

다이아몬드 코어드릴 공정의 구멍가공 특성과 모델링

윤관우*, 정성종⁺

(논문접수일 2008. 3. 4, 심사완료일 2008. 5. 23)

Drilling Characteristics and Modeling of Diamond Core Drilling Processes

Kwan-Woo Yoon*, Sung-Chong Chung⁺

Abstract

Diamond core drills are applied to drill difficult-to-cut materials. This paper proposes basic understanding of ceramic drilling mechanics and characteristics of main factors affecting tool life, tool wear, cutting force, and chipping thickness. In contrast to conventional drilling, the core drilling process make deep grooves on the workpiece. One difficulty of it is the evacuation of chips from the drilled groove. As the drilling depth increases, an increased amount of chips tend to cluster together and clog the groove. Eventually severe wear develops and diamond grits are separated from the drill body. To relieve the clogging problem and to evacuate chips from the groove easily, the helical drilling process is applied for the core drilling process. To analyze drilling characteristics and derive optimal drilling conditions, tool life, tool wear, cutting force, and chipping thickness are quantified through the monitoring system and the Taguchi method. Mathematical models for the tool life and chipping thickness are derived from the response surface method. Optimal drilling database has been constructed through the experimental models.

Key Words : Diamond core drill(다이아몬드 코어드릴), Tool life(공구수명), Tool wear(공구마멸), Cutting force(절삭력), Chipping thickness(칩핑두께), Helical drilling(헬리컬 드릴링), Experimental design(실험계획법)

1. 서론

다이아몬드 입자(grit)를 탄소강 몸체에 용착시킨 다이아몬드 코어드릴은 세라믹(ceramic), 웨이퍼(wafer), 유리(glass), 타일(tile), 텅스텐(tungsten)등과 같은 난삭재의 구멍가공에

효과적이기 때문에 IT, BT는 물론, 건설, 기계 산업에 널리 이용된다.

다이아몬드 코어드릴링 공정에서 가공조건과 절삭유의 공급유무는 공구수명과 가공능률을 결정짓는 중요한 요인이다. 그러나 이 공정은 다른 입자가공에 비해 관여하는 인자

* 한양대학교 기계공학과

+ 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (schung@hanyang.ac.kr)

주소: 133-791 서울시 성동구 행당1동 17번지

가 많고 그 인자들이 상호작용하여 공구수명과 가공능률에 영향을 미치므로, 각 인자들의 특성 분석과 가공조건 선정이 어렵다⁽¹⁻³⁾.

절삭공구를 사용한 전형적인 드릴링 공정과 대조적으로 코어드릴링 공정은 깊은 홈을 만들면서 재료를 제거 한다. 때문에 가공된 홈으로부터 칩 배출이 원활하지 않다. 가공깊이가 증가할수록 칩은 누적되고 서로 뭉치려는 경향을 보이며, 가공된 홈을 막히게 한다. 이와 같은 현상은 결국 다이아몬드 입자의 마멸과 탈착을 촉진시킨다. 가공된 홈으로부터 칩 배출을 용이하게 하고 눈막힘 현상을 해결하기 위해서 진동 및 헬리컬 드릴링 공정에 대한 연구가 진행되고 있다. Huang과 Wang은 다이아몬드 코어드릴링 공정에서 압축 가공에 영향을 주는 인자들에 대해 연구하였다^(4,5).

본 연구에서는 다이아몬드 코어드릴링 공정에서 절삭유를 공급하며 난삭재 중 하나인 포셀린 타일에 헬리컬 드릴링 방법으로 구멍가공을 수행한다. 다이아몬드 코어드릴링 공정의 특성을 분석하기 위해서 공구동력계 및 머신비전 시스템⁽⁶⁾을 이용하여 공정변수에 따른 공구수명, 공구마멸, 절삭력, 칩핑두께를 정량화하였다. 그리고 실험계획법에 기초하여 공구수명 모델과 칩핑두께 모델을 도출하고, 최적가공조건과 가공DB를 구축하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 절삭력, 마멸 등의 데이터수집장치와 가공실험장치를 보인 것이다. 다이아몬드 코어드릴의 구멍가공 실험에는 주축 모터동력 10kW, 최대 회전수 12,000rpm의 수직형 탭핑 센터를 사용한다. 절삭력 측정을 위해 공구동력계와 LabVIEW를 이용하고, 마멸을 측정하기 위해 머신비전 장치를 사용한다. 드릴링 공구는 내경 2mm, 외경 6mm의 다

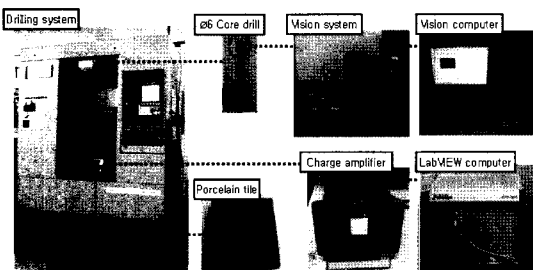


Fig. 1 Overview of the experimental setup

이아몬드 입자를 용착시킨 다이아몬드 코어드릴을 사용한 다. 시편은 대표적 난삭제인 포셀린 타일(90×90×10mm³, 모스경도 7)을 사용하는데, 이것은 조직이 치밀하고 색상은 희며, 내산성, 내알카리성, 내마멸성이 우수하다.

