

< 논문 >

머신비전 시스템을 이용한 마이크로드릴 마멸의 상태감시

최 영 조* · 정 성 중†

(2006년 1월 18일 접수, 2006년 3월 15일 심사완료)

Monitoring of Micro-Drill Wear by Using the Machine Vision System

Young-Jo Choi and Sung-Chong Chung

Key Words : Edge Detection(윤곽선 검출), Machine Vision(머신비전), Micro-Drill(마이크로-드릴), Reliability Estimation(신뢰도 평가), Shape from Focus(초점결상), Wear(마멸)

Abstract

Micro-drill wear deteriorates accuracy and productivity of the micro components. In order to improve productivity and quality of micro components, it is required to investigate micro-drill wear exactly. In this study, a machine vision system is proposed to measure the wear of micro-drills using a precision servo stage. Calibration experiments are conducted to compensate for the machine vision system. In this paper, worn volume, area and length are defined as wear amounts. Micro-drill wear is reconstructed as the 3D topography and the quantized wear amount by using the shape from focus (SFF) method and wear parameters. Experiments have been conducted with HSS twist micro-drills and SM45C carbon steel workpieces. Validity of the proposed machine vision system is confirmed through experiments.

기호설명

C_{Volume} : 치즐에지 마멸의 부피, μm^3
 C_{Area} : 치즐에지 마멸의 면적, μm^2
 EP, SP : 이미지의 끝점과 시작점
 $F(x_i, y_j)$: 초점결상지수(focus measure index: FMI)
 G_x, G_y : 수직 및 수평방향의 기울기
 H : 마멸된 치즐에지의 높이
 H_L : 수정 라플라시안 마스크
 H_H, H_V : 수평 및 수직방향의 소벨(Sobel) 연산자
 $I(x, y)$: 입력영상
 M_{Area} : 마진 마멸의 면적, μm^2
 $ML(x, y)$: 출력영상의 결과값
 M, N : 블록윈도우(block window)의 크기
 T_L : 문턱값(threshold value)
 V_{BArea} : 플랭크 마멸의 면적, μm^2
 d_{nf} : 물체의 높이, μm
 $f(x)$: 치즐에지 마멸의 윤곽선 함수
 $g(x)$: 플랭크 마멸의 윤곽선 함수

$h(x)$: 마진 마멸의 윤곽선 함수
 n_f : 카메라의 이동횟수
 α : 드릴의 포인트 각도의 1/2
 Δd : 측정이송간격, μm
 ∇f : 수직 및 수평방향 기울기의 합

1. 서론

미세구멍(micro-drilling) 가공 기술은 마이크로 다이(dies), 몰드(molds), 연료 분사 노즐, 시계, 베어링 그리고 PCB 등과 같은 마이크로 구멍들을 가공하는데 널리 이용되고 있다. 미세구멍 가공공정에서 마이크로-드릴 마멸(micro-drill wear)은 미소 부품들(micro components)의 정확도와 생산성을 떨어뜨리는 중요한 요인이다. 이러한 마이크로-드릴의 마멸을 정확하게 측정함으로써, 마이크로-드릴 마멸의 특성을 이해하고 마멸된 마이크로-드릴의 교체시기를 예측하는 것이 가능하다. 그리고 마이크로-드릴 마멸의 상태감시는 미소 부품들의 요구된 품질을 만족시키기 위해 필수적이고, 미소 부품들의 생산성과 품질을 향상하기 위해서 마이크로-드릴 마멸을 정확하게 관찰하는 것이 요구된다. 공구 마멸 측정들에는 간접적인 방법과 직접적

* 한양대학교 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : schung@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0444 FAX : (02)2298-4634

인 방법으로 나눈다.⁽¹⁻⁵⁾ 간접적인 측정 방법으로 절삭력(cutting thrust force), 토크 신호(torque signal)^(1,2) 그리고 절삭 온도(cutting temperature)⁽³⁾ 등과 같은 측정 방법들이 일반적인 드릴에 사용되고 있다. 이러한 측정 방법들은 측정된 신호들의 변화를 분석하여 공구의 수명이나 마멸을 예측할 수 있다. 그러나 이러한 측정 방법들은 복잡한 드릴 형상의 마멸을 관찰할 수 없다는 단점이 있다. 그리고 직접적인 측정 방법으로 SEM(scanning electron microscope),^(4,5) 공초점 간섭현미경(confocal microscope)⁽⁵⁾ 그리고 레이저 등을 이용한 측정 방법들이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 측정 장비들은 고가이고 측정시간이 많이 걸리며 일반적인 작업 환경에서 사용하기 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 마이크로-드릴의 마멸을 측정하기 위해서 정밀서보스테이지를 이용한 머신비전시스템을 제안한다. 제안된 머신비전시스템 상에서 영상처리기술⁽⁶⁾과 초점결상(shape from focus: SFF)⁽⁷⁻¹⁰⁾ 방법을 이용하여 마이크로-드릴 마멸을 측정한다. 정확한 영상을 얻기 위해서, 할로겐 광원을 이용한 조명장치를 구성한다. 또한, 인공물을 이용하여 개발된 머신비전시스템의 신뢰도를 평가하고 보정한다. 그리고 본 실험에서는 고속도강 트윈스트 마이크로-드릴과 기계구조용 탄소강(SM45C) 시편을 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 마이크로-드릴 마멸을 측정하기 위해 드릴의 마멸을 정의하고, 3 장에서는 영상처리기술과 초점결상 방법을 기술한다. 4 장에서는 제안한 머신비전시스템과 보정 및 신뢰도 평가, 그리고 5 장에서는 실험 결과를 서술한다. 마지막으로 6 장에서는 결론을 서술한다.

