

# 고경도강(AISI 4140, Hrc60)의 하드터닝에서 가공속도 및 윤활조건 변경에 따른 CBN 공구의 마모 특성

## Wear Characteristics of CBN Tools on Hard Turning of AISI 4140

양기동<sup>1</sup>, 박경희<sup>1</sup>, 이명규<sup>2</sup>, 이동윤<sup>2,✉</sup>  
Gi-Dong Yang<sup>1</sup>, Kyung-Hee Park<sup>1</sup>, Myung-Gyu Lee<sup>2</sup>, and Dong Yoon Lee<sup>2,✉</sup>

1 한국생산기술연구원 생산시스템연구실용화그룹 (Department of Manufacturing System R&D, Korea Institute of Industrial Technology)

2 한국생산기술연구원 IT 융합공정연구실용화그룹 (Department of IT Converged Process R&D, Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: dylee@kitech.re.kr, Tel: +82-31-8040-6169

Manuscript received: 2014.5.6 / Revised: 2014.6.12 / Accepted: 2014.7.3

*Hard turning is a machining process for hardened materials with high surface quality so that grinding process can be eliminated. Therefore, the hard turning is capable of reducing machining time and improving productivity. In this study, hardened AISI4140 (high-carbon chromium steel) that has excellent yield strength, toughness and wear resistance was finish turned using CBN tools. Wear characteristics of CBN tool was analyzed in dry and MQL mixed with nano-particle (Nano-MQL). The dominant fracture mechanism of CBN tool is diffusion and dissolution wear on the rake surface resulting in thinner cutting edge. Abrasive wear by hard inclusion in AISI4140 was dominant on the flank surface. Nano-MQL reduced tool wear comparing with the dry machining but chip evacuation should be considered. A cryogenically treated tool showed promising result in tool wear.*

Key Words: Hard Turning (하드터닝), CBN Tool (CBN 공구), Tool Wear (공구 마모), Nano-MQL (나노입자 극소량윤활), Cryogenically Treated (극저온 처리)

### 1. 서론

하드터닝(hard turning)은 고경도소재(HRC 45~65)의 가공에서 연삭공정 없이 정삭공정만으로 우수한 품질의 표면을 얻을 수 있는 공정이다. 일반적으로 자동차 및 기계 산업에서는 우수한 표면 조도와 치수 정밀도를 요구하기 때문에 표면 마무리 공정에서 연삭공정이 사용되고 있으며, 경도가 높은 제품의 경우 선삭가공 이후 열처리를 통해 경도를 높이고 연삭공정으로 마무리하고 있다. 연삭

공정은 우수한 표면품질과 고경도소재에의 적용이 용이하다는 장점이 있어 작업 현장에서 많이 사용되고 있으나, 마무리에만 사용되는 별도의 추가 공정이기 때문에 공정 시간 및 공간의 효율성을 떨어뜨리고 있다. 또한, 과도한 절삭유 사용으로 환경적인 문제가 대두되고 있다. 하드터닝은 이러한 연삭공정의 단점을 극복하기 위한 대안으로 최근 현장에 널리 보급되기 시작하였다. 그러나, 고경도강의 하드터닝은 높은 절삭 온도를 발생하기 때문에 공구마모가 매우 심각하다.<sup>1-6</sup>

Varadarajan<sup>7</sup>은 AISI 4340(46HRC)의 건식 하드터닝에서 회전당 이송속도 증가(0.05~0.14 mm/rev)에 따라 절삭온도가 증가하며 그 범위는 900 ~ 1100℃로 매우 높다는 것을 보였다. 높은 절삭온도로 인하여 내열성이 높은 CBN 공구가 널리 사용되고 있으며, Enomoto<sup>8</sup>는 CBN 공구가 초경공구(carbide tool)보다 가공시 발생하는 평균 절삭온도가 낮음을 확인하였고, 고경도강 절삭에서 피삭재와의 화학적 반응이 안정적이어서 확산마모(diffusion wear)가 적게 나타난다고 보고하였다.

