이 뚜렷하게 나타나 있는 것을 확인할 수 있다.

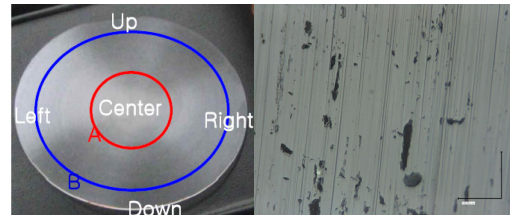


Fig. 7 Pictures of workpiece and magnified ground surface by microscope using #1200 grinding wheel

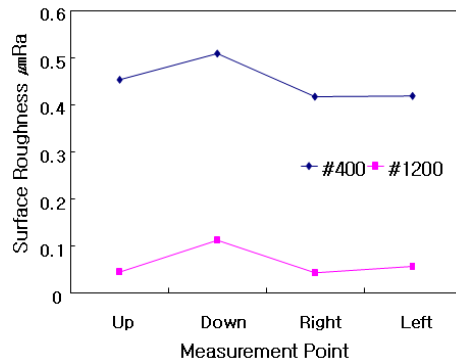


Fig. 8 Results of surface roughness measurement on ground surface of section A

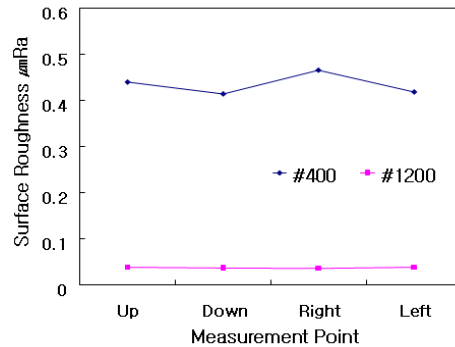


Fig. 9 Results of surface roughness measurement on ground surface of section B

3.2 입도별 표면조도

연삭성 평가 결과에 따라 ELID 연삭 기술을 적용하면 사파이어도 높은 입도를 가진 슷돌로 연삭

이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 경면 가공의 정도를 확인하기 위하여 단결정 사파이어 시편을 슷돌의 입도별로 가공하고 표면조도를 측정하였다. 측정은 접촉식 표면조도 측정기(Mitutoyo SJ-400)로 측정하였으며, 로터리 평면연삭기의 시편은 Fig. 7 에서와 같이 공작물의 회전 중심을 기준으로 내부영역인 내부(A section)와 외곽 영역인 외부(B section)로 나누어 측정하였다.

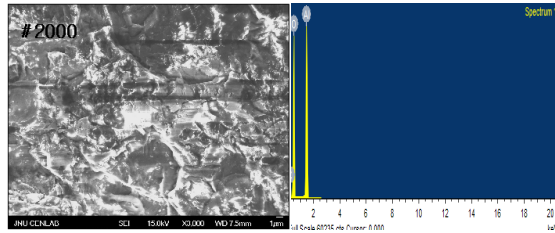


Fig. 10 Results of SEM and EDS analysis of ground surface using #2000 grinding wheel

Table 3 Elements on ground surface after ELID grinding using #170 grinding wheel

Element	App	Intensity	Weight (%)	Weight (%)	Atomic (%)
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	8.47	0.4088	20.71	0.45	15.68
O K	143.49	1.2746	112.57	0.43	63.97
Al K	57.58	0.9535	60.39	0.18	20.35
Totals			193.68		

Table 4 Elements on ground surface after ELID grinding using #1200 grinding wheel

Element	App	Intensity	Weight (%)	Weight (%)	Atomic (%)
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	7.81	0.3931	19.86	0.46	15.58
O K	133.20	1.2519	106.40	0.42	62.66
Al K	59.78	0.9626	62.11	0.18	21.69
P K	0.26	1.1093	0.23	0.04	0.07
Totals			191.87		

Fig. 8 과 Fig. 9 는 로터리 평면연삭기에서 제작한 시편의 표면조도를 측정한 결과이다. 입도 400 번 슷돌로 가공한 후 표면조도를 측정한 결과, 내부(A)영역은 각각 0.45umRa, 0.51umRa, 0.42umRa, 0.42umRa 이었으며, 외부(B)영역은 0.44umRa,

0.47umRa, 0.41umRa, 0.42umRa 로 전체평균 0.45umRa 였다. 입도 1200 번 슷돌로 가공한 시편의 경우에는 내부영역에서 0.05umRa, 0.11umRa, 0.04umRa, 0.06umRa 이었으며, 외부영역에서는 0.04umRa, 0.03umRa, 0.04umRa, 0.04umRa 로 전체적으로 평균 0.06umRa 의 표면조도를 얻을 수 있었다.

