

Ball-end milling 에서의 경사면 가공시의 공구진동 특성에 관한 연구

조 병 무*, 유 진 호+, 이 동 주**

A Study on the tool vibration characteristics in inclined surface milling

Byung-Moo Cho*, Jin-Ho Yoo+, Dong-Ju Lee**

Abstract

Inclined surface milling in the mould and die industries is one of the most commonly needed cutting process. For the variety and complexity of cutting characteristics in various cutting condition, it is difficult to select a optimal tool path orientation. The comparative results through FFT analysis in this study provide a guideline for the selection tool path orientation.

Key Words : inclined surface(경사면), cutting condition(절삭조건), tool path orientation(공구경로방향)

1. 서 론

기계산업의 발달과 더불어 복잡한 3차원 곡면형상을 가진 금형제품이 요구되고 고정도화 및 고속화되는 추세이다. 이러한 금형가공의 대부분은 볼 엔드밀 가공에 의해 수행되며 볼 엔드밀링 작업과정은 곡면의 형상, 크기 및 정밀도에 따른 적합한 가공조건이 요구된다. 절삭영역에서 발생하는 공구와 피삭재의 상대적인 구조적 자력진동(self-excited vibration)의 한 형태인 채터(chatter)이다. 절삭과정중에 이 채터가 발생하면 가공면의 치수정밀도, 표면거칠기, 공구수명 및 공작기계의 수명에 나쁜 영향을 끼

치므로 절삭과정의 특성을 파악하여 채터현상이 감소되는 절삭방법을 찾아내는 것이 중요하다고 할 수 있다. 진동을 직접적으로 측정하는 것은 진동모드의 특징적인 형상이 주파수에 의해 영향을 받기 때문에 어렵다. 그러므로 일반적으로 절삭조건에 따른 절삭력 신호를 시간에 대해 측정한다. 이것에 의해 주파수 스펙트럼 분석을 수행하여 공구마모나, 일반적으로 나타나지 않는 고주파수 영역에서의 채터 주파수들과 같은 보다 정확한 요소들을 도출해낸다. 이러한 방법으로 시간영역상에서는 구분이 어려운 절삭중에 나타나는 특성들을 찾아낼 수 있다.

본 내용에서는 경사면 절삭과정에서 발생하는 가공경로

* 주저자, 충남대학교 대학원 기계공학과 (cbmoo@cnu.ac.kr)
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

+ 국방과학연구소

++ 충남대학교 기계공학과

별로 절삭력을 측정하고 주파수 영역에서의 절삭력을 비교하여 주 가공영역에서의 진폭비교를 통하여 각각의 경사각에 대하여 절삭력특성과 접촉면에 의한 공구변형 특성을 파악하였고 FFT분석을 통하여 절삭력에 의한 공구진동분석을 수행하였다. 이를 통하여 제품의 치수정밀도, 표면조도의 향상, 공구수명 연장에 대한 효율적인 절삭방향을 제시하고자 한다.

2. 공구변형에 의한 가공오차

볼랜드밀 가공으로 형성된 표면에서의 가공오차의 원인으로서는 절삭력에 의한 공구변형(tool deflection)이 가장 큰 요인이다. 볼랜드밀의 간단한 공구변형모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지 않는다고 가정하고 Fig. 1과 같이 공구를 외팔보(cantilever beam)로 간주할 수 있다.

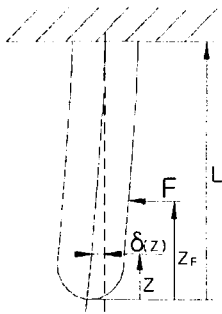


Fig. 1 Simplest tool deflection model

Kline 등⁽³⁾은 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고, 공구 끝단으로부터 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우의 변형모델로, 공구의 끝단에서 Z만큼 떨어진 점에 나타나는 수평변형량 $\delta(z)$ 를 다음과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F_y}{3EK^4} [(z_F - z)^3 - (L - z)^2 + 3(L - z)(L - z_F)]$$

여기서,

Z_F : 절삭력의 중심위치까지의 거리

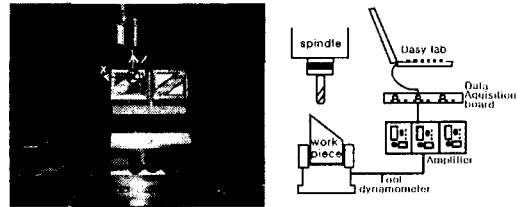
R : 공구반경, E : 공구의 탄성계수

L : 유효공구길이

F_y : 공구끝단에서 절삭력 F 가 작용하는 점까지의 거리

3. 실험장치 및 방법

본 실험은 독일 DECKEL사의 CNC MILLING M/C (FP-2NC)에서 수행되었고 전체적인 장치의 개략도와 Fig. 2에 나타내었다.