Naigade<sup>9</sup>는 MQL을 이용한 하드터닝에서 건식보다 표면조도가 개선되고, 대량의 윤활유를 사용하는 습식을 대체할 수 있다고 보고하였다. Sayuti<sup>10</sup>는 평균 5-10um 크기의 silicon dioxide nano-particles를 0.5wt%로 절삭유에 혼합하여 분사하는 방법이 공구마모를 감소시키고 표면조도에 효과적임을 보였다. 이는 공구와 칩 사이에 윤활유를 분사하여 마찰에 의해 발생하는 절삭온도가 감소하기 때문이다. Rahmati<sup>11</sup>은 nano-particle이 공구와 칩 사이에서 롤링(rolling)하여 칩과 공구의 마찰을 최소화하고, 이는 다시 공구마모 감소로 이어진다고 분석하였다. Seah<sup>12</sup>은 극저온 처리(deep cryogenic treatment)된 초경공구가 공구의 마모저항(wear resistance)을 증가시켜 공구수명이 향상된다는 것을 확인하였으며, Yong<sup>13</sup>도 일반공구와 극저온 처리된 공구의 실험 결과, 극저온 처리된 공구의 마모저항이 증가하여 공구마모가 감소됨을 보였다. 이와 같이 하드터닝 공정에서 공구마모를 감소하기 위해 다양한 방법들이 연구되고 있다.

본 논문에서는 하드터닝 공정에 있어서 건식가공과 Nano-MQL 및 극저온 처리를 적용한 공구의 마모 실험을 통하여 가공조건 및 윤활조건에 따른 공구마모를 비교 분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 피삭재는 직경 100mm의 AISI 4140환봉으로, 열처리를 통해 약 60HRC의 표면경도를 갖고 있으며, 절삭공구는 내열성이 높은 CBN (Sankvik corp. N123L1-0800-RE)을 사용하였다. 가공속도 증가에 따른 공구마모 특성을 분석하기 위하여 가공조건은 절삭깊이 0.1mm, 회전당 이송속도 0.1mm/rev로 고정한 후 절삭속도( $V_c$ )를 135, 200, 250, 300, 500m/min로 변경하면서 가공실험을 건식으로 수행하였으며, 이때의 절삭거리는 총 이

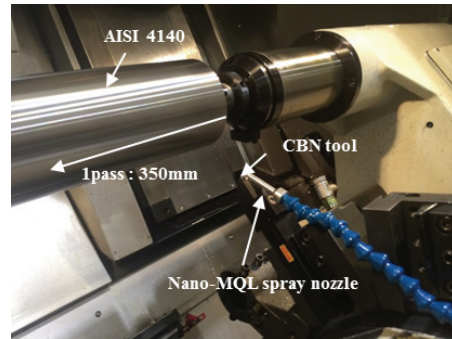


Fig. 1 Experimental setup

송거리 350mm를 감안할 때 1.1km가 된다.

윤활조건에 따른 공구마모 특성 분석을 위해서 절삭깊이와 이송속도는 이전과 동일하게 고정하고 가공속도를 앞선 가공속도 증가에 따른 공구마모 특성 분석을 통해 건식가공에 적용 가능한 상한선이라고 판단되는 300m/min으로 선정된 후 건식과 Nano-MQL 방식에 대해서 가공거리를 1.1, 1.65, 2.2km로 변경하면서 가공실험을 수행하였다. Nano-MQL방식은 윤활유에 나노입자(nano-particle)를 혼합하여 미스트(mist) 형태로 분사하는 방식으로서 MQL 분사 장치(Unistkorea corp., UNIMAX 210F)의 압축 공기 압력은 5bar, 오일 유량은 3ml/min로 설정하였다. 실험에 사용된 나노입자는 너비 1~15um, 높이 10nm사이의 graphene nano platelet (XGscience corp., xGnP M5)을 사용하였고,<sup>14</sup> 식물성 오일(Unistkorea corp., unist 210)에 0.1wt% 혼합하였으며, MQL 분사 노즐은 공구와 칩 사이의 접촉면을 향하게 Fig. 1과 같이 설치하였다.

극저온처리(cryogenic treatment)한 CBN 공구의 공구마모 특성을 분석하기 위하여 동종의 공구를 액화질소(liquid nitrogen)에 10분간 침전시킨 직후에 동일한 가공깊이(0.1mm), 이송속도(0.1m/rev)와 가공속도(300m/min)에서 건식으로 가공실험을 수행하였다.

