

마이크로 머시닝에서의 공구 정렬과 가공정밀도

안주은^a, 이성호^b, 곽재섭^{c*}

Tool Alignment and Machining Accuracy in Micro End Milling

Ju Eun An^a, Sung Ho Lee^b, Jae Seob Kwak^{c*}^a Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University,
365, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea^b Department of Steel and Machine Maintenance, Sunlin College,
30, Chogokgil 36beon-gil, Buk-gu, Pohang, Gyeongbuk-do, 37560, Korea^c Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University,
365, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	February	2016
Revised	17	March	2016
Accepted	28	March	2016

Keywords:

Micro end mill
Tool misalignment
Machining error
Micro channel

ABSTRACT

A micro end mill is one of the precise tools used in machining ultra-precision products such as microchannel and micropatterned mold. To achieve the required precision of these products, several studies investigated the cutting force, burr formation, and burr generation mechanism of micro end mills; however, there are few studies on the alignment of micro tools, which is the foundation of machining. Hence, in this investigation, relation expressions were derived to determine the relation between the misalignment parameters and the machining accuracy. At the same time, the effect of the machining parameters was analyzed using a multiple linear regression analysis and the analysis of variance. The results indicate that the tilting angle of a micro tool has more influence on the machining accuracy than other parameters.

1. 서론

최근 다양한 산업분야에서 소수성, 친수성, 마찰계수 감소 등 다양한 효과를 얻기 위해 제품의 표면에 적용되는 마이크로 패턴과 랩온어칩(lab on a chip), 마이크로 반응기 등에 포함되는 마이크로 채널의 수요 및 연구가 증가하고 있다. Choi 등^[1]은 베어링강에 포토리소그래피(photolithography)로 타원형의 딤플(dimple)패턴을 제작하여 방향과 밀도에 따른 마찰력 감소를 확인하였다. Vorobyev 등^[2]은 펄스 레이저를 활용하여 높은 빛 흡수율과 자기세정 효과를 가지는 초소수성 금속 표면을 제작하였으며, Varenberg 등^[3]은 개구리의 발바닥을 모방한 육각형 형태의 마이

크로 패턴을 제작하여 건조한 표면과 습한 표면에서의 마찰 계수의 차이를 줄이는 것에 대한 실험을 진행하였다. 또한 Choi 등^[4]은 실리콘 웨이퍼에 리소그래피(lithography) 기법을 사용하여 탈수 소 화학반응을 위한 마이크로 채널을 가공하고, 화학반응 시 이상 유동 계면마찰에 대한 연구를 수행하였다. 이 외에도 직사각형 배열, 피라미드 형태 등 다양한 형상의 마이크로 패턴과 마이크로 채널의 제작 및 활용에 대한 연구가 진행 중이다^[5,6].

현재 연구 중인 대부분의 마이크로 패턴 및 채널은 주로 리소그래피 같은 광학적 방법을 통해 제작되었다^[7]. 하지만 이는 제품의 제작과정이 복잡하거나 제작 시간이 길어 대량생산에 적용하는데 제약이 있다. 반면 마이크로 공구를 이용한 절삭가공은 별도의 추

* Corresponding author. Tel.: +82-51-629-6139

Fax: +82-51-629-6126

E-mail address: jskwak5@pknu.ac.kr (Jae Seob Kwak).

가 장비 없이 기존의 장비를 활용할 수 있을 뿐만 아니라 리소그래피보다 짧은 가공시간으로 비교적 효율적인 제작이 가능하다.

마이크로 머시닝은 정밀한 형상의 가공에 적용되므로 여러 가공변수를 통제하여 가공의 정밀도를 향상시키는 것이 매우 중요하며, 지금까지 이에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다. Seo 등^[8]은 시뮬레이션과 실험을 통하여 마이크로 엔드밀링에서 절삭력에 의한 공구변형이 가공 오차에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Zaman 등^[9]은 마이크로 엔드밀의 절삭력을 3차원 모델로 분석하였다. 또한 Piquard 등^[10]은 가공 시 발생하는 버(burr)의 형상을 측정하고 이에 대한 관계식을 정의하였다. 이와 같이 현재 마이크로 머시닝에 대해 진행되고 있는 연구들은 대부분이 가공 시 절삭력의 영향 및 버의 형상이나 제거에 관한 것들이다. 하지만 마이크로 엔드밀링과 같이 높은 정밀도를 요구하는 가공을 진행할 때는 공구의 정렬 또한 가공오차에 영향을 미치는 중요한 요인이 될 수 있으나 아직 이에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 마이크로 패턴 또는 마이크로 채널의 가공에 사용되는 엔드밀의 정렬오차(misalignment)와 가공정밀도 간의 관계를 파악하고, 그 영향력을 사례연구를 통하여 분석하였다. 또한 회귀식을 도출하여 변수의 영향력을 파악하고 이를 활용하여 마이크로 엔드밀의 가공범위를 확장하고자 한다.

