

미세구멍 가공의 최적 절삭성을 위한 절삭조건에 관한 연구 (A study on the optimal machinability cutting conditions of the micro-drilling)

이병열* 안중환** 오정욱 김상준*** 이용숙****
 * 부산대학교 대학원 ** 부산대학교 정밀기계공학과
 *** (주)한화 **** KIMM

1. 서론

오늘날 전자산업, 광학기기, 미세노즐 및 오리피스, 정밀공구, 게이지, 고밀도 PCB 기판등 각종 산업에서 미세구멍 가공기술이 요구되고있다. 이러한 구멍 가공에 사용될 수 있는 기술로는 드릴 가공의 기계적 가공방식 이외에 레이저가공, 전자빔가공, 방전가공등의 열적가공방식과 전해가공, 전해연마, 화학부식의 화학적가공 방식이 있겠으나 생산성, 가공표면의 정도, 심혈가공의 어려움 등의 이유로 미세드릴을 이용한 기계적인 가공방법이 선호되고있다.

드릴가공시 절삭조건에 영향을 미치는 인자에 관한 연구는 1907년도에 Taylor가 12가지의 인자를 발표한 이래 많은 연구가 이루어져왔고, 그 결과 절삭속도, 이송속도, 드릴직경, 가공물의 경도의 4가지가 가장 중요함이 확인되었다⁽¹⁾.

그러나, 일반적으로 직경 1mm이하의 미세구멍가공에 사용되는 미세드릴은 공구강성이 작기 때문에 과다한 토크에 의해 쉽게 파손이 일어나고, 가공중의 칩과 열의 배출이 어려우며, 절삭유와 공급도 어렵기 때문에 일반의 드릴링 메카니즘과는 다른 많은 문제점을 가지고 있다.⁽²⁾

본 연구에서는 미세구멍 가공시 가공 토크에 미치는 중요 변수들의 영향을 실험을 통하여 조사하여 높은 절삭성을 발휘하는 동시에 공구의 파손도 피할 수 있는 조건을 제시하였다.

2. 주축토크의 실험적 모델링

미세 드릴의 가공시에는 일반적인 드릴 가공과 달리 같은 직경의 드릴이라도 드릴의 형상에 따라 Thrust와 Torque가 크게 다르다⁽³⁾. 이는 일반의 드릴가공의 개

념과 다르며 아직까지 명확한 이론이 정립되지 않은 상태이므로 본 연구에서는 일반적 드릴 가공의 중요 인자들 중 이송속도와 공구직경, 그리고 경험적으로 미세구멍가공시 중요한 인자로 나타난 step량이 미세 가공의 절삭성에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 조사하였다.

여기에서는 드릴에 걸리는 절삭지향, 즉 주축부하를 Air Spindle의 주축회전속도 저하율을 이용하여 측정하였으며, 그 관계는 다음과 같다.⁽⁴⁾

주축회전 운동방정식 :

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_d - T_b - T_L$$

J : 주축 관성 모멘트 ω : 각속도($\frac{2\pi N}{60}$)

T_d : Air 스펀들의 회전 Torque N : 주축회전수

T_b : 공기마찰에 의한 제동 Torque

T_L : 절삭 Torque

T_L이 절삭시간 τ동안 주축에 부하로서 작용한다.

절삭이 시작되기 전에 주축회전은 정상상태에 도달해 있으므로,

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_d - T_b = 0 \text{이 된다.}$$

정상상태에서 Δω=τ동안 T_L이 작용하면

$$J\Delta\omega = -T_L \cdot \Delta t = -T_L \cdot \tau$$

$$\therefore \frac{\Delta N}{\tau} = \frac{-60}{2\pi} \cdot \frac{T_L}{J} = -K \cdot T_L \quad (K: 상수)$$

J는 일정하므로 절삭시간당 회전속도 저하율

($\frac{\Delta N}{\tau}$)은 T_L에 비례한다.