가공에 사용한 CBN 공구의 공구마모는 3D형상 측정 레이저 현미경(KEYENCE corp., VK-X200)을 이용하여 관찰 및 측정하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 절삭속도에 따른 공구마모

Fig. 2는 절삭속도 변화에 따른 CBN 공구 경사면의 마모를 보여주고 있다. 경사면의 마모는 절

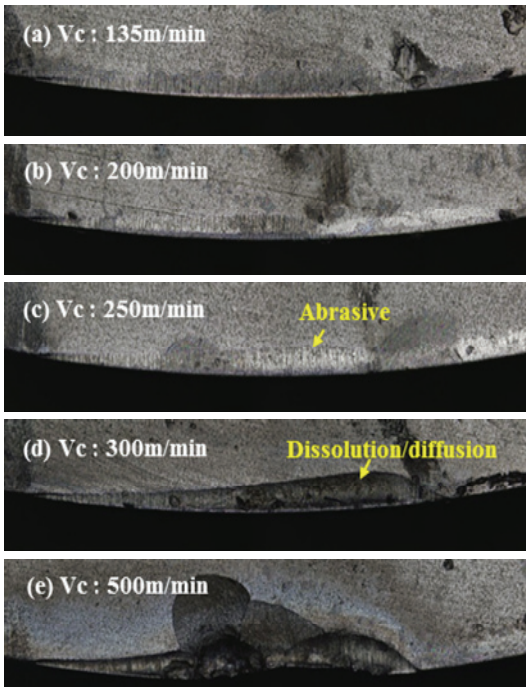


Fig. 2 Crater wears in various cutting speed

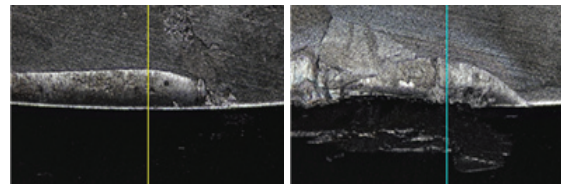
삭속도 300m/min부터 뚜렷한 크레이터 마모(crater wear)형태로 발생하였으며, 500m/min에서는 크레이터마모와 인선파손(edge chipping)이 동시에 발생하였다. 이는 절삭 속도 300m/min 이상에서 공구의 급격한 크레이터마모 증가로 공구인선부분의 두께가 감소하여 인선파손(edge fracture)이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 크레이터마모의 윗부분에는 공구 소재가 결손(scooped)된 것을 확인할 수 있었는데 이는 높은 가공온도와 접촉압력(contact pressure)로 인해 소재 덩어리(chunk)가 떨어져 나간 것으로 판단된다. 또한, 낮은 절삭속도에서는 Fig. 2(c)에서와 같이 피삭재에 포함된 경질입자(hard inclusion)에 의한 연마현상(abrasion)만 발생하였으나, 300m/min 이상의 절삭속도에서는 Fig. 2(d)에서와 같이 긁힘자국(scoring mark)이 없는 것으로 보아 용해(dissolution) 및 확산(diffusion) 마모가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 절삭속도에 따른 가공칩의 형상을 보여주고 있다. 절삭 속도가 증가할수록 절삭칩의 컬(curl)의 반경이 커지는 것을 볼 수 있는데, 절삭칩 컬의 반경 증가로 칩과 공구의 접촉면적이 증가되고 이는 다시 마찰력 및 절삭 온도를 증가시켜 공구 마모를 가속화하는 것으로 사료된다.

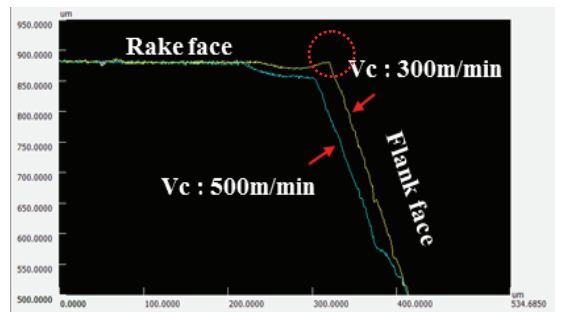


(a) Vc: 250m/min (b) Vc: 300m/min (c) Vc: 500m/min

Fig. 3 Chip formations of cutting speeds



(a) Vc: 300m/min (b) Vc: 500m/min



(c) Tool edge profile

Fig. 4 Comparison of tool edge profiles

Fig. 4는 절삭속도 300m/min과 500m/min에서 발생한 크레이터마모의 단면형상을 보여주고 있다. 측정 위치((a)와 (b))는 급격한 인선 파손(catastrophic edge fracture)이 발생하지 않으면서 크레이터마모가 가장 크게 발생한 지점이다. 가공속도가 증가함에 따라 진진된 크레이터마모 및 여유 면마모(flank wear)를 확인할 수 있으며, 앞서 기술한 바와 같이 크레이터마모 증가에 따른 인선두께가 감소하고 인선영역의 응력집중에 의해 인선파괴가 발생한 것으로 판단된다(Fig. 4(c) 참조).