2. 공구정렬과 가공정밀도 관계

본 연구에서는 마이크로 엔드밀의 정렬 시 발생할 수 있는 오차가 가공정밀도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 공구의 정렬변수와 가공정밀도의 관계를 파악하고자 하였다. 엔드밀의 오버행 길이(overhang) h , 설정 절삭 깊이(depth) t , 기울어진 각도(tilting angle) θ 를 마이크로 엔드밀의 정렬변수로 지정하였으며, 각 변수는 Fig. 1에 도시된 것과 같다.

Fig. 2는 관계식의 기준이 되는 4가지 측정값의 위치를 나타낸 것이다. 가공된 채널의 최대 폭(maximum width, D_{max}), 최소 폭(minimum width, D_{min}), 최대 깊이(maximum depth, H_{max}), 최소 깊이(minimum depth, H_{min}) 및 이를 이용한 폭과 깊이의 차와 정렬변수간의 관계식을 도출하였다.

식 (1)과 식 (2)는 각각 채널의 최대 폭과 최소 폭을 나타낸다.

$$D_{max} = 2(h \sin \theta + \frac{d}{2} \cos \theta) \quad (1)$$

$$D_{min} = d(\cos \theta + \sin \theta \tan \theta) + 2\alpha \tan \theta \quad (2)$$

여기서 d 는 공구의 직경을, α 는 오버행과 절삭깊이의 차로 $h-t$ 를 의미한다. 위 식을 통해 최대 폭과 최소 폭의 차, D_{diff} 를 나타내는 식 (3)을 다음과 같이 얻을 수 있다.

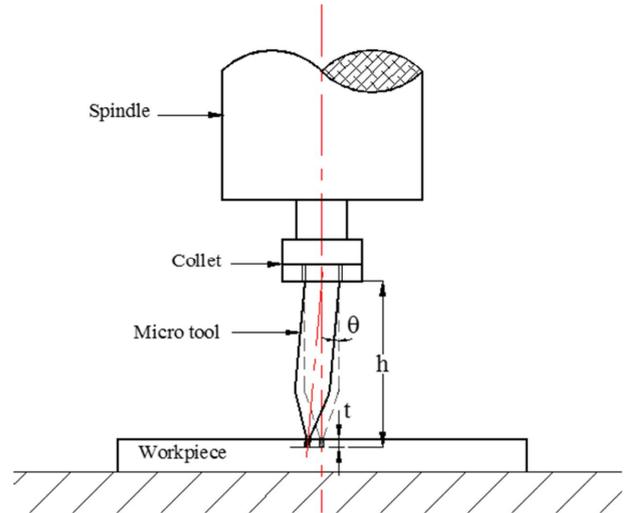


Fig. 1 Schematic of micro end milling process

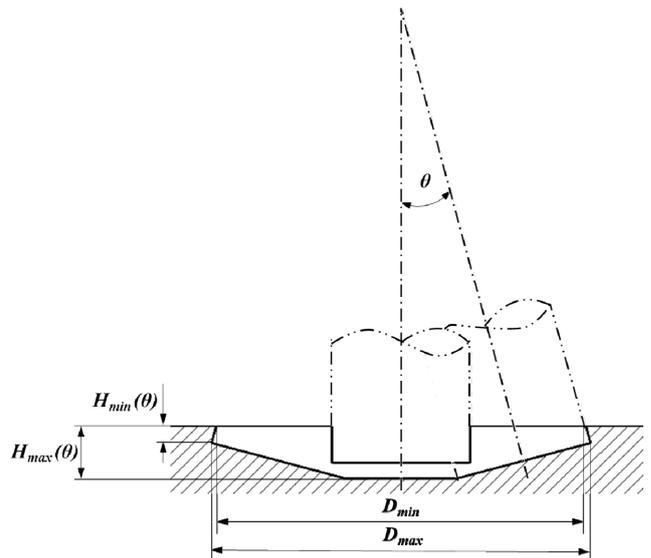


Fig. 2 Measurement location

$$D_{diff} = 2(h \cos \theta - \frac{d}{2} \sin \theta - \alpha) \tan \theta \quad (3)$$