여기서 T_L 은 드릴 직경 P(mm), 이송속도 V(mm/sec), 스텝량 S(mm)의 함수이고, τ S/N이므로 ΔN 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta N = KP^\alpha V^\beta S^\gamma$$

3. 실험장치와 방법

3.1 실험장치

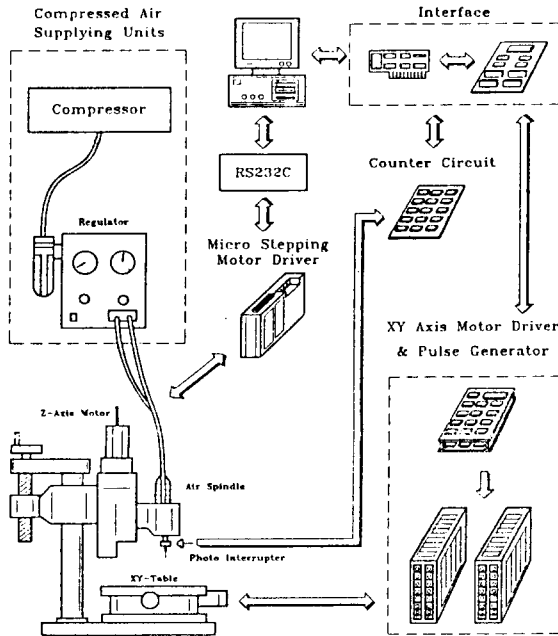


그림 1. 미세드릴 가공기의 구성도

그림 1은 실험 장치를 나타내며 이 장치의 특징은 미세드릴의 파손을 방지하기 위한 Step Back 기능이 있으며 고속의 Air Spindle을 사용하고있고 RPM 변화량의 검출을 위하여 회전부쪽에 반사형 광센서를 설치하여 드릴의 회전속도를 측정하고있다.⁽⁴⁾

3.2 중앙중첩실험계획법

본 실험은 실험의 수를 줄이기 위하여 중앙중첩실험계획법을 사용하였고, 실험계획표를 직교배열표를 이용하여 작성하였다. (표 1)

각 조건의 실험은 2번씩 수행하고, 중앙점에서는 4번 실험하였다.

표 1. 중앙중첩 실험법을 이용한 실험 계획.

실험 NO	P[mm]	V[mm/s]	S(mm)
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

변수의 범위는 경험에 의해 표 2처럼 설정하였다

표 2. 가공물의 종류에 따른 변수 값

LEVEL	황동(3t)			알루미늄(1.5t)			SUS(5t)		
	P	V	S	P	V	S	P	V	S
-1	0.3	0.5	0.01	0.3	0.5	0.01	0.3	0.5	0.01
0	0.5	4	0.1	0.5	4	0.1	0.5	4	0.05
1	0.9	8	0.4	0.9	8	0.2	0.9	8	0.1

가공물의 경도의 영향은 직접 변수로 잡지 않고 황동, 알루미늄, SUS의 3가지 재료에 한하여 실험하였다.

3.3 실험방법

실험중 주축의 회전수는 3000RPM으로 고정하였고 RPM의 변화는 광센서를 이용하여 컴퓨터에서 읽어들인다.

실험 순서를 Random하게 정하였다.

* 황 동 : 3, 10, 8, 9, 6, 2, 1, 5, 7, 4

* 알루미늄 : 3, 6, 2, 8, 9, 5, 10, 4, 1, 7

* S U S : 1, 2, 10, 3, 8, 7, 4, 9, 6, 5

가공중 부하가 많이 걸리는 경우에는 드릴 가공부분에 Air를 분사하여 Air를 공급하지 않는 경우와 비교하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 Least Square Modelling

실험에서 얻은 결과 데이터를 기초로 각 Step중의 RPM의 최대 변화량을 뽑아서 이 변화량들의 평균값과 최대값을 구하여 Least Square Modelling을 행하였다.