2. 드릴 마멸의 정의

일반적으로 사용되는 트윈스트 드릴에서는 4가지 유형의 치즐에지 마멸, 플랭크 마멸, 마진 마멸, 크레이터 마멸이 관찰된다. 이러한 마멸의 형태들은 부피(volume), 면적(area) 그리고 평균 길이(average length)를 이용하여 마멸을 정의한다. 본 연구에서는 치즐에지 마멸, 플랭크 마멸 그리고 마진 마멸을 가공 과정에 따라서 관찰하고 마멸량을 정량화 한다. 드릴의 커팅 에지 부분에서 높은 온도와 중하중(heavy loads)에 의해 발생하는 크레이터 마멸은 마멸량이 미미하기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않는다.⁽¹¹⁾ Fig. 1은 트윈스트 드릴의 형상을 나타낸다.

치즐에지 마멸이 진행됨에 따라서 드릴의 구멍 가공 중심 정확도가 떨어진다. 그리고 절삭 과정에서 가공된 구멍의 품질에 중요한 영향을 미친다. 이러한 마멸을 정량화 하기 위해서 치즐에지의 마

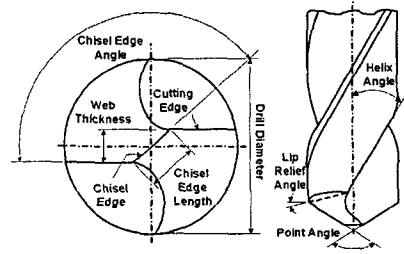


Fig. 1 Twist drill geometry

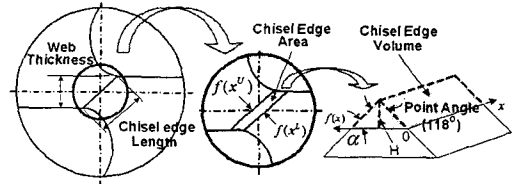


Fig. 2 Shape of chisel edge wear

멸을 부피(C_{Volume})와 면적(C_{Area})으로 정의하고, Fig 2에 나타낸다. 마멸된 치즐에지 부분의 높이(H)는 다음 식으로 표현된다.

$$H = \frac{\left\{ \int_{SP}^{EP} [f(x^U) - f(x^L)] dx \right\}}{2(EP - SP)} \tan(\alpha) \quad (1)$$

where $f(x^U)$ = upper value of $f(x)$ at x

$f(x^L)$ = lower value of $f(x)$ at x

SP = x value of the start point

EP = x value of the end point

α = depends upon drill point geometry

아래 나타낸 식 (2)와 식 (3)에 치즐에지 마멸의 부피(C_{Volume})와 면적(C_{Area})을 정의한다.

$$C_{Volume} = \frac{\left\{ \int_{SP}^{EP} [f(x^U) - f(x^L)] dx \right\}^2}{4(EP - SP)} \tan(\alpha) \quad (2)$$

$$C_{Area} = \int_{SP}^{EP} [f(x^U) - f(x^L)] dx \quad (3)$$

Fig. 3과 같이 드릴 절삭 여유면에 플랭크 마멸이 발생하게 되면, 구멍가공의 정확도가 저하되며 버의 크기가 증대 되고 드릴의 체터 혹은 파손이 발생한다. 이러한 마멸을 측정하기 위해 V_B , V_{Bmax} ⁽¹¹⁾ 그리고 식 (4)에 플랭크 마멸의 면적(V_{BArea})을 정의한다.

$$V_{BArea} = \int_{SP}^{EP} [g(x^U) - g(x^L)] dx \quad (4)$$

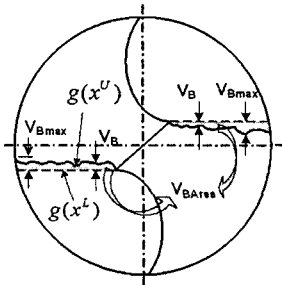


Fig. 3 Shape of flank wear

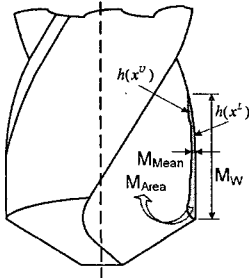


Fig. 4 Shape of margin wear

마진 마멸은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 드릴 의주면과 가공된 구멍이 접촉되는 가장자리의 끝부분 코너 혹은 랜드 부분에 발생된다. 과도한 마진 마멸은 버의 발생과 구멍 가공 오차는 물론 불량한 구멍의 원인이 된다. 이러한 마멸을 측정하기 위해서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 마진 마멸을 폭(M_W), 평균 마멸량(M_{Mean})⁽²⁾ 그리고 정의한 마진 마멸의 면적(M_{Area})으로 측정한다. 식 (5)에 마진 마멸의 면적(M_{Area})을 정의한다.

$$M_{Area} = \int_{SP}^{EP} [h(x^U) - h(x^L)] dx \quad (5)$$

3. 마이크로 드릴 마멸의 측정 알고리즘

3.1 초점결상 시스템

치출에지 마멸의 형상을 복원하기 위해서 마멸 표면의 3차원 플롯은 초점결상(shape from focus: SFF)⁽⁷⁻¹⁰⁾ 방법을 적용하여 측정된다. 그리고 초점결상지수(focus measure index: FMI)⁽⁸⁻¹⁰⁾는 영상 내의 임의의 점에서 고주파 성분의 민감성을 증대 시키는 수정라플라시안 마스크(modified Laplacian mask) 연산자⁽¹⁰⁾를 통하여 정확한 마멸면을 측정하는데 사용된다. 입력영상 $I(x,y)$ 와 수정라플라시안 마스크의 컨벌루션(convolution) 과정을 식 (6)에서 나타낸다.

