

공구 형상 및 자세에 따른 금형 자유곡면 가공품질 향상에 관한 연구

윤일우*, 황종대**, 고대철***,#

*한국폴리텍대학 광주캠퍼스 기계시스템과, **한국폴리텍대학 부산캠퍼스 기계시스템과

***부산대학교 융합학부

Improvement of Mold-Sculptured Surface Quality Based on Tool Shape and Posture

Il-Woo Yun*, Jong-Dae Hwang**, Dae-Cheol Ko***,#

*Department of Mechanical System, Gwangju Campus of Korea Polytechnics

**Department of Mechanical System, Busan Campus of Korea Polytechnics

***Graduate School of Convergence Science, Pusan National University

(Received 10 August 2021; received in revised form 02 October 2021; accepted 03 October 2021)

ABSTRACT

This paper presents a study on the improvement of the machining quality of sculptured-surfaces of molds according to the shape and posture of the tool. In the existing 3-axis machining, the methods using the ball end-mill and radius end-mill were analyzed for various cutting patterns and compared with those of the 5-axis machining. It was observed that the 5-axis machining using a ball end-mill obtained the finest surface roughness, and for the 3-axis machining, the optimal results were obtained for the one-way machining using a radius end-mill.

Keywords: Surface Roughness(표면조도), Sculptured Surface(자유곡면), Cutting Pattern(가공경로), 5-axis Machining(5축가공), Tool Posture(공구자세)

1. 서 론

최근 자동차 및 전자 분야에서 제품의 디자인이 중요한 구매요소로 자리 매김함에 따라 제품 형상을 심미적으로 다양하게 표현할 수 있는 자유곡면(Sculptured surface)을 이용한 제품 설계가 증가하고

있다. 따라서 자동차 및 전자 제품 외관 형상을 결정하는 금형가공 분야에서도 더 높은 수준의 가공품질이 요구되며 자유곡면에 대한 고능력, 고품질 가공에 대한 중요도가 증대되고 있다.

철판재질의 자동차 및 전자 제품의 외관 자유곡면 형상의 성형은 프레스 금형을 통해 결정되며 펀치(punch) 및 다이(die) 구조로 이루어진 금형의 성형 공정에 의해서 소성 변형하게 된다. 이러한 펀치, 다이의 자유곡면 가공은 주로 볼 엔드밀(ball

Corresponding Author : dcko@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-3697, Fax: +82-51-514-3690

end-mill)을 이용한 3축 가공이 주를 이룬다. 그러나 냉장고 도어 금형과 같이 평활한 대형 자유곡면을 볼 엔드밀을 사용하여 반복적으로 가공하다 보면 이론 절삭속도가 0인 볼 엔드밀 공구 선단점 부근에서 절삭이 주로 이뤄짐에 따라 공구의 마모 속도가 빨라지고 금형 전 영역에 대한 고른 표면 조도를 얻지 못하여 다듬질 가공 공수가 상승하는 문제가 발생된다. 이를 개선하기 위한 방법으로 5축가공(5-axis Machining)의 리드각(lead angle) 변화를 통한 공구 접촉 면적을 최적화하여 이를 개선할 수 있는 방법이 있지만 아직 많은 금형 임가공 업체는 3축 가공이 일반적이다¹⁾.

따라서 본 연구에서는 금형의 자유곡면 가공에서 공구의 형상 및 자세에 따른 가공품질을 개선시켜 보고자 볼 엔드밀과 공구의 끝단은 평면형상이고 평면의 양 끝 에지(edge)부에 R이 형성되어 있는 코너 레디우스엔드밀(corner radius endmill, 이하 레디우스 엔드밀)을 각각 사용하여 공구의 형상 및 가공 패턴(cutting pattern) 변화에 따른 가공 품질을 비교하고, 3축 및 5축의 공구 자세 변화에 따른 가공 결과를 추가로 비교하여 효과적인 자유 곡면의 고품질, 고능률 가공법을 제안하고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 자유곡면 가공

자동차, 전자, 임펠러, 프로펠러 등 다양한 분야에서 외관 형상을 표현하는데 사용되어지는 자유곡면의 가공은 정형화된 모델 기준이 없기 때문에 어떠한 공구 경로를 일반화 시키는 데에는 많은 어려움이 따른다. 다양한 형상에 맞는 적절한 공구의 형상 및 자세의 선택이 가공 품질을 결정하는 가장 중요한 요소가 될 것이다^{2,3)}.

