



컴퓨터 비전 알고리즘을 기반으로 한 마이크로 드릴의 진직도 오차 측정

이득우^{a*}, 시티 누르파딜라 빈티 자이니^b

Measurement of Axial Straightness Error of Microdrill based on Computer Vision Algorithm

Deug-Woo Lee^{a*}, Siti Nurfadilah Binti Jaini^b^a Department of Nano Energy Engineering, Pusan National University^b Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	11	January	2022
Revised	23	February	2022
Accepted	17	March	2022

Keywords:

Microdrill
Computer vision
Axial straightness error
Measurement system

ABSTRACT

Microdrill machining is widely applied in various industries where structural design and material properties of the microdrill play a critical role during the machining. A composite microdrill composed of WC and polycrystalline diamond combines the wear resistance, toughness, and hardness properties of the cutting tool. However, composite microdrills are fabricated through complex processes which make them prone to geometrical errors. Hence, axial straightness error of microdrills was investigated in this study as a geometrical error. A computer vision algorithm was specifically developed for measuring the axial straightness error of the microdrill. Subsequently, the ability of the developed technique to perform precise and accurate measurement of tool geometrical errors was evaluated in this study.

1. 서론

마이크로드릴링은 전자, 의약, 항공 우주, 자동차 산업 등 다양한 첨단 분야에 널리 적용되는 기본적인 미세 가공 공정이다^[1]. 초미세 구멍 가공 범위는 1 μm 에서 1 mm 사이로 마이크로드릴의 제작정밀도가 드릴 홀의 높은 정확도와 품질을 달성하는 데 중요한 역할을 한다^[1]. 마이크로 드릴링 작업은 드릴 날 직경이 작으며 비대칭적인 구멍가공의 특성을 가지고 있어 연구가 주로 드릴소재 및 드릴형상 그리고 드릴날 제조 방법 등에 중점을 두어 이루어지고 있다.

최근 반도체 제조공정의 단결정 실리콘전극 가공에 사용되는 마이크로 드릴 소재로 다결정 다이아몬드(PCD)가 많이 사용된다. PCD는 절삭 공구 제조에 널리 사용되는 합성 다이아몬드 중 하나

로 높은 경도, 열전도도 및 내마모성 특성이 있다^[2]. 한편, 초경 소재(WC)도 마이크로 드릴에 일반적으로 사용되는 재료로 경도와 인성이 균형을 이루나 경취성 소재의 가공에는 응착 마멸과 확산마멸이 발생하는 경향이 높다^[3-6]. 따라서 단결정실리콘 전극과 같이 경취성소재 가공용 마이크로 드릴을 제작하기 위해서는 경도와 인성을 같이 고려하여 서로 다른 공구재료를 결합하는 것이 기계적 특성을 향상시키는데 유리하다. 따라서 본 연구에서는 WC 인 드릴 본체에 텅소재로 PCD인 이중 재료 구조의 마이크로드릴 제조공정에 중점을 두었다.

마이크로 드릴용 PCD소재는 고압 고온(HPHT)공정을 통해 미세 다이아몬드 분말이 WC기판위에 두께 약 0.5-2.0 mm로 소결되어 PCD-WC 디스크를 제작한다^[3]. 이 PCD-WC 디스크는 마이크로 직경의 드릴날부로 사용되고 드릴생크부는 초경소재로 생크

* Corresponding author Tel.: +82-51-510-3129

E-mail address: dwoolee@pusan.ac.kr (Deug-Woo Lee).

를 제작한다. 이를 경납접(브레이징 기술)을 통해 PCD-WC 드릴 날부와 연결되어 마이크로 드릴이 제작된다. 이 공구 제조 공정에서 발생하는 주요 문제는 축 진직도이다. 마이크로드릴의 축방향 진직도 오차를 측정하는 방식은 고세장비의 드릴 형상과 1 mm이하의 드릴 직경으로 정밀 측정이 매우 어렵다.

