

실험계획법에 의한 마이크로 드릴링 공정의 최적 절삭조건 결정

김동우*, 조명우 (인하대 기계공학과), 이응숙(한국기계연구원), 서태일(한국생산기술연구원)

Determination of Optimum Micro Drilling Conditions Using Experimental Design Methods

D.W. Kim, M.W. Cho (Inha University), E.S. Lee (KIMM) and T.I. Seo (KITECH)

ABSTRACT

Recently, the needs for highly precise, smaller and deeper drilling techniques are increasing to produce fuel injection nozzles, watches, air bearings and printed circuit boards (PCB). However, it is not easy to determine optimum cutting conditions since the micro drilling process is very sensitive to various disturbances. Also, undesirable characteristics to optimize the micro drilling are small signal-to-noise ratios, drill wandering motions and high aspect ratios. Thus, in this study, experimental design methods are applied to determine optimum cutting conditions. Using the methods, three cutting parameters, feed, step and cutting speed are optimized to minimize thrust forces. Obtained conditions are verified through required experimental works. As the results, it is shown that the experimental methods can be applied to micro drilling processes to determine optimum cutting conditions.

Key Words : Cutting Force (절삭력), Micro Drill(미세 드릴), Taguchi Method (다구치 방법), ANOVA (분산 분석)

1. 서론

최근 광섬유, 커넥터, 프린트 기판, 미세 노즐, 광학 기기, IC 용 마스크 등을 위한 최신 가공기술의 필요성이 제기되면서 각종 산업분야에 걸쳐 미세구멍 가공기술이 요구되고 있다. 특히 의료, 항공우주, 컴퓨터 산업에서의 미세구멍가공은 집적도 향상에 따른 가공 구멍의 미세화, 가공 직경에 대한 가공 깊이의 증가, 고밀도 등의 이유로 높은 정밀도와 고 생산성 등이 요구[1]되고 있으며, 이와 같은 기능을 집적 시킨 소형부품의 개발 경쟁이 산업사회에 있어 점점 치열해짐에 따라 미세구멍가공 기술의 중요성은 날로 증가하고 있다. 이러한 가공에 사용되는 기술로는 열적 가공 방식인 전자빔, 레이저, 방전가공 등이 있고 전해연마, 전해가공 같은 화학적 가공 등이 있으나 다양한 피삭체에 대한 적용성, 가공 후 용인한 마무리 작업성 그리고 경제성과 생산성 측면을 고려하면 아직까지는 드릴을 이용한 기계적 가공이 선호되고 있다[2]. 따라서 산업 전반에 걸쳐 점점 더 미세한 구멍가공을 요구함에 따라 드릴 가공도 초소형 화 되어가고 있는 추

세이며 미세 드릴가공에 대한 개발 또한 증대되었다. 하지만 미세 드릴 날의 직경이 작아지고 세장비가 커질수록 심화되는 칩과 열의 배출성 부족, 원활하지 못한 절삭유 공급에 따른 윤활성 부족 그리고 미세드릴의 부족한 강성으로 인하여 공구 파손 등의 많은 문제점이 있다. 그래서 미세드릴 가공에 있어서 공구의 파손과 마모를 막을 수 있는 적절한 절삭조건과 신뢰성 있는 데이터를 가지는 것은 무척 중요하다[3]. 따라서 본 논문에서는 다양한 소재에 대한 미세 심공(micro deep hole)가공에 있어서의 공구 모양과 가공조건을 변화하며 실험을 수행함으로써 가공특성을 파악하여 최적의 가공을 실현할 수 있는 기초적인 지침을 설정하고자 하였다. 따라서 직경 0.2mm 의 미세드릴을 이용한 심공 가공에 있어서 미세드릴 가공 시 트러스트에 영향을 미치는 가공 변수와 최적의 절삭 조건을 찾고자 하였으며 그 방법으로 본 논문에서는 유효적인 실험을 위해 실험 계획법을 이용하였다. 본 실험에서는 효율적인 실험을 위해 다구치 방법을 이용하였으며 실험결과에 대한 분석방법은 분산분석(ANOVA)으로 수행하였다[4].