2.2 소재 및 시편형상

자유곡면 가공 품질을 분석하기 위한 시편은 금형 펀치, 다이에 주로 사용하는 SM45C를 선택하였고 시편의 사이즈는 100×100×40에 시편 상부에 냉장고 도어 등에 많이 사용되어지는 자유곡면을 0.5mm 가공여유를 남기고 제작하였다. Table 1은

SM45C 소재에 대한 물리적 특성을, Fig. 1은 시편의 주요 형상 및 규격을 보여준다.

2.3 자유곡면의 절삭

본 연구에서는 공구의 형상 및 자세가 금형의 자유곡면 가공에 미치는 영향을 분석하기 위하여 금형 가공 시 주로 사용하는 4가지 가공 패턴을 선택하여 패턴의 변화에 따른 표면 조도 및 가공 특성의 변화를 확인하고자 하였다. 실험에 사용된 절삭 조건은 Table 2에 나타내었다. 절삭 실험에 사용한 공구는 소재 특성을 고려하여 AlTiN 코팅처리한 2날 초경 $\phi 8$ 볼 엔드밀 및 DR11 레디우스 엔드밀을 사용하였다.

공구 형상에 따른 절삭 특성을 비교하기 위하여 가공 패턴을 제외한 나머지 인자는 동일 조건에서 가공 테스트를 하였으며, 금형가공의 특성상 형상 깊이를 고려하고 일반적으로 적용되는 세장비 한계인 5를 적용하여 식 (1)과 같이 홀더 끝단에서 공구의 돌출길이를 30mm로 하였다.

$$\text{세장비, } \lambda = \frac{l}{D} = \frac{30}{6} = 5, \quad (1)$$

l = extrusion length of tool, D = diameter of tool

Table 1 Chemical composition of SM45C steel substrate(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu
SM45C	0.42 ~0.48	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.03	≤0.035	≤0.30

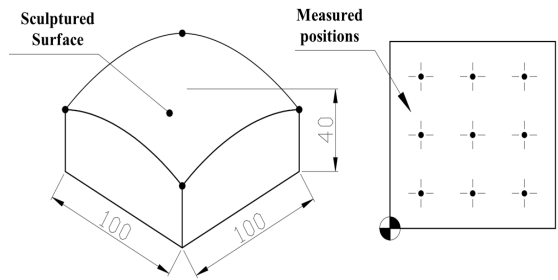


Fig. 1 Geometry and measuring points of test specimen (mm)

Table 2 Cutting condition

Condition	1	2	3	4
Factor	8Ball/2Flute		D8R1.0/2Flute	
Milling Mode	Down cutting			
Cutting Pattern	One-way	Zigzag	Spiral	
Cutting speed	40 m/min			
Feed	0.08 (feed/tooth)			
Scallop height	0.01 (mm)			
Step over	0.509 (mm)			
Depth of cut	0.5 (mm)			
Tool Angle	0° / 30°			

2.4 실험장치

Fig. 2는 공구 형상 및 자세에 따른 자유곡면에 대한 가공 특성을 확인하기 위하여 본 연구에서 사용한 5축 가공기(Kitamura Mytrunnion-5)에서의 3축 및 5축 가공 및 회전축을 정의한 개략도이다. 본 장비는 X축을 중심으로 회전하는 축을 틸팅(A)축, Z축을 중심으로 무한각도(로테이트각, θ_r) 회전하는 축을 로테이션(C)축이라 정의하며 틸트각의 범위는 $-120^\circ \leq \theta_t \leq 30^\circ$ 이다.