마이크로드릴의 정밀 측정의 경우, 아직 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 일부 연구자들이 레이저 및 광학 측정 시스템을 이용하고 있지만 기존 기술에는 다음과 같은 몇 가지 문제점이 있다^[7-8]; (i) 측정시 열팽창으로 인한 측정 오차 발생, (ii) 복잡하고 고가의 계측시스템 구성, (iii) 마이크로 드릴 비트의 플루트 윤곽 형상에 따른 측정의 어려움. 그러므로 본 연구에서는 세장비가 크고 초소구경 드릴에 축방향 진직도 오차를 정밀 측정하기 위한 컴퓨터 비전(CV)을 활용한 측정방법을 제시하였다. 측정 정밀도를 높이기 위해 현미경으로 마이크로드릴을 확대하여 해상도를 높였으며, 컴퓨터비전 알고리즘을 활용한 측정 시스템을 제작하여 간편하면서도 정밀한 측정 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 구성 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 직경이 0.4 mm인 마이크로 드릴을 보여주고 있다. 드릴 끝단인 툴팁 그리고 샹크와 드릴 본체를 연결하는 브레이징 조인트는 SEM 이미지와 함께 Fig. 1(a)에서 나타내었

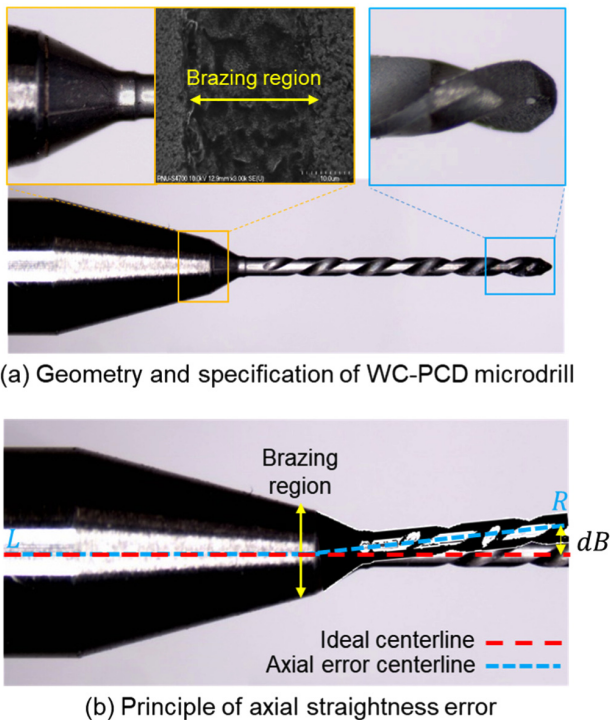


Fig. 1 Geometry of microdrill and basic principle of axial straightness error

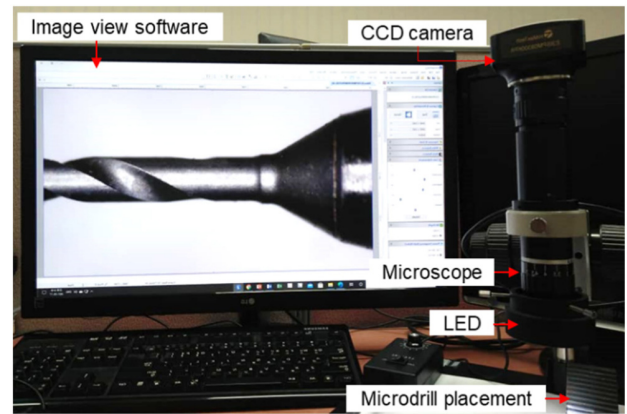


Fig. 2 Equipment utilized to acquire microdrill data for measuring axial straightness error

