

공구 접근 경로가 원통형상의 밀링가공물에 미치는 영향

김 강*

(논문접수일 2003. 2. 18, 심사완료일 2003. 5. 6)

Effect of Tool Approaching Path on the Shape of Cylindrically Milled Parts

Kang Kim*

Abstract

Milling process has been used in aircraft, auto-component and mold industries widely. They need more accurate and precise parts to improve the performance and quality of their products. So, the geometrical form accuracy of the workpiece surface generated by this process is getting more and more important. Generally, the form accuracy is affected by machine conditions, cutting conditions, tool geometry, tool deflection by cutting force and tool path and so on. Even though they are controlled as perfect conditions, it is easily found that there is a line along the axis of a cylindrically milled part. It is presumed that the tool approaching causes this error on milled surface. Thus, the study for investigating the effect of the tool approaching path on the cylindrical surface geometry of the end-milled part is carried out.

Key Words : End Milling Process, Tool Approaching Path, Roundness Error

1. 서론

가공면의 정밀도에 대한 요구는 기술의 발달에 따라 점점 더 커지고 있다. 최근에 들어서는 연삭, 연마 등의 후가공 공정을 감소 또는 생략시킴으로써 비부가가치 가공시간과 생산비용의 비효율성을 보완하고, 고속가공 기술을 적용하여 엔드밀링 가공의 정밀도를 향상시키고자 노력하고 있다. 따라서 엔드밀링 가공에 의하여 생성되는 가공면의 창성기구와 형상정밀도에 대한 관심이 증가하는 추세이다.

엔드밀링 가공에서의 가공면 창성기구 및 형상정밀도에 관한 연구는 공구 바닥날에 의한 평면가공과 옆날에 의한 측벽가공의 경우로 구분할 수 있다. Tlustý⁽¹⁾는 공구와 공작물의 상대운동 방향과 가공경로에 따른 축방향 절삭깊이를 변화시킴으로써 공구에 발생하는 진동을 줄이고 평면가공에서의 정밀도를 향상시킬 수 있다고 기술하였다. Kline⁽²⁾과 Sutherland⁽³⁾는 측벽가공에서의 비절삭저항을 이용하여 계산된 절삭력을 공구의 변형량에 적용시켜 그 값을 구하고, 가공면 형상오차에 대한 연구를 수행하였다.

* 주저자, 국민대학교 기계자동차공학부 (kangkim@kookmin.ac.kr)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

Budak^(4,5)은 측벽가공에서 절삭깊이와 공구 날 당 이송거리의 변화에 따른 가공면 형상오차 추정식을 확립하여 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 적절한 절삭조건 선정에 관하여 고찰하였으며, Elbestawi⁽⁶⁾는 정상조건에서 공구의 마모와 런아웃을 고려한 표면 생성기구에 대하여 연구하였다.

이와 같이 엔드밀링 가공 시, 가공면 형상과 정밀도는 가공면 생성점에 관여하는 동작기계의 강성 및 정밀도 특성, 절삭조건, 공구기하, 절삭력에 따른 공구변형과 가공경로 등에 의하여 결정된다^(7,8). 그러나 기 발표된 연구 결과는 가공면 형상정밀도에 관한 특성을 각주형상의 공작물에 대하여 평면가공과 측벽가공으로 나누어 고찰하는 것이 주를 이루고, 원통형상의 가공면 형상정밀도 특성에 관한 연구는 다소 미흡한 상태이다. 아울러, 앞에서 언급한 영향 인자들이 최적 조건인 상태에서 가공된 경우에도 원통형상으로 가공된 공작물은 공작물의 축과 평행한 직선 형태의 가공면 결함을 원주면에 나타내는 것이 육안으로도 확인이 된다. 이 결함은 공구의 접근 경로와 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다. 그러므로, 본 연구에서는 공구의 접근 경로에 따른 원통형상 공작물의 가공면 특성을 진원도 측면에서 비교하여, 가공면의 형상을 최적화하는 방안에 대하여 모색해 보고자 한다.