Fig. 3은 가공 이후 시편의 조도측정에 사용한 표면 조도기, 가공표면 및 공구마모 검사에 사용한 현미경을 나타내었다. 실험에 사용한 조도 측정기인 Mitutoyo사의 CS-3200은 평면뿐 아니라 곡면에 대한 측정이 가능하여 자유곡면에 대한 효과적인 분석이 가능하였다^[4].

2.5 측정방법

가공 완료된 시편의 표면 조도는 스타일러스 타입의 조도 측정기를 통해 측정하였고 스타일러스의 축척 반경이 스텝오버 값보다 작기 때문에 측정의 방향은 볼 엔드밀 가공방향에 수직한 방향으로 측정하였다. 측정의 위치는 Fig. 1과 같이 100×100mm의 가공 영역 시편의 좌측 하단을 기준으로 상, 중, 하 각 3구간씩 총 9구간을 측정하였으며 거칠기 범위를 고려하여 중심선 평균 거칠기 값을 기록하였다. 측정이후 가공 표면은 현미경을 사용하여 60배 배율로 관찰하였다.

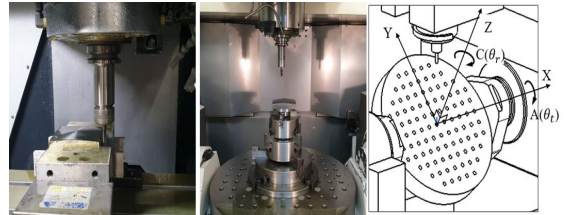


Fig. 2 Machining center and Definition of the rotary axes



(a) Surface roughness tester (b) Microscope
Fig. 3 Measuring equipment

2.6 가공 경로

공구 경로는 Unigraphics(NX)를 통해 생성하였으며, 경로 생성 후 Vericut 시뮬레이션을 통해 공구 경로의 검증을 수행하여 동작기계와의 간섭 및 공구 진입/진출의 안전성을 검증하였다. Fig. 4는 본 실험에 사용한 가공 경로(Cut pattern)를 보여준다.

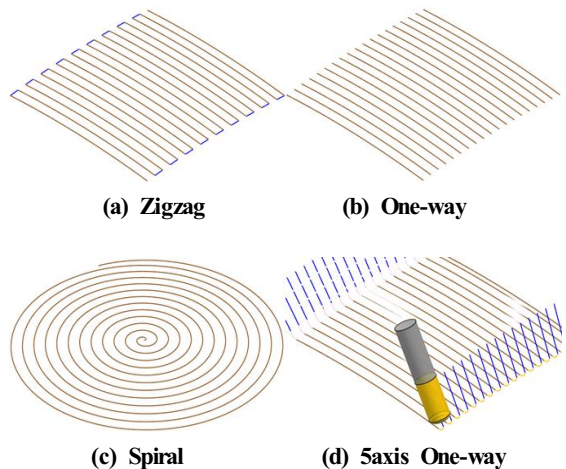


Fig. 4 Applied tool path

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면조도

표면조도란 부품 가공 시 절삭공구의 인선이나 슷돌입자에 의해 절삭된 표면, 주물 등의 매끄러운 정도를 나타내며 본 연구에서는 중심선 평균 거칠기 (Ra)를 사용하였다. 8가지 절삭 조건에 대한 가공 결과는 Table 3과 같으며 가장 좋은 조도는 7번째 조건인 볼 엔드밀을 이용한 one-way 5축 가공으로 평균 Ra 1.396 μm 이 측정 되었으며, 3축 가공 중 가장 좋은 결과는 4번째 조건인 레디우스 엔드밀의 one-way 가공으로 Ra 1.678 μm 이 측정되었다. 가장 높은 조도 값은 5번째 레디우스 엔드밀을 이용한 Spiral 가공으로 평균 Ra 4.316 μm 이 측정되었다. 이는 경사가 완만한 시편의 형상 및 중삭 조건 등의 영향으로 판단되며, 이 조건을 제외하면 2번째 조건인 볼 엔드밀의 Zigzag 가공이 가장 높은 Ra 3.063 μm 로 측정되었다.

Table 3은 전체 가공에 대한 조도 결과 값을 Fig. 5의 (a), (b)는 가장 좋은 결과를 보여준 7번째 조건인 볼 엔드밀 5축 가공의 중삭 및 정삭가공 결과를 보여준다.

