

2차원 공구진동기구의 변위 해석

손성민*(부산대학교 대학원), 임한석(부산대 기계기술연구소), 안중환(부산대 기계공학부)

A Displacement Analysis of 2-Dimensional Tool Vibrator

S. M. Son(Graduate School, PNU), H. S. Lim(RIMT, PNU), J.H. Ahn(School of Mechanical eng. PNU)

ABSTRACT

In this paper, the theoretical tool displacement and surface roughness are analyzed based on the tool locus of a 2-dimensional tool vibrator. At first, the effects assuming no structural deformation of such variables as frequency, amplitude and phase difference that determine tool loci are simulated. The results show that larger amplitude and/or higher frequency makes better surface. However, a real tool vibrator has the structural deformation, much or less, depending on the excitation frequency. Applying FEM analysis to the deformation of a designed 2D tool vibrator according to the excitation, it has been proved that in this case the displacement is $5\mu\text{m}$ at 1kHz and almost 0 at 20kHz even under the same excitation amplitude.

Key Words : 2D vibration cutting (2차원 진동절삭), variation of tool locus (공구궤적의 변화), deformation of 2D tool vibrator (2차원 공구진동자의 변형)

1. 서론

초정밀 절삭가공기술은 고정밀도 미러나 렌즈 등의 광학부품과 전자부품, 정보기기 등을 생산하기 위한 방법으로 발달해 왔으며, 보다 소형·고집적화의 방향으로 진행되어 가고 있다. 이러한 연구의 하나로 미세절삭가공에서 발생하는 치수효과(size effect)에 의한 재료의 소성변형이나 국부적 탈락을 방지하고 버(burr)의 발생을 억제하기 위한 방법으로 진동절삭이란 방법이 제안되었고⁽¹⁾, 또한 공구의 진동을 2차원화한 방법도 발표되었으며⁽²⁾ 저자들도 이를 제작·실험하여 그 효과를 발표한 바 있다.⁽³⁾

미세절삭가공에서 2차원 진동절삭은 절삭부의 강성증대효과를 유도하여 일반절삭의 경우보다 chatter마크와 버의 발생을 억제하고, 가공면의 품질을 향상시킬 수 있음이 확인되었으나 가공조건에 따라 그 효과는 크게 달라질 수 있다. 적절한 가공조건은 공구의 진동형태와 관련되어 결정되어야 한다. 공구의 2차원 진동형태에서 고려되어야 할 인자로 공구진동시의 진폭과 주파수, 공작물의 이송속도 및 공구를

가진하는 2축간의 위상차가 있다. 그러나 이러한 인자들은 가진기구의 구조에 의해 진폭이나 주파수가 제한될 수 있고, 이로 인하여 절삭속도가 제한 된다. 가진기구 2축간의 위상차 또한 서로 간섭하지 않고 독립적으로 진동하는 것이 요구되지만 역시 쉽지 않은 문제로 남아 있다.

본 논문에서는 2차원 진동절삭의 공구궤적을 결정하는 각 요소들(주파수, 진폭, 위상차 및 이송속도)의 변화에 따른 가공면의 정밀도 변화를 시뮬레이션을 통해 조사해 보고 이를 바탕으로 최적 진동절삭 조건에 대해 조사하였다. 그리고, 진동절삭기구에 대한 유한요소 해석 결과를 토대로 고능률·고정도 미세가공을 위한 기구의 구조에 대해 고찰하였다.

2. 2차원 진동절삭의 원리

본 연구에서 대상으로 하는 2차원 진동절삭은 T/4 (T:공구 2차원 진동의 1주기)의 위상차를 가진 임의 주파수 전압을 직각으로 배치되어 있는 압전소자에 인가할 때 생기는 타원형태의 궤적을 따라 공