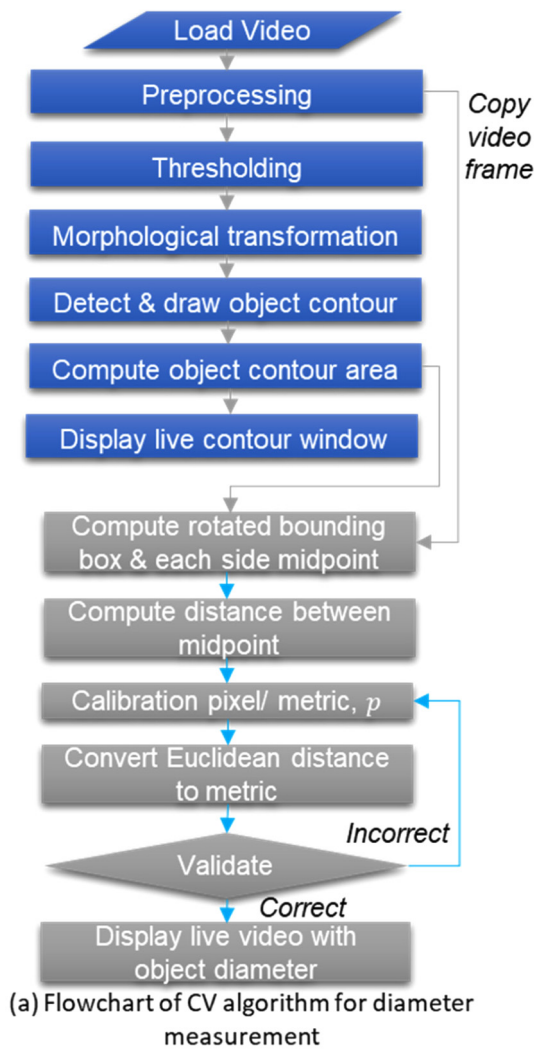
다. Fig. 1(b)는 브레이징 제작 공정 또는 드릴가공 공정에서 발생할 수 있는 축 진직도 오차 성분을 보여주고 있다. Fig. 1(b)와 같이 드릴 본체의 이상적인 중심선에서 마이크로 드릴 날의 중심선이 벗어날 때 축방향 진직도 오차가 발생한다. 이를 줄이기 위해서는 드릴 몸체와 샹크 사이의 브레이징 공정을 정밀하게 수행해야 하며 이 공정에 사용되는 충전재 조절 등 발생하는 결함을 최소화할 수 있도록 축방향 진직도 오차를 측정하는 것이 중요하다.

Fig. 2는 마이크로드릴의 형상오차를 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 축 진직도 오차는 현미경이 장착된 CCD 카메라를 이용하여 마이크로 드릴의 시각적 데이터를 획득하고 컴퓨터비전 (computer vision, CV) 알고리즘을 이용하여 영상처리를 함으로써 측정이 이루어진다. CV 분석은 일관된 이미지 처리를 위해 LED의 조명 조건 및 전원 레벨을 최적의 상태로 일정하게 유지하였다. CV에서 비디오 처리는 시각적 데이터의 배경에서 관심 영역을 분리하는 중요한 프로세스입니다. 마이크로 드릴의 형상은 필터, 분할 및 윤곽감지 프로세스를 통해 비디오 처리로 인식하고 드릴 형상이 정확하게 인식되면 측정할 좌표를 지정한다.

영상처리에서 측정값은 픽셀 단위로 얻어짐으로 치수값(μm)으로 변환하는 보정작업(calibration)이 필요하며 이 과정을 위해 정밀 측정된 드릴 본체와 마스터 핀 게이지를 활용하였다. 픽셀에서 측정값으로 보정, p 는 식(1)과 같다.

$$p = \frac{M_p}{M_m} \quad (1)$$

여기서 M_p 는 픽셀 단위의 측정값을 나타내고 M_m 은 보정단위(μm)의 측정값을 나타낸다. CV 알고리즘을 통해 측정된 직경(M_m)이 실제 치수와 같아질 때까지 p 값을 조정한다. Fig. 3(a)는 마이크로 드릴의 윤곽측정 및 보정값을 계산하기 위한 측정 순서도를 보여주고 있다. Fig. 3(b)는 드릴직경 측정의 원리를 나타내었다.



