

볼 엔드밀 가공시 공구경로에 따른 절삭특성에 관한 연구

조병무*, 이동주⁺

(논문접수일 2007. 7. 10, 심사완료일 2007. 9. 13)

A Study on Cutting Characteristics According to Cutting Direction in Ball-End Milling

Byoung-Moo Cho*, 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. Especially, when the cutting process becomes unstable, it induces self-excited vibrations, a frequent cause of poor tool life, rough surface finish, damage to the workpiece and the machine tool itself, and excessive down time. 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), self-excited vibration(자력진동), tool path orientation(공구경로방향)

1. 서론

최근 기계, 항공, 전자산업의 발달이 고도화됨에 따라 절삭가공에 있어 부품형상이 복잡해지고 고정밀화를 요구하고 있으며 볼 엔드밀 가공은 큰 부분을 차지하고 있다. 엔드밀 공구는 밀면의 볼 부위의 기하학적 형상 때문에 공구 중심날에서의 절삭은 거의 일어나지 않으며 최외각날에서 큰 절삭력을 발휘하게 되는 절삭력의 불규칙한 형태를 나타낸다^(1,2).

절삭가공에서 발생하는 채터진동(chatter vibration)은 절

삭가공면의 정밀도, 공작기계 및 공구의 수명, 가공공정의 생산성에 영향을 미치며^(3,4), 공작기계부품의 설계 및 구성, 가공공정의 자동화에 중요한 변수로 작용하게 되므로 채터진동의 이론적 규명과 적절한 방지대책이 필요하나, 아직까지도 채터진동에 대한 완전한 이론적 해석이 이루어지지 않고 있다. 채터진동을 방지하려면 무엇보다도 공작기계의 정·동강성을 향상시켜야 하지만^(5,6), 동일 공작기계에서는 단지 절삭조건이나 공구형상의 적절한 변화로 가공 중에 발생하는 채터진동을 감소 또는 없앨 수 있다고 알려져 있다⁽⁷⁾. 따

* 충남대학교 대학원 기계공학과

⁺ 교신저자, 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학부 (dongju@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전시 유성구 공동 220

라서 채터가 발생하면 가공면의 치수정밀도, 표면조도, 공구 마멸이 증대되어 공구수명이 단축되고 공작기계 자체에 손상을 주어 절삭속도와 이송량의 한계에 영향을 끼쳐 생산성 저하가 유발되므로 절삭과정의 특성을 분석하여 채터를 최소화 할 수 있는 절삭조건 및 가공경로를 찾아내는 것이 중요하다 할 수 있다. 이를 통하여 제품의 치수정밀도, 표면조도의 향상, 공구수명 연장에 대한 효율적인 절삭방향을 모색 하고자 한다.

2. 볼 엔드밀의 절삭특성

볼 엔드밀 가공에서 공구 진행경로가 상방향과 하방향 일 때 절삭력의 차이는 절삭영역으로 설명될 수 있으며 절삭영역에 공구정점부의 포함여부를 구분하여 고찰할 필요가 있다⁽⁸⁾.

Fig. 1에서 가공 시 공구정점부가 절삭영역에 포함되지 않 기 위해서는 다음과 같아야 한다.

$$\overline{DF} > \text{절삭깊이(depth of cut)}$$

그리고 \overline{DF} 를 구하면

$$\overline{EB} = R \cdot \sin \zeta \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \overline{DC} &= \overline{BD} - \overline{BC} \\ &= \overline{EB} \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta) \\ &= R \cdot \sin \zeta \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \overline{DF} &= \overline{DC} \cdot \cos \zeta \\ &= [R \cdot \sin \zeta \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta)] \cos \zeta \\ &= R(1 - \cos \zeta) \end{aligned} \tag{3}$$

공구반경(R)이 5mm이고 공작물의 경사각이 15°, 30°, 45° 일 때 식 (3)에 의해 \overline{DF} 를 구해보면 각각 0.17mm, 0.67mm, 1.47mm가 된다. 본 실험에서는 절삭 깊이가 2mm 로 각각의 경사각에 대한 \overline{DF} 가 이보다 작으므로 세 경사면

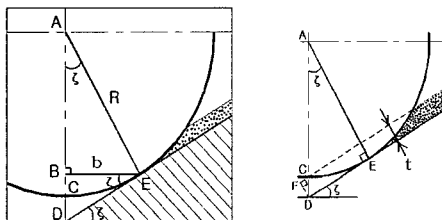


Fig. 1 Geometry of Ball-end mill

모두 공구 정점부가 절삭영역에 포함되지만, 15°일 때 가장 많이 포함되고 45°에서 가장 작게 포함되는 것을 알 수 있다. 따라서 피삭재의 경사각이 15°인 경우 상, 하향 밀링이 가장 많이 함께 존재하고, 45°인 경우에는 상, 하향 밀링의 어느 한쪽이 상대적으로 크게 존재한다고 할 수 있다.

