

# 나노스케일 절삭가공에서의 비절삭저항 변화 및 원인 분석

권예필\*, 김시훈\*, 전은채\*,#

\*울산대학교 첨단소재공학부

## Analysis of Variation of Specific Cutting Resistance in Nanoscale Cutting

Ye-Pil Kwon\*, Si-Hoon Kim\*, Eun-chae Jeon\*#

\*School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan

(Received 31 May 2020; received in revised form 17 August 2020; accepted 18 August 2020)

### ABSTRACT

In general, lithography techniques are applied when machining single-crystal silicon in nanoscale applications; however, these techniques involve low degrees of freedom for the vertical shapes. By applying mechanical techniques to machine silicon, nanopatterns having various types of vertical shapes can be manufactured. In this study, we determined the ductile–brittle machining transition point and analyzed the variation of the specific cutting resistance within the ductile machining region in nanoscale applications. When brittle fracture occurred during the nanoscale cutting, the depth of cut and cutting force increased and decreased rapidly, respectively. The first point of rapid increase in the depth of cut was defined as the ductile–brittle machining point. Subsequently, the shape of the machining tool was observed using a scanning electron microscope to calibrate the machining area, considering the tip blunting. The specific cutting resistance decreased continuously and converged to a certain value during the nanoscale cutting. The decrease and convergence in the value can be attributed to the decrease in the ratio of the arc length to the area of the machining tool and silicon.

**Key Words :** Specific Cutting Resistance(비절삭저항), Nanoscale Cutting(나노스케일 절삭가공), Ductile Machining(연성가공)

## 1. 서 론

4차 산업혁명에서 5G와 같이 첨단 산업 시장의 규모가 증가함에 따라 반도체 시장 또한 동반성장하고 있으며 반도체 산업에 사용되는 주요 소재인 단결정 실리콘의 가공에 대한 관심도 커지고 있다.

단결정 실리콘을 가공하는 방법으로 기존에는 리소그래피 방식이 많이 사용<sup>[1-4]</sup>되었으며 이 방식은 직사각형과 같은 단순한 형상의 패턴 가공은 가능하지만, V 형태와 같은 형상의 패턴 가공 시 복잡한 공정을 필요로 하여 가공된 패턴의 형상 자유도가 낮다. 낮은 형상 자유도를 극복하기 위해 기계 가공 방식을 활용할 경우, 공구의 형상에 따라 패턴이 형성되기 때문에 형상 자유도를 높일 수 있으나 취성재료인 실리콘의 특성상 재료가 쉽게 파괴되는

# Corresponding Author : jeonec@ulsan.ac.kr

Tel: +82-52-712-8053, Fax: +82-52-712-8045

취성 파괴 현상이 일어나 패턴 가공이 어렵다는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 취성 파괴를 발생시키지 않고 취성 재료를 기계적으로 가공하려는 연구들이 수행되었다<sup>15-81</sup>. 기존에 수행된 대부분의 연구 결과는 연성 가공 한계점, 즉 최초로 취성파괴가 발생하는 지점을 결정할 때 정성적인 분석만 진행하였으며, 정량적 분석을 실시한 연구의 경우에도 절삭력 변화에 대한 분석만 진행하였고, 절삭가공에서 중요한 인자인 비절삭저항에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 최초로 취성파괴가 발생하는 지점에서의 절삭깊이의 변화도 분석하고, 공구 형상 및 절삭력 변화를 분석하여 절삭깊이에 따른 비절삭저항 변화를 분석하는 연구를 수행하여 나노스케일에서의 비절삭저항 크기효과를 검증하였다.

## 2. 실험장비 및 실험방법

본 연구에서는 Anton Paar Inc.의 NST(Nano Scratch Tester) 장비를 사용하여 소재 표면을 가공하였다. 일반적으로 나노스크래치 테스터는 박막의 접합력 및 강도를 정량적으로 분석하는 데 사용되는 장비이지만, 특정 형상의 공구를 사용하여 시편 표면을 긁는 나노스크래치 테스터의 원리에 의해 나노스케일에서의 절삭가공장비로 사용할 수 있다<sup>9-10</sup>. 또한, 나노스크래치 테스터는 기존의 가공 장비에 비하여 나노스케일의 낮은 하중 영역에서 하중의 정밀한 제어와 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 하중에 따른 재료의 변화 양상을 in-situ하게 확인이 가능하며, 기존의 가공 장비보다 높은 정밀도의 제어 및 측정이 가능한 나노스크래치 테스터를 이용하여 나노스케일에서 취성 재료의 연성 가공 기술을 수행하였다.

