

사파이어 의료용 나이프의 연삭가공에서 지그의 탄성계수가 날 부 형상에 미치는 영향

신건휘*, 이득우**, 곽태수*[#]

*경남과학기술대학교 기계공학과, **부산대학교 메카트로닉스공학과

Effect of the Elasticity Modulus of Jig Material on Blade Edge Shape in Grinding Process of Sapphire Medical Knife

Gun-Hwi Shin*, Deug-Woo Lee**, Tae-Soo Kwak*[#]

*Dept. of Mechanical Engineering, Gyeongnam National University of Sci. and Tech.,

**Nano Fusion Technology, Pusan National Univ.

(Received 22 February 2017; received in revised form 9 March 2017; accepted 21 March 2017)

ABSTRACT

This study focuses on the effect of the elasticity modulus of jig material on blade edge shape in the grinding process of a sapphire medical knife. The ELID grinding process was applied as the edge-grinding method for sapphire material. Carbon steel and copper have been selected as the hard and soft jig materials, respectively. The blade edge created by ELID grinding was measured by a surface roughness tester and optical microscope. The shape of the ground edge and surface roughness were compared using the measurement results. As a result, it was found that chipping in the blade edge of the sapphire knife occurred more than in the case of jig material with a high-elasticity modulus because of the high normal force in the grinding process. Moreover, the maximum height surface roughness, R_{max} , of the ground surface was higher in the case of the jig material with a high-elasticity modulus due to the difference in elastic elongation. It was considered to lead to chipping from the notch effect.

Key Words : Sharpening Grinding(날 세움 연삭가공), Jig Material(지그소재), Sapphire(사파이어), Surface Roughness(표면거칠기), Chipping(치핑)

1. 서 론

사파이어를 소재로 한 의료용 칼날은 경도가 높으며, 우수한 내식성 및 내화성으로 절개부의 감염 위험이 낮고 피부 손상이 적어 상처 치유도 빠

르다. 기존의 의료용 칼날은 제작에 용이한 스테인리스 소재 또는 경도 높은 다이아몬드 소재가 주를 이루고 있다. 스테인리스 소재의 나이프는 절개 시 피부 조직에 금속 이온이 용출되어 세포 손상의 위험이 있으며, 매끄러운 절개가 이루어지지 않아 절개 상처의 회복이 늦다. 다이아몬드 소재는 높은 경도로 인하여 가공이 어려울 뿐 아니라 날 부를 가공하는데 상당한 시간이 소요되므로 제작 비용이

Corresponding Author : tskwak@gntech.ac.kr

Tel: +82-55-751-3317, Fax: +82-55-751-3319

크게 증가한다. 단결정 사파이어는 우수한 경도 및 기계적 성질 뿐 아니라 고온 및 저온 안정성이 좋아 우주/군사용 광학시스템, 레이더 기기, 광학부품, 반도체의 기관, 의료기기의 부품 등과 같은 첨단기술 분야 및 광학 분야에 사용되며, 인체 내부의 산이나 여타 조직에 반응하지 않는 성질을 응용한 의료 분야에도 활용되고 있다.^[1] 사파이어는 다이아몬드에 비해 가공성이 우수하나 여전히 경취성으로 인해 제거가공이 어렵고 가공 능률이 낮으며 복잡한 형상 가공에 어려움이 있다. 단결정 사파이어를 수술용 나이프에 적용할 때는 예리한 날 세움과 우수한 표면조도가 요구된다. 나이프와 같이 예리한 칼날이 요구되는 경우에는 날 부의 소재가 얇아짐에 따라 칩핑 발생이 빈번하므로 이에 대한 대책이 요구된다. ELID(Electrolytic In-Process Dressing) 연삭 가공은 가공 중 스톨 표면에 생성된 산화피막이 눈매움 현상을 방지하여 드레싱을 위한 작업의 중단 없이 지속적인 연삭가공이 가능할 뿐 만 아니라, 연삭 저항이 낮아 사파이어와 같은 경취성 재료의 연삭가공에 적용하기가 용이하다^[2]. ELID 연삭에서는 가공 중 스톨 표면에 있는 산화 피막의 생성과 탈락이 계속 반복되는데 이를 ELID사이클이라고 한다. ELID사이클은 무정지 연속 드레싱 및 연삭 저항의 저감에 직접적인 영향을 미치므로 이를 제어할 필요가 있으며, ELID 모니터링 시스템을 이용하면 이를 감시하고 제어할 수 있다.^[3,4] 절삭가공 시 공작물은 공구에 의해 주어지는 주분력(Tangential force)과 배분력(Normal force)에 의해 제거 가공이 이루어지며, 이와 같은 가공력은 공구, 공작물, 가공장치 등에 탄성변형을 야기한다.^[5] 연삭가공에서 발생하는 탄성 변형은 스톨의 배분력이 주로 관여하고 있으며, 절삭 가공에 비해 압축 탄성변형이 크게 나타난다. 사파이어와 같이 경취성 재료는 탄성 변형이 거의 일어나지 않으므로, 연삭가공 시 배분력이 급격히 증가하여 순식간에 압축강도에 도달하므로 파손이 생기기 쉽다. 따라서 탄성이 큰 지그 재료는 연삭 가공에서 발생하는 배분력을 흡수하여 경취성 공작물의 파손을 저감할 수 있다.

