

STAVAX 강의 마이크로 밀링 중 가공 방향 및 절삭유체 분사형태에 따른 표면 거칠기 경향에 관한 연구

이동원^{1,2} · 이현화¹ · 김진수¹ · 김종수[†]
한국생산기술연구원 뿌리기술연구소^{1,†}
인하대학교 기계공학과²

A study on surface roughness depending on cutting direction and cutting fluid type during micro-milling on STAVAX steel

Dong-Won Lee^{1,2} · Hyeon-Hwa Lee¹ · Jin Soo Kim¹ · Jong-Su Kim[†]

Korea Institute of Industrial Technology, Research Institute of Advanced manufacturing & materials Technology^{1,†}
Department of Mechanical Engineering, Inha University²

(Received June 20, 2023 / Revised June 27, 2023 / Accepted June 30, 2023)

Abstract: As Light-Emitting Diodes(LEDs) continue to advance in performance, their application in automotive lamps is increasing. Automotive LEDs utilize light guides not only for aesthetics but also to control light quantity and direction. Light guides employ patterns of a few hundred micrometers(μm) to regulate the light, and the surface roughness(Ra) of these patterns can reach tens of nanometers(nm). Given that these light guides are produced through injection molding, mold processing technology with high surface quality micro-patterns is required. This study serves as a preliminary investigation into the development of high surface quality micro-pattern processing technology. It examines the surface roughness of the workpiece based on the cutting direction of the pattern and the cutting fluid type when cutting micro-patterns on STAVAX steel using cubic Boron Nitride(cBN) tools. The experiments involved machining a step-shaped micro-pattern with a height of 60 μm and a pitch of 400 μm in a 22 \times 22 mm area under identical cutting conditions, with only the cutting direction and cutting fluid type being varied. The machining results of four cases were compared, encompassing two cases of cutting direction(parallel to the pattern, orthogonal to the pattern) and two cases of cutting fluid type (flood, mist). Consequently, the Ra value was found to be the highest(Ra 128.33 nm) when machining with the flood type in parallel to the pattern, while it was the lowest(Ra 95.22 nm) when machining with the mist type orthogonal to the pattern. These findings confirm that there is a difference of up to 25.8 % in the Ra value depending on the cutting direction and cutting fluid type.

Key Words: cBN tool, Cutting fluid type, Micro milling, Micro pattern, Surface roughness, STAVAX steel

1. 서론

최근 LED(Light Emitting Diode) 기술의 발전으로 LED 램프의 크기, 소비전력, 수명, 휘도 등에 대한 개선이 이루어졌고 LED는 차량용 할로겐 램프를 대체하고 있는 추세이다. LED가 차량용 램프로 사용되는 경우 눈부심 방지, 광량, 휘도 등에 대한 규

제를 만족시키고자 광학설계를 활용하여 설계된 미세패턴이 있는 라이트가이드를 사용하며, 램프의 구조를 개선하기 위하여 라이트 가이드를 사용하기도 한다.¹⁾ 이러한 라이트 가이드는 사출성형을 이용하여 제조되기 때문에 라이트 가이드의 개발 및 개선과 제조를 위해서는 수 십 nm의 표면 거칠기를 갖는 마이크로 패턴 가공 기술 개발이 우선되어야 한다. 마이크로 패턴 가공 및 높은 표면 품질을 갖는 금형 가공을 실현하기 위하여 다양한 연구들이 이루어졌다. Hwang 등²⁾은 사출성형금형에 주로 사용되는 소재중 하나인 P20에 질소와 붕소를 첨가하여

† 교신저자: jskingloria@kitech.re.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

피삭성을 개선시켰으며, 질화티타늄(TiN)이 코팅된 텅스텐 카바이드 공구를 이용하여 피삭성이 개선된 P20 강을 가공하는 실험을 통하여 고품위의 표면 가공의 가능성을 확인하였다. Jung³⁾ 등은 이온 빔을 이용하여 sub-micrometer scale의 절삭날을 갖는 SCD(Single-Crystalline Diamond) 공구를 제조하여 구리 코팅층을 가공함으로써 초미세 패턴 제작 기술을 제안하였다. Rhie⁴⁾ 등은 선삭가공 실험을 통하여 획득한 표면 거칠기 데이터를 절삭 파라미터에 관하여 회귀분석과 분산분석을 수행함으로써 절삭파라미터와 표면 거칠기의 관계에 대한 수학적 모형을 제시하였다.

