

가공경로가 밀링가공면의 기하학적 특성에 미치는 영향

박문진*, 김강**

Effects of the Tool Path on the Geometric Characteristics of Milled Surface

M. J. Park*, K. Kim**

ABSTRACT

There are lots of factors that are related to the geometric characteristics of machined surface. Among them, the tool path and milling mode (up cut milling or down cut milling) are the easiest controllable machining conditions. Thus, the first objective of this research is to study the effects of them on the milled surface that is generated by an end milling tool. To get precision parts, not only the machining process but also the measurement of geometric tolerance is important. But, this measurement requires a lot of time, because the infinite surface points must be measured in the ideal case. So, the second objective is to propose a simple flatness measurement method that can be available instead of the 3-D geometric tolerance measurement method, using a scale factor and characterized points. Finally, it is also shown that the possibility of flatness improvement by shifting the consecutive fine cutting tool path as compared with the last rough cutting tool path.

Key Words : End-mill(엔드밀), Tool path(가공경로), Geometric characteristics(기하학적 특성), Up-cut milling(상향절삭밀링), Down-cut milling(하향절삭밀링), Flatness(평면도)

1. 서론

기계가공으로 초정밀부품을 제작하기 위해서는 가공조건의 확립이 중요하다. 대개의 경우에는 1차가공, 2차가공, 3차가공 등으로 이어지는 일련의 공정을 통하여 정밀한 부품으로 제작된다. 가공의 차순이 증가할수록 시간과 비용이 많이 소모되므로 이상적인 경우 최적의 가공조건을 찾아 1차가공만으로도 원하는 정도의 부품을 제작할 수 있도록 하여야 한다. 일반적으로, 가공조건 중 공구의

형상이 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이와 관련하여 가공면의 조도에 미치는 영향은 이론이나 실험을 통하여 이미 잘 알려진 내용이다. 가공경로 및 형상공차와 관련하여서는, 엔드밀로 평면가공시 가공경로가 공작물의 기하학적인 형상에 미치는 영향에 관한 연구^{(1)~(3)} 내용이 발표되고는 있으나, 가공경로가 가장 수정이 용이한 가공조건 중의 하나라는 측면에서 볼 때, 이 분야에 대하여서는 아직도 많은 연구가 필요하다고 사료된다. 그러므로, 본 논문에서는 가장 단순한 형상인 평면을 대상으로하여 이 형상

* 아주시스템(주) 기술연구소
** 국민대학교 기계자동차공학부

과 관련된 대표적인 가공법인 밀링가공시, 가공경로의 변화에 따라 서로 다르게 생성되는 가공면의 기하학적인 특징을 실험을 통하여 알아보려 한다.

아울러, 정밀한 부품의 경우, 설계단계에서의 형상공차의 활용 및 생산단계에서의 측정 및 검사에 대한 중요성이 점점 증대되고 있다. 그러나, 형상공차의 측정은 이상적인 경우, 가공면의 모든 좌표값을 읽어들이야 하므로 많은 시간이 소요된다. 그러나, 만일 가공면에 존재하는 골과 산의 위치를 예측할 수 있다면, 단순히 이 위치에서의 깊이 또는 높이를 측정하여 그 값의 차이를 보정함으로써 단시간내에 평면도를 추정할 수 있게된다. 그러므로, 앞에서 제시한 실험을 통하여 확인되는 가공면의 특징적인 점의 측정과 보정계수의 산출에 의하여 추정되는 평면도값을 구하여 이러한 방법의 가능성을 알아보려 한다.

정밀가공을 요하는 경우에는 황삭후 정삭을 하며, 이때 절삭속도와 이송속도는 황삭시 준 값과는 다른 값을 갖으나, 가공경로에는 변화가 없는 것이 일반적이다. 그러나, 가공경로에 수직인 가공면의 형상이 일정한 형태를 나타낸다면, 정삭 가공경로를 황삭 가공경로에 대하여 평행 이동시켜줌으로써 평면도를 개선시킬 수 있다고 가정할 수 있다. 만일, 이 가정이 맞다면, 생산성이나 생산비용에 영향을 주지 않고, 가공면의 형상정도를 향상시킬 수 있다. 그러므로, 앞에서 수행한 실험 결과를 기초로 하여 2차 정삭 실험을 수행하여 가정의 타당성을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 측정장치

