

공구접근 경로가 밀링 가공된 원통 구멍 형상에 미치는 영향

김광희[#]

Effect of Tool Approaching Path on the Shape of Cylindrical Hole in a Milling Process

Kwang-Hee Kim[#]

ABSTRACT

Because of the development in mold industries, the geometrical form accuracy of the milled surface is getting more and more important. It has been known that the geometrical form accuracy is affected by machine conditions, cutting conditions, tool conditions and tool path and so on. Among them, the tool approaching path causes the change in material removal per tooth at the end of each machining cycle. And, this change generates the geometrical form error around the region where the tool engages the workpiece initially. So, it is impossible to eliminate the geometrical error caused by the tool approaching path. Thus, characteristics of this geometrical error are studied analytically and experimentally to minimize this region.

Key Words : Milling Process(밀링 가공), Tool Approaching Path(공구 접근 경로), Geometrical Form Accuracy(기하학적 형상 정밀도)

1. 서 론

작업자가 가공 중에 조절할 수 있는 변수 및 가공 경로 선정에 따라 가공면의 품질은 영향을 받는다. 진원가공에 있어서 윤곽이나 포켓가공 정밀도는 입구부에서 가공면의 축 방향으로 나타나는 직선형태의 결함으로 인하여 사상작업 및 조립시간에 영향을 준다. 그러므로 공구경로 및 형상특성이 주요 관심의 대상이 되고 있는 추세이다. 이와 관련하여, Kim^[1]등

은 엔드밀에 의한 원통 가공 시 절삭깊이가 진원도 값의 변화에 미치는 영향이 크다고 보고하고 있다. Yoon^[2]등은 원통가공에서 엔드밀의 돌출길이에 따른 가공면의 치수변화와 진원도 영향을 연구하였다. 또한 Budak^[3-4] 등은 측벽가공에서 절삭깊이와 공구 날당 이송거리의 변화에 따른 가공면 형상오차 추정식을 확립하여 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 적절한 절삭조건 선정에 관하여 고찰하였으며, Cho^[5]등은 가공오차를 줄일 수 있는 공구경로의 보상에 대하여 공구 휨을 중심으로 연구한 내용을 발표하였다. Park^[6]등은 가공경로가 밀링가공면의 기하학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구에서 가공경로에 따라 평

교신저자 : 국민대학교 대학원 기계설계학과
E-mail : kkhkbs@daum.net

활한 면을 얻을 수 있다고 보고하고 있다. Kim^[7]은 공구접근 경로가 원통형상의 밀링가공물에 미치는 영향을 실험 및 해석으로 분석하여 공구접근경로가 형상정밀도에 미치는 영향을 연구하였다. 기 발표된 연구 결과들은 원통형상 외부의 측벽가공 시 형상정밀도를 고찰하는 것이 주를 이루고, 원통형상 내부의 가공면 형상정밀도 특성에 관한 연구는 다소 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는, 평 엔드밀을 이용하여 하향가공(down cut milling)에 의한 원통 구멍형상의 측벽가공 시, Fig. 1에서와 같이 확인되는 밸리(valley)의 발생에 대하여 가공경로 측면에서 해석과 실험을 통하여 분석하고자 한다.

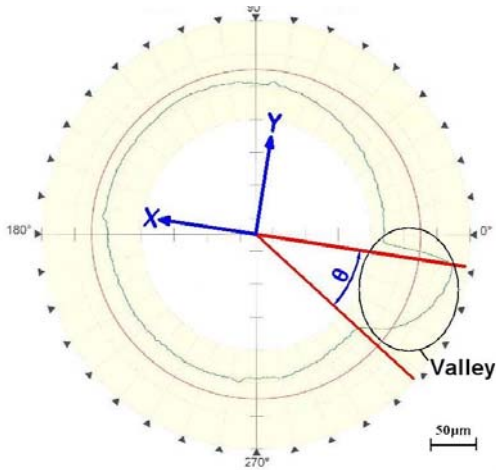


Fig. 1 Typical geometry of cylindrically milled surface

2. 해 석

해석을 위한 밸리각(θ)와 공구의 반경(r), 공작물 반경(R), 공구접근 경로의 곡률반경(R_t) 및 절삭깊이(R_d)는 Kim^[7]이 정의한 방법을 적용한다. Fig. 2는 밸리각을 해석하기 위한 좌표계이다. Fig. 2에서 $P(x^*, y^*)$ 는 공구가 절삭 초기에 공작물에 접근하는 진입영역의 마지막 시점에 퇴출영역에 생성되는 공구반경방향 절삭깊이가 최대값을 갖으며 진입영역

에 근접한 점으로 정의한다. 따라서 $P(x^*, y^*)$ 는 아래의 두 원의 방정식의 교점을 의미한다.