2.2 실험방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 헬리컬 드릴링 방법을 나타낸다. 일반적인 드릴링 방식은 축 방향에 대하여 직선적인 절입형태를 취하는 반면, 헬리컬 드릴링 방식은 드릴링 방향에 대하여 헬리컬 궤적의 절입형태를 취하게 된다. 다이아몬드 코어드릴링 공정에서 헬리컬 운동을 이용하면 칩 배출이 용이하므로 눈막힘 현상이 방지되고, 지속적인 구멍가공이 가능하다. 또한 공구와 구멍 사이에 존재하는 간극을 통하여 가공 중에 발생하는 절삭열의 발산이 원활하다는 특징을 갖는다⁽⁵⁾.

다이아몬드 코어드릴링 공정에 관여하는 인자 중 헬리컬 이송속도(Helical feed)는 가공시간을 증감시키는 인자이므로, 최대생산성을 고려한 수준 선정이 필요하다. 선행 실험결과 헬리컬 이송속도가 20μm/rev 이상일 경우, 공구마멸로 인해 절삭력이 급격하게 증가하였고, 시편이 파손되었다. 본 실험에서는 공구수명과 최대생산성을 고려하여 헬리컬 이송속도를 20μm/rev 으로 선정하였다.

3. 실험계획법

다이아몬드 코어드릴링 공정에서 환경적, 기계적 오차에 강건하고 공구수명 및 생산성 향상을 위한 최적가공조건을 선정하기 위해 다구찌 실험계획법과 반응표면분석을 이용한다. 다이아몬드 코어드릴링 공정은 다른 입자가공에 비해 관여하는 인자가 많고 가공조건이 복잡하다. 이러한 여러 인자들의 특성을 분석하기 위해 각각의 인자와 그 수준을 조합하

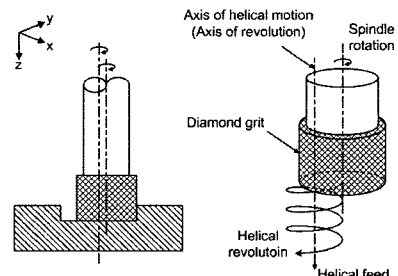


Fig. 2 Parameters in the helical drilling process

여 실험할 경우, 실험 횟수는 기하급수적으로 증가한다. 따라서 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있게 실험을 계획하고 효율적으로 데이터를 분석하는 것이 중요하다.

다구찌 방법의 강건설계는 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호입력의 힘과 잡음의 힘 비율로 나타내며, 각각의 조절인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 선정된 값의 잡음에 대하여 강건해진다. SN비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지는데 특성치는 망목, 망소, 망대 특성으로 나뉜다. 망대특성은 특성치가 클수록 좋은 경우로서 공구수명이 이에 준하고, 망소특성은 특성치가 작을수록 좋은 경우로서 공구마멸, 절삭력, 칩핑두께가 이에 준한다.

$$\eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

$$\eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 각각 망소 특성과 망대 특성에 대한 SN비(dB)이다. 여기서, y_i 는 실험데이터, n 은 실험 횟수를 의미한다.

다구찌 기법을 효과적으로 실험조건 선정에 적용하기 위해 직교배열표를 이용한다. 직교배열표는 실험의 재현성과 최적가공조건 선정시 안정성을 보장하고 실험 인자별 교호작용을 희생시켜 실험의 크기를 최소화하면서 실험에 많은 인자와 그 수준을 포함시킬 수 있다는 장점이 있다.

최적가공조건의 선정뿐만 아니라 가공DB 구축에 필요한 수학적 모델을 구하기 위해 선행실험을 통해 특성치에 영향을 미치는 인자 및 수준을 선정하고, 총 25회의 실험수를 갖는 $L_{25}(5^6)$ 직교배열표를 작성하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 인자와 수준을 나타내고, Table 2는 $L_{25}(5^6)$ 직교배열표를 나타낸다. Table 2에서 Error는 작업환경, 공구 형상

오차, 기계적 오차 등을 감안한 것으로, 분산분석에서 특성치에 유의한 영향을 주는 인자들의 검출을 강인하게 한다.

