

## 고정 입자 정반을 이용한 사파이어 기판의 연마 특성 연구

이태경<sup>1</sup> · 이상직<sup>1</sup> · 조원석<sup>1</sup> · 정해도<sup>2</sup> · 김형재<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원 정밀가공시스템그룹, <sup>2</sup>부산대학교 기계공학과

### Study on the Lapping Characteristics of Sapphire Wafer by using a Fixed Abrasive Plate

Taekyung Lee<sup>1</sup>, Sangjik Lee<sup>1</sup>, Wonseok Jo<sup>1</sup>, Haedo Jeong<sup>2</sup> and Hyoungjae Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Pusan University

(Received January 15, Revised March 11, 2016; Accepted March 11, 2016)

**Abstract** –Diamond mechanical polishing (DMP) is a crucial process in a sapphire wafering process to improve flatness and achieve the target thickness by using free abrasives. In a DMP process, material removal rate (MRR) is a key factor to reduce process time and cost. Controlling mechanical parameters, such as velocity and pressure, can increase the MRR in a DMP process. However, there are limitations of using high velocities and pressures for achieving a high MRR owing to their side effects. In this paper, we present the lapping characteristics and improvement of MRR by using a fixed abrasive plate through an experimental study. The change in MRR as a function of velocity and pressure follows Preston's equation. The surface roughness of a wafer decreases as the plate velocity and pressure increases. We observe a sharp decrease in MRR over the lapping time at a high velocity and pressure in the velocity and pressure test. An analysis of surface roughness (Rq and Rpk) indicates that wear of abrasives decreases the MRR sharply. In order to investigate the effect of abrasive wear on the MRR, we utilize a cutting fluid and a rough wafer. The cutting fluid delays the wear of abrasives resulting in improvement of MRR drop. The rough wafer maintains the MRR at a stable rate by self-dressing.

**Keywords** –fixed abrasive(고정 입자), free abrasive(자유 입자), lapping characteristic(연마특성), self-dress(자생), sapphire wafer(사파이어 기판)

### 1. 서 론

LED(light emitting diode)는 기판위에 GaN층을 성장시켜 제작하는 방식을 이용하고 있으며, 기판으로는 GaN 층과 격자 상수가 유사하고 고온 성장 동안 결정구조를 유지할 수 있는 사파이어가 주로 이용되고 있다[1]. 사파이어 기판의 제조 공정은 성장된 사파이어 단결정을 기판 형태로 절단하는 MWS(Multi-wire Saw) 공정과 기판의 평탄도와 두께편차를 줄이기 위한 DSL(Double-sided Lapping)과 DMP(Diamond Mechanical Polishing)

공정, 이후 기판의 표면 데미지 층을 제거하기 위한 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정으로 이루어진다. DMP 공정에서는 기판 가공량에 비해 시간당 가공량이 작기 때문에 공정 시간과 비용을 줄이기 위해서 재료제거율(MRR:Material Removal Rate)을 향상시키는 것이 필요하다. DMP 공정의 재료제거율을 향상시키기 위한 연구들이 진행되고 있지만 여전히 재료 제거율은 낮은 상태이다.

DMP 공정은 정반에 다이아몬드 연마 입자를 공급하면서 기판을 가압하여 정반과 기판의 상대 운동을 이용하여 기판을 가공하는 공정이다(Fig. 1). 이때 입자는 자유 입자(free abrasive)로 기판과 정반 사이에서 구르거나(three-body) 정반에 박혀 긁으면서(two-body) 기판

<sup>†</sup>Corresponding author : [hyjakim@kitech.re.kr](mailto:hyjakim@kitech.re.kr)  
Tel: +82-51-974-9257, Fax: +82-51-974-9308

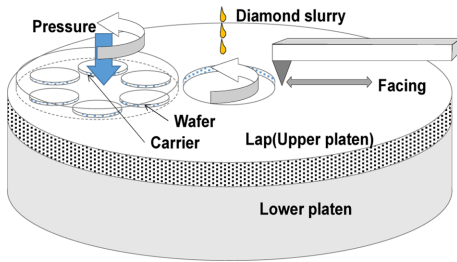


Fig. 1. Schematic diagram of DMP process.