여기서 H_L 은 고역통과 필터 역할을 하는 수정

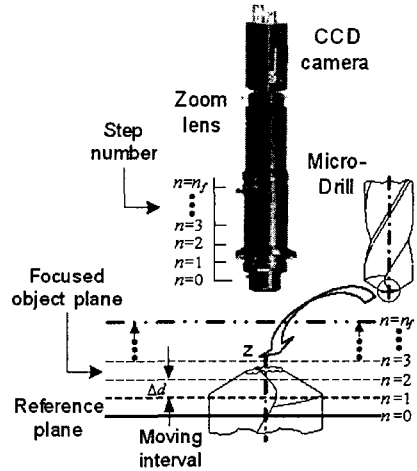


Fig. 5 Shape from focus(SFF) system

$$\begin{aligned} ML(x,y) &= I(x,y) \otimes H_L(x,y) \\ &= |4I(x,y) - I(x-2,y) - I(x+2,y) \\ &\quad - I(x,y-2) - I(x,y+2)| \end{aligned} \quad (6)$$

$$H_L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

라플라시안 마스크이다. 초점결상지수는 영상내의 임의의 점 (i,j)을 중심으로 M, N 으로 나타내는 사각 블록윈도우(block window)의 크기 내에 있는 수정라플라시안값들의 합으로 나타내며, 다음 식으로 초점결상지수값(F)을 나타낸다.

$$F(i,j) = \sum_{x=i-M}^{i+M} \sum_{y=j-N}^{j+N} ML(x,y) \text{ for } ML(x,y) \geq T_L \quad (7)$$

식 (7)에서 T_L 은 문턱값으로 $ML(x,y)$ 가 문턱값 이상일 때만 더해진다. 초점이 잘 맞을수록 초점결상지수값이 커지는 효과가 있다. Fig. 5은 치출에지의 마멸된 표면을 측정하기 위한 초점결상 시스템을 나타낸다.

Fig. 5에서 드릴의 바닥을 기준초점평면(focused reference plane)이라 하고, 드릴의 임의의 한 점 z 의 높이를 d_n 라 하면, 정밀서보스테이지에 장착된 CCD 카메라를 물체초점평면(focused object plane)으로 측정이송간격 Δd 만큼씩 이동시키면 z 점의 초점결상지수값이 점진적으로 증가하며, 드릴의 z 점이 물체초점평면과 같아질 때 초점이 맺게 된다. z 점의 드릴의 높이 d^* 는 식 (9)로 표현된다.

$$d^* = d_{n_j} = n_f \times \Delta d \quad (8)$$

마멸된 드릴의 높이를 정확하게 측정하기 위해서 가우시안 보간법(Gaussian interpolation)을 적용한다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

3.2 윤곽선 검출 방법

획득한 영상으로부터 치즐에지, 플랭크 그리고 마진의 마멸된 표면의 경계를 측정하기 위해서 윤곽선 검출방법을 사용한다. 윤곽선 검출방법들에는 라플라시안(Laplacian), LoG(Laplacian of Gaussian), DoG(difference of Laplacian), 소벨(Sobel), 로버츠(Roberts) 그리고 프리위트(Prewitt) 등과 같은 방법들이 제안되어 왔다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 임의의 점 (x, y) 에서 수직과 수평 방향의 기울기를 각각 계산하고 영상의 차이와 평활화 효과를 제공하는 소벨(Sobel) 방법을⁽⁶⁾ 적용하여 윤곽선을 검출한다. 수직 방향기울기인 G_x 와 수평 방향기울기인 G_y 는 입력영상 $I(x, y)$ 와 소벨 연산자의 컨벌루션 과정을 통해 아래와 같이 식 (9)와 식 (10)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} G_x &= I(x, y) \otimes H_v \\ &= [I(x-1, y+1) + 2I(x, y+1) + I(x+1, y+1)] \\ &\quad - [I(x-1, y-1) + 2I(x, y-1) + I(x+1, y-1)] \\ H_v &= \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} G_y &= I(x, y) \otimes H_H \\ &= [I(x+1, y-1) + 2I(x+1, y) + I(x+1, y+1)] \\ &\quad - [I(x-1, y-1) + 2I(x-1, y) + I(x-1, y+1)] \\ H_H &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 H_v 와 H_H 는 수직과 수평 방향의 소벨 연산자이다. 소벨 연산자의 출력 ∇f 는 G_x 와 G_y 의 기울기 합으로 얻어진다.