본 연구는 사파이어 의료용 나이프의 날 세움 가공을 위해 ELID연삭 가공 기술을 적용하여 지

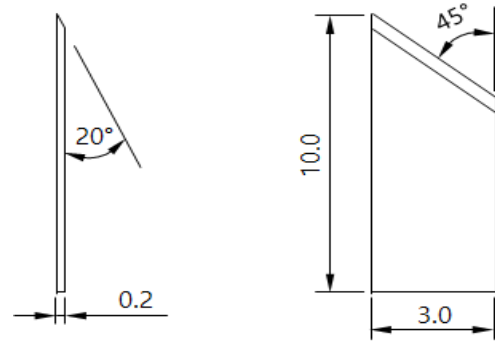


Fig. 1 The drawing of sapphire knife specimen

그의 탄성 변형이 나이프 날 부 형상 및 칩핑 현상의 변화에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

2. 실험 및 측정방법

2.1 사파이어 시편과 지그 소재

본 연구를 위한 사파이어 나이프는 가로 3mm, 세로 10mm, 두께 0.2mm로 날 끝은 폭 방향으로 45°를 이루고 있으며, 날 세움 각도는 두께 방향으로 편측 20°이다. 사파이어 나이프의 치수와 형상은 Fig. 1과 같다. 시편용 고정 지그는 시편의 두께 방향으로 20°경사의 날 부 가공을 위해 시편의 경사각과 동일한 각도로 제작되었다. 경질 지그로서 약 0.45% 탄소가 함유된 구조용 탄소강(Carbon steel), SM45C를 선정하였으며, 연질 지그로서는 순동(Copper), Cu를 선정하여 제작하였다. 실험에 사용된 순동과 탄소강의 항복강도는 각각 33.3MPa과 343MPa로 순동은 탄소강의 9.7%에 불과하고, 탄성계수는 각각 110GPa과 205GPa로 탄소강에 비해 순동은 약 53.7%에 해당한다. 지그로 사용된 탄소강 및 순동의 기계적 물성은 Table 1과 같다.

2.2 실험 및 측정방법

사파이어 나이프의 연삭 실험을 위하여 범용 평면연삭기(YGS-63A, YOUIL)에 ELID연삭 시스템을 구축하고 황삭 연삭을 위해서 입도 #325 스톨과

날 부 형성을 위해 #2,000의 주철결합제 다이아몬드 슛돌 2종류를 사용하였다. 가공 중 연삭 특성 분석을 위해 ELID모니터링 시스템을 이용하여 ELID드레싱 전류 및 저항변화 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 이용하여 기준전류에 도달했을 때 수동으로 절입하는 방식으로 실험하였다. ELID 연삭을 위한 인가전압은 80V로 고정하였으며, 공작물 테이블의 좌우 이송속도는 10[m/min], 전후 이송속도는 13[mm/min] 조건으로 하였다. Table 2는 실험을 위한 연삭가공 조건이다. 사파이어 나이프 시편의 고정을 위해 탄소강과 순동 두 종류의 지그는 날 세움 각도와 동일하게 20°의 경사면으로 가공하였으며, 이와 같은 경사면에 시편을 왁스로 고정하였다. 한편, 날 부 연삭가공이 완료된 시편은 표면조도 측정기(SJ-400, Mitutoyo)와 고배율 광학식 표면관찰 현미경(IMS-M-345, SOMETECH)으로 연삭 가공면의 표면조도와 날 부 형상을 측정하였다.