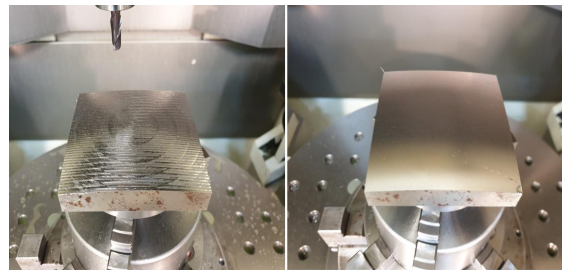
3.2 볼 엔드밀에 의한 3-Axis 정삭가공

볼 엔드밀에 의한 정삭가공은 One-way 방식이 평균 Ra 2.601 μm , Zigzag 방식이 Ra 3.063 μm 로 8가지 가공 방식 중 Spiral방식을 제외하고 가장 높은 표면 조도를 나타내었다. Fig. 6은 5축 볼 엔드밀 가공과 3축 볼 엔드밀 가공과의 비교 그래프이다. 가공 패턴은 Zigzag 방식보다 One-way 방식이 표면 조도면에서는 효과 적이었으며, 경사가 완만한 중앙부위에서의 조도는 두 방식 모두 평균값을 크게 상회하였다. 이는 이론적 절삭속도가 0이 되는 볼 엔드밀 공구 선단점 부근에서의 가공 결과로 판단된다. Zigzag 가공은 상향, 하향절삭이 교차가공되므로 중앙부를 제외한 좌, 우 형상의 조도 차이가 크지 않았지만 One-way방식에서는 상방향 가공(up ward cutting)이 이루어지는 좌측 형상부의 조도가 하방향 가공(down ward cutting)이 이뤄지는 우측 형상부보다 낮은 조도 특성을 나타내어

볼 엔드밀에서 형상 가공 시 상방향 절삭이 유리함을 확인하였다^[5]. Fig. 7, 8은 조건 1, 2의 볼 엔드밀 One-way 및 Zigzag 방식에 대한 표면 조도 그래프를 Fig. 9은 볼 엔드밀 가공에 대한 현미경 확대 형상을 보여준다.

Table 3 Measured surface roughness

Order	Surface roughness Ra(μm)			
	Top avg.	Mid avg.	Bot avg.	Avg.
1	1.772	3.451	2.582	2.601
2	2.617	3.948	2.406	3.063
3	2.093	0.947	4.646	2.562
4	1.763	1.190	2.082	1.678
5	5.431	1.826	5.691	4.316
6	1.823	0.765	2.466	1.684
7	1.506	1.299	1.382	1.396
8	2.144	2.051	2.083	2.093