$\Delta R = KP^\alpha V^\beta S^\gamma$ 로부터 양변에 상용log를 취하여

$$\log \Delta R = \log K + \alpha \log P + \beta \log V + \gamma \log S$$

$$\log \Delta R = y, \log K = G, \log P = x_1, \log V = x_2,$$

$$\log S = x_3 \text{로 놓고 위식을 정리하면}$$

$$y = G + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 \text{가 된다.}$$

그림 2.는 실험 결과 파일들 중 황동을 재료로한 실험 3번(P=-1, V=1, S=-1)의 실험 결과이다.

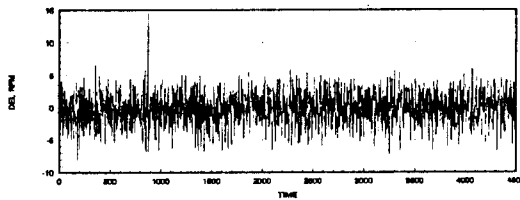


그림 2. 황동 실험 3번의 결과

이러한 결과와 데이터들의 각 Step당의 RPM의 변화량 중 최고 값을 뽑아서 그림 3과 같은 결과를 얻었다.

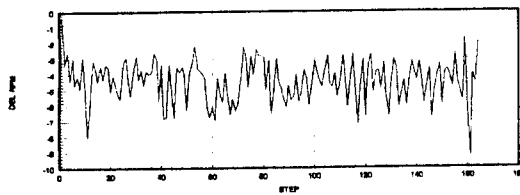


그림 3. 각 스텝당 RPM 변화의 최고값

4.2 이론값과 실제값의 비교

Least Square Modeling을 이용하여 다음의 관계식을 얻었다.

* 재질 : 황동

$$y_{max} = 1.944 + 0.761x_1 + 0.196x_2 + 0.396x_3$$

$$y_{mean} = 1.685 + 0.656x_1 + 0.185x_2 + 0.465x_3$$

* 재질 : 알루미늄

$$y_{max} = 1.720 + 0.178x_1 + 0.030x_2 + 0.380x_3$$

$$y_{mean} = 1.687 + 0.211x_1 + 0.018x_2 + 0.452x_3$$

* 재질 : SUS

$$y_{max} = 2.146 + 0.6091x_1 + 0.110x_2 + 0.446x_3$$

$$y_{mean} = 2.183 + 0.750x_1 + 0.110x_2 + 0.535x_3$$

위의 식을 이용하여 계산한 결과와 실제의 실험결과를 비교하였다.

여기서 오차(%)는 $\frac{\text{이론값} - \text{실제값}}{\text{이론값}}$

표 3.a 황동의 실험값과 계산값

직경	속도	스텝	ΔR MAX			ΔR MEAN				
			실제값	이론값	오차(%)	실제값	이론값	오차(%)		
0.3	0.5	0.01	6.68	4.95	34.9	4.53	3.36	34.8		
			8.21		65.8	5.23		55.6		
		0.4	11.57	21.35	45.8	9.95	18.67	46.7		
			12.64		40.7	11.43		38.7		
		8	0.01	6.83	8.53	19.9	4.56	5.61	19.6	
				12.0		40.6	7.93		41.0	
	0.4	54.04	36.77	46.9	54.04	31.19	73.6			
		70.99		93.0	59.97		92.6			
0.5	4	0.1	17.62	27.34	35.5	12.36	20.13	38.8		
			23.14		15.3	14.43		28.3		
			19.13		30.0	14.78		26.8		
			15.01		45.0	10.58		47.7		
		0.9	0.5	0.01	9.40	11.43	17.7	6.36	6.90	8.6
					9.87		13.6	6.15		10.8
	0.4	81.43	49.27	65.2	58.99	38.39	53.7			
		86.18		74.9	70.29		83.5			
8	0.01	11.01	19.68	44.0	6.51	11.53	43.4			
		11.85		39.7	7.17		37.6			
		82.12	84.84	3.1	62.86	64.12	2.0			
		88.01		3.7	65.40		2.0			

