

슬라이딩 모드 제어를 이용한 마이크로 드릴의 절삭력 제어 Cutting force regulation of micro drilling using the sliding mode control

정 만실(대우전자), 조 동우(포항공과 대학교 기계공학과)

Man Sheel Cheong(Research Engineer), Dong Woo Cho(Pohang Univ of Science and Technology)

ABSTRACT

Micro-hole drilling (holes less than 0.5 mm in diameter with aspect ratios larger than 10) is gaining increased attention in a wide spectrum of precision production industries. Alternative methods such as EDM, laser drilling, etc. can sometimes replace mechanical micro-hole drilling but are not acceptable in PCB manufacture because they yield inferior hole quality and accuracy. The major difficulties in micro-hole drilling are related to wandering motions during the inlet stage, high aspect ratios, high temperature, etc. However, of all the difficulties, the most undesirable one is the increase of drilling force as the drill penetrates deeper into the hole. This is caused mainly by chip related effects. Peck-drilling is thus widely used for deep hole drilling despite the fact that it leads to low productivity. Therefore, in this paper, a method of cutting force regulation is proposed to achieve continuous drilling. A proportional plus derivative (PD) and a sliding mode control algorithm will be implemented for controlling the spindle rotational frequency. Experimental results will show that sliding mode control reduces the nominal cutting force and its variation better than the PD control, resulting in a number of advantages such as an increase in drill life, fast stabilization of the wandering motion, and precise positioning of the hole.

Key words : micro drilling(마이크로 드릴링), aspect ratio(세장비), deep hole drilling(깊은 구멍 가공), cutting force(절삭력), spindle rotational frequency(스핀들 회전속도), PD controller(선형 제어기), sliding mode controller(슬라이딩 모드 제어기)

1 Introduction

구멍가공 기술은 기계가공기술중 가장 기본적인 방법으로 생산성 향상을 목적으로 점차 고속화, 고정밀화되고 있다. 마이크로 구멍 가공은 마이크로 드릴을 이용하는 방법, 방전 가공기를 이용하는 방법, 그리고 레이저를 이용하는 방법등이 있으나 피삭재의 성질과 무관하며 열변형이 작고 가공후의 마무리 작업이 손쉬운 가공이라는 점에서 마이크로 드릴에 의한 가공이 주로 사용되고 있다.

마이크로 드릴은 공구의 강성이 크지 않아서 가공 중 Load가 증가하는 경우 공구의 파손으로 인한 피삭재의 손실과 생산성의 저하가 문제가 된다. 가공 방법으로는 칩 배출을 원활히 하기 위하여 펙 드릴 가공이 주로 이루어진다. 그러나 이는 가공시

간이 길어져 생산성을 크게 떨어지는 단점이 있다.

그리고 마이크로 드릴 가공은 절삭유 공급이 어려워 가공중 발생하는 열의 배출이 효과적으로 이루어 지지 않는다. 이로 인하여 드릴비트의 마모속도가 커지고 피삭재에 변질층이 생기는 스미어(Smear)가 발생하기도 한다. 그리고 일반적인 드릴 작업에서 나타나는 버 역시 나타난다. 또한 드릴의 먹힘 현상은 드릴과 피삭재 모두에게 피해가 있기 때문에 가공의 생산성을 저하시키는 원인이다.⁽³⁾

따라서 가공중의 구멍가공상태를 감시하고 가공 조건을 적절하게 변화시켜 줌으로써 구멍의 가공 정도를 개선하고 동시에 드릴의 변형과 마모를 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

절삭력 제어를 위해서 가공상태를 보여주는 토크와 트러스트의 감시가 이루어져야 한다. 트러스트

의 경우는 일반적인 공구 동력계를 이용하여 검출이 가능하지만, 토크의 경우는 드릴의 직경이 작기 때문에 일반적인 공구동력계(Tool dynamometer)로는 검출이 어렵다. 따라서 이를 검출하기 위한 토크 센서의 개발이 선행되어야 한다. 그리고 검출된 가공상태를 종합하여 적절한 가공조건을 결정하는 집적된 제어 시스템이 구축되어야 한다.

본 논문에서 2장에서 마이크로 드릴시스템과 가공상태의 검출을 위해서 개발한 센서를 소개하고 3장에서는 밸브 스피들 시스템과 절삭 현상 모델의 모사(System identification)를 행하였다. 그리고 4장에서 PD제어와 슬라이딩 모드(Sliding mode control)제어를 이용하여 절삭 깊이에 따라 증가하는 절삭력을 제어하는 방법을 제시한다.