$$X = A \sin(ft + \phi) + vt \quad (1)$$

$$Y = A \sin(ft)$$

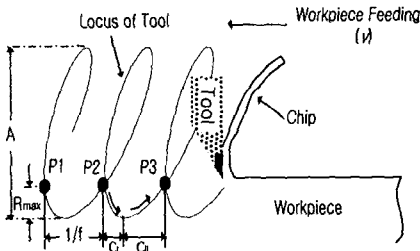


Fig. 1 2D Vibration Cutting

구를 움직이며 가공을 행하는 것이다. 진폭 A , 주파수 f , 위상차 ϕ 로 공구를 진동시키고, 공작물을 v 로 이송시킨다면 실제 가공에서 나타나는 공구의 궤적은 다음의 식(1)과 같이 표현될 수 있고, 그림 1 과 같은 가공형태로 나타나게 된다. 공구가 타원 궤적을 따라 움직이기 때문에 구간 C_I 에서는 공작물을 절삭하며 깊이방향으로 들어가므로 일반절삭과 같은 (+)의 배분력이 되지만 다시 되돌아 나오는 구간 C_{II} 에서는 마찰력의 방향이 일반절삭과 반대(-)값의 배분력이 된다. 이로 인하여 전단각이 커져 전단면적이 감소하게 되므로 진동절삭의 간헐적 절삭과 더불어 절삭저항이 줄어드는 원인이 되고, 절삭저항의 감소는 가공중에 발생하는 소성변형영역을 감소시켜 버의 발생을 억제하는 효과를 기대할 수 있게 한다.

그림 1의 P1, P2, P3는 이론적인 최대 거칠기를 결정하는 점이 되는데, 가공면의 최대거칠기(R_{max})는 식(1)의 A, f, ϕ, v 간의 조합에 의해 변화한다. 여기서는 X축과 Y축의 진폭을 동일하게 한다. 위상차는 궤적의 형태와 공구의 운동방향에 영향을 주는데, 위상차가 고정되어진 조건하에서 결정되는 이론적인 최대거칠기는 주파수가 증가하면 P2와 P3의 간격이 좁아져 작아지게 되고, 절삭속도가 증가하면 P2, P3의 간격이 넓어져 커지게 된다. 또 진폭이 증가하게 되면 P2, P3의 간격에는 변화가 없으나 최대거칠기점이 낮아지게 된다.

3. 2차원 진동궤적에 따른 R_{max} 변화

2차원 진동절삭에서 공구의 궤적을 결정하는 요소인 주파수, 진폭, 위상차를 변수로 하여 공작물 이송속도에 따라 R_{max} 가 변화하는 경향을 시뮬레이션 하였다. 주파수 1kHz, 진폭 5 μ m, 위상차 $T/4$ 를 기준으

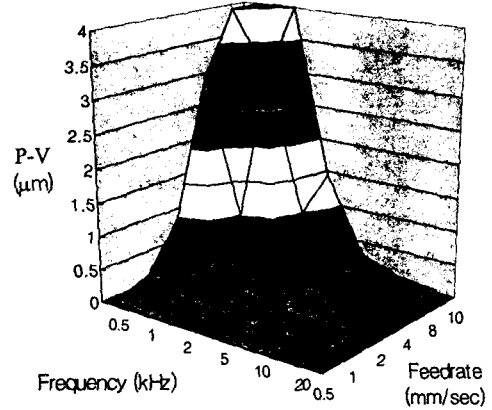


Fig. 2 Simulated P-V according to Frequencies and Feedrates

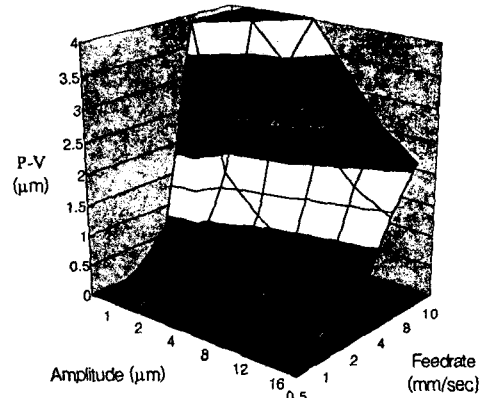


Fig. 3 Simulated P-V according to Amplitudes and Feedrates

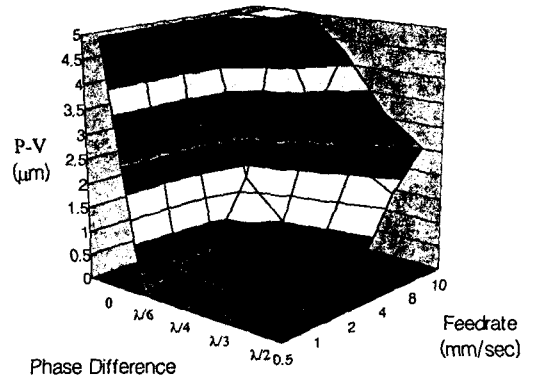


Fig. 4 Simulated P-V according to Phase difference and Feedrates

로 하여 세 인자 중 하나가 변수일 때 다른 인자들은 이 값으로 고정하여 실행하였다.

