

CNC 밀링에 의한 볼록곡면 가공시의 가공특성에 관한 연구

한 흥 삼,* 이 동 주**

A Study on the characteristics of the convex surface machining in CNC milling

Heung-Sam Han,* Dong-Ju Lee**

ABSTRACT

In order to suggest the proper cutting conditions of the CNC milling machining for the free-form surface, some experiments were carried out. In the experiments, the influence of cutting conditions on a inclined spherical surface were examined by geometrical analysis. In this study, the roundness and cutting force were measured to know the effect of several cutting conditions on the machined surface and the cutting characteristics were carefully investigated. The results obtained in this study are as follows:

- 1) If the tool has enough rigidity, we can get better dimensional accuracy in up-ward cutting than down-ward cutting.
- 2) A great roundness error is appeared on the surface declined under 30 degrees to the horizontal plane in circular machining by a ball end mill.
- 3) If the thrust force is increased, the stability of tool is decreased. And the phenomenon is appeared in great in down-ward cutting than up-ward cutting.

Key Words : Up-ward Cutting(볼 엔드밀의 상방향가공), Down-ward Cutting(볼 엔드밀의 하방향가공), Circular Cutting (원주방향가공), Tool Path Interval (볼 엔드밀의 이송간격), Cutting Force (절삭력), Machining Accuracy (가공정도)

1. 서 론

항공기, 자동차, 금형등, 자유곡면을 갖는 제품의 수요가 날로 증대되고 있다. 이들의 자유곡면은 수치제어

공작기계에서 볼 엔드밀을 사용하여 가공하는 경우가 대부분이다. 여기에는 곡면의 형태, 크기 및 요구 정밀도에 따른 적절한 가공조건이 요구 되는데, 이때 다양한 절삭 특성에 기인하는 효과적인 가공조건 설정의 어

* 충남대학교 기계공학과 대학원

** 충남대학교 기계공학과

려움이 따른다.⁽¹⁾ 예를 들면 곡면경사 및 볼 엔드밀 날의 위치에 따라 절삭속도, 공구 경사각 등이 연속적으로 변하고, 특히 구면의 정상 부위에서는 적절한 공구형상의 유지가 이루어지지 못하게 되는 경우 등을 들 수 있다.⁽²⁻⁵⁾ 이러한 가공상의 복잡성으로 절삭조건 예측이 어렵게 되며, 이로 인하여 가공중에 발생하는 chatter, 공구치짐, 공구파손 등이 가공물의 형상정밀도의 저하를 가져오게 된다.⁽⁶⁻⁹⁾ 결국 요구되는 형상정밀도를 얻기 위해서는 상당히 소극적인 가공조건을 부여하거나 시행착오에 의한 재가공 등을 해야하기 때문에 최적의 가공조건을 찾기 위한 연구가 절실하다고 하겠다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

따라서 본 연구에서는 기하학적으로 응용이 편리한 구면을 볼 엔드밀링 가공하여 볼으로써, 볼 엔드밀에 의한 경사면 가공시의 가공특성을 규명코자 하였다.

2. 실험

2.1 시편, 사용기계 및 공구

곡면의 경사나 형상에 따른 가공정밀도와 최적절삭조건과의 관계를 규명하기 위해서 모든 곡면의 표준이 되고, 기하학적으로 해석이 편리한 반구면의 시편을 제작하였다. 시편의 가공방법으로는 SM45C의 탄소강 재료를 CNC선반에서 반지름 R30.5로 일차 구면을 가공하여, 밀링에 고정할 수 있도록 구면의 하부를 가공하였다. 이 시편의 기계적성질 및 물리적 성질은 Table.1과 같다.

본 실험에서 사용된 기계의 사양은 CNC 밀링 3축제어의 Heidenhaim TNC155이며, 절삭공구는 공구강성에 따른 가공성의 영향을 보기 위해서 HSS $\phi 5$, ϕ



Fig. 2.1 Experimental system set up

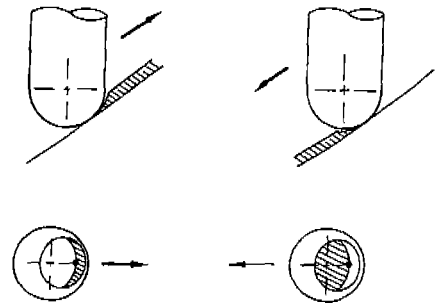


Fig. 2.2 Comparison of up-ward and down-ward milling with ball endmill

10, $\phi 16$ 의 볼 엔드밀을 사용하였다. 측정기기는 공구동력계, 신호 증폭기, A/D 컨버터, IBM-PC 등으로 구성하였으며, 형상정밀도 측정기는 3차원측정기 및 진원도측정기를 사용하였다. Fig.2.1은 실험장치를 나타낸다.

