



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0083698
(43) 공개일자 2019년07월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05B 19/4065 (2006.01) G05B 19/4093 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G05B 19/4065 (2013.01)
G05B 19/40938 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0001448
(22) 출원일자 2018년01월05일
심사청구일자 2018년01월05일

(71) 출원인
경상대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
(72) 발명자
오영진
경상남도 함안군 칠원읍 구성2길 11-1
김수진
경상남도 진주시 가좌안골길21번길 5 (가좌동, 가좌제일풍경채) 102동 205호
(74) 대리인
김종석

전체 청구항 수 : 총 6 항

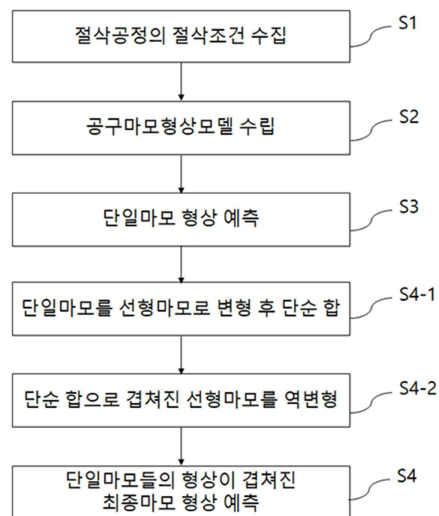
(54) 발명의 명칭 공구마모 형상 예측 방법

(57) 요약

본 발명은 공구마모 형상 예측 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 연속적으로 변화하는 표면경사각의 영향을 고려하고, 확률이론, 선형이론, 역변형 이론을 적용하여 복잡한 형상을 가공할 때도 공구마모형상을 예측할 수 있어 공구 마모로 인해 야기되는 절삭 오류를 최소화시키기 위한 공구마모 형상 예측 방법에 관한 기술이다.

본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법은, 절삭공구의 절삭날 위치별 가공시간 분트포에서 예측되는 각각의 단일마모들을 시간의 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹친 후 역변형해 단일마모들이 겹쳐진 최종마모 형상을 예측하는 방법으로, 복잡한 형상을 가공할 때 공구마모형상을 예측할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G05B 2219/37252 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415152137

부처명 산업통상자원부

연구관리전문기관 한국산업기술평가관리원

연구사업명 기계산업핵심기술개발사업

연구과제명 (RCMS) 가상 생산을 위한 절삭가공의 품질 예측기술 개발(4차년도)

기 여 율 1/1

주관기관 한국산업기술평가관리원

연구기간 2017.06.01 ~ 2018.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

컴퓨터를 이용하여 공구마모 형상을 예측하는 방법으로서,

절삭공정에서 설정되는 다수 개의 절삭조건을 수집하는 제1단계;

상기 다수 개의 절삭조건으로부터 공구마모형상모델을 수립하는 제2단계;

상기 수립된 공구마모형상모델로부터 단일마모들의 형상을 예측하는 제3단계; 및

상기 예측된 단일마모들의 형상을 겹쳐 최종마모 형상을 예측하는 제4단계;를 포함하고,

상기 절삭공정은 절삭공구와 피절삭물 사이의 표면 경사각이 연속적으로 변화되는 공정인 것을 특징으로 하는 공구마모 형상 예측 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제4단계는,

상기 예측된 단일마모들의 형상들을 시간에 대한 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹치는 제4-1단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 공구마모 형상 예측 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 제4단계는,

상기 제4-1단계 이후, 상기 단순 합으로 겹쳐진 선형마모를 역변형하여 상기 최종마모 형상을 예측하는 제4-2단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 공구마모 형상 예측 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 예측되는 단일마모들의 형상은 상기 절삭공구의 절삭날 위치별 가공시간 분포로부터 예측되는 형상인 것을 특징으로 하는 공구마모 형상 예측 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 공구마모형상모델은 가공경로시뮬레이션을 통해 계산되는 상기 절삭공구의 절삭날 위치별 가공시간 분포를 포함하는 것을 특징으로 하는 공구마모 형상 예측 방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 따른 방법을 상기 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램이 기록된 상기 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 공구마모 형상 예측 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 연속적으로 변화하는 표면경사각의 영향을 고려하고, 확률이론, 선형이론, 역변형 이론을 적용하여 복잡한 형상을 가공할 때도 공구마모형상을 예측할 수

[0001]

있어 공구 마모로 인해 야기되는 절삭 오류를 최소화시키기 위한 공구마모 형상 예측 방법에 관한 기술이다.