식 (4)와 식 (5)는 각각 채널의 최대 깊이와 최소 깊이를 나타낸다.

$$H_{max}(\theta) = \frac{d}{2} \sin \theta + h \cos \theta - \alpha \quad (4)$$

$$H_{min}(\theta) = h \cos \theta - \frac{d}{2} \sin \theta - \alpha \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)를 통해 최대 깊이와 최소 깊이의 차, H_{diff} 를 구하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{diff}(\theta) = d \sin \theta \quad (6)$$

식 (6)과 식 (3)을 비교해볼 때, D_{diff} 는 오버행, 절삭 깊이 등 모

든 변수의 영향을 받는 반면, H_{diff} 는 공구직경과 기울어진 각도의 영향만 받는 것을 알 수 있다. 이는 H_{diff} 가 오버행이나 절삭 깊이에 관계없이 항상 일정한 값을 가짐을 의미한다.

3. 적용 사례

3.1 형상오차 비교

마이크로 엔드밀링에서 정렬변수의 영향력을 평가하기 위하여 앞 장에서 얻은 관계식에 직경 100, 300 μm 인 엔드밀과 일정 범위 이내의 정렬오차를 적용하였다. 사례연구에 사용된 엔드밀 중 직경 300 μm 인 엔드밀의 3D 모델과 실제 사진은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. Table 1은 사례 연구에 적용된 정렬변수의 범위를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 엔드밀 직경 300 μm , 설정 절삭 깊이 10 μm , 오버행 15.0 mm의 조건에서 각도변화에 따른 가공형상의 차이를 나타낸 것이다. 전체적으로 각도가 증가함에 따라 가공형상의 폭이 증가하고, 형상의 높이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 정상적인 가공 형상($\theta=0^\circ$)과 최대 각도 오차를 가질 때($\theta=1.0^\circ$)의 형상을 비교하면 최대 각도 오차를 가질 때의 최소 높이가 정상가공의 약 절반 정도로 감소하는 것을 알 수 있으며, 엔드밀의 직경이 100 μm 인 경우에도 이와 유사한 형상의 변화를 확인할 수 있다.

오차율은 정상 가공의 기준인 $\theta=0^\circ$ 에서 측정된 값이 벗어난 정도를 나타내며 다음 식 (7)~(8)과 같이 정의된다.

$$\text{Depth Error (\%)} = \frac{|H_0(\theta) - H(\theta)|}{t} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Width Error (\%)} = \frac{|D_0 - D|}{d} \times 100 \quad (8)$$

엔드밀의 직경이 300 μm , 오버행이 15.0 mm일 때, 정상가공에 대한 최대 깊이 H_{max} 의 오차율은 Fig. 5에 도시된 것과 같다. 각도가 증가할수록 오차율이 비선형적으로 증가하다가 0.6° 이후로 다시 감소하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 최대 오차율은 각도 θ 가 0.6° , 설정 절삭 깊이가 10, 30, 50 μm 일 때, 각각 7.5, 2.6, 1.5%로 나타난다. 설정 절삭 깊이가 증가할수록 오차율의 크기는 감소하지만 그래프의 형태는 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 직경 300 μm 의 엔드밀을 사용하고 오버행이 15.0 mm일 때, 최소 깊이 H_{min} 의 오차율을 나타낸 그래프이다. 오차율은

