

## 탄화 티타늄 금속기 복합재의 드릴가공 특성에 대한 경험적 고찰(1)

이 정 근\*  
기술표준원

### An Empirical Study on Drilling Characteristics of Titanium Carbide Metal Matrix Composites (1)

Jeong-Keun Lee\*

Machinery and Construction Standards Division, Korean Agency for Technology and Standards, #2 Joongangong Gwacheon 427-716, Korea

(Received November 13, 2006; Accepted December 14, 2006)

**Abstract** The experimental data from the central composite design runs were utilized for mathematical models for the drilling characteristics containing linear, quadratic and interactive effects of the parameters such as volume fraction of TiC in the composites, drill speed, feed rate and drill diameter. The models were developed via stepwise selection where the insignificant effects were removed using t-test. The models were subjected to optimization of maximizing drill life and satisfying the other constraints.

**Keywords :** Drilling characteristics, Titanium carbide metal matrix composites, Central composite design

#### 1. 서 론

탄화 티타늄 복합재는 여러 가지 장점으로 인하여 최근에 많이 사용되고 있으나 경도가 높은 탄화 티타늄 입자와 비교적 무른 매트릭스의 불균질 재료로서, 또 불안정한 세라믹-금속 계면 때문에 가공 특성을 이론적으로 예측하기 어렵다<sup>1)</sup>. 분말야금 제품의 특성상 후가공이 많지 않지만 탄화 티타늄 복합재는 설비에 부착되는 내마모성 부품으로 주로 사용되므로 드릴 가공이 빈번하게 요구된다<sup>2)</sup>. 따라서 본 연구에서는 실험치를 바탕으로 탄화 티타늄 복합재의 드릴 가공 변수인 탄화 티타늄 함유량, 피드 속도, 드릴 가공속도 및 드릴 직경에 대한 피가공특성인 드릴 수명, 비소모에너지, 최대 오프셋 및 가공표면 거칠기의 수학적 모델을 찾고자 하였다.

#### 2. 실험방법

탄화 티타늄 복합재는 철분말, 합금원소와 4.37

$\mu\text{m}$  TiC 입자를 혼합하여 소결과 HIP 처리를 통하여 제작하였다. 매트릭스의 성분은 5.2 w% Cu, 4.1 w% Mo, 0.6 w% Ni 및 나머지 Fe이다. 어닐링 후에 에머리페이퍼(#400)로 표면을 연마하였다. 시험에 사용된 드릴은 118 SP cobalt/HSS 패러렐 생크드릴로 그림 1과 같은 모양을 한다.

여기서 드릴 수명은 입체치 측면 마모가 일어날 때까지의 총 가공 거리를 말하며 KS 규격에 따라<sup>3)</sup> 표 1에서 정한 바와 같이 드릴 직경 별로 일정한 깊이의 구멍 가공을 반복하여 드릴의 측면 마모가 0.2 mm 가 되는 관통 깊이의 총합으로 하였다. 실제로는 n 번째 구멍을 뚫었을 때 측면 마모가 0.2 mm 보다 크나 n-1번째 구멍에서의 측면 마모가 0.2 mm 보다 작다고 보고 보간법을 사용하여 수명을 구하였다. 비소모에너지는 전력계를 연결하여 총소모 전력을 측정 후 제거된 복합재의 부피로 나누어서 구하였다. 표면 거칠기는 접촉식 시험기를 사용하여 n-1 번째 구멍에서 ISO 3724에 따라 시험하여 산술 평균 거칠기를 얻었다<sup>4)</sup>. 최대 오프셋이라 함은 드릴의 중심

\*Corresponding Author : [Tel : +82-2-509-7293; E-mail : jklee@kats.go.kr]

Table 1. Penetrating depths classified by drill size

Diameter $D$ (mm)		Penetrating depth (mm) per hole
Exceeding	Not longer than	
6.00	6.70	19
6.70	7.50	22
7.50	8.50	24
8.50	9.50	27
9.50	10.6	30
10.6	11.8	34
11.8	13.0	38

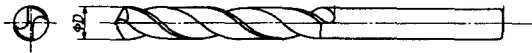


Fig. 1 Drawing of a parallel shank drill.