배경 기술

- [0002] 금형 산업에서 절삭 마감작업은 높은 생산성으로 고품질의 복잡한 형상을 제조하는 데 있어 일반적으로 사용되는 제조 공정이다.
- [0003] 금형 산업의 제조 공정에 일반적으로 사용되는 코팅된 탄소 볼 엔드 밀을 사용한 절삭 마감작업은 연속적으로 변화하는 표면 경사각을 가질 경우 중첩 영역 아래에서 공구 마모를 예측하는 데 복잡성을 초래한다. 실제로 절삭 날의 공구 접촉점은 공구 마모에 영향을 미치는 순간 표면 경사각의 다양성으로 변경되지만 대부분의 현재 공구 마모 모델에서는 고려되지 않는다.
- [0004] 공구 마모 형상을 예측하기 위한 종래의 기술을 살펴보면, 대한민국 공개특허공보 제10-2005-0030925호에 개시된 바와 같이, PZT소재를 공구, 공구대 혹은 작업대에 삽입 할 수 있게 나사선을 형성하여 음향센서를 제작하고 가공 중(InProcessing) 신호를 수집하여 육안으로 관찰할 수 있도록 화면에 표시함으로써 가공상태를 예측하고, 음향신호를 분석함으로써 공구의 마멸이나 파손에 의한 공구의 교체시기 및 수명을 예측하여 공정을 개선하고 생산성을 향상시켜 생산원가절감이 가능한 표면결합 및 공구상태에 대한 음향신호 분석시스템이 개시되었다.
- [0005] 그러나, 상기 종래의 기술의 경우에도 연속적으로 변화하는 표면 경사각을 고려하여 중첩 영역 아래에서 공구 마모를 예측하는 기술은 개시되지 않았으며, 종래의 기술은 공정이 진행되면서 공구 마모를 모니터링하는 것이며, 절삭 조건을 통해 공구마모를 예측하는 것이 아니다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0006] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 제10-2005-0030925호(2005.03.31.)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 지금까지 공구마모 형상 예측 방법에 관한 연구가 많이 이루어졌지만, 절삭 공정이 진행되기 전 미리 마모 형상을 예측하고, 표면 경사각이 연속적으로 변화하는 경우와 같이 복잡한 마모 형상을 예측하기 위한 연구는 부족하다. 본 발명은 절삭공구의 절삭날 위치별 가공시간 분포에서 예측되는 각각의 단일마모들을 시간의 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹친 후 역변형해 단일마모들이 겹쳐진 최종마모 형상을 예측하는 방식으로 보다 개선된 공구마모 형상 예측 방법을 제공하고자 한다.
- [0008] 본 발명이 해결하고자 하는 과제들은 이상에서 언급한 과제로 제한되지 않으며, 여기에 언급되지 않은 본 발명이 해결하려는 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0009] 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법은, 컴퓨터를 이용하여 공구마모 형상을 예측하는 방법으로서, 절삭공정에서 설정되는 다수 개의 절삭조건을 수집하는 제1단계, 상기 다수 개의 절삭조건으로부터 공구마모형상모델을 수립하는 제2단계, 상기 수립된 공구마모형상모델로부터 단일마모들의 형상을 예측하는 제3단계, 및 상기 예측된 단일마모들의 형상을 겹쳐 최종마모 형상을 예측하는 제4단계를 포함하고, 상기 절삭공정은 절삭공구와 피절삭물 사이의 표면 경사각이 연속적으로 변화되는 공정인 것을 특징으로 한다.
- [0010] 또한, 본 발명의 제4단계는 상기 예측된 단일마모들의 형상들을 시간에 대한 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹치는 제4-1단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0011] 또한, 본 발명의 제4단계는 상기 제4-1단계 이후, 상기 단순 합으로 겹쳐진 선형마모를 역변형하여 상기 최종마모 형상을 예측하는 제4-2단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0012] 또한, 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법에 있어서, 상기 예측되는 단일마모들의 형상은 상기 절삭공구의

절삭날 위치별 가공시간 분포로부터 예측되는 형상인 것을 특징으로 한다.

