

# 다이아몬드전착 밴드쏘우장비를 이용한 고치밀도 알루미늄소결체의 다이싱가공 성능평가

이용문\*, 박영찬\*, 김동현\*\*, 이만영\*\*\*, 강명창\*.#

\*부산대학교 융합학부, \*\*한국세라믹기술원, \*\*\*MTI 다이아몬드

## Performance Evaluation of Dicing Sawing of High-densified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Bulk using Diamond Electroplated Band-saw Machine

Yong-Moon Lee\*, Young-Chan Park\*, Dong-Hyun Kim\*\*, Man-Young Lee\*\*\*, Myung Chang Kang\*.#

\*Graduate school of convergence science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

\*\*Business Support Division, Korea institute of ceramic engineering & technology, Jinju, Korea

\*\*\*MTI Diamond, Ltd, Inchoen 21990, Korea

(Received 21 November 2017; received in revised form 3 December 2017; accepted 5 December 2017)

### ABSTRACT

Recently, the brittle materials such as ceramics, glass, sapphire and textile material have been widely used in semiconductors, aerospace and automobile owing to high functional characteristics. On the other hand, it has the characteristics of difficult-to-cut material relative to all materials. In this study, diamond electro-deposited band-saw machine was developed to operate stably using water-coolant type through relative motion between band-saw tool and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> material. High densified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> material was manufactured by spark plasma sintering method. The bulk density was observed by the Archimedes law and the theoretical density was estimated to be 3.88 g/cm<sup>3</sup> and its hardness 14.7 MPa. From the dicing sawing test of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> specimen, behavior of surface roughness and band-saw wear are dominantly affected by the increase of the band-saw linear velocity. Additionally, an continuous pattern type of diamond band-saw was a very effective due to entry impact as a one-off for brittle material.

Key Words : Diamond Band-saw(다이아몬드 밴드쏘우), Dicing Sawing(다이싱가공), Spark Plasma Sintering (방전플라즈마소결법), Entry Impact(진입 충격), Alumina(알루미나)

### 1. 서 론

최근 다이싱가공(Dicing sawing)의 적용 분야는 고기능성 소재의 개발로 반도체, 항공 및 자동차분야까지 활발하게 적용되고 있다.

다이싱가공은 세라믹, 티타늄, 사파이어 잉곳 및 유리재료에 행해지는데, 대부분 난삭재(Difficult-to-cut material)의 특성을 가지고 있다. 특히 세라믹의 다이싱가공은 얇은 판 절단에 많이 사용되지만, 높은 취성과 경도로 인해 공구마멸과 절단 후 표면품질 저하문제가 많이 발생된다. 그로 인해 와이어 방전가공(Wire-electric discharge

# Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

machining) 및 레이저가공과 같은 특수가공이나 다이아몬드를 이용한 연삭공구가 세라믹절단에 이용되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 그러나 특수가공의 경우 생산성이 낮고 설비가 고가이며 공작물의 크기가 제한되기 때문에, 대부분 연삭공구를 많이 이용하고 있으며, 공구수명과 효율적인 절단을 위한 연구가 증가하고 있다<sup>[4-5]</sup>.

세라믹의 다이싱용 연삭공구는 연삭 휠 및 와이어쏘우와 같은 형태의 모재에 다이아몬드를 코팅(Coating)하여 사용된다. 하지만 기존의 다이아몬드 연삭 휠과 다이아몬드 와이어쏘우를 이용한 장비는 얇은 기판(2 mm 이하)의 다이싱절단에 있어서 상대성을 가지고 있다. 다이아몬드 연삭 휠의 경우, 높은 이송력을 이용한 빠른 절단시간과 단순 회전운동으로 절단되는 간단한 구동방식을 가지고 있지만, 공구의 절단폭(Kerf width)이 크고 재료 소모량과 절삭부하가 높아서 가공단면의 표면조도가 나쁘다. 또한 다이아몬드 와이어쏘우의 경우, 재료 소모량이 적고 가공단면의 표면조도가 우수하지만, 낮은 이송력으로 인해 소요시간이 길고 두 개의 롤러 사용으로 장력제어 등 장비구성이 복잡해 대량생산에 한계가 있다<sup>[5,6]</sup>. 이에 비해 다이아몬드가 전착된 밴드쏘우는 연삭 휠보다 얇은 두께로 절단하기 때문에 재료 소모량이 적고, 와이어쏘우보다 빠른 이송력으로 절단시간이 짧은 장점을 가지고 있다<sup>[7-9]</sup>.