(a) Flowchart of CV algorithm for diameter measurement



(b) Principle for measuring diameter

Fig. 3 Diameter measurement for calibration

축 진직도 오차를 측정하기 위한 좌표계는 CV 알고리즘의 도심 (centroid) 및 “fit line” 기능을 기반으로 구한다. 여기서 도심을 이용하는 것은 마이크로 드릴 비트의 불 균일한 플루트 윤곽 형상에 따른 측정의 기준점을 잡기 위한 것으로 도심이 질량중심점이기 때문에 회전공구인 드릴의 가공 중심축이 된다. 따라서 도심을 회전축의 기준점으로 정한 것이 드릴형상 회전공구의 오차측정에 매우 유용할 것으로 예측되며 본 연구 CV알고리즘의 주요 특이점이다. CV분석에서 윤곽은 객체의 모양을 형성하기 위해 연결된 가장 바깥쪽 경계 또는 선으로 앞의 영상처리로 보정된 치수값을 기준으로 결정되며 도심은 인지된 마이크로 드릴 윤곽의 1차 모멘트로 얻어진다. 도심 모멘트는 식별된 영역이 유한하고 닫힌 다각

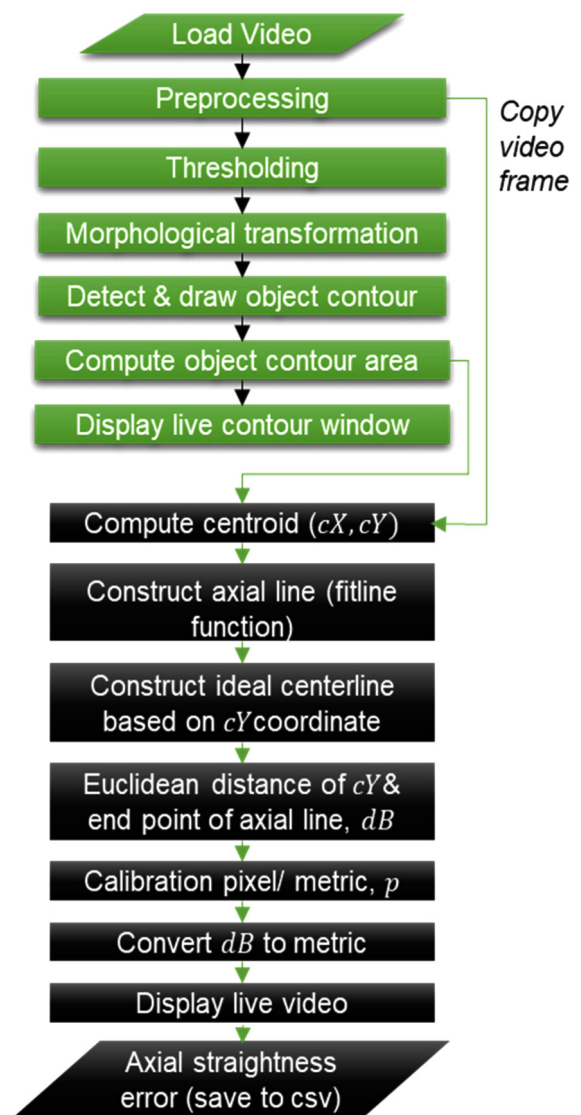


Fig. 4 Flowchart of CV algorithm for computing axial straightness error

형 경로에 적용되는 Green’s theorem을 기반으로 계산된다^[9]. 축 진직도 오차가 중심축에 y축 방향으로의 편차로 계산되기 때문에 이상적인 중심선은 y 좌표(cY)만 고려한다.

CV분석에서 ‘fit line’ 기능은 마이크로 드릴의 윤곽의 대칭적인 중심축을 찾을 수 있는 것으로 왼쪽 끝에서 오른쪽끝까지 중심선을 대칭적으로 맞추어 준다. ‘fit line’ 함수 왼쪽(L)과 오른쪽(R)을 통해 두 개의 좌표를 얻지만 dB를 계산하는 데는 y축의 오른쪽 좌표만 사용한다. 즉, 축의 진직도오차(dB) 값은 도심(cY)와 ‘fit line’ 함수 오른쪽(R)의 두 격자점 사이의 유클리드 거리를 계산하여 구한다. 이 두 격자점 사이의 거리는 식(2)와 같이 유클리드 거리 매핑 $E_{m,n}$ 을 기반으로 계산된다^[10]. 또한, 이 두 점의 x 좌표는 동일하다.