에서부터 측정하여 가공면이 드릴 반경이상 벗어난 최대 거리를 말하며 측정은 표 1에 규정된 관통 깊이로 뚫린 마지막 구멍에서 드릴 중심 축과 시편 표면의 구멍가장자리간의 최대거리를 영상분석을 통하여 구하였다. 드릴가공시 절삭유는 냉각을 빠르게 하기 위해서 KS W 2종을 사용하였다<sup>5)</sup>.

### 3. 모델 수립

최적조건을 구하기 위한 시험이므로 반응표면법을 적용하고 드릴 특성이 드릴 변수에 따라서 선형 거동을 보이지 않을 것으로 판단되어 중심합성계획을 통해 2차 다항식 모델을 수립하였다. 또 모델의 모든 계수간의 공분산을 0으로 하기 위해 축값을 1.414로 잡았다<sup>6)</sup>. 표 2에 설계 수준과 변환 전 실제 각변수들의 수준을 나타내었다. 이 설계 수준의 조합으로

표 3과 같은 실험 결과를 얻었다.

기본모델은 아래와 같다.

$$Y = b_0 + b_1V + b_2S + b_3F + b_4D + b_{11}V^2 + b_{22}S^2 + b_{33}F^2 + b_{44}D^2 + b_{12}VS + b_{13}VF + b_{14}VD + b_{23}SF + b_{24}SD + b_{34}FD$$

여기에서  $Y$ 는 response,  $b_0$ 는 constant,  $b_1, b_2, b_3$  등은 regression coefficient 이다.

모델 수립 후 적정성을 판단하기 위해서 분산분석을 행하였고 그 결과 4가지 드릴가공 특성에 대한 모델은 95% 신뢰 수준에서 의미있다고 판단되었다. 그러나 번거로운 계산과 공선성으로 인한 왜곡을 피하기 위하여 t-test를 통하여 95% 수준에서 0과 다름없는 계수를 가진 항들을 공변수의 단계적 선택을 통하여 제거하였다. 그 결과는 다음과 같다.

$$L = 0.104V + 3.74F - 0.0390S^2 + 0.0359SD \quad (1)$$

$$P = 59.3 - 0.434V - 33.3F - 1.52S \quad (2)$$

$$R = 13.8 - 0.131V + 5.95F - 0.527S \quad (3)$$

$$O = 0.0568V^2 + 64.2F + 5.27S \quad (4)$$

여기서 드릴 가공 특성의 최적화는 아래의 제한조건을 만족하며 드릴 수명을 최대로 하는 변수들의 값을 구하는 것이다. 먼저 식 1에서  $L$ 은  $S$ 에 대해서만 선형이 아니다. 즉  $L$ 이 최대가 되는  $S$ 값이 존재한다. 즉,

$$\partial L / \partial S = 2 \times (-0.0390)S + 0.0359D = 0 \quad (1)^*$$

$D = (2 \times 0.0390)S / 0.0359$ 일 때 드릴 수명이 최대가 된다.

관행적으로 건전한 드릴 가공의 제한 조건은  $P \leq 35$ ,

Table 2. Factors and levels used in the experiment

Design level	1.414	1	0	-1	-1.414	
Correspondent	%Volume of TiC (47)	47.07 (47)	45 (45)	40 (40)	35 (35)	32.93 (33)
	Feed(mm/rev) (0.54)	0.5414 (0.54)	0.5 (0.50)	0.4 (0.40)	0.3 (0.30)	0.2586 (0.26)
	Drill Speed (m/min) (9.83)	9.828 (9.83)	9 (9.00)	7 (7.00)	5 (5.00)	4.172 (4.17)
	Dia. Of Drill (mm) (10.4)	10.414 (10.4)	10 (10.0)	9 (9.0)	8 (8.0)	7.586 (7.6)

Figures in parenthesis refer to controllable levels in the experiment.