따라서 본 연구는 다이싱용 밴드쏘우와 알루미늄 공작물의 상대적 운동을 이용한 절단장비를 새로이 설계 및 제작하였다. 절단에 사용할 세라믹소재는 방전플라즈마소결법(SPS, Spark Plasma Sintering)에 의해 고치밀화된 알루미나( $Al_2O_3$ )를 제조하였다. 세라믹소재에 적합한 밴드쏘우의 패턴형상을 선정하기 위해 연속(Continuous)형과 단속(Interrupted)형의 패턴에 대해서 진입충격(Entry Impact)에 따른 절단면을 비교분석하였다. 그리고 밴드의 선속도(Linear velocity)와 절단거리의 변화에 따른 공구상태와 가공면의 표면조도로 가공성능을 평가하였다.

## 2. 밴드쏘우용 절단장비 제작

### 2.1 밴드쏘우와 이송테이블의 구동원리

Fig. 1은 밴드쏘우용 절단장비의 구동원리를 이송력방향(X), 밴드의 회전방향(Y) 및 주절삭방향(Z)의 관점에서 표현하였다. 밴드쏘우는 0.2 mm 두께의 SUS304 기판에 폭 5 mm와 길이 200 cm의 링 형상을 하고 있다. 장비의 구동은 밴드쏘우의 회전과 이송 테이블의 중력에 의한 이송간의 상대운동으로 절단된다. 밴드쏘우의 구동방식은 100 Hz로 구동되는 DC모터에 의해 회전하는 풀리(Pulley)가 밴드쏘우를 YZ 방향으로 회전시키며, 이때 회전하는 밴드쏘우가 나머지 3개의 풀리에 벨트 역할을 하며 구동한다. 따라서 밴드의 선속도는 모터 회전수 및 밴드 길이로 조절이 가능하며, 모터 회전수  $N_s$ 는 식 (1)과 같이 모터 주파수  $f$ 에 비례하여 증가한다.

$$N_s = \frac{120f}{P} [rpm] \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 모터의 극수를 나타낸다.

이송 테이블의 구동원리는 추(Weight)의 중력에 의해 이송력방향으로 직선운동하여 밴드쏘우와 상대운동을 한다. 이때, 이송 테이블의 이송력  $F_f$ 은 식 (2)와 같이 추의 갯수( $n$ )의 질량에 비례한다<sup>[10]</sup>.

$$F_f = n \times 9.8 [N] \quad (2)$$

### 2.2 절단장비의 기구적 구성요소 및 제작

Fig. 2와 같이 취성소재 절단성능 평가를 위한 다이아몬드 밴드쏘우용 절단장비를 제작하였다.

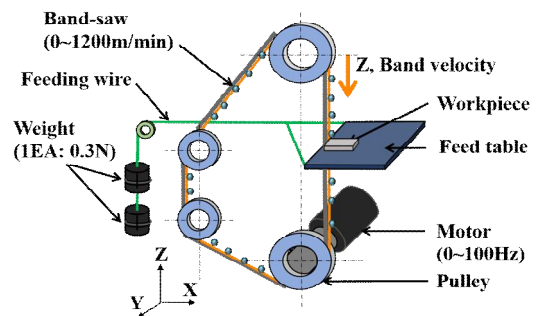


Fig. 1 Schematic of driving method for cutting machine

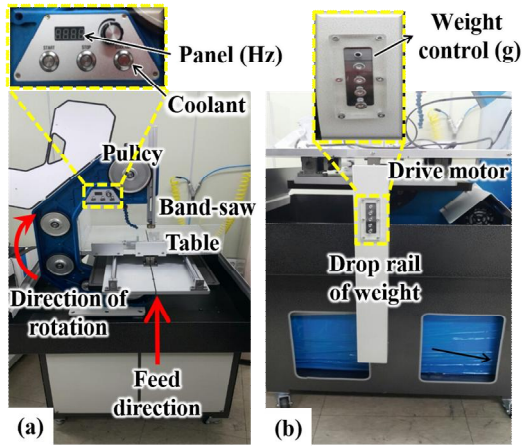


Fig. 2 Kinematics composition of band-saw cutting machine: (a) Front view and (b) Back view photo