[0013] 또한, 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법에 있어서, 상기 공구마모형상모델은 가공경로시뮬레이션을 통해 계산되는 상기 절삭공구의 절삭날 위치별 가공시간 분포를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0014] 또한, 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법을 상기 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램이 기록된 상기 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0015] 상기 과제의 해결 수단에 의해, 본 발명의 공구마모 형상 예측 방법은 보다 정밀하고 정확하게 절삭 공구의 복잡하고 겹쳐진 최종마모 형상을 예측할 수 있고, 이를 통해 주어진 절삭 조건에서 발생하는 오류를 줄일 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0016] 도 1은 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법의 순서도이다.
- 도 2는 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법의 개념 설명도이다.
- 도 3은 본 발명에 따른 절삭공구의 마모 양태를 도시하기 위해 단부를 100배 확대한 도면이다.
- 도 4는 본 발명에 따른 절삭공구의 절삭작업에서 절삭마모의 기하학적 요소를 나타내는 도면이다.
- 도 5는 본 발명에 따른 절삭공구의 공구마모 형상의 분포를 측정한 그래프이다.
- 도 6은 본 발명에 따른 절삭 시간과 표면 경사각에 대한 플랭크 마모의 경향을 나타내는 그래프이다.
- 도 7은 본 발명에 따른 선형화된 공구마모 W_x 의 측정값 및 계산값의 비교 그래프이다.
- 도 8은 본 발명의 입증 실험을 위한 절삭기계와 피절삭물 설치 상태를 나타낸 도면이다.
- 도 9는 본 발명의 피절삭물이 수평 하향 방향으로 절삭될 때 일정한 경사면과 볼록한 윤곽면의 경사면에 대한 절삭날의 표면 경사각 변화를 나타낸 도면이다.
- 도 10은 본 발명의 실험 중 그룹 I의 테스트1에 따른 예측된 공구마모 겹침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 겹침형상의 값 사이의 비교 그래프이다.
- 도 11은 본 발명의 실험 중 그룹 I의 테스트2에 따른 예측된 공구마모 겹침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 겹침형상의 값 사이의 비교 그래프이다.
- 도 12는 본 발명의 실험 중 그룹 II의 테스트1에 따른 예측된 공구마모 겹침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 겹침형상의 값 사이의 비교 그래프이다.
- 도 13은 본 발명의 실험 중 그룹 II의 테스트2에 따른 예측된 공구마모 겹침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 겹침형상의 값 사이의 비교 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 이상과 같은 본 발명에 대한 해결하고자 하는 과제, 과제의 해결 수단, 발명의 효과를 포함한 구체적인 사항들은 다음에 기재할 실시예 및 도면들에 포함되어 있다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법은 불엔드밀과 같은 절삭공구가 절삭 공정을 작업할 때, 복잡한 형상의 피절삭물의 경우 표면 경사 각도가 연속적으로 변화하므로 겹쳐지는 영역 아래에서 공구 마모의 형상을 예측하는 것으로, 공구 마모 분석에서 절삭 날과 겹침 영역을 따라 연속적으로 변화하는 공구 겹침과 표면경사각의 영향을 고려한다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 컴퓨터를 이용한 공구마모 형상 예측 방법에서의 각 단계들은 다음과 같다.

[0020] 제1단계: 절삭공정에서 설정되는 다수 개의 절삭조건을 수집하는 단계

[0021] 제2단계: 상기 다수 개의 절삭조건으로부터 공구마모형상모델을 수립하는 단계

- [0022] 제3단계: 상기 수립된 공구마모형상모델로부터 단일마모들의 형상을 예측하는 단계
- [0023] 제4단계: 상기 예측된 단일마모들의 형상을 겹쳐 최종마모 형상을 예측하는 단계
- [0024] 이하 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법을 도 1 및 도 2를 참조하여 각 단계별로 상세히 설명한다.

[0025] **제1단계: 절삭공정에서 설정되는 다수 개의 절삭조건을 수집하는 단계**

- [0026] 공구 상태를 평가하는 데 가장 자주 사용되는 측정치는 도 3에 네모 형상으로 도시된 플랭크 마모이다. 일반적으로 공구는 플랭크 마모가 기준 값에 도달 할 때 수명이 다한 것으로 간주된다. 플랭크 마모는 절삭 날의 상단과 플랭크 마모가 발생하는 영역의 바닥 사이의 거리로 측정 할 수 있다. 실제 절삭 조건의 복잡성으로 인하여 절삭 진행은 공구 마모의 상당한 부분을 발생 시키며, 상이한 절삭조건은 공구 마모 상태에 대해 각기 다른 영향을 미친다. 공구 마모는 재료 특성, 공구 재료, 공구 형상, 작동 조건 및 기계의 열악한 제어로 인한 예기치 않은 충격과 같은 기타 요인의 함수이다.

[0027] **제2단계: 다수 개의 절삭조건으로부터 공구마모형상모델을 수립하는 단계**

- [0028] 공구 마모를 예측하기 위해 다양한 이론적, 경험적, 수치적 또는 결합된 모델이 개발되었다. 현재의 공구 마모 모델은 테스트 플랭크 마모 결과의 평균값 또는 최대값을 기준으로 제안되었지만 종종 공구 마모 값이 과대 또는 과소평가되는 일 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해 피절삭물의 경사각이 일정한 조건 하에서의 공구 마모 기하학적 프로파일이 개발되었고, 공구마모 형상이 분포함수로 근사화 될 수 있는 것이 밝혀졌다.

[0029] **제3단계: 수립된 공구마모형상모델로부터 단일마모들의 형상을 예측하는 단계**

- [0030] 공구마모 형상이 분포함수로 근사화될 수 있으므로, 공구마모 형상은 하기의 수학식 1로 산출된다.

수학식 1

$$W_i = f_i(x)$$

[0031]

$$f_i(x)$$

- [0032] 여기서, $f_i(x)$ 는 확률밀도함수(PDF)이다.