높은 표면 품질을 갖는 마이크로 패턴을 가공하기 위해서 적합한 피삭재 및 공구의 선정이 필수적이다. 경우에 따라 공구의 코팅, 소재의 피삭성 개선 및 적합한 공구의 제작 등이 필요하며 가공조건이 표면 거칠기에 미치는 영향 또한 고려되어야 한다.⁵⁻¹²⁾

본 연구는 차량 LED 램프의 라이트가이드 제조용 금형가공기술 개발을 위한 선행연구로서 수 십 mm 수준의 표면 거칠기를 갖는 마이크로 패턴을 가공 기술을 구현하기 위하여 가공 조건 중 마이크로 패턴에 대한 가공 방향과 절삭유체 분사 형태가 표면 거칠기에 미치는 영향을 알아보하고자 실험적 연구를 수행하였다.

2. 가공실험 및 표면 거칠기 측정

2.1. 소재 및 공구의 선정

실험에 사용된 피삭재인 STAVAX(\leq HRC 52, ASSAB)는 SUS420J2 계 강종으로 내식성과 내마모성이 우수하고 경면가공성이 뛰어나 다양한 사출금형소재로 사용되며 특히 광학용 플라스틱 부품 제조를 위한 사출금형의 코어 소재로 적합하다. 하지만 크롬(Cr) 함량이 높아 타 강종 대비 피삭성이 좋지 않으므로 적절한 공구와 가공 조건 선정이 수반되는 소재이기도 하다.¹³⁾

STAVAX와 같은 고경도 난삭재를 가공하기 위한 공구의 소재는 입방정 질화붕소(cBN, cubic Boron Nitride), 단결정 다이아몬드(SCD, Single-Crystalline Diamond), 다결정 다이아몬드(PCD, Poly-Crystalline Diamond) 등이 있다. 이 중 cBN은 다이아몬드에 가까운 경도(4700-8600 kgf/mm)를 갖는 인공소재이며 내열

성 및 내마모성이 우수하다. 특히 고온에서 철(Fe)계 금속에 대한 안정성이 높아 고경도 특수강 절삭용 공구에 적합한 소재이다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 피삭재와 가공 형태를 고려하여 cBN 소재의 직경 0.3 mm 2날 볼 엔드밀(SSPB220, NS TOOL Co., Ltd.) 사용하였다.

2.1. 가공형상 및 실험 조건

본 실험 적용된 가공 형상은 마이크로 스케일의 계단 형태 패턴으로 Fig.1 에 3D CAD 모델을 나타내었다. 마이크로 패턴은 약 22×22 mm 면적 내에 Y 방향 피치 0.4 mm, Z 방향 피치 0.06 mm, 단차부는 반경 R0.15 mm의 필렛을 갖도록 설계되었다.

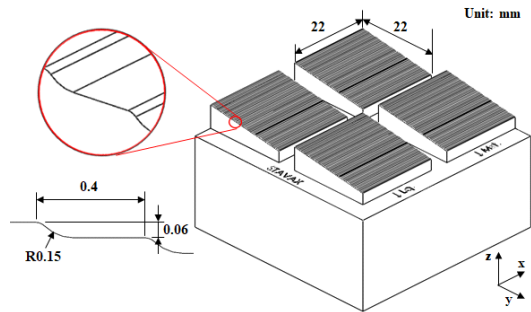


Fig. 1 Geometry for experiments

가공 실험은 고속 정밀 가공이 가능한 3축 CNC 가공기(RXP 801 Z2, Rödgers)를 사용하였다. 실험 조건은 Table 1과 같으며 이송속도(Feed rate)와 반경 방향 절삭깊이(a_e , Radial depth of cut)는 공구 제조사가 권장하는 가공조건 70% 수준을 적용하였다. 가공 방향은 패턴과 평행한 방향(X 방향)과 패턴의 직교방향(Y 방향)으로 구분하였고, 절삭유체의 분사형태는 범람식(flood)과 연무식(Mist)으로 구분하였다.

