

◆ 특집 ◆ 5축 가공기술

5축 가공의 응용 · 레이저 가공, 사출금형 가공

Application of 5-axis Machining – Laser Engraving, Molding Die Machining

김형중¹, 위경훈¹, 안성훈¹, 전차수², 이상훈³, 이정근⁴, 조현욱³, 박정환^{3,✉}
Hyung Jung Kim¹, Kyung Hoon Wie¹, Sung Hoon Ahn¹, Cha Soo Jun², Sang Hoon Lee³, Jung Geun Lee⁴,
Hyeon Uk Cho³ and Jung Whan Park^{3,✉}

1 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)
2 경상대학교 산업시스템공학부 (Division of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National Univ.)
3 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
4 윌테크 (WillTech, Daegu)
✉ Corresponding author: jwpark@yu.ac.kr, Tel: 053-810-3524

Key Words: Five-axis Machining (5축 가공), Laser Engraving (레이저 가공), Molding Die (사출금형)

1. 서론

일반적으로 5축 가공은 3축 가공에 비해 효율이 좋고 가공성이 좋다고 평가되며, 프로펠러, 임펠러, 터빈 블레이드, 항공기 부품, 금형 등의 다양한 제품을 대상으로 한다. 5축 가공을 절삭가공으로 한정하였을 때 일반적인 가공 도구는 엔드밀 공구와 레이저 가공기를 꼽을 수 있다. 엔드밀 공구를 이용한 5축 가공은 가장 전통적인 절삭가공 방식이며, 레이저 가공의 경우는 일반적으로 곡면의 절단(예: blanking)에 많이 활용하고 있다.

최근 5축 레이저 가공기를 이용한 3차원 미세형상 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 미세 패턴, 의료용 부품, 세라믹 가공 등 다양한 분야에 적용되어 사용되고 있으며, 최근에는 레이저 빔 자체의 가공 특성에 따라 보다 정확한 가공을 위한 CAM 시스템의 개발도 함께 이루어지고 있다.

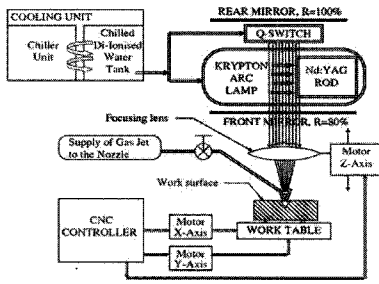
금형의 5축 가공은 국내에서도 본격적으로 적용이 시작되고 있으며, 최근 대형 사출금형의 5축 가공이 많은 관심을 끌고 있다.

본 논문에서는 5축 레이저 가공기를 이용한 미세 표면가공(engraving) 및 대형 사출금형의 5축 가공 사례를 살펴보고자 한다.

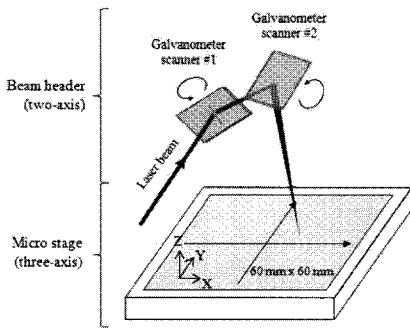
2. 레이저 가공

2.1 레이저 가공의 원리 및 특징

레이저 가공기술은 작은 지점에 높은 에너지를 집중시켜 고체의 표면으로부터 질량을 제거하는 열공정(thermal process) 방식의 미세가공 기술로서, 집광 면적이 매우 좁기 때문에 수십 m의 국부 가공이 가능하며 비접촉 가공임으로 소재에 가해지는 응력이나 뒤틀림이 거의 없다. Fig. 1(a)는 일반적인 레이저 가공기 장비의 구성을 보여준다. 이러한 레이저 가공 장비의 가공부는 5개의 축으로 구성되어 있는데, Fig. 1(b)와 같이 가공물은 3축 스테이지에 의해 이송된다. 그리고 레이저 빔을 제어하는 2축의 스캐닝이 추가됨으로써 절단이나 드릴링 보다 복잡한 5축에 의한 3차원 형상을 가공할 수 있다.¹ 이는 기존의 절삭가공뿐만 아니라 매우 얇은 벽(thin wall), 미세한 채널 등의 다양한 가공 범위에서 활용이 가능하다.