**Table 3. Experimental results of the drilling test**

Variables Transformed					responses		
% Volume of TiC	Feed (mm/rev)	Drill Speed (m/min)	Dia. of Drill (mm)	Drill Life (m)	Specific Power $\times 10^4$ (Wh/mm <sup>3</sup> )	Surface Roughness ( $\mu$ m)	Offset ( $\mu$ m)
V	F	S	D	L	P	R	O
-1	1	1	1	3.343	19.85	8.89	150.9
1	-1	1	1	2.497	34.46	6.62	131.5
1	1	-1	1	3.456	20.78	8.52	147
1	1	1	-1	1.893	24.07	5.05	134.1
-1	-1	1	1	2.991	15.48	3.44	133.9
-1	1	-1	1	2.619	14.51	6.5	148.3
-1	1	1	-1	1.956	25.19	4.84	139.4
1	-1	-1	1	2.707	15.18	6.24	157.3
1	-1	1	-1	5.01	25.72	8.7	161.6
1	1	-1	-1	4.698	23.54	9.45	147.8
-1	-1	-1	1	3.325	48.72	6.33	128.2
-1	-1	1	-1	5.01	25.72	8.7	161.6
-1	1	-1	-1	3.895	42.9	9.32	112.6
1	-1	-1	-1	5.392	25.86	11.99	119.3
-1	-1	-1	-1	4.027	44.92	8.94	117.9
1	1	1	1	5.572	27.08	11.51	128.7
1.414	0	0	0	5.07	24.88	9.21	172.1
-1.414	0	0	0	5.03	25.63	8.82	164.5
0	1.414	0	0	6.15	18.69	10.21	181.5
0	-1.414	0	0	5.202	27.1	8.3	170.3
0	0	1.414	0	2.842	12.42	4.22	175.7
0	0	-1.414	0	3.818	21.18	4.71	172.3
0	0	0	1.414	5.285	12.77	6.06	182.5
0	0	0	-1.414	3.947	22.18	4.52	180.5
0	0	0	0	5.462	13.37	5.82	197

$R \leq 10$ ,  $O \leq 20D$ 로 알려져 있다. (1)\*을 만족할 때 이상의 제한조건으로부터 아래와 같은 식이 얻어진다.

$$F \geq (24.3 - 0.434V - 1.52S) / 33.3 \quad (2)*$$

$$F \leq (-3.8 + 0.131V + 0.3527S) / 5.95 \quad (3)*$$

$$F \leq (20D - 0.0568V^2 - 5.27S) / 64.02 \quad (4)*$$

수명을 최대로 하는 S값이 드릴 직경에 따라 정해졌다면 TiC 함량이 같은 재료 내에선 다른 독립 변수인 F 값이 최대값을 가져야 한다. 따라서 식 (3)과 (4)를 모두 만족시키는 F 최대값이 드릴 수명을 최대화하는 조건이다. 이러한 조건들을 정리하여 표 4에 기록하였다

### 4. 고찰

TiC 함량이 증가함에 따라 경도는 증가하였다. 하지만 TiC 입자와 매트릭스 사이의 결합력이 약하므로 계면의 증가로 인해 가공에 소요되는 에너지는 감소하였다. 또 드릴 속도의 증가는 역시 비 소모에너지를 감소시켰다. 이는 고속 가공 시 저속 가공보다 가공면을 경화시키는 효과가 적기 때문으로 판단된다<sup>7)</sup>. 피드속도가 증가해도 비소모에너지는 감소하였다. 이는 칩의 크기가 커져 새로운 표면을 만드는데 사용되는 에너지가 적기 때문으로 사료된다. 드릴 직경의 크기는 에너지 소모에 의미있는 영향을 미치지 않는다.

Table 4. Optimized drilling conditions

V	D	S*	F <sub>min</sub>	F <sub>max1</sub>	F <sub>max2</sub>	L <sub>max</sub>
30	7	3.22	0.19	0.31	1.12	4.67
30	8	3.68	0.17	0.35	1.39	4.95
30	9	4.14	0.15	0.39	1.67	5.24
30	10	4.60	0.13	0.43	1.94	5.55
30	11	5.06	0.11	0.47	2.21	5.88
30	12	5.52	0.09	0.51	2.49	6.22
30	13	5.98	0.07	0.55	2.76	6.58
35	7	3.22	0.13	0.42	0.83	5.61
35	8	3.68	0.11	0.46	1.11	5.88
35	9	4.14	0.08	0.50	1.38	6.17
35	10	4.60	0.06	0.54	1.65	6.48
35	11	5.06	0.04	0.58	1.93	6.81
35	12	5.52	0.02	0.62	2.20	7.15
35	13	5.98	0.00	0.66	2.47	7.51
40	7	3.22	0.06	0.53	0.50	6.44
40	8	3.68	0.04	0.57	0.77	6.81
40	9	4.14	0.02	0.61	1.05	7.11
40	10	4.60	0.00	0.65	1.32	7.42
40	11	5.06	-0.02	0.69	1.60	7.74
40	12	5.52	-0.04	0.73	1.87	8.08
40	13	5.98	-0.06	0.77	2.14	8.44
45	7	3.22	0.00	0.64	0.12	5.55
45	8	3.68	-0.02	0.68	0.40	6.70
45	9	4.14	-0.05	0.72	0.67	7.86
45	10	4.60	-0.07	0.76	0.95	8.35
45	11	5.06	-0.09	0.80	1.22	8.67
45	12	5.52	-0.11	0.84	1.49	9.02
45	13	5.98	-0.13	0.88	1.77	9.38