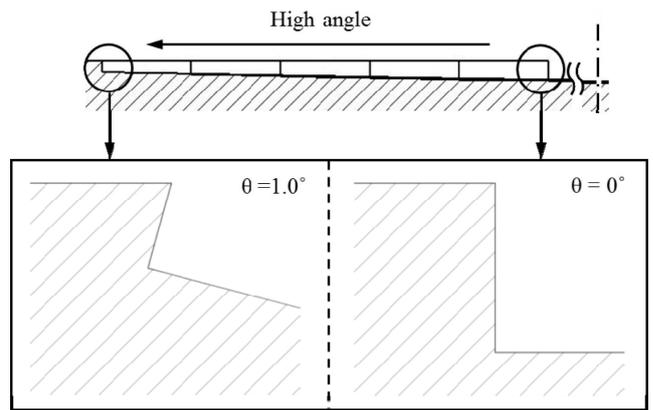


Fig. 4 Half profile of channel with angle increment

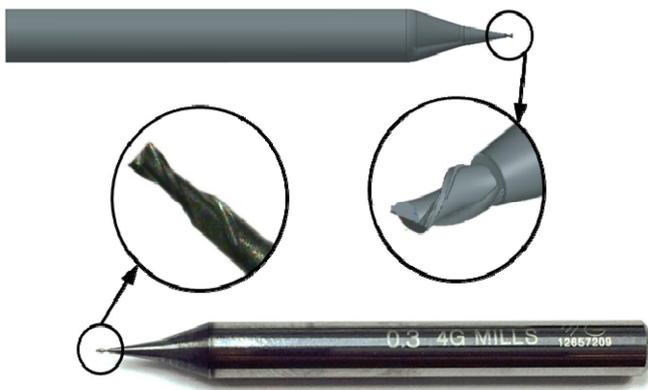


Fig. 3 3D model and photography of micro end mill (ϕ 300 μm)

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Tool diameter, d (μm)	100, 300
Tilting angle, θ ($^\circ$)	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
Depth, t (μm)	10, 30, 50
Overhang, h (mm)	10.0, 12.5, 15.0