2. TAGUCHI METHOD

다구치는 제품의 품질을 손실로써 평가하였는데, 손실은 제품의 성능특성이 목표치(target value) 또는 이상치를 유지하지 못하고 변동함으로써 야기된다. 이러한 성능변동의 원인을 잡음(noise)이라 부르며 잡음은 외란, 내란, 불완전제조로 나눌 수 있다. 다구치 방법의 기본 원리는 이와 같은 잡음을 제거하거나 직접 통제하는 대신에 제품의 성능특성치가 잡음에 둔감하도록(즉, 잡음하에서도 성능변동이 심하지 않도록) 제품이나 공정을 설계하는 것이다. 다구치는 이와 같은 전략을 수행함에 있어 소위 직교배열(orthogonal array)이라는 실험계획을 통해 특성치에 대한 데이터를 얻을 것과, 이 데이터로부터 유도된 SN 비(signal-to-noise ratio)라는 성능척도(performance measure)를 분석하여 제품이나 공정의 최적조건을 결정할 것을 제안하였다[5].

2.1 직교 배열

제품의 불량을 적게 한다거나 품질의 산포를 작게 하려는 실험조사에는 일반적으로 고려하여야 할 인자의 수가 많다. 인자의 수가 많을 경우에 주효과와 기술적으로 없으리라고 생각되는 2 인자 교호작용 및 고차의 교호작용에 관한 정보를 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 짤 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교 배열표이다. 직교 배열표에는 보통 2,3 수준계가 많이 쓰인다. 직교 배열표에는 $L_A(B^C)$ 의 형태의 기호로 많이 쓰인다. A는 실험의 크기이며, B는 수준 수, C는 인자의 수를 나타낸다. 직교 배열표를 나타내는 방법에는 각 열에 수준계에 따른 기호나 숫자로 표시되며, 이 기호들은 각 열에 들어간 인자의 수준들을 구분 짓는 기호가 된다

2.2. 자유도

자유도(dgree of freedom)란 어떤 수준이 특성치를 보다 좋게 얼마나 좋게 하는가를 결정하기 위해 필요로 하는 인자 또는 교호작용의 수준사이에서의 최소 비교 회수이다.

(1) 인자의 수준 수에서 선형제약조건을 빼면 각 인자의 자유도가 된다.

(2) 교호작용(interaction A*B)의 경우 각 인자의 자유도의 곱을 하면 교호작용의 자유도가 된다.

위에서 선형제약조건이란 수준평균에 대한 각 수준의 편차의 합은 0임을 나타낸다. 실험 계획법에 이용되는 직교배열표의 선정은 자유도에 의해서 결정된다. 즉 인자와 수준이 결정되면 직교배열을 선택

해야 하는데 이때 임의의 직교배열을 사용할 수 있고 없고의 기준이 되어 주는 것이 자유도 결정이다. 직교배열마다 실험에 사용되는 인자와 수준의 총 자유도가 정해져 있어 인자의 수와 수준의 수가 결정되면 실험의 총 자유도를 계산하여 이용하려는 직교 배열표를 선택한다.

2.3 분산 분석

분산분석(Analysis of Variance: ANOVA)란 먼저 특성값 전체의 산포를 총 제곱합으로 나타내어 이 총 제곱합을 실험에 사용된 각 요인들의 제곱합으로 분해하고, 각 요인의 제곱합을 그 요인들의 자유도로 나누어 불편분산을 계산한 다음, 각각의 불편분산을 오차분산으로 나누어 분산비 F0를 계산하여 오차에 비하여 큰 영향을 주는 요인이 무엇인지를 찾아내는 분석방법으로 주로 분산 분석표를 만들어 해석한다.