Table 1 Experiment condition

Machining condition	Case No.			
	1	2	3	4
Spindle speed, RPM	40,000			
Feed rate, mm/min	560			
Radial depth of cut, mm	0.0035			
Axial depth of cut, mm	0.006			
Cutting direction	X	Y	X	Y
Cutting fluid type	Flood	Flood	Mist	Mist

2.3. 표면 거칠기의 측정

가공실험이 완료된 시편은 3D 공초점 레이저 현미경(OLS5100, Olympus)을 사용하여 표면 거칠기(Ra) 값을 측정하였다. 표면 거칠기는 각 실험 케이스 별 등간격으로 가공순서에 따라 9개 지점을 측정하였으며 공구 진행방향과 직교한 방향으로 측정하였다. 가공 방향에 따른 측정 지점 및 측정 선의 예시를 Fig.2 에 나타내었다.

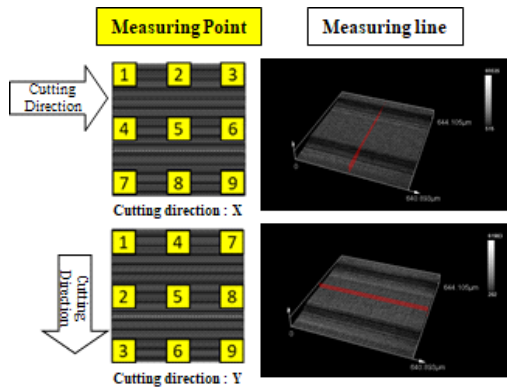


Fig. 2 Surface roughness measuring point and measuring line depending on cutting direction

3. 실험결과 및 분석

실험결과는 각 실험 조건 별 표면 거칠기(Ra) 값의 경향, 9개 측정 지점 값의 평균 및 표준편차를 비교하여 분석하였다. 모든 실험 조건의 가공시간(working time) 및 Ra 값 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Result of experiment

Measuring point No.	Surface roughness, Ra, nm			
	Case 1 X, Flood	Case 2 X, Mist	Case 3 Y, Flood	Case 4 Y, Mist
1	69	82	121	73
2	68	98	126	61
3	47	89	90	57
4	230	207	154	160
5	199	194	71	102
6	147	171	93	101
7	147	96	161	106
8	134	78	135	114
9	114	88	130	83
Average	128.33	122.56	120.11	95.22
Std.Dev.	61.28	52.25	30.06	31.66
SEM	20.43	17.42	10.02	10.55
Working time, sec	260	260	590	590

3.1. 가공 방향에 따른 표면 거칠기

Case 1과 3, Case 2와 4를 각각 비교하여 절삭유체 분사형태가 동일할 때 가공방향에 따른 표면 거칠기 차이를 알 수 있다. 범람식 환경일 때와 연무식 환경일 때 모두 패턴과 직교한 방향으로 가공하는 것이 패턴과 평행한 방향으로 가공할 때보다 낮게 나타났으며 각각 6.4 %, 22.3 % 감소한 수준으로 확인되었다. 표준편차 또한 범람식 환경과 연무식 환경 모두 패턴의 평행방향 가공 대비 패턴과 직교방향 가공 시 낮게 나타났으며 범람식 환경에서 51 %, 연무식 환경에서는 39.4 % 낮게 측정되었다.