나노스크래치 테스터는 배분력과 가공 길이를 제어하여 소재의 표면을 긁을 수 있으며, 두 가지 제어 방식이 존재한다. 첫 번째는 ‘Progressive mode’로 소재에 가해주는 배분력을 0에서부터 사용자가 임의로 설정한 힘까지 선형적으로 증가시켜주며 표면을 가공하는 방식이며, 두 번째는 ‘Constant mode’로 사용자가 설정한 임의의 힘을 일정하게 유지시켜주며 표면을 가공하는 방식이다. 본 연구에

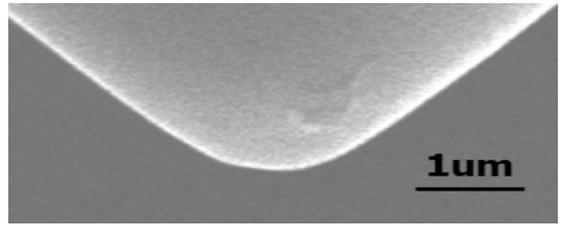


Fig. 1 90° conical single-crystal diamond cutting tool with a tip radius of 1 $\mu$ m

서는 ‘Progressive mode’는 최초 취성파괴시점 결정 및 비절삭저항 변화 분석에 사용하였고, ‘Constant mode’는 가공된 패턴 내부에 취성 파괴 발생 여부를 검증하는데 사용하였다. Progressive mode 가공 시 필요한 최대 배분력은 기존의 연구 결과를 바탕으로 50mN으로 선정하였다. 패턴 가공 시 공구는 Fig 1에 나타난 90° 원뿔형 단결정 다이아몬드 공구를 사용하였으며, 실험에 사용된 단결정 실리콘은 (001) 웨이퍼를 사용하였고, 패턴 가공 방향은 [110] 방향이며 패턴 가공 길이는 1mm로 하였다. 가공속도는 1mm/min으로 하였다.

기존의 연구에서는 가공된 패턴의 SEM 이미지와 절삭력 변화만을 이용하여 패턴의 변형 양상과 절삭력의 변화 양상을 동기화하여 최초 취성 파괴 발생 지점을 확인해 연성가공 한계를 결정하였으나, 본 연구에서는 기존의 SEM 이미지와 절삭력의 변화에 추가로 절삭깊이의 변화를 확인하여 절삭력 및 절삭깊이의 변화 양상과 패턴의 변형 양상을 동기화하여 연성가공 한계를 결정하였다. 이렇게 결정된 연성가공한계에서의 절삭력을 임계 절삭력(Critical cutting force)라고 하였으며, 임계 절삭력이 나타나는 지점에서 소재에 가해진 배분력을 임계 배분력(Critical thrust force)라고 하였다.

절삭 공구는 공구의 제작 공정 상 무딘 부분(Tip blunting)이 필연적으로 존재하는데 무딘 부분은 소재 가공 시 비절삭저항에 영향을 미치게 되지만, 일반적인 가공 수준인 마이크로스케일에서는 그 영향이 크지 않다. 그러나 나노스케일에서 가공을 실시하게 될 경우, 무딘 부분이 비절삭저항에 미치는 영향이 마이크로스케일에 비하여 크게 작용하게 된다. 이에 본 연구에서는 비절삭저항을 계산할 때 필요한 면적을 정확하게 측정하기 위해 가공에 사

용된 절삭 공구의 형상을 Fig. 1과 같이 전자현미경 (SEM)으로 관찰하여 무딘 부분의 정확한 반지름을 구하여 공구의 절삭면적을 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 단결정 실리콘의 연성가공한계 분석