본 실험에 사용된 수치제어 밀링머신은 세일중공업에서 제작한 TMV-40M기종이며, 사용된 공구는 양지원공구의 HSS 표준 2날 앤드밀로 직경은 16mm이다. 측정장치는 영국 Rank-Taylor Habson사의 Form Talysurf Series 2이며, Traverse unit, Column, Traverse table, 데이터 처리장치인 IBM PC, 분석장치인 Macintosh PC와 프린터들로 전체 시스템이 구성되어 있다. Traverse unit에 부착된 축침(stylus)에서 피측정물의 좌표값을 읽어 들여 IBM PC에서 데이터를 처리하고 Macintosh PC로 데이터를 분석해서 3차원의 그래픽으로 피측정물의 형상을 보여준다. 추정 평면도 값을 구하기 위하여, 시편의 특징지점 좌표값을 다이얼 게이지로

측정하였다. 사용된 다이얼 게이지의 측정 정밀도는 0.001mm이다. 시편은 기계부품으로 많이 사용되는 기계 구조용 탄소강 SM45C를 평면밀링가공과 평면연삭가공에 의하여 가로 120mm, 세로 90mm, 높이 25mm의 직육면체로 제작하여 사용하였다.

2.2 가공

밀링작업시 가공면의 기하학적 형상특성을 알아보기 위해 가공경로, 공구와 공작물사이의 상대운동 방향에 따라 가공조건을 5가지로 구분하고 이를 변화시켜가며 실험을 하였다. 한 조건당 3개의 시편을 가공하였으며 공구의 마모를 고려하여 조건이 바뀔 때마다 공구를 교체하였다.

Fig. 1은 각각의 가공경로를 그림으로 나타내고 있다. 가공경로 1은 바깥쪽에서 안쪽으로 돌아 들어가는 나선형의 경로를 가지며 상향절삭이 이루어진다. 가공경로 2는 안쪽에서 바깥쪽으로 돌아 나오는 나선형의 가공경로를 가지며 가공경로 1과 동일하게 상향절삭이 이루어진다. Fig. 1 b)의 A와 B부분에서는 다른 부분보다 공구와 공작물의 접촉면적이 크기 때문에 절삭저항도 크다. 따라

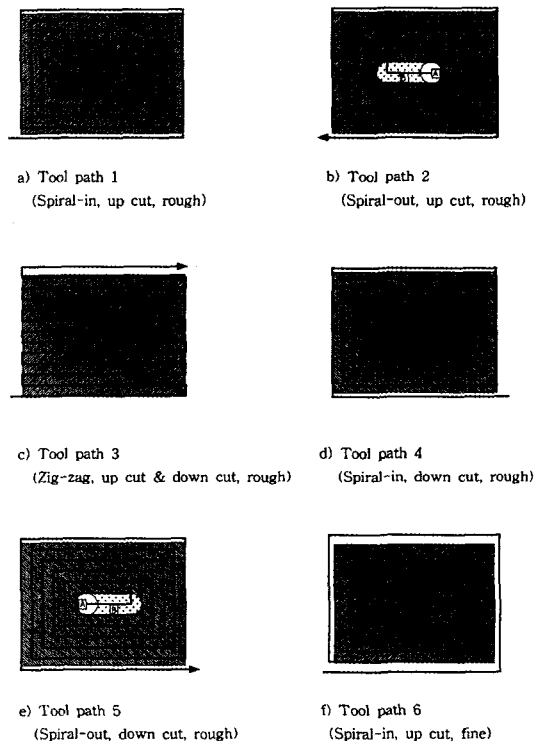


Fig. 1 Tool Path

서, 이런 문제점을 고려하여 이송속도가 A부분에서는 지정속도의 1/4, B부분에서는 1/2이 되도록 조정하였다. 가공경로 3은 상향절삭과 하향절삭이 교차되는 지그재그형의 가공경로이다. 가공경로 4는 바깥에서 안으로 돌아 들어가는 나선형의 경로를 가지며 하향절삭이 이루어진다. 가공경로 5는 안에서 바깥으로 돌아 나오는 나선형의 가공경로를 가지며 하향절삭이 이루어진다. 가공경로 5로 가공할 때는 가공경로 2에서와 동일한 이유로 Fig. 1 e)의 A부분에서는 이송속도를 지정속도의 1/4로, B부분에서는 1/2로 조정하였다.