(a) Typical configuration of laser engraving system²



(b) Five-axis control: beam header(two-axis) + stage (three-axis)³

Fig. 1 Schematics of laser engraving system

또한, 에너지 밀도가 높은 레이저 빔을 사용하기 때문에, 절삭 가공이 어려운 합금(SUS, Ti 등)이나 세라믹 또는 깨지기 쉬운 재료들을 포함하여 정도나 강성에 상관없이 다양한 재료의 가공이 가능하다. 레이저 가공기는 매질에 따라 크게 CO₂, Nd:YAG, Excimer 레이저 등으로 분류되며, 대상 어플리케이션과 재료에 따라 Table 1 과 같이 사용이 된다.

최근에는 레이저 가공 기술의 상용화를 위한

Table 1 General applications of laser machining

Applications	Workpiece materials	Laser type
Cutting	Metal	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG
	Plastics	CWCO ₂
	Ceramic	PCO ₂
Drilling	Metal	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:glass
	Plastics	Excimer
Marking	Metal	PCO ₂ , Nd:YAG
	Plastics	Excimer
	Ceramic	Excimer

많은 연구들의 진행으로 반도체 및 전자 산업에서 절단, 마킹, 드릴링 등에 사용될 뿐만 아니라 고정 밀도와 미세 형상의 2.5 차원 혹은 5 축 가공 기술을 기반으로 한 (역구배가 있는) 3 차원의 형상의 가공도 가능하게 되었다.

2.2 레이저 가공기의 개발 동향

전 세계적으로는 독일이 레이저 산업에서 선두 자리를 확보하고 있으며, 자동차 및 전자, 반도체 산업에서 기존의 가공 기술로 처리가 어려운 분야에 다양하게 사용되고 있다. 국내에서는 절단용으로 저가의 CO₂ 레이저 가공기의 수요가 크며, 마킹, 절단 등의 미세한 가공이 필요한 전자 산업에서 제한적으로 Nd:YAG 레이저 가공기를 사용하고 있다.

레이저 가공은 기존의 절삭 가공과 비교했을 때, 미세패턴이나 복잡한 형상을 가공하는데 유리하다. 공구와 절삭 재료의 내구성을 고려해야 하는 절삭가공과 달리, 레이저의 종류를 바꾸거나, 사용하는 레이저 빔의 가공 조건(빔 반경, 초점 거리 등)을 변경해주는 것만으로 그 가공범위를 쉽게 조정할 수 있기 때문이다. Manchester University의 Li 외⁴는 Sb₃₀Te₇₀ 필름표면에 500 nm 단위의 정교한 기호 모양을 가공하는 데에 성공하였다(Fig. 2). Ritsumeikan University의 Kathuria⁵는 Nd:YAG 레이저로 의료용 스텐트를 가공하였다(Fig. 3). National ChangHua University of Education의 Che⁶은 CO₂ 레이저를 이용하여 달걀 표면에 글자와 패턴을 가공한 연구를 발표하기도 하였다(Fig. 4).

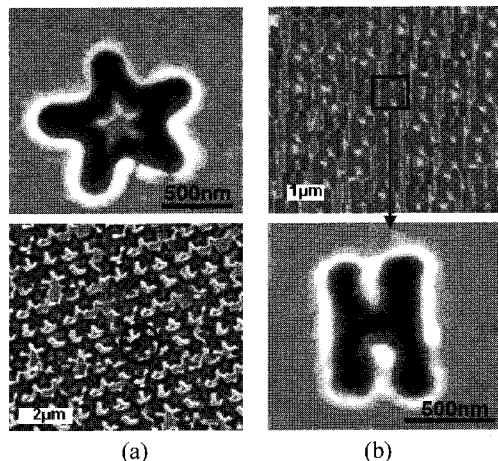


Fig. 2 SEM images of star-shape arrays (a) and H-shape arrays (b) produced by KrF excimer laser (GSI-Lumonic IPEX848)

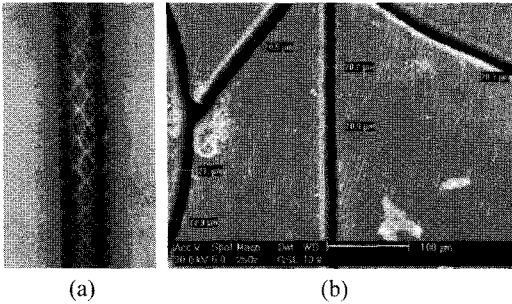


Fig. 3 (a) Pictorial view of laser generated metallic stent
(b) SEM micrograph showing kerf width of laser cut metallic stent