나노스크래치 테스터를 활용하여 배분력을 선형적으로 증가시키면서 단결정 실리콘에 패턴을 가공할 때 가공 길이에 따른 절삭력과 절삭깊이 변화 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. 배분력이 증가함에 따라 절삭력이 완만하게 증가하는 모습을 보이다가 특정 지점에서 절삭력이 급격히 감소 후 증가하는 거동을 보이는 지점이 발생한다. 기존 논문<sup>[9-10]</sup>에서는 이 지점을 최초 취성 파괴가 발생하는 ‘임계 절삭력’으로 정의하였으며, Fig. 2(a)에서 점선으로 표시한 지점에 해당한다. 절삭력의 변화와 별도로 절삭깊이의 변화를 관찰해보면 Fig. 2(b)와 같이 배분력이 증가함에 따라 절삭깊이가 완만하게 증가하다가 특정 지점에서 급격히 증가한 후 다시 감소하는 거동을 보인다. 이 특정 지점은 앞서 절삭력에서 정의한 ‘임계 절삭력’ 점과 일치하므로 취성파괴가 발생할 때 절삭깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 가공 깊이의 급격한 변화가 발생하는 이유는 취성 파괴에 의해 순간적으로 수직방향으로 소재의 탈락이 일어나기 때문이다. 따라서 절삭력의 변화 뿐만 아니라 절삭깊이의 변화를 통해서도 최초 취성파괴지점을 확인할 수 있다.

본 연구에서 결정된 임계 절삭력 및 임계 절삭깊이가 실제로 최초 취성파괴 발생 여부와 일치하는 지 확인하기 위하여 가공된 단결정 실리콘의

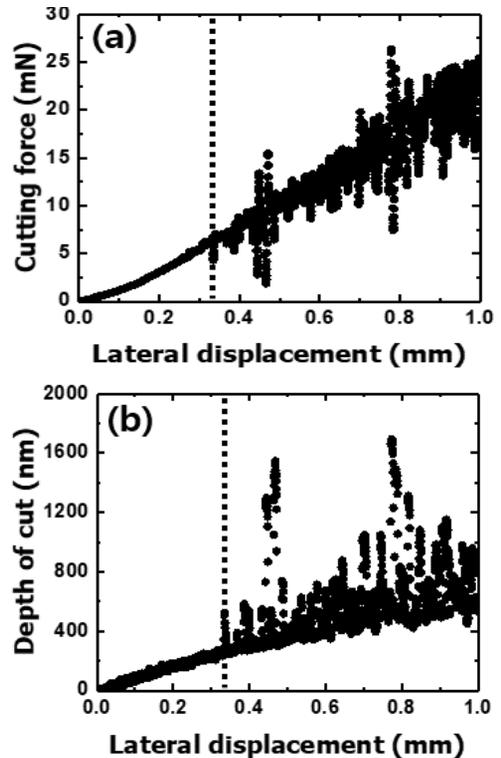


Fig. 2 Variation of (a) cutting force and (b) depth of cut versus lateral displacement when silicon machined with increasing thrust force from 0 to 50mN

표면 패턴을 SEM으로 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2의 가공 길이에 따른 절삭력과 절삭깊이 변화를 Fig. 3의 SEM으로 관찰한 표면 패턴과 동기화하여 비교 분석한 결과, Fig. 2의 임계 절삭력과 임계 절삭깊이가 결정된 지점과 Fig. 3에서 최초로 취성 파괴가 발생한 지점이 일치하는 것을

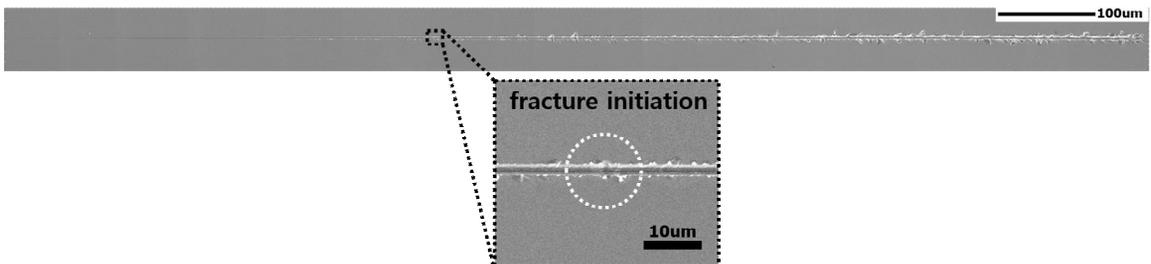


Fig. 3 Panorama photo of single crystal silicon machined with increasing thrust force from 0 to 50mN

