

# 다구찌 실험계획법과 반응표면 실험계획법을 사용한 마이크로 엔드밀의 형상설계에 관한 연구

## A Study on Design of Micro End-mill Geometry using Taguchi method and Response Surface Method

\*오인철<sup>1</sup>, 윤해성<sup>1</sup>, 안성훈<sup>2</sup>

\*R. Z. Wu<sup>1</sup>, H. S. Yoon<sup>1</sup>, #S. H. Ahn(ahnsh@snu.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부, <sup>2</sup> 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소

Key words : Taguchi method, Response surface method, Micro end-mill, Printed circuit board

### 1. 서론

2006년 이후 유럽과 북미에서 주도하고 있는 그린 정책의 영향으로 인해 인쇄회로기판(PCB, Printed Circuit Board)의 공정에서도 여러 가지 유해물질들을 제거한 신소재 기판에 대한 요구와 법적 제재가 날로 증가하여 래드프리(Lead-free)와 할로겐프리(Halogen-free)기판에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 무할로겐 기판은 열저항성과 안정성을 높이기 위해 SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>3</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>와 같은 물질을 첨가하는데 이로 인해 기판의 취성이 증가하여 가공용 툴의 마모와 파손이 빈번하게 일어나고 있다. 이러한 것을 예방하고 성능을 높이기 위해 가공용 툴의 중요한 설계인자들을 최적화하는 연구가 반드시 필요하다.

인쇄회로기판에는 수많은 슬롯이나 구멍이 필요한데 슬롯 가공용 툴은 마이크로 라우터, 엔드밀이 사용되고 구멍 가공용 툴은 마이크로 드릴이 사용된다.

본 연구에서는 슬롯 가공용 툴인 마이크로 엔드밀의 최적형상설계를 목적으로 하고 있다. 엔드밀의 형상인자에는 여러 가지가 있는데 주요하게는 여유각, 경사각, 헬릭스각, 코어지름 등이 있다. 기존의 연구에서는 여유각, 경사각에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Kaldor는 절삭조건에 따른 최적의 여유각이 존재함을 실험을 통해서 확인하였다[1]. Baradie는 소재의 지름에 따른 여유각의 변화에 대하여 연구하였다[2]. 또한 Mei는 여유각과 경사각이 가공중에 툴의 안정성에 미치는 영향을 연구하였다[3]. 여유각과 경사각에 대한 연구는 충분히 진행되었으나 헬릭스각과 코어지름에 대한 연구는 부족한 상태이다. 실제가공에서 헬릭스각과 코어지름이 마이크로 엔드밀의 성능에 큰 영향을 준다.

따라서 본 연구에서는 실험계획법으로 할로겐프리 기판을 가공하는 엔드밀의 헬릭스각과 코어지름의 최적화를 목적으로 한다. 엔드밀의 헬릭스각과 코어지름을 제외한 형상인자들은 일정한 값으로 정하고 헬릭스각과 코어지름을 3수준인 설계인자로 선정하고 절삭력, 강성, 슬롯에러, 수명, 외경마모량을 평가인자로 선정하여 연구를 진행하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1. 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법의 장점은 한마디로 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있다는 것이다. 다구찌 실험계획법에서는 산포의 크기를 계량특성치로 변환하여 산포를 작게하는 인자들의 조건을 찾아간다. 주로 사용하는 계량특성치는 손실함수와 SN 비가 있다. SN 비(Signal to Noise Ratio)는 신호 대 잡음의 비율을 의미한다. 계량특성치는 망목, 망소, 망대특성 세가지로 분류하는데 Table 1에서와 같이 각 분류에 따른 함수관계식을 보여준다[4].

Table 1에서 y는 측정치이고 m은 목표치이며 k는 상수이며 V는 평균제곱이다.

다구찌 실험계획법의 또 하나의 특징은 직교배열표를 사용하는 것이다. 직교배열표는 L<sub>n</sub>(n<sup>c</sup>)로 표기하는데 E는 실험 횟수이고 n는 설계변수의 레벨의 수효이며 C는 열의

수효이다.

Table 1 Measurement characteristics

계량특성치	망목특성	망소특성	망대특성
손실함수	$k(y-m)^2$	$ky^2$	$k(\frac{1}{y^2})$
SN 비	$10\log[\frac{(y)^2}{V}]$	$-10\log[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2]$	$-10\log[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}]$

결과적으로 다구찌 실험계획법을 사용하면 최소의 실험을 진행하여 설계변수의 최적수준을 정하여 주는 것이다.