$$E_{m,n} = \sqrt{(m_x - n_x)^2 + (m_y - n_y)^2} \quad (2)$$

마이크로 드릴의 드릴날부 축 진직도 오차를 실시간으로 측정하기 위한 CV 알고리즘의 순서도는 Fig. 4와 같다. 오차 측정은 마이크로 드릴이 일정한 간격(30°)으로 회전 정지된 상태에서 12번 측정하여 원주 방향 전체에 대한 회전 오차 값을 얻었다.

$$R = k \cdot \sigma \quad (3)$$

측정의 신뢰도를 평가하기 위해 측정값의 평균 \bar{x} 과 표준편차 σ 를 계산하였다. 측정 반복도(repeatability) R 은 식(3)과 같이 three-standard-deviation-band 접근법^[11]에 따라 평가되었다. 또한, k 는 스튜던트 t -분포를 기반으로 한 신뢰성 범위를 나타내며, 여기서 그 값은 자유도 d_f 에 따라 달라진다. 이 값은 총 측정 횟수에서 1을 빼서 계산되며 정확한 측정 시스템을 나타내는 더 작은 σ 및 R 값이 얻어지도록 한다.

3. 결과

CV 알고리즘을 사용한 측정을 수행하기 위해 먼저 픽셀 교정을 위한 핀 게이지의 직경 측정이 30회 이루어졌다. Table 1은 실제와 CV를 통한 직경 측정을 비교한 것이다. 각 측정 표본에 대해 CV 알고리즘을 통한 측정에 대한 평균값을 산출하였다. CV 알고리즘으로 측정된 핀 게이지와 마이크로 드릴 비트의 실제 직경 차이는 0.03 μm 와 0.19 μm 로 불일치 값은 0.2 μm 미만이었다. 따라서 CV 알고리즘을 통해 얻은 측정값은 허용 가능하여 보정 값은 축 진직도 오차를 측정하는 데 사용되었다. 또한, 정밀도는 여러 번의 반복측정을 통해 신뢰도를 높이는 기준으로 측정하였으며, CV 알고리즘을 통해 측정된 모든 데이터는 정확한 측정값을 나타내었다.

Fig. 5는 마이크로 드릴의 측정 위치를 보여주고 있으며, 이때 브레이징 영역이 있는 샹크에서 드릴 본체의 40 mm까지 Fig. 5-a를 기준으로 30° 간격으로 회전하며 원주방향으로 측정이 이루어졌다. 각 정지된 위치에서 15번씩 반복적으로 이미지 자료를 받아 마이크로 드릴의 축 진직도 오차를 측정하기 위해 CV 분석하였다.

Table 2과 3는 Fig. 5(a-l)의 원주방향으로 서로 다른 위치에서 마이크로드릴의 축방향 진직도오차의 평균값표준, 반복도(\bar{x})를 측정된 결과이다. (a)에서 (l)까지 각 위치의 평균 축방향 진직도 오차는 1.92 μm , 1.15 μm , 0.13 μm , 1.02 μm , 0 μm , 1.86 μm , 2.56