또한, 상향밀링 혹은 하향밀링이 되기 위한 각도한계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (2R - t)t &= b \times b \\ b &= \sqrt{(2R - t)t} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \sin \zeta &= \frac{b}{R} = \frac{\sqrt{(2R - t)t}}{R} \\ \zeta &= \sin^{-1} \frac{\sqrt{(2R - t)t}}{R} \end{aligned} \tag{5}$$

본 실험에서 공구반경(R)은 5mm이고 절삭 깊이가 2mm 이므로, 식 (5)에 의해 상향 또는 하향밀링이 되기 위한 각도 $\zeta \approx 53^\circ$ 가 된다.

따라서 피삭재 경사각이 53° 이상에서는 상향밀링 또는 하향밀링만이 존재하는 것을 알 수 있다.

3. 절삭력 신호의 진폭변화

일반적으로 채터의 감지를 위하여 공구-공작물계에 대한 동적특성을 파악하고, 고유진동수 근처의 진동신호를 포착 하는 방법이 있으나, 이는 가공 전 공구/공작물계의 동적 특성을 미리 알고 있어야 하므로 현실적으로 거의 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 주파수 특성을 고려하지 않고 신호의 진폭변화만을 이용하여 채터를 감지할 수 있다⁽⁹⁾. 채터가 발생하는 경우, 절삭력의 가장 현저한 차이는 진동 진폭이 커진다는 사실에 의해 절삭력 신호로 채터를 감지하기 위하여 배분력 신호의 포락신호(envelope signal)를 이용하고 이것의 분포를 볼 수 있는 모드선도(mode diagram)를 통하여 채터신호를 다른 주기적 신호 및 절삭력이 크게 요동되는 다른 신호와 구분할 수 있다⁽¹⁰⁾.

Fig. 2는 가공 중 실시간으로 계산된 두 포락 신호 사이의 거리를 추적하여 그린 모드 선도로서 x축은 두 포락 신호의 상대적 거리(gap width)를 의미하고, y축은 특정시간 동안 계산된 그 거리의 빈도수(frequency)를 의미한다.

이 그래프에서 모드(mode)와 모드폭(mode width)이라는 두 개의 특성치를 정의한다. 모드는 그래프에서 빈도수가 가장 많은 두 포락 신호의 상대적 거리를 의미하고 이는 그

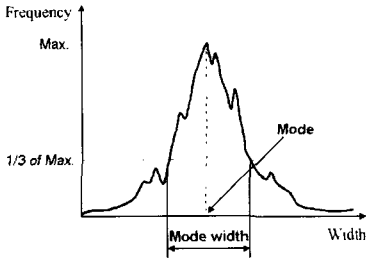


Fig. 2 Typical mode diagram

거리의 평균값과는 다른 의미를 갖는다. 한편, 모드폭은 모드에서의 빈도수의 1/3되는 빈도수의 폭을 의미한다. 즉, 채터가 발생한 경우에는 정상적인 절삭이 진행될 때에 비해 절삭력의 변화폭이 크므로 두 포락 신호 사이의 거리가 커져 모드 값은 커지게 된다. 또한, 모드폭은 단순히 절삭력의 요동폭이 큰 경우와 구분하기 위해 두 포락 신호사이의 거리의 분산 정도를 나타낸다. 가공 중 채터가 발생하게 되면 절삭력의 진폭이 커질 뿐만 아니라 크게 변화하므로, 모드폭을 넓게 만들도록 작용하게 된다. 또한 모드의 크기는 상대적인 채터의 강도를 의미하게 된다.