2.2 실험방법

볼 엔드밀로 경사면을 가공할 때 공구의 이동방향에 따라 실제 절삭이 이루어지는 부위의 형상은 Fig.2.2와 같다. 위의 그림은 공구 진행방향에 따른 절삭 상태이고, 아래 그림은 볼 엔드밀의 바닥면의 절삭 부위를 빗금으로 나타낸다. 즉 상방향 가공시에는 절삭 가공면이 바깥쪽에 분포하고 하방향 가공시에는 안쪽에 분포한다. 여기에서 볼 엔드밀의 바깥쪽의 절삭성이 양호하다는 것을 고려하면 상방향 절삭이 바람직하다.

구면을 가공하기 위한 절삭조건은 평면과 다른 조건이 요구된다. 경사면의 위치에 따른 접촉점의 변화에 따라 절삭조건 변화가 요구되는 복잡한 상황이 전개

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions.

a) Mechanical properties

heat treatment	yield point (kgf/mm ²)	tensile strength (kgf/mm ²)	elongation (%)	H _b
N	35	58	20	220

N : normalizing

b) Chemical compositions

C	Si	Mn	P	S
0.45	0.20	0.70	0.03	0.032

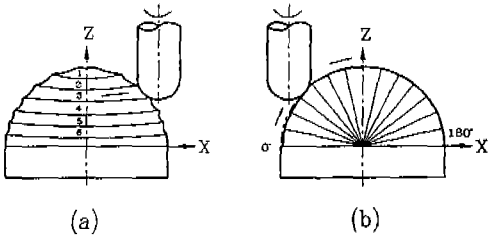


Fig. 2.3 Cutting directions
 (a) circular ball end milling
 (b) up-down ward ball end milling

되므로 절삭조건 선정이 중요하다. NC 밀링에서 공구회전수가 일정한 경우와 절삭속도가 일정한 두 경우에 대해 실험하였고, 각 경우에 대한 가공방법은 Fig. 2.3의 (a)는 볼 엔드밀이 구면의 정점 부위에서부터 1° 간격으로 1회전씩 원주방향 가공하는 방법이고, (b)의 상하방향 가공은 구면의 하부에서 진행되는 공구경로가 구면의 정점을 지나 반대쪽 구면하부 까지 가공하는 방법이다. 볼 엔드밀로 구면(球面) 가공할 경우 축방향 절삭깊이는 절삭여유가 되며 경사면에 대한 볼 엔드밀의 가공경로에 따른 절삭넓이는 공구의 간격(Path interval)에 해당한다. 이 경우 절삭 조건은 대부분 절삭속도(Cutting speed), 즉 공구와 피삭재간의 최대절삭속도와 절삭날당 이송량으로 주어진다.

구면을 가공하기 위한 절삭조건을 구하기 위해서, 구면(球面)의 법선에 대한 각도분봉에 의해 공구경로의 간격(Path interval)을 등분하여, 정점부위에서 0도(구면하부)부위 까지의 절삭 조건의 변화를 계산해 주어야 한다. 따라서 Fig. 2.4와 같이 볼 엔드밀의 접촉 위치에 따른 θ 의 변화에 대한 엔드밀의 접촉점에서의 직경은 다음과 같이 표시한다.

$$d = 2 \cdot c \cdot \cos\theta$$

이때 구면의 접촉점의 절삭 속도는 $V = \frac{\pi d n}{1000}$ 이다.

접촉점에서 피삭재의 중심 위치인 x의 거리는 $x = (R + c)\cos\theta$ 로 나타낼 수 있다.