Table 1 Mechanical property of jig material for copper, Cu and 0.45% carbon steel, SM45C

Material symbol	Cu	SM45C
Hardness [Kgf/mm ²]	50	198
Tensile Strength, Ultimate [MPa]	210	569
Tensile Strength, Yield [MPa]	33.3	343
Elongation at Break [%]	60	20
Modulus of Elasticity [GPa]	110	205
Poison's Ratio	0.343	0.29
Shear Modulus [GPa]	46	80

Table 2 Condition for ELID grinding experiment

Grinding machine		YGS63A
Grinding wheel	Mesh no.	#325 / #2,000
	Abrasive	Diamond
	Bonding material	Cast iron
ELID power supply		K-ELID 910
ELID voltage		80V
Reciprocal table speed		10 [m/min]

탄소강 소재의 경사각 지그에 사파이어 시편을 왁스로 부착한 뒤 지그와 함께 Table 1의 조건으로 저입도(#325)의 주철결합제 다이아몬드 슛돌 가공 후, 고입도(#2,000) 슛돌로 가공하였다. 해당 절입 깊이는 #325 일 때 2.5 μ m, #2,000 일 때 1 μ m로 하였고, ELID드레싱 전류가 0.3A 이하에서 안정될 때 1회씩 절입하였다. ELID드레싱 전류는 슛돌 표면의 산화층 두께와 연관되며, 드레싱 전류가 0.3A이하로 안정될 때 충분한 절입이 이루어진 것으로 판단하였다. 동일한 방법으로 순동 소재의 경사각 지그에 시편을 부착하여 연삭가공 하였다.

2.3 지그 소재와 변형률

세라믹과 같은 취성 재료는 압입력이 0.01N 또는 굵기 깊이가 0.1 μ m수준에 있어서는 취성 재료에 소성유동 파괴, 즉 연성파괴가 발생한다고 보고된 바 있다.[6] 취성 재료의 연삭 가공에서 변형 파괴가 충분히 미소하여 연성파괴에 의해 생성된 가공면은 매우 고우며 높은 치수정밀도와 표면조도가 얻어진다. 연삭 가공에서 압입력은 주로 절입깊이와 지그의 압축변형에 영향을 받는다. 동일한 절입깊이 조건에서 다른 성질을 갖는 탄소강과 순동의 압축변형이 사파이어 칼날 가공에 미치는 영향을 평가하고 실험 결과를 비교한다. 연삭가공 중에 연삭스�돌 또는 공작물이 연삭점에서 받는 힘을 연삭력이라 하며, 연삭력은 접선분력(F_t), 법선분력 또는 배분력(F_n), 축방향 분력(F_s)등 세 개의 서로 수직되는 분력으로 나눌 수 있다. 절삭 가공에서와는 달리 연삭 가공에서는 법선분력이 가장 크며 통상적인 가공조건에서는 접선분력의 2.0~2.5배로 나타난다. 연삭분력을 구하는 일반화된 이론식은 다음과 같다.

$$F_t = i \cdot t = R_s \cdot b \cdot z \cdot \frac{v_w}{v} \quad (1)$$

$$F_n = i \cdot n = \lambda \cdot R_s \cdot b \cdot z \cdot \frac{v_w}{v} \quad (2)$$

여기서, i 는 동시 연삭날의 수이고, t 와 n 은 연삭입자 한 개의 접선방향과 법선방향의 연삭력이며, λ 는 법선방향과 접선방향의 연삭력 비를 나타

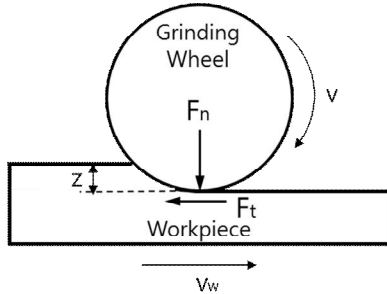


Fig. 2 Tangential and normal force in the grinding process

낸다. 또한 R_s 는 비연삭 저항을 나타내며 b 는 연삭폭, z 는 연삭깊이, v_w 와 v 는 공작물의 속도와 슷들의 속도를 나타낸 것이다.^[5,7]