4. 실험장치 및 방법

본 실험은 독일 Deckel사의 CNC Milling M/C(FP-2NC)에서 수행되었고 전체적인 장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

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

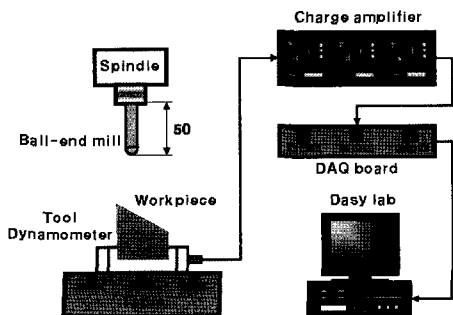


Fig. 3 Set-up of the cutting test

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 불엔드밀 Φ 10를 사용하였고 경사각이 각각 15°, 30°, 45°가 되도록 제작하였다. 본 실험에서 적합한 절삭조건은 Table 1과 같이 불엔드밀 공구에 대한 추천값과 공구제작사의 추천조건을 근간으로 선정하였으며 절삭유제는 사용하지 않았다.

실험 전에 결과의 정확성을 기하기 위해 표면의 요철을 일정하게 하도록 면삭 하였다. 모든 절삭 조건에서의 공구는 런아웃을 10 μ m 이하로 하였다. 이것은 실험 전에 0.001mm 분해능의 다이얼 인디케이터를 이용하여 측정하였다.

Fig. 4는 가공경로별 공구진행 방향을 나타내고 있다. 실험은 가공경로별로 5회 반복 수행하였고, 공작물의 경사면은 15°, 30°, 45°로 설정하여 경사각도에 따른 절삭력 및 특

Table 1 Machining conditions

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

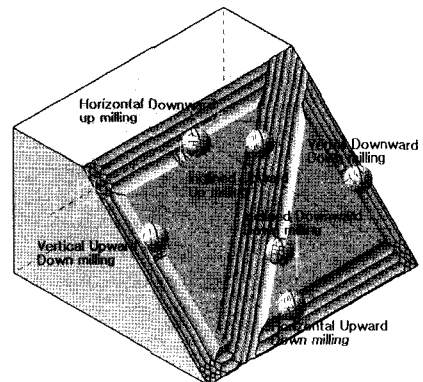


Fig. 4 Samples of tool path orientation

성 관찰할 수 있도록 하였다.

공구의 돌출길이는 50mm로 하였으며, 축방향과 반경방향 절삭깊이는 일정한 값으로 하여 실험하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 수평 및 수직방향 경로에서의 절삭력 및 특성

Fig. 5는 다양한 공구경로의 절삭조건에 대한 날의 절삭방향(up/down)에 따른 공구이송방향 절삭력과 FFT 분석결

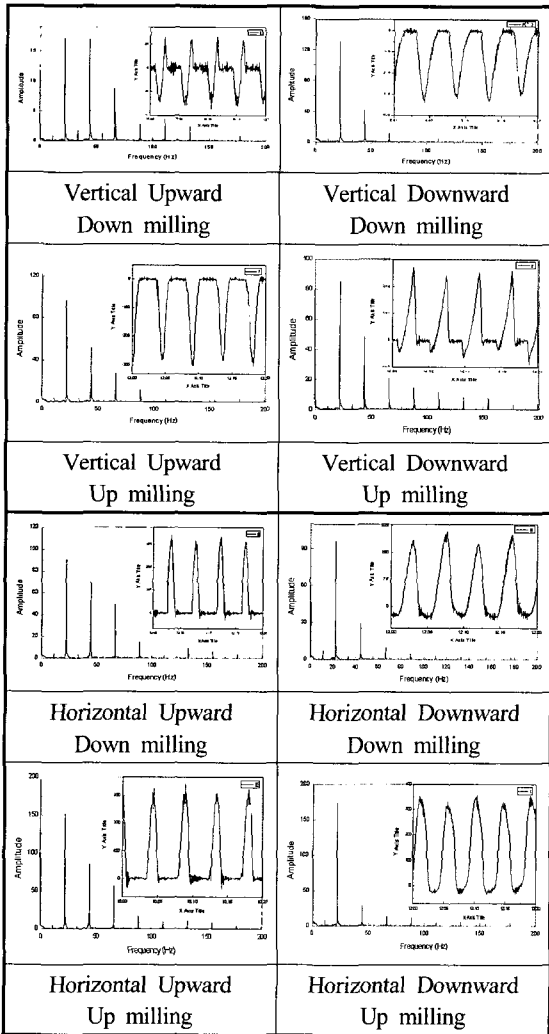


Fig. 5 Fy and FFT analysis on Fy derived from employing vertical or horizontal cutter path orientation in 45° inclined workpiece surface

과를 나타낸다.