정삭시 공구의 가공경로가 공작물의 기하학적인 형상변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 추가적으로 정삭 가공경로 실험을 수행하였다. 먼저, 가공경로 1과 같은 가공조건으로 1차가공을 하여 정삭가공 실험을 위한 시편을 준비하였다. 정삭시 이송속도와 주축회전속도는 1차가공의 2배가 되도록 설정하였다. 정삭 가공경로는 1차와 동일한 가공경로 1인 경우와, 1차가공시 생성되는 공구날 자국(tool mark)이 공구 지름의 1/4지점을 지나가도록 평행 이동된 가공경로 6인 경우의 두 가지로 나누어 실험을 진행하였다.

주 가공변수인 이송속도, 절삭속도, 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이는 참고문헌⁽⁴⁾에 있는 값을 근거로 산출하여 고정하였다. 상세한 가공조건은 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1 Experimental conditions

1st experiment		2nd experiment	
고정조건	설정값	고정조건	설정값
주축회전속도	396 R.P.M.	주축회전속도	796 R.P.M.
이송속도	33.16 mm/min	이송속도	66.32 mm/min
반경방향 절삭깊이	D/2	반경방향 절삭깊이	D/2
축방향 절삭깊이	1 mm	축방향 절삭깊이	0 mm
공구 회전 방향	시계방향	공구 회전 방향	시계방향
		1차 가공경로	가공경로 1
변화조건	설정값	변화조건	설정값
가공경로	가공경로 1, 2, 3, 4, 5	정삭 가공경로	가공경로 6

2.3 측정

시편의 크기가 측정기의 측정범위를 초과하므로 Fig. 2에 나타난 것과 같이 측정부분 1과 측정부분 2로 나누어 측정하였다. 시편의 가장자리는 측정이 곤란하므로 가장자리에서 2mm씩 안쪽으로 들어간 부분을 측정하였다. 빛금친 부분은 측정부분 1과 측정부분 2에서 공통적으로 측정되는 범위를 나타낸 것이다. 측정부분 1과 측정부분

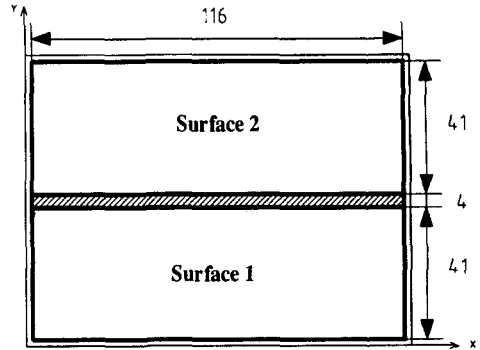


Fig. 2 Partitioning of surface for measurement (unit: mm)

2는 비슷한 평면도를 가지므로 두 측정부위중 큰 값을 시편의 평면도값으로 정의하였다. 측정기는 X축 방향으로 축침이 이동하면서 가공면의 좌표값을 읽어들이고 Y축 방향으로 Traverse table이 음(-)의 방향으로 0.5mm 씩 이동하여 전체 가공면의 기하학적인 형상을 나타내도록 설정하였다. 분석을 위한 기본설정값으로 'Subtract least squares plane'을 이용하였으며 가우시안(Gaussian) 타입의 1mm 필터를 사용하였다.

가공면 특정 위치의 좌표값은 정반 위에서 다이얼 게이지로 측정하였다. 이 때, 시편의 좌우 가장자리와 상하 가장리의 좌표값을 읽어 시편의 평행을 맞춘 다음 각 좌표값들을 보정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 가공면의 형상 및 특징

가공면의 기하학적인 형상은 상향절삭인지 하향절삭인지에 따라 달라지는 것으로 나타났다. Fig. 3은 상향절삭, 하향절삭, 지그재그형 경로의 가공면을 나타낸다. 하향절삭과 상향절삭은 반대의 형상으로 가공면이 나타나며 상향과 하향이 교차되는 지그재그형은 두 특징이 동시에 나타난다. 그러므로, 국부적인 가공면의 형상은 공작물과 공구의 상대운동 방향에 따라서 영향을 받을 수 있다.

각 가공경로별로 평균 평면도값을 비교해보면 근소한 차이지만 가공경로 1이 30.24μm의 평면도 값을 가지므로서 가장 좋은 가공면을 얻을 수 있음을 알았다. Table 2에는 각 시편의 평면도값을 나타내었으며, Fig. 4에는 가공경로별로 평균 평면도값을 비교하여 그래프로 나타내었다. 전체적으로 볼 때, 같은 형태의 가공경로일 경우