표 3.b 알루미늄의 실험값과 계산값

직경	속도	스텝	ΔR MAX			ΔR MEAN			
			실제값	이론값	오차(%)	실제값	이론값	오차(%)	
0.3	0.5	0.01	6.67	7.20	7.3	4.46	4.64	3.8	
			7.27		0.9	4.57		1.5	
		0.2	17.96	22.50	20.2	14.14	18.00	21.6	
		8	0.01	9.2	7.83	17.4	5.67	4.88	16.6
				8.59		9.7	5.30		10.4
	0.2	20.67	24.45	15.4	14.96	18.92	21.1		
		19.95		18.4	18.21		3.7		
0.5	4	0.1	24.79	20.15	23.0	18.16	15.21	19.0	
			16.69		17.2	13.12		13.8	
		20.75		2.9	16.97		11.1		
		21.23		5.3	15.61		2.6		

0.9	0.5	0.01	8.66	8.76	1.3	5.55	5.86	5.1
		0.2	30.61	27.36	11.8	24.61	22.69	8.8
			32.63		19.2	28.91		27.8
	8	0.01	7.52	9.52	21.1	4.97	6.16	19.3
			10.10		6.0	6.60		7.1
		0.2	37.46	29.74	25.9	30.45	23.86	27.6
			44.53		49.7	32.30		35.3

표 3. c SUS의 실험값과 계산값

PHI	속도	스텝	ΔR MAX			ΔR MEAN		
			실계값	이론값	오차(%)	실계값	이론값	오차(%)
0.3	0.5	0.01	8.89	7.98	10.2	5.23	4.87	7.3
			8.65		7.7	5.57		14.3
		0.1	11.72	22.30	47.5	9.9	16.7	40.7
			17.79		20.6	12.05		28.1
	8	0.01	9.26	10.83	14.8	5.75	6.61	13.0
			14.64		35.1	9.56		44.6
		0.1	30.38	30.26	1.3	22.99	22.65	1.1
			35.41		16.9	24.41		7.7
0.5	4	0.05	32.32	28.09	15.3	21.00	21.25	0.9
			22.53		19.6	19.03		10.3
			19.89		29.2	14.97		29.7
			17.26		38.5	12.78		39.71
0.9	0.5	0.01	13.87	15.59	10.9	9.45	11.10	14.8
			15.16		2.5	10.61		4.5
		0.1	46.64	43.55	7.1	40.9	38.06	7.6
			49.32		13.3	45.38		19.2
	8	0.01	21.37	21.15	1.0	14.97	15.06	0.6
			23.04		9.0	16.21		8.0
		0.1	68.38	59.08	15.7	59.64	51.64	15.4
			67.73		67.7	63.41		22.7

4.3 Air 분사의 영향

실험에서 구한 데이터 중 Air를 공급한 경우와 공급하지 않은 경우를 비교하여 Air 공급의 효과를 비교하였다. (표 4)

표 4. Air 공급의 영향

FILE	Air 유		Air 무		비교[무/유]	
	ΔRmean	ΔRmax	ΔRmean	ΔRmax	(%)	(%)
B-8.*	-24.85	-88.01	-49.25	-139.11	198	158
B-9.*	-10.51	-23.14	-10.30	-20.82	98	90
B-6.*	-30.43	-86.18	-23.92	-79.46	79	92
A-8.*	-22.50	-44.53	-32.68	-78.47	145	176
A-9.*	-9.61	-24.79	-12.24	-29.96	127	121
A-5.*	-9.33	-17.96	-10.57	-24.66	113	137
S-10.*	-12.25	-19.89	-15.46	-25.34	126	127
S-3.*	-4.40	-9.26	-5.08	-9.30	115	100
S-8.*	-38.33	-49.32	-43.62	-58.14	114	118
S-7.*	-9.45	-17.99	-11.68	-25.83	124	144