Fig. 5는 절삭속도 300m/min에서의 여유면마모를 보여주고 있고 절삭속도 변화에 대한 여유면마모를 Fig. 6에 정리하였다. 절삭속도가 증가에 따라 긁힘 마모에 의한 점진적인 여유면마모가 진행되고, 또한 절삭속도 300m/min에서 급격한 크레이터마모가 발생한 것과는 대조적으로 여유면마모는 비교적 안정적(steady)으로 진행되는 것으로 보아 공구파손에는 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.



Fig. 5 Flank wear at cutting speed of 300m/min

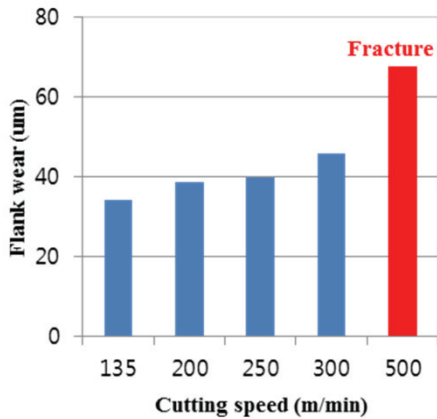


Fig. 6 Comparison of flank wear

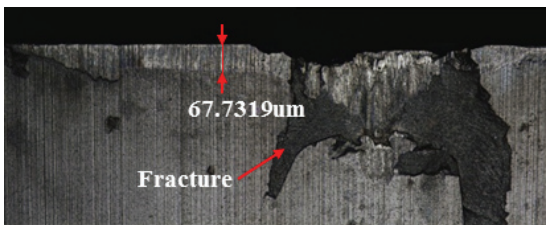
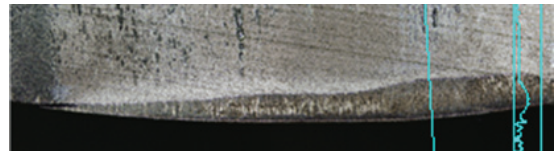


Fig. 7 Flank wear at cutting speed of 500m/min

Fig. 7은 절삭속도 500m/min 실험에서 심각하게 파손된 공구의 여유면을 보여주고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 열처리된 강(AISI4140, HRC60)을 CBN 공구로 가공하는 경우 경사면과 여유면 모두에서 연마현상에 의한 마모가 발생하고 있으나, 주된 공구파손은 안정적인 여유면마모가 아닌 경사면에서 발생하는 높은 절삭온도에 따른 용해/확산 마모에 의한 크레이터마모가 공구인선의 두께를 급격히 감소시켜서 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.2 Nano-MQL 적용에 따른 공구 마모

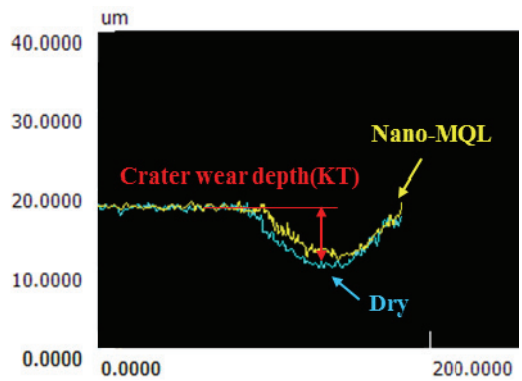
3.1 절의 실험을 통해서 안정적인 공구마모 현상을 보여주는 300m/min의 절삭속도로 절삭거리 변화에 따른 공구마모를 관찰하고, Nano-MQL에 의한 공구마모 저감 효과를 확인하기 위하여 건식가공 결과와 비교하였다. Fig. 8은 건식과 Nano-MQL



(a) Rake face for dry cutting



(b) Rake face for Nano-MQL cutting



(c) Crater wear depth profile

Fig. 8 Comparison of crater wear profiles

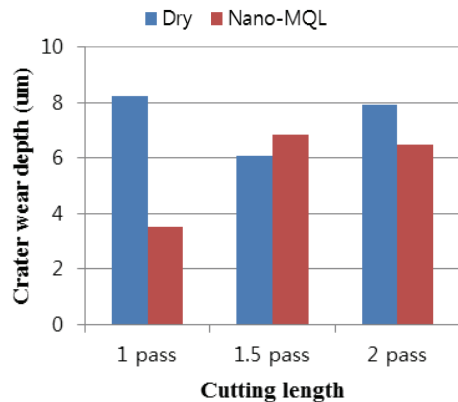


Fig. 9 Crater wear of dry and Nano-MQL cutting tool

로 2 pass (2.2km)의 거리를 가공하였을 때 발생한 크레이터마모를 보여주고 있다. Fig. 8(b)의 화살표가 지시하는 것은 윤활유가 타고 남은 잔해물로 공구의 좋지 않은 표면 상태를 보이지만, Fig. 8(c)에서와 같이 건식공정보다 작은 크레이터마모를 보여주고 있다. Fig. 9는 가공거리별 크레이터마모