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자 마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다⁽⁷⁾. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도(degree of freedom)로 나누면 그 요인의 평균제곱(mean square)이 되며, 오차의 분산과 비교할 수 있다. 이때 얻어진 값들의 확률적 유의수준은 F-검증을 이용하여 평가한다. 분산분석표에서 SS는 제곱합, DF는 자유도,

Table 2 $L_{25}(5^6)$ Orthogonal array

Exp.#	Spindle rotation	Helical feed	Helical diameter	Helical revolution	Error
1	3000	60	0.4	30	1
2	3000	70	0.6	60	2
3	3000	80	0.8	90	3
4	3000	90	1.0	120	4
5	3000	100	1.2	150	5
6	3500	60	0.6	90	4
7	3500	70	0.8	120	5
8	3500	80	1.0	150	1
9	3500	90	1.2	30	2
10	3500	100	0.4	60	3
11	4000	60	0.8	150	2
12	4000	70	1.0	30	3
13	4000	80	1.2	60	4
14	4000	90	0.4	90	5
15	4000	100	0.6	120	1
16	4500	60	1.0	60	5
17	4500	70	1.2	90	1
18	4500	80	0.4	120	2
19	4500	90	0.6	150	3
20	4500	100	0.8	30	4
21	5000	60	1.2	120	3
22	5000	70	0.4	150	4
23	5000	80	0.6	30	5
24	5000	90	0.8	60	1
25	5000	100	1.0	90	2

Table 1 Levels of control factors

Factors	Levels				
	1	2	3	4	5
Spindle rotation(rpm)	3000	3500	4000	4500	5000
Helical feed(mm/min)	60	70	80	90	100
Helical diameter(mm)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
Helical revolution(rpm)	30	60	90	120	150

V는 평균제곱, ρ 는 기여도(percentage of contribution), PE는 풀링된 오차(pooled error)를 의미하고, F0는 평균제곱의 비로서 F-검정에 사용된다⁽⁷⁾.

4. 특성치 정량화

4.1 공구마멸(Tool wear)

다이아몬드 코어드릴의 마멸과 형상을 분석하기 위하여 머신비전 시스템을 이용한다. Fig. 3에서 (a)와 (b)는 각각 가공전과 가공후의 이미지이고, 가공조건에 따른 다이아몬드 코어드릴의 마멸을 정량화하기 위해 (c)와 같이 다이아몬드 입자의 높이변화(h)를 Fig. 1의 머신비전장치로 측정한다^(6,8). 마멸이 작을수록 공구수명이 향상되고, 절삭성이 우수하므로 망소 특성 식 (I)을 적용하여 SN 비를 구한다.

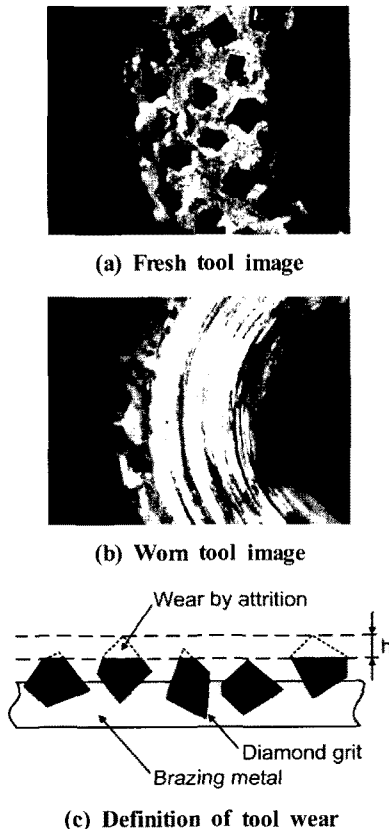


Fig. 3 Tool wear measurement

4.2 절삭력(Cutting force)

절삭력을 측정하기 위해 공구동력계(9272, Kistler)를 사용한다. 공구동력계에서 발생된 신호는 Fig. 1에 보인 바와 같이 앰프(5070, Kistler)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐서 LabVIEW 컴퓨터에 기록된다. 이 때, 샘플링 시간(sampling time)은 1ms 이다. Fig. 4는 무리한 가공조건에서 포셀린 타일의 헬리컬 드릴링 작업 중에 z축 방향의 절삭력을 측정 한 것이고, Fig. 5는 이때 절삭력의 변화율을 시간에 따라 보인 것이다. Fig. 4에서 시간의 증가와 더불어 절삭력이 점진적으로 상승하여 150초 후에 절삭력이 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 절삭력 급상승 현상은 공구마멸과 눈막힘 현상에 기인한 것으로 다이아몬드 코어드릴의 연삭 특성을 이해하고, 공구 교체시기의 예측을 가능하게 한다. 선행실험에서 헬리컬 피드의 선정 시 Fig. 5의 절삭력 변화율을 이용하여 그 기준을 선정하였다.