Set-up of the cutting test

절삭력 측정은 Kistler사의 3채널 압전형 공구동력계 (3 component piezoelectric dynamometer, Type 9065)를 CNC MILLING M/C의 테이블에 고정하고 치구를 제작하여 공작물을 설치하였다. 절삭신호의 증폭은 용량형 앰프(charge amplifier, KISTLER 5019A)를 사용하였고, sampling 주파수는 2KHz로 설정하였으며 데이터획득장치(DAQ board, IOTECH WAVEBOOK 512H)를 통하여 PC로 전송하여 데이터처리를 하였으며 절삭공구는 2날 솔리드형 고속도강 표준 볼랜드밀 직경 10mm를 사용하였고 경사각이 각각 15°, 30°, 45°가 되도록 제작하였다. 본 실험에서 적용한 절삭조건은 Table 1 과 같이 볼랜드밀 공구에 대한 추천값과 공구제작사의 추천조건을 근간으로 선정하였으며 절삭유제는 사용하지 않았다.

Table 1 Machining conditions

Workpiece	SM45C
	15°, 30°, 45°
Spindle speed	730 rpm
Feed rate	88 mm/min
Feed for tooth	0.06 mm/tooth
Depth of cut	2mm
Pick feed	1.5mm
Tool	R5-2teeth H.S.S.
Tool over hang	50mm

실험 전에 결과의 정확성을 기하기 위해 표면의 흠을 제거하고 평면도를 보장할 목적으로 공작물을 face milling

하였다. 모든 절삭 조건에서의 공구는 tool runout을 10 μ m 이하로 하였다. 이것은 실험전에 0.001mm 분해능의 dial indicator를 이용하여 측정하였다. Fig. 3 은 절삭력의 성분과 방향을 나타낸다. 실험은 결과를 확인하기 위하여 5회 반복 수행하였다. 공작물의 경사면은 15°, 30°, 45° 로 설정하여 경사각도에 따른 절삭력 및 진동이 변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

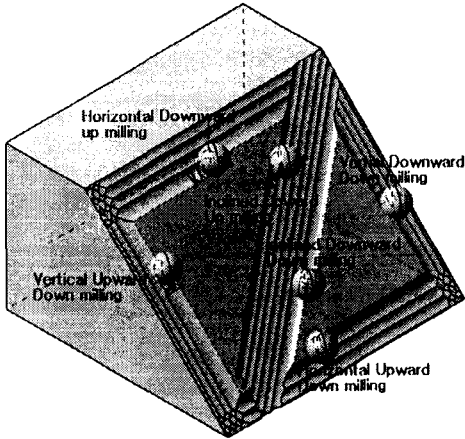


Fig. 3 Samples of tool path orientation

본 논문에서는 반경방향 절삭깊이 보다 축방향 절삭깊이를 주는 것이 접촉면이 측면으로 위치함으로써 공구 안정성 측면에서 좋은 결과를 보인다는 문헌에 의하여 축방향과 반경방향 depth는 일정한 값으로 하여 실험하였다.

먼저, 공구경로 방향별의 가공특성 및 공구 진동특성을 보고자 수직방향과 수평방향의 가공경로에 대하여 실험하였으며, 여기에서 얻어진 결과를 확인하며, 좀더 복잡한 가공조건에 적용하기 위하여 수직과 수평방향 특성이 복합적으로 발생하는 경사면의 공작물에서 경사각을 가지는 공구 경로를 가정하고 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 수평 및 수직방향 경로에서의 절삭력 및 진동

Fig. 3 에서 나타내고 있는 공구 경로방향에 따라서 경사면 가공 시 발생할 수 있는 수평방향 조건과 수직방향 조건을 실험하였다. Fig. 4는 다양한 공구경로의 절삭조건에 대한 날의 절삭 방향(Up/Down)에 따른 공구이송방향 절삭력과 FFT 분석결과를 나타낸다.