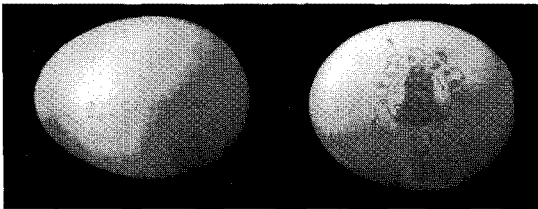
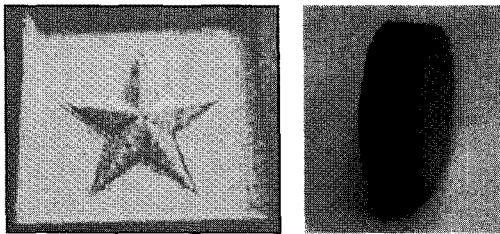


Fig. 4 Surface machining on the eggshell using CO₂ laser

또한 기존의 가공방법으로는 가공이 어려운 재료들에 대한 가공에 대해서도 다양하게 연구가 되었다. Nd:YAG 를 이용하여 Wang 과 Zeng⁷ 은 알루미늄 세라믹에 3 차원 형상을 가공한 연구를 진행하였으며(Fig. 5(a)), Liu 외⁸ 는 Si₃N₄ 세라믹에 나선산을 가공하는 연구를 수행하였다(Fig. 5(b)).



(a) Star-shape on alumina (b) Thread on Si₃N₄

Fig. 5 3-D shape machining on ceramics

상업용으로는 세계적으로는 포바(FOBA)⁹ 와 디엡지(DMG, Deckel Maho Gildemeister),¹⁰ 국내에서는 쿠키혼 등이 금형 및 부품 등의 다양한 형상 가공이 가능한 레이저 가공기를 출시하고 있다.

2.3.5 축 가공 기술 기반 3 차원 레이저 가공기 개발

상기 레이저 가공기(Exito Blade II)는 (주) 쿠키

혼에서 개발하고 있는 3 차원 레이저 가공기이다 (Fig. 6).³ STL 모델을 기반으로 3 차원 모델의 가공을 지원하는 전용 소프트웨어를 개발하여 정확한 가공 결과를 달성하고자 하였다.¹¹ 이 장비의 기본 구성은 Fig. 1 에 소개된 것과 동일하며, 수직벽 가공 알고리즘이 적용되어 기존의 레이저 가공기로는 가공이 어려운 수직벽을 비교적 우수한 품질로 대면적 모델의 정밀가공이 가능한 장점을 가지고 있다. 가공실험으로는 수직벽 가공 알고리즘을 기반으로 한 핸드폰 키캡에 대해서 다루었다.



Fig. 6 Example parts of commercial system

2.3.1 수직벽 정밀 가공

일반적으로 레이저 가공은 일정 스팟에 높은 에너지량을 갖는 빛을 집중시켜 가공하는 방법론적 특성에 의해 일반 기계식 절삭가공용 경로를 사용할 경우 가공오차가 발생하게 된다. 이러한 레이저 가공시 발생하는 문제는 레이저 빔의 형태로 인해 발생하는 고유한 현상으로, 최종 부품의 품질에 있어 결함으로 여겨지며, 이는 기계식 5 축 절삭가공의 공구간섭 문제와 유사하다. 레이저 가공에 있어서 공구간섭은 원뿔로 형상화 할 수 있는 레이저와 모재간의 간섭을 뜻한다. 이는 주로 Fig. 7(a)와 같이 고 종횡비(high-aspect-ratio)의 홈을 가공할 경우 나타나며 결과적으로 형상의 주위에 손상을 입힌다(Fig. 7(b)). 이는 특히 수직벽을 가공할 경우, 두드러지게 나타난다. 따라서 직벽과 같이 경사도가 가파른 벽면을 가공하기 위해서는 원뿔형상의 레이저와 STL 모델의 각 삼각형간의 간섭을 파악하고, 간섭이 일어나는 경우에 대해 레이저 빔의 2 축 제어부를 이용하여 간섭을 회피할 수 있는 주사위치에서 기울어진 레이저 빔을 사용하는 것이 필요하다.