- [0033] 본 발명에 따른 공구마모 형상 예측 방법은 원래 공구 마모 형상을 직접 측정한 다음 통계 이론을 기반으로 마모의 확률밀도함수를 결정하기 위해 채택되었다. 실제로, 가우스 분포 함수 및 웨이블 분포 함수와 같은 확립된 확률함수 중 하나를 선택하여 분포함수를 설명하는 것이 바람직하다. 데이터 집합에 의해 기술된 모집단이 주어진 확률 분포를 따르는지를 테스트하기 위해 다양한 방법을 사용할 수 있다.

[0034] **제4단계: 예측된 단일마모들의 형상을 겹쳐 최종마모 형상을 예측하는 단계**

- [0035] 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법에서의 제4단계는 다음과 같은 단계를 포함한다.

- [0036] 제4-1단계: 예측된 단일마모들의 형상들을 시간에 대한 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹치는 단계

- [0037] 제4-2단계: 단순 합으로 겹쳐진 선형마모를 역변형하여 최종마모 형상을 예측하는 단계

- [0038] 이하 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법의 제4단계를 도 1 및 도 2를 참조하여 각 단계별로 상세히 설명한다.

[0039] **제4-1단계: 예측된 단일마모들의 형상들을 시간에 대한 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹치는 단계**

- [0040] 절삭날의 설계 또는 작동에서는 절삭 공구가 주어진 작동 조건에서 실패 할 것인지 여부에 대한 관심도가 높다. 상술한 제3단계에서 설정된 공구마모형상모델은 비선형 모델이므로, 중첩 영역에 대해서 공구마모 중첩형상을 계산하는 것은 어렵다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 상술한 제3단계에서 설정된 공구마모형상모델을 선형화

하여 직선그래프를 도시할 수 있는 새로운 변수를 생성한다.

[0041] 수학식 1에 선형화이론을 적용하여 W_i 모델에 대한 선형 함수 W_L 을 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$W_L = f_L(W_i); \quad i=1,2,\dots,n$$

[0042]

[0043] 여기서, W_i 는 다른 물리적 파라미터의 조합과 W_i 변수에 해당하는 i 로 구성되는 공구마모 변수를 나타낸다. 즉, 수학식 1을 선형화하여 공구마모형상모델로부터 파라미터의 변화에 대한 선형 함수인 W_L 을 산출하는 것이다.

[0044] 한편, 공구 접촉점은 표면경사각의 다양성에 따라 변경되어 절단 중 겹치거나 겹치지 않는 영역과 관련된 다른 공구마모 형상을 생성한다. 겹치는 영역은 인접한 영역과 함께 하나 이상의 공통 도구 접점을 각각 가지고 있는 영역을 의미한다. 각각의 구역마다 공구마모 형상 예측을 반복적으로 수행하면, 겹치는 공구 접촉점은 2개 이상의 구역에 공통적으로 포함될 수 있다. 그러나 본 발명은 비선형 공구 마모 모델을 선형 모델로 변환하기 때문에 공구 접점이 겹치더라도 선형마모 공구의 겹쳐진 마모형상을 단순 합으로 산출할 수 있다.

[0045] 따라서 선형화된 공구마모 겹침 형상은 수학식 2에 나타난 선형화 모델 W_L 의 단순 합으로 도출되어, 하기의 수학식 3으로 나타낸다.

수학식 3

$$W_{LO} = \sum_{i=1}^n W_L$$

[0046]

[0047] 수학식 3이 마련되어, 절삭날을 따라 공구 접점에서 주어진 작동 매개 변수에 대해 선형화된 공구마모 겹침 형상을 계산할 수 있다.

[0048] **제4-2단계: 단순 합으로 겹쳐진 선형마모를 역변형하여 최종마모 형상을 예측하는 단계**

[0049] 상기 제4-1단계에서 서술한 바와 같이, 공구마모 겹침 형상은 수학식 3을 기반으로 계산할 수 있다. 그러나 계산된 결과는 선형공구마모모델 W_L 에서 산출된 겹침 모델로서, 실제 공구마모 겹침 형상과 다르다. 이 문제를 해결하기 위해 실제 공구마모 겹침 형상은 해당 선형공구마모모델의 역수를 취하여 계산할 수 있다. 따라서 절삭날의 최종 공구마모 형상은 하기의 수학식 4로 나타낸다.

수학식 4

$$W_O = f_L^{-1}(W_{LO})$$

[0050]

[0051] 이와 같이, 볼 엔드밀과 같은 절삭공구의 작업에서 표면 경사각 및 절삭 시간은 가변 값이며, 공구의 플랭크 표면에 다른 공구마모 겹침형상 구조를 초래할 수 있다. 따라서 동일한 경사각 및 절삭 시간으로 구성되는 절삭 사이클에 대한 공구마모 겹침형상을 계산하고, 여러 절삭 사이클에 대해 동일한 프로세스를 확장 할 수 있다.

[0053] 실시예

[0054] 이하에서는, 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법을 절삭공구에 실제로 적용하여 구체적으로 설명한다.