2. 시편 및 실험 장비

2.1 시편

본 연구에서는 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 합금강 SM45C를 시편 재료로 선정하였다. 시편 가공은 완성된 시편의 직직도(Straightness) 오차를 최소화하기 위하여 CNC 선반 작업을 시행하였으며, 아울러 실험가공 시 발생할 수 있는 시편의 떨림에 의한 가공면 형상오차를 최소화하기 위하여 평면밀링 작업도 시행하였다. 이와 같은 선행 작업에 의하여 최종적으로 원기둥 형상의 시편을 제작하였으며, 시편의 형상 및 치수는 Fig. 1에서 보여 준다. 시편 윗부분 원통형상의 원주면은 실험 가공면으로서, 반경방향 절삭깊이의 변화를 주기 위하여 실험가공 전의 원통직경이 $\varnothing 41\text{mm}$, $\varnothing 42\text{mm}$, $\varnothing 43\text{mm}$, $\varnothing 44\text{mm}$ 가 되도록 준비하였으며, 치수 오차의 범위는 $\pm 0.005\text{mm}$ 이내가 되도록 조치하였다. 시편의 중간부분은 바이스에 의한 고정부분으로서 $\pm 0.005\text{mm}$ 의 치수 오차를 가지며, 아랫부분의 원통형상은 측정 시의 센터링(Centering)을 용이하게 하기 위하여 가공되었다. 완성된 시편 중 임의로 10개의 시편을 추출하여 진원도를 측정한 결과, 평균값이 $3.93\mu\text{m}$ 인 것이 확인되었다.

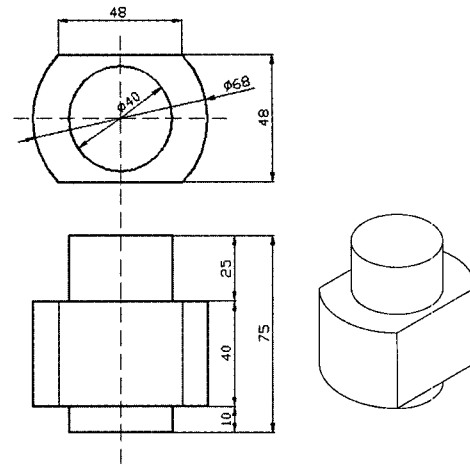


Fig. 1 Shape and dimension of workpiece

2.2 가공 및 측정

본 연구에서 사용된 CNC 밀링머신은 통일중공업에서 제작한 TMV-40M 기종이다. Table 1은 CNC 밀링머신의 주요 사양을 나타낸다. 가공기계의 정밀도는 공작물의 정밀도에 직접적으로 영향을 미치므로, 실험에 앞서 CNC 밀링머신의 정밀도에 대한 평가 및 보정을 실시하였다. 측정에는 SNU precision(주)의 AVEC-100 볼바(Ballbar)가 사용되었으며, 측정 후 CNC 제어기의 파라메타를 수정하여 모든 축이 $0.5\mu\text{m}$ 이내의 정밀도를 갖도록 보정하였다.

실험에 사용된 절삭공구는 고온에서 내산화성이 우수하고 열확산율이 높아서 내열 충격성이 양호한 티타늄 코팅(TiCN coating)-HSS 표준 2날 엔드밀이며, 공구의 직경은 $\varnothing 20\text{mm}$, 헬릭스각은 30° 인 것을 선택하였다. 공구의 교환 시기를 결정하기 위하여, 매 시편 가공 후 공구현미경으로

Table 1 CNC milling machine specification

Table size (mm)		900 × 410
Traverse x, y, z axis (mm)		560 × 410 × 510
Spindle	speed (rpm)	40 ~ 4000
	taper	NT. 40
	motor power (kW)	AC 5.5
Feed rate (mm/min)		1 ~ 5000
CNC controller		FANUC O-MC

공구의 마멸을 측정하였으며, 관찰 결과를 토대로 하여 시편을 5개 가공 후에는 항상 새 공구로 교환하였다.