확인하였다. 따라서 절삭력과 절삭깊이 변화를 복합적으로 분석하면 광학현미경이나 전자현미경을 사용하지 않고 용이하게 최초 취성파괴 지점을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 나노스케일에서의 비절삭저항 변화

비절삭저항은 절삭속도에 무관한 가공 과정에서의 효율성을 나타내는 변수로, 비절삭저항을 이용하면 가공 시 공구나 장비에 가해지는 힘의 예측이 가능하며, 예상된 힘의 크기를 바탕으로 가공에 쓰이는 적정 공구 및 장비를 선정하여 가공 시 공구 및 장비의 손상을 최소화할 수 있다. 이러한 방식은 비절삭저항이 일정한 값을 가진다는 전제조건을 바탕으로 하는데 마이크로스케일에서는 절삭깊이가 알아질 때 크기 효과(Size effect)가 나타나 비절삭저항의 값이 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>[11]</sup>. 비절삭저항의 값이 변화할 경우, 앞서 언급한 공구 및 장비에 가해지는 힘을 결정할 때, 계산된 힘의 크기에 변화를 일으키며 적정 공구 및 장비 선정에 영향을 미치게 되므로 본 연구에서 나노스케일에서 비절삭저항의 크기 효과를 분석하였다.

비절삭저항은 일반적으로 단위 면적 당 절삭에 필요한 에너지 또는 단위 면적 당 절삭에 필요한 응력으로 표현할 수 있으며, 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$K_s = \frac{F}{A_c} \quad (F = \text{절삭력}, A_c = \text{절삭면적}) \quad (1)$$

식 (1)에서 보이는 바와 같이 비절삭저항 값은 공구의 절삭 면적과 연관되어 있기 때문에, 가공 공구의 형상을 정확하게 정의하는 과정이 필수적이다. 앞서 설명한 바와 같이 공구의 끝부분에는 필연적으로 무딘 영역이 존재하기 때문에 절삭면적을 정확하게 구하기 위해서는 무딘 영역의 반지름을 구해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 가공 공구를 SEM으로 관찰하여 1.198 $\mu\text{m}$ 의 반지름을 구하였다. 이를 바탕으로 가공 시 가공 면과 접촉하는 공구의 단면적에 해당하는 영역을 Fig. 4에 도시하였다. 취성 파괴 시 새로운 면을 형성

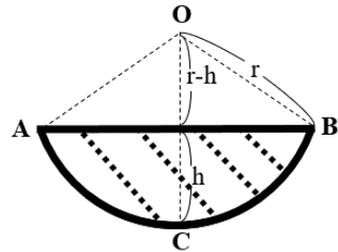


Fig. 4 The cross-sectional area of a tool that is in contact with the machined surface during machining

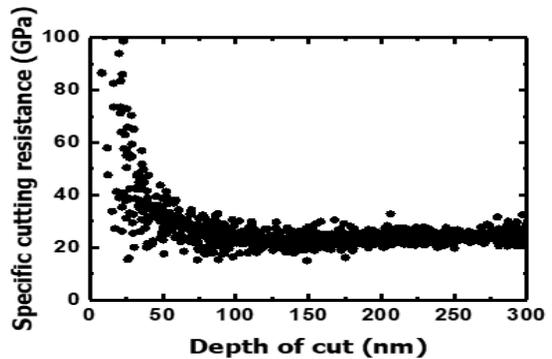


Fig. 5 Variation of specific cutting resistance versus depth of cut

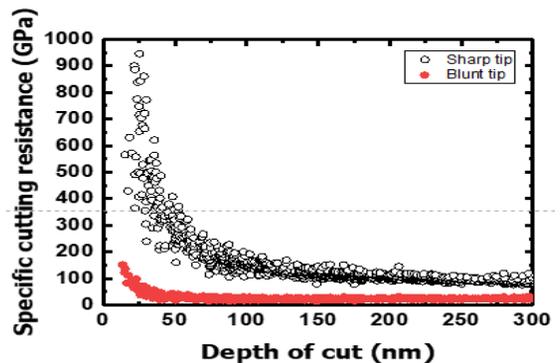


Fig. 6 Variation of specific cutting resistance versus depth of cut with a sharp tip and a blunt tip