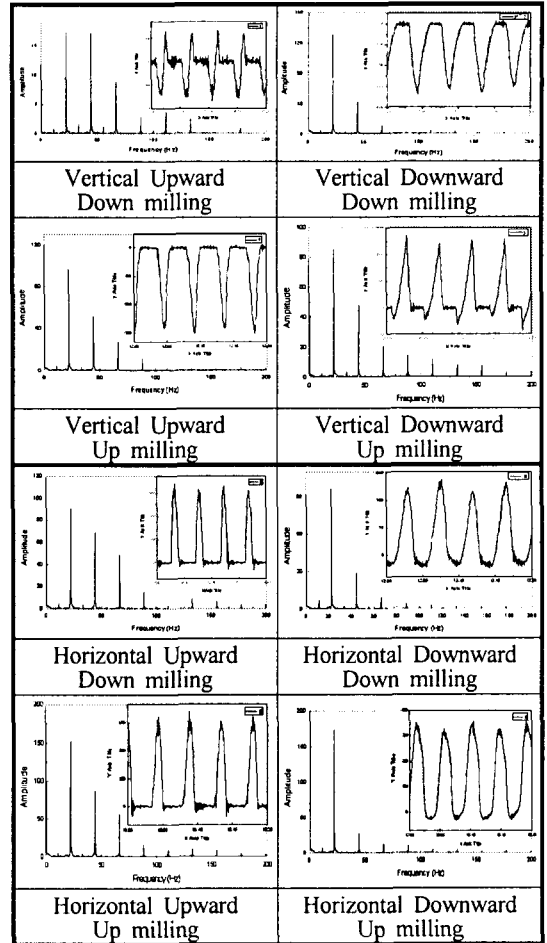


Fig. 4 Fy and FFT analysis on Fy derived from employing vertical or horizontal cutter path orientation in 45° inclined workpiece surface

기존의 참고문헌으로부터, “주요 chatter 발생은 축의 강성과 절삭 속도의 크기가 변하더라도 영향을 받지 않는다.”고 하였으므로, 실험에 있어서 절삭속도는 중요시하지 않았다. 공구 이송방향(Y방향) 절삭력 성분이 공구에 대해, 그리고 chatter 진동에 가장 민감하게 작용한다. 그 이유는 절삭날의 안전높이(relief)와 공작물 표면의 여유면 사이의 직접적인 접촉이 chatter가 발생되도록 가진시키는 주요한 원인기 때문이다. 또한, Ning의 연구로부터 가공시 다른 축에 비해 감쇠비가 가장 작기 때문에 절삭력 중에 공구 진행방향이 chatter 측정에 가장 민감하다고 기술하였다. 따라서 본 논문에서는 공구진행 방향의 절삭력에 대해서 분석하였다.

Fig. 3에서 상향절삭에 해당하는 접촉면은 하향절삭에 해

당하는 그림의 좌우 대칭 형태로 나타나며, 이때 절삭력과 상향절삭 해당부분, 하향절삭 해당부분은 반대로 나타난다. 이송방향의 절삭력을 분석한 본 논문의 결과에서는 상향이 나 하향의 단일 절삭이 일어나는 경우는 상향과 하향의 절삭 결과가 같게 나타났다.

주파수 분석결과에서 연속적으로 나타나는 조화 주파수 성분들은 공구날의 절삭과 관련된 주파수 성분들이다. 하향 절삭의 결과로부터, 상방향 가공으로 조건일 경우의 주절삭 주파수의 진폭이 하방향 가공으로 조건일 경우보다 크게 나타났다. 그와는 별도로 고주파 영역에서 주요한 채터 진동 주파수는 나타나지 않았다. 이것은 공구의 여유면과 공작물사이의 접촉에 의한 힘이 충분히 크다는 것을 의미한다. 이렇게 큰 Y 방향 절삭력은 공구마모를 심화시키는 방향으로 작용한다. 더욱이, 채터 주파수가 발생되지 않았기 때문에 상방향 공구경로일 경우의 공구마모가 주로 일어난다고 할 수 있다. 수직 상방향 경로의 경우 50에서 100Hz 사이에 조화 주파수 성분들이 나타나는데, 이것은 공구의 runout 때문에 발생한 것으로 이것은 공구 날이 손상될 수 있다. 이것은 수직 상방향과 수평 상방향의 경우 많이 나타났는데, 이로 인하여 공구수명이 단축될 수 있다. 반대로 하방향 공구 경로의 경우 주 절삭력 주파수 부분의 값이 작으므로 절삭력이 작다는 것을 의미하며, 공구수명이 길어질 수 있다.