3.2. 절삭유체 분사 환경에 따른 표면 거칠기

가공 조건과 방향이 동일한 경우 절삭유체 분사 환경에 따른 표면 거칠기의 차이를 관찰하기 위하여 Case 1과 2, Case 3과 4를 각각 비교하였다.

패턴과 평행한 방향으로 가공 시 연무식 환경에서 범람식 환경 대비 약 4.5 % 감소한 수준의 Ra 값을 확인 할 수 있었으며, 패턴과 직교한 방향으로 가공 하는 경우 연무식 환경에서 범람식 환경 대비 20.7 % 감소한 Ra 값이 관찰되었다. 표준편차의 경우 패턴의 평행한 방향으로 가공하는 경우 연무식 환경에서 범람식 환경보다 16.1 % 낮게 나타났으나, 패턴에 직교한 방향으로 가공 시 연무식 환경에서 범람식 환경보다 5.1 % 높게 확인되었다.

4. 결론

본 연구는 차량 LED 램프용 라이트 가이드 개발과 관련한 선행 연구로서 수 십 나노미터의 표면 거칠기를 갖는 마이크로 패턴 가공 기술을 구현하기 위하여 마이크로 패턴에 대한 가공방향과 절삭유 분사형태가 금형의 표면 거칠기에 미치는 영향을 확인하고자 가공실험을 수행하였고 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

- 패턴과 직교한 방향으로 가공하는 것이 고품위 표면 가공에 유리하며 절삭유 분사환경에 따라 6.4 %(범람식) ~ 22.3 %(연무식) 낮은 Ra 값을 갖는 표면을 얻을 수 있다. 또한 연무식 환경에서 가공방향이 표면 거칠기에 미치는 영향이 증가함을 알 수 있다.
- 패턴과 직교한 방향으로 가공하는 경우 상대적으로 균일할 표면을 가공할 수 있으며, 연무

식 환경 대비 범람식 환경에서 가공방향이 표면 거칠기의 균일한 정도에 미치는 영향이 증가함을 알 수 있다.

- 동일한 가공 조건과 가공 방향에서 절삭유 분사 형태만을 변경하여 4.5 % ~ 20.7 %의 표면 거칠기 감소 효과를 얻을 수 있었으며 패턴과 직교한 방향으로 절삭하는 경우 절삭유 분사 형태가 표면 거칠기에 미치는 영향이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

결론적으로 연무식 환경에서 패턴의 직교방향으로 가공 시 Ra 95.22 nm인 우수한 품질의 표면을 얻을 수 있었으며, 동일한 절삭조건에서 Ra 값은 가공방향 및 절삭유 분사형태에 따라 최대