하면서 사용된 에너지가 절삭력에 반영되므로 정확한 비절삭저항은 최초 취성파괴 이전에만 구할 수 있다. 따라서 최초 취성파괴가 발생하는

300nm 이하의 절삭깊이 범위까지 비절삭저항의 변화를 계산하여, Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 절삭깊이에 따른 비절삭저항은 마이크로스케일과 유사하게 나노스케일에서도 절삭깊이가 얇아질수록 비절삭저항의 크기가 증가하는 크기 효과(Size effect)가 나타나는 것이 확인되었다. 절삭 공구에 존재하는 무딘 영역을 보정하지 않은 경우에 계산된 비절삭저항을 Fig. 6에 나타내었다. 무딘 영역을 보정하지 않아도 크기 효과는 동일하게 발생하지만, 매우 작은 절삭깊이에서 비절삭저항이 약 10배 이상 과대 평가되는 문제가 발생하였다. 따라서 나노스케일에서 정확한 비절삭저항을 구하려면 공구 끝 부분의 무딘 영역의 반지름을 정확하게 구해야 한다.

나노스케일에서도 Fig. 5에서와 같이 크기 효과가 발생하는 것은 명확하게 나타나지만, 비절삭저항이 지속적으로 감소하는 것이 아니라 절삭깊이 약 100nm 지점부터는 감소하지 않고 수렴하는 양상이 나타났다. 이를 설명하기 위해 다음과 같은 분석을 수행하였다. 기존의 이론<sup>[12]</sup>에서는 절삭 시 절삭에 사용되는 힘 이외에 가공공구가 피삭재에 끌리면서 가해지는 힘을 크기 효과의 원인으로 규정하고 있으며, 이 힘을 경작력(plowing force)이라 부른다. 절삭깊이가 충분히 큰 경우에는 절삭력의 비중이 매우 높기 때문에 경작력의 영향이 적지만 절삭깊이가 작아짐에 따라 경작력의 효과가 점점 커지게 되어 비절삭저항이 증가하는 것으로 나타난다. 이를 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$K_s = \frac{F}{A_c}, F = F_c + F_p \quad (2)$$

$$F_c = nA_c, F_p = mL \quad (3)$$

$$K_s = \frac{F}{A_c} = \frac{F_c + F_p}{A_c} = m \frac{L}{A_c} + n \quad (4)$$

여기서  $F_c$ 는 실제 절삭력,  $F_p$ 는 경작력,  $L$ 은 가공공구와 피삭재가 접하는 길이를 의미하며,  $m$ 과  $n$ 은 비례 상수이다. 식 (4)에서 보는 바와 같이 비절삭저항은  $L/A_c$ , 즉 가공공구와 피삭재가 접하는 길이와 절삭면적 간의 비율(이하  $L/A$ )에 대해 선형적으로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 무딘