[0055] 우선, 실제 절삭공구에 적용하기 위해 절삭마모의 기하학적 요소를 수식으로 나타내어야 한다.

[0056] 공구마모 겹침 모델을 개발하기 위해서는 기본 볼엔드밀의 형상, 순간적으로 변화하는 절삭면과 피절삭물 간의 상호 작용, 및 절삭공구와 피절삭물 간의 상호 작용에 대한 피절삭물 경사의 영향을 분석해야 한다. 도 4는 볼 엔드밀의 절삭작업에서 절삭마모의 기하학적 요소를 나타낸다. 순간적인 절삭 각도는 기본 방정식을 기반으로 수학식 5와 같이 계산할 수 있다.

수학식 5

$$\alpha_i = \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{2d_n}{r}}\right) \cong \sqrt{\frac{2d_n}{r}}$$

[0057]

[0058] 여기서 r 과 d_n 은 각각 절삭공구의 반경과 절삭 깊이를 나타낸다.

[0059] 도 4에 도시된 바와 같이, 절삭면의 위치각 α_{c1} 와 α_{c2} 는 하기 수학식 6 및 수학식 7로 나타난다.

수학식 6

$$\alpha_{c1} = \delta - \alpha_i \cong \delta - \sqrt{\frac{2d_n}{r}}$$

[0060]

수학식 7

$$\alpha_{c2} \cong \delta + \frac{p_s}{2r}$$

[0061]

[0062] 여기서 p_s 는 절삭의 스텝오버 깊이를 나타낸다.

[0063] 또한, 절삭면에 따른의 공구의 입구 및 출구 접촉 위치는 하기 수학식 8 및 수학식 9로 산출할 수 있다.

수학식 8

$$l_{c1} = r\alpha_{c1}$$

[0064]

수학식 9

$$l_{c2} = r\alpha_{c2}$$

[0065]

[0066] 상술한 바와 같이 수식으로 산출된 절삭마모의 기하학적 요소를 이용하여 본 발명의 일 실시예에 따른 공구마모 형상 예측 방법을 절삭공구에 실제로 적용하여 단일마모 형상을 예측하고, 이를 통하여 최종 공구마모 형상을 예측해보기로 한다.

[0067] 공구마모형상모델을 통한 단일마모 형상예측

[0068] 본 발명에서 언급하는 공구마모 형상의 특성은 공구의 측면에서 발생하는 마모를 의미한다. 두 개의 플루트의 평균값이 공구 마모의 지표로 간주된다. 절삭 매개 변수는 마감절삭공정과 동일하게 설정되어 스핀들 속도, 이송 속도, 스톱 오버 깊이 및 축 깊이와 관련된 고정 작동 매개 변수와 즉각적으로 변화하는 표면경사각이 가변 매개 변수로 설정되었다.

[0069] 도 5는 공구마모 형상의 분포를 측정한 것으로, 단일마모가 공구 접촉점을 중심으로 생기며, 시간에 따라 단일마모의 크기는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다양한 경사각에 대한 공구의 입구 및 출구 접촉위치는 수학식 5 내지 9에 따라 산출될 수 있으며, 이때 공구 경사각이 일정한 조건에서는 공구 접촉점의 진입 위치에서 공구 마

모가 시작되고 공구 접점의 출구 위치에서 최대 플랭크 마모 VB_{max} 가 발생하는 것을 파악할 수 있다.

[0070] 도 5에 도시된 바와 같이, 측정된 공구마모 형상 데이터는 정규 분포 양상을 나타낸다는 가설을 세울 수 있다. 가설을 검증하기 위해 Matlab 프로그램을 사용하여 측정된 데이터를 맞추기 위해 최소제곱법이 수행되었다. 확

률 이론에 따르면 공구마모 형상 분포는 가우스 분포로 근사되므로, 공구마모 형상의 확률밀도함수 $f_i(l)$ 는 하기 수학식 10과 같이 산출된다.

수학식 10

$$f_i(l) = VB_{max} e^{-\left(\frac{1-l_{c2}}{C_W}\right)^2}$$

[0071]

[0072] 여기서, $C_W = 0.36$ 은 고정 매개 변수의 영향을 고려한 실험 상수 값이고, 1은 절삭공구의 중심 끝에서 절삭날

을 따라 측정된 호길이이며, VB_{max} 는 공구의 최대 측면 마모를 나타낸다.

[0073] 이때, 수학식 1에 따라 공구마모 형상의 분포는 수학식 11과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 11

$$W_i = f_i(l) = VB_{\max} e^{-\left(\frac{1-l_{c2}}{C_W}\right)^2}$$

[0074]

[0075] 공구마모 형상은 일반적으로 정규 분포를 따른다는 것이 증명되었다. 그러나, 지금까지 플랭크 마모 $VB_{\max}$ 를 계산하는 데 효과적인 모델은 아직 존재하지 않으나, 이는 측정된 데이터를 통해 간접적으로 계산될 수 있다.