예를 들어 인자 A의 수준 수는 l 이고 각 수준마다 m 개의 반복이 있다고 한다면 개개의 데이터 x_{ij} 와 총 평균 x_{tm} 와의 총편차를 둘로 분해하면

$$(x_{ij} - x_{tm}) = (x_{ij} - \bar{x}_i) + (\bar{x}_i - x_{tm}) \quad (2.1)$$

(2.1)의 식이 되고 여기서 \bar{x}_i 는 각 수준의 평균값을 나타낸다. 따라서 위 식에서 이를 제곱하고 l, m 개의 데이터에 대한 합을 구하면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_{tm})^2 &= \\ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (\bar{x}_i - x_{tm})^2 + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 & \quad (2.2) \end{aligned}$$

여기서 좌변을 총 제곱합(S_T), 우변의 첫 항을 각 수준의 효과차이로 인한 변동으로 급간변동 또는 인자의 변동(S_A)이라 하고, 둘째 항은 각 수준내에서의 편차의 제곱합으로 급내변동, 오차변동 또는 잔차변동(S_E)이라고 한다. $S_T = S_A + S_E$ 로 표현되며, 각 항의 간편한 계산식은 아래와 같다.

$$S_T = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_{tm})^2 = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 - CT \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} S_A \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (\bar{x}_i - x_{tm})^2 &= m \sum_{i=1}^l (\bar{x}_i)^2 - CT \\ &= \frac{l T_i^2}{m} - CT \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 - m * \sum_{i=1}^l \bar{x}_i^2$$

$$= \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 - CT \right) - \left(\sum_{i=1}^m \frac{T_i^2}{m} - CT \right) \quad (2.5)$$

여기서 $CT = T_i^2 / lm = T^2 / rN$ 이고 T 는 데이터의 총합이다. 위식으로 구한 각 인자의 제곱합을 각 인자의 자유도로 나누면 제곱평균 또는 분산이 된다. 이를 나타내는 일반식은 다음과 같다.

$$V_i = \frac{S_i}{Q_i} \quad (2.6)$$

오차분산에 대한 주요인자의 (2.6)식을 이용하여 분산비를 구할 수 있는데 분산비는 임의의 요인인 오차 요인에 비해 통계적으로 유의한가를 판단하는 기준으로 분산비가 크면 오차요인에 비해 유의함을 나타낸다. 즉, 직교 배열표를 이용하여 실험계획을 세울 때 귀무가설에 대한 검정을 하게 되는데 실험에서 얻어지는 인자의 영향이 특정 유의 수준 내에서 신뢰할 수 있는가를 검정하는 기준이 된다.

$$F_0 = \frac{V_i}{V_E} \quad (2.7)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 마이크로 드릴링 시스템

본 실험에 사용된 마이크로 드릴링 머신은 TUNGALOY 사의 SDM-01-15BF 형 드릴링 머신으로 고속의 에어 스펀들을 사용하며 스텝이송 구동 방식을 적용 미세드릴의 파손을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 Step back 의 작용으로 칩과 열의 배출을 용이하게 할 수 있다. 본 실험에 사용된 마이크로 드릴 머신과 그 시스템의 사진을 Fig. 1 에 나타내었다.

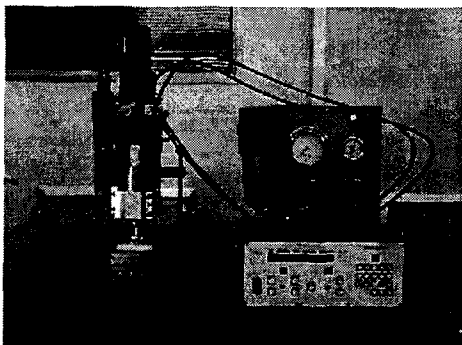


Fig. 2 Micro drilling system

본 실험에서는 일반강(SM45C)을 을 가공 대상으로 선정하였으며 실험에 사용된 마이크로드릴의

형상과 치수를 Fig. 2 에 나타내었다.