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (11)$$

4. 머신비전시스템과 보정 및 신뢰도 평가

4.1 머신비전 시스템

본 연구에서는 정확한 영상을 얻기 위해서 정밀서보스테이지(precision servo stage)를 이용한 머신비전시스템을 제안한다. 마이크로-드릴의 마멸된

Table 1 Specification of the precision servo stage

Table size	300×300 mm
Travel range	300 mm
Moving resolution	1 μm
Repeatable accuracy	3 μm (full stroke)
Speed	10 mm/min

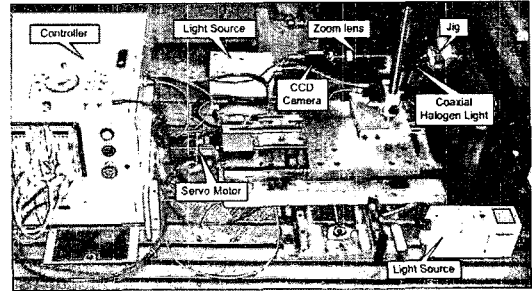


Fig. 6 Machine vision system

표면의 3차원 복원과 윤곽선 검출을 위해서 얻어지는 영상은 정확한 측정이송간격($\Delta d = 5 \mu m$)으로 움직여야 한다. 이를 만족시키기 위해서 정밀서보스테이지에 제어 알고리즘을 적용시켜 1 μm 의 분해능과 3 μm (full stroke)의 반복 정밀도를 가지는 머신비전시스템을 개발한다. 개발된 머신비전시스템은 줌렌즈, CCD 카메라, 2개의 할로젠 광원을 이용한 조명장치 그리고 디지털 영상처리 및 분석을 위한 컴퓨터로 구성된다. Table 1은 정밀서보스테이지의 사양을 나타내고, Fig. 6은 머신비전시스템을 나타낸다.

4.2 보정 및 신뢰도 평가

4.2.1 3차원 보정 및 신뢰도 평가

본 연구에서는 개발된 머신비전시스템의 보정 및 신뢰도를 평가하기 위해서 SFM 방법을 적용한 3차원 복원 실험을 실시한다. 0.1 μm 의 정밀도를 가지는 LVDT를 이용하여 1.00 mm와 1.08 mm 높이를 가지는 두 개의 블록게이지 높이를 각각 50회 측정하였다. 각 블록게이지의 높이값들을 산술 평균하여 두 값의 차인 80.2 μm 으로 높이를 정의한다. 블록게이지의 3차원 측정은 마이크로-드릴 마멸의 3차원 측정 실험조건과 같게 실시하며, 실험 조건은 5장에서 서술한다. Fig. 7은 두 개의 블록게이지들을 나타내는 영상이고, Fig. 8은 블록게이지의 정확한 높이값을 측정하기 위해서 가우시안 보간법을 적용한 초점결상수값들을 나타낸다. Fig. 9는 블록게이지를 3차원으로 복원한 결과를 나타내고, 두 블록게이지의 높이 차이는 95% 신뢰성 구간에서 $82.6 \pm 4.61 \mu m$ 이다. LVDT와 SFM 시스템 방법을 적용하여 얻은 결과로부터 평균 오차 편차가 2.4 μm 임을 확인하고, 측정값들을 Table 2에 나타낸다.

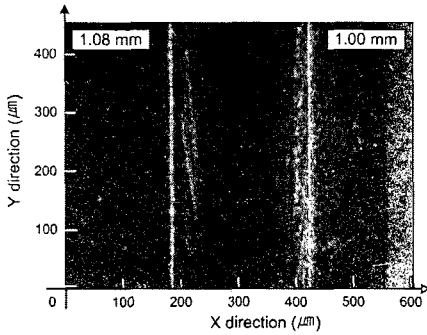


Fig. 7 Raw image of block gauges

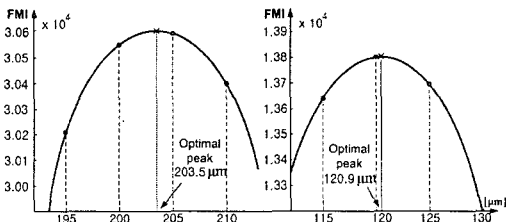


Fig. 8 Gaussian interpolation of FMIs

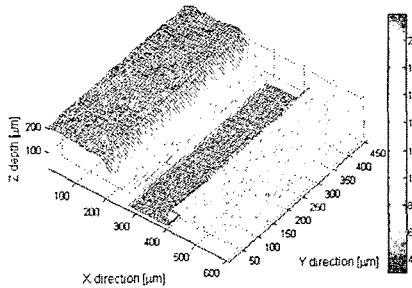


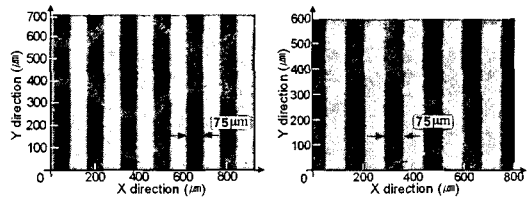
Fig. 9 Oblique plot of block gauges

Table 2 3-D Calibration result [unit: μm]

LVDT difference	80.2
Height of lower block gauge by interpolated FMI	120.9 \pm 3.99 (95%)
Height of higher block gauge by interpolated FMI	203.5 \pm 4.55 (95%)
Gaussian interpolation difference	82.6 \pm 4.61 (95%)
Error deviation	2.4

4.2.2 2 차원 보정 및 신뢰도 평가

2차원 보정 및 신뢰도 평가를 실시하기 위해서 인공물을 이용한 실험을 수행한다. 2차원 보정 및 신뢰도 평가 실험은 배율에 따라 인공물에서 보여지는 선 사이의 길이값과 개발된 머신비전시스템을 통하여 얻어진 2차원 이미지의 픽셀값들을 계산하여 2차원 보정 및 신뢰도 평가를 실시한다.