25.8 % 차이가 있음을 확인하였다. 하지만 전체 가공 형상에서 패턴과 직교한 방향은 빗면을 따르기 때문에 반복되는 Z축 이송으로 절삭시간이 증가하여 본 연구에 적용된 형상에서는 패턴에 평행한 가공 방향 대비 약 2.3배의 가공시간이 소요되며, 가공이 요구되는 면적이 증가할수록 가공방향에 따른 가공 시간의 차이 또한 증가될 것으로 예상된다. 따라서 가공방향과 절삭유 분사 형태 및 시간당 재료 제거율이 고려된 실험적 연구가 진행 될 필요가 있으며, 본 논문의 결과는 향후 연구의 기초자료로 활용 될 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원 및 산업통상자원부의 소재부품산업기술개발기반구축사업의 ‘글로벌 시장진출을 위한 차세대 자동차용 R100 μ m, Ra20nm급 디지털 라이트닝 초미세 Light Guide 모듈 금형성형 기술 개발(KM230100, 20019131)’과제의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- 1) Lee, D.W., Lee, S.K. , “An Analysis of the Technology Market for Development of LED Head lamps for Vehicles”, Korea Institute of Science and Technology Information, pp.5-47, 2013
- 2) Hwang, S.K., Lee, J.H. and Ryu, S.H., “A Study on Tool Wear Surface Roughness Characteristics in Milling of AISI P20 mold steel with BN”, Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 420-426, 2018
<http://doi.org/10.17958/ksmt.20.4.201808.420>
- 3) Jung, S.-T., Song, K., Choi, Y.J., et al., “Research on ultra-precision fine-pattern machining through single crystalline diamond tool fabrication technology”, Korea Society of Die & Mould Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 63-70, 2020
<http://doi.org/10.22847/ksdme.14.3.202009.010>
- 4) Rhie, Y.S. and Lee, D.J., “Dermination of the cutting condition and prediction of the surface roughness when turning die steel (STD11) with ceramic tool”, Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 11-17, 2012
<http://doi.org/10.17958/ksmt.14.4.201208.11>
- 5) Hong, K. P., Song, K. H., Lee, I. C., et al., "A Study on The Optimization of Plastic Mold Steel Machining Using MQL Supply System", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 6, pp.7-14, 2017
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.6.007>
- 6) Sim, M.S., Kim, D.H. and Lee, C.M., “The Effect of Surface Roughness according to Machining Conditions of Test Specimen for Precision Micro-milling Machining”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32, No.1, pp. 49-55, 2015
<https://doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.1.49>
- 7) Choi, T.K., Kim, J.S., Park, J.H., et al., “The cutting temperature characteristics depending on cutting conditions in turning of Al6061-T6”, Proceedings of KSMTE 2010 autumn conference, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 238-240, 2010
- 8) Lee, S.Y. and Kim, H.N., “Effects of Cutting Conditions on Surface Roughness in Turning”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No.8, pp. 139-149, 2001
- 9) Jeong, J., Kwon, H., Koo, J., Kim, P. and J. Kim, “A Study on Machinability Evaluation of Inconel 718 in Flat End Milling”, Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers,

Vol. 21, No. 6, pp. 982-987, 2012
<http://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.6.982>

- 10) Cho, C.Y. and Ryu, S.H., "Cutting Characteristics of Ball-end Mill with Different Helix Angle", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No.5, pp. 395-401, 2014
- 11) Huang, W.T., Wu, D.H., Lin, S.P., et al., "A combined minimum quantity lubrication and MWCNT cutting fluid approach for SKD 11 end milling", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 84, pp. 1697-1704, 2016
<http://doi.org/10.1007/s00170-015-7770-2>
- 12) Seo, K.H., Son, M.K., Yoon, G.S., et al., "A study on machining conditions on surface roughness in EPS End-milling", Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.11, No.2, pp.46-50, 2017
- 13) Y. Hwang et al. "A Study on the Ultraprecision Grinding of STAVAX", Proceedings of KSPE 2010 autumn conference, Korean Society for Precision Engineering, pp. 99-100
- 14) Rowe, W.B., "Chapter 3 - Grinding Wheel Developments", Principle of Modern Grinding Technology, pp.35-58, 2009
<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2018-4.50009-4>

저자 소개

이동원 (Dong-won Lee)



< 관심분야 >
정밀가공, 금형, CAE

- 2017년 8월: 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월~현재: 인하대학교 기계공학과 박사과정
- 2015년 3월~현재: 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소 금형성형연구부, 학연협동과정생

이현화 (Hyeon-hwa Lee)



< 관심분야 >
가공, 공구마모, 금형

- 2018년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 11월~현재: 한국생산기술연구원, 뿌리기술연구소, 금형성형연구부, 포스트닥터

김진수 (KIM JIN SOO)



< 관심분야 >
CAD, CAM, 마이크로 가공

- 1994년 : 양천고등학교 졸업
- 1997년~2004년 : 한양엠텍(주) CAM, CAM 근무
- 2010년 10월~현재: 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소 금형성형연구부, 기술원

김종수 (Jong-Su Kim)



< 관심분야 >
정밀가공, 금형, 자동화

- 2012년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2019년 1월: 삼성전자 MASK 개발팀, 책임연구원
- 2019년 1월~현재: 한국생산기술연구원, 뿌리기술연구소, 금형성형연구부, 수석연구원