이러한 구면(球面) 가공에서 절삭속도를 유지하기 위하여 워치들을 활용해 자동프로그램을 작성하며, 가공 조건은 절삭속도가 일정하게 유지되어야 하는 실험에서는 $V = \pi d n$ 의 관계에서 접촉위치에 따라 d가 변하므로 이에 합당한 n을 구한다. 이때 피이드는 절삭날당 절삭력을 일정하게 하기 위하여 n/10으로 정하였다. 이에

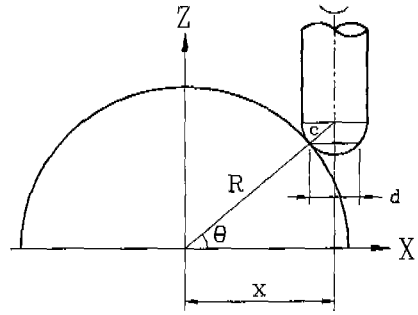


Fig. 2.4 Ball end mill diameter at contact point

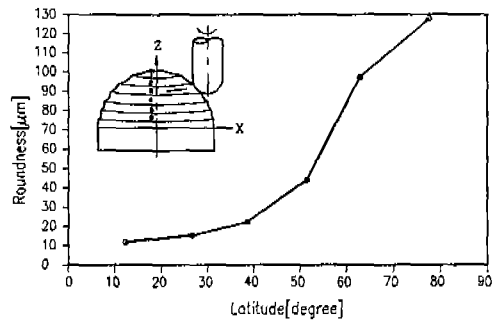


Fig. 3.1 Roundness values on circular machined part (800rpm, ϕ 16 ball end milling)

대한 근거는 참고문헌^{(5),(13)}을 참고하였고, 수차의 가공 실험을 하여 최적피드를 선정하였다. 공구의 회전속도 n이 일정한 경우에는 피이드를 스펀들 회전수의 1/10로 고정된다. 이때는 가공위치(Latitude angle)변화에 따라서 실제 가공시의 공구 절삭참여 부위의 직경이 바뀌므로 절삭속도도 이에 따라 변하게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 형상 정밀도 관계

Fig. 3.1은 구면(球面)의 경사부위에서 공구회전수가 800rpm인 경우 원주방향가공(Fig. 2.3의 a 가공법)한 구면(球面)의 진원도를 나타낸 그림이다.

이 그림에서는 경사도가 작을수록 진원(眞圓)의 오차(誤差)가 작고, 경사도가 클수록 진원의 오차가 크게 나타나고 있는데, 이는 구면(球面)의 경사도가 큰 곳에서 절삭성이 저하되는 것으로 사료된다. Fig. 3.2는 공구의 직경이 $\phi 5$, $\phi 10$, $\phi 16$ 인 볼 엔드밀로 공구 회전수를 일정하게 유지하고, 구면을 상하방향(Fig. 2.3의

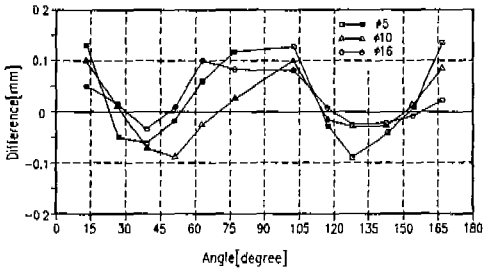


Fig. 3.2 Difference values of radius on the up-down ward machined part (rpm=1800, ϕ 16 ball end milling)

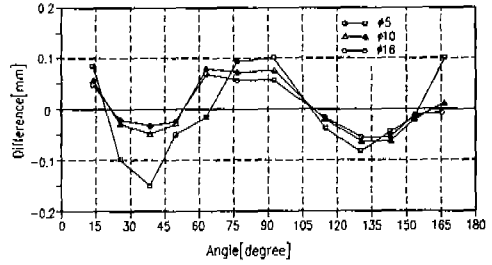


Fig. 3.4 Difference values of radius on the up-down ward machined part (V=30m/min)