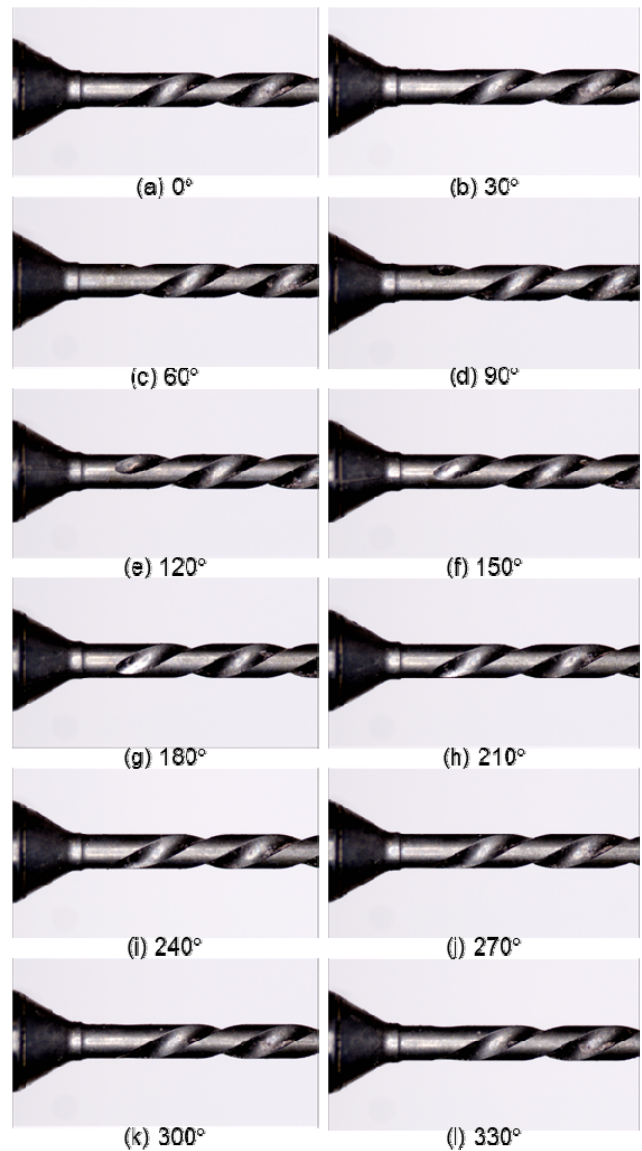


Fig. 5 Location for measuring axial straightness error of microdrill

μm , 1.98 μm , 1.73 μm , 1.60 μm , 1.92 μm , 1.09 μm 로 측정되었으며 극좌표계로 나타내면 Fig. 6과 같다. 축방향 진직도 오차의 원주방향 측정을 통해 회전오차(runout)를 파악할 수 있으며 최대 4.48 μm 임을 알 수 있다.

계산된 σ 및 R 값을 기반으로 측정의 정밀도와 정확도를 평가한 결과 전체적으로 σ 및 R 값은 각각 0.47 μm 및 0.82 μm 이 하였다. 전반적으로 마이크로 드릴의 측정된 원주방향 진직도 오차 평균값은 2.56 μm 이하이고 모든 측정의 σ 값이 0.5보다 작고 상대적으로 낮았다. 본 연구에서 측정횟수를 15회로 함에 따라 평균화 효과에 의해 평균값의 측정신뢰도를 높일 수 있었고 분산을 낮출 수 있었다. 따라서 컴퓨터비전 알고리즘의 ‘윤곽도심(centroid)’ 및 ‘fit line’을 활용함으로써 매우 빠른 시간에

Table 1 Comparison between actual diameter with measurement through CV

Item	Measured diameter (μm)	
	Actual (μm)	Measured through CV (μm)
Pin gauge	450	450.03
Microdrill bit	431	431.19

Table 2 Measured axial straightness error of microdrill at (a) to (f) locations

No	Measured error of microdrill at (a) to (f) locations					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
1	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
2	1.92	1.92	0	0.96	0	1.92
3	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
4	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
5	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
6	1.92	1.92	0	0.96	0	1.92
7	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
8	1.92	1.92	0.96	0.96	0	1.92
9	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
10	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
11	1.92	0.96	0.96	0.96	0	0.96
12	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
13	1.92	0.96	0	1.92	0	1.92
14	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
15	1.92	0.96	0	0.96	0	1.92
	1.92	1.15	0.13	1.02	0	1.86
	0	0.40	0.34	0.25	0	0.25
	0	0.70	0.59	0.44	0	0.44