진원도는 Rank-Taylor Habson사의 Talyrond 252를 사용하여 측정하였다. 가공된 시편의 진원도는 가공면의 양 끝단 2mm를 제외하고 위에서 아래방향 1mm 간격으로 총 16단을 측정하였으며, 중간 위치인 8번째 단에서의 측정값을 실험 결과로 선정하였다.

3. 예비 실험

3.1 목적 및 방법

원통형상의 시편을 평 엔드밀을 이용하여 원호가공할 때, 공구의 공작물에 대한 진입영역(Entry-region) 또는 퇴출영역(Exit-region) 부근에서 상대적으로 다른 특성을 갖는 가공면이 존재한다는 것은 현장에서 일반적으로 널리 알려진 사실이며, 육안으로도 쉽게 확인이 된다. 이러한 특성은 시험가공 된 시편의 측정결과인 Fig. 2에서도 확인할 수 있다. 이 그림은 공구가 +X축 방향으로 진입하여 360° 원호가공 후, 최초 접촉점과 동일한 곳에서, -X축 방향으로 퇴출하는 가공경로에 의하여 생성된 가공면의 진원도 형상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공작물의 원주면은 특정 위치에서 다른 곳에 비하여 곡률반경이 상대적으로 큰 부분을 갖는 것을 알 수 있다. 실제 가공면에 골이 형성되는 것은 아니지만, 진원도 그림에서 이 부분은, 배율의 영향으로 인하여, 골과 같은 형태로 보여진다.

여기에서, 이 결함을 편의상 밸리(Valley)라고 칭하고 이 결함부분에 해당하는 각도 θ 를 밸리각(Valley angle)이라고 한다. 만일, 기계 및 가공 조건이 최적이었다면, 이 밸리

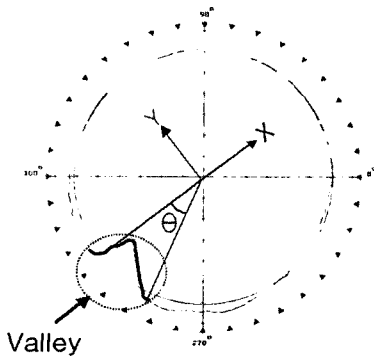


Fig. 2 Typical geometry of cylindrically milled surface

는 공구의 진입 또는 퇴출 영역에 나타나며 밸리의 깊이는 진원도 값과 일치하는 것이 관찰을 통하여 확인되었다.

밸리 결함을 방지하기 위해서는 밸리의 생성 시점과 원인을 알아야 한다. 그러나 일반적으로 원통형상 가공할 때, 공작물에 대한 공구의 최초 접촉점과 최종 접촉점은 일치하므로 생성 시점의 확인이 불가능하다. 그러므로, 우선 예비실험을 수행하여 밸리의 생성시점을 규명하고자 한다. 예비실험에서는 공작물의 원주면에 대하여 법선방향으로 공구를 진입시켜서 360°+a를 원호가공 후 퇴출시킴으로써 최초 접촉점과 최종 접촉점이 서로 다른 가공경로를 지정한다. 예비실험에서 a는 0°, +5°, +10°, +15°의 4가지를 선정을 하였으며, 가공경로는 Fig. 3에서 보여주고 있다. 아울러, Table 2는 참고문헌 9의 내용을 참조하여 선정된 실험 절삭조건을 나타낸다.