S\* is the drill speed value that satisfies (1)\*.

F<sub>min</sub> is the minimum feed rate value derived from constraint (2)\* when S=S\*.

F<sub>max1</sub> is the maximum feed rate value derived from constraint (3)\* when S=S\*.

F<sub>max2</sub> is the maximum feed rate value derived from constraint (4)\* when S=S\*.

L<sub>max</sub> is the maximum life calculated from Eq (1) when S=S\* and F=Min(F<sub>max1</sub>, F<sub>max2</sub>).

TiC 함량이 증가 함에 따라 표면조도는 감소하였다. 이는 취성의 증가 및 build-up edge 형성의 감소와 관련있는 것으로 생각된다<sup>8)</sup>. 가공속도의 증가는 build-up edge의 제거로 인해 표면 조도를 감소시킨다. 피드 속도의 증가는 부적절한 덩어리 칩의 발생과 피드마크 때문에 표면 조도가 증가 하였다. 드릴 직경의 크기는 표면조도에 의미있는 영향을 미치지 않는다.

TiC 함량이 증가 함에 따라 경도가 증가하였다. 따라서 진동이 많이 발생하여 오프셋을 증가시킨다. 피드속도의 증가 역시 강제진동 때문에 오프셋 증가로 이어 진다. 가공속도의 증가역시 정적 진동의 증가로 오프셋을 증가시킨다. 드릴직경은 오프셋에 영향이 없다.

TiC 함량이 증가 함에 따라 드릴 수명도 늘어난다. 이는 매트릭스-TiC 계면의 증가와 함께 build-up

edge 형성의 감소때문이다. 가공속도의 증가는 복합재의 가공경화 감소로 인한 수명의 증가와 온도의 상승에 따른 수명의 감소를 야기시키므로 이들 사이의 관계 때문에 가공속도에 따른 드릴 수명의 극대값이 있다. 가공속도는 (1)\*을 만족할 때, 다른 변수들은 조건 (2), (3), (4)를 만족시키는 최대 경계값일 때 최대 드릴 수명을 갖는다. 피드속도의 증가에 따라 드릴 수명은 증가하는데 이는 접촉면적의 증가로 인한 효율적 가공 때문으로 생각된다.

## 5. 결 론

- 1) 탄화 티타늄 금속기 복합재의 드릴 최대 수명을 예측하기 위한 모델이 제시되었다
- 2) TiC 함량의 증가는 비 소모에너지와 표면 조도를 감소시키고 드릴수명과 오프셋을 증가시킨다.
- 3) 가공속도의 증가는 비 소모에너지 표면 조도를 증가시키고 어느 정도까지 드릴 수명도 증가시킨다.
- 4) 피드속도를 증가시키면 드릴 수명, 표면 조도,

오프셋을 증가시키고 비 소모에너지를 감소시킨다.

## 참고문헌

1. J. E. Schutens and K. Tempo: Introduction to metal matrix composite materials, DOD metal matrix composites information analysis center, New York (1989) 33.
2. website; www.alloytic.com.
3. KSB3243 Parallel shank twist drills
4. ISO3274; 1996 Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Nominal characteristics of contact (stylus)instruments.
5. KSM2173 2001 Cutting fluid.
6. Steyerberg E.W., Eijkemans M.J., Harrell F.E., Jr., Habbema J.D.: Prognostic modelling with logistic regression analysis: a comparison of selection and estimation methods in small data sets, Stat Med., San Fransisco (2000) 1059.
7. R. Hikiji et al: J. Japan Society of Mechanical engineers, 647(2000) 309.
8. JP-0108431, 1986, TOYOTA Motor Co.