#### 2.2. 반응표면 실험계획법

반응표면분석(Response Surface analysis)은 여러 개의 설명변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수  $\eta$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 이 분석법은 반응표면분석을 사용하면 독립변수들과 종속변수간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 종속변수값이 최적화되는 독립변수들의 값을 찾아볼 수 있다.

독립변수의 개수가 다름에 따라 1차 회귀모형, 2차 회귀모형을 사용할 수 있는데 본연구에서는 두가지 독립변수를 가지므로 2차 회귀모형을 사용하여 곡면을 표현하였다. 2차회귀모형의 표면의 함수식은 식(1)과 같다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Eq. 1에서  $\beta$ 는 상수이고 x는 설명변수  $\xi$ 를 선형변환식 ( $x_i = \frac{\xi_i - \xi_{0i}}{c_i}$ )으로 변환시킨 독립변수이다. c<sub>i</sub>는 x<sub>i</sub>를 -1에서 +1 사이에서 위치하도록 잡아주는 상수이다. 본 연구에서는 회귀분석법을 사용하여 반응표면을 추정하였다[5].

### 3. 실험 및 분석

실험에 사용되는 엔드밀의 직경은 500 $\mu$ m 이고 할로겐프리 기판은 DS-7402HG MG 0.15t 이다. 절삭력, 강성은 마이크로 머시닝 시스템(Daekhon 210062AT-MP)과 동력계(KISTLER 9256C1)를 사용하여 측정하였고 슬롯에러는 광학현미경(SOMETECH SV-32)으로 측정하였으며 수명과 외경마모량은 N사에서 측정하였다.

헬릭스각과 코어지름은 Table 2와 같이 3수준으로 정하여 직교배열표에 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)에 적용하였다.

#### 3.1. 다구찌 실험계획법

직교배열표의 9가지 형상들에 대하여 성능평가 실험을 진행하였다. 각 성능평가의 측정 값을 평균값으로 나누고 그 값들을 합하여 종합평가를 해본 결과 5번 형상 즉 헬릭스각 40°, 코어지름 0.30mm 인 형상이 제일 높은 값을 가졌다(Fig. 2).

같은 방법으로 각 성능평가 측정값의 SN 비를 평균 SN 비로 나누어 종합평가를 하면 Fig. 3에서와 같이 3번과 5번 즉 헬릭스각 30°, 코어지름 0.35mm 인 형상과 헬릭스각

40°, 코어지름 0.30mm 인 형상이 제일 높은 SN 비를 가진다.

Table 2 Orthogonal array  $L_9(3^4)$

실험번호	설계인자 헬릭스각[°]	코어지름[mm]	상관관계변수	상관관계변수
1	30	0.25	-	-
2	30	0.30	-	-
3	30	0.35	-	-
4	40	0.25	-	-
5	40	0.30	-	-
6	40	0.35	-	-
7	50	0.25	-	-
8	50	0.30	-	-
9	50	0.35	-	-

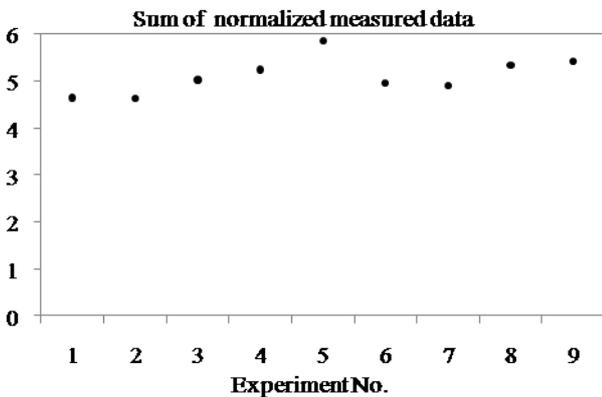


Fig. 2 Comparison of measured data

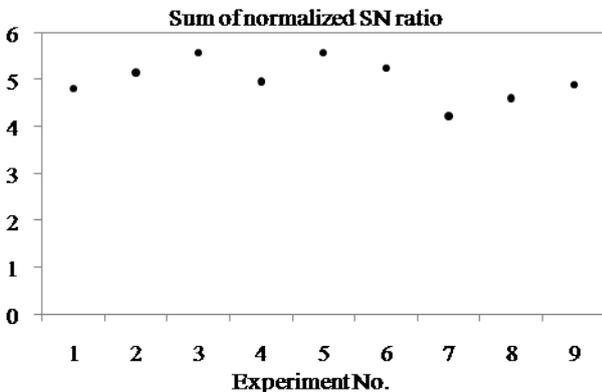


Fig. 3 Comparison of SN ratio

실험값과 SN 비의 평가로부터 헬릭스각 40°, 코어지름 0.30mm 인 형상이 최적화형상을 알 수 있다.