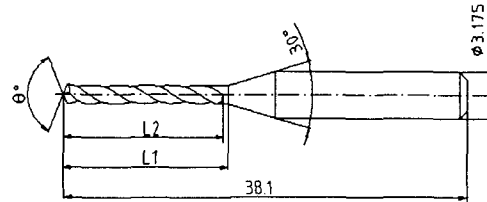


Fig. 2 Geometry of micro drill

Table 1 Experimental design for an $L_{27}(3^{13})$ orthogonal Array

array	A	B	AB	AB	C	AC	AC	e	e	e	e	e	e	Repos	SN(%)		
factors	feed	step			rpm												
1	30	5			2000												
2	60	10			2000												
3	90	20			3000												
Nb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2		
1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	33	-10.0%	
2	26	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	29	29	-9.33%	
3	19	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	28	29	-9.09%	
4	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	-9.5%	
5	20	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	31	28	-9.41%
6	18	1	2	2	2	3	3	3	1	1	2	2	2	2	27	26	-8.67%
7	1	1	3	3	3	1	1	1	3	3	2	2	2	24	27	-8.14%	
8	17	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	23	25	-7.61%
9	8	1	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	21	19	-6.03%	
10	21	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	48	49	-3.75%
11	16	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	41	42	-4.23%
12	3	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	37	33	-10.6%
13	7	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	41	42	-4.23%
14	15	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	32	35	-10.9%
15	5	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	34	33	-10.3%
16	14	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	38	41	-11.9%
17	6	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	34	32	-10.3%
18	12	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	29	-9.36%
19	22	3	1	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	68	75	-17.0%
20	11	3	1	2	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	62	63	-6.91%
21	23	3	1	2	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	51	52	-4.23%
22	13	3	2	3	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	51	5	-14.0%
23	27	3	2	3	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	47	43	-13.0%
24	24	3	2	3	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	46	48	-13.4%
25	10	3	3	1	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	45	5	-13.5%
26	25	3	3	1	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	42	46	-12.5%
27	9	3	3	1	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	41	39	-11.9%

3.2 실험 계획법을 이용한 0.2mm 마이크로 드릴 가공 실험

칩의 영향을 크게 받지 않는 스텝 이송량인 경우에는 스텝방식에는 크게 영향을 받지 않지만, 드릴에 걸리는 걸삭력을 줄이기 위하여 스텝이송을 회수를 너무 많이 주어도 가공경화의 영향으로 쉽게 파손으로 이르게 된다. 또한 드릴의 feed 를 너

무 느리게 하면 작업능률이 떨어지며 주축의 회전 속도가 너무 빨라도 드릴링의 진동이 커져 피삭재의 구멍이 확대된다. 따라서 본 실험에서는 재질 SM45C 에서 Dia. 0.2mm 직경의 드릴 가공 시 최적 절삭조건을 찾고자 실험 계획법을 이용하였다.

실험에 사용된 직교배열은 $L_{27}(3^{13})$ 을 이용하였으며 통계적 분석을 통하여 드릴의 트러스트에 영향을 주는 주인자를 검출하고자 하였다. 각 실험조건에서 총 절삭 깊이는 동일하게 주었으며, 피삭재 SM45C 의 표면 거칠기와 표면경화를 해결하기 위해서 피삭재를 선삭하고 폴리싱하여 $R_{max} : 0.6 \mu m$ $R_a : 0.065 \mu m$ 이내로 하였다. 실험에 따른 각 조건과 직교 배열표, 그리고 실험의 결과치에 의한 트러스트 값을 Table 1 에 나타내었다.

