

<論 文>

주축속도변동을 이용한 공기회전축식 미세구멍가공의 감시제어

안중환* · 김화영** · 신정식*** · 이응숙**** · 김상준***** · 오정욱*****

(1994년 7월 14일 접수)

Monitoring and Control of the Air Spindle Based Microdrilling Using Spindle Speed Variations

J. H. Ahn, H. Y. Kim, J. S. Sin, E. S. Lee, S. J. Kim and J. U. Oh

Key Words : Microdrill(미세드릴), Spindle Speed Variations(주축속도변동), Air Spindle(공기회전축), Moving Average Algorithm(이동평균법), Step-Feed Drive(계단이송 구동), Reflective Photo Sensor(반사형 광센서)

Abstract

Microdrilling is one of the most difficult operations because of the poor chip discharge and the weakness of tool. This study is concerned about the development of a microdrilling monitoring system that is useful for minimizing the tool breakage and enhancing the machinability in the air spindle based microdrilling. The system is composed of a drilling state detection unit and an adaptive step-feed control unit that controls the micro-stepping motor driven spindle axis. Drilling states such as overload, tool breakage are recognized by the change of the air spindle speed which is measured via the reflective photo sensor. Based on the monitoring results, the adaptive step-feed control algorithm adjusts the step increment to keep the decrease of spindle speed within a specified range. The results of evaluation tests have shown that the developed system is very effective to prevent the breakage of microdrill and improves the productivity in comparison with the conventional microdrilling.

1. 서 론

구멍가공기술은 기계가공기술중 가장 기본적인 것으로 오늘날 각종 전자제품, PCB(printed circuit board), 시계산업, 광섬유 커넥터, 미세노즐, 오리피스, 우주항공용 전자부품, 의료용 광학기기, 정밀공구, 게이지 등의 분야로 적용범위가

확대되면서 점차 고속화, 심공화 되어가고 있다.

미세드릴은 가늘고 길어서 굽힘강도와 비틀림강도가 작은데다, 가공중에 칩이 잘 배출되지 않고 절삭유를 공급하기도 어렵기 때문에, 작업도중 드릴이 쉽게 부러지고 그 결과 생산성이 크게 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 제안된 방법중 하나가 계단이송(step feed) 절삭방식인데, 이 방법은 칩을 배출하는데 아주 효과적이다. 그러나 공작물 재질에 따라 스텝량을 얼마로 할 것인지 정하기는 매우 어렵고, 더우기 실제가공에서 순간순간 변하는 절삭저항의 변동을 고려하지 않고 스텝량을 정하였을 때 드릴파손을 어느 정도 막을 수 있느냐 하는 의문이 제기된다. 따라서 드릴의 파손을 최소

*정회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

**부산대학교 대학원

*** (주)터보테크

**** 한국기계연구원 자동화연구부

***** (주)한화 창원공장

화하기 위해서는 가공중 드릴날에 걸리는 절삭력을 측정해서, 그 데이터에 근거해서 절삭이송과 스텝량을 제어할 수 있는 감시제어 기능이 필요하다.

미세드릴의 절삭력을 측정하는 방법으로 로드셀을 이용하여 절삭저항을 검출하는 방법, 절삭저항의 증가에 따른 주축회전수 변화를 검출하는 방법, 광파이버식 변위센서로 절삭저항에 의한 변형을 검출하는 방법 등이 보고되어져 있다.⁽¹⁻³⁾ 또 다중센서로부터 공구상태에 대한 정보를 추출한 뒤 인공신경망을 이용하여 미세드릴 파손을 미리 감지하는 것에 대한 연구도 보고되어져 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서 사용한 주축은 정압(hydrostatic)공기베어링과 공기터빈으로 구성된 공기회전축(air spindle)으로서, 회전수가 20.000~100.000 rpm 정도이고 축의 관성모멘트가 매우 작기 때문에, 절삭력 변동에 따라 회전속도의 변동이 쉽게 나타난다. 본 연구에서는 공기주축의 회전속도 변동을 실시간에 측정해서 절삭력을 간접적으로 추정하고, 절삭력의 과다에 따라 드릴작업을 적절히 제어함으로써 공구파손을 막고 생산성을 높일 수 있는 미세구멍

가공용 감시제어 시스템을 개발하고자 한다.