3.2 결과 및 고찰

Fig. 4는 예비실험 결과를 나타낸다. 진원도 측정 결과에서 볼 수 있듯이, 퇴출영역의 각도(a)가 증가함에 따라서 밸

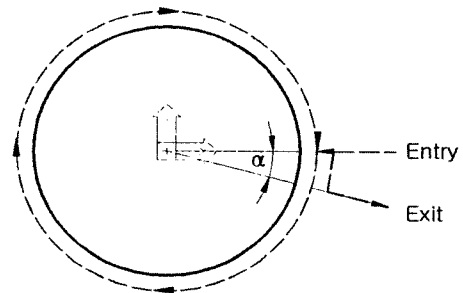


Fig. 3 Tool path (Preliminary experiment)

Table 2 Experimental conditions

Cutting conditions	Value
Feed per tooth (mm/tooth)	0.09
Feed rate (mm/min)	70
Spindle speed (rpm)	381
Radial depth of cut (Rd) (mm)	1
Axial depth of cut (Ad) (mm)	20
Tool revolution direction	Clockwise
Tool path	Down cut milling

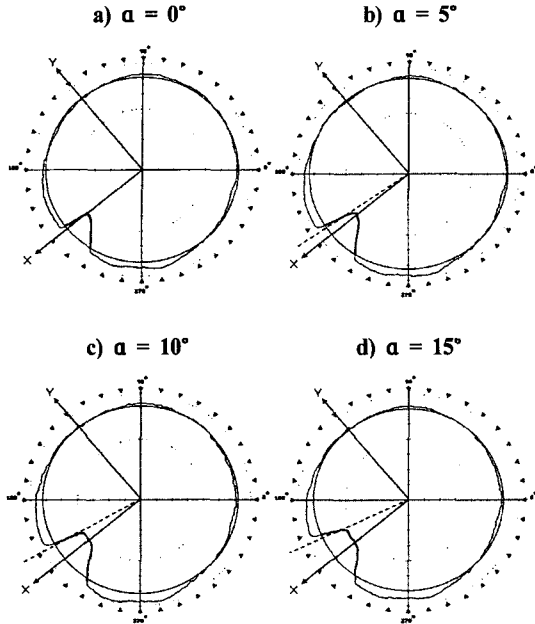


Fig. 4 Experimental results (Preliminary experiment)

리의 폭에 해당하는 밸리각은 α 의 변화량과 동일한 크기의 각도만큼 증가되었으나, 밸리 깊이의 변화는 없는 것이 확인되었다. 그러므로, 하향 밀링가공으로 원통형상 시편의 원주면을 가공할 때 나타나는 밸리 결함은 공구가 퇴출되는 영역 부근에서 생성되는 것으로 추정할 수 있다. 아울러, 밸리 결함이 시작되는 위치는 모두 일치하며 α 가 증가함에 따라서 밸리의 최저점 구간이 확장되는 특징에 의하여 결함 부분의 가공조건과 밸리각을 제외한 원주면의 가공조건을 비교하여 볼 때, 결함부분에서 반경방향 절삭깊이의 급격한 변화 및 감소가 발생한다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 반경방향 절삭깊이의 변화량과 밸리 결함이 밀접한 관련이 있다고 판단된다.

4. 해석 및 실험

예비실험 결과에 의하면, 밸리 결함의 발생 범위를 최소화하기 위해서는 퇴출영역에서의 반경방향 절삭깊이 변화를 최소화하여야 한다. 그러나, 퇴출영역의 절삭깊이는 가공이 시작될 때 공구가 공작물에 접근하는 경로에 의하여 결정된다. 그러므로, 진입영역에서의 공구경로 변화가 퇴출영역에서 원주면의 각변위에 대하여 반경방향 절삭깊이를