상향절삭의 결과로부터, 수평 하방향 가공의 경우 주 절삭 주파수가 조화 주파수 성분보다 상대적으로 더 작게 나온다. 이러한 경우 공구날이 공작물을 파고들어 얇은 면에서 두꺼운 면으로 칩이 생성된다. 절삭력이 공구를 공작물 방향으로 밀기 때문에, 예상 접촉면은 더 커지고 과 절삭 현상이 발생한다. 그러나 절삭은 안정적으로 이루어진다. 반대로 공구날과 공작물 표면 사이의 간섭이 증가하므로 공구날의 여유면상에서 칩이 발생한다. 수평 상방향 가공 시, 뚜렷한 채터 신호는 발생하지 않았다.

Fig. 5는 공작물의 경사면 각도별 절삭력과 주파수 영역에서의 진폭을 비교한 그림이다.

경사면의 각도별로 주파수 분석 결과를 비교한 결과, 채터로 나타나는 고주파성분의 경사면 각도에 대한 일반적인 경향은 나타나지 않았다. 그러나 각 조건별로는 뚜렷한 경향을 보이기도 하였는데, 예로 수평 하방향 하향절삭에서는 경사면 각도가 작을 경우, 공구 중심이 공구 접촉면에 포함되므로 모든 절삭날의 방향에 대해 절삭이 일어난다. 그러나 경사각이 증가할수록 공구중심에서 멀어지므로 절삭이 일어나지 않는 부분에서 고주파 진동이 일어나는 것으로

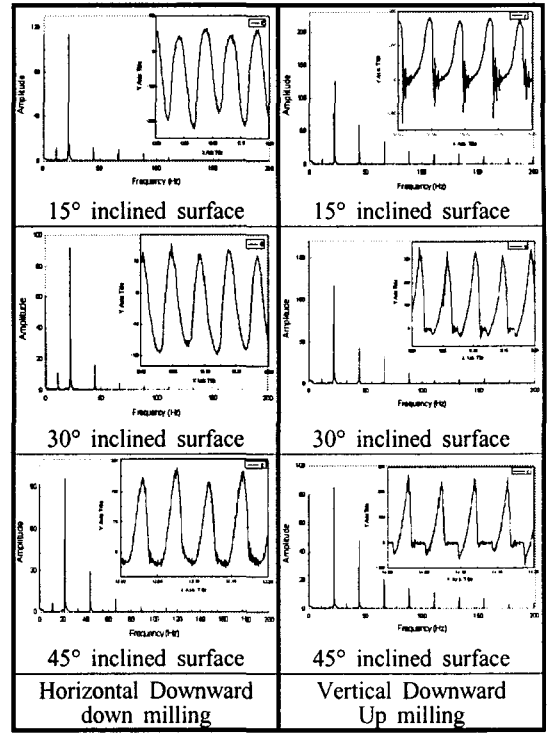
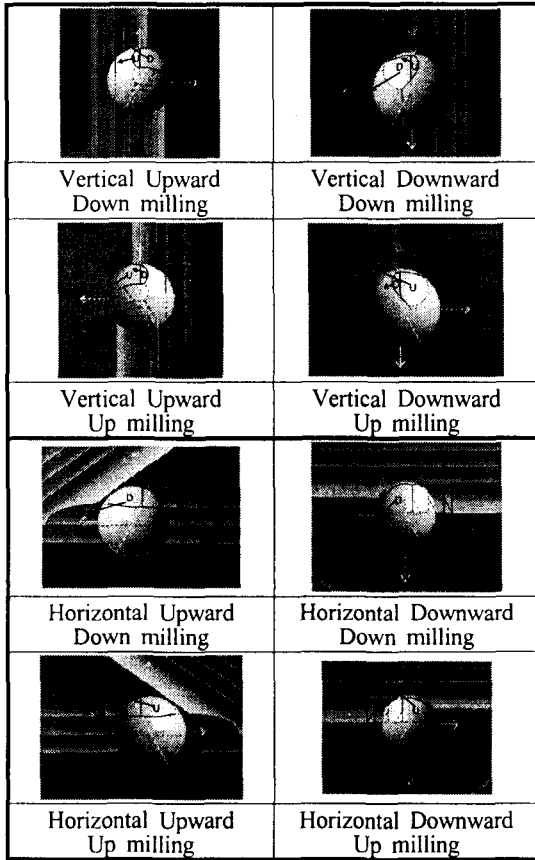