Table 3 Measured axial straightness error of microdrill at (g) to (l) locations

No	Measured error of microdrill at (g) to (l) locations					
	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)
1	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
2	2.88	1.92	1.92	0.96	1.92	0.96
3	2.88	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
4	1.92	1.92	1.92	0.96	1.92	0.96
5	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
6	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
7	2.88	2.88	1.92	1.92	1.92	0.96
8	2.88	1.92	1.92	0.96	1.92	0.96
9	2.88	1.92	0.96	1.92	1.92	0.96
10	2.88	1.92	0.96	0.96	1.92	0.96
11	2.88	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
12	1.92	1.92	1.92	0.96	1.92	0.96
13	2.88	1.92	0.96	1.92	1.92	1.92
14	2.88	1.92	1.92	1.92	1.92	0.96
15	2.88	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
	2.56	1.98	1.73	1.60	1.92	1.09
	0.47	0.25	0.40	0.47	0	0.34
	0.82	0.44	0.70	0.82	0	0.59

** R computed based on 95% confidence level with 14 degree of freedom, k = 1.761.

간편한 방법으로 μm 이하 정밀도의 드릴형상 오차 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

반복도(repeatability)는 14개의 자유도와 함께 0.95의 신뢰 수준을 기반으로 계산되었다. 반복 측정에 따른 측정값의 불일치는 측정 중 마이크로 드릴의 표면에 부착된 미세 먼지등 이물질이 윤곽 형상 오차를 나타낸 것으로 파악되었다. 따라서 정밀 측정 영역에서는 CV 알고리즘의 전처리 분석에서 윤곽 검출에 영향을 미치는 요인의 제거가 중요하다. 이러한 문제점은 기존 다른 연구자에서 보고된 바와 같이 레이저 및 광학 측정 시스템에서도 주요 장애요소로 작용하였다^[8]. 일반적으로 마이크로 드릴 표면에 먼지를 제거하기 위해 초음파 세척을 사용했음에도 불구하고 측정 과정에서 다시 부착하여 측정오차가 발생함을 확인하였다. 마이크로 메타급 정밀도 측정을 위해서는 측정 환경이 중요하고 불확실성을 최소화하면서 측정의 정밀도를 최대화할 수 있는 환경 구축이 필요하다. 즉 마이크로 드릴 표면에 먼지 등 이물질이 부착되는 측정의 불확실성을 제거하기 위해 ‘클린 룸’에서 측정이 이루어질 필요가 있다.

본 연구의 CV 알고리즘을 이용한 측정 기술은 브레이징 공정과 드릴날 가공공정에서 발생할 수 있는 마이크로 드릴의 축방향 진직도 오차를 on-line 상에서 측정이 가능함으로 측정을 통한 개선 방향을

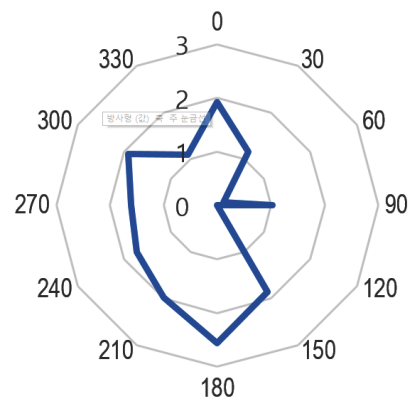


Fig. 6 Polar chart of axial straightness error(\bar{x})

찾는데 기여할 것으로 기대된다. 또한 마이크로드릴과 같이 정밀한 측정에서는 CV 분석에서 정확한 윤곽 인식이 필요하며 측정면에 이물질 제거 등 환경 설정이 중요함을 알 수 있었다.

4. 결론

마이크로 드릴은 제작공정에서 드릴생크와 드릴날부에 진직도 오차 등 형상오차의 발생 가능성이 높아 정밀 측정이 요구된다.

본 연구에서는 마이크로드릴의 초소구경과 비대칭성에 따른 측정의 어려움을 해결할 새로운 측정방법을 제시하였다. 현미경이 장착된 CCD카메라와 드릴날면의 도심(centroid)과 fit-line을 이용한 컴퓨터비전 알고리즘으로 축 직진도 오차를 이하 정밀도로 실시간 측정할 수 있음을 보여주었다.