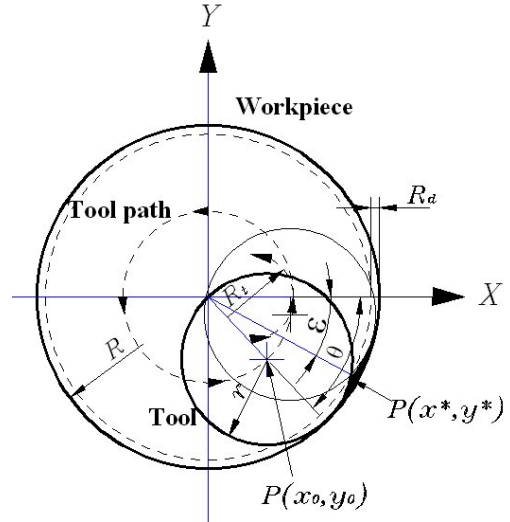


Fig. 2 Coordinate system for valley angle analysis

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

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

$$\rho = 0 \quad (\text{Tool path : Normal})$$

$$\rho = R_t \quad (\text{Tool path : Inscribed circle})$$

위의 식 (2)에서 ρ 는 공구접근 경로의 곡률반경에 해당하는데, Fig. 2와 같이 법선방향 접근경로인 경우, 0으로 볼 수 있으며 내접원 접근 경로는 $+R_t$ 를 대입하여 사용할 수 있다. 그러므로 $P(x^*, y^*)$ 점과 X축이 이루는 각 변위 ε 은 x^*, y^* 값을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

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

이 각 변위를 지난 후에 비로서 공구는 원하는 곡률반경을 따라 일정한 공구날당 소재제거량으로 가공을 한다. 가공이 진행됨에 따라 공구가 $P(x^*, y^*)$ 을 다시 지나는 순간부터 실제적인 반경방향 절삭깊이가 감소하므로 공구날당 소재제거량의 변화가 발생

되며, 이로 인해 진원도 값을 증가시키는 벨리가 생성되는 것을 예상할 수 있다. 공구가 $P(x^*, y^*)$ 를 접하는 순간의 공구중심점을 $P(x_0, y_0)$ 라 하며 아래와 같이 벨리각 θ 를 정의할 수 있다.

$$x_0^2 + y_0^2 = (R - r)^2 \tag{4}$$

$$(x_0 - x^*)^2 + (y_0 - y^*)^2 = r^2 \tag{5}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y_0/x_0) \tag{6}$$

3. 실험

앞서 제시한 해석적인 접근의 타당함을 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. 실험장치 및 시편은 수직형 CNC 밀링머신인 TMV-40M 기종을 이용하여 기계구조용 합금강으로 많이 사용되는 SM45C를 가공하였다. 가공하고자 하는 시편의 형상 및 치수는 Fig. 3에서 보여 주고 있다. 원통내부의 형상은 실험을 하기 위한 가공 면으로서 완성된 시편의 진직도 오차를 최소화하기 위하여 CNC밀링에서 정삭작업 횟수를 2회 하였다. 이 그림에서 D1 치수는 실험 조건에 따라 반경방향 절삭깊이가 변화되는 것을 감안한 실험가공 후의 가공 직경을 의미한다.