가공 중 채터가 발생하면, 공구 이송방향(Y방향) 절삭력 성분이 공구에 대해, 그리고 채터진동에 가장 민감하게 작용한다. 따라서 본 논문에서는 공구진행 방향의 절삭력에 대해서 분석하였다.

상향절삭에 해당하는 접촉면은 하향절삭에 해당하는 그림의 좌우 대칭 형태로 나타나며, 이때 절삭력과 상향절삭 해당부분, 하향절삭 해당부분은 반대로 나타난다. 이송방향의 절삭력을 분석한 본 논문의 결과에서는 상향이나 하향의 단일 절삭이 일어나는 경우는 상향과 하향의 절삭 결과가 같게 나타났다. 주파수 분석결과에서 연속적으로 나타나는 조화 주파수 성분들은 공구날의 절삭과 관련된 주파수 성분들이다. 하향절삭의 결과로부터, 상방향 가공경로 조건일 경우의 주절삭 주파수의 진폭이 하방향 가공경로 조건일 경우보다 크게 나타났다.

수직 상방향 경로의 경우 50 ~ 150Hz 사이에 조화 주파수 성분들이 나타나는데, 이것은 공구의 린아웃 때문에 발생한 것으로 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 의미한다.

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 여유면 상에서 칩이 발생한다. 수평 상방향 가공 시, 뚜렷한 채터신호는 발생하지 않았다.

Fig. 6은 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 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 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 고주파 성분이 크지 않지만 공작물의 반대방향인 경우 진동이 더 커지므로, 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 15°의 경우 절삭 후 큰 고주파진동이 발생하는 것으로 판단된다.

각도가 커질수록 상향절삭 부분과 하향절삭 부분이 이격되므로 절삭력 그래프 상에서도 상향절삭과 하향절삭 사이

에 간격이 경사각이 커질수록 벌어지게 되며, 순간적인 진동이 발생하지 않게 된다.

5.2 경사진 공구 이송방향에서의 절삭력 및 특성

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.

공구 이송방향 절삭력에 대해 피크피드(pick feed) 방향과 주절삭력의 방향이 일치할 경우 공구의 힘은 피삭재에 의해서 방해받을므로 예상 절삭력 보다 작은 힘 량이 발생하거나 그 방향으로의 과 절삭 현상이 발생한다. 경사진 공구 이송방향에서의 절삭력 및 주파수 분석결과는 수직과 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. 7은 45° 경사면에서 공구 이송방향이 45°인 경우의 절삭력과 주파수 영역에서의 진폭을 나타내었다.