본 연구에서는 가공조건에 따른 절삭력을 정량화하기 위해 안정한 가공조건에서 나타나는 Fig. 6과 같은 절삭력의

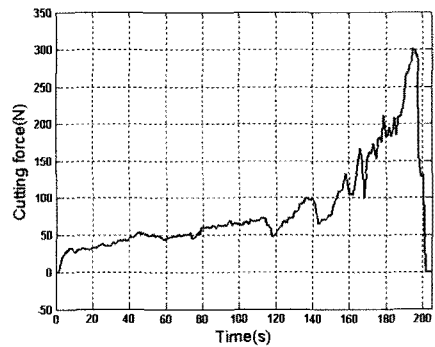


Fig. 4 Variation of cutting force

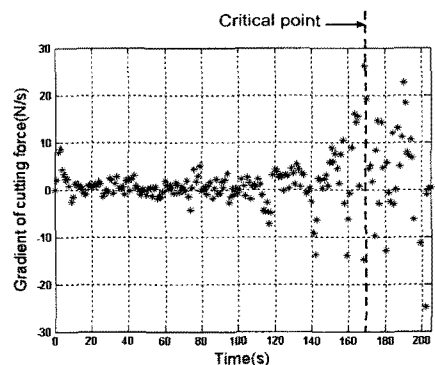


Fig. 5 Variation of cutting force gradient

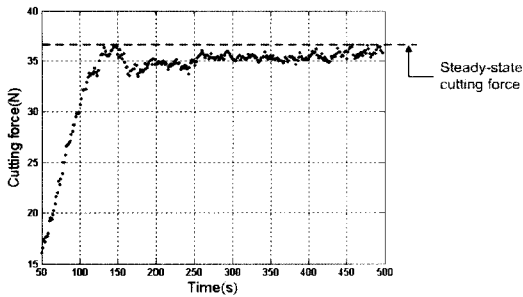


Fig. 6 Cutting force versus time

정상상태 구간을 측정하였다. 높은 생산성 하에서도 절삭력은 낮을수록 좋기 때문에 망소 특성 식 (1)을 적용하여 SN비를 구하였다.

4.3 칩핑두께(Chipping thickness)

실험에 사용된 포셀린 타일은 모스경도가 7인 취성 재료이기 때문에 가공면에 미세한 균열이 발생하는 등의 결함에 주의가 요구된다. Fig. 7은 다이아몬드 코어드릴링 공정에서



Fig. 7 Machined rod with chipping

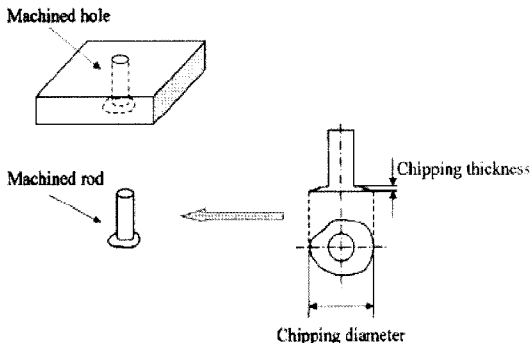


Fig. 8 Definition of chipping thickness

포셀린 타일의 출구부 파손을 보여준다. 출구부 파손을 최소화하는 가공조건을 선정하기 위하여 Fig. 8과 같이 칩핑두께를 정량화 한다⁽⁹⁾. 공구마멸, 절삭력과 마찬가지로 칩핑두께도 작을수록 좋기 때문에 망소 특성 식 (1)을 적용하여 SN비를 구한다.

5. 실험결과

5.1 공구수명

Fig. 9는 다이아몬드 코어드릴 습식실험 결과를 나타낸다. Spindle rotation: 4500rpm, Helical feed: 60mm/min, Helical diameter: 1mm, Helical revolution: 60rpm에서 가장 많은 113홀을 가공하였고, Spindle rotation: 3000rpm, Helical feed: 100mm/min, Helical diameter: 1.2mm, Helical revolution: 150rpm에서 가장 적은 2홀을 가공하였다. Table 3은 공구수명에 대한 분산분석 결과이다. 이 분산분석표로부터 공구수명에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Helical feed(54.38%)이고, Spindle rotation(25.7%), Helical revolution(8.25%), Helical diameter(7.37%), Error(4.31%)의 순으로 공구수명에 영향을 미친다.