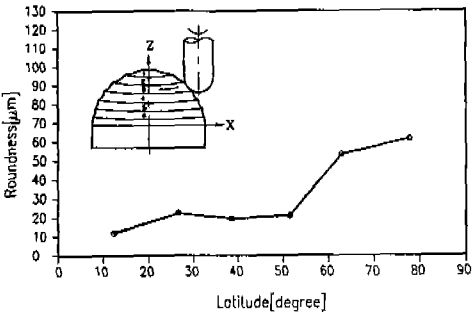


Fig. 3.3 Roundness values on the circular machined part (V=30m/min, ϕ 16 ball end milling)

b가공법)으로 가공했을 때의 구면위치에 따른 반경변화를 3차원측정기로 측정하여 나타낸 것이다. ϕ 5 볼 엔드밀의 경우 가공이 시작될 때와 가공이 끝나는 경사도가 작은 부위에서 공구의 강성과 관련하여 공구의 변형이 있는 것을 알 수 있다. 또한 구면(球面)의 정점 부위에서도 볼 엔드밀의 절삭성과 강성의 영향이 있는 것으로 사료된다. ϕ 10 볼 엔드밀의 경우 구면(球面)의 평균 반지름선인 기준선으로 미소하게 접근된 것을 볼 수 있다. 이는 공구강성의 증가로 공구변형에 의한 오차가 줄어든 것으로 해석할 수 있다. ϕ 16 볼 엔드밀의 경우도 전체적으로는 ϕ 5, ϕ 10과 동일한 경향을 보이고 있으나 그 오차는 상대적으로 작음을 볼 수 있으며, 이는 강성의 증대에 기인하는 것으로 사료된다.

한편, 공구강성이 충분하면 상방향 가공보다 하방향 가공의 가공성이 좋은 것도 볼 수 있다.

Fig. 3.3은 절삭속도가 30m/min일 때 원주(circular)가공된 구면(球面)에 대한 경사부위의 진원도 크기를 나타내는 그림이다. 이 그림에서도 경사도가 클수록

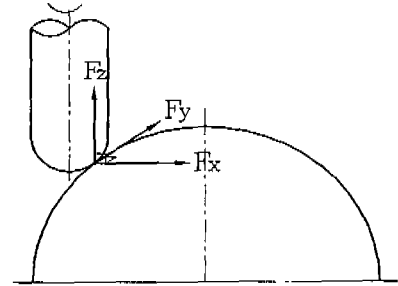


Fig. 3.5 The components of cutting force

진원의 오차가 크게 나타나고 있으며, 특히 경사도가 60° (수평 평면에 대한 경사도는 30°)를 넘으면 진원의 오차가 상승되고 있다. 따라서 경사도가 큰 부위에서 볼 엔드밀의 가공성이 떨어짐을 예측할 수 있다. Fig.3.4은 공구직경이 ϕ 5, ϕ 10, ϕ 16인 볼 엔드밀로 절삭속도 일정인 30m/min를 유지시키고 구면(球面)의 경사를 따라 가공하는 방법(Fig.2.2의 b)으로 가공된 면을 3차원 측정기로 측정하여 형상오차인 구면의 위치에 따른 반경변화를 나타낸 그림이다. Fig.3.2의 경우와 비슷한 양상을 보이고 있으나 전체적으로 보면 점진적으로 기준선에 접근하는 것을 볼 수 있는데, 이는 절삭속도 일정이라는 절삭조건에 따른 가공성의 개선으로 사료된다. 또한 양 그림에서 공통적인 것으로는 수직에 가까운 15° , 165° 부근과 평면에 가까운 90° 부근에서 과소절삭이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 또한, 공구강성이 충분한 경우 상방향 가공시 보다 하방향 가공시에 형상오차가 작은 것을 볼 수 있으며, 이는 볼 엔드밀링의 가공특성의 하나인 것으로 사료된다.

3.2 절삭력 관계

Fig.3.5는 본 실험에 적용한 절삭력 좌표계를 나타

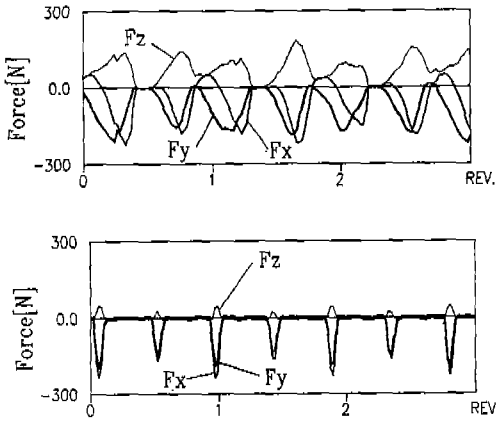


Fig. 3.6-7 Cutting resistance of circular milling at constant rpm ($\theta=78\text{deg.}$, $\theta=26\text{deg.}$), 800rpm