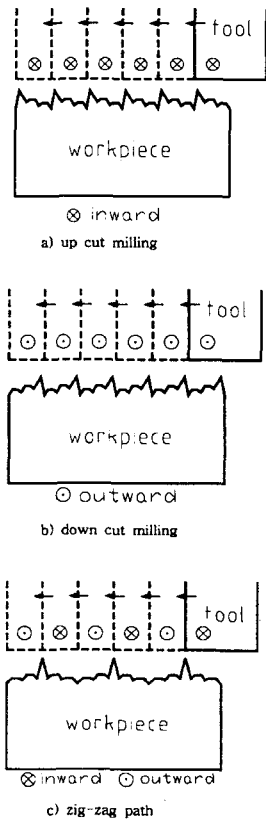


Fig. 3 Exaggerated profile of milled surface

Table 2 Flatness of each tool path (unit: μm)

시편번호	가공경로 1	가공경로 2	가공경로 3	가공경로 4	가공경로 5
시편 1	25.264	27.232	30.492	29.592	28.640
시편 2	30.160	32.592	36.608	28.800	36.064
시편 3	35.296	34.384	36.726	35.376	37.968
평균	30.240	31.403	35.611	31.256	34.224

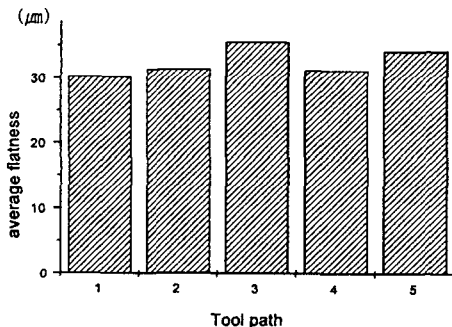


Fig. 4 Comparison of the average flatness

(밖에서 안으로 가공: 가공경로 1과 가공경로4, 또는 안에서 밖으로 가공: 가공경로 2와 가공경로 5) 하향절삭 보다는 상향절삭이 좋은 평면도값을 가지는 것을 확인할 수 있었고, 상향절삭과 하향절삭이 교차되는 가공경로 3이 가장 큰 평면도값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 아울러, 상향절삭과 하향절삭 두 경우 모두 공통적으로, 안에서 밖으로 가공하는 것 보다 밖에서 안으로 가공하는 것이 우수한 가공면을 생성시키는 것도 알 수 있다.

그러므로, 전반적인 가공면에 있어서는, 밖에서 안으로 상향절삭이 이루어지는 가공경로를 선택하는 것이 형상 공차 측면에서 볼 때 유리하다고 판단된다.

3.2 평면도값 추정

각 가공경로별로 기하학적 형상의 특징을 관찰한 결과에 의하면 특정부분이 전체의 평면도값에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 각 경로에 따라 높은 좌표값을 가지는 부분과 낮은 좌표값을 가지는 부분을 특징적으로 보여 주고 있다.

전체적으로 볼 때 공구날 자국이 생성되는 부분에서 높은 좌표값을 가진다. 가공경로 1의 경우에는 가운데 부분에서 마지막으로 생성되는 공구날 자국이 높은 좌표값을 가진다. 가공경로 2의 경우에는 처음 가공이 시작되는 부분이 높은 좌표값을 가지고 공구의 이송방향이 바뀌는 부분에서 낮은 좌표값을 가진다. 관련연구에서 언급한 것과 같이 가공경로 2에서는 공구의 이송방향이 바뀌어 균일한 가공이 되지 않는다. 이는 공구와 공작물의 단위면적당 접촉시간이 길기 때문에 공작물의 다른 부분보다 낮은 좌표값을 갖는 것이다. 가공경로 3의 경우에는 상향절삭이 진행될 때의 공구날 자국이 높은 좌표값을 가진다. 가공경로 4의 경우에는 가공경로 1과 마찬가지로 가운데 부분에서 마지막으로 생성되는 공구날 자국이 높은 좌표값을 가진다. 가공경로 5의 경우에는 처음 가공이 시작되는 부분이 높은 좌표값을 가지며 세로방향으로 가공된 부분(바이스과 닿지 않는 면 방향으로 가공된 부분)이 낮은 좌표값을 가진다. 이와 같이 가공면은 가공경로에 따라서 동일한 특징을 갖는 가공면을 생성한다. 그러므로 가공경로에 따라 특정 두 지점의 좌표값을 측정하여 평면도값을 추정해 볼 수 있었다.