을 가공한다. 이러한 자유 입자 연마에서는 연마 입자의 대부분이 three-body 거동을 보이며 일부 입자만이 two-body 형태로 연마에 참여하게 된다[2]. 연마 시 three-body에 비해 two-body의 경우가 가공량이 크기 때문에 자유 입자를 이용한 가공에서는 재료제거율을 향상시키기에는 한계가 있다[3]. 이를 해결하기 위하여 정반이나 패드를 제작할 때 연마 입자를 혼합하여 제작한 고정 입자(fixed abrasive)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[4-5].

고정 입자를 사용하였을 경우 연마 입자들의 거동이 two-body 형태를 띄며 재료제거율 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 다이아몬드를 연마 입자로 사용한 고정 입자 정반을 이용하여 압력과 속도와 같은 공정 변수에 따른 사파이어 기판의 연마 특성을 연구하였으며, 시간에 따른 재료제거율 저하 현상을 분석하여 이를 개선할 수 있는 방안에 대하여 연구하였다.

## 2. 공정 변수에 따른 연마 특성

### 2-1. 실험 방법

본 실험에서는 정반의 회전속도와 기판에 가해지는 압력을 공정 변수로 택하여 각 변수에 따른 재료제거율과 기판의 표면 거칠기를 평가하였다. 실험에 사용된 고정 입자 정반은 연마 입자와 충전제(filler), 금속 분말을 혼합한 후 소결 과정을 통해 제작된 사각형의 펠릿을 플레이트에 부착하여 제작하였으며, 평균 39 μm 크기의 다이아몬드 연마 입자를 사용하였다. 정반의 회전속도는 50~200 rpm, 압력은 100~400 gf/cm<sup>2</sup>으로 설정하였으며 기판은 CMP된 상태의 기판(epi-ready wafer)을 사용하였다. 각 조건에 대하여 Fig. 2와 같이 실험 전 정반을 드레싱하고 가공 중 물을 공급하면서 연마실험을 진행하였으며, 실험 조건을 Table 1에



Fig. 2. Experimental sequence.

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Conditions
Fixed abrasive	Diamond (#400)
Wafer	Sapphire (4in), Epi-ready
Cutting fluid	Water
Velocity of plate (rpm)	50, 100, 150, 200
Pressure (gf/cm <sup>2</sup> )	100, 200, 300, 400

나타내었다.

재료제거율은 FRT社의 MicroProf<sup>®</sup>299 TTV를 이용하여 연마 전후 기판의 평균 두께를 측정하여 계산하였으며, 기판의 표면거칠기는 Zygo社의 New view 7300을 이용하여 기판의 표면거칠기를 측정하였다.

### 2-2. 실험 결과

Fig. 3에 속도에 따른 재료제거율의 변화를 나타내었다. 실험 결과 재료제거율은 속도에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 압력에 대해서도 비례적으로 증가하였다. 속도가 200 rpm, 압력이 400 gf/cm<sup>2</sup>에서 가장 높은 재료제거율인 34.4 μm/min 결과를 얻었다. 일반적인 연마공정에서 사용되는 Preston 방정식에서 재료제거율은 정반의 회전 속도( $V$ )와 기판에 가해지는 압력( $P$ )에 비례한다[6].

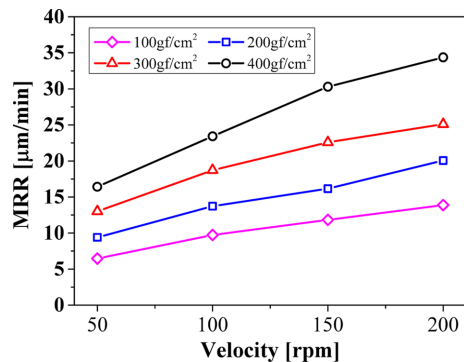


Fig. 3. MRR as a function of Velocity of plate.