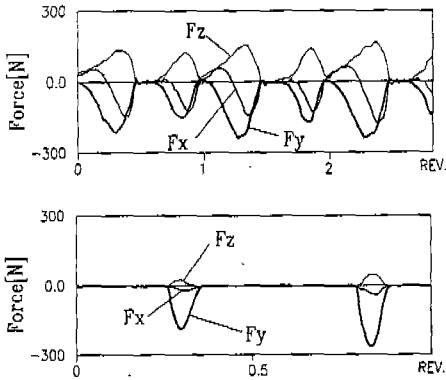


Fig. 3.8-9 Cutting resistance of circular milling at constant V ($\theta=78\text{deg.}$, $\theta=26\text{deg.}$), V = 30m/min

낸다.

Fig. 3.6-7은 공구 회전수가 일정할때 원주방향(圓周方向) 가공에 대한 구면(球面)에 있어서의 경사부위에 따른 절삭력(切削力) 관계를 나타내는 그림이다. F_x 성분(구면의 중심 X방향)이 처음에는 크고, 다음 성분이 작게 나타난 것은 공구의 절삭날이 두날 중 하나는 크고 하나는 작음을 의미한다. 그림의 중심(zero)선을 기준으로 성분이 위 아래로 생기는 것은 절삭위치에 따른 절삭력의 상태이다. 모든 성분파형이 중심선상에 가깝고 파형의 모양이 명확하게 나오면 절삭상태가 양호하고, 좋은 가공면을 얻을 수 있다고 보아진다. 경사각도 θ 가 작은 경우에는 3분력이 주기적으로 얇게 나타나고 있으나 θ 가 증가할수록 즉 평면 형상에 가까워 질 수록

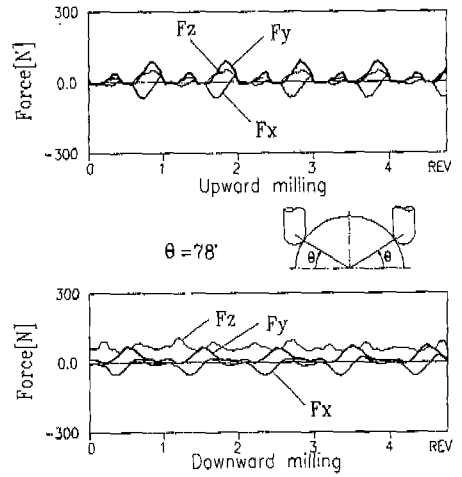
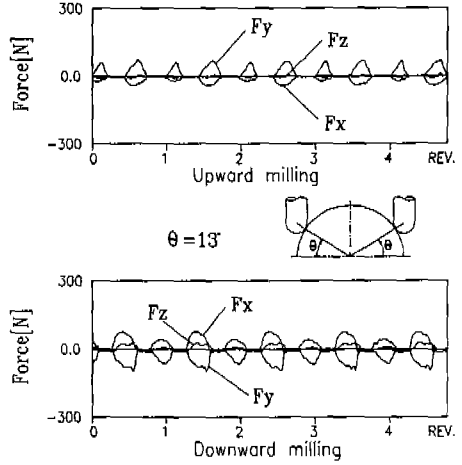


Fig. 3.10-11 Cutting force comparison of upward and downward ball-end milling ($\phi 5$) in constant rpm (1800)

주기적이면서도 넓은 폭의 절삭저항이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 공구와의 접촉점에서 절삭날이 공구와의 접하는 시간 즉 절삭량이 많아진 것을 의미한다. 따라서 이러한 파장(波長)이 길고 넓은 주파수(周波數) 성분이 형상정밀도에 영향을 주어 Fig. 3.1에서 보는 바와 같은 진원도 크기의 변화가 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 3.8-9은 절삭 속도 일정의 원주방향 밀링에 대한 것이다. 여기서도 경사도에 따른 절삭저항의 변화 거동은 Fig. 3.6-7과 거의 동일하다. Fig. 3.10-11은 $\phi 5$ 볼 엔드밀의 회전수가 일정일때 상방향과 하방향의