Fig. 5 Comparison of Fy and FFT analysis on Fy varying incline angle

판단된다. 절삭력 분석 결과 중 수직 하방향 상향절삭의 경우 15°에서 주 절삭파형 외에 고주파성분이 발생하는데 이는 공작물 표면에 흔적을 남기므로 나쁜 가공결과를 초래한다. 그 원인으로는 Fig. 5를 참조하면 절삭이 작은 영역의 하향절삭으로 시작하여 큰 영역의 상향절삭으로 바뀌므로, 절삭력은 음의 작은 절삭력에서 큰 양의 절삭력으로 바뀌는 파형을 보여준다. 상향절삭의 경우 얇은 칩의 형상에서 두꺼운 형상으로 마무리가 되므로 파형의 기울기도 완만하게 시작하여 급하게 종료된다. 또한, 한 날이 상향절삭 동안 다른 날이 하향절삭을 시작하며 그 순간 선행 절삭중인 날이 상향절삭을 완료함으로 반대방향의 힘이 순간적으로 작용하여 진동을 일으킨다. 또 다른 요인으로는 절삭 파형 완료 시점에 절삭력이 공작물 방향인 경우 공구의 고주파 부분의 크지 않지만 공작물의 반대방향인 경우 진동이 더 커지므로, 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 15°의 경우 절삭 후의 큰 고주파진동이 발생하는 것으로 판단된다. 각도가 커질수록 상향절삭 부분과 하향절삭 부분이 이격되므로 절삭력 그래프 상에서도 상향절삭과 하향절삭 사이에 간격이 경사각이 커질수록 벌어지게 되며, 순간적인 진동이 발생하

지 않게 된다.

Fig 6. 는 수직, 수평 가공시의 진동현상을 규명하기 위하여 45° 경사면에서의 절삭 접촉면을 도시한 것이다.



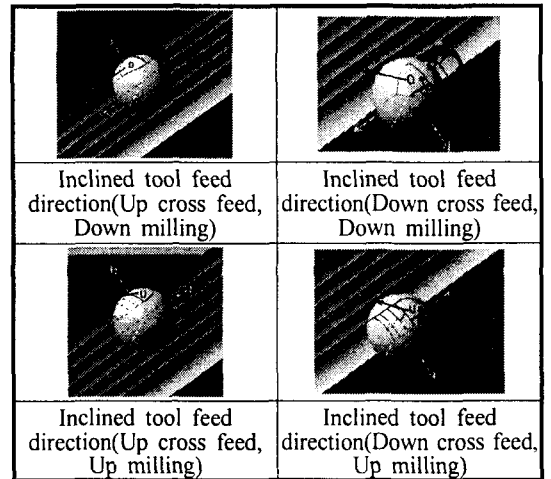
→ : feed direction U : up milling area
 ↗ : pick feed direction D : down milling area

Fig. 6 Cutter contact area during ramping or contouring

볼 엔드밀의 공구 표면에서의 공작물과의 접촉면 발생시, 접촉면의 위치는 경사면의 각도와 이송방향에 따라 결정되며, 접촉면의 크기는 축방향 깊이에 의해 결정된다. 실제 가공이 일어나는 부분의 위치는 공구의 진행방향에 따라 결정되며, 실제 가공이 일어나는 부분의 크기는 feed rate 과 radial depth에 의해 접촉면 내의 어느 부분까지 차지하는가가 결정된다. 그러나 실제 가공에 있어서는 절삭력에 의한 공구의 휨에 의해서도 접촉면의 크기와 위치가 영향을 받는다.

4.2 경사진 공구 이송방향에서의 절삭력 및 진동

수직방향과 수평방향의 가공경로에 대하여 실험한 결과를 확인하며, 좀더 복잡한 가공조건에 적용하기 위하여 수직과 수평방향 특성이 복합적으로 발생하는 경사면의 공작물에서 경사각을 가지는 공구경로를 가정하고 공구의 이송방향에 대하여 절삭 실험을 수행하였다.



→ : feed direction U : up milling area
 ↗ : pick feed direction D : down milling area

Fig. 7 Cutter contact area during inclined tool feed direction cutting

Fig 7.은 45° 경사면에서 공구 이송방향이 45°인 경우이며, 공구 접촉면이 주축 회전수가 이송량 보다 충분히 큰 일반적인 경우의 45°도 경사면을 나타내었다.