(a) 5 magnification (b) 6 magnification
Fig. 10 Images of micro-film

Table 3 2-D Calibration results [unit: μm]

Magnification	$\times 5$	$\times 6$
Pixel size	1.41	1.13
Width of line	75	75
Width of line by using pixel size	75.07 \pm 1.88 (95%)	75.09 \pm 1.74 (95%)
Error deviation	0.07	0.09

Table 4 Measurement conditions

	Chisel edge wear	Flank wear	Margin wear
Pixel size	0.95 μm	1.41 μm	1.13 μm
Magnification	$\times 8$	$\times 5$	$\times 6$
Image size (Number of pixels)	640 \times 480	640 \times 480	640 \times 480
Moving resolution	5 μm	-	-
Block window	M=N=5	-	-

실험조건은 마이크로-드릴 마멸의 영상 획득 방법과 동일하게 실시하며, 5장에서 서술한다. Fig 10은 5배와 6배의 배율로 획득한 인공물의 영상을 나타낸다.

Table 3은 75 μm 의 너비를 가지는 선들과 각각의 배율에 해당되는 픽셀 크기를 계산하여 측정된 결과이다. 개발된 머신비전시스템으로부터 5배와 6배의 배율로 측정된 평균 오차 편차가 0.07과 0.09 μm 임을 확인 하였다.

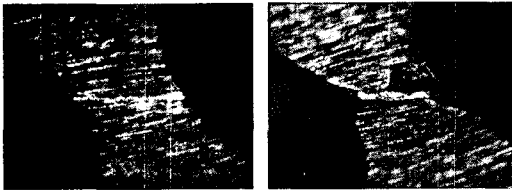
5. 실험 결과

5.1 실험 조건

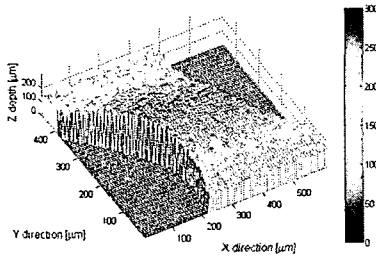
본 논문에서는 1.0 mm 고속도강 트위스트 마이크로-드릴과 1.5 mm 의 두께를 가지는 기계구조용 탄소강(SM45C) 시편을 사용한다. 그리고 마이크로-드릴 마멸 특성을 분석하기 위해서 각기 다른 3가지 실험 조건을 적용하여 실험을 실시한다. Table 4와 Table 5는 측정 조건과 절삭 조건을 각각 나타낸다.

Table 5 Cutting conditions

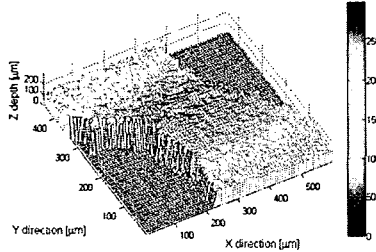
Drill diameter	$\phi 1.0 \text{ mm}$
Drill material	HSS
Specimen	SM45C
Cutting speed	2,400 RPM
Feedrate	9 mm/min



(a) Fresh micro-drill (b) After drilling 10 holes
Fig. 11 Rae images of chisel edges



(a) Fresh micro-drill



(b) After drilling 10 holes

Fig. 12 Oblique plots of chisel edges

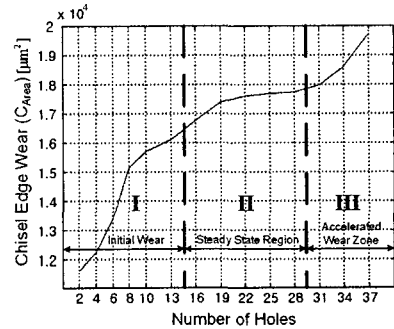
5.2 마이크로 드릴 마멸

5.2.1 치즐에지 마멸

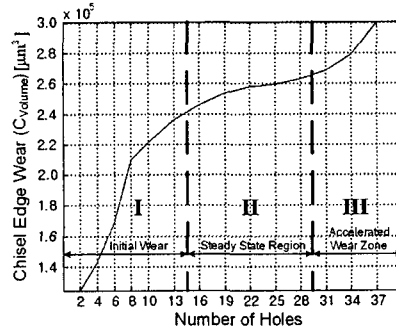
Fig. 11 (a)는 사용하지 않은 드릴의 치즐에지 부분의 원 영상을 나타낸다. Fig. 11 (b)는 10 개의 구멍을 가공한 후의 마멸된 치즐에지 표면을 나타낸다. 부피(C_{Volume})와 면적(C_{Area})으로 정의한 치즐에지 마멸을 측정하기 위해서 일정한 측정이송간격 ($\Delta d = 5 \mu\text{m}$)으로 카메라를 이동 시키면서 영상들을 획득한다. 계산된 초점결상지수값들을 가우시안 보간법을 적용하여 정확한 높이 정보값들을 계산한다. 그리고 계산된 높이 정보값들을 이용하여 마멸된 표면을 3 차원으로 복원한다. Fig. 12 (a)와 (b)는 사용하지 않은 치즐에지 부분과 10 개의 구멍을 가공한 후의 치즐에지 부분의 마멸을 개발된 SFF 시스템을 이용하여 3 차원으로 복원한 이미지

Table 6 Parameters of chisel edge wear

Drilled holes	$C_{Area} [\mu\text{m}^2]$	$C_{Volume} [\mu\text{m}^3]$
2	11625.77	124782.26
4	12236.29	142949.89
6	13390.00	170508.19
8	15137.21	209932.45
10	15685.71	221178.82
13	16088.53	235995.23
16	16741.14	246025.51
19	17383.53	253565.01
22	17597.49	257678.83
25	17664.25	259282.33
28	17734.01	262982.83
31	17960.85	268723.39
34	18592.31	279130.49
37	19710.66	300839.09



(a) Wear rate of C_{Area}



(b) Wear rate of C_{Volume}

Fig. 13 Chisel edge wear rates

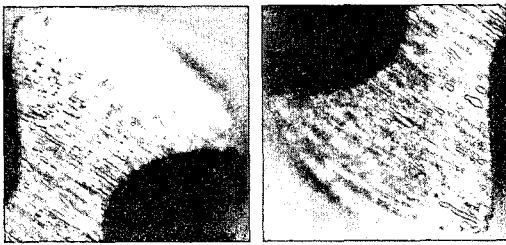
를 나타낸다.