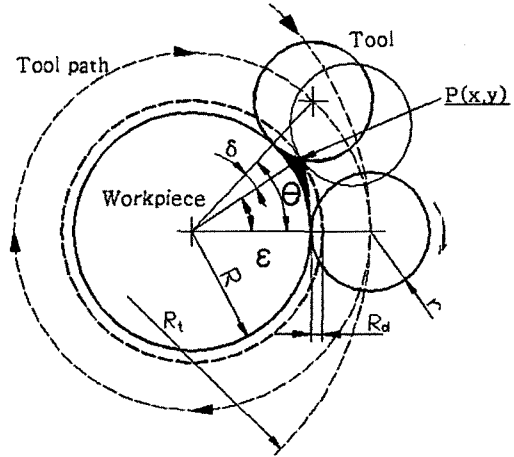


Fig. 5 Coordinate system for valley angle analysis

변화시키는 상황을 해석적인 방법으로 분석하여 밸리각을 예측한다. 또한, 가공경로를 변화시키며 실험 가공을 수행하고 그 결과를 해석에 의한 추정 결과와 비교하여 밸리 결함을 최소화하는 가공경로를 확인하고자 한다.

4.1 해석

Fig. 5는 공구 접근 경로에 따른 밸리각, θ 의 변화를 해석적으로 정의하기 위한 좌표계이다. 공구와 공작물의 반경 및 공구 접근 경로의 곡률반경을 각각 r, R, R_d 라고 하고 절삭깊이를 R_d 라고 가정할 때, 공구와 공작물의 접촉은 점 $P(x,y)$ 에서 시작된다. 이 때, P는 아래에 정의되어 있는 두 원의 교점이 되며, 각변위 ϵ 는 이 교점 P의 좌표값을 이용하여 정의된다.

$$x^2 + y^2 = (R + R_d)^2 \quad (1)$$

$$[x - (R + r + \rho)]^2 + y^2 = (r + \rho)^2 \quad (2)$$

$$\rho = 0 \quad (\text{tool path: normal})$$

$$\rho = R_t \quad (\text{tool path: circumscribed circle})$$

$$\rho = \infty \quad (\text{tool path: tangential})$$

$$\rho = -R_t \quad (\text{tool path: inscribed circle})$$

$$\epsilon = \tan^{-1}(y/x) \quad (3)$$

위의 식 (2)에서 사용된 변수 ρ 는 공구 접근 경로의 곡률 반경에 해당하는데, 이 경로가 외접원인 경우는 $+R_t$, 내접원인 경우에는 $-R_t$ 를 대입한다. 현장에서 많이 사용되는 공구의 법선 방향 및 접선 방향 접근인 경우의 ρ 는 각각 0과

∞라고 볼 수 있다. 접선 접근의 경우에는 $\rho \rightarrow \infty$ 극한값을 취하면, 식 (2)는 $x = R$ 이 된다.

공구가 공작물과 접촉을 유지하며 최초 접촉점으로부터 식 (3)으로 나타내는 각변위 ε 만큼 이동할 때까지는 여전히 공구 접근 과정으로 간주되고, 이 시점부터 비로서 공구가 일정한 이송속도의 크기로 원하는 가공 후 공작물의 곡률반경에 대응하는 경로를 따라서 실질적인 가공이 이루어진다. 동일한 가공조건 하에서의 가공은 공구가 최초 접촉점 P를 다시 만날 때(점 P에 대한 공구 중심의 상대 각변위가 δ 인 순간)까지 계속되어지나, 이 순간부터 가공이 완료되어 공구가 공작물과 이탈되는 순간까지는 그 이전에 비하여 급격한 절삭깊이의 감소가 발생된다. 여기에서 각변위 δ 는 공구가 법선방향으로 접근하는 경우의 ε 과 동일하므로 법선으로 접근할 때 최초 공작물 접촉점을 $P(x_n, y_n)$ 로 가정하면 δ 를 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$x_n^2 + y_n^2 = (R + R_d)^2 \quad (4)$$

$$[x_n - (R + r)]^2 + y_n^2 = r^2 \quad (5)$$

$$\xi = \tan^{-1}(y_n / x_n) \quad (6)$$

그러므로 벨리각 θ 는 다음과 같이 앞에서 구한 ε 과 δ 의 합으로 정의할 수 있다.