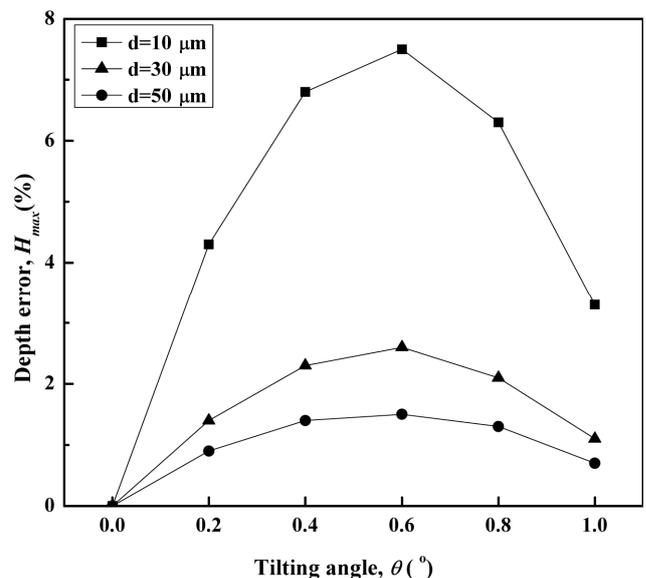


Fig. 5 Depth error (H_{max}) according to angle

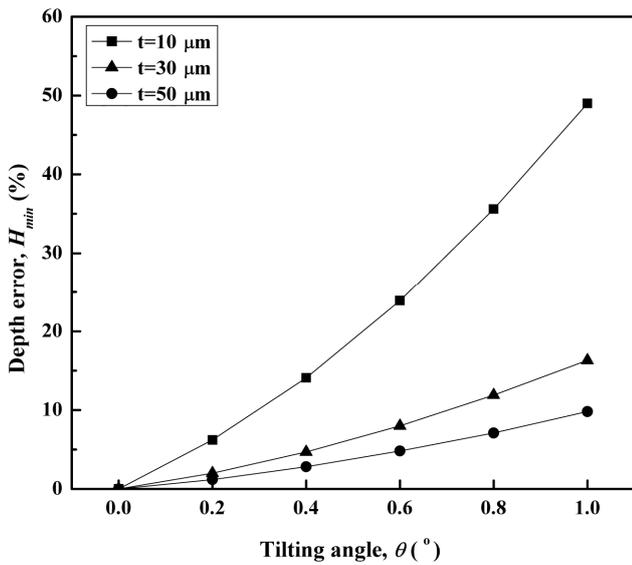


Fig. 6 Depth error (H_{min}) according to angle

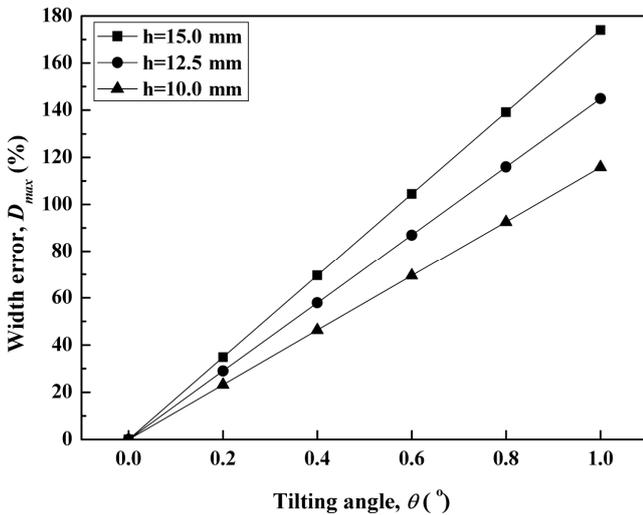


Fig. 7 Width error according to angle

각도 θ 가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하며, 최대 오차율은 절삭 깊이가 10 μm , 각도가 1°일 때의 값으로 약 49%이다. 이는 Fig. 4에서 확인할 수 있는 것처럼 최소 깊이, 즉 가공형상 끝단의 높이가 절반 정도 감소함을 의미한다. 또한 최대 깊이 오차율과 같이 절삭 깊이에 따른 결과 값의 차이는 있으나 전체적인 그래프의 형상은 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 사례연구를 통해 가공형상의 깊이 오차는 각도 오차와 비선형적인 관계를 가짐을 알 수 있었고, 최대 깊이와 최소 깊이의 차가 식 (6)에서 확인한 것과 같이 설정 절삭 깊이나 오버행의 변화에 관계없이 항상 일정한 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 엔드밀 직경이 300 μm , 절삭 깊이가 50 μm 일 때, 정상 가공에 대한 폭 오차율을 각도 변화에 따라 나타낸 것이다. 전체 실험결과에서 D_{diff} 는 0.06~1.60 μm 로 목표치뿐만 아니라 측정된

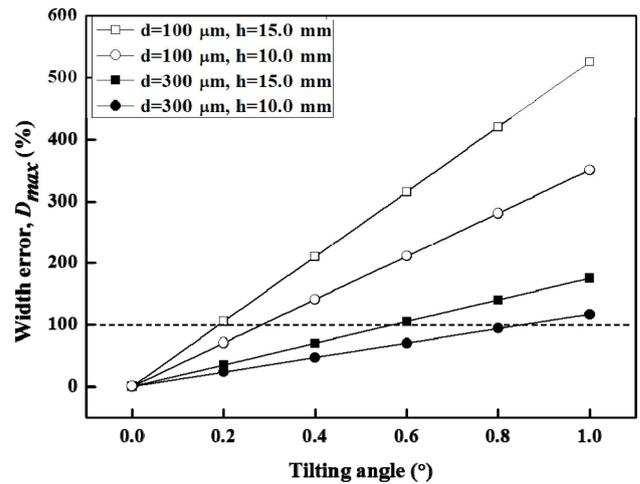


Fig. 8 Width error according to end mill diameter and overhang

값에 비해 매우 작은 값이므로 폭 오차는 D_{max} 를 기준으로 하였다. 오차율은 각도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 오버행에 따른 폭 오차의 최대치는 각각 174% ($h=15.0 \text{ mm}$), 145% ($h=12.5 \text{ mm}$), 116% ($h=10.0 \text{ mm}$)이다. 또한 사례연구를 통해 폭 오차와 각도 오차가 선형적인 관계를 가짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 각도변화에 따른 폭 오차율을 엔드밀 직경과 오버행 거리에 따라 나타낸 것이다. 엔드밀 직경이 작을수록 각도변화에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 또한 폭 오차를 100%로 제한할 경우 직경 100 μm 엔드밀은 0.2~0.3°, 직경 300 μm 엔드밀은 약 0.6~0.8°까지 각도변화가 허용됨을 확인할 수 있다. 이는 각도 오차가 발생한 상태에서 공구의 파손없이 가공하는 것이 가능할 경우, 공구의 각도 조절을 통해 공구의 직경보다 큰 폭의 채널을 비교적 생산적으로 가공하는 것이 가능함을 의미한다.