2. 미세구멍 가공기 제어부의 구성

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 고속 공기회전축형 미세구멍 가공기의 전체 구성도이다. 제어부, XY축 구동제어부, Z축 구동제어부, 주축회전속도의 측정부 등으로 이루어져 있다. 제어부는 PC를 주체로 하고, XY축 구동제어부는 드릴작업 위치까지 공작물을 이송하는데 사용되고, 드릴작업에는 Z축 구동제어부와 주축회전속도의 측정부가 사용된다.

2.1 Z축의 구동제어부

Z축의 구동은 최고 50,800 pulse/rev의 분해능을 가진 마이크로 스텝핑모터(Parker사, OEM57-83) 및 구동기(Parker사, OEM 650)와 피치 2 mm의 볼스크류를 사용하여, 펄스당 이송량을 0.04 μm까지 미세하게 함으로써, 드릴날에 가해지는 이송저항의 변화가 부드럽게 되도록 하였다.

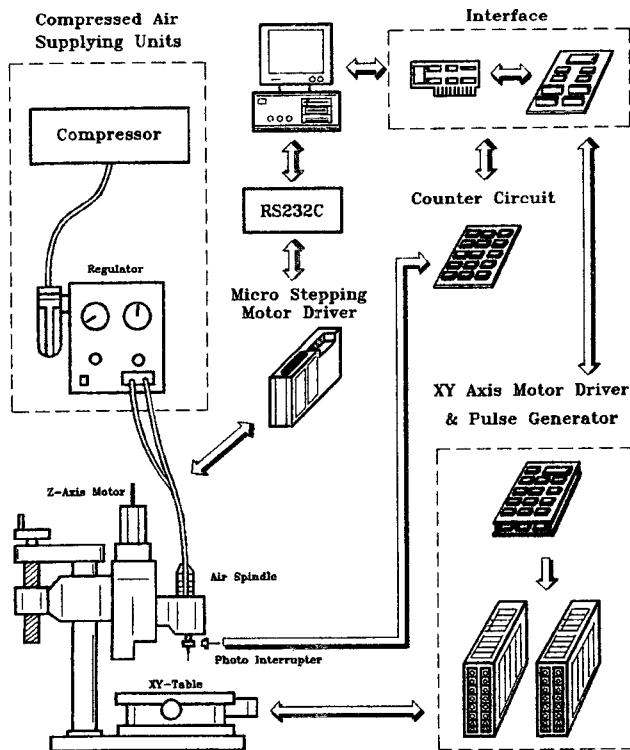
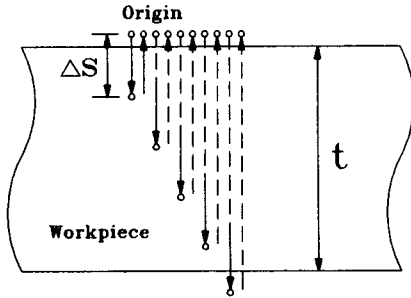


Fig. 1 Construction of the high-speed air-spindle based microdrilling machine



ΔS : Step Size
t : Thickness of Workpiece

Fig. 2 A pattern of step-feed drilling

가공중 발생하는 칩의 배출을 원활히 하기 위해, Z축의 구동은 Fig. 2와 같이 일정한 스텝량을 절삭이송하고 나서 원점으로 복귀하는(step back) 계단이송방식으로 하였다.⁽⁵⁾

2.2 주축회전속도의 측정부

회전주축에 엔코더(encoder) 등을 달아서 회전속도를 측정하는 것은 관성모멘트가 작은 주축의 회전성능을 나쁘게 할 수 있다. 본 연구에서는 주축의 회전 성능에 아무런 영향을 주지 않기 위해, 드릴척의 절반을 검정색으로 칠하고 반사형 광센서(포토 인터럽터)를 사용해서, 주축 1회전당 하나의 펄스가 나오는 것을 비접촉으로 측정하여 회전속도를 구하였다. 센서에서 검출된 펄스로부터 회전속도를 구하는 방법에는 (i) 단위시간당 입력된 펄스를 계수하는 방법, (ii) 펄스의 주기를 측정하는 방법, (iii) F/V(frequency/voltage) 변환기를 이용하는 방법 등이 있다.