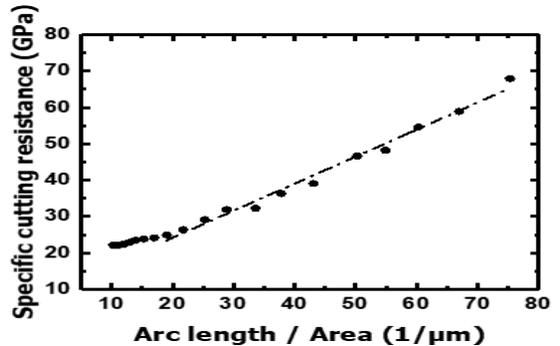


Fig. 7 Variation of specific cutting resistance versus tip arc length/area

영역의 반지름을 고려하여 계산된  $L/A$ 와 비절삭저항 간의 관계를 Fig. 7에 나타내었다.  $L/A$ 가 약  $20/\mu\text{m}^{-1}$  이상일 때는 식 (4)에서 예측한 바와 같이 비절삭저항과  $L/A$ 가 선형적인 관계를 갖지만 그 이하에서는 비절삭저항이 수렴하는 현상을 보이고 있다. 절삭깊이와  $L/A$ 가 반비례하는 것을 감안할 때  $L/A$ 가 작아지는 것은 절삭깊이가 증가하는 것을 의미하며 선형적인 관계를 벗어나는 지점이 절삭깊이 약 100nm 지점으로 비절삭저항이 수렴하는 지점과 일치하였다. 따라서  $L/A$  값이 약 20인 지점이 나노스케일에서 비절삭저항이 수렴되는 지점이라 할 수 있다. 그러나 이 값의 물리적 의미와 피삭재와의 관련 여부를 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 단결정 실리콘의 연성가공 한계를 결정하기 위해 절삭깊이를 정량적으로 분석하였으며, 나노스케일 절삭가공 시 비절삭저항의 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 배분력을 증가시킬 때 절삭력이 급격히 감소하는 지점에서 절삭깊이도 급격한 증가를 보이는 데, 이는 수직 방향으로 취성 파괴가 발생하여 재료의 탈락이 발생하였기 때문이며, 이를 통해 절삭깊이의 변화를 분석을 통해 연성-취성 가공 천이지점을 결정할 수 있다.
2. 나노스케일에서 공구의 형상을 직접 측정하여

절삭 면적을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우의 비절삭저항을 비교하였을 때 얇은 절삭깊이에서 비절삭저항이 큰 차이를 보였다. 따라서 나노스케일에서 비절삭저항 계산 시 정확한 결과를 얻기 위해 공구 끝부분 형상을 정밀하게 정의해야 한다.

3. 나노스케일에서 절삭깊이가 증가함에 따라 비절삭저항이 감소하다가 수렴하는 현상이 발생하였으며, 이는 공구와 피삭재가 접하는 길이와 절삭면적 간의 비율이 감소하는 것과 관련이 있다.
4. 위 비율이 높은 경우에는 표면 효과로 인해 절삭력 외에 경작력의 효과가 크게 나타나서 비절삭저항이 높아지며 비율이 특정값 이하로 낮아지면 경작력 효과가 완화되어 비절삭저항이 수렴하는 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2019R111A3A01054545)의 지원을 받았음.

## REFERENCES

1. Harriott, L. R., "Limits of lithography", IEEE, Vol. 89, No. 3, pp. 366-374, 2001.
2. Thompson, L. F., Willson, C. G., Bowden, M. J., Introduction to Microlithography, American Chemical Society, Vol. 219, pp. 1-13, 1983.
3. Chien, F. S. -S., Wu, C. -L., Chou, Y. -C., Chen, T. T., Gwo, S., "Nanomachining of (110)-oriented silicon by scanning probe lithography and anisotropic wet etching", Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 16 pp. 2429-2431, 1999.
4. Choi, Y. K., Zhu, J., Grunes, J., Bokor, J. Somorjai, G. A., "Fabrication of Sub-10-nm Silicon Nanowire Arrays by Size Reduction Lithography", The Journal of Physical Chemistry, Vol. 107, No. 15, pp. 3340-3343, 2003.
5. Blackley, W. S., Scattergood, R. O., "Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials", Precision Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 95-103, 1991.
6. Liu, K., Li, X. P., Liang, S. Y., "The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, No. 9-10, pp. 875-884, 2007.
7. Liu, K., Li, X., Liang, S. Y., "Nanometer-Scale Ductile Cutting of Tungsten Carbide", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 6, No.2, pp. 187-195, 2004.
8. Lee, S. H., "Analysis of ductile mode and brittle transition of AFM nanomachining of silicon", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 61, pp. 71-79, 2012. .
9. Choi, D. H., Lee, J. R., Kang, N. R., Je, T. J., Kim, J. Y., Jeon. E. c., "Study on ductile mode machining of single-crystal silicon by mechanical machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 113, pp. 1-9, 2017.
10. Choi, D. H., Yoon, M. A., Kim, K. S., Je, T. J., Jeong, J. H., Jeon, E. c., "Study on Ductile Machining Technology for Manufacturing Nano-Patterns on Single Crystal Silicon through Quantitative Analysis of Thrust Force", Journal of the Korean Society for Precision Engineering. Vol. 33, No. 1, pp. 11-16, 2016.
11. Jeon, E. c., Lee, Y. H., Je, T. J., "Analysis of Size Effect of Nano Scale Machining Based on Normal Stress and Indentation Theories", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp.1-6, 2018.
12. Boothroyd, G., Knight, W. A., Fundamentals of Machining and Machine Tools, Third Ed., Taylor & Francis, pp. 81-83, 2006.