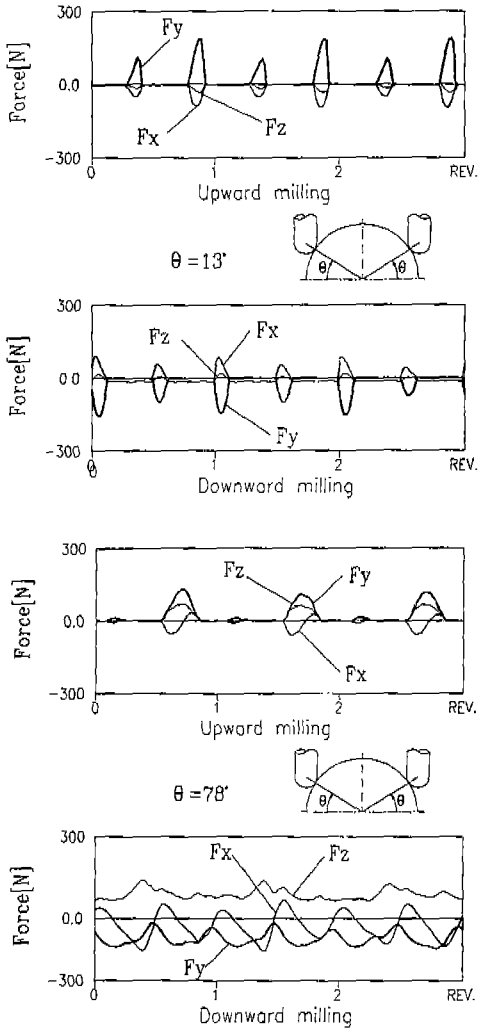


Fig. 3.12-13 Cutting force comparison of upward and downward ball-end milling (ϕ 16) in constant rpm (600)

구면(球面)가공에 대한 절삭력 관계를 나타내는 그림이다. 상방향 가공시 θ 가 13° 부위에서는 주파수 상태가 비교적 잘 형성되고 있으나, 하방향의 경우에는 파형(波形)이 나빠지고 있음을 볼 수 있다. 경사각 78° 를 보면 상방향 가공시의 성분형태가 점차 불안정해지고 있으며, 특히 하방향 가공에서는 더 심하게 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이는 절삭상태의 변화에 따른 공구강성에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 3.12-13은 ϕ 16볼 엔드밀의 회전수를 600rpm으

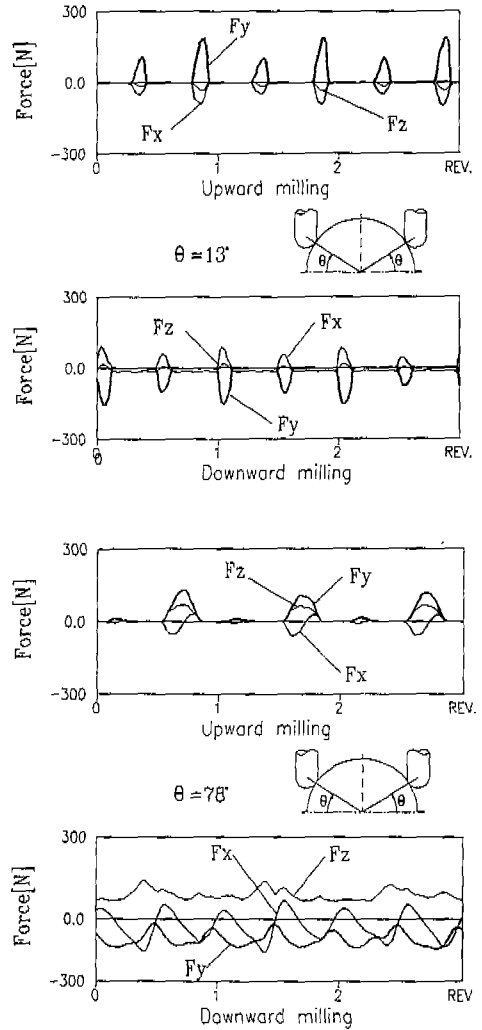


Fig. 3.14-15 Cutting force comparison of upward and downward ball-end milling (ϕ 16) in constant V (30m/min)

로 고정한 상태의 상방향 및 하방향 가공의 절삭력 측정 그림이다. 절삭력(切削力) 성분을 비교해 보면, 상방향 13° 부위와 하방향 13° 부위에서 매우 좋은 성분파형을 가지고 있고 78° 부위에서는 절삭력 성분의 형태가 나빠지는데, 이에 따라 절삭성도 변화됨을 알 수 있다. 특히 절삭속도 일정인 Fig. 3.14-15의 절삭속도 $V=30\text{m/min}$ 으로 고정한 경우를 보면 Fig. 3.12-13의 경우와 비교하여, 주파수 성분의 형태가 명확하고 중심선에 가까이 가고 있어, 절삭성이 향상됨을 보이고 있다.