이론적 검토 및 예비실험 결과 고속주축의 미세한 회전속도 변동에 가장 민감하게 반응하는 (ii)의 방법을 사용하였다. Fig. 3은 이 방법에 의한 펄스 주기 측정법을 나타낸다. 회전축 1회전 시간을 나타내는 입력펄스 주기(T)는, T시간 동안 카운터에 입력된 계수용 기준펄스(f_c Hz)의 개수(n)로 측정하였으며, rpm으로 환산하면 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\text{회전속도} = \frac{\text{기준펄스의 주파수}(f_c)}{n} \times 60(\text{rpm}) \quad (1)$$

f_c 가 클수록 속도분해능은 좋아지는데, 본연구에서 f_c 를 40 MHz로 하여 60,000 rpm에서 분해능

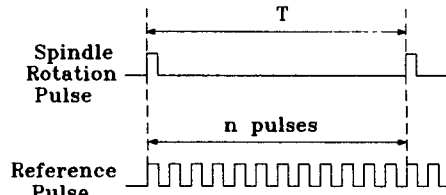


Fig. 3 A measuring unit of the pulse interval using reference pulses

이 2 rpm 이하가 되도록 하였다.

3. 공기회전축의 회전속도변동

3.1 비절삭에서 주축회전속도의 특성

Fig. 4는 공기회전축에 공급되는 공기의 압력을 2 kgf로 설정한 상태에서, 비절삭시에 약 55 msec의 샘플주기로 측정된 주축회전속도를 나타낸다. 진폭이 약 30 rpm, 주기가 55 sec 정도인 저주파 성분이 나타나는 것을 알 수 있는데, 이것은 공기회전축에 공급되는 공기의 압력을 일정한 범위 안에 들도록 조절하는 공기압축기(air compressor)의 운전주기에 의한 것으로 생각된다. 이와 함께 작은 진폭(약 5 rpm)의 고주파 성분이 섞여있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 측정회로상의 전자소자 특성차이와 주축의 진동 등에 의해서 생긴 것으로 생각된다. 따라서 회전속도변동을 정확하게 측정해서 가공상태를 감시하기 위해서는 이러한 잡음(noise)성분을 제거할 필요가 있다.

3.2 계단이송 가공에 의한 드릴추력과 회전속도의 변동

Fig. 5는 스테인레스(SUS304) 공작물에 ϕ 0.7 mm 드릴로 계단이송방식으로 가공할 때, 주축회전속도와 드릴추력(thrust force)이 변동하는 모습을 나타낸다. 추력은 공구동력계(KISTLER 9257A)로 검출하고, 그 출력을 주축회전 펄스에 동기를 맞춰 A/D 변환하여 구한 값이다.

절삭이 시작되면 추력이 15 N 정도 걸리고 회전속도는 300 rpm 정도 급속히 줄어든다. 계단이송이 끝나고 원점복귀가 시작되면 추력은 0 N으로 떨어지고 회전속도는 완만하게 회복한다. 이렇게 계단이송 가공이 반복되면서 추력과 회전속도변동 패턴이 반복된다. 이때 회전속도가 완전히 회복되기 전에 계단이송이 이루어지므로 회전속도는 전반

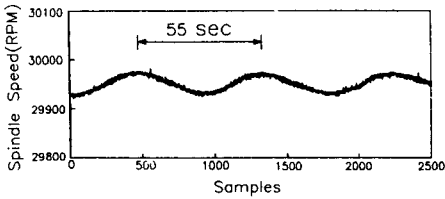


Fig. 4 Spindle speed including dominant low frequency noise with non-cutting(supplied air pressure : 2 kgf, sampling time : 55 msec)