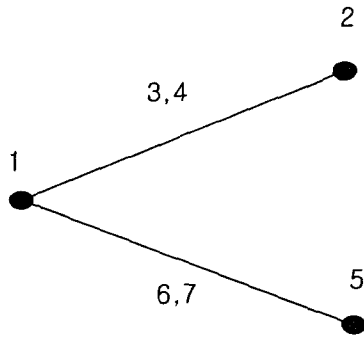


Fig. 3 Linear Graph For $L_{13}(3^{13})$

실험 계획법을 통하여 도출된 데이터들을 분석하는데 있어서 다구치는 소위 직교표라 부르는 실험계획을 이용하여 데이터를 수집할 것과, 그 데이터로부터 유도된 SN 비(signal-to-noise ratio)를 분석함으로써 제품이나 공정의 최적조건을 결정할 것을 제안하고 있다[7]. 따라서 다구치 방법에 의한 손실함수의 특성은 망소 특성, 망대 특성, 망목 특성으로 나누어지며 본 실험의 경우에는 최소 트러스트를 갖는 조건을 찾는 것을 목적으로 하므로 망소 특성으로 잡았으며 $A*B$, $A*C$ 를 교호작용으로 고려하여 Fig. 3 에 나타낸 것처럼 선점도를 이용하여 인자를 배당하고 실험을 실시하였다.

Table 2 Singal-to-noise ratio response

Symbol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	A*B	A*B	C	A*C	A*C	e	e	e	e	e	e
Level 1	-8.624	-12.5	-10.95	-11.30	-12.28	-11.16	-11.18	-11.55	-10.88	-11.22	-11.25	-11.34	-11.28
Level 2	-11.33	-11.2	-12.05	-11.80	-11.27	-11.55	-11.31	-11.21	-11.15	-11.30	-11.5	-11.17	-11.28
Level 3	-14.02	-10.2	-10.63	-11.03	-10.42	-11.26	-11.47	-11.20	-11.57	-11.46	-11.23	-11.46	-11.42
Max-Min	5.397	2.32	1.42	0.77	1.86	0.39	0.3	0.35	0.69	0.24	0.27	0.28	0.14

Table 2 는 각 결과에 대한 S/N ratio response 를 보여주고 있는데 예를 들어 Factor A 의 경우 즉 feed 에서 레벨 1,2,3 일 때 계산되어진 S/N ratio

response 의 평균값을 올려놓은 것이다. 또한 상대적으로 동일한 방법으로 Table 3 과 4 에는 $A*B$ 와 $A*C$ 의 교호작용표를 나타내었다.

Table 3 A*B Interaction matrix

	B1	B2	B3
A1	-9.5146	-9.202	-7.236
A2	-12.323	-11.124	-10.57
A3	-15.7497	-13.527	-12.78

Table 4 A*C Interaction Matrix

	C1	C2	C3
A1	-9.2747	-8.7859	-7.919
A2	-12.671	-11.081	-10.264
A3	-14.902	-13.953	-13.204

실험을 통하여 나온 결과치에 의한 각 요인에서 S/N 비의 그래프를 Fig. 5 에서 Fig. 9 까지 나타내었다. 이 결과를 토대로 평균 Trust 값을 각 인자의 수준별로 정리하여 각인자의 수준 변화에 의해 나타난 특성치 산포의 합과 평균을 구해서 Table.5 에 나타내었다. 따라서 이 Table 을 통해 마이크로 드릴링에 있어서 드릴의 트러스트에 영향을 미치는 인자는 Feed, Step, RPM 순으로 나타났으며 무엇보다 이송속도의 영향, 즉 Feed 값이 가장 큰 것으로 나타났다. Table 6 에는 Table 5 를 토대로하여 풀링(Pooling)을 시킨후 분산 분석한 결과를 나타내었다. 여기서 풀링이란 오차분산이나 다른 인자들의 분산에 비해 상대적으로 큰 유의성을 나타내지 못하는 인자를 실험상 나타날 수 있는 오차로 판단하여, 오차인자로 판단함을 의미하고, 옳은 판단인가에 대한 검정은 분산비 즉, F 검정으로 확인한다. 결국 각각의 Factor 에서 S/N ratio graph 와 ANOVA 를 통해 A1, B3 그리고 C3 이 트러스트를 가장 적게 주는 변수이며 또한 $A*B$ 와 $A*C$ 의 교호작용은 없다고 볼 수 있다.