가공경로 1, 4의 경우는 가운데 부분에서 마지막으로 생성되는 공구날 자국과 그 옆부분, 가공경로 2의 경우는 처음 가공이 시작되는 부분과 공구의 이송방향이 바뀌는 부분, 가공경로 3의 경우는 상향절삭이 진행될 때의 공구

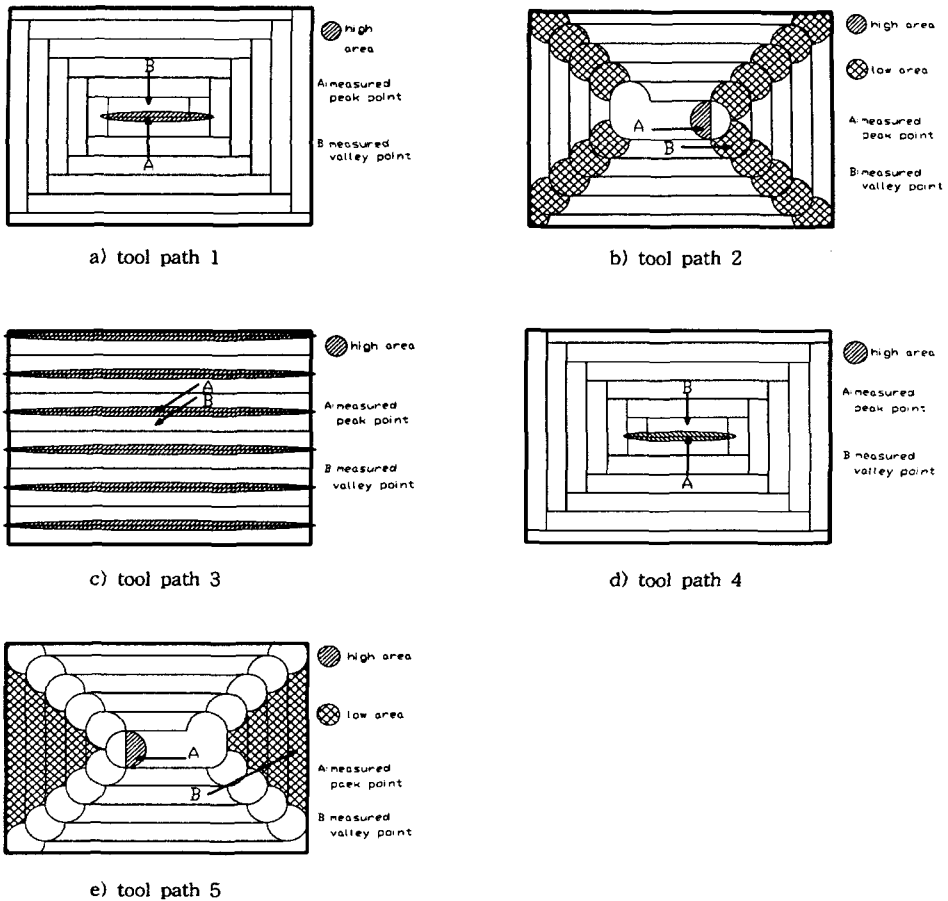


Fig. 5 Geometric characteristics of milled surface

날 자국과 그 옆부분, 가공경로 5의 경우는 처음 가공이 시작되는 부분과 세로방향으로 가공된 부분(바이스와 닿지 않는 면 방향으로 가공된 부분)의 좌표값을 읽어 그 차이를 1차원값(1D value)으로 정의하였고, Table 3에 각 가공경로별로 측정 후 계산된 1차원값을 나타내었다. 시편에서 각 가공경로에 따라 좌표값을 측정할 지점을 A, B로 표시하여 Fig. 5에 나타내었다.

3차원 평면도값과 1차원값에는 차이가 발생되므로, 추정 평면도값은 1차원값에 미지의 변환상수(Scale factor), T 를 곱한 형태로 가정하였다. 이 변환상수는 오차를 최소화하기 위하여 최소 제곱법을 사용하였다. 그러므로, $\frac{1}{\text{시편 개수}} \sqrt{(\text{측정 평면도값} - 1\text{차원값} \times T)^2}$ 가 최소가 되는 T 를 구하면, 1.64라는 값을 얻을 수 있었다. 각 시편의 1차원값에 변환상수를 곱해서 구한 추정값(presumed flatness)을 측정된 평면도값(measured flatness)과 비교

Table 3. 1D values (peak value-valley value, μm)

시편번호	가공경로 1	가공경로 2	가공경로 3	가공경로 4	가공경로 5
시편 1	13.50	18.35	20.96	16.00	20.12
시편 2	16.32	21.18	18.80	18.87	23.24
시편 3	20.21	24.29	21.20	17.82	21.89

하여 Table 4에 나타내었으며, 그 오차의 평균을 가공경로별로 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다.