4. 결 론

볼 엔드밀에 의한 곡면가공시의 형상오차 및 절삭력 특성을 규명코자 $\phi 5$, $\phi 10$, $\phi 16$ 볼 엔드밀을 이용하여, 원주방향 및 상하방향의 밀링가공을 실시하였다. 이때 가공시편으로는 기하학적으로 응용이 편리한 구면을 사용하였다.

본 실험 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 工具의 剛性이 충분한 볼 엔드 밀링에서는 상방향 절삭보다는 하방향 절삭시에 그 형상오차가 작게 나타난다.

2. 球形의 볼 엔드밀에 의한 원주방향 구면가공시 구면상의 정점부위로 갈수록 眞圓度가 불량하며, 이 경향은 수평면에서의 경사각이 30° 보다 작을경우, 그리고 切削速度가 일정한 경우보다 工具回轉數가 일정한 경우에 더욱 나쁘게 나타난다.

3. 球面の 볼 엔드 밀링 경우 背分力이 작을 수록 양호한 眞圓度가 얻어진다.

4. 공구강성이 충분하고 회전수일정한 경사면에 대한 볼 엔드 밀링에 있어서 上方向의 절삭에는 工具가 安定된 상태이나 下方向의 절삭시에는 不安定한 상태가 된다. 또한 배분력이 클수록 공구는 불안정한 상태가 된다.

5. 경사면가공시 수직에 가까운 15° 와 165° 부근 및 수평에 가까운 90° 부근에서는 과소절삭이 이루어지며, 45° 및 135° 정도의 경사면 부근에서는 과대절삭이 일어난다.

REFERENCES

1. 박희덕, 양민양, "볼 엔드 밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 大韓 機械學會 論文集 第13卷, 第3號, pp. 433-442, 1989.
2. 大庫和孝 外 5人, "金型の 高品位, 高能率 仕上切削法の 開發 日本精密工學會", 第47卷, 第4號,

- pp.649-654, 8, 1981.
3. 岸浪律史, 鈴木裕, "圓弧切れ刃ホルエントミルの 切刃刃形狀と切削性能", 日本精密機械學會, 48卷, 7號, pp.906-912, 8, 1981.
4. 심충건, 양민양, "유연성이 있는 볼 엔드밀 공구의 처짐 모델과 절삭성에 관한 연구", 大韓 機械學會 論文集, 第15卷 3號, pp. 1067-1082, 1991.
5. 서남섭, 金屬切削理論, 東明社, pp.187-205 1985.
6. 한정림, 김평길, 김중성 精密測定II, 賢文社, pp.100-125, 1978.
7. 최병규, CAM system과 CNC절삭가공, 청문각, pp.40-258, 1991.
8. 박경삼, "볼 엔드 밀링에서의 절삭력분석", MIE 89158, (과기원 산업공학과 석사논문) KAIST, 12, 1990.
9. Hyun-Deog Cho, "A Study on the 5-axis Precision Machining for Sculptured Surfaces", DPE 89829, (과기원 정밀공학과 박사논문) KAIST, 12, 1993.
10. G.W.Vicker and K.W.Quan "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining", ASME, J. of Eng. for Ind., vol.111 pp.22-26, 2, 1989.
11. 성광재, "自由曲面的 모델링 및 가공정보 생성에 관한 研究" 忠南大學校 大學院 석사논문, (MME), 2, 1992.
12. D.H.Kim, and B.K.Choi, "Calculation of Economic CL Data for Sculptured Surface Machining", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol.9, No.2, 12, 1983.
13. Nourney, Vollmer and Co., oHG, Verlag Europa-Lehrmittel "Tabellenbuch Metall" fur metallverarbeitende Berufe. pp.156-199, 1977.