특히, 이들 인자들의 기여도가 Error에 비해 그 값이 충분히

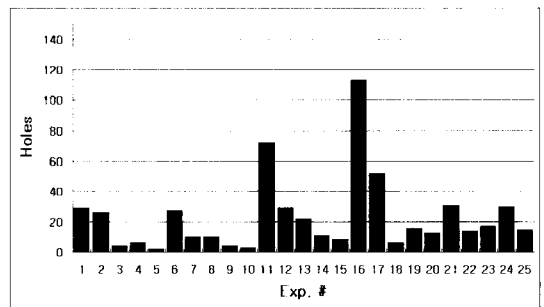


Fig. 9 Experimental results for the tool life

Table 3 ANOVA results for the tool life

Factor	Level(SN ratio)					SS	DF	V	F ₀	μ(%)
	1	2	3	4	5					
A	18.23	18.04	26.43	27.46	26.08	440.68	4	110.17	5.97	25.70
B	33.18	26.96	19.81	20.41	15.89	932.57	4	233.14	12.63	54.38
C	19.62	24.74	24.20	25.88	21.81	126.33	4	31.58	1.71	7.37
D	23.48	27.06	23.87	19.80	22.03	141.52	4	35.38	1.92	8.25
Error						73.83	4	18.46		4.31
Total							20	428.73		100

크므로, Helical feed, Spindle rotation, Helical revolution, Helical diameter 모두가 공구수명에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있다. Table 3 으로부터 공구수명을 최대로 하는 인자의 조합은 Spindle rotation은 4500rpm, Helical feed는 60mm/min, Helical diameter는 1mm, Helical revolution 은 60rpm 이다.

5.2 공구마멸

Fig. 10은 다이아몬드 코어드릴 습식실험에서 공구마멸에 대한 결과를 나타낸다. Spindle rotation: 4500rpm, Helical feed: 70mm/min, Helical diameter: 1.2mm, Helical revolution: 90rpm에서 마멸이 가장 작았으며, Spindle rotation: 3000 rpm, Helical feed: 100mm/min, Helical diameter: 1.2 mm, Helical revolution: 150rpm에서 마멸이 가장 심했다.

Table 4에서 Helical diameter의 평균제곱은 Error에 비해 그 값이 작으므로, Helical diameter를 풀링(pooling)하여 분산분석표를 작성하였다. 분산분석표에서, 공구마멸에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Spindle rotation(50.78%)이고, Helical feed(34.73%), Helical revolution(11.04%), PE(3.45%)의 순으로 공구마멸에 영향을 미친다. 특히, 이들 인

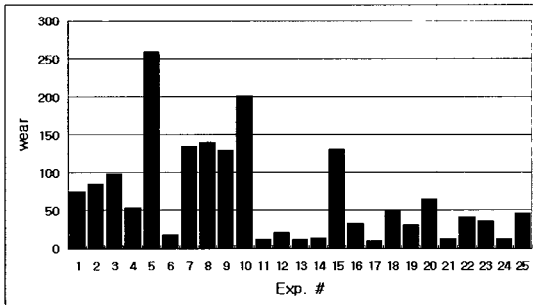


Fig. 10 Experimental results for the tool wear

Table 4 ANOVA results for the tool wear

Factor	Level(SN ratio)					SS	DF	V	F ₀	ρ(%)
	1	2	3	4	5					
A	-39.75	-39.80	-26.82	-30.09	-28.24	805.10	4	201.27	14.72	50.78
B	-27.22	-31.98	-33.90	-30.36	-41.24	550.63	4	137.66	10.07	34.73
C	-34.54	-33.40	-32.38	-33.50	-30.88	38.24	4	9.56		
D	-34.72	-31.78	-28.24	-35.14	-34.82	174.98	4	43.74	3.20	11.04
Error						71.11	4	17.78		
PE						109.35	8	13.67		3.45
Total							20	396.35		100

자들의 기여도가 PE에 비해 그 값이 충분히 크므로, Spindle rotation, Helical feed, Helical revolution 가 공구마멸에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있다. Table 4로부터 공구마멸을 최소로 하는 인자의 조합은 Spindle rotation은 4000 rpm, Helical feed는 60mm/min, Helical diameter는 1.2 mm, Helical revolution은 90rpm 이다.

5.3 절삭력

Fig. 11은 다이아몬드 코어드릴 습식실험에서 절삭력 측정 값을 나타낸다. Spindle rotation: 4500rpm, Helical feed: 70mm/min, Helical diameter: 1.2mm, Helical revolution: 90rpm에서 절삭력이 가장 낮았으며, Spindle rotation: 3000rpm, Helical feed: 100mm/min, Helical diameter: 1.2mm, Helical revolution: 150rpm에서 절삭력이 가장 높았다. 이는 공구마멸을 최소, 최대로 하는 가공조건과 동일한 것으로 공구마멸과 절삭력은 서로 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다. Table 5에서 Helical revolution의 평균제곱은 Error에 비해 그 값이 작으므로, Helical revolution을 풀링(pooling)하여 분산분석표를 작성하였다. 분산분석표에서, 절삭력에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Spindle