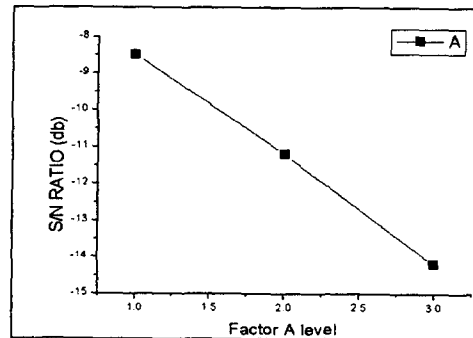


Fig. 4 S/N Ratio Response graph of factor A

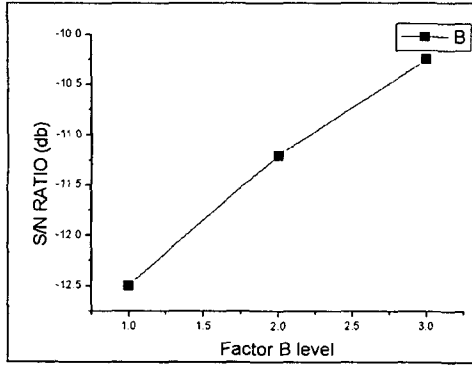


Fig. 5 S/N Ratio Response graph of factor B

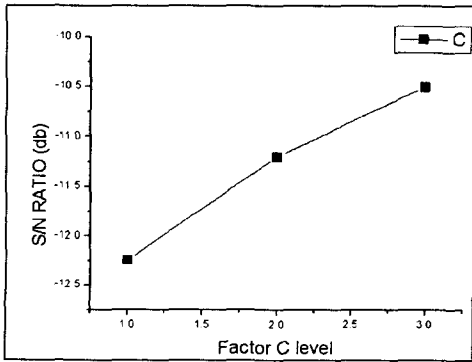


Fig. 6 S/N Ratio Response graph of factor C

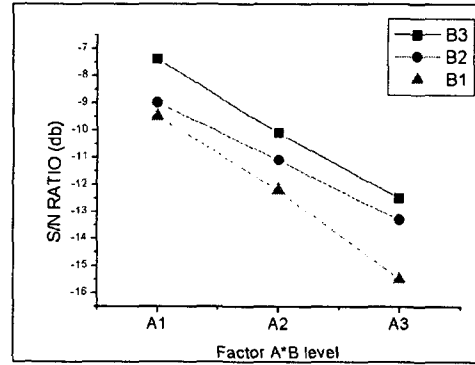


Fig. 7 Interaction graph of factor A*B

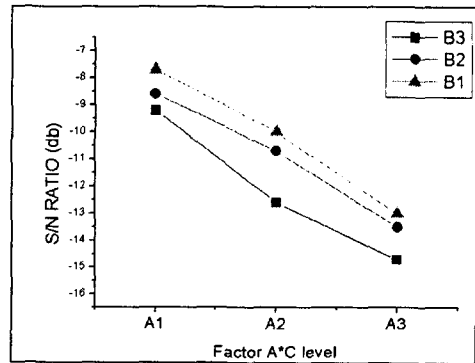


Fig. 8 Interaction graph of factor A*C

4. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 다구치 방법을 이용하여 발생되는 절삭력의 결과에서 분산분석을 통하여 Feed 30, Step 20, RPM 30000 일 때 가장 최적의 절삭조건으로 나왔으며 그 트러스트 값은 0.2N 으로 가장 적은 값을 걸리는 것을 알 수 있었으며 아래의 Fig. 10 에 Feed 30, Step20, RPM3000 에서의 가공면을 나타내었다. 또한 Fig.11~Fig.13 은 step 의 조건에 따른 가공면의 형상을 보여주는데 이 형상면을 통하여 Step 의 횟수가 많아질수록 가공구멍의 형상이 확대 또는 불규칙해지는 것을 볼 수 있다.

따라서 공구의 마모를 줄이기 위한 최적의 절삭력을 찾는 것이 가공된 공작물의 표면형상이나 최소의 버를 형성하지는 않기 때문에 최적의 가공면을 찾기 위해서는 새로운 실험 데이터들을 요구되어진다.