치즐에지 마멸의 부피(C_{Volume})와 면적(C_{Area}) 파라미터들을 Table 6 에 정리하였다. Fig. 13 (a)와 (b)는 가공 개수에 따른 부피(C_{Volume})와 면적(C_{Area})의 마멸 곡선을 나타낸다. 가공 개수뿐만 아니라 드릴 마멸 발생에 따라 마멸 파라미터들이 증가하는 것을 Fig. 13 을 통해서 입증하였다. 개발된 머신비전 시스템이 치즐에지 마멸 검사 시스템으로 유용함을 확인하였다..

5.2.2 플랭크 마멸

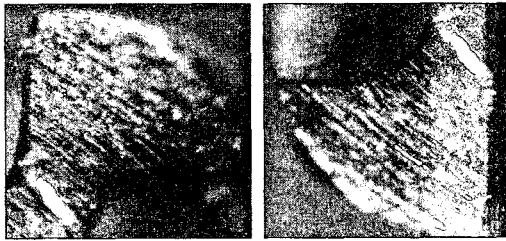
V_B , V_{Bmax} 그리고 정의한 플랭크 마멸의 면적 (V_{BArea})을 측정하기 위해서 소벨 윤곽선 검출 방법과 세션화 방법을 적용하여 정확한 윤곽선을 검출하였다. 윤곽선 검출을 통해 얻어진 이미지 내에서 마멸의 윤곽을 나타내는 점 데이터들을 이용하여 마멸을 측정한다. Fig. 14는 사용하지 않은 플랭크 부분 그리고 Fig. 15는 37개의 구멍을 가공한 후의 플랭크 부분의 마멸을 나타낸다. Fig. 16은 소벨 윤곽선 검출 방법을 사용하여 처리한 이미지를 나타낸다.

플랭크 마멸의 V_B , V_{Bmax} 그리고 면적(V_{BArea})을 Table 7에 정리하였다. 그리고 Fig. 17 (a)와 (b)는 V_B 와 면적(V_{BArea})의 마멸 곡선을 나타낸다. 가공 개수뿐만 아니라 드릴 마멸 발생에 따라 마멸 파라미터들이 증가하는 것을 Fig. 17을 통해서 입증하였고, 치즐에지 마멸과 파라미터들의 마멸 곡선이 유사함을 확인하였다. 개발된 윤곽선 검출 시스템이 마이크로 가공 공정에서 플랭크 마멸 검사 시스템으로 유용함을 확인하였다.



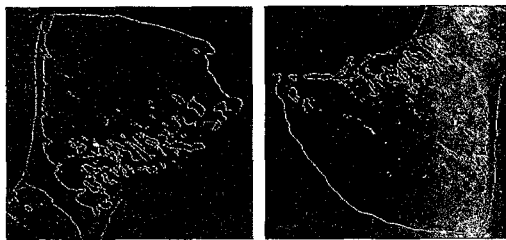
(a) No. 1 (b) No.2

Fig. 14 Raw images of flank surfaces (Fresh micro-drill)



(a) No. 1 (b) No.2

Fig. 15 Raw images of flank wears (After drilling 37 holes)

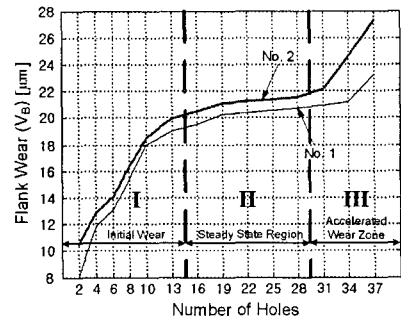


(a) No. 1 (b) No.2

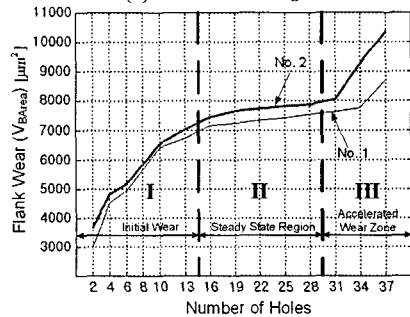
Fig. 16 Edge detected flank wears by Sobel operator (After drilling 37 holes)

Table 7 Parameters of flank wear

Drilled holes		V_B [μm]	V_{Bmax} [μm]	V_{BArea} [μm^2]
2	No. 1	8.09	21.09	2979.98
	No. 2	10.46	22.50	3668.88
4	No. 1	11.82	26.34	4512.31
	No. 2	12.89	29.27	4812.14
6	No. 1	13.11	30.39	4937.88
	No. 2	14.14	34.73	5177.59
8	No. 1	15.41	37.08	5633.94
	No. 2	16.32	38.50	5827.10
10	No. 1	18.04	39.93	6418.89
	No. 2	18.55	41.35	6535.82
13	No. 1	19.05	41.06	6715.26
	No. 2	19.93	42.48	7016.99
16	No. 1	19.52	41.06	7152.32
	No. 2	20.46	43.89	7431.99
19	No. 1	20.26	43.59	7232.00
	No. 2	21.06	43.59	7651.08
22	No. 1	20.35	44.99	7323.81
	No. 2	21.23	43.59	7716.31
25	No. 1	20.54	44.99	7414.89
	No. 2	21.38	45.71	7793.88
28	No. 1	20.74	45.33	7532.44
	No. 2	21.51	46.67	7860.67
31	No. 1	20.87	46.18	7613.49
	No. 2	22.15	47.54	8041.48
34	No. 1	21.17	46.80	7760.19
	No. 2	24.61	49.73	9267.08
37	No. 1	23.22	47.74	8700.86
	No. 2	27.33	50.63	10320.69