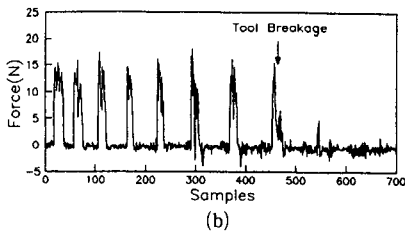
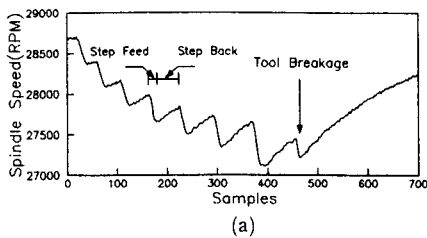


Fig. 5 Fluctuations of spindle speed and thrust force with step-feed drilling(workpiece : SUS304, drill : ϕ 0.7 mm, HSS)

적으로 점점 감소하는 경향을 보인다. 회전속도의 변화가 절삭력의 변화보다 약간 늦게 생기는 것을 알 수 있는데, 이것은 드릴날이 가공면상에 닿는 순간 절삭력은 변하지만 회전속도는 회전축의 관성 모멘트와 공기 압축성 때문에 약간 늦게 변하기 때문이다.

결국 8번째 계단이송에서 절삭력 과다로 드릴이 파손되었다. 파손까지의 회전속도, 절삭력의 변동을 살펴보면 회전속도 감소폭은 점점 커지고 있으나 절삭력의 증가폭은 그렇게 두드러지지 않다. 이 사실에서 미세드릴의 절삭상태 변화는 공구동력계보다 주축회전수 측정장치쪽이 더 민감하게 검출하는 것을 알 수 있다.

3.3 절삭조건에 따른 회전속도변동

Tables 1, 2는 다른 절삭조건을 일정하게(초기

Table 1 Decrease of spindle speed according to workpiece materials(drill diameter : 0.7 mm, step : 0.2 mm)

Material	Decrease of spindle speed(rpm)
Brass	150
Aluminum	190
Stainless	240

Table 2 Decrease of spindle speed according to step size(drill diameter : 0.3 mm, workpiece : aluminum)

Step(mm)	Decrease of spindle speed(rpm)
0.1	100
0.15	120
0.2	150

회전속도 30,000 rpm, 이송속도 $4\mu\text{m/rev}$) 두고, 각각 공작물 재료 또는 스텝량에 따라서 회전속도 감소폭이 얼마나 되는지를 조사하기 위해서, 7번째 계단이송 때의 측정된 결과를 나타낸다. 공작물의 경우 황동-알루미늄-스테인레스의 순으로 즉 재질이 강할수록 감소폭이 커지는데, 같은 순으로 칩의 배출과 절삭성이 나빠지고 드릴이 쉽게 파손되는 경향을 보였다.

또 스텝량의 경우 커질수록 회전속도 감소폭도 크게 나타나는데, 이것은 절삭력의 증대에 따른 결과이다. 따라서 공구직경이나 공작물에 따라서 최적의 절삭조건과 허용 속도감소폭을 설정할 필요가 있다.

4. 주축회전속도변동을 이용한 감시제어 알고리즘

4.1 주축회전속도변동을 이용한 가공상태 판단

미세드릴의 파손을 막기 위해서는 가공중 과부하가 걸리지 않도록 해야 한다. 절삭저항은 회전속도 감소폭과 밀접한 관계가 있으므로, 여기서는 회전속도 감소폭이 일정한 한계값(threshold)을 넘어서면 과부하상태로 판단한다. 과부하에 대한 기준은 드릴직경, 공작물 재질, 스텝량, 이송속도, 회전속도 등의 절삭조건을 고려해서 선정한다.