2 Experimental apparatus

그림 (1)은 드릴 시스템의 전체 구성도를 나타낸 것이다. 구동계는 드릴의 이송을 담당하는 이송계와 스피들에 공압을 공급하는 공압비례밸브로 구성된다. 그리고 제어계는 스피들에 인가되는 압력제어를 위한 입력 전압과 이송부의 속도를 결정하기 위한 펄스 발생기(PC)이다. 그리고 드릴 가공 상태 검출을 위한 광센서와 토크-트러스트 센서로 구성이 된다.

본 연구에서는 토크와 트러스트를 분리하여 측정하는 방식을 이용하였다. 토크는 직경이 작은 구리(Copper)에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 이는 직경이 작은 경우 같은 스트레스에 대해서 변형이 크게 일어나는 성질을 이용한 것이다. 그리고 트러스트는 Kistler 9001로드와셔(load washer)를 이용하여 측정하였다. 그림 (2)는 본 연구에서 마이크로 드릴 시스템의 시스템 동정을 위해서 개발한 토크-트러스트 센서이다.

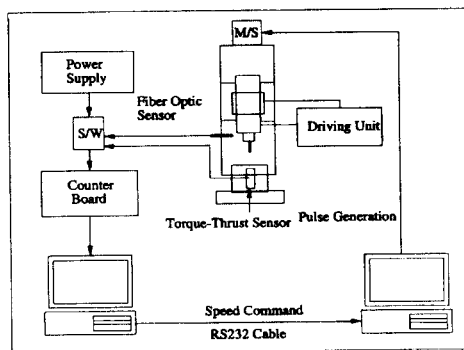
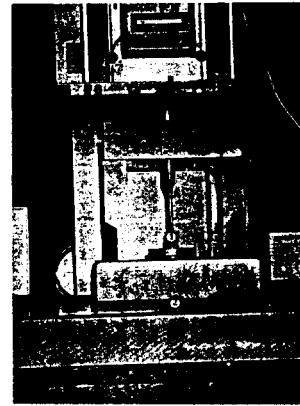


Fig 1. A schematic diagram of the micro drilling system.



1 : Torque sensor 2 : Thrust sensor
Fig. 2 Torque-Thrust sensor

3 System identification with genetic algorithm

유전 알고리즘을 이용한 시스템 식별방법은 시스템을 구성하는 각 소자들의 모델링을 기초로 하며 이는 전체시스템의 입력과 최종출력만을 이용하여 시스템을 구성하는 각 소자들의 동특성을 파악할 수 있다. 따라서 시스템 소자의 모델링이 먼저 이루어져야 하는 어려움이 있다. 그러나 시스템 소자들의 비선형 모델링이 가능한 경우 이를 정량적으로 파악할수 있는 장점이 있다. 그러나 시스템의 식별에 소요되는 시간이 길어서 실시간 시스템 식별에의 적용에는 어려움이 따른다.

유전 알고리즘을 이용하여 시스템의 식별을 하기 위해서 먼저 시스템 계수들이 존재하는 영역을 추정해야 한다. 이는 유전 알고리즘이 해공간으로 주어진 영역에서 탐색을 하기 때문이다⁽⁹⁾.

유전 알고리즘을 이용하여 밸브 스피들 시스템을 동정하기 위해서 사용한 입력은 밸브에 가해지는 스텝입력 전압(Step input voltage)이고 출력은 스피들의 회전 속도이다. 밸브-스피들 시스템의 동정에서 적합성(Fitness)의 평가는 식 (1)을 이용하였다.

$$Fitness = \sum_{i=0}^n 1/|y_{si} - y_{ri}|^2 \quad (1)$$

여기서 n은 데이터의 y_s 는 시스템 모사의 출력치, y_r 은 실 시스템의 스텝전압을 입력으로 했을 때 스피들의 회전 속도를 나타낸다.

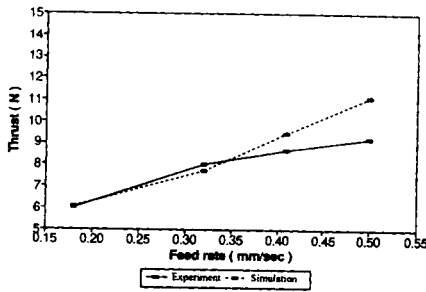
절삭 모델링의 식별을 위한 입력데이터는 스피들 회전수와 피드속도를 이용하였고 출력데이터는 절삭력인 토크와 트러스트로 하였다.