그림 2는 주파수변화에 따른 R_{max} 변화 경향으로 주파수가 높아짐에 따라 동일 이송속도에서 최대거칠기는 작아짐을 알 수 있으며, 주어진 최대 거칠기에 도달하는 이송속도도 고주파일수록 그 범위가 확대되어 가공의 고능률화에 유리함을 알 수 있다. 그림 3은 진폭변화에 따른 결과로 주파수가 변수로 작용했을 때와 비슷한 경향을 보이지만 가공면의 향상도는 주파수를 증가시켰을 때의 경우에 미치지 못함을 확인할 수 있다. 그 주요 원인으로 주파수는 기준으로 했던 1kHz보다 수십 배 증가시키는 것이 가능하지만 진폭은 압전액츄에이터의 특성상 수십 μm 이상의 변위를 얻는 것이 매우 힘들기 때문이다. 저자들이 실험에 이용하였던 일본 TOKIN사의 AE0505D16의 경우 공진주파수는 69kHz이지만 최대구동전압 인가시 변위량은 $17.4 \pm 2.0 \mu\text{m}$ 이고 통상 사용전압이 이에 미치지 못함을 감안하면 사용 가능한 변위량은 더욱 짧아지게 된다. 그림 4는 2차원 진동절삭 가진기구의 X축(수평)과 Y축(수직)에 입력하는 sine신호의

위상차에 따른 가공면 R_{max} 값의 변화를 나타낸다. 동일 이송속도일 경우, 위상차를 0~T/2의 범위에서 크게 할수록 동일 더 좋은 가공면을 얻을 수 있음을 알 수 있다. T/2~T 구간은 공구가 한 주기 내에서 상향절삭과 하향절삭의 길이비가 0~T/2 구간과 역으로 되지만 같은 값의 R_{max} 가 얻어진다.

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 공구진동의 주파수와 진폭은 가능한 크게 하고 두 축 사이의 위상차는 T/2로 하는 것이 보다 고정도의 가공면을 생성하는 데 유리하다. 그러나, 이러한 인자들을 각각 독립적으로 설정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 진동기구의 재료특성과 형상특성에 의해 가장 큰 진폭을 얻을 수 있는 주파수가 결정되고, 위상차 또한 입력되는 신호와 관계없이 진동기구의 형상에 의존하여 변형되기 때문이다.