밴드의 선속도는 패널(Panel)에서 구동모터의 주파수를 40 Hz~100 Hz 범위로 조절하고, 최대속도는 주파수가 100 Hz일 때 1200 m/min으로 회전한다. 이송테이블 위에 고정되는 공작물은 추의 무게를 0~5개로 조절하여 밴드쏘우 방향으로 절입된다. 다이싱공정에서 발생하는 열의 저감과 칩의 원활한 분리를 위해 수냉식의 절삭유(Water coolant)방식으로 노즐을 통해 분사되도록 하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 밴드쏘우용 절단장비의 가공조건 및 알루미나소결체 제조

고밀도를 가지는 알루미나 소결체의 절단성능 평가는 일정한 절단거리 100 mm에 대하여 다이싱형태로 수행하고, 예비실험을 통하여 이송력은 5.88 N(Number of weights; 2)로 고정하여 절단실험을 수행하였다. 절단장비의 주요 가공조건으로서 밴드쏘우의 선속도와 절단거리의 변화를 관찰하였으며, 이때 본 실험장치에서 사용한 밴드의 선속도는 480 m/min에서 1200 m/min까지 3단계로 구분하였으며, 총 5회로 절단거리 500 mm까지 순차적으로 평가하였다.

Table 1 SPS conditions of for high-densified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulk

Sintering conditions	
Powder	AES-12(SUMITOMO CHEMICAL, Japan)
Powder size	0.5 μm
Purity	99.9 %
Temperature rising speed	100 °C/min
Dwell time	10 min

Table 2 Mechanical properties of sintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Mechanical properties	
Relative density	3.88 g/cm <sup>3</sup>
Hardness	14.7 MPa

실험에 사용된 알루미나 소결체는 고에너지 방전플라즈마소결법을 이용하여 제조하였고, 그 소결조건으로는 Table 1과 같이 승온온도(Temperature rising speed) 100 °C/min, 유지온도는 1,400 °C이며 유지시간(Dwell time) 10 min에서 순도 99.9%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 파우더로 소결하였다. 소결체는 마이크로 비커스 경도계(MMT-X, MATSZAWA, Japan)와 아르키메데스 방법을 이용한 밀도계(MSA323S-100-DE, SARTORIUS, Germany)로 기계적 물성을 측정하였다. 그 결과는 Table 2와 같이 비커스 경도 14.7 MPa과 이론밀도 98.4 %로 고경도와 고밀도를 가지는 소재임을 확인하였다.

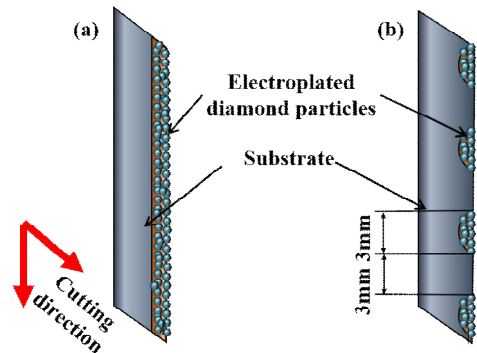


Fig. 3 Pattern of band-saw with diamond particles: (a) Continuous band-saw and (b) Interrupted band-saw

### 3.2 다이아몬드 밴드쏘우의 패턴에 따른 절단성능 평가방법

본 실험에서 사용한 다이아몬드 전착된 밴드쏘우 (MTI-C2000, MTI diamond, Korea)는 SUS304 기판에 니켈-다이아몬드가 0.45 mm 두께로 코팅되어 있는데, 다이아몬드의 입자 크기는 90  $\mu\text{m}$ 로 니켈-다이아몬드 복합전착이 되어있다. 이때 다이아몬드가 전착된 밴드쏘우의 연삭가공은 미세한 다이아몬드 입자가 공작물을 제거하는 절단가공이다. K. D. Bouzakis 는 절삭공구가 공작물에 초기 진입할 때의 절삭력이 공구에 미치는 영향에 대해서 연구하였다<sup>[11]</sup>. 일반적으로 밴드쏘우는 절삭에 비해 적은 진입충격(Entry impact)이 발생하지만, 다이아몬드의 입자 패턴에 따라 두 가지 형태로 전착되어 연속형과 단속형 밴드쏘우에 따른 취성재료 절단가공에서의 진입충격에 의한 가공성의 차이를 확인하고자 하였다.