3.2 채널의 최대 폭 예측

사례연구를 바탕으로 하여 여러 변수들 간의 상관관계를 파악하기 위하여 다중선형회귀분석(multiple linear regression analysis)으로 예측식을 도출하였다.

가공형상의 최대, 최소 깊이 오차는 가공된 형상의 폭 오차에 비해 작은 값일 뿐 아니라 상대적으로 작은 오차율을 가지므로 본 연구에서는 최대 폭(D_{max})에 대해서만 예측식을 구하였다.

다중선형회귀분석은 여러 독립변수와 하나의 종속변수 간의 관계를 나타내는 방법 중 하나로 아래 식 (9)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (9)$$

여기서 Y 는 종속변수, β_n 는 회귀계수의 추정값이며 최소제곱법을

통해 구하였다. x_i 는 각각의 독립변수, ε 는 확률오차를 나타낸다. 식 (10)은 위의 회귀식을 행렬형태로 변형한 식이다.

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{10}$$

식 (11)~(14)는 식 (10)의 변수를 행렬형태로 나타낸 것이다.

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \tag{11}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}_{n \times (k+1)} \tag{12}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}_{(k+1) \times 1} \tag{13}$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \tag{14}$$

위의 다중회귀분석식에 사례연구를 통해 얻은 데이터를 입력하여 식 (15)와 같은 기술어진 각도, 오버행, 설정 절삭 깊이와 채널의 최대 폭 D_{max} 에 대한 예측식을 얻을 수 있다.

$$Width(D_{max}) = 82.3 + 435 * \theta + 17.5 * h - 0.017 * t \tag{15}$$

Table 2는 식 (15)에 대한 분산분석 결과이다. 종속변수 D_{max} 에 가장 많은 영향력을 가지는 변수는 각도(θ)이며, 절삭 깊이(t)는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 식 (15)의 결정계수는 97.5%이며, 이는 이 식이 지정 범위 이내에서 통계적으로 유의한 결과를 가짐을 의미한다.

Fig. 9는 절삭 깊이가 50 μm , 오버행이 각각 11.0, 14.0 mm일 때, 도출한 예측식의 결과와 앞서 구한 사례연구의 결과를 비교한 것이다. 대부분의 계산 결과가 사례연구 결과 범위 이내에 위치함을 확인할 수 있고, 이를 통해 일정 범위 이내에서는 도출한 예측식을 사용하여 채널의 최대 폭을 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

Table 3은 도출된 예측식을 사용하여 직경 300 μm 인 엔드밀, 오버행이 10.0, 12.5, 15.0 mm, 절삭 깊이가 30 μm 일 때 원하는 최대 폭을 얻을 수 있는 각도 오차의 크기를 나타낸 것이다. 오버행이 증가하고, 목표 D_{max} 값이 감소할수록 각도 오차값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 450 μm 의 최대 폭을 얻을 수 있는 각도

Table 2 ANOVA of regression

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	1262721	420907	657.8	0.000
Residual error	50	31994	640		
Total	53	1294715			