4.2 이동평균법을 이용한 잡음제거

회전속도 변동량으로 가공부하를 정확하게 추정하기 위해서는 가공과 무관하게 주축회전속도 신호에 포함되어 있는 잡음성분을 제거하는 과정 즉 잡음제거(noise filtering)가 필요하다. 특히 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 저주파 잡음신호는 진폭이 커서 정확한 속도변동폭 산출에 결정적인 악영향을 미친다. 따라서 여기서는 저주파 잡음을 제거 대상으로 하고, 컴퓨터 연산으로 비교적 간단히 실시간에 잡음제거를 할 수 있도록 이동평균법(moving average algorithm)에 의한 디지털필터를 이용하였다.⁽⁶⁾ 이동평균법은 LPF(low pass filter)처럼 고주파 잡음을 제거할 목적으로 주로 사용되는데, 이동평균법에 의한 근사식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(n-i) \tag{2}$$

다음에 원신호에서 이동평균법에 의한 근사 신호를 빼면 식(3)과 같이 저주파 성분을 제거한 신호를 얻을 수 있다.

$$e(n) = x(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(n-i) \tag{3}$$

여기서, N 은 저주파 파형의 이동평균을 구하는 점의 개수이다. $N=10$ 으로 하여 이 저주파 잡음제거 알고리즘을 Fig. 4의 원신호에 적용시켰을 때 얻은 결과는 Fig. 6과 같다. 55 sec 주기의 저주파 잡음이 잘 제거된 것을 알 수 있다. 이렇게 해서 구멍가공중의 실제 측정값에서 이동평균 값을 빼면 절삭저항에 의한 회전속도의 순수변동성분만

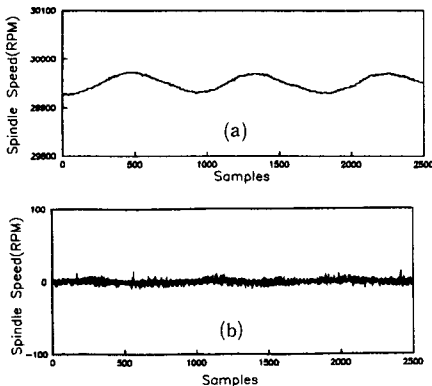


Fig. 6 Spindle speed with dominant noise filtered by moving average algorithm(sampling time : 55 msec)

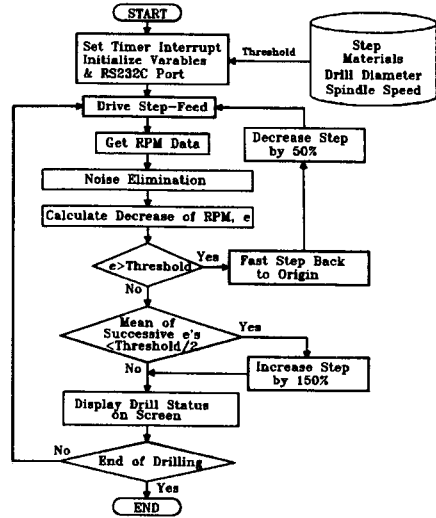


Fig. 7 Flowchart of the monitoring/control algorithm for microdrilling

남는다.

4.3 가공부하의 변동에 따른 가변계단이송 제어

가공중 과부하가 발생했다고 인식되었을 때, 드릴의 파손을 방지하기 위해서는 일단 공구를 후퇴시키든지 절삭조건을 완화시킬 필요가 있다. 본연구에서는 작업상태에 따라 스텝량을 감소 또는 증대시키도록 하였다. 즉 과부하가 발생하면 원점까지 급속복귀를 한 뒤에 스텝량을 반으로 줄여 가공을 계속한다. 만약 가공부하가 계속해서 한계값보다 작을 경우는 스텝량을 점차적으로 증가시킨다. Fig. 7은 미세구멍가공의 감시제어 알고리즘의 흐름도이다.

5. 실험결과 및 고찰

Table 3은 드릴직경, 공작물의 재질, 스텝량을 변화시켜 가면서 일정한(fixed) 계단이송방식으로 시험절삭을 실행한 결과이다. 시험번호 4, 7, 10, 13, 15번 가공에서 공구가 파손되었다. 다음에 공구가 파손된 똑같은 조건에서 감시제어 알고리즘을 적용해서 가변(flexible) 계단이송의 시험절삭을 행하였다. ϕ 0.1 mm 드릴의 경우를 제외하고는 모두 공구가 파손되지 않고 양호한 결과를 보였다. ϕ 0.1 mm 드릴의 경우는 스텝량이 수 μ 정도로 제한되기 때문인지 회전속도변동이 거의 나타나지 않았다. Fig. 8은 감시제어 알고리즘을 적용했을