(a) Wear rate of V_B



(b) Wear rate of V_{BArea}

Fig. 17 Flank wear rates

Table 8 Parameters of margin wear

Drilled holes		M_W [μm]	M_{Mean} [μm]	M_{Area} [μm^2]
2	No. 1	278.37	7.13	1953.33
	No. 2	334.04	6.98	2267.42
4	No. 1	306.21	8.47	2622.78
	No. 2	342.61	7.65	2460.00
6	No. 1	331.34	9.60	3083.27
	No. 2	357.35	7.85	2786.58
8	No. 1	346.04	10.99	3652.99
	No. 2	368.66	9.27	3142.74
10	No. 1	352.40	11.68	4045.07
	No. 2	395.55	10.00	3931.57
13	No. 1	388.36	12.07	4555.10
	No. 2	401.54	10.55	4216.76
16	No. 1	398.42	12.96	5027.88
	No. 2	410.68	11.47	4741.58
19	No. 1	404.55	13.74	5383.31
	No. 2	415.59	12.33	5197.71
22	No. 1	409.14	14.03	5519.78
	No. 2	418.79	12.63	5288.21
25	No. 1	413.97	14.27	5608.47
	No. 2	421.21	12.79	5386.38
28	No. 1	417.31	14.35	5686.44
	No. 2	424.65	13.01	5522.91
31	No. 1	421.23	14.71	5775.81
	No. 2	432.28	14.06	6010.76
34	No. 1	434.74	15.59	6276.26
	No. 2	442.11	14.97	6510.71
37	No. 1	462.93	17.33	7723.63
	No. 2	478.84	16.68	7986.32

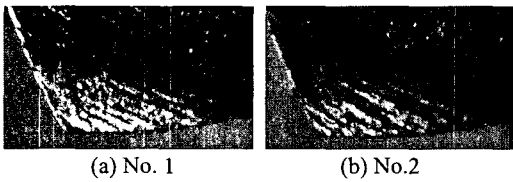


Fig. 18 Raw images of margin wears (After drilling 4 holes)

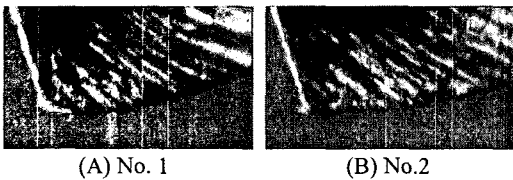


Fig. 19 Raw images of margin wears (After drilling 28 holes)

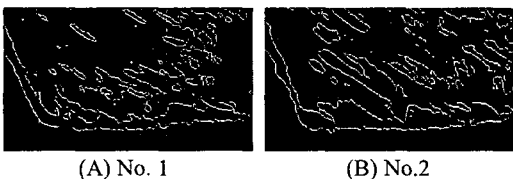
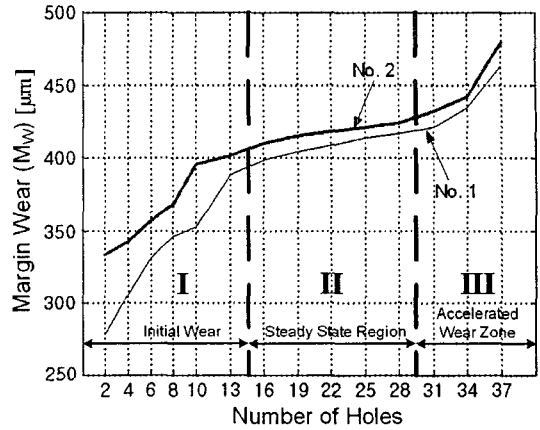
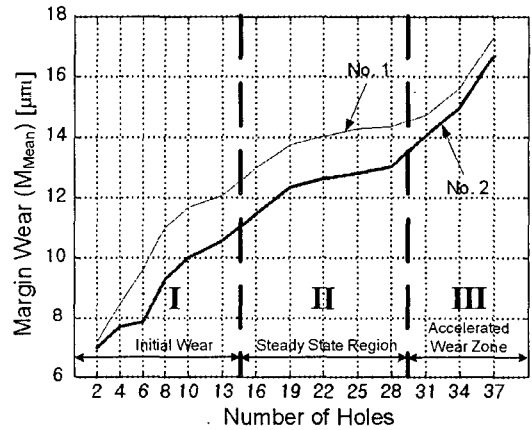


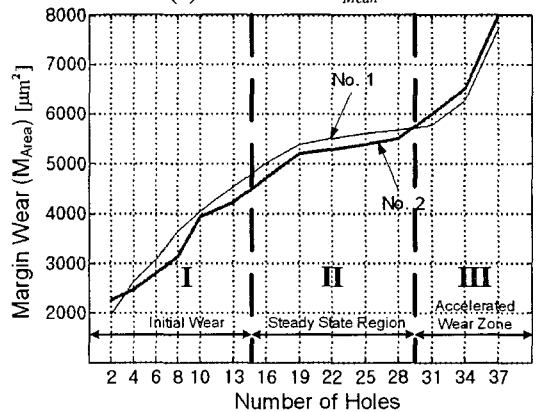
Fig. 20 Edge detected margin wears by Sobel operator (After drilling 37 holes)