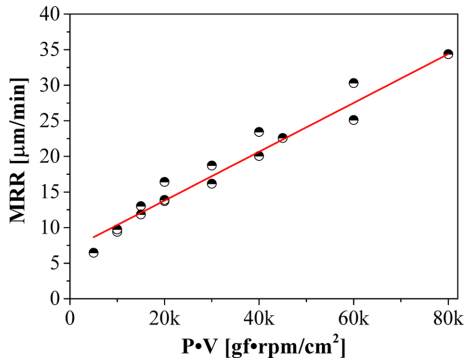


Fig. 4. MRR as a function of P · V.

$$MRR = k_p \cdot P \cdot V$$

$K_p$ 는 Preston 상수로서 압력과 속도 외 다른 변수의 영향을 포함하고 있다. 고정 입자 정반의 재료제거율 특성이 Preston 방정식을 잘 따르는지 확인하기 위하여 Fig. 4에 압력과 속도의 곱에 대한 재료제거율의 경향성을 나타내었다. 자유 입자를 이용한 연마에서는 압력과 속도에 따라 연마 입자의 분산이 영향을 받아 재료제거율이 Preston 방정식을 따르지 않는 경우도 있지만, 본 실험에 이용된 고정 입자 정반의 경우 연마 입자가 정반에 고정되어 이러한 변수들의 영향을 거의 받지 않고, 재료제거율은 압력과 속도에 비례한다는 것을 확인할 수 있다.

각 조건별 가공 후 기관의 표면거칠기 값(Ra)을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 표면거칠기는 정반의 속도가 증가할수록 감소하여 200 rpm에서 가장 좋은 결과를 보였다. 압력에 대해서는 압력이 증가할수록 표면거칠기가 개선되는 경향을 보였으나 속도에 비해 영향이 작았으며, Fig. 6의 압력, 속도에 대한 표면거칠

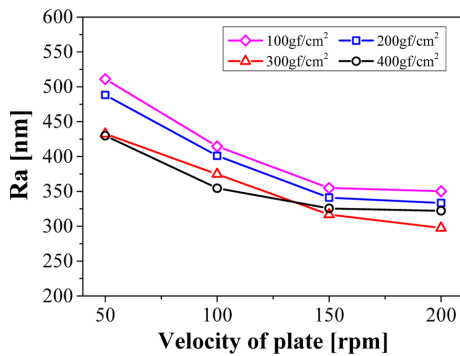


Fig. 5. Roughness as a function of velocity of plate.

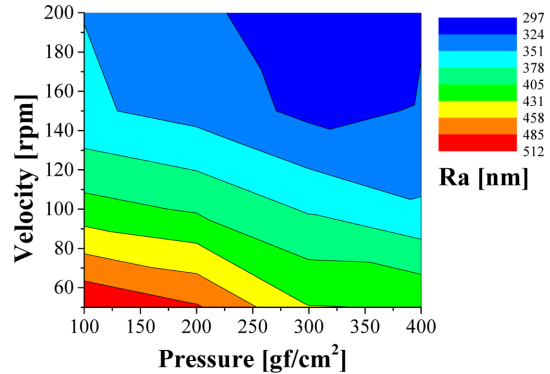


Fig. 6. Contour map of roughness as a function of velocity and pressure.

기 등고선 지도에서 이를 확인할 수 있다.

자유 입자 연마에서는 슬러리를 통해 새로운 연마 입자가 연속적으로 공급되기 때문에 연마 입자의 날카로움이 유지가 되며, 압력이 증가하였을 때 절삭 깊이가 깊어지기 때문에 기관의 표면조도가 나빠진다. 고정 입자 정반에서는 속도와 압력이 낮을 경우 연마 입자의 마모가 작아서 날카로움이 유지되어 표면에 깊은 스크래치를 남기지만, 압력과 속도가 높은 경우 연마 입자의 마모가 크기 때문에 표면에 얇은 스크래치를 남겨 표면조도가 개선 되는 효과가 있다. 입자의 마모와 관련된 것은 연마 시간에 관련이 있는 것으로 다음 장에서 고정 입자 정반의 시간에 따른 연마 특성을 연구하였다.