연삭가공에서 볼 수 있는 임계연삭력(Threshold grinding force) 및 스파크 아웃(Spark out)공정은 가공탄성 현상에 기인된 것이다. Fig. 2는 연삭가공 중 공작물과 연삭스틀 사이에 작용하는 연삭력과 절삭량의 관계를 나타낸 것이다. 공작물은 슷들이 접촉되는 순간부터 소재가 제거되는 것이 아니라 어느 정도의 힘이 작용해야만 피가공물의 재료가 제거된다. 실제 제거가공이 일어나는 시점까지의 연삭력을 임계연삭력이라고 하며, 초기에 이 힘에 의해 절삭되지 않는 깊이를 임계연삭 깊이(Threshold grinding depth)라고 한다(fig.3). 사파이어 소재는 취성이 매우 높은 재료이므로 연삭 가공 시에는 지그 재료에 따라 탄성변형량과 임계연삭 깊이가 변한다. 따라서 지그 재료를 달리하면 연삭 중 법선분력에 영향을 미치게 되므로 취성이 높은 피가공물의 치핑 발생과 크게 연관될 것임을 알 수 있다. ELID 연삭에서 사파이어 나이프의 날 부 연삭을 위해 최대한 낮은 배분력으로 가공 되도록 절입량을 조절하고, 지그 소재의 탄성변형 영역 이내에서 가공하였다. Table 1과 fig.4에서와 같이 가공 중 지그의 탄성변형은 순동 소재가 탄소강에 비해 약 1.9배 정도임을 알 수 있다. 또한 사파이어의 탄성계수는 약 400 ~ 480 GPa이므로 탄소강에 비해 2배 이상, 순동에 비해 약 4배에 해당한다. 따라서 연삭가공 중 동일한 압력 하에

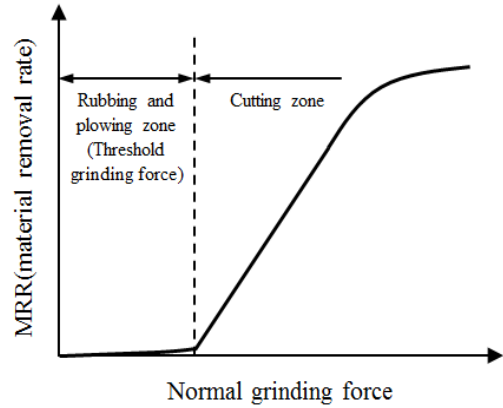


Fig. 3 Relationship between grinding force and material removal rate

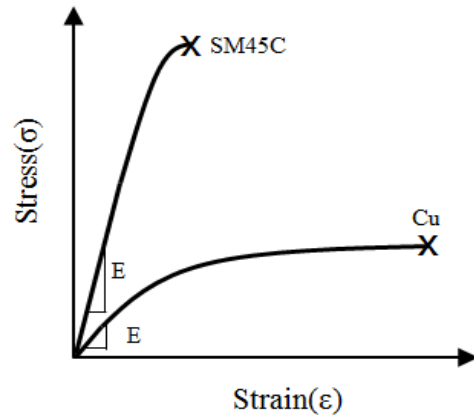


Fig. 4 Stress-strain curve for copper, Cu and carbon steel, SM45C

서 탄성변형은 사파이어가 탄소강의 50%, 순동의 25%에 불과하다. 따라서 사파이어를 가공할 때 순동 지그를 사용하면 연삭가공 중에 탄성변형의 75%가 순동 지그에서 발생하여 치핑 발생을 현저히 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공표면 분석