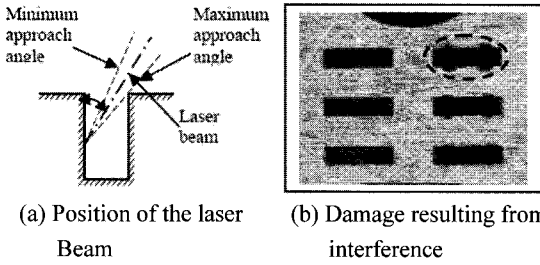


Fig. 7 The interference problem in laser milling¹²

이를 위해 레이저 빔을 Fig. 8 과 같은 원뿔 형상으로 가정하고, 이 원뿔과 삼각형 간의 간섭을 탐지하는 알고리즘 및 주사위치 오프셋 알고리즘을 구성하였으며, 가공기 전용 소프트웨어의 하위 알고리즘으로서 탑재하였다. Fig. 9 는 제안된 알고리즘을 적용할 경우 나타나는 가공결과로써 수직벽 형상이 우수한 품질로 나타나는 결과를 확인할 수 있다.

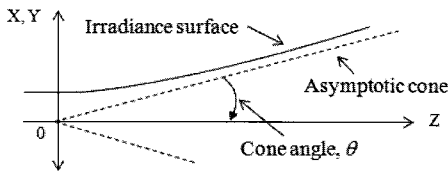


Fig. 8 Schematic diagram of the laser beam

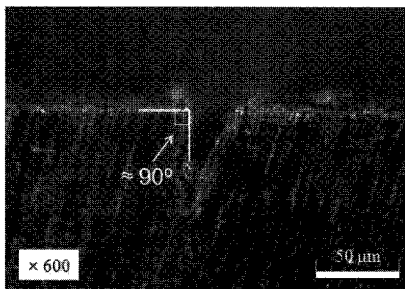
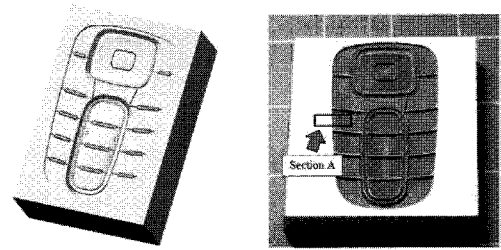


Fig. 9 Vertical wall machining with the proposed

2.3.2 가공 결과

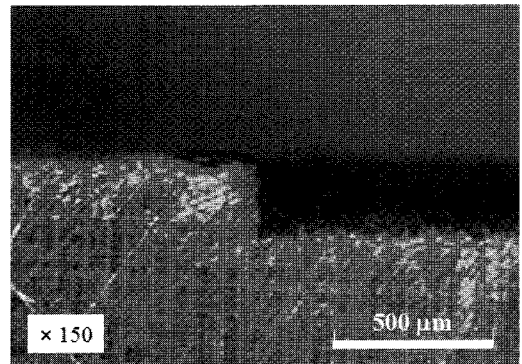
상기 설명한 레이저 가공기의 성능 평가를 위해 Fig. 10(a)의 핸드폰 키패드 모델을 강철로 된 모재에 가공하였다. 레이저의 가공깊이(Depth-of-Cut)는 20m 이며 가공한 모델의 크기는 약 40mm × 60mm 이다. 생성된 NC 코드의 크기는 약 120MB, 총 가공시간은 약 30 시간이며 실제 가공결과를 Fig. 10(b)와 같다.

앞서 설명한 수직벽 가공 알고리즘의 성능 평가를 위해 Fig. 10(b)의 A 부분을 절단하여 현미경을 이용하여 관찰하였다. 관찰결과를 Fig. 10(c)이며, 비교적 수직벽 형상이 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) CAD model

(b) Fabricated part



(c) Magnified view of section A

Fig. 10 Fabrication results of keypad example

3. 대형 사출금형 가공

3.1 개요

자동차 램프 부품류 사출금형(Fig. 11)을 제작하는 SL(썬)는 다음과 같은 이유로 대형 5 축 NC 가공기를 도입하였다(Fig. 12). 참고로 본 가공기의 기구학적 구조는 스피들 헤드측에 2 개 회전축(B, C 축)이 부착된 head/head 형식이다.

- 금형의 대형화 추세로 기존 설비 사양을 초과하는 경우가 발생,
- 가공 제품 형상의 급경사 등이 많아지면서 기존 3 축 고속가공의 어려움 발생,
- 자동차 개발기간 단축으로 금형의 납기 단축이 요구되며,
- 금형의 설계 자유도를 향상시킴으로써 금형 품질을 개선하고자 함.