3.3 정삭 가공경로

황삭가공된 시편을 서로 다른 가공경로로 정삭가공한 후 평면도를 측정된 결과를 살펴보면, 시편 3개의 평균 평면도값이 정삭가공경로 1은 33.72 μm , 정삭가공경로 6은 25.72 μm 로 1차와 같은 가공경로로 정삭한 면보다, 1차가공시 생성된 공구날 자국이 공구지름의 1/4지점을 지나도록 정삭한 면의 평면도값이 평균적으로 8 μm 만큼 작

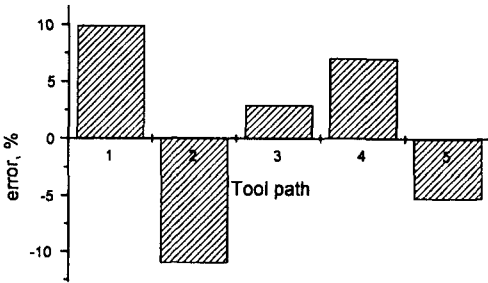


Fig. 6 Errors of presumed flatness
 (error=(presumed flatness/measured flatness-1) × 100)

Table 4 Comparison between measured flatness with presumed flatness

가공경로	시편	측정값 (μm)	추정값 (μm)	오차 (%)
	가공경로 1	1	25.256	22.140
2		30.160	26.765	11.26
3		35.296	33.144	6.10
평균				9.90
가공경로 2	1	27.232	30.094	-10.51
	2	32.592	34.735	-6.58
	3	34.384	39.836	-15.86
	평균			-10.98
가공경로 3	1	30.496	34.374	-12.72
	2	36.608	30.832	15.78
	3	36.736	34.604	5.81
	평균			2.96
가공경로 4	1	29.520	26.240	11.11
	2	28.800	30.947	-7.45
	3	35.376	29.225	17.39
	평균			7.02
가공경로 5	1	28.640	32.997	-15.21
	2	36.064	38.114	-5.68
	3	37.968	35.900	5.45
	평균			-5.25

주) 추정값 = (peak value - valley value) × T
 (T : 변환상수 = 1.64)

게 나타났다. 이러한 평면도의 차이는 황삭가공면의 산이되는 부분이, 정삭가공시 가공경로가 수평이동됨에 따라, 제거되는 것으로 사료된다. 그러므로, 동일 가공면에 대한 정삭가공시에는 가공경로를 이전의 가공경로 사이에 있도록 하는 것이 형상공차 측면에서는 유리하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 엔드밀을 이용한 평면가공시 공구와 공

작물의 상대운동 방향과 가공경로가 공작물의 가공면에 미치는 영향을 규명하고, 가공면의 기하학적인 특징을 파악하여 측정시간을 감소시킬 수 있는 가능성을 제시하고자 하였으며, 연구결과 다음과 같은 내용이 확인되었다.

- 상향절삭(up cut milling) 가공면과 하향절삭(down cut milling) 가공면은 각각 서로 다른 기하학적인 특징을 나타낸다.
- 엔드밀을 사용한 평면가공작업에서는 상향절삭으로 밖에서 안으로 외곽윤곽을 따라 나선형으로 가공하면 가장 평활한 면을 얻을 수 있다.
- 가공면의 특정부분이 전체의 평면도에 영향을 미친다. 그러므로 특정 두 지점의 좌표값을 1차원적으로 측정하여도 3차원의 평면도값을 추정할 수 있다.
- 황삭후 평면도를 개선하기 위하여 정삭하는 경우, 정삭 가공경로가 황삭 가공경로와 일치시키는 것보다 정삭 가공경로를 평행 이동시켜서 황삭 가공경로 사이에 있도록 함으로써 보다 평활한 면을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation planning based on cutting process model," Annals of the CIRP, Vol. 39/1, pp. 517~521, 1990.
2. Tsai, M. D., Takada, S., Inui, M., Kimura, F., and Sata, T., "New NC routines for quality in milling," Annals of the CIRP, Vol. 40/1, pp. 95~98, 1991.
3. Tarnq, Y. S., and Shyur, Y. Y., "Identification of radial depth of cut in numerical control pocketing routines," International Journal of Machines tools and Manufacture, Vol. 33, pp. 1~11, 1993.
4. ASM International Handbook Committee, Metals Handbook 9th ed., Vol. 16 - Machining, ASM International, pp. 319, 322~326, 1989.