$$\theta = \varepsilon + \delta \quad (7)$$

4.2 실험

앞에서 제시한 해석적인 방법의 타당함을 검증하기 위하여 실제 가공 실험을 실시하였다. 실험에서, 공구의 접근 경로와 반경방향 절삭깊이를 제외한 모든 사항(시편, 공구, 공작기계, 실험조건 등)은 예비실험과 동일한 상황에서 수행하였다. Fig. 6은 일반적으로 현장에서 사용되는 4가지 서로 다른 공구 접근 경로를 보여준다.

공작물에 대한 공구의 접근경로는 법선(normal), 외접원(circumscribed circle), 접선(tangential), 내접원(inscribed circle)의 4가지 경우를 선정하였다. 아울러, 접근경로가 외접원과 내접원의 경우에는, 공구 중심이 그리는 궤적의 곡률 반경을 각각 2 가지씩 지정하여(외접원: 10mm, 30mm, 내접원: 55mm, 70mm) 총 6가지의 경로를 선정하였다. 반경방향 절삭깊이는 각각의 접근경로에 대하여 0.5mm에서 2.0mm까지 0.5mm 간격으로 4 가지 조건에 대하여 실험하였다.

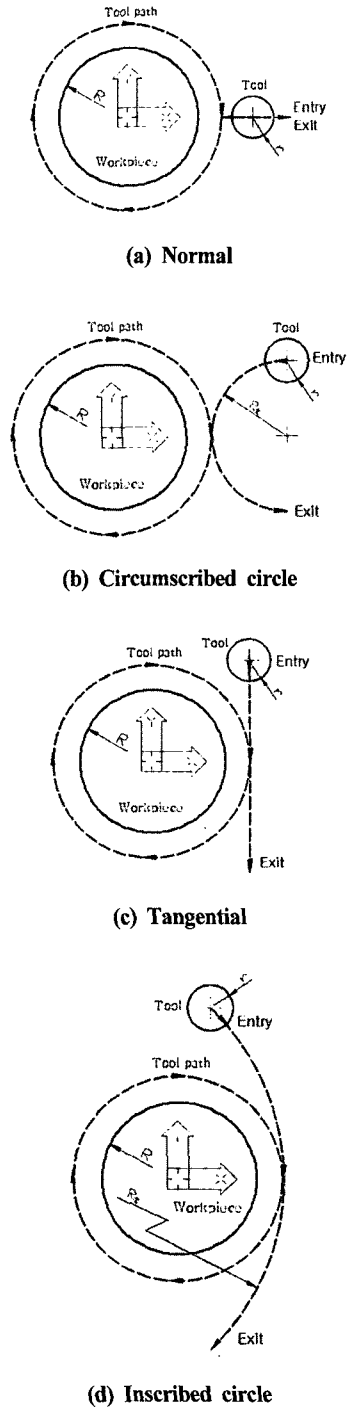


Fig. 6 Tool path (Experiment)

5. 결과 및 고찰

Fig. 7은 실험 후 밸리각을 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 밸리각을 예측하기 위하여 실험 조건과 동일한 4가지 입력 변수 (공구 반경, 공작물 반경, 반경방향 절삭깊이, 공구 접근경로의 곡률 반경) 값을 식 (1)-(7)에 대입하여 추정 밸리각을 구하였고, 이 값을 측정값과 비교해 본 결과, 모든 조건에 대하여 두 값의 차이는 $\pm 3\%$ 이내로 지나지 않았으며, 밸리각 측정 오차가 $\pm 0.5^\circ$ 인 점을 감안하여 볼 때, 해석 모델의 타당성 및 예측 가능성을 알 수 있다.