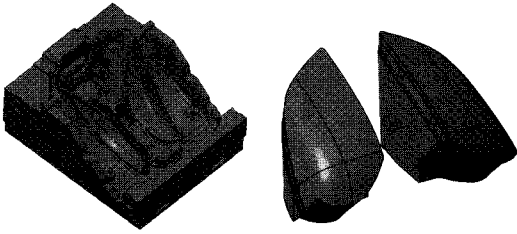
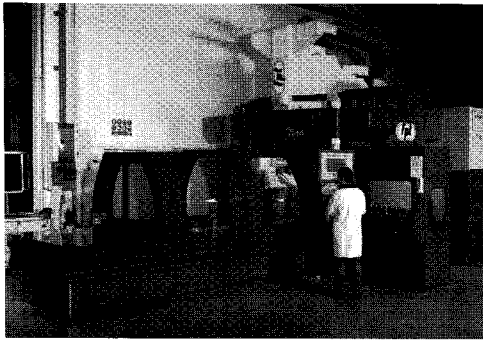
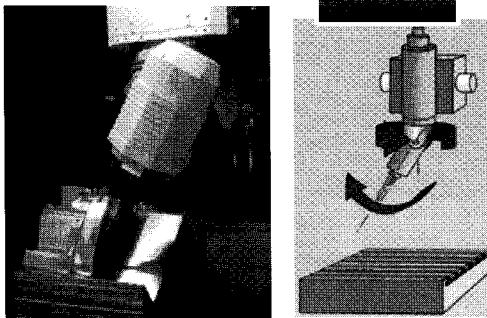


Fig. 11 Manufactured products(SL Corp)



(a)



(b)

Fig. 12 DINO machine (FPT Industry)

자동차 램프 부품류 사출금형의 경우 최근 제품의 대형화로 인해 금형의 크기도 대형화 되고 있다. 또한 제품 형상의 특성에 의해 깊은 급경사 가공형상을 가지는 경우가 많은데, 기존 3 축 가공기에 의한 가공은 비효율적인 문제가 발생한다(예: 공구길이 증가에 의한 가공성 저하). 이외에도 5 축 가공은 전극 방전가공(form EDM) 공정을 대체하거나 최소화 할 수 있는 장점이 있으며, 5 축 가공방식을 고려하여 보다 유연한 금형 설계가 가능하다.

3.2 가공 데이터 준비

5 축 가공을 세분하면 동시 5 축(simultaneous 5-axis) 가공과 위치결정형 5 축(positional 5-axis) 가공으로 나눌 수 있다. 위치결정형 5 축 가공은 3+2 축 가공이라고도 불리며, 5 축 가공기에서 특정 공구방향을 유지한 상태에서 가공을 진행하는 방식으로서, 금형 가공에 많이 활용되는 방식이다.

5 축 가공데이터를 준비하는 과정은 기존의 3 축 가공데이터를 준비하는 것과 크게 다르지 않다(Fig. 13). 다만 가공과정에서 발생할 수 있는 다양한 간섭(interference)을 사전에 검사하고 제거하는 과정이 필수적이다. 특히 움직이는 기계 구조물과 작업물 간의 충돌(collision)은 치명적인 경우가 많기 때문에 주의하여 검증하는 것이 필요하다.

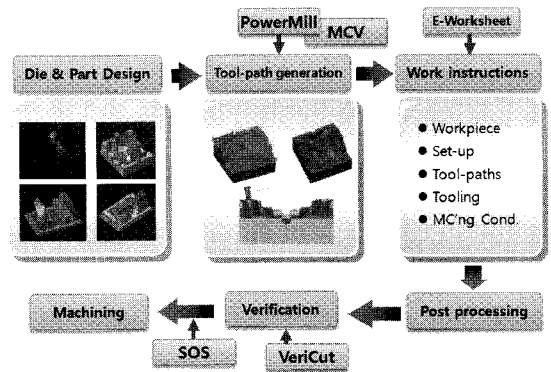
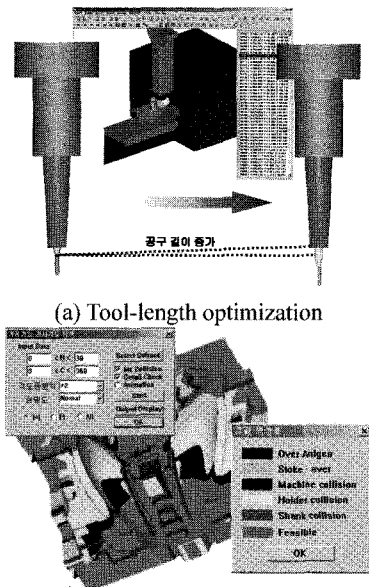