5. 결론

본 연구에서는 미세구멍 가공에서의 실험적 검토를 하며 또한 가공시 발생하는 절삭력에 영향을 주는 인자들을 판명하고자 실험 계획법을 이용하여 미세구멍 가공에서 절삭력 향상을 위한 가공조건

Table 5 Analysis of variance

source	Sum of squarness	DOF	Mean square	F ₀
A	127.388	2	63.669	12.960
B	18.7163	2	9.3518	1.9036
C	11.7107	2	5.85535	1.192
A*B	-29.0518	4	-7.262	-1.478
A*C	-10.4107	4	-2.6026	0.529
e	58.9537	12	4.913	
Total	177.256	26		

Table 6 Analysis of variance after pooling

source	Sum of squarness	DOF	Mean square	F ₀	F (0.05)
A	127.388	2	63.669	65.3	3.49
B	18.7163	2	9.3518	9.58	3.49
C	11.7107	2	5.855	6.00	3.49
e	19.491	20	0.9745		
Total	177.256	26			

선정을 얻을 수 있었다. 따라서 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

(1) 0.2 mm 미세드릴 가공에서 직교 배열표에 의한 실험 계획법을 이용하여 실험을 한 후 분산 분석을 실시하였다. 0.2 mm 미세드릴 가공에서 트러스트에 가장 영향을 주는 인자는 트러스트에 기여하는 인자는 Feed, Step, RPM 순으로 나타나며 무엇보다 이송속도의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

(2) 2mm 미세드릴 가공에서 각각의 Factor 에서 S/N ratio graph 와 ANOVA 를 통해 A1, B3 그리고 C3 이 트러스트를 가장 적게 주는 변수이며 또한 A*B 와 A*C 의 교호작용은 없다고 볼 수 있다. 최적 절삭조건은 A1, B3, C3 으로 나타났으며 A*B 와 A*C 의 교호작용은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 하지만 단지 트러스트 하나의 값으로 마이크로 드릴링에 있어서 드릴의 수명과 공작물의 표면형상, 즉 진원도나 최소의 버를 형성함에 있어서는 최적의 조건이라고 할 수 없다. 따라서 이 요인에 대한 실험과 연구를 필요로 하겠다.

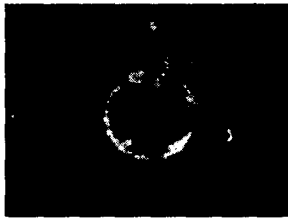


Fig.9 Micro drilled hole(feed 30, step20, rpm 30000)



Fig.10 Micro drilled hole(feed 60, step5, rpm 30000)

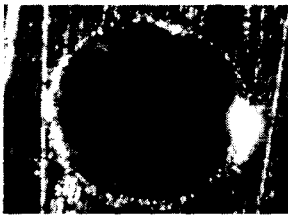


Fig.11 Micro drilled hole(feed 60, step10, rpm 30000)

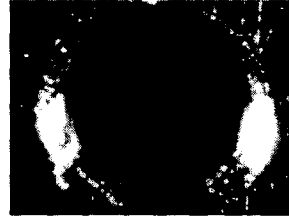


Fig.12 Micro drilled hole(feed 60, step20, rpm 30000)

참고문헌

1. 이응숙, "미세구멍가공용 드릴링머신 개발" 제 2 회 정밀기술 심포지움, 한국 기계연구원, pp.291, 1994
2. W.konig, "Tool Monitoring of small Drills with Acoustic emission", Int.j.Mach. Tools Mufact, Vol32, Mo. 4, 87~493, 1992
3. 이병열외 4 인, "미세구멍 가공의 최적절삭성을 위한 절삭조건에 관한 연구", 한국정밀공학회, '94년도 추계학술대회 논문집 p131~ 135, 1994
4. 박성현, 현대 실험계획법, 민영사, 1990
5. Glen stuart peace, Taguchi Method, Addison-wesley Publishing co.inc
6. 이대욱, " 실험계획법을 이용한 유리재질의 최적연삭조건에 관한 연구" 충북대학교 공학석사 학위논문, p3-10
7. 박동규, 최신 실험계획법, 기전연구사, 1999