같은 방법으로 드릴의 절삭 현상에 대한 식별 역시 수행하게 된다. 절삭 현상의 식별에 사용하는 적합성은 식(2) 과 같다.

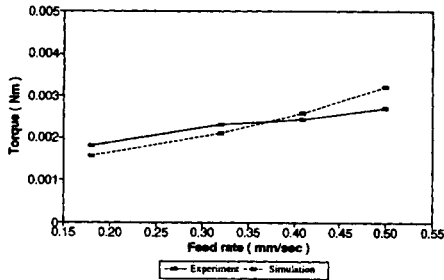
$$Fitness = \sum_{i=0}^n 1/(\{|T_{hsi} - T_{hri}| \times w_h + |T_{osi} - T_{ori}| \times w_o\})^2 \quad (2)$$

위 식에서 w_h, w_o 는 트리스트와 토크 값의 크기가 다르기 때문에 이를 정규화 하기 위한 것이다.

그림 (2)은 스피ndl의 회전속도를 일정하게 하고 피드속도를 다르게 하였을때, 직경 0.7mm드릴의 절삭에서 측정된 토크와 트리스트를 모사결과와 비교한 것이다. 드릴비트에 가해지는 토크와 트리스트는 피드에 대해 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 모델에 의한 토크와 트리스트가 실시스템에서 측정된 토크와 트리스트와 유사한 결과로 본 연구에서 제안한 전단각과 마찰각이 횡경사각과 경사각의 함수라는 가정에 타당성을 부여하는 결과이다. 하지만 피드속도가 커지는 경우는 모델에 의한 토크와 트리스트가 실시스템 결과와 상당한 차이가 나타난다.



(a) Thrust



(b) Torque

Fig. 3 Comparison of the cutting forces as the feed rate varies (Dia. : 0.7mm, spindle rotating frequency: 750 Hz)

피드속도가 커지는 경우는 유전적 알고리즘에서 구한 마찰각과 전단각이 실제와 달라지는 것을 의미한다. 즉 동일한 피삭재인 경우에도 절삭 조건(절삭 두께)이 크게 변하는 경우에는 마찰각과 전단각이 변화하는 것을 보인 것이다.

4 Application of the sliding mode control

비선형이 강한 절삭현상을 간단화된 모델^(11,12)을 이용하여 제어를 수행하기 위해서는 현대제이론(Modern control theory)로는 그 정도의 한계가 있다. 따라서 모델의 비정확성에 의한 오차를 극복하면서 안정하고 강인한 제어를 수행할 수 있는 방법으로 본 연구에서는 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 그리고 이를 PD 제어기와 비교 하였다.

스핀들의 압력 제어 밸브의 동적 특성을 보이는 방정식은 다음과 같다.^(1,2)

$$\ddot{x}_v + 2\xi\omega_n \dot{x}_v + \omega_n^2 x_v = k_1 u \quad (3)$$

여기서 x_v 는 밸브 실린더의 위치 변화, ξ 는 밸브의 감쇄상수, ω_n 은 밸브의 고유 진동수이고 u 는 제어 입력 전압이다.

만일 $x_1 = x_v$ 이라 하면 다음과 같은 상태 방정식으로 바꿀 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = k_1 u - 2\xi\omega_n x_2 - \omega_n^2 x_1 \quad (5)$$

$$\ddot{\theta} + \xi f(\dot{\theta}) = P \Delta N r_{av} / l \quad (6)$$

여기서 θ 는 스피ndl 회전 각도, $P = K_v x_v = K_v x_1$ 과 $\dot{\theta} = x_3$ 임을 이용하여 스피ndl의 동적 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_3 = k_2 x_1 - k_3 x_3^{0.608} \quad (7)$$

여기서 $k_2 = \xi$ 이 $k_3 = K_v \Delta N r_{av} / l$ 이다. 그리고 k_t 는 스피ndl 상수, A 는 스피ndl 터빈의 단면적, N 은 터빈의 날개의 개수, r_{av} 는 터빈의 유효 반지름을 의미하고 I 는 회전 관성 모멘트이다.