(a) 5-axis semi finishing (b) 5-axis finishing

Fig. 5 machining and processing result

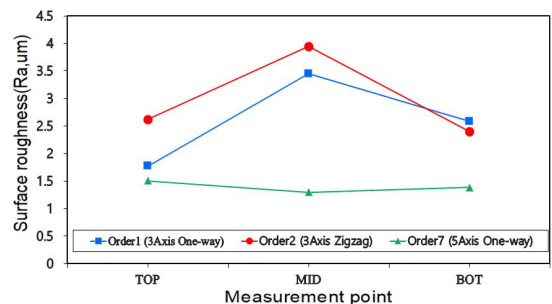


Fig. 6 Comparison of 3-axis & 5-axis ball end-mill machining

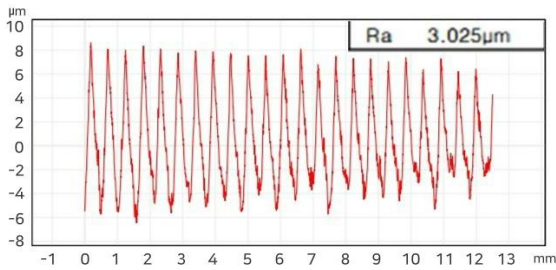


Fig. 7 Surface roughness graph of ball mill one-way

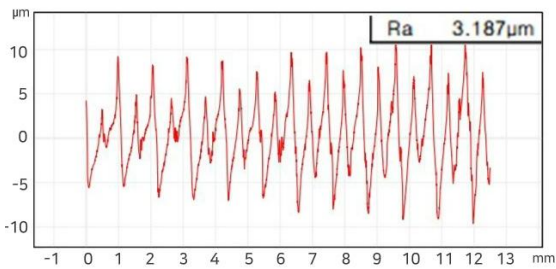


Fig. 8 Surface roughness graph of ball mill zigzag

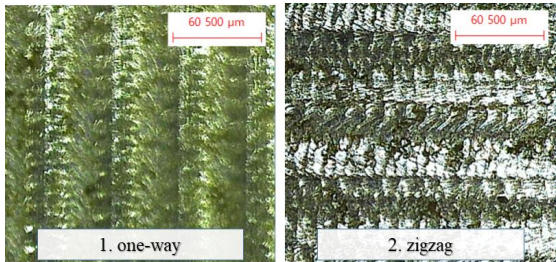


Fig. 9 Microscopic views of the surfaces in ball mill

3.3 코너 레디우스 엔드밀에 의한 정삭가공

Table 3의 조건 3~6은 레디우스 엔드밀에 의한 가공 결과를 보여준다. 여기에서 가장 주목할 점은 3, 4번 조건의 결과로 3번 조건은 볼 엔드밀과 동일한 Scallop height 0.01(mm)의 이송 조건으로 One-way 가공하였을 때의 결과라 할 수 있다. 실험결과 3번 조건은 볼엔드밀의 One-way 가공 전체 평균과 비슷한 결과를 얻었으나 볼 엔드밀에 비해 일정한 표면 조도를 확인할 수 있었다. 같은 Scallop height를 지정하면서 공구의 형상 차이로 step over 값이 약 1.9배 넓어졌음에도 불구하고 비슷한 조도 결과를 얻음으로 조도 및 가공 시간

적 측면에서 경제적 가공이 가능함을 확인하였다. 4번째 가공조건은 볼 엔드밀의 Scallop height에 대한 동일 Step over를 지정하여 같은 조건에서 조도를 비교한 결과 전 가공 영역이 비교적 일정하게 평균 Ra 1.678 μm 의 결과를 얻었다. 이는 5축 볼 엔드밀 가공을 제외한 가장 낮은 조도 결과이다. Fig. 10은 3축 및 5축 가공에서 레디우스 엔드밀 사용한 실험에 대한 표면 조도 비교 결과를 보여준다. 레디우스 엔드밀에 대한 절삭 실험은 같은 절삭 조건 내에서 가공 경로의 변화된 영향으로 Ra 1.678 μm 에서 Ra 4.316 μm 까지 측정됨을 확인하였다. 모든 가공 패턴에서 중앙부에 조도가 낮게 측정되는 이유는 가장 경사가 없는 중앙부위에서 레디우스 공구의 밑날을 이용한 가공이 이뤄졌음을 판단할 수 있다. Fig. 11, 12는 레디우스 엔드밀을 이용한 조건 3, 4에 대한 표면 조도 그래프를 Fig. 13은 레디우스엔드밀 조건인 3, 4, 5, 6 가공에 대한 현미경 확대 형상을 보여준다.