공구 이송방향 절삭력에 대해 pick feed 방향과 주절삭력의 방향이 일치할 경우 공구의 휨은 피삭재에 의해서 방해를 받으므로 예상 절삭력 보다 작은 휨 량이 발생하거나 그 방향으로의 과 절삭 현상이 발생한다. 이러한 현상은 실제로 참고문헌에서 slotting 가공 시 공구의 휨에서 나타난다. 경사진 공구 이송방향에서의 절삭력 및 주파수 분석결과는 수직 과 수평 실험에서와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 각각의 조건들은 비슷한 절삭 접촉면 형상을 갖는 수직, 수평 방향 실험과 유사하게 공구이송방향의 절삭력 및 주파수 분석결과를 나타내었다. Fig. 8에서는 45° 경사면에서 공구 이송방향이 45°인 경우의 절삭력과 주파수 영역에서의 진폭을 나타내었다.

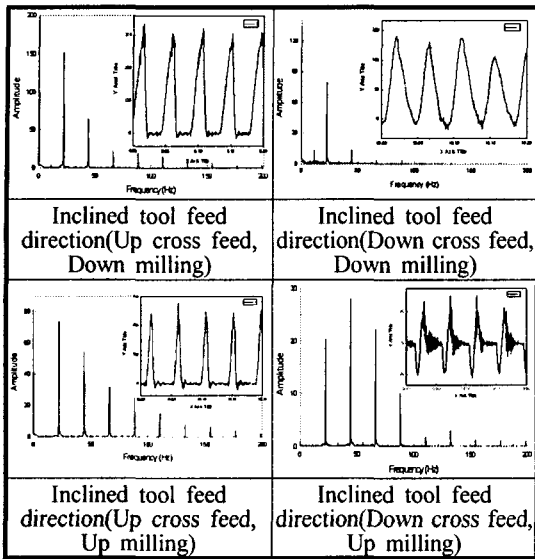


Fig. 8 Fy and FFT analysis on Fy derived from employing inclined tool feed direction cutting in 45° inclined workpiece surface

주파수 분석결과 하방향(Down cross feed) 상향절삭의 경우, 주 절삭 진동보다 높은 주파수에서의 분석 값이 크게 나타났다. 이러한 현상은 경사각이 작아질수록 없어지는데, 발생되는 이유로는 공구 정점이 공작물과 이격된 상태로 절삭력의 방향이 바뀌면서 절삭이 완료되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 경사면 절삭 시 발생할 수 있는 가공경로 별 절삭력을 측정하였으며, 주파수 영역에서의 절삭력을 비교하여 주 가공영역에서의 진폭비교를 통하여 가공경로 중의공구 이송방향 가공 진동영역에서 절삭력 및 진동분석 결과를 비교함으로써 절삭 품질 및 공구마모 측면에서 좋은 가공경로를 선정하기위한 실험을 수행하고 분석하였다. 또한 공구 접촉면을 분석하여 해당 경로 및 공구 이송각도 및 방향별 절삭력의 결과의 원인을 고찰하였다. 본 연구로 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 수직 상 방향 절삭으로 가공할 경우 공구 이송방향 절삭력의 주 절삭 주파수 성분들에서의 값이 커짐으로 microchipping 과 macrochipping이 발생하는 경향이 커져

서 공구수명 이 상대적으로 짧아진다. 반대로 하 방향 공구 경로에서는 주 절삭 주파수 영역의 값들이 작아짐으로 공구 마모가 개선되고 공구수명이 길어진다.

- FFT 분석을 통하여 수직 상 방향 절삭을 할 경우 상향, 하향에 관계없이 절삭력의 증가가 아주 작기 때문에 최소의 진동을 보인다.

- FFT 분석 결과 일반적으로 모든 조건에서 상향 절삭의 경우가 하향 절삭의 경우보다 주 절삭 주파수 성분 보다 높은 고주파부분에서 진폭이 높게 산출되었으며, 이것은 칩의 생성에 있어서 두꺼운 부분에 의해서 절삭이 끝나므로 공구에 고주파영역의 진동을 남기는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Hosoi, T., Hoshi, "Cutting Actions of Ball-End Mill with a Spirial Edge", Annals of CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 49~59, 1997
- (2) M. Y. Yang, H. D. Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling", int. J. Mach. Tools & Manufact, Vol. 31, No. 1, pp. 45~54, 1991
- (3) W. A. Kline, R. E. DeVor and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cut", Int. J. of Mach. Tool Des. and Res., Vol. 22, pp.7~22, 1982
- (4) Y. S. Chiou, E. S. Chung, S. Y. Liang, "Analysis of tool wear effect on chatter stability in turning", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, pp. 391~404. 1995