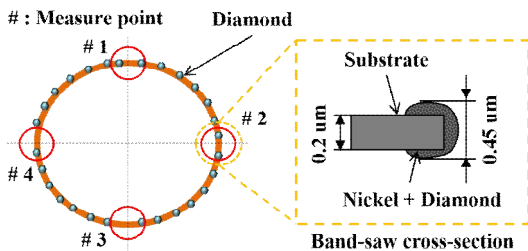


Fig. 4 measure points of band-saw thickness observing kerf width

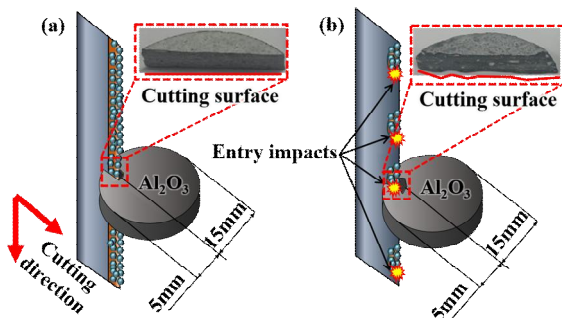


Fig. 5 Characteristic comparison of surface with band-saw pattern types: (a) Continuous band-saw and (b) Interrupted band-saw

Fig. 3(a)의 연속형 밴드쏘우는 다이아몬드와 니켈이 연속적으로 전착된 밴드쏘우로, 공작물과의 진입충격이 1회 발생한다. Fig. 3(b)의 단속형 패턴은 다이아몬드 입자가 모재에 일정한 간격(3 mm)을 두고 전착되어있어 가공시에 칩(Chip) 또는 열배출에 유리하다. 하지만 다이아몬드 입자의 전착부위가 취성소재에 진입과 이탈을 반복할 때 마다 단속적으로 충격력이 발생하여 취성소재 절단에 다소 불리할 것으로 예상된다<sup>[8,9]</sup>. 실제 연속형과 단속형의 취성소재 절단성 평가를 위해, 직경 20 mm, 두께 5 mm로 소결된 알루미늄을 각각 절단하여 절단면의 가공형상을 관찰하였다.

절단거리에 따른 밴드쏘우의 두께 변화관찰은 버니어 캘리퍼스로 확인하고, 측정위치는 Fig. 4와 같이 각 4군데로 하여 두께를 측정하였다. 절단면은 광학현미경(KH-8700, HIROX, Japan)을 이용하여 표면조도와 절단면의 가공상태를 관찰하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 밴드쏘우의 선속도 증가에 따른

#### 공구마멸에 의한 전착부 두께의 변화

Fig. 5는 밴드쏘우의 패턴 형태에 따른 알루미늄의 절단면을 보여준다. 연속형 밴드의 경우는 절단방향에 따른 절단면의 가공형상이 매우 균일함을 보였고, 그에 반해 단속형 밴드쏘우의 경우는 불균일한 가공표면 형상을 나타냈다. 그 이유는 연속형에 비하여 단속형은 진입충격이 주기적으로 발생하여 가공형상에 영향을 미치기 때문이다<sup>[11]</sup>. 그러므로 취성소재의 다이싱공정을 위한 밴드쏘우의 패턴 선정시에는 칩의 배출 또는 가공열의 배출 영향보다는 진입충격의 영향을 적게 받는 연속형 패턴이 유리함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 알루미늄소재의 절단거리에 따른 다이아몬드전착 밴드쏘우의 두께변화를 관찰하였다. 초기 밴드쏘우의 복합전착부 두께는 0.45 mm로 일정하며, 100 mm 절단 후에는 480 m/min을 제외하고는 급격한 두께 감소를 보였다. 480 m/min의 경우 300 mm까지 두께는 서서히 줄어들어, 500 mm에서도 나머지 두 밴드속도에 비해 두께 감소가 적었다.