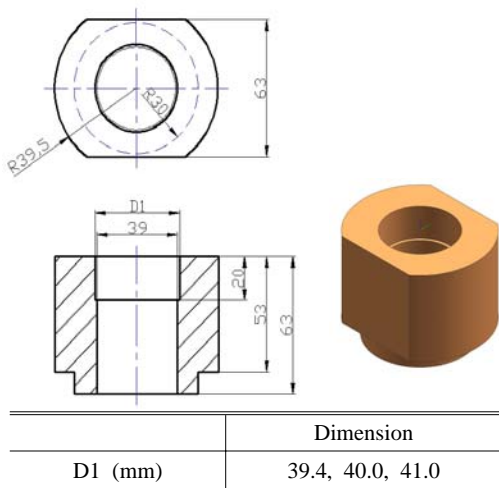


Fig. 3 Shape and dimension of workpiece

엔드밀을 이용한 포켓가공 등의 중 절삭에서는 두 날 엔드밀을 사용하는 것이 가공물의 형상 정밀도 관점에서 바람직함을 알 수 있다^[8]. 따라서, 실험에 사용된 절삭공구는 고온에서 내산화성이 우수하고 내열 충격성이 양호한 티타늄 코팅(TiCN coating)-HSS 표준 2날 엔드밀이며, 직경이 $\varnothing 20\text{mm}$ 이며 헬릭스 각이 30° 인 것을 선정하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 시편의 상단을 기준으로 하여 축방향으로 20mm를 가공하였으며, 가공면의 상하 양단에서 각각 3mm씩을 제외하고 아래에서 윗 방향으로 1mm 간격으로 총 15단에 대하여 원주 방향 형상정밀도를 측정하였다. 가공면의 형상오차는 Taylor Hobson사의 Talyrond 252를 이용하여 측정하였다.

실험방법은 공작물에 대한 공구의 접근경로인 법선(Normal), 내접원(Inscribed circle)의 2가지 경우를 선정하였으며, 반경방향 절삭깊이는 각각의 접근경로에 대하여 0.2, 0.5, 1.0mm로 3가지 조건에 대하여 실험하였다. 실험의 보편성을 확보하기 위하여 절삭조건은 Machining data handbook^[9]에 있는 값을 기준으로 하여 설정하였다. Table 1은 실험 가공조건을 나타내고 있다.

Table 1 Experimental conditions

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

Fig. 4는 공구경로를 보여주고 있는데 (a)의 법선 경로는 원점에서 공구가 +X축 방향으로 직선 진입하여 반시계 방향으로 360° 원호가공 후, 원점으로 퇴출하는 가공경로이다. (b)는 내접원 경로를 보여주며, 원점에서 공구 접근경로의 곡률반경을 따라 반시계 방향을 시작점에 진입하여 반시계 방향으로 360° 원호가공 후, 내접경로를 따라 퇴출하는 가공 경로이다.

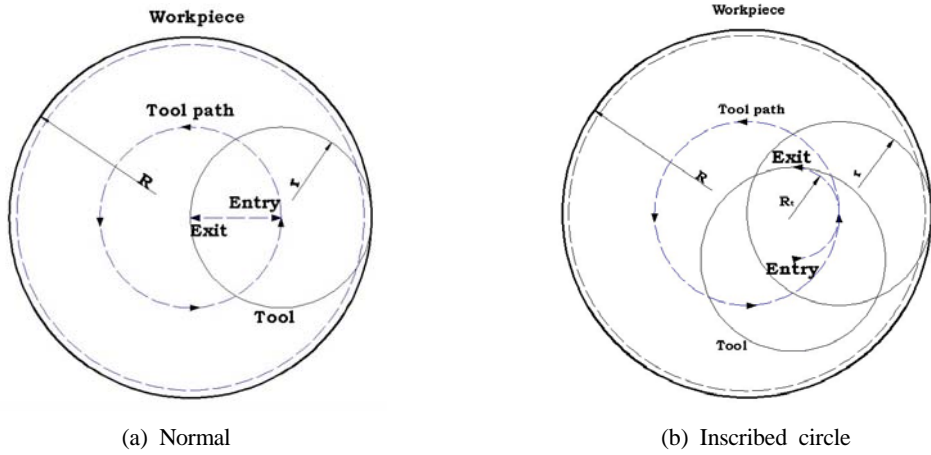


Fig. 4 Tool path (Experiment)