탄소강 지그를 이용한 가공에서 입도지수 #325

다이아몬드 스톨을 사용할 때 사파이어 날 부에 치핑이 발생하였다. 따라서 #325 스톨은 황삭 연삭에만 활용하였으며, 날 세움 다듬질 가공은 입도 #2,000의 다이아몬드 스톨을 사용하였다. Fig. 5는 실험으로 제작된 사파이어 나이프 시편의 가공 표면을 측정된 결과이다. 탄소강과 순동 지그에서 가공된 시편의 표면거칠기는 각각 $0.035\mu\text{m}R_a$ 와 $0.037\mu\text{m}R_a$, $0.267\mu\text{m}R_{max}$ 와 $0.237\mu\text{m}R_{max}$ 로 나타났다. 가공 표면 상태는 지그의 재료에 큰 영향을 받지 않고 두 경우 모두 경면(鏡面)의 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 그러나 취성 재료에 있어서 가공 흔적은 노치효과에 의하여 치핑이 유발되기 때문에 최대 높이 표면거칠기를 평가하여 치핑 발생 가능성을 확인할 수 있다. 최대 높이 표면거칠기는 일반적으로 가공면의 상태를 비교하는 지표로 활용되나 재료의 취성에 의한 치핑 발생 여부를 평가하는데도 유용하게 활용된다. 실험 결과에 따르면 탄소강 지그에서 가공된 시편의 최대 높이 표면거칠기(R_{max})는 순동 소재의 지그를 사용한 경우에 비해 높게 나타났다. 따라서 탄소강 지그를 사용할 경우에 치핑 발생 가능성이 더욱 높을 것으로 예상된다.

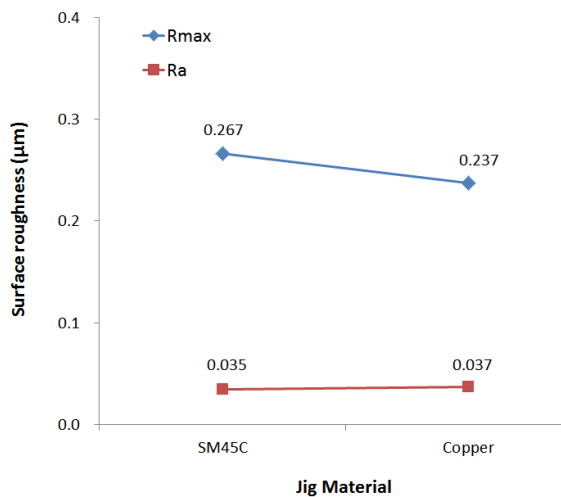
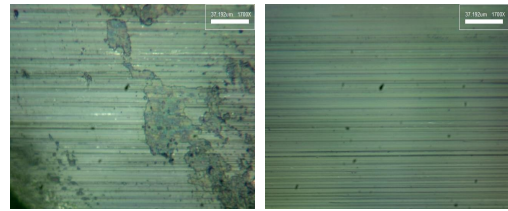


Fig. 5 Measurement results of surface roughness

3.2 날 부 형상 평가

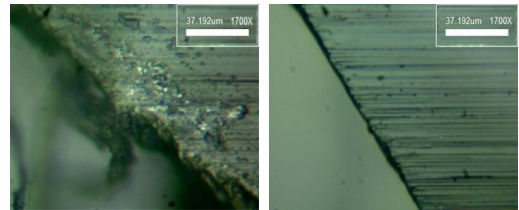
제작된 시편의 가공 표면과 날 부 형상을 비교하기 위하여 광학식 표면관찰 현미경으로 1,700배 확대하여 측정하였다. Fig. 6은 날 부 가공 표면을 각각 비교한 것이다. (a)는 탄소강 지그, (b)는 순동 지그를 사용하여 가공한 가공표면 확대 사진이다. (a)와 (b) 두 경우 모두 횡방향으로 연삭 스톨이 지나간 가공 흔적을 볼 수 있다. 이와 같은 가공 흔적은 사파이어 소재가 연성과괴에 의해 제거 가공이 이루어졌음을 의미한다. 순동 지그를 사용한 경우에는 가공표면의 대부분이 연성과괴에 의해 제거 가공이 이루어진 반면에, 탄소강 소재의 지그를 사용한 경우에는 가공 표면의 상당한 부분



(a) SM45C

(b) Cu

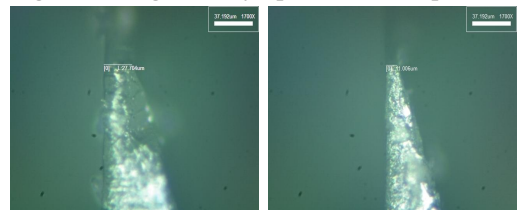
Fig. 6 Measurement results of ground surface magnified by optical microscope



(a) SM45C

(b) Cu

Fig. 7 Measurement results of ground blade edge area magnified by optical microscope



(a) SM45C

(b) Cu

Fig. 8 Measurement results of shape of blade edge magnified by optical microscope