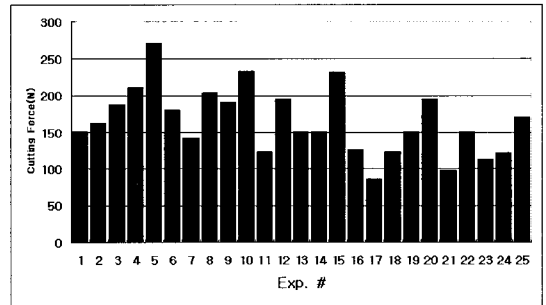


Fig. 11 Experimental results for the cutting force

Table 5 ANOVA results for the cutting force

Factor	Level(SN ratio)					SS	DF	V	F ₀	ρ(%)
	1	2	3	4	5					
A	-45.67	-45.47	-44.43	-42.40	-42.18	55.09	4	13.77	8.84	44.33
B	-42.49	-43.09	-43.63	-44.21	-46.74	53.88	4	13.47	8.65	43.36
C	-43.98	-44.25	-43.60	-45.04	-43.28	9.07	4	2.27	1.46	7.30
D	-44.36	-43.81	-43.52	-43.70	-44.76	5.31	4	1.33		
Error						7.15	4	1.79		
PE						12.46	8	1.56		5.01
Total							20	31.07		100

rotation(44.33%)이고, Helical feed(43.36%), Helical diameter (7.3%), PE(5.01%)의 순으로 절삭력에 영향을 미친다. 특히, 이들 인자들의 기여도가 PE에 비해 그 값이 충분히 크므로, Spindle rotation, Helical feed, Helical diameter 가 공구마멸에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있다. Table 5로부터 절삭력을 최소화하는 인자의 조합은 Spindle rotation은 5000rpm, Helical feed는 60mm/min, Helical diameter는 1.2mm, Helical revolution은 90rpm이다.

5.4 칩핑두께

Fig. 12는 다이아몬드 코어드릴 습식실험에서 칩핑두께 측정값을 나타낸다. Spindle rotation: 4000rpm, Helical feed: 60mm/min, Helical diameter: 0.8mm, Helical revolution: 150rpm에서 칩핑두께가 가장 작았으며, Spindle rotation: 3000rpm, Helical feed: 100mm/min, Helical diameter: 1.2mm, Helical revolution: 150rpm에서 칩핑두께가 가장 컸다. Table 6은 칩핑두께에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 분산분석표에서, 칩핑두께에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Helical feed(47.24%)이고, Spindle rotation(28.71%), Helical revolution(10.45%), Helical diameter(9.06%), Error (4.53%)의 순으로 칩핑두께에 영향을 미친다. 특히, 이들 인자

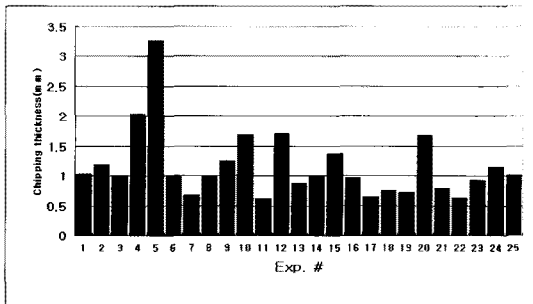


Fig. 12 Experimental results for the chipping thickness

Table 6 ANOVA results for the chipping thickness

Factor	Level(SN ratio)					SS	DF	V	F ₀	ρ(%)
	1	2	3	4	5					
A	-3.66	-0.63	-0.42	0.92	1.02	71.55	4	17.89	6.33	28.71
B	1.19	1.04	0.80	-1.30	-4.50	117.73	4	29.43	10.42	47.24
C	0.28	-0.21	0.37	-2.16	-1.06	22.59	4	5.65	2.00	9.06
D	-2.17	-1.19	0.72	-0.25	0.12	26.05	4	6.51	2.31	10.45
Error						11.30	4	2.82		4.53
Total							20	62.30		100

들의 기여도가 Error에 비해 그 값이 충분히 크므로, Helical feed, Spindle rotation, Helical revolution, Helical diameter 모두가 칩핑두께에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있다.

Table 6으로부터 칩핑두께를 최소화하는 인자의 조합은 Spindle rotation은 5000rpm, Helical feed는 60mm/min, Helical diameter는 0.8mm, Helical revolution은 90rpm이다.