드릴비트에 가해지는 토크의 스피ndl의 회전속도와 의 관계를 표현하면 다음과 같다.^(4,5,6,7,8)

$$x_4 = k_4 / x_3 \quad (8)$$

그리고 제어 대 $y = x_4$ 가 된다. 그리고 k_4 는 매 순

간의 드릴링 공정에 대해 절삭 모델에서 얻은 동적 토크 상수이다. 식 (8)은 드릴비트의 동적 특성을 고려하지 않은 것이다.

본 시스템의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 결정이 된다.^(13,14,15)

$$S = \dot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e \quad (9)$$

$$e = s_{4d} - x_4 \quad (10)$$

이다. 여기서 x_{4o} 는 원하는 토크를 의미한다.

5 Experiment

실험은 간단한 귀환 선형제어기인 PD제어기와 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 수행하였다.

선형 제어기인 PD제어는 토크를 오차로 하여 제어를 수행 하였다. 그림 (4)은 이를 간략도를 표현한 것이다.

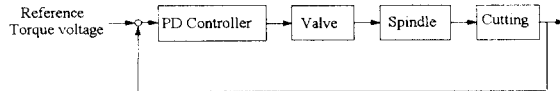


Fig. 4 A schematic diagram of PD controller.

PD 제어기는 드릴비트에 가해지는 토크가 증가하는 경우 스펀들의 회전 속도를 증가시켜서 1회전당 절삭량을 조절한다. 즉 절삭량이 증가할 경우는 스펀들의 회전 속도를 증가시켜서 드릴비트의 각 회전시 절삭량이 감소하도록 한다. 그러나 스펀들 회전 속도가 큰 경우는 칩이 너무 미세하게 분쇄되어서 배출이 용이하게 이루어지지 않고 많은 에너지를 필요로 하는 단점이 있다. 따라서 가공중 발생하는 칩의 크기가 배출이 용이한 적절한 스펀들 회전 속도를 유지하면서 절삭력을 제어하는 것이 요구되어 진다.

슬라이딩 모드 제어는 스펀들 회전 속도의 변화로부터 드릴비트에 가해지는 토크를 추정하고 이에 따라서 제어를 수행한다. 그림 (5)에서 볼 수 있듯이 슬라이딩 모드 제어는 토크를 측정하지 않고 모델링에 의해서 토크를 추정한다.

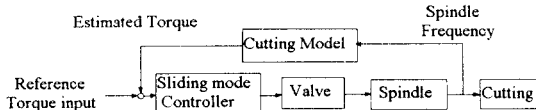
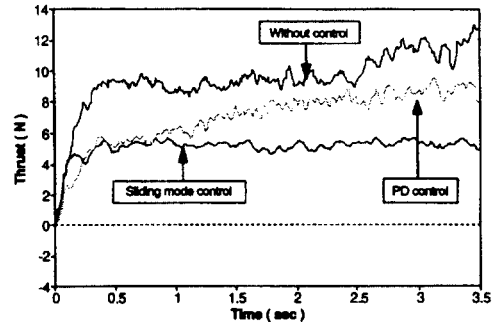


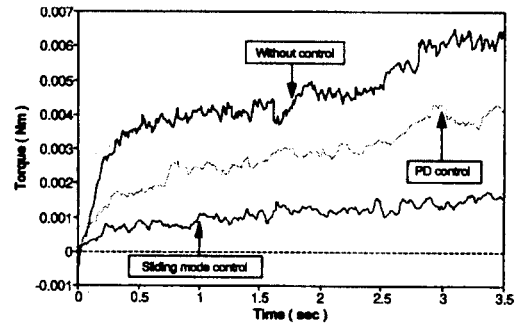
Fig. 5 A schematic diagram of the sliding mode

control system.

그림 (6)에서 슬라이딩 모드 제어가 제어하지 않았을 경우나 PD제어기보다 좋은 결과를 보이는 것을 볼 수 있다. 하지만 드릴의 직경이 작아질수록 제어 정도가 떨어진다. 이는 드릴의 직경이 작아질수록 스펀들의 회전속도가 드릴비트에 가해지는 토크에 민감하게 반응하지 않기 때문이다.



(a) Thrust variation



(b) Torque variation

Fig. 6 Comparison of cutting force variation for a drill of diameter 0.8 mm

표 1은 드릴 가공 조건을 명시한 것이다. 파삭재의 재료는 연강을 사용하였고 피드 속도는 일정하게 유지 하였다.