해석적인 접근의 신뢰성이 확인되었다고 판단되므로, 이 방법을 이용하여 결함 부분에 영향을 미치는 주 변수인 반경방향 절삭깊이, 공구 반경 및 공구 접근경로가 밸리각에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 편의상, 모든 변수값은 공작물 반경을 기준으로 무차원 변수화 하였으며, Figs. 8과 9는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 앞에서 언급한 바와 같이, 공구 접근경로의 곡률반경이 0이면 법선방향 접근을, 곡률반경이 +값이면 서로 외접하는 원의 궤적을, 곡률반경이 -값이면 서로 내접하는 원의 궤적을 따라서 접근하는 것이며, 곡률반경이 $\pm\infty$ 로 증가하면 접선방향으로 접근하는 것을 의미한다. 내접원 궤적으로 접근하는 경우에는 항상 공구 접근경로의 곡률반경은 공작물과 공구 반경의 합보다 큰 값을 갖는다. 그러므로, 실현 불가능한 내접원 공구 접근경로의 영역이 존재한다.

Figs. 8과 9에서 공통적으로 볼 수 있듯이, 법선방향으로 공구가 접근할 때에 밸리각이 최소화되는 것을 알 수 있다.

다른 모든 조건이 같고 공구 접근 경로만을 달리하는 경우에는 법선, 외접원, 접선, 내접원 순으로 밸리각이 증가된다. 이것은 공구가 접근할 때 퇴출 영역의 공작물 표면이 일부 제거되는 부분의 범위와 일치하며, 이것을 통하여 이 결합이 반경방향 절삭깊이의 변화와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서, 공구가 곡률반경이 작은 궤적을 그리며 공작물과 내접하는 형태로 공작물에 접근하는 것은 가장 바람직하지 못한 접근방법이다.

반경방향 절삭깊이가 클수록 밸리각이 증가됨을 Fig. 8에서 보여 준다. 그러므로, 정밀 가공을 요하는 공작물의 경우에 최종 정삭으로 공작물의 형상공차를 확보하려면, 그 이전 단계인 중삭 및 황삭 단계에서 적절히 절삭깊이를 배분

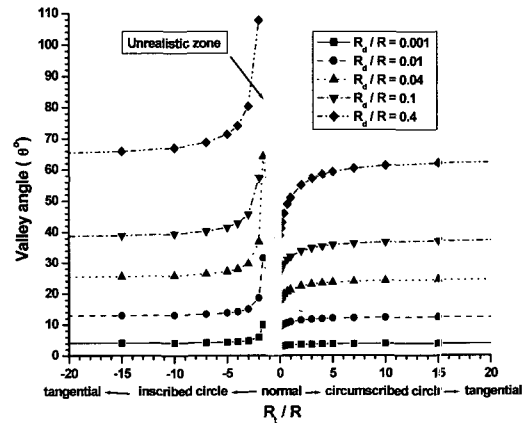


Fig. 8 Effect of depth of cut on valley angle (Simulation)

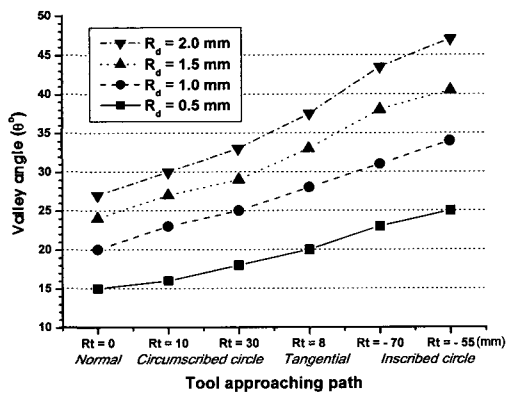


Fig. 7 Experimental result

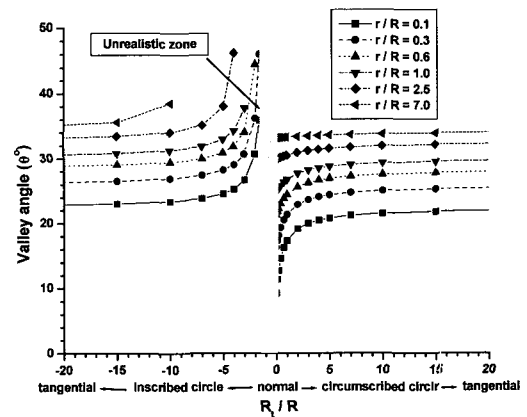


Fig. 9 Effect of tool radius on valley angle (Simulation)