4. 실제 진동기구의 변형에 의한 영향

2차원 진동절삭기구가 임의 주파수에서 어떠한

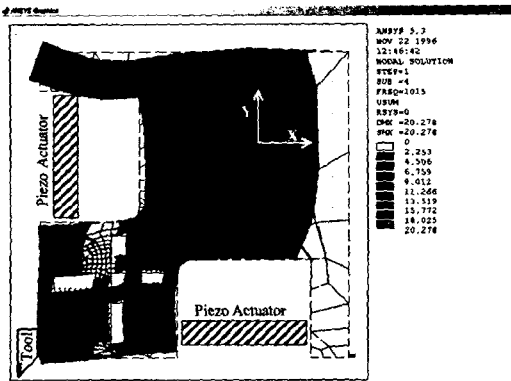


Fig.5 Deformation of the 2D Vibrator at 1kHz

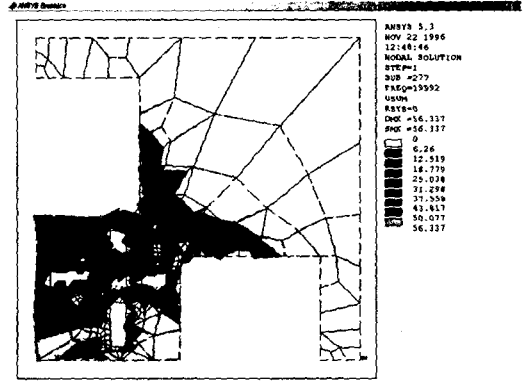


Fig.6 Deformation of the 2D Vibrator at 20kHz

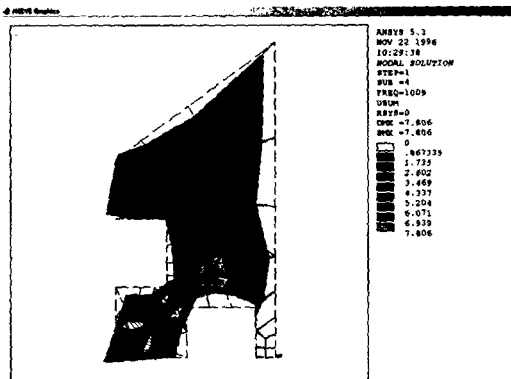


Fig.7 Deformation of the Y-axis reinforced 2D Vibrator at 1kHz

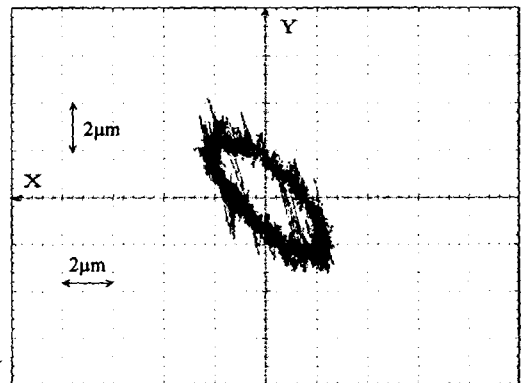


Fig.8 Measured Tool Locus of the 2D Vibrator

변형을 하는지 조사하기 위하여 유한요소해석을 하였다. 유한요소해석프로그램은 ANSYS를 사용하였고 진동절삭기구의 재료는 탄소강으로 하였다. 그림 5는 1kHz부근에서의 변형을 나타낸다. 진동기구의 내부에 있는 홀(hole)은 X축의 변위와 Y축의 변위 사이의 상호간섭을 회피하기 위해 만든 것으로 이 주파수에서는 의도했던 형상으로 변형되었다. 그러나, X축을 지지하는 부분의 변형이 작은 반면, Y축 압전소자를 지지하는 부분의 변형은 크게 나타났다. 그 원인은 진동기구의 X축이 가공기의 Z-column에 고정되어 있는 반면, Y축은 자유단으로 남아 있기 때문이다. 그림 6은 동일한 구조의 진동기구가 20kHz부근에서의 변형하는 모습을 나타내고 있다. 기구내부의 간섭회피홈만 크게 변형되었을 뿐 공구가 부착되는 부분의 변형은 극히 작게 나타났다. 변형해석 결과로 보면 이 2차원 진동기구는 비교적 저주파인 1kHz부근에서는 진동의 두 축이 상호간섭을 적게 받으며 미세가공에 이용할 수 있을 정도의 변위를 생성하지만 초음파영역에서는 변위량이 미미하여 가공에 적용하기 힘들다. 그림 7은 Y축 지지부를 보강했을 때 1kHz부근의 변형해석 결과로 그림 5에서 보이는 Y축 지지부분의 변형이 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그러나, 이 구조 또한 20kHz부근의 변형은 그림 6의 결과와 크게 다르지 않았다. 그림 8은 실제 제작된 2차원 진동절삭기구에 의해 공구를 위상차 T/4, 주파수 1kHz로 가진 하였을 때 나타난 진폭과 레적을 측정된 결과이다. 가진기구의 X축, Y축 모두 5 μ m의 진폭이 측정되었고, 주어진 위상차와 거의 일치하는 타원 형상을 나타내었다.

5. 결론

2차원 진동절삭에 이용되는 공구진동기구의 이론적 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 공구의 진동 주파수, 진폭, 및 두 진동축 간의 위상차를 이송속도에 대해 시뮬레이션한 결과 위상차를 T/2로 설정하여 주파수와 진폭을 가능한 크게 할수록 보다 정밀도가 높은 가공면을 얻을 수 있다.
- 2) 공구계적을 결정하는 인자들(주파수, 진폭, 위상차, 이송속도)이 각각 독립적으로 변할 경우, 주파수, 진폭, 위상차순으로 가공면의 정밀도 향상에 효과적이다.
- 3) 간섭회피홈을 가진 2차원 공구진동기구는 20kHz이상에서는 진폭이 크지 않고 기구의 변형이 미세가공에의 적용에 적합하지 못하였다.

고효율, 고정도 미세가공을 위해서 주파수와 진폭의 증대가 필요하지만, 진동절삭기구의 재료와 형상특성에 의해 물리적으로 결정되는 것으로 보다 높은 강성에서 2차원 진동기구의 X축과 Y축이 상호간섭없이 변형될 수 있는 기구가 필요하다.

참고문헌

1. 隈部淳一郎, '精密加工 振動切削-基礎と應用', 實教出版, 1979.
2. Shamoto, E., Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting", Annals of the CIRP Vol. 43/1, pp35-38, 1994.
3. 손성민, 임한석, 안중환, "진동절삭을 이용한 고정도 미세가공", 한국정밀공학회지, 제16권, 제3호, pp.72-77, 1999.