5.5 칩핑두께 모델링

다이아몬드 코어드릴 습식실험에서 식 (3)의 지수함수 형태의 모델링을 통하여 칩핑두께 모델을 구한다. 칩핑두께 모델의 유효범위는 Spindle rotation는 3000~5000rpm, Helical feed는 60~100mm/min, Helical diameter는 0.4~1.2mm, Helical revolution은 30~150rpm이다.

$$CT = ks^{\alpha} f^{\beta} d^{\gamma} r^{\delta} \quad (3)$$

$$CT = 57.569s^{-1.009} f^{1.188} d^{0.19} r^{-0.176} \quad (4)$$

최소오차자승법을 적용하면 칩핑두께 모델은 식 (4)와 같이 얻어진다. 여기서 CT는 칩핑두께, s는 Spindle rotation (rpm), f는 Helical feed (mm/min), d는 Helical diameter (mm), r은 Helical revolution (rpm) 을 의미한다. 유효 가공조건하에서 칩핑두께는 이 모델식을 통해 예측할 수 있고, 평균오차 0.26mm 이내의 정확도를 가진다. Fig. 13은 칩핑두께에 대한 실제 실험값과 식 (4)로부터 계산된 칩핑두께의 예측값을 보인다.

5.6 공구수명 모델링

다이아몬드 코어드릴링 공정에서 최적가공조건을 선정하기 위한 방법으로 반응표면분석을 이용한다. 반응표면분석은 여러 개의 설명변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 하여

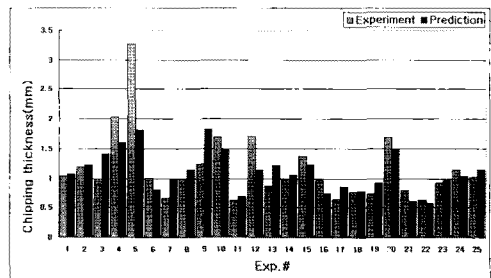


Fig. 13 Comparisons for the chipping thickness

어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 만들어 내는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다⁽⁶⁾. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 의미하고, 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응으로 나타나는 종속변수를 말한다. 종속변수 η 을 최적화시키는 인자들의 값을 최적반응조건이라고 하며, 제품의 생산 공정에서 인자들의 최적공정조건을 찾는 데 효과적으로 사용된다.

반응표면 분석을 이용하여 다이아몬드 코어드릴 습식가공에서의 공구수명 반응표면 모델을 식 (5)와 같이 도출하였다. 공구수명 모델의 유효범위는 Spindle rotation은 3000~5000 rpm, Helical feed는 60~100mm/min, Helical diameter는 0.4~1.2mm, Helical revolution은 30~150rpm 이다.

$$\begin{aligned}
 TL = & -6.494 + 0.156s - 7.862f + 198.115d \\
 & - 0.438r - 1.295E - 5s^2 + 0.048f^2 \\
 & - 96.751d^2 - 1.574E - 3r^2 - 4.258E - 4sf \\
 & - 7.875E - 3sd - 9.715E - 6sr + 8.16E - 3fr
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서 TL 은 공구수명(홀수), s 는 Spindle rotation(rpm), f 는 Helical feed(mm/min), d 는 Helical diameter(mm), r 는 Helical revolution(rpm)을 의미한다. Fig. 14는 공구수명에 대한 실제 실험값과 식 (5)로부터 계산된 공구수명의 예측값을 나타내며, 극히 불량한 10홀 이하의 공구수명이 얻어지는 실험치인 3, 4, 5 등의 경우를 제외한 실험값과 예측값의 평균오차는 41% 이나, 모델의 경향치가 실험치 반영하고 있기 때문에, 이 공구수명 모델을 통하여 사용자가 원하는 가공조건에 따른 공구수명의 예측이 가능하다. 또한, 모델의 정확성을 높이기 위해서는 비선형성 모델에 적합한 신경망 기법⁽¹⁰⁾ 등의 도입이 필요하다. Fig. 15는 Spindle rotation과 Helical feed에 비해 공구수명에 유의한 영향을 주지 않는 Helical diameter와 Helical revolution을 각각 0.8mm와 90

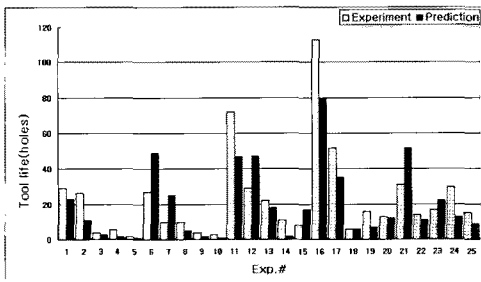


Fig. 14 Comparisons for the tool life

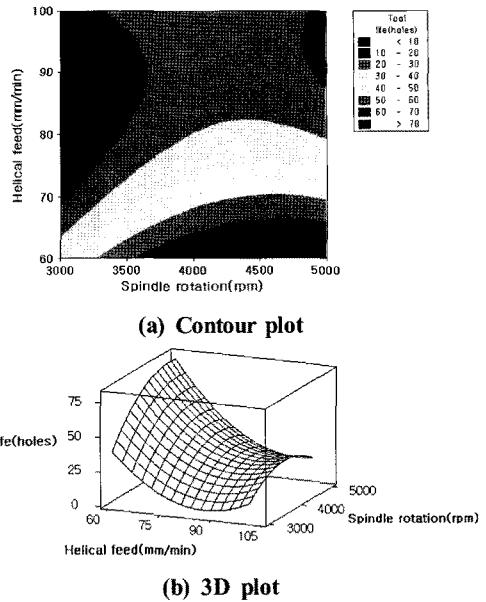


Fig. 15 Response surface model for the tool life

rpm으로 고정된 후, 식 (5)를 통해 도출한 가공DB에 따른 공구수명의 반응표면 등고선과 3D 플롯을 보여준다.