[0076] 도 6은 절삭 시간과 표면 경사각에 대한 플랭크 마모 $VB_{\max}$ 의 증가를 나타내는데, 관찰 결과, 절삭 시간의 초기 단계에서 절삭 시간에 따라 플랭크 마모의 증가가 급격히 증가했다. 마모 경향은 다른 연구자들에 의해 보고된 패턴과 일치하였는데, 절단 초기에 마모는 가장자리의 불규칙성을 제거하는 경향이 있고 높은 압력이 발생하며 가장자리에 열이 집중된다. 이러한 최초의 가속 마모 후에 절삭 시간이 증가함에 따라 마모 속도가 느려지므로 코팅이 마모를 더디게 하는 것을 알 수 있다. 또한, 도 6에 따르면, 표면 경사각이 플랭크 마모에 영향을 미치는데, 절삭공구 마모는 표면 경사각이 증가함에 따라 감소하였다.

[0077] 따라서 Taylor의 확장 방정식에 따라, 플랭크 마모 $VB_{\max}$ 모델은 절삭 시간과 경사각을 고려하여 수학식 12와 같이 제안된다.

수학식 12

$$VB_{\max} = C_B t^a \delta^b$$

[0078]

[0079] 여기서, C_B 는 고정 매개 변수의 영향을 고려한 또 다른 실험 상수 값이고, a는 시간 계수이며, b는 경사각 계수이다. 실험 상수 값은 전술한 바와 같이 근사 곡선(curving fitting)을 통해 산출되었으며, $C_B=0.0054$, $a=0.497$ 및 $b=-0.869$ 인 것으로 나타났다.

[0080] 수학식 12를 수학식 11에 삽입하여, 경사각(δ), 공구 접촉점(1) 및 절삭 시간(t)의 관점에서 생성된 공구마모 형상에 대한 예측 모델은 하기 수학식 13과 같습니다.

수학식 13

$$W_i = C_B \delta^b e^{-\left(\frac{1-l_{c2}}{C_W}\right)^2} t^a$$

[0081]

$$C = C_B \delta^b e^{-\left(\frac{1-l_{c2}}{C_W}\right)^2}$$

[0082] 여기서, 라고 가정하면 공구마모형상모델은 하기 수학식 14와 같이 표현된다.

수학식 14

$$W_i = Ct^a$$

[0083]

[0084] 수학식 14는 공구마모 형상이 경사각(δ), 공구 접촉점(1) 및 절삭 시간(t)에 의해 직접 영향을 받는다는 것을 나타낸다.

[0086] 단일마모 형상을 겹친 최종마모 형상예측

[0087] 공구마모 겹침형상을 용이하게 산출하기 위해, 제안된 비선형 공구마모형상모델은 선형화되어 직선 그래프를 도시할 수 있는 새로운 변수를 생성한다. 여기서 선형화된 공구마모형상모델은 비선형 마모 곡선을 선형 곡선에 맞추는 매핑 함수를 적용되어, 수학식 14는 하기 수학식 15로 변환된다.

수학식 15

$$W_i^{1/a} = C^{1/a} t$$

[0088]

[0089] 상술한 수학식 2로부터, 선형화된 방정식은 하기 수학식 16과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 16

$$W_L = C^{1/a} t$$

[0090]

[0091] 따라서 수학식 14를 선형화함으로써, 공구마모형상모델로부터 모델 파라미터의 변화에 대한 선형함수인 방정식

W_L 을 산출할 수 있다. 도 7은 선형화된 공구마모 W_L 의 측정값 및 계산값의 비교 그래프를 나타낸다.

[0092] 비선형 공구 마모를 변환하여 선형마모로 변환하였으므로, 상술한 제4-1단계와 제4-2단계를 적용하여 주어진 작동 조건에서 공구마모 겹침형상을 계산할 수 있다. 먼저, 선형화된 공구마모 겹침형상은 수학식 3 및 수학식 15-16에 따라 하기 수학식 17과 같이 계산한다.

수학식 17

$$W_{LO} = C^{1/a} (t_1 + t_2 + \dots + t_n) = W_{L1} + W_{L2} + \dots + W_{Ln}$$

[0093]

[0094]

다음으로, 실제의 최종적인 공구마모 겹침형상을 계산하는 것이다. 상술한 제4-2단계와 같이 최종적인 공구마모 겹침형상은 해당 선형화된 공구마모 겹침형상(W_{LO})의 분산의 역수를 취하여 계산할 수 있다. 수학식 4를 참조하여, 최종 공구마모 겹침형상은 수학식 17을 역변형하여 하기 수학식 18과 같이 주어진다.

수학식 18

$$W_O = W_{LO}^a = (W_{L1} + W_{L2} + \dots + W_{Ln})^a$$

[0095]

[0096]

여기서 a는 수학식 12의 a와 같다.