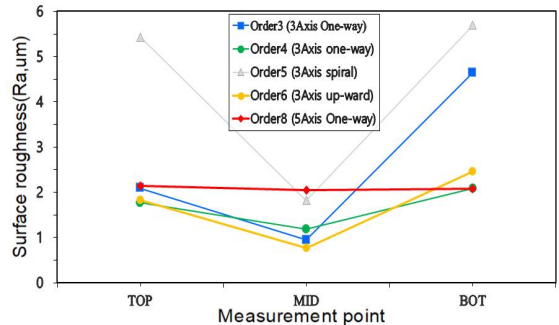


Fig. 10 Comparison of 3-axis & 5-axis radius endmill machining

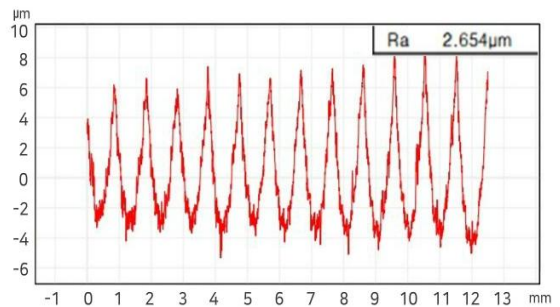


Fig. 11 Surface roughness graph for the third condition

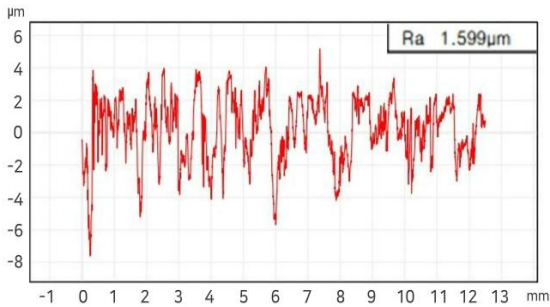


Fig. 12 Surface roughness graph for the fourth condition

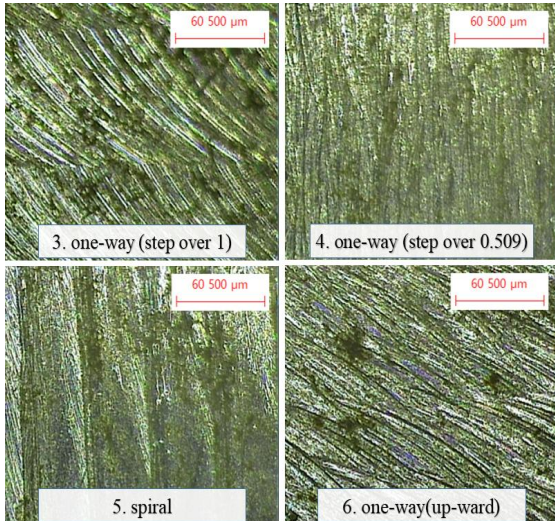


Fig. 13 Microscopic views of the surfaces in corner radius endmill

3.4 볼 & 레디우스 엔드밀에 의한 5-Axis정삭

금형가공의 정삭 가공에 해당하는 Scallop height 0.01(mm)의 이송 및 30°의 리드각, One-way 가공 결과 가공 품질은 볼엔드밀이 평균 Ra 1.396 μ m으로 가장 좋은 결과를 나타내었으며 볼 및 레디우스 엔드밀 모두 가공 전 영역에 걸쳐 매우 일정한 표면 조도를 나타내었다. 이는 5축 가공의 리드각 변화에 따른 접촉면적을 유지해준 결과라 판단된다. 본 실험에서 볼 엔드밀이 레디우스 엔드밀 보다 낮은 조도를 보임은 절삭 시 가공 접촉점이 볼엔드밀의 중심점에서 멀어짐으로 인해 절삭 속도가 높아지므로 절삭성이 좋은 경향을 나타내는 것

으로 판단되며 레디우스 엔드밀 또한 코너R의 크기 및 공구 형상을 고려한 중삭 여유량 및 리드각을 변화시킬 경우 더 나은 조도를 얻으리라 판단된다. Fig. 14, 15는 볼 및 레디우스 엔드밀을 이용한 조건 7, 8에 대한 표면조도 그래프를 Fig. 16은 5축 가공인 조건 7, 8에 대한 현미경 확대 형상을 보여준다.