4.4 최적의 절삭조건 선정

이론식을 이용하여 드릴에 걸리는 절삭저항 그래프를 그리면 그림 4와 같다

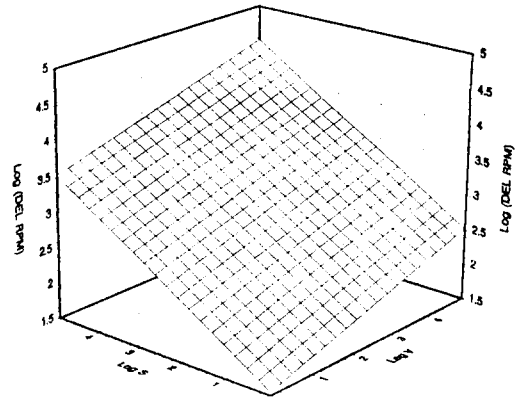


그림 4. V-S-DRPM 특성

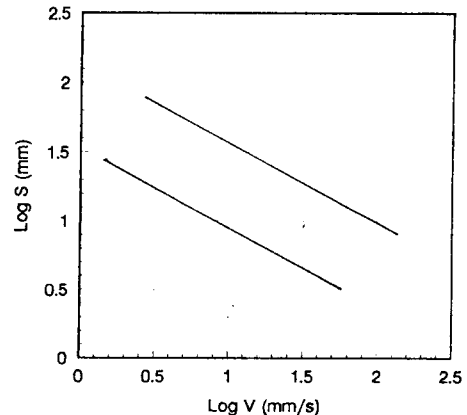


그림 5. V-S 선도

그림 5는 그림 4에서 동일한 Torque가 걸리는 조건을 V-S 평면상에 나타낸 그림이다.

이상의 결과에서 기준 Torque 이하의 작업환경 중 최적의 작업환경을 찾기 위해서는 총 가공시간을 고려하여야 한다.

총 가공시간 = 실제의 가공시간 + idle 시간

스텝당 가공시간을 t_2 라고 두면 $t_2 = S/V$ 이고, 가공 깊이를 d 로 하면 가공 회수 $n = d/S$ 이므로 실제의 가공

시간은 $t_2 * n = \frac{d}{S} \frac{S}{V} = \frac{d}{V}$ 이다.

한 Step당 급속 이송 시간을 t_1 이라고 두면

idle time은 $\frac{n(n+1)}{2} t_1$ 이 된다.

총 가공 시간 T 는 아래의 식과 같다.

$$T = \text{실제의가공시간} + \text{idle time} = \frac{d}{V} + \frac{n(n+1)}{2} t_1$$

이 식을 S 에 대하여 정리한 후 T 가 최소값을 가지는 조건을 찾는다.

6. 결론

- 1) 실험계획법을 이용하여 실험의 수를 줄였다.
- 2) 미세드릴에 영향을 미치는 각 인자를 실험하고 최소자승법을 이용하여 이론식을 구하여 실제값과 이론값을 비교하였다.
- 3) 가공중 가공부에 Air를 공급하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다.
- 4) 최적의 절삭조건을 찾을수 있는 방법을 연구하였다.

참고문헌

- (1) S. A. Jalali and W. J. Kolarik "TOOL LIFE AND MACHINABILITY MODELS FOR DRILLING STEEL" Int J. Mach. Tools Manufact. Vol 31. No 3, pp273-282, 1991
- (2) 백인환, 정우섭, 이상호, "미소경 드릴링 머신의 시작과 절삭현상의 연구", 한국정밀공학회 93년도 춘계학술대회논문집 PP.66-70
- (3) "小徑ドリル加工における工具損傷", 加工 Databa-se. 機械振興協會技術研究所©1979

- (4) 辛田藏堂의 3인, "靜壓空氣軸受主軸における微小徑ドリルの損傷檢出", 精密學會秋季大會學術講演會論文集, pp.723-726
- (5) 신정식, 안중환, "미세구멍 가공의 감시·진단", 대한기계학회. 94년도 춘계학술대회논문집. pp. 466-469
- (6) W. König, K.Kutzner And U. Schehl, "Tool monitoring of small drills with acoustic emission", Int. J. Tools Manufact. Vol. 32, No. 4, pp.487-493, 1992.
- (7) G. S. Li, W. S. Lau and Y. Z. Zhang, "In-process Drill Wear and breakage Monitoring For A Machining center based on cuttin force parameters", Int. J. Tools Manufact. Vol. 32, No. 6, pp.855-867, 1992.