주파수 분석결과 하방향(down cross feed) 상향절삭의 경

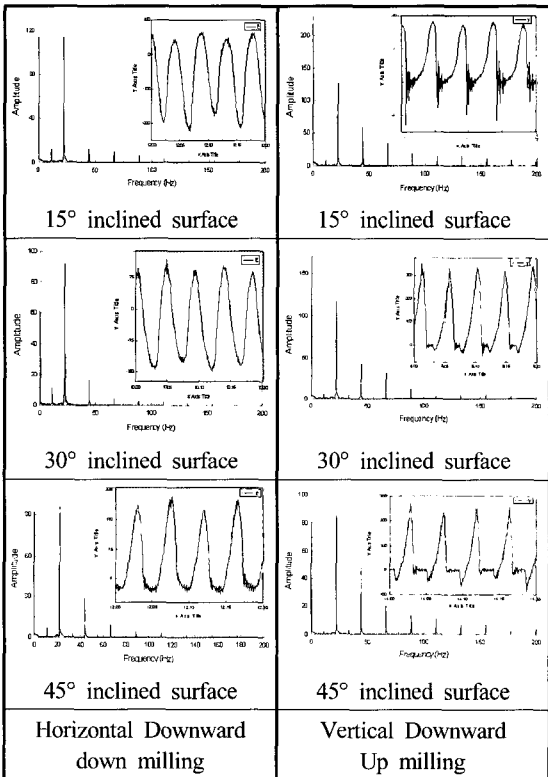


Fig. 6 Comparison of Fy and FFT analysis on Fy varying incline angle

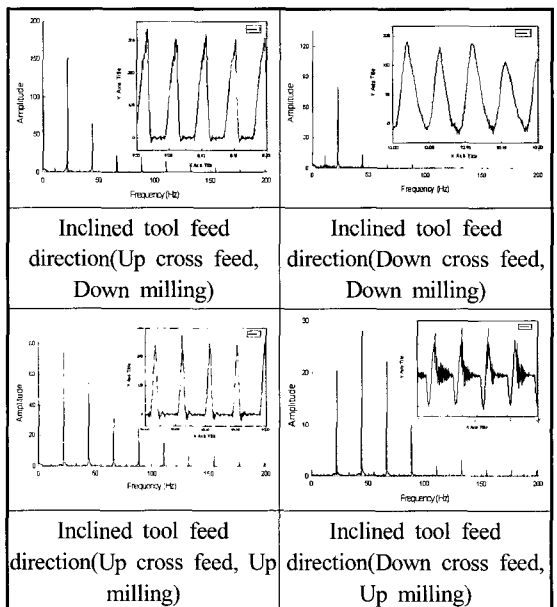


Fig. 7 Fy and FFT analysis on Fy derived from employing inclined tool feed direction cutting in 45° inclined workpiece surface

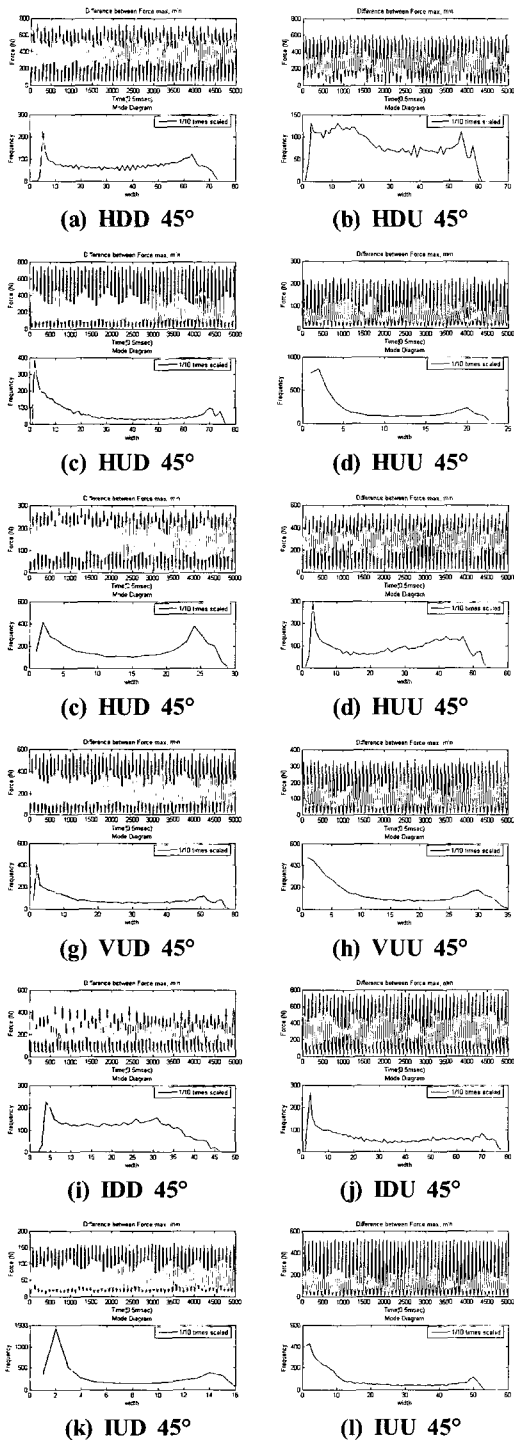


Fig. 8. Mode diagram in the various cutting conditions of inclined angle 45°

우, 주 절삭 진동보다 높은 주파수에서의 분석 값이 크게 나타났다. 이러한 현상은 경사각이 작아질수록 없어지는데, 발생하는 이유로는 공구 정점이 공작물과 이격된 상태로 절삭력의 방향이 바뀌면서 절삭이 완료되기 때문인 것으로 판단된다.

5.3 경로별 절삭력 진동진폭의 변화

Fig. 8은 경사각 45°일 때 다양한 가공경로에서 절삭력의 배분력에 대한 최대값과 최소값의 차이와 모드 선도를 나타내었다.

일반적으로 채터가 발생하는 경우에 절삭력은 상당히 큰 진폭으로 요동하며, 두 포락 신호의 편차도 크다. 또한, 모드 선도에서는 수평축이 상대적으로 크며 수직축은 짧게 된다. 이는 절삭신호의 진폭이 크게 변화함으로 인해 두 포락신호의 편차가 넓은 분포를 가지며 각각의 폭에 대한 빈도수가 적어지기 때문이다.