5.7 최적가공조건

공구수명에 대한 반응표면 모델링 식 (5)의 유효범위 내에서 공구수명을 최대로 하는 최적가공조건은 Spindle rotation: 4750rpm, Helical feed: 60mm/min, Helical diameter: 0.8, Helical revolution: 30rpm이고, 예상가공 홀수는 90홀이다. 또한 이 반응표면 모델로부터 가공인자의 유효수준범위내의 가공조건에서 다이아몬드 코어드릴링 공정에 대한 가공DB를 구축하고 작업환경에 맞는 가공조건을 선택할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다이아몬드 코어드릴의 구멍가공특성을 분석하기 위해서 포셀린 타일에 구멍가공을 수행하고, 공구수명과 가공능률에 유의한 영향을 주는 인자들을 정량화하였다. 또한 실험에 기초하여 공구 DB 구축에 필요한 공구수명과 칩핑두께를 모델링 하고 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구수명에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Helical feed이고, Spindle rotation, Helical revolution, Helical diameter의 순으로 영향을 미친다.
- (2) 공구마멸에 가장 유의한 영향을 주는 인자는 Spindle rotation이고, Helical feed, Helical revolution의 순으로 영향을 미친다. Helical diameter는 공구마멸에 유의한 영향을 미치지 않는다⁽³⁾. 최소자승법을 이용하여 칩핑두께 모델을 지수방정식의 형태로 모델링 하였고, 이를 이용하면 유효 가공조건 하에서 칩핑두께를 가공조건에 따라서 예측할 수 있으며, 이 때 0.26mm 이내의 평균오차를 가진다.
- (3) 반응표면 모델을 이용하여 유효 가공조건하에서 공구수명 DB 모델을 도출하였다. 이 모델 식에 가공조건을 대입하면 41% 이내의 오차 범위 안에서 예상 가공효율을 예측할 수 있으며, 이 반응표면 모델로부터 얻어진 최대 가공효율은 90홀이고, 최적가공조건은 Spindle rotation: 4750rpm, Helical feed: 60mm/min, Helical diameter: 0.8mm, Helical revolution: 30rpm이다.

또한, 공구 DB 구축에 필요한 공구수명 모델의 경우, 정확성을 보다 높이기 위해서는 비선형성 모델에 적합한 신경망 기법 등에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Balykov, A. V., 2003, "Modeling of Diamond Drilling of Holes in Brittle Nonmetallic Solid Materials," *Glass and Ceramics*, Vol. 60, No. 3-4, pp. 13~16.
- (2) Zhang, Q. H, Zhang, J. H, Sun, D. M., and Wang, G. D., 2002, "Study on the Diamond Tool Drilling of Engineering Ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 232~236.
- (3) Huang, S. L. and Wang, Z. W., 1997, "The Mechanics of Diamond Core Drilling of Rocks," *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 134.
- (4) Ishikawa, K., Suwabe, H., Nishide, T., and Uneda, M., 1998, "A Study on Combined Vibration Drilling by Ultrasonic and Low-frequency Vibrations for Hard and Brittle Materials," *Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 196~205.
- (5) Yagishita, H., 2007, "Comparing Drilling and Circular Milling for Hole Making in Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP) Laminates," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 35, pp. 153~160.
- (6) Choi, Y. J. and Chung, S. C., 2006, "Monitoring of Micro-drill Wear by Using the Machine Vision System," *Transactions of the NAMRI/SME*, Vol. 34, pp. 143~150.
- (7) Park, S. H., 2006, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, Korea.
- (8) Shi, Z. and Malkin, S., 2006, "Wear of Electroplated CBN Grinding Wheels," *Transaction of the ASME*, Vol. 128, pp. 110~118.
- (9) Jiao, Y., Liu, W. J., Pei, Z. J., Xin, X. J., and Treadwell, C., 2005, "Study on Edge Chipping in Rotary Ultrasonic Machining of Ceramics: An Integration of Designed Experiments and Finite Element Method Analysis," *Transactions of the ASME*, Vol. 127, pp. 752~758.
- (10) Chung, S. C., 1992, "Development of Adaptive Numerical Control System (I) - Intelligent Selection of Machining Parameters by Neural-Network Methodology," *Transactions of the KSME*, Vol. 16, No. 7, pp. 1223~1233.