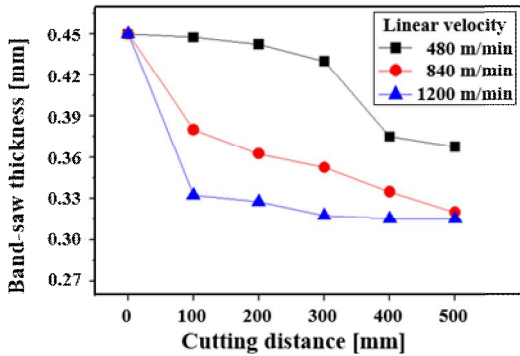
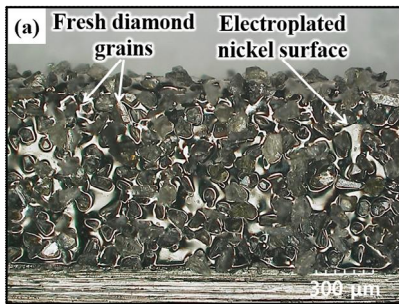
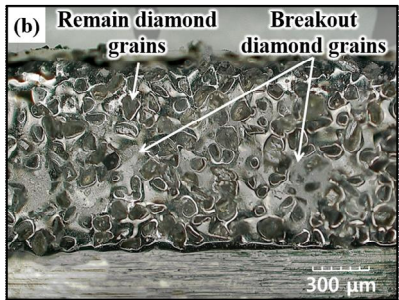


Fig. 6 Characteristics of band-saw thickness according to variation of cutting distance and band-saw's linear velocity



(a) New diamond band-saw



(b) Worn diamond band-saw

Fig. 7 Cutting surface comparison of new and worn diamond band-saw

이에 비해 밴드쏘우의 선속도 840 m/min과 1200 m/min의 경우는 절단거리 100 mm부터 복합 전착부의 급격한두께 감소량을 보였다, 이는 공구마멸에 의한 공구수명을 결정할 수 있는 중요한 가공데이터로 활용할 수 있다.

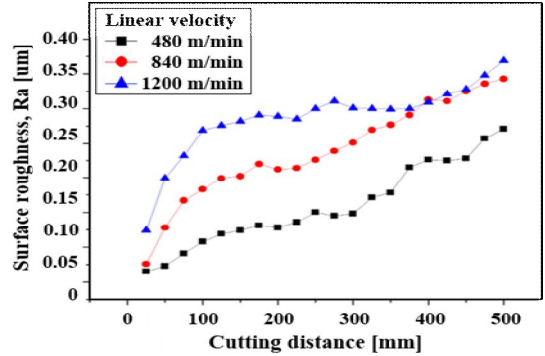


Fig. 8 Surface roughness with cutting distance

Fig. 7에서는 광학현미경을 통한 다이아몬드 밴드쏘우의 가공 전과 가공후의 다이아몬드 입자상태를 확인한 결과로서, 새로운 밴드쏘우상태에서는 다이아몬드 입자가 양호하게 전착되어 분포되어 있지만, 밴드 선속도 1200 m/min으로 절단거리 500 mm를 가공했을 때의 밴드쏘우의 표면상태는 다수의 다이아몬드입자가 탈락되어 넓은 니켈 표면이 두드러지게 나타났다. 이는 선속도가 증가함에 따라 공구가 공작물에 의해 받는 절삭부하가 크고, 그 부하에 의한 다이아몬드의 탈락이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 6에서 설명한 바와 같이, 절단 후 다이아몬드 밴드쏘우의 전착두께 감소에 의한 공구마멸의 진전현상과 직접적으로 관련있다는 것을 알 수 있다<sup>[12]</sup>.

## 4.2 밴드쏘우의 선속도 증가에 따른 절단면 표면조도의 변화

Fig. 8은 절단거리의 증가와 밴드 선속도의 증가에 따라 알루미늄의 평균 표면조도 ( $R_a$ )가 매우 이상적으로 서서히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 추의 중량 조절에 통하여 밴드쏘우와 알루미늄소재 간에 상대운동에 의한 다이아몬드 밴드쏘우 장비가 밴드쏘우의 선속도 가공조건 내에서 안정적으로 절단이 이루어지고 있음을 반영하고 있다. 한편, 알루미늄소재의 절단거리 300 mm일 때, 밴드 선속도 480 m/min에서 평균 표면조도가 급격히 증가하는 거동을 보이고 있는데, 이는 Fig. 6과 Fig. 7에서와 같이 밴드쏘우에 전착된 다이아몬드 입자의 보다 많은 탈락에 의한 결과로 확인되었다.