또한, 가공 중에 불연속형의 칩이 발생하는 경우에 절삭력의 요동 때문에 단순히 절삭력의 요동 폭만을 이용하여 채터를 감지하거나 혹은 절삭력의 주파수 특성을 고려하는 경우에 잘못 판단할 수 있다. 그러나 모드선도에서는 거의 정상적인 가공이 일어날 때와 유사한 신호가 나타나기 때문에 채터신호와 구분될 수 있다.

이 그림에서 (b), (i)를 제외한 대부분의 그래프에서 비슷한 경향의 절삭력의 진폭변화를 보이고 있으며, 전체적으로 채터가 발생하였다고 할 만한 신호는 검출되지 않았다. 또한, (b)와 (i)의 절삭 진동의 진폭변화와 모드선도를 보면 (b)가 절삭력의 편차가 크지만, 모드선도는 비슷한 경향이 나타남을 알 수 있다. 이는 채터신호와 구별되는 것으로서 불연속형의 칩이 가공 중에 발생하기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 볼 엔드밀에 의한 경사면 절삭 시의 가공경로별 절삭력에 대한 절삭파형을 분석하였고, 주파수 영역에서의 절삭력을 비교하고 주절삭 주파수와의 또한 모드선도를 통하여 절삭력 신호의 진동진폭의 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수직 상 방향 절삭의 경우 조화주파수 성분들이 나타나 공구의 수명이 짧아지는 경향이 많고, 하향 방향에서는 주 절삭 주파수 영역의 값들이 작아서 수직 하방향의 절삭이 공구수명에 유리함을 확인하였다.

- (2) 일반적으로 상향 절삭의 경우가 하향 절삭의 경우보다 주 절삭 주파수 성분 보다 높은 고주파부분에서 진폭이 높게 나타났으며, 이것은 칩의 생성이 공구에 고주파영역의 진동을 남기는 것으로서 상향절삭이 공구마멸에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- (3) 공구의 한 날이 절삭이 끝난 후 다음 절삭이 이루어지는 시간 동안 절삭력의 진동이 심한 부분은 조화주파수가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 이는 작은 절삭량으로 시작하여 큰 절삭량으로 끝나면서 순간적인 진동이 남는 상향절삭에서 주로 발생하는 것을 확인하였다.
- (4) 절삭조건 등의 요인으로 인하여 뚜렷하게 채터가 발생하지는 않았지만 절삭력 신호의 진동진폭의 변화를 추적함으로써 좀 더 가혹한 가공조건에서 관찰한다면 채터 발생을 감지할 수 있는 방법임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Feng, H. Y. and Menq., C. H., 1996, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *Trans. ASME, J. of Manufact. Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 461~469.
- (2) Yang, M. Y. and Park, H. D., 1991, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," *international Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 31,

- No. 1, pp. 45~54.
- (3) Merritt, H. E., 1965, "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter," *Trans. ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 87, pp. 447~454.
- (4) Smith, S. and Tlustý, J., 1990, "Update on High-Speed Milling Dynamics," *Trans. ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 112, pp. 142~149.
- (5) Elbestawi, M. A., Papazafiriou, T. A. and Du, R. X., 1991, "In-process monitoring of tool wear in milling using cutting force signature," *int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 31, No. 1, pp. 55~73.
- (6) Kim, B. S. and Kim, J. K., 2002, "The Parameters Identification of Chatter Vibration in Turning Works," *Trans. KSMTE*, Vol. 11, No. 6, pp. 83~90.
- (7) Tobias, S. A. and Fishwick, W., 1958, "The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions," *Trans. of the ASME*, Vol. 80, pp. 1079~1088.
- (8) Kim, K. K., Kang, M. C., Lee, D. W., Kim, J. S. and Lee, Y. C., 1999, "Characteristics of Inclined Plane Constructed by High speed Ball End Milling according to the Variation of Cutting Direction(1)," *Journal of the KSMTE*, Vol. 8, No. 2, pp. 137~143.
- (9) Subramanian, T. L., DeVries, M. F. and Wu, S. M., 1976, "An Investigation of Computer Control of Machining Chatter," *Trans. ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 98, pp. 1209~1214.
- (10) Youn, J. W., 2000, "A Study of Chatter Sensing using Cutting Force," *Trans. of KSMTE*, Vol. 9, No. 3, pp. 150~159.