### 3. 시간에 따른 연마 특성

#### 3-1. 시간에 따른 재료제거율 저하 현상

고정 입자 정반에서는 시간에 따라 연마 입자의 마모 현상이 발생하여 절삭성능이 떨어지게 된다. 이러한 현상이 발생하였을 때 드레싱을 통하여 새로운 연마입자를 돌출시키기도 하지만 가공 중 정반과 기관사이의 상대운동과 가압 하중에 의하여 새로운 연마입자가 돌출되는 자생(self-dressing) 효과가 발생한다. 자생 효과가 입자의 마모보다 클 경우 정반의 재료제거율 저하 현상을 일어나지 않는다. 시간에 따른 재료제거율의 변화를 통해 자생 효과를 확인하기 위하여 각 압력과 속도에 대하여 연마 테스트를 진행하였다. 각 실험의 조건은 Table 1과 동일하게 하였으며 CMP된 기관으로 1분동안 가공한 후, 가공에 사용된 기관으로

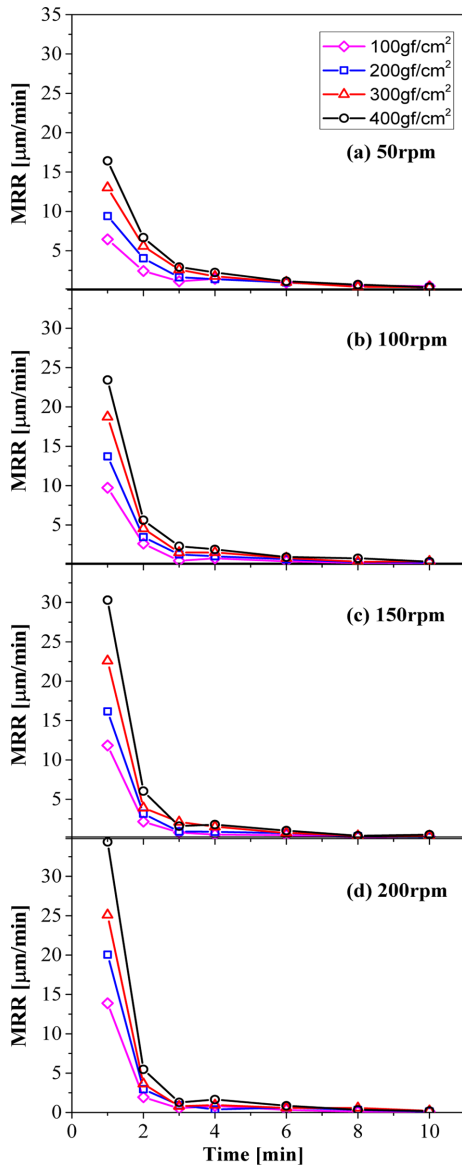


Fig. 7. MRR as a function of time with velocity.

계속 연마 실험을 진행하였다.

Fig. 7에 속도와 압력에 대하여 시간에 따른 재료제거율을 나타내었다. 가장 낮은 속도인 50 rpm에서는 시간에 따라 재료제거율이 완만하게 감소하지만, 속도가 증가할수록 재료제거율이 급격하게 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 초기 1분 동안의 재료제거율은 속도와 압력에 비례하여 증가하는 경향을 보였지만, 2분 대에서는 압력과 속도에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 3분 이후부터는 재료제거율이 낮아 연마가 거의

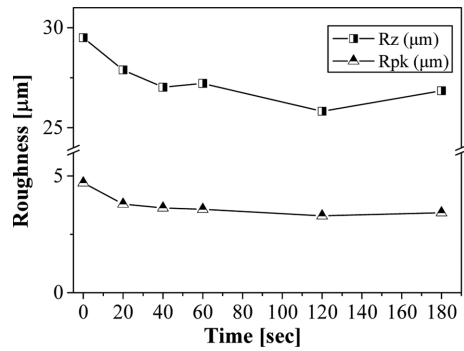


Fig. 8. Roughness of plate as a function of time.