## 5. 결론

본 연구에서는 알루미늄소재용 밴드쏘우 절단장비를 제작하였고, 다양한 절단조건에 따른 절단성능을 확인하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 밴드쏘우용 절단장비는 추의 무게조절에 따른 밴드쏘우와 가공물간에 상대운동으로 구동하고, 수냉식 절삭유를 사용하여 밴드 선속도 480 m/min~1200 m/min으로 2 mm 두께의 알루미늄소재의 다이싱가공을 안정적으로 수행하였다.
2. 고경도와 고밀도를 가지는 알루미늄소재의 절단에 있어서, 연속형 패턴을 가진 밴드쏘우 형태가 단발 진입충격효과로 단속형 패턴보다는 절삭면이 매우 양호한 결과를 얻었다.
3. 밴드쏘우의 선속도와 알루미늄소재의 절단거리의 증가에 따라 다이아몬드와 니켈의 복합전착 두께가 비례적으로 감소하였고, 가공면의 평균 표면조도 또한 비례적으로 증가하였다.

## REFERENCES

1. Park, K. D., Go, G. H., Lee, D. J., Kim, J. H. and kang, M. C., "Feasibility Evaluation of Micro Hole Drilling and the Material Properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/hBN Ceramic with hBN Contents," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, pp. 36-41, 2017.
2. Jeong, H. A., Lee, C. H. and Kang, M. C., "Fabrication of Micro-electrodes using Liner Block Moving Electrical Discharge Grinding and Characteristics of Micro-hole Machining of Graphene Nanoplatelet-reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, pp. 149-156, 2017.
3. Shin, G. H., Kang, B. O. and Kwak, T. S., "Effect of the Elasticity Modulus of the Jig Material on the Blade Edge Shape in the Grinding Process of Sapphire Medical Knife-Part 2 Verification of the Chipping Phenomenon and Elastic Modulus of the Jig Material," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 63-68, 2017.
4. Shen, J. Y., Wang, J. Q., Jiang, B. and Xu, X. P., "Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic," Wear, Vol. 332-333, pp. 788-793, 2015.
5. Kim, K. T., Hong, Y. H., Park, K. H. and Lee, S. W., "Development of Ultrasonic Grinding Wheel for Hybrid Grinding System," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1121-1128, 2013.
6. Kim, H. J., Kim, D. Y., Kim, C. M. and Jeong, H. D., "Multi-wire sawing of sapphire crystals with reciprocating motion of electroplated diamond wires," CIRP, Vol. 62, pp. 335-338, 2013.
7. Cvetkovic, S., Morsbach, C. and Rissing, L., "Ultra-precision dicing and wire sawing of silicon carbide (SiC)," Microelectronic Engineering, Vol. 88, pp. 2500-2504, 2011.
8. Gao, C. and Yuan, J. T., "Efficient drilling of holes in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> armor ceramic using impregnated diamond bits," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 1719-1728, 2011.
9. Zhu, Z., To, S., Xiao, G., Ehmann, K. F. and Zhang, G., "Rotary spatial vibration-assisted diamond cutting of brittle materials," Precision Engineering, Vol. 44, pp. 211-219, 2016.
10. Back, I. H., Kim, J. S., Jeon, U. C., Kim, N. K., Choi, M. S. and Lee, D. W., "Machine Tools-Driving Mechanisms and Design Principles," Chung Moon Kack, pp. 257-266, 2001.
11. Bouzakis, K. D., Makrimalakis, S., Katirtzoglou, G. and Bouzakis, E., "Coated tools' wear description in down and up milling based on the cutting edge entry impact duration," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 61, pp. 115-118, 2016.
12. Kim, J. S., Kang, S. K. and Shin, M. J., "Effect of Cutting off Processing SCM415 on Surface Roughness and Thickness of Materials," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, pp. 20-26, 2013.