Initial spindle frequency	Feed rate	Workpiece material
545 Hz	0.32 mm/sec	SS40

Table 1 The cutting of drilling and the workpiece

그림 (7)에서는 슬라이딩 제어를 이용하여 제어

를 수행하였을 경우의 스핀들 회전수의 변화를 보이는 것이다. 적정 토크를 유지하기 위해서 547Hz에서 안정한 상태로 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 칩에 의해서 토크가 증가하면 회전수를 증가시켜 다시 적정토크를 유지하게 된다. 결과로부터 스핀들 회전수의 가/감속이 칩의 배출을 원활하게 하는 원인이 되는 것으로 보인다

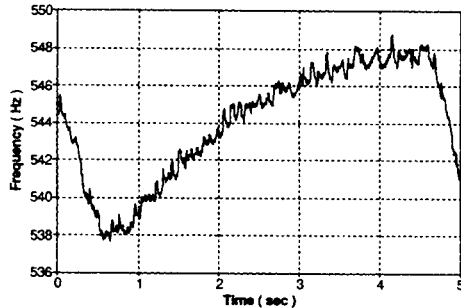


Fig. 7 Spindle frequency variation when the sliding mode control applied.

6 Conclusion

가공깊이에 따라 증가하는 마이크로 드릴의 절삭력 제어는 PD제어기보다 슬라이딩 제어기가 효과적이다. 이는 제어대상이 비선형성이 강한 시스템이고 슬라이딩 제어는 경계층 사이에서 연속적으로 제어를 수행하기 때문에 안정하고 연속적인 제어를 수행할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

절삭력 제어를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 일반적으로 펌드릴 가공에 의존하는 깊은 구멍 가공방법을 개선하여 연속적인 드릴 가공을 수행함으로써 생산성을 향상시킬 수 있었다.
2. 스핀들 회전수의 가/감속을 이용하여 가공 공정을 제어함으로써 마이크로 드릴 가공에서 가장 문제가 되는 칩배출을 향상시킬 수 있었다. 이는 칩과 피삭재의 마찰의 감소를 인해서 구멍 표면의 품질 향상 역시 가져왔다.
3. 드릴비트에 가해지는 토크와 트러스트이 감소로 드릴의 수명연장 효과를 가져왔다.
4. 적절한 드릴 초기조건 선정으로 초기 드릴 가공 중 발생하는 완더링 운동(Wandering motion)을 억제하고 발생한 완더링 운동을 짧은 시간에 안정화 시킬수 있었다.

참고 문헌

1. Herbert E. Merrit, Hydraulic control system, John Wiley & Sons Inc.
2. Irving H. Shames, mechanics of Fluids, McGRAW-HILL International Editions, 2nd Edition, 1989.
3. Iwata K., Moriwaki T. and Hoshikawa M., Fundamental study of high speed micro deep drilling., Precision Eng. of Mech., 47, 2 1983, pp. 240~246.
4. Williams R.A., A study of the drilling process. J. Eng. for Industry, Vol. 95 1974, pp. 1207~1215.
5. Ulsoy G., Tekinalp O., Effects of geometry and process parameters on drill transverse vibrations, J. Eng. for Industry, Vol. 112, 1990, pp. 189~194.
6. Rincon D. M., Ulsoy G. A., Effects of drill vibrations on cutting forces and torque, Ann. Of the CIRP, Vol. 43, 1994, pp. 59~62.
7. Rubenstein C., The torque and thrust force in twist drilling. Part I. Theory, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 4, 1991, pp. 481~489.
8. Armarego, E.J.A and Brown, R.H., "The Machining of Metals" Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.
9. E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
10. Usui E, Hirota A., Analytical prediction of three dimensional cutting process, J. Eng. for Industry, Vol. 100, 1978, pp. 222~228.
11. Moon F. C., Chaotic dynamics and fractal in material removal process, Nonlinearity and chaos in engineering dynamics, John Wiley & Sons Ltd., 1994, p. 26~37.
12. Grabec I., Chaotic dynamics of the cutting process, Int. J. Mach. Tools, Vol. 28, No. 1, 1988, pp. 19~32.
13. Drakunov S. V., Utkin V. I., Sliding mode control in dynamic systems, Int. J. Control, Vol. 55, No. 4, 1992, pp. 1029~1037.
14. Slotine J. J., Li W., Applied nonlinear control, Prentice-Hall Inc., 1991, p. 207~309.
15. Vidyasagar M., Nonlinear system analysis, Prentice-Hall Inc., 1993.