[0098]

실험예

[0099]

본 발명의 공구마모 형상 예측 방법을 검증하기 위해 추가적인 실험이 수행되었다.

[0100]

우선, 본 발명의 공구마모 형상 예측 방법에 따른 최종 마모형상과 실제 마모형상을 비교하기 위한 실험장비, 피절삭물 및 측정방법에 대해 서술하기로 한다.

[0101]

절삭 실험은 20,000 rpm의 최대 스핀들 속도와 24 m/min의 이송 속도를 갖는 3축 수직 밀링센터(HWACHEON VESTA 1000)에서 수행하였다. 공구 마모를 가속화하기 위해 모든 실험은 건조식으로 진행되었으며, 노즐을 통해 공급된 압축 공기가 절단 영역으로 분사되었다. 또한, 도구 변형의 동적 영향을 최소화하기 위해 공구의 돌출 길이를 가능한 한 짧게 유지하였으며, 다이얼 표시기를 사용하여 정확한 공작물 경사도를 얻었다.

[0102]

도 8은 실험을 위한 절삭기계와 피절삭물 설치 상태를 나타낸다. 본 실험에서는 도 9에 도시된 바와 같이 피절삭물이 수평 하향 방향으로 절삭될 때 일정한 경사면과 볼록한 윤곽면일 때의 차이점을 조사하였다. 절삭 매개 변수는 정삭 공정과 동일하게 설정되고 스핀들 속도, 이송 속도, 스텝오버 깊이 및 수평 하향 절삭에서의 축 깊이와 관련된 고정 작동 매개 변수가 설정되었다. 가변 매개 변수는 즉각적인 경사각이었다. 본 실험에서 사용된 절삭조건의 세부 사항은 표 1과 같다.

표 1

[0103]

절삭 조건	
절삭기계	VESTA 1000(3축 수직 밀링센터)
볼랜드밀	다층의 TiAlN carbide
직경(mm)	10
절삭면 수	2
피절삭물 재료	경화된 HP1 steel HRC 53-57
스핀들 속도(rpm)	6000
이송 속도(mm/min)	1200
절삭 축깊이, d_a (mm)	0.05
절삭 경로간격, p_s (mm)	0.2
경사각($^\circ$)	30-40
런아웃(μm)	<10

공구 길이(mm)	30
절삭 작업유형	하향
윤활제	압축공기 분사의 건조식

[0105] 본 실험에 사용된 피절삭물 재료는 경화된 HP1 주물 철이다. 표 2는 본 실험에서 사 된 43 HRC의 평균경도를 갖는 HP1의 화학적 조성을 나타낸다. 이 재료는 100×100×100mm 직사각형 블록 형상으로 가공되었다. 가공실험을 시작하기 전에 상기 피절삭물은 표면, 바닥 및 측면에서 페이스 밀링하여 표면 결함을 제거하고 평탄도를 확보하여 결과에 대한 편향을 방지했다. 절삭공구로 두 날 초경 볼 엔드밀(OSG-GS 시리즈)이 실험에 사용되었습니다. 볼 엔드밀은 약 2.5mm의 두께를 갖는 다층 TiAlN 막으로 코팅되었다. 절삭날의 직경은 10mm, 경사각은 30° 이고 여유각은 -10° 입니다.

표 2

[0106]

피절삭물 재료인 HP1의 화학적 조성					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.35	0.20	0.30	5.20	1.40	0.55

[0108] 공구의 플랭크 마모 측면에서 공구마모 형상은 100X 배율에서 디지털 현미경 (INSIZE)을 사용하고 가공 시험 전체에 걸쳐 이미지 처리 소프트웨어를 사용하여 측정되었다. 특정 시간 간격 후에 절삭 공구가 공구 홀더에서 제거되어 공구 마모의 형상을 관찰하였다. 일루미네이터가 디지털 현미경의 광원으로 제공되었으며, 절삭날의 이미지가 기록되고 처리되었다. 공구마모 형상은 절삭가공된 표면과 접촉 한 절삭날을 따라 플랭크 마모 측면에서 측정 할 수 있었다. 볼 엔드 밀링의 최대 플랭크 마모 기준은 약 0.1mm로 지정되었다. 또한 두 날의 마모를 각각 측정해 평균값이 공구 마모의 지표로 고려되었다.

[0109] 본 발명에 따른 공구마모형상모델의 정확성과 타당성을 확인하기 위해 상기 서술한 절삭장비, 피절삭물, 절삭면 측정장치를 통해 도 9에 도시된 바와 같이 그룹 I과 그룹 II의 두 그룹으로 실험을 수행하였다.

[0110] 그룹 I은 일정한 경사면 밀링이고 그룹 II는 불룩한 윤곽의 경사면 밀링이다. 스핀들 속도, 이송 속도, 스텝 오버 깊이 및 축 깊이와 관련된 고정 작동 매개 변수는 상술한 표 1에 제시되어 있다. 실험은 표 3 및 표 4에 기재된 바와 같이 다양한 경사각으로 수행되었다.