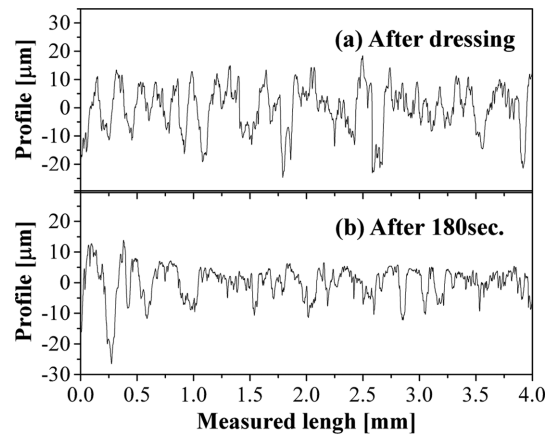


Fig. 9. Surface profile of plate.

되지 않았다. 이는 연마 입자의 자생 작용보다 입자 마모의 속도가 빨라 재료제거율의 저하를 가져오는 것으로 보인다.

시간에 따른 재료제거율 저하 현상을 분석하기 위하여 시간에 따른 정반의 표면거칠기 변화를 확인하였다. 초기의 재료제거율이 급격하게 떨어지기 때문에 초기 1분 동안 20초 단위로 연마 후 정반의 표면거칠기를 측정하였으며, 1분 이후 부터는 1분 단위로 측정을 하였다. 시간이 0일 때 값은 드레싱 직후의 표면거칠기 값을 나타내며, 실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 측정 결과 표면거칠기 프로파일의 최고 높이를 나타내는 지표인 Rz 값과 돌출된 피크의 높이를 나타내는 Rpk 값이 연마시간이 길어짐에 따라 시간에 대하여 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9의 드레싱 직후와 180초 연마 후 정반 표면의 프로파일을 통해서도 표면의 날카로움이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 입자의 마모에 의하여 재료제거율 저하 현상이 발

생하며 일반적인 공정 조건에서 자생 작용이 발생하기 어렵다는 것을 확인하였다.

### 3-2. 재료제거율 저하 현상 개선

고정 입자 정반을 이용한 기관 가공과 유사하게 다 이이몬드 입자를 강선에 전착시킨 고정 입자 와이어를 이용하여 기관을 절단하는 MWS 공정은 입자의 마모를 줄이고 절삭성을 향상시키기 위하여 절삭유를 사용한다[7]. 고정 입자를 이용한 연마에서 절삭유가 연마 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 MWS에서 사용되는 절삭유를 연마 중에 공급하면서 연마 실험을 진행하였다. 또한 기관의 표면거칠기가 정반의 자생 작용에 미치는 영향을 확인하기 위하여 절삭유를 공급하면서 MWS 된 거친 표면거칠기를 가지는 기관을 1분씩 연마하여 재료제거율을 측정하였다. 속도는 200 rpm, 압력은 400 gf/cm<sup>2</sup>으로 하였으며, 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

절삭유를 사용하였을 때 물을 사용한 경우에 비하여 초기 절삭성능이 높고 재료제거율 저하 현상이 둔화되는 것을 확인하였다. 하지만 시간에 따른 재료제거율의 저하 현상이 발생하는 것으로 보아 자생 효과의 증

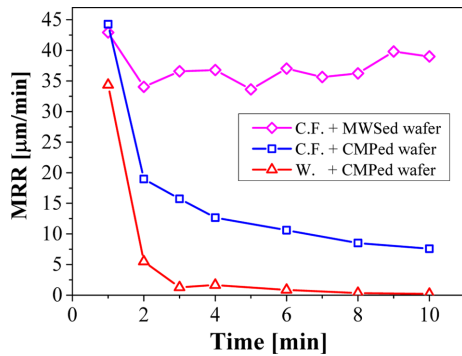


Fig. 10. MRR as a function of time with various conditions.

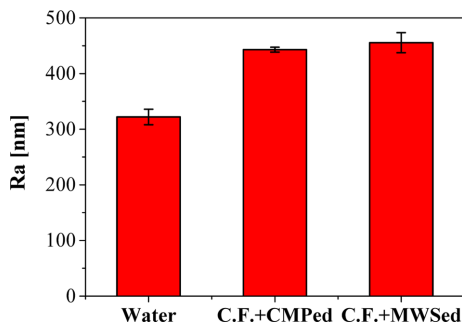


Fig. 11. Ra as a function of various conditions.