측정의 신뢰성과 정확도를 높이기 위해서는 측정할 시편에 부착된 불순물을 최소화해야 하며 비디오를 획득하는 동안 광도 및 색상 조정 기능이 측정 과정 전반에 걸쳐 일정하게 유지되어야 함을 알 수 있었다. 또한 측정 과정에서 발생하는 측정오차를 줄이기 위해서는 반복도(repeatability) 평가를 통한 측정횟수를 결정하여야 한다. 마이크로드릴의 축방향 진직도 오차의 측정 결과로 최대 \bar{x} 는 2.56 μm 에 측정 신뢰성 σ 및 R 값이 0.47, 0.82 이하로 유지되었다.

후 기

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Zhang, S., Zhou, Y., Zhang, H., Xiong, Z., To, S., 2019, Advances in Ultra-precision Machining of Micro-structured Functional Surfaces and their Typical Applications, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 142 16-41, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.04.009>.
- [2] Li, Q., Zhan, G., Li, D., He, D., Moellendick, T. E., Gooneratne, C. P., Alalsayednassir, A. G., 2020, Ultrastrong Catalyst-free Polycrystalline Diamond, *Sci. Rep.*, 10 22020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79167-4>.
- [3] Astakhov, V. P., Stanley, A., 2014, Polycrystalline Diamond (PCD) Tool Material: Emerging Applications, Problems, and Possible Solutions, In: Davim, J. (Eds) *Traditional Machining Processes*, Springer, Berlin, 1-32, https://doi.org/10.1007/978-3-662-45088-8_1.
- [4] Katiyar, P. K., Singh, P. K., Singh, R., Kumar, A. L., 2016, Modes of Failure of Cemented Tungsten Carbide Tool Bits (WC/Co): A Study of Wear Parts, *Int. J. Refract. Met. Hard Mat.*, 54 27-38, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.06.018>.
- [5] Dos Santos, A. G., da Silva, M. B., Jackson, M. J., 2018, Tungsten Carbide Micro-tool Wear when Micro Milling UNS S32205 Duplex Stainless Steel, *Wear*, 414-415 109-117, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.007>.
- [6] Zheng, L. J., Wang, C. Y., Fu, L. Y., Yang, L. P., Qu, Y. P., Song, Y. X., 2012, Wear Mechanisms of Micro-drills during Dry High Speed Drilling of PCB, *J. Mater. Process. Technol.*, 212 :10 1989-1997, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.004>.
- [7] Chuang, S. F., Chen, Y. C., Chang, W. T., Lin, C. C., Tarnag, Y. S., 2010, Nondestructive Web Thickness Measurement of Micro-drills with an Integrated Laser Inspection System, *Nondestruct. Test. Eval.*, 25:3 249-266, <https://doi.org/10.1080/10589751003637077>.
- [8] Chang, W.-T., Wu, J.-H., 2016, An Innovative Optical-based Method and Automation System for Rapid and Non-destructive Measurement of the Web Thickness of Microdrills, *Measurement*, 94 388-405, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.071>.
- [9] Green, G., 1828, *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*, Wezäta-Melins Aktiebolag Sweden, <https://doi.org/10.48550/arXiv.0807.0088>.
- [10] Deshrijver, G., Kerre, E. E., 2005, 8- Triangular Norms and Related Operators in L^* -fuzzy Set Theory, In: Klement, E.P., Mesiar, R. (Eds.), *Logical, Algebraic, Analytical and Probabilistic Aspects of Triangular Norms*, Elsevier, 231-259, <https://doi.org/10.1016/B978-044451814-9/50008-2>.
- [11] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., Lienhard, J. H., 2004, *Mechanical Measurements*, Fifth Edition, Pearson Education, Taiwan, 45-125.



Deug-Woo Lee

Professor in the Department of Nano Energy Engineering, Pusan National University.
His research interest is Tribology.
E-mail: dwoolee@pusan.ac.kr



Siti Nurfadilah Binti Jaini

Ph.D. student in the Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University.
Her research interest is Application of artificial intelligence.
E-mail: nurfadilah249@gmail.com