Table 3 Results of microdrilling test with the fixed step-feed algorithm

No.	Drill diameter (mm)	Step (μm)	Material	Result
1	0.7	1100	Brass	Good
2	0.7	700	Aluminum	Good
3	0.7	200	Stainless	Good
4	0.7	300	Stainless	Breakage
5	0.6	800	Brass	Good
6	0.4	60	Stainless	Good
7	0.4	80	Stainless	Breakage
8	0.3	600	Brass	Good
9	0.3	100	Aluminum	Good
10	0.3	200	Aluminum	Breakage
11	0.3	30	Stainless	Good
12	0.2	30	Stainless	Good
13	0.2	40	Stainless	Breakage
14	0.1	5	Brass	Good
15	0.1	7	Brass	Breakage

때의 주축회전속도 신호, 잡음제거된 주축회전속도 신호, 스텝량의 제어결과를 나타낸다. 주축회전속도의 원신호에서 저주파 잡음이 잘 제거되고, 회전속도 변동에 따라 스텝량이 적절히 조절되고, 또 과부하가 걸릴때마다 급속복귀가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

미세구멍가공의 감시제어 시스템 개발과 평가실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 공기회전축의 회전속도변동을 측정함으로써 과절삭력을 검출할 수 있었다.
- (2) 반사형 광센서식 회전수 측정장치로 고속주축의 속도변동을 고분해능으로 검출할 수 있었다.
- (3) 이동평균법을 이용하여 저주파 속도변동 잡음성분을 제거하였다.
- (4) 회전속도의 변동량에 연계한 가변계단이송제어로 드릴파손을 방지하였다.

참고문헌

- (1) 小野元久, 菅原 章, 矢野 宏, 1992, “微小徑ドリル加工に關する研究(第1報)-切削抵抗の測定について-,” 日本精密工學會誌, Vol. 58, No. 8, pp. 79~84.
- (2) 幸田盛堂, 石橋幸治, 立石孝之, 廣瀬哲雄, 村田悌二, 1984, “靜壓空氣軸受主軸における 微小徑ドリルの折損檢出,” 昭和59年度 精密工學會 秋季學術講演會論文集, pp. 723~726.
- (3) 畑村洋太郎, 長尾高明, 光石 衛, 中畠信行, 1994, “微小徑ドリル加工の研究(第1報) -4枚 羽根および多段板バネ構造を用いた主軸搭載形光學式トルク スラスト檢出裝置-,” 1994年度 精密工學會 春季學術講演會論文集, pp. 135~136.
- (4) Ibrahim Nur Tansel, 1992, “Identification of the Pre-Failure Phase in Microdrilling Operations with Multiple Sensors,” *ASME Neural Networks in Manufacturing and Robotics, PED*-Vol. 57, pp. 23~36.
- (5) 김동열, 주호운, 1992, “CNC가공,” 기전연구사, pp. 212~219.
- (6) 南 茂夫, 1986, “科學計測のための波形データ處理,” CQ出版社, pp. 84~90.

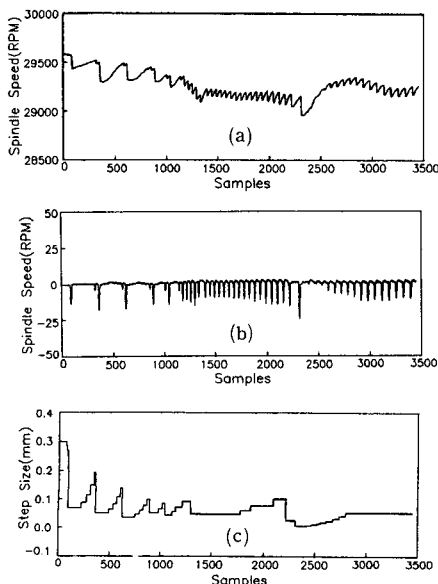


Fig. 8 Results of monitoring/control system with flexible step-feed (sampling time : 55 msec)