가는 작으나, 연마입자와 기관과의 접촉부에서 발생하는 열을 절삭유가 감소시킴으로써 입자 마모를 지연시켜 재료제거율 저하 현상을 늦추는 것으로 보인다[8].

절삭유와 함께 MWS 후 거친 표면의 기관으로 실험한 경우, 초기 1분의 재료제거율이 높고 이후 시간에 따라 감소하지 않고 유지되는 것을 확인하였다. 이는 MWS 이후 웨이퍼의 거친 표면이 정반과의 상대 운동에 의해 정반 표면을 긁음으로써 새로운 입자를 돌출시켜 정반의 자생 작용에 효과를 주는 것으로 판단된다.

Fig. 11에 각 실험조건에 따른 기관의 표면거칠기 값을 나타내었다. 물을 이용하였을 경우 표면 거칠기는 320 nm 정도로, 절삭유를 이용하여 CMP된 기관과 MWS된 기관을 연마한 경우의 표면조도 450 nm 보다 낮은 표면거칠기 값을 얻을 수 있었다. 물만 이용하여 연마하였을 경우 입자의 마모가 빨라 절삭 깊이가 낮아져 표면거칠기는 좋아지고 재료제거율은 떨어지는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 사파이어 기관의 재료제거율 향상을 위하여 고정 입자 정반을 이용하여 기관의 연마특성을 평가하였다. 공정 변수에 따른 연마결과는 압력과 속도에 비례하여 재료제거율이 증가하는 것을 확인하였으며 표면거칠기 또한 개선되었다. 시간에 따른 연마 특성으로 입자의 마모에 의해 급격한 재료제거율 저하 현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 정반의 표면거칠기와 프로파일을 통하여 입자의 마모와 재료제거율과의 상관관계를 확인하였다.

시간에 따른 재료제거율 저하 현상을 개선하기 위하여 절삭유와 실제 공정에서 사용되는 MWS된 거친 표면을 가지는 기관을 이용하였으며, 이를 통하여 35 μm/min 이상의 높은 재료제거율을 안정적으로 얻을 수 있었다. 이는 자유 입자를 이용한 연마 공정에 비해 10배 이상 높은 것으로 고정 입자 정반을 이용하여 공정시간을 크게 단축시킬 수 있을 것으로 보인다. 다만 자유 입자에 비해 기관의 표면거칠기가 크다는 점이 단점으로 존재하며, 이는 고정 입자 정반을 이용하여 연마 후 자유 입자 정반으로 표면거칠기를 개선하는 방식으로 두 가지의 연마 메커니즘을 적절히 조합하여 공정 시간 및 비용을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] XiaoKai Hu, Zhitang Song, Zhongcai Pan, Weili Liu, LiangCai Wu, "Planarization machining of sapphire wafers with boron carbide and colloidal silica as abrasives", *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 8230-8234, 2009.
- [2] E. Rabinowicz, L. A. Dunn, P. G. Russell, "A study of abrasive wear under three-body conditions", *Wear*, Vol. 4, pp. 345-371, 1961.
- [3] H. M. Kim, G. H. Park, Y. G. Seo, D. J. Moon, B. J. Cho, J. G. Park., "Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body modes as a function of diamond abrasive size", *Wear*, Vol. 332, pp. 794-799, 2015.
- [4] B. J. Cho, H. M. Kim, R. Manivannan, D. J. Moon, J.G. Park "On the mechanism of material removal by fixed abrasive lapping of various glass substrates", *Wear*, Vol. 302, pp. 1334-1339, 2013.
- [5] J. Y. Choe, H. Y. Kim, J. H. Park, H. D. Jeong. "A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad", *J. Korean Soc. Precision Eng.*, Vol. 19, pp. 212-220, 2002.
- [6] F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines", *J. Soc. of Glass Tech.*, Vol. 11, 1927.
- [7] W. I. Clark, A. J. Shih, C. W. Hardin, R. L. Lemaster, S. B. McSpadden, "Fixed abrasive diamond wire machining—part I: process monitoring and wire tension force", *J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 523-532, 2003.
- [8] N. P. Hung, S. H. Yeo, B. E. Oon, "Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites." *J. Materials Processing Technology*, Vol. 67, pp. 167-161, 1997.