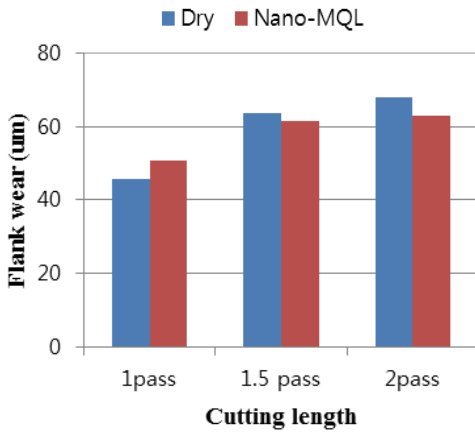


Fig. 10 Flank wear of dry and Nano-MQL cutting tool

의 크기를 보여주고 있다. 1pass (1.1km) 가공시 Nano-MQL가공의 크레이터마모는 건식가공에 비해 50%이상 적게 나타났으나, 1.5pass (1.65km) 이후에는 마모의 차이가 많지 않았다. 이와 같은 크레이터마모 경향은 Nano-MQL 가공시에 발생하는 가공 칩 배출이 원인인 것으로 보인다. Nano-MQL은 5bar의 압축공기와 함께 분사 되는데, Nano-MQL의 윤활작용으로 건식과 달리 가공칩이 끊어지지 않고 가공영역(피삭재)에 잔존하여 원활한 칩배출을 방해한다. 또한, 배출되지 못한 가공칩은 Nano-MQL 오일의 가공표면(공구와 칩 사이) 침투를 방해하여 공구마모 감소시키지 못한 것으로 판단된다. 이와 같은 문제는 Nano-MQL 가공시 칩 배출을 원활히 할 수 있는 공구의 칩브레이커(chip breaker)나 가공칩 배출장치의 사용으로 해결될 수 있다. 따라서, 본 실험의 1pass 결과에서 보듯이 가공칩 문제를 제외하면 Nano-MQL 가공이 크레이터마모를 급격히 감소시키는 것을 확인할 수 있다.

여유면마모에 대해서는 Fig. 10에서와 같이 건식공정과 Nano-MQL이 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었고 이는 여유면의 윤활 차이가 없었기 때문인 것으로 보인다.

한편, 극저온 처리가 공구에 미치는 영향을 분석하기 위해 극저온 처리 공구의 하드터닝 실험을 진행하였고 다른 윤활조건과 비교하기 위해 동일한 가공조건을 사용하였다. Fig. 11은 극저온 처리 공구의 마모를 나타내고 있다. 극저온 처리 공구의 여유면마모는 46.52um로 다른 윤활조건과 유사하나 크레이터마모의 경우는 3.11um로 건식(8.22um)과 Nano-MQL (3.52um)의 경우 보다 작게

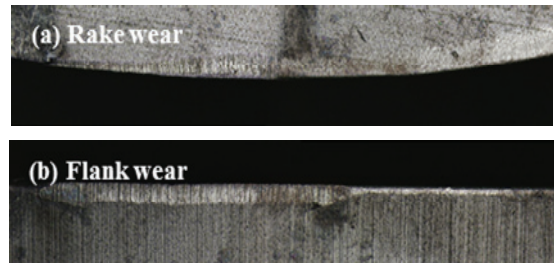


Fig. 11 Tool wear of cryogenic treated at cutting distance of 1.1km

나타났다. 이는 간단한 극저온 처리로 CBN공구의 마모 저항을 증가시키고 결과적으로 공구마모를 감소시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 공구의 극저온 처리는 하드터닝의 주요 공구파손의 원인인 크레이터마모를 줄일 수 있어 하드터닝 공정에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