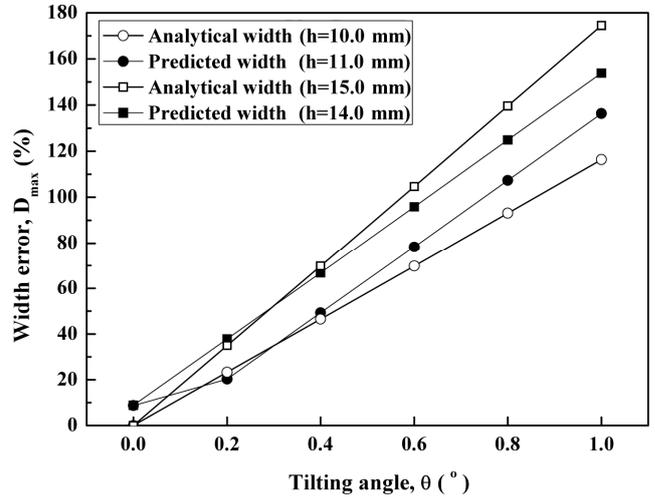


Fig. 9 Comparison between simulated and calculated width

Table 3 Predicted tilting angle for desired width

Desired D_{max} (μm)	Predicted tilting angle ($^\circ$)		
	$h=10.0$ mm	$h=12.5$ mm	$h=15.0$ mm
350	0.21	0.11	0.01
400	0.33	0.23	0.13
450	0.44	0.34	0.24

오차는 오버행이 10.0, 12.5, 15.0 mm일 때, 각각 0.44, 0.34, 0.24 $^\circ$ 이다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 머시닝에서 공구 정렬시 발생할 수 있는 오차와 가공형상 간의 관계식을 구하고, 정렬변수가 가공결과에 미치는 영향을 사례연구를 통하여 평가하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

먼저 공구의 각도 오차와 깊이 오차율 사이의 비선형적 관계를 확인하고, 최대 깊이 오차와 최소 깊이 오차의 차가 각도를 제외한 다른 변수의 영향을 받지 않음을 확인하였다. 또한 각도 오차와 채널 폭 오차율의 선형적 관계를 확인할 수 있었다.

사례연구의 결과를 기반으로 하여 채널의 최대 폭과 실험 변수들 사이의 다중회귀예측식을 도출하고, 가장 영향력 있는 변수가 각도(θ)임을 확인하였다.

그리고 향후 사례연구에 대한 실험적 검증 및 활용 방안에 대한 연구를 수행하고 공구의 정렬 오차로 인한 버 생성과 제거에 대한 연구를 제안하고자 한다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(NRF-2013R1A1A2007446).

References

- [1] Choi, W. S., Kwon, S. H., Chung, S. W., Kwon, S. G., Park, J. M., Kim, J. S., Park, D. Y., Chae, Y. H., 2012, Friction Characteristics of W100XL25 Micro Ellipse Type Pattern, *Journal of the KSTLE*, 28: 3 136-141.
- [2] Vorobyev, A. Y., Guo, C., 2015, Multifunctional Surfaces Produced by Femtosecond Laser Pulses, *Journal of Applied Physics*, 117:3 033103-(1-5).
- [3] Varenberg, M., Gorb, S. N., 2009, Hexagonal Surface Micropattern for Dry and Wet Friction, *Advanced Material*, 21:4 483-486.
- [4] Choi, S. H., Hwang, S. S., Lee, H. J., 2014, Experimental Study of Interfacial Friction in NaBH₄ Solution in Microchannel Dehydrogenation Reactor, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 38:2 139-146.
- [5] Kim, E., Kinney, W. H., Ovrutsky, A. R., Vo, D., Bai, X., Honda, J. R., Marx, G., Peak, E., Lindberg, L., Falkinham III, J. O., May, R. M., Chan, E. D., 2014, A Surface with a Biomimetic Micropattern Reduces Colonization of Mycobacterium Abscessus, *FEMS Microbiology Letters*, 360:1 17-22.
- [6] Guo, P., Lu, Y., Pei, P., Ehmann, K. F., 2014, Fast Generation of Micro-channels on Cylindrical Surfaces by Elliptical Vibration Texturing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136:4 041008-.
- [7] Lai, Y., Lin, C., Wang, H., Huang, J., Zhuang, H., Sun, L., 2008, Superhydrophilic-superhydrophobic Micropattern on TiO₂ Nanotube Films by Photocatalytic Lithography, *Electrochemistry Communications*, 10:3 387-391.
- [8] Seo, T. I., Sohn, J. I., Lee, H. Y., 2009, A Study of Machining Error Due to Tool Deflection in Micro Endmilling, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 18:3 294-299.
- [9] Zaman, M. T., Kumar, S., Rahman, M., Sreeram, S., 2006, A Three-dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46:3/4 353-366.
- [10] Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P., Dudzinski, D., 2014, Micro-end Milling of NiTi Biomedical Alloys, Burr Formation and Phase Transformation, *Precisions Engineering*, 38:2 356-364.