하여 결함부분이 정상여유보다 작도록 조치하여야 한다. 만일, 생산성만을 고려하여 과도한 절입깊이로 증삭 또는 황삭이 수행되는 경우에는, 이 때 생성된 결함이 정상 후 형상에 영향을 미칠 수도 있다. 공구의 크기에 있어서는, 상대적으로 반경이 작은 공구를 쓰는 것이 유리함을 Fig. 9에서 보여주는 시뮬레이션 결과에 의하여 알 수 있다. 따라서, 공구의 강성 및 변형을 고려하고 절삭저항이 작게 발생하는 절삭조건을 선정하고 가능한 범위 내에서 반경이 작은 공구를 사용하는 것이 추천된다.

시뮬레이션 결과에 의하면, 절입깊이나 공구반경을 0으로 하는 경우에만 이 결함을 제거할 수 있다. 따라서 이 결함은 밀링가공 자체의 고유한 특성이며, 개선은 가능하나 제거 혹은 방지가 불가능하다고 판단된다.

6. 결론

평 엔드밀로 하향가공에 의한 원통형상의 측벽가공 시, 가공경로가 형상정밀도에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석하였다. 가공면에 발생하는 형상결함은 진원도 측정을 통하여 확인하였으며, 본 연구에서 제시한 추정식을 통한 가공면 형상오차 예측 방법은 임의의 절삭조건인 경우 결함 부분의 범위를 빠르고 정확하게 예측할 수 있으므로 유용하게 이용될 수 있다. 본 연구의 수행을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 평 엔드밀을 이용하여 하향가공에 의한 원통형상의 측벽가공 시 생성되는 결함 부분은 공구가 퇴출할 때 발생된다.
- (2) 이 결함 부분의 존재 범위의 크기에 영향을 미치는 주 인자는 공작물과 공구의 반경비, 반경방향 절삭깊이 및 접근경로의 곡률반경이다.
- (3) 반경방향 절삭깊이는 작게 주고 반경이 작은 공구를 선택하여 법선방향으로 공작물에 접근하면 결함 범위를 줄일 수는 있으나, 이러한 결함을 완전히 제거

하는 것은 현실적으로 불가능하다.

참고 문헌

- (1) Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., 1990, "New NC routines for quality in milling", *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 517~521.
- (2) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Shareef, I. A., 1982, "The prediction of surface accuracy in end milling", *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 104, pp. 272~278.
- (3) Sutherland, J. W. and DeVor, R. E., 1986, "An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems", *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (4) Budak, E. and Altintas, Y., 1994, "Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy", *Int. J. Mach. Tools Manu.*, Vol. 34, No. 7, pp. 907~918.
- (5) Budak, E. and Altintas, Y., 1995, "Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 3, pp. 459~476.
- (6) Elbestawi, M. A., Ismail F., and Yuen, K. M., 1994, "Surface topography characterization in finish milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 2, pp. 245~255.
- (7) Park, M. J. and Kim, K., 1998, "Effects of the Tool Path on the Geometric Characteristics of Milled Surface", *J. of KSPE*, Vol. 15, No. 6, pp. 58~63.
- (8) Ryu, S. H., 2002, *Optimal Cutting Condition in Side Wall Machining Considering Tool Deflection*, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- (9) Metcut Research Associates Inc., 1980, *Machining Data Handbook, 3rd Edition*, pp. 131.