Fig. 13 NC data generating process

금형 설계 후 3 차원 CAD 모델이 준비되면 공정계획을 작성한 후 적절한 CAM 시스템을 이용하여 가공데이터를 준비한다. 다양한 CAM 시스템이 존재하지만, SL(주)의 경우는 가공데이터 생성 용도로 PowerMill®, 가공데이터 검증(verification) 용으로는 VeriCut®을 사용하고 있다.

여기에 더하여, 공구길이 및 공구방향 등의 가공조건 최적화를 위한 별도의 CAM 시스템을 개발하여 사용하고 있으며,¹⁴ 가공기를 조작하는 현장 작업자가 간편하게 활용할 수 있는 모듈을 추가로 갖추고 있다(Fig. 14). 부연하자면, 공정 별 NC 가공데이터의 최적 공구길이는 충돌 및 기계축값 오류(stroke-over)가 없는 최소 공구길이이며, 기존 CAM 시스템의 경우 적용 가공기 모델을 고려한 충돌 검사 기능이 다소 부족하거나 복잡한 반복 작업을 되풀이 함으로써 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.



(b) Search of feasible tool-orientation

Fig. 14 Auxiliary CAM system for tool-length optimization, feasible tool-orientation search

5 축 가공의 주요한 장점으로, 3 축 가공에 비해 공구길이와 공구방향의 최적화가 가능하다는 점이다. 특히 램프 부품의 사출금형에 존재하는 깊고 급격한 경사면 형상의 경우 이러한 장점을 극대화하는 효과를 볼 수 있다(Fig. 15).

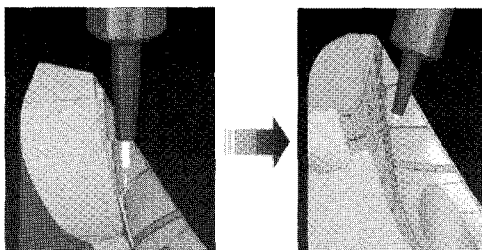


Fig. 15 Tool-length optimization example

3.3 가공 공정 사례

· 사출금형의 경우 황삭에서 잔삭에 이르는 모든 공정에서 5 축 가공을 사용하는 것은 아니다. SL(ㄷ)의 경우 일반적으로 황삭의 경우 3 축 가공을 수행하고, 중정삭 및 잔삭은 3 축, 3+2 축, 동시 5 축 가공을 적절하게 배합하여 사용한다.

예를 들어 Fig. 16 에 보이는 금형 모델의 경우, 황삭 공정의 7 개 단위공정(UMO: unit machining operation)¹⁵ 은 일반 3 축 가공으로 처리하며, 중~잔

삭의 40 여개 UMO 중 30%는 3 축 고속가공, 20%는 동시 5 축가공, 그리고 50%는 3+2 축 가공을 수행하고 있다.

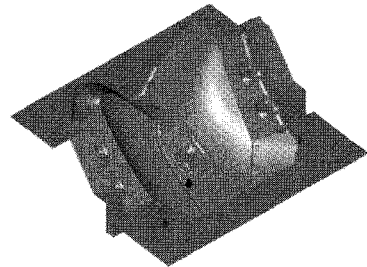


Fig. 16 Molding die model(upper side cavity)

3.4.5 축 가공 적용 평가

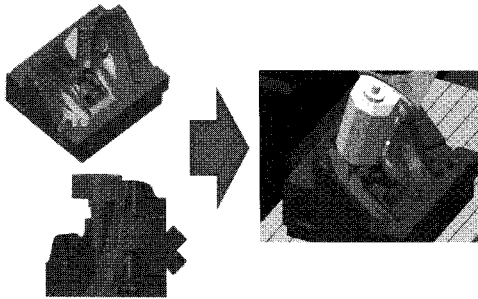
대형 5 축 가공기를 이용한 사출금형 5 축 가공 적용에 대한 효과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 참고로 SL(ㄷ)의 경우, 평균 30% 가량의 납기단축 및 생산성 향상 효과를 보이고 있다.