4. 고 찰

Fig. 5는 반경방향 절삭깊이와 공구접근 경로에 따른 진원도 값의 변화를 보여주는 그래프이다. 또한 Fig. 6은 반경방향 절삭깊이를 구멍의 반경비로 나누어 무차원화된 변수를 도입하여 진원도에 미치는 영향을 보여주고 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 진원도 값이 나빠지는 것을 확인할 수 있으며, 법선경로보다 내접원경로가 진원도 값이 좋게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 법선경로와 내접

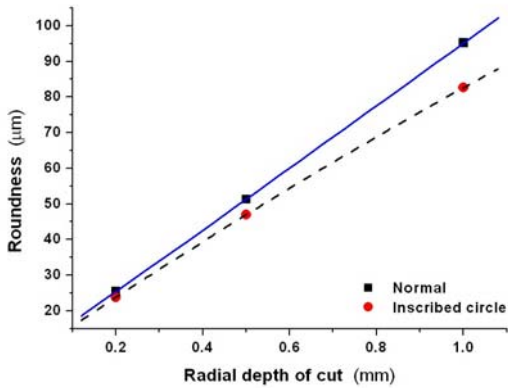


Fig. 5 Comparison between analytical and experimental results (Roundness)

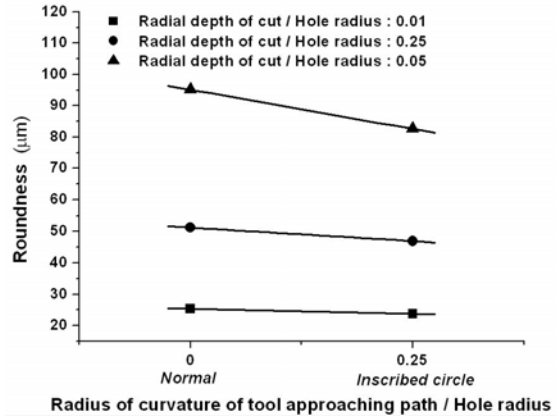


Fig. 6 Effect of radial depth of cut and tool approaching path on roundness

원경로를 살펴보면, 반경비가 0.01일 때 기울기는 완만하게 나타나며, 0.05 일 때는 기울기가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 반경방향 절삭깊이와 공작물의 반경비가 클수록 공구접근 경로의 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 실험 후 벨리각을 측정된 결과를 해석한 값과 비교한 그래프를 나타낸 것이다. 벨리각을 예측하기 위하여 공구반경, 구멍반경, 반경방향 절삭깊이, 공구 접근경로의 곡률반경 값을 식 (1)~(6)에 대입하여 추정 벨리각을 구하였고, 이 값을 측정값과 비교해본 결과 모든 조건에 대하여 두 값의 차이는 4% 이내에 지나지 않았으며, 벨리각

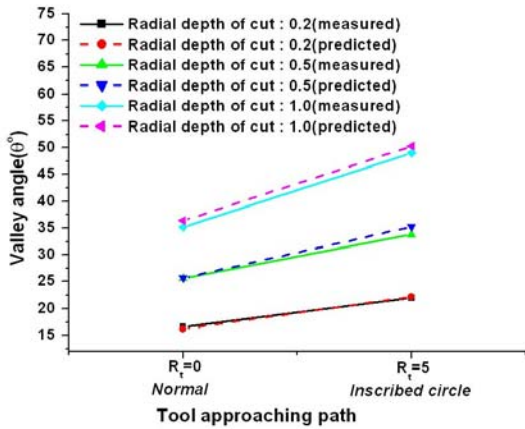


Fig. 7 Comparison between analytical and experimental results (valley angle)

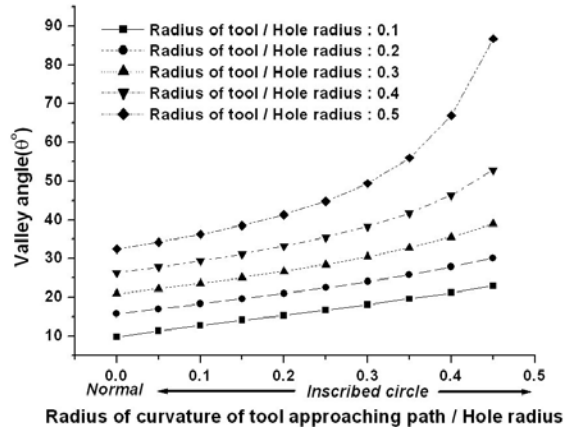


Fig. 9 Effect of tool radius on valley angle (Simulation)

측정 오차가 $\pm 1.5^\circ$ 인 점을 감안하여 볼 때, 해석 모델의 타당성 및 예측 가능성을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9은 반경방향 절삭깊이, 공구반경 및 공구접근 경로가 밸리각에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 알아본 결과이다.