CBN 공구를 이용한 열처리경화강(AISI4140, (HRC60)의 하드터닝을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭속도 300m/min부터 급격한 크레이터마모의 발생을 보이며 500m/min에서는 급격한 인선 파괴가 발생하였다. 크레이터마모의 증가로 공구인선부분의 두께가 감소하면서 인선 파괴가 발생한 것으로 판단된다.
2. 절삭속도가 증가할수록 가공칩의 컬(Curl) 반경이 증가하였고, 이는 칩과 공구의 접촉면적을 증가시켜 마찰에 의한 절삭온도 증가, 결과적으로 공구마모가 가속화되는 것으로 보인다.
3. Nano-MQL의 공구마모는 건식공정보다 적게 나타났다. Nano-particle을 함유한 MQL은 공구와 가공칩간의 마찰을 감소시켜 공구마모를 줄일 수 있으나, Nano-MQL 가공시의 칩배출 문제는 윤활작용을 방해하여 마모 저감효과를 나타내지 못했다. 향후 가공칩 배출을 고려한 공정연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.
4. 극저온 처리(cryogenic treated)는 공구의 마모 저항을 증가시켜 건식보다 낮은 크레이터 마모를 보여주었고, 이는 간단한 극저온 처리로 하드터닝의 주요 공구파손의 원인인 크레이터 마모를 줄일 수 있다는 것을 보여준다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 과제 (10033782, 10047590) 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Dogra, M., Sharma, V. S., Sachdeva, A., Suri, N. M., and Dureja, J. S., "Tool Wear, Chip Formation and Workpiece Surface Issues in CBN Hard Turning: A Review," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 11, No. 2, pp. 341-358, 2010.
2. Bang, H. I., "A Study on the Machining Characteristics with Coated Low CBN Inserts in Hard Turning of SCM440," Ph.D. Thesis, School of Precision Mechanical Engineering, Chonbuk National University, 2012.
3. Huang, Y., Chou, Y. K., and Liang, S. Y., "CBN Tool Wear in Hard Turning: A Survey on Research Progresses," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 5-6, pp. 443-453, 2007.
4. Heo, S. J., "Hard Turning Machinability of V30 Cemented Carbide with PCD, CBN and PCBN Cutting Tool," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 25, No. 12, pp. 47-54, 2008.
5. Jeon, J. Y., Ko, T. J., and Kim, H. S., "Research on the Intermittent Hard Turning (1): Machinability and Characteristic of CBN Tools," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 16, No. 7, pp. 58-65, 1999.
6. Moon, S. H., Shin, H. G., and Kim, T. Y., "Machining Characteristics and Tool Wear in Hard Turning of AISI 52100 Steel with Low CBN," *Proc. of the KSME 2004 Spring Annual Conference*, Vol. 6, pp. 26-30, 2008.
7. Varadarajan, A., Philip, P., and Ramamoorthy, B., "Investigations on Hard Turning with Minimal Cutting Fluid Application (HTMF) and Its Comparison with Dry and Wet Turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 193-200, 2002.
8. Enomoto, S., Kato, M., Miyazawa, S., and Ono, T., "Characteristics of Tool Life of CBN Cutting Tool in Turning Chromium-Molybdenum Steels of Various Hardnesses," *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 209-210, 1987.
9. Naigade, D. M., Patil, D. H., and Sadaiah, M., "Some Investigations in Hard Turning of AISI 4340 Alloy Steel in Different Cutting Environments by CBN Insert," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 14, No. 2, pp. 165-193, 2013.
10. Sayuti, M., Sarhan, A. A., and Salem, F., "Novel Uses of SiO<sub>2</sub> Nano-Lubrication System in Hard Turning Process of Hardened Steel AISI4140 for Less Tool Wear Surface Roughness and Oil Consumption," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 67, pp. 265-276, 2014.
11. Rahmati, B., Sarhan, A. A., and Sayuti, M., "Morphology of Surface Generated by End Milling AL6061-T6 using Molybdenum Disulfide (MoS<sub>2</sub>) Nanolubrication in End Milling Machining," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 66, pp. 685-691, 2014.
12. Seah, K., Rahman, M., and Yong, K., "Performance Evaluation of Cryogenically Treated Tungsten Carbide Cutting Tool Inserts," *Proc. of Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 1, pp. 29-43, 2003.
13. Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., and Rahman, M., "Performance of Cryogenically Treated Tungsten Carbide Tools in Milling Operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 7-8, pp. 638-643, 2007.
14. Park, K.-H., Ewald, B., and Kwon, P. Y., "Effect of Nano-Enhanced Lubricant in Minimum Quantity Lubrication Balling Milling," *Journal of Tribology*, Vol. 133, No. 3, Paper No. 031803, 2011.