(a) Wear rate of M_W



(b) Wear rate of M_{Mean}



(c) Wear rate of M_{Area}
Fig. 21 Margin wear rates

5.2.3 마진 마멸

폭(M_W), 평균 마멸량(M_{Mean}) 그리고 정의한 마멸의 면적(M_{Area})을 측정하기 위해서 플랭크 마멸 측정 과정에 적용한 것과 같은 방법으로 마진 마멸

을 측정한다. Fig. 18과 Fig. 19는 4개와 28개의 구멍을 가공한 후의 마진 부분의 마멸을 나타낸다. Fig. 20은 소벨 윤곽선 검출 방법을 사용하여 처리한 이미지를 나타낸다.

마진 마멸의 폭(M_W), 평균 마멸량(M_{Mean}) 그리고 면적(M_{Area})을 Table 8에 정리하였다. Fig. 21 (a), (b)와 (c)는 폭(M_W), 평균 마멸량(M_{Mean}) 그리고 면적(M_{Area})의 마멸 곡선을 나타낸다. 가공 개수뿐만 아니라 드릴 마멸 발생에 따라 마멸 파라미터들이 증가하는 것을 Fig. 21을 통해서 입증하였고, 치절에지와 플랭크 마멸의 파라미터들의 마멸 곡선이 유사함을 확인하였다. 개발된 윤곽선 검출 시스템이 마이크로 가공 공정에서 마진 마멸 검사 시스템으로 유용함을 확인하였다.

6. 결론

(1) 미세구멍 가공 공정에서 발생하는 드릴의 마멸을 측정하기 위해서 정밀서보스테이지, 줌렌즈, CCD 카메라, 디지털 영상처리 및 분석을 위한 컴퓨터 그리고 정확한 영상을 획득하기 위해서 2개의 할로젠 광원을 이용한 조명장치로 구성된 머신비전시스템을 개발하였다.

(2) 개발된 머신비전시스템에 SFF 시스템과 윤곽선 검출 방법을 이용하여 마이크로-드릴의 마멸을 3차원 형상으로 복원하고, 마멸량을 정량화하였다.

(3) 본 논문에서 제안된 머신비전시스템의 보정 및 신뢰도를 평가하기 위해서 블록 게이지와 인공물을 이용한 실험을 수행하였다. 3차원 보정 및 신뢰도 평가는 LVDT와 SFF 시스템을 적용하여 얻은 결과값으로부터 평균 오차 편차가 $2.4 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 그리고 2차원 보정 및 신뢰도 평가는 인공물에서 나타나는 선의 너비값과 5배와 6배의 배율로 얻어진 이미지의 픽셀값으로부터 평균 오차 편차가 0.07과 $0.09 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다.

(4) 본 연구에서는 마이크로-드릴에 발생하는 치절에지, 플랭크 그리고 마진 마멸을 부피(volume), 면적(area) 및 평균 길이(average length)를 이용하여 마멸을 정의하였다. 그리고 실험을 통하여 마멸량을 정량화하고, 정의한 마멸 파라미터들을 기존에 측정 방법인 절삭력과 표면 거칠기를 이용한 마멸 현상과 유사함을 확인하였다.

(5) 개발된 머신비전시스템을 이용하여 미소 부품들의 검사에 적용이 가능함을 입증하였다.

참고문헌

- (1) Lin, S. C. and C. J. Ting, 1995, "Tool Wear Monitoring in Drilling Using Force Signals," *WEAR*, Vol. 180, pp. 53~60.
- (2) Shih, A. J., M. Bakkal, S. B. McSpadden, and R. O. Scattergood, 2005, "Thrust Force, Torque and Tool Wear in Drilling the Bulk Metallic Glass," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 863~872.
- (3) Bono, M. and J. Ni, 2005, "Location of the Maximum Temperature on the Cutting Edges of a Drill," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, In Printing.
- (4) Nickel, J., A. N. Shuaib, B. S. Yilbas, and S. M. Nizam, 2000, "Evaluation of the Wear of Plasma-nitrided and TiN-coated HSS Drills using Conventional and Micro-PIXE Techniques," *WEAR*, Vol. 239, pp. 155~167.
- (5) Chen, Y. C. and Y. S. Liao, 2003, "Study on Wear Mechanisms in Drilling of Inconel 718 Superalloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 269~273.
- (6) Gonzalez, R. C. and R. E. Woods, 2002, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- (7) Nayar, S. K. and Nakagawa, Y., 1994, "Shape from Focus," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 8, pp. 824~831.
- (8) Yoon, H. S. and Chung, S. C., 2004, "Vision Inspection of Micro-drilling Processes on the Machine Tool," *Transactions of the NAMRI/SME*, Vol. 32, pp. 391~398.
- (9) Yoon, H. S. and Chung, S. C., 2004, "Machine Vision Inspection System of Micro-drilling Processes on the Machine Tool," *Transactions of KSME(A)*, Vol. 28, No. 6, pp. 867~875 (in Korean).
- (10) Park, C. Y. and Chung, S. C., 2006, "3D Wear Analysis of Valve Assemblies by using the Machine Vision," *Transactions of KSME(A)*, In Printing (in Korean).
- (11) Altintas, Y., 2000, *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, Cambridge.