Fig. 8, Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 반경방향 절삭깊이와 공구반경이 커질수록 밸리각이 증가되고, 아울러 공구접근 경로의 곡률반경이 커질수록 밸리각이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반경방향 절삭깊이와 공구의 반경이 클수록 공구접근 경로의 영향

을 크게 받는 것을 의미 한다. 따라서 공구의 강성 및 변형을 고려하고 절삭저항이 작게 발생하는 절삭조건을 선정하고 가능한 범위 내에서 반경이 작은 공구를 사용하는 것이 추천된다.

5. 결 론

본 연구에서는 평 엔드밀을 이용하여 하향가공(down cut milling)에 의한 내경가공 시, 가공경로가 형상정밀도에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석하였다. 본 연구의 수행을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 원통형 외측가공에서 확인된 바와 같이, 밸리는 공작물과 공구사이의 반경비, 반경방향 절삭깊이 및 접근경로의 곡률반경의 영향을 받는다.
2. 원통 구멍형상의 측벽 가공 시 진원도 값을 요구하는 가공에서는 반경방향 절삭깊이 값이 작은 절삭조건을 선택하여 사용하는 것이 좋다.
3. 진원도 값을 요구하는 가공에서는 법선방향 가공경로보다 내접원 방향 가공경로를 사용하는 것이 유리하다.

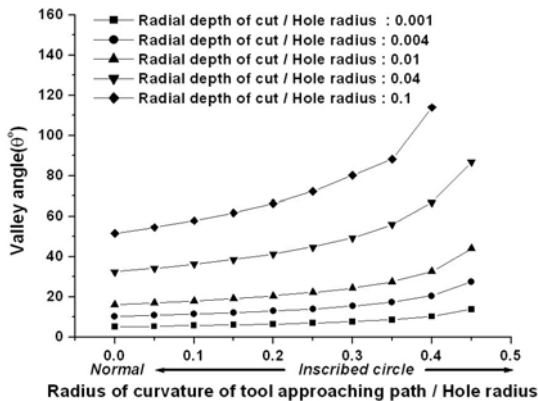


Fig. 8 Effect of radial depth of cut on valley angle (Simulation)

참고문헌

1. 김성청, 박희건, 이응석, “엔드밀에 의한 원통가공 시 절삭조건에 따른 진원도의 실험적 연구,” 한국공작기계학회지, 제8권, 제4호, pp. 52-60, 1999.
2. 윤종학, 서성원, 이현철, “AL합금의 고속 원통가공에서 발생하는 치수오차와 진원도의 영향 고찰,” 한국공작기계학회논문집, 제10권, 제5호, pp. 17-24, 2001.
3. Budak, E. and Altintas, Y., “Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy,” Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 7, pp. 907-39, 1994.
4. Budak, E. and Altintas, Y., “Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates,” Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 3, pp. 459-476, 1995.
5. 조정훈, 서석환, “직접형상제어를 위한 공구경로의 보상: 2D 윤곽가공의 공구힘을 중심으로,” 한국정밀공학학회지, 제12권, 제2호 pp. 31-39, 1995.
6. 박문진, 김강, “가공경로가 밀링가공면의 기하학적 특성에 미치는 영향,” 한국정밀공학학회지, 제15권, 제6호, pp. 58-63, 1998.
7. 김강, “공구접근경로가 원통형상의 밀링가공물에 미치는 영향,” 한국공작기계학회, 제12권, 제3호, pp. 45-51, 2003.
8. 류시형, 주종남, “측벽 엔드밀 가공에서 공구 변형을 고려한 형상오차 예측,” 한국정밀공학학회지, 제21권, 제6호, pp. 43-51, 2004.
9. Machining Data Handbook, 3rd edition, Section 2- I, 2-II, pp. 131, 1980.