- 가공 정밀도 및 품질 향상
 - 작업물 셋업 최소화
 - 최적 공구길이
 - 공구 수명 향상
- 납기 단축
 - 작업물 셋업 시간 단축
 - 방전가공 및 사상작업 감소
- 금형 설계 유연화
 - 측면과 언더컷 부위 형상가공 자유도 증가

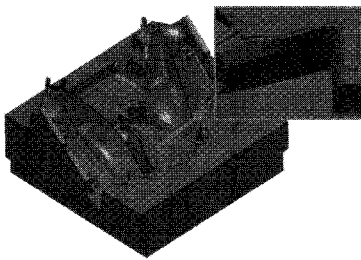
Fig. 17 은 5 축 적용으로 인한 가공 품질 향상 사례를 보이고 있다. Fig. 17(a)는 급경사면을 가지는 대형 제품의 경우로서, 가공기계 헤드 충돌로 인해 3 축 고속가공기 사용이 불가능하여 대형 일반 가공기를 사용함으로써 가공면 품질이 떨어지고 가공시간이 증가하는 문제를 해결하는 사례이다. 또한 Fig. 17(b)는 깊은 측벽 부위에 대해 3 축 고속가공기로 작업할 경우 공구길이가 지나치게 길어지고 방전가공이 추가되어야 하는 문제가 발생하는 경우인데, 3+2 축 및 동시 5 축 가공으로 처리하는 사례를 보인다.

4. 결론 및 전망

본 논문에서는 5 축 레이저 가공기를 활용한 미세 형상가공 연구 사례와, 대형 5 축 가공기를 이용한 사출금형 가공 사례를 살펴보았다.



(a) Avoidance of machine head collision



(b) Tool-length reduction, replacement of EDM

Fig. 17 Improvement of performance

최근 5 축 레이저 가공기를 이용한 3 차원 미세 형상 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 추후 이에 관한 연구가 더욱 활발해 질 것으로 사료된다. 또한 일반 금형 가공에 5 축 가공기를 활용하는 사례가 본격적으로 확산될 것으로 보인다.

후 기

본 연구(레이저 가공)는 서울시 산학연 협력사업(과제번호: TR080578) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Dubey, A. K. and Yadava, V., "Laser beam machining--A review," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 609-628, 2008.
- Kuar, A. S., Doloi, B. and Bhattacharyya, B., "Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1301-1310, 2006.
- Kooky hon Ltd., <http://www.kooky.co.kr>
- Li, L., Guo, W., Wang, Z. B., Liu, Z., Whitehead, D. and Luk'yanchuk, B., "Large-area laser nano-texturing with user-defined patterns," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 1-6, 2009.
- Kathuria, Y. P., "Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 3, pp. 545-550, 2005.
- Chen, M.-F., Hsiao, W.-T., Huang, W.-L., Hu, C.-W. and Chen, Y.-P., "Laser coding on the eggshell using pulsed-laser marking system," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 737-744, 2009.
- Wang, C. and Zeng, X., "Study of laser carving three-dimensional structures on ceramics: Quality controlling and mechanisms," *Optics & Laser Technology*, Vol. 39, No. 7, pp. 1400-1405, 2007.
- Liu, J. S., Li, L. J. and Jin, X. Z., "Accuracy control of three-dimensional Nd:YAG laser shaping by ablation," *Optics & Laser Technology*, Vol. 31, No. 6, pp. 419-423, 1999.
- FOBA, <http://www.foba.de>
- DMG, <http://www.dmgamerica.com>
- Kim, H. J., Wie, K. H., Ahn, S. H., Jun, C. S. and Kim, H. I., "Tool-path generation algorithm for vertical wall machining using laser milling," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 1041-1042, 2009.
- Pham, D. T., Dimov, S. S., Petkov, P. V. and Dobrev, T., "Laser Milling for Micro-tooling," *CU IMRC Working Paper Series*, Cardiff University, 2005.
- FPT Industry, <http://www.fptindustrie.com>
- Lee, J. G., Yang, S. J. and Park, J. W., "Setup Data Generation for Positional 5-axis Machining of Die and Mold," *J. of Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 382-390, 2008.
- Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Sculptured surface machining," *Kluwer*, 1998.