에서 취성과파괴에 의해 제거가공이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

이는 연삭 가공중 탄소강과 순동의 압축 탄성 변형량의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 압축 탄성 변형량은 순동이 탄소강에 비해 약 2배에 해당하므로 가공 중 시편에 작용하는 연삭 배분력이 저감되고, 순동 지그를 사용했을 때 대부분의 가공표면은 연성과파괴에 의한 제거 가공이 이루어진 것으로 사료된다. Fig. 7은 사파이어 날 부를 비교한 사진이다. (a)는 탄소강 지그, (b)는 순동 지그를 사용한 경우이다. 탄소강 지그를 사용한 경우, 대부분의 날 부에서 치핑현상이 발생하였음을 확인할 수 있다. 반면에 순동 지그를 사용한 경우에는 치핑 현상이 거의 발견되지 않았다. Fig. 8은 순동과 탄소강 지그를 각각 사용하여 제작된 시편의 날 끝 반경을 측정 한 것이다. 순동 지그에서 5.5 μm , 탄소강 지그에서 13.8 μm 로 나타났다. 순동 지그를 사용한 경우에 치핑현상이 저감되어 더욱 예리한 날 세움 가공이 가능하였다.

4. 결론

사파이어 나이프의 날 세움 가공에서 지그 재료 가 날 세움 가공에 미치는 영향을 확인하고, 지그의 탄성계수와와의 상관성을 확인하기 위한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면 거칠기를 측정한 결과, 각 시편의 최대 높이 표면거칠기는 각각 0.267 $\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 와 0.237 $\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 로 나타났으며, 순동 지그를 사용한 경우에 최대 높이 표면거칠기가 우수하였다.
2. 광학식 현미경을 이용하여 가공 표면을 정성적으로 분석한 결과, 순동 지그에서 연성과파괴에 의해 제거 가공이 이루어진 가공 표면이 더욱 넓게 분포하였다.
3. 날 끝 반경을 측정한 결과, 순동 지그에서 5.5 μm , 탄소강 지그에서 13.8 μm 로 나타났다. 순동 지그를 사용한 경우에 더욱 예리한 날 세움 가공이 가능하였다.
4. 탄성계수가 낮은 순동 지그와 탄성계수가 상대적으로 높은 탄소강 지그를 이용하여 사파이어 나이프의 날 세움 가공 실험을 한 결과, 탄성계

수가 낮은 순동 지그를 사용한 경우에 가공 시편의 표면거칠기가 우수하였으며 날 끝을 보다 예리하게 가공할 수 있었다.

REFERENCES

1. Kwak, J. S., Kim, G. H., Lee, Y. C., Ohmori, H. and Kwak, T. S., "Properties of ELID Mirror-Surface Grinding for Single Crystal Sapphire Optics," J. of KSPE, Vol. 29, No. 3, pp. 247-252, 2012.
2. Kim, Y. Y., Kwak, T. S. and Kim, K. N., "Mirror-surface Machining Properties of Structural Ceramics using Diamond Abrasives," J. of KCS Vol. 47, No. 4, pp. 290-295, 2010
3. Kwak, T. S., Han, T. S., Jung, M. W., Kim, Y. J., Uehara, Y. and Ohmori, H., "A Study on Characteristics of ELID Lapping for Sapphire Wafer Material," J. of KSPE Vol. 29, No. 12, pp. 1285-1289, 2012
4. Koo, Y. and Kim, K. N., "High Precision and Effective Grinding using Super Abrasives and ELID," J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 2, No. 4, pp. 25-32, 2003.
5. Lim, G. H. and Kim, K. S., "Effects of the Surface Grinding Conditions on the Machining Elasticity Parameter," J. of KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 26-32 1998.
6. Kwak, J. S. and Kwak, T. S., "Review of Technology Trends for Ceramics Removal-Machining," J. of KSPE, Vol. 30, No. 12, pp. 1227-1235, 2013.
7. Chi, L. Z., Lee, S. J., Park, H. M., Oh, S. L. and Ha, M. K., "Effect of Change of Grinding Force on Geometric Error," J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 3, No. 2, pp. 10-17, 2004.
8. Shin, G. H., "Effect of elasticity modulus of jig materials on shape of blade edge in grinding process of medical sapphire knives", A Thesis for a Master's degree, Gyeongnam National Univ. of Sci. and Tech., Republic of Korea, 2017.