3.3 가공표면 성분 분석

ELID 연삭은 슷돌 표면에 금속산화물(Fe₂O₃)이 가공 중에 지속적으로 생성과 탈락이 반복되면서 연속드레싱 효과가 나타나는 것이다.⁷ 이와 같은 산화물은 공작물과 반응성이 높은 경우에 가공 후 표면에 영향을 미친다. 따라서, 수평축 평면연삭기에서 제작한 ELID 연삭 시편을 가공 후에 주사전 자현미경(JSM-5600LV)을 이용하여 SEM 측정 및 EDS 분석을 통해 사파이어 소재의 표면성분을 분석 함으로서 산화물의 검출 여부를 확인하였다. 사파이어와 동일한 분자식을 가지고 있는 알루미늄(산화알루미늄) 소재의 경우에는 ELID 연삭시 슷돌의 주철(Fe)성분이 공작물의 표면에 검출된다. 그러나 SEM 및 EDS 를 이용하여 분석한 결과 (Table 3, 4), 사파이어의 가공 표면에는 주철 성분이 검출되지 않았다. 이것은 사파이어가 매우 안정된 결정 구조를 가지고 있어서 금속산화물과 결합하지 않은 것으로 보인다.

4. 결론

광학용 특수소자인 단결정 사파이어를 대상으로 ELID 경면연삭 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) ELID 연삭 가공 전과 가공 후의 시편높이를 측정한 결과, 입도 400 번 슷돌로 가공하였을 때 높이 변화는 33.5um, 입도 1200 번 슷돌로 가공하였을 때 높이 변화는 4.5um 으로 나타났으며 시편의 중심부에서 가공량이 적었다. 따라서 초미세 지립의 연삭 슷돌을 이용하여 사파이어의 고정밀/고효율 가공이 가능함을 알았다.

2) 로터리 수평축 평면연삭 장치를 이용한 ELID 연삭가공 실험에서 단결정 사파이어 시편을 제작하고 표면조도를 측정한 결과, 입도 400 연삭 슷돌로 가공하였을 때 0.45umRa, 입도 1200 슷돌의 경우 0.06umRa 의 경면을 얻을 수 있음을 확인하였다.

3) ELID 연삭에서 슷돌 표면의 산화물과 공작물의 반응 여부를 확인하기 위해 가공표면을 SEM 및 EDS 로 성분을 분석 및 측정 한 결과, 가공 후 사파이어의 가공표면에는 주철 성분이 검출되지 않음을 확인하였다.

초미세 지립 연삭 슷돌을 이용한 사파이어의 경면가공에 ELID 연삭법을 적용한 결과, 고경도 소재인 사파이어가 취성과파괴 없이 연삭제거 가공이 가능하였으며, 공작물 가공표면의 성분에 변화가 없이 60nmRa 이하의 경면을 얻을 수 있었다. ELID 연삭에 의한 고경도 소재의 경면가공 기술은 사파이어의 응용성을 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2011 년도 기초과학지원연구원에서 수행중인 초정밀 열영상 현미경 사업(D31200)의 경남과학기술대학교 위탁연구임.

참고문헌

1. Kim, K., Ahn, Y., Seo, J. and Park, J., "Comparison of flux and natural sapphire after heat-treatment," J. of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 152-158, 2009.
2. Kim, Y., Kwak, T. and Kim, K., "Mirror-surface Machining Properties of Structural Ceramics using Diamond Abrasives," J. of the Korean Ceramic Society, Vol. 47, No. 4, pp. 290-295, 2010.
3. 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. 39, No. 1, pp. 329-332, 1990.
4. 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 Int. Academy for Prod. Eng., Vol. 44, No. 1, pp. 287-290, 1995.
5. Dai, Y., Ohmori, H., Watanabe, Y., Eto, H., Lin, W. and Suzuki, T., "Subsurface Properties of Ceramics for Lightweight Mirrors after ELID Grinding," Int. J. of Jpn. Soc. of Mech. Eng., Series C, Vol. 47, No. 1, pp. 66-71, 2004.
6. Kwak, T. and Ohmori, H., "Nano-level Mirror Surface Machining Technology for SiC Ceramics Mirror," J. of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 23 No. 6, pp. 29-36, 2006.
7. Kwak, T., "Machining Properties to Nano-Level Mirror Surface Finishing for Fine Grained WC-Co 18% Alloy using Magnetic Polishing Slurry," J. of the Korean Ceramic Society, Vol. 46, No. 1, pp. 102-107, 2009.