**3.2. 반응표면 실험계획법**

헬릭스각을  $x_1$  에, 코어지름을  $x_2$  에 선형변환시켜 독립 변수로 정하고 위에서 사용되었던 측정값과 SN 비를 반응 값으로 정하여 최소제곱법(least squares estimators)을 적용하였다. 결과 측정값과 SN 비에 의한 반응표면의 신뢰도는 각각 1.59 와 8.47 이다. 검정통계량에 의하면 95%신뢰구간의 기각치는  $F(0.05;4,4) = 6.39$  이다. 그러므로 SN 비에 의한 반응표면(Fig. 4)이 유의하다. 반응표면의 함수식을 유도하면 식(2)와 같다.

$$\hat{\eta} = 0.673 - 0.217x_1 - 0.073x_2 + 0.328x_1^2 + 0.162x_2^2 - 0.048x_1x_2 \quad (2)$$

반응표면에서 최적의 형상은 반응 값이 최대값을 가지는 형상인데 이때 헬릭스각은 44°, 코어지름이 0.31mm 이다.

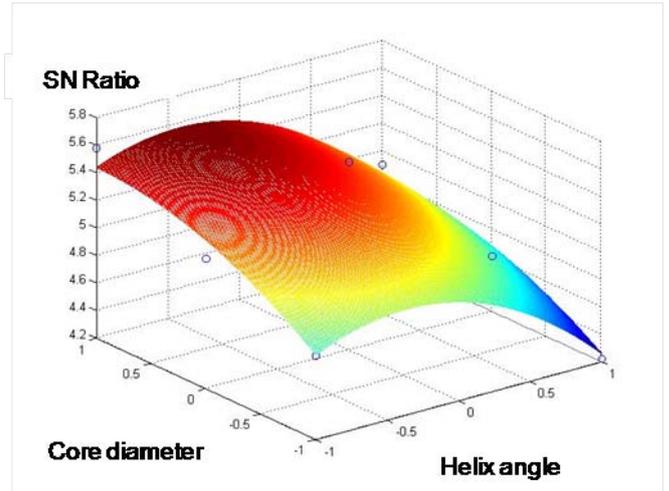


Fig. 4 Response surface model of measured data

**4. 결론**

본 연구에서는 할로겐프리기관에 사용되는 엔드밀의 최적형상에 대하여 연구를 진행하였다. 헬릭스각과 코어지름이 서로 다른 9 가지형상의 엔드밀에 대하여 절삭력, 슬롯에러, 강성, 수명과 외경마모량을 평가하고 다구찌 실험계획법과 반응표면 실험계획법으로 각각 최적의 형상을 추정하였다. 다구찌 실험계획법에 의한 최적형상은 헬릭스각 40°, 코어지름 0.30mm 이고 반응표면 실험계획법에 의한 최적형상은 헬릭스각 44°, 코어지름 0.31mm 이다. 실제 현장에서는 헬릭스각 40, 코어지름 0.30mm 에서 값을 조금씩 변화시켜서 사용한다. 그러므로 두 가지 실험계획법을 통한 마이크로 엔드밀의 형상최적화는 가치가 있다고 본다.

추후에는 두 가지 최적형상에 대하여 성능평가를 진행하여 할로겐프리기관 가공용 마이크로 엔드밀의 형상최적화에서 어느 실험계획법이 더 효과적인가를 연구할 계획이다.

**후기**

본 연구는 서울대학교 2 단계 BK21 사업, 정밀기계설계 공동연구소와 (주) 네오티스(Project No. 0420-20090059)에 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

**참고문헌**

1. Kaldor, S., Trendler, P.H.H., Hodgson, T., "Investigation and Optimization of the Clearance Geometry of End Mills", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 34, No.1, pp. 149-154, 1985.
2. El Baradie, M.A., "The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool-life testing", Wear, Vol. 195, Issues 1-2, pp. 201-205, 1996.
3. Mei, Z., Yang, S., Shi, H., Chang, S., Ehmann, K.F., "Active chatter suppression by on-line variation of the rake and clearance angles in turning- principles and experimental investigations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 7, pp. 981-990, 1994.
4. J. B. Park, J. W. Kim, H. J. Kim, G. Y. Lee, K. T. Lee, J. S. Park, S. H. Ahn, "Tool life evaluation of micro-end mill for PCB machining Using Design of Experiment", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 333 ~ 334, 2008.
5. Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook, Response Surface Methodology, 2<sup>nd</sup> Edition, JOHN WILEY & SONS, INC, 2002.