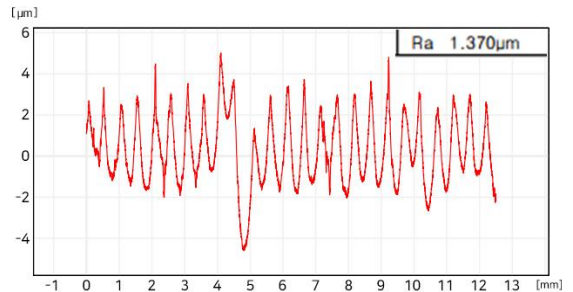


Fig. 14 Surface roughness graph for the six condition

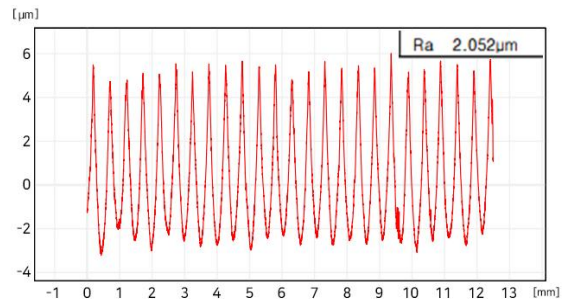


Fig. 15 Surface roughness graph for the 7th condition

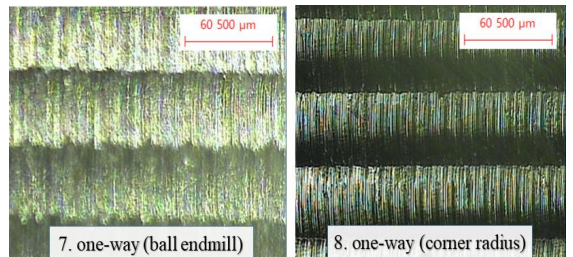


Fig. 16 Microscopic views of the surfaces in 5-axis machining

4. 결 론

금형의 평활한 대형 자유곡면에 대한 가공에서의 공구의 형상 및 가공 패턴, 공구 자세를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 형상의 변화가 심하지 않은 평활한 자유곡면의 정삭 가공 시 볼 엔드밀의 사용은 가공 접촉점에 따른 절삭속도 저하로 표면 조도 측면에서 봤을 때 비효과적이다.
2. 5축 가공을 통하여 공구의 접촉면적을 일정하게 제어하는 것이 가공 표면 품질을 향상 유지하는데 가장 유리함을 확인할 수 있었다.
3. 3축 가공에서 형상의 변화가 심하지 않은 평활한 자유곡면의 정삭 가공의 경우 레디우스 공구를 통한 One-way 방식의 가공이 표면 조도 및 가공 시간 측면에서 효과적임을 확인하였다.
4. 3의 결과를 토대로 레디우스 공구를 3축 중삭 가공에 확대 적용하고 볼 엔드밀을 사용하여 5축 정삭 가공하는 방식이 금형의 자유곡면 가공 품질 향상에 유리할 것으로 판단된다.
5. 레디우스 공구의 5축 가공은 볼 엔드밀을 사용한 5축 가공보다 조건 선정에 있어서 공구의 형상을 고려한 리드각 및 틸드각의 변화 등 더욱 세밀한 설정이 필요함을 확인하였다.

따라서 본 연구 결과 적절한 가공패턴과 절삭조건 및 공구자세를 고려한 레디우스 공구 및 볼엔드밀의 사용이 금형의 자유곡면 가공 시 표면품질 향상에 효과적임을 확인하였으며 공구자세를 선정함에 있어 레디우스 공구를 사용한 5축 중삭과 볼엔드밀을 사용한 5축 정삭 가공은 경제절삭과 표면조도 향상의 측면에서 함께 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되어 향후 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Yun, I. W., "Investigation of Cutting Conditions in Milling of AMPCO Metal for Minimizing Surface Roughness," A Thesis for a Master, Chonnam National University, Republic of Korea, 2016.
2. Hwang, J. D., and Yun, I. W., "Efficient 5-axis Machining of a Propeller using Geometric

- Properties," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 71-78, 2020.
3. Hwang, J. D., and Lim, E. S., and Jung, Y. G., "The Control Technology of Cutter Path and Cutter Posture for 5-axis Control Machining," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 1-8, 2011.
4. Hwang, J. D., and Yun, I. W., "5-axis Machining of Impellers using Geometric Shape Information and a Vector Net," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 63-70, 2020.
5. Yun, I. W., and Hwang, J. D., "Surface Quality Improvements on the Spherical Shaped Mold using Ball End Milling," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 71-16, 2020.