표 3

[0111]

그룹 I을 위한 가변 작동 매개 변수		
경사각(°)	절삭시간(min)	
	테스트 No.1	Test No.2
30	160	160
35	70	70
40	70	160

표 4

[0113]

그룹 II를 위한 가변 작동 매개 변수			
테스트 No.	변화하는 경사각(°)	절삭각 간격(°)	총 절삭시간(min)
1	35.1 ~ 39.6	0.1	150
2	33.7 ~ 40.4	0.1	219

[0115] 그러므로, 모든 관련 절삭 매개 변수를 수학식 5 내지 수학식 18에 삽입하여 공구마모 꺾침형상을 정량적으로 예측할 수 있다.

[0116] 그룹 I : 일정한 경사면 밀링 하에서 공구마모 꺾침형상

[0117] 예측된 공구마모 꺾침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 꺾침형상의 값 사이의 비교가 도 10 및 도 11에 도시되어 있다. 각 구역의 단일 공구마모 형상예측은 수학식 5 내지 수학식 14를 반복적으로 계산한 다음, 중첩 영역에서는 수학식 15 내지 수학식 18을 통해 공구마모 꺾침형상을 산출한다. 도 10 및 도 11에 도시된 바와 같이, 공구마모 값은 표면 경사각 $\delta = 40^\circ$ 에서 절삭 시간이 70분에서 160분까지 증가함에 따라 증가하며, 이는 중첩 영역에서의 공구마모 형상을 결정한다. 예측값과 실험값의 비교 결과는 절삭 시간이 일정한 경사면 밀링에서 공구마모 꺾침형상을 결정하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다. 예측된 결과는 실험 결과의 일반적인 경향과 잘 일치하며, 예상값과 실험값 사이의 최대 백분율 오차는 약 17%이다.

[0118] 그룹 II : 불록한 윤곽의 경사면 밀링 하에서 공구마모 꺾침형상

[0119] 공구마모 꺾침형상은 순간적으로 변화하는 경사각의 함수이다. 불록한 윤곽의 경사면 밀링 하에서 예측된 공구마모 꺾침형상과 실험적으로 측정된 공구마모 꺾침형상의 값 사이의 비교가 도 12 및 도 13에 도시되어 있다. 총 가공 시간은 각각의 순간적으로 변화하는 경사각으로 분배된다. 고정 절삭 매개 변수들과 다양한 순간적으로 변화하는 표면경사각에 있어서의 공구마모 꺾침형상은 상술된 모델을 사용하여 예측된다. 예측된 공구마모 꺾침형상은 실험 결과와 잘 일치하는 경향이 관찰되며, 실험 및 예측 데이터의 전반적인 경향은 공구마모 꺾침형상이 불록한 윤곽의 경사면 밀링에서는 순간적으로 변화하는 표면경사각과 절삭시간에 의해 결정된다는 것을 보여준다. 예상 값과 실험 값 사이의 최대 백분율 오차는 약 16%이다.

[0120] 본 발명은 순간적으로 변화하는 표면경사각과 중첩영역의 영향을 고려하여 새로운 공구마모 형상예측 방법을 제시한다. 확률론, 선형화 정리 및 역변형을 기초로 하여, 본 발명은 코팅된 카바이드 볼 엔드밀로 경화된 HP1 강재를 절삭하는 실험을 통해 시연되고 검증되었다. 수행된 실험을 통해, 공구 경사면이 일정한 조건에서는 공구

접촉점의 진입 위치에서 공구 마모가 시작되고 공구 접점의 출구 위치에서 최대 측면 마모 VB_{max} 가 발생하고, 중첩 영역 내에서 공구마모 꺾침형상은 즉각적인 표면경사각과 해당 절삭 시간에 의해 결정되는 것을 알 수 있었다.

[0121] 본 발명에 적용된 새로운 공구마모 형상예측 방법은 설계 엔지니어가 피절삭물의 표면품질을 높이고 공구마모로 인한 가공 오류를 보상하기 위해 중첩되거나 중첩되지 않는 영역과 관련된 공구마모 형상을 예측하는 데 바람직하다.

[0122] 이와 같이, 상술한 본 발명의 기술적 구성은 본 발명이 속하는 기술분야의 당업자가 본 발명의 그 기술적 사상이나 필수적 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

[0123] 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적인 것이 아닌 것으로서 이해되어야 하고, 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타나며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 등가 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

부호의 설명

[0124] S1 : 절삭공정에서 설정되는 다수 개의 절삭조건을 수집하는 제1단계

S2 : 다수 개의 절삭조건으로부터 공구마모형상모델을 수립하는 제2단계

S3 : 수립된 공구마모형상모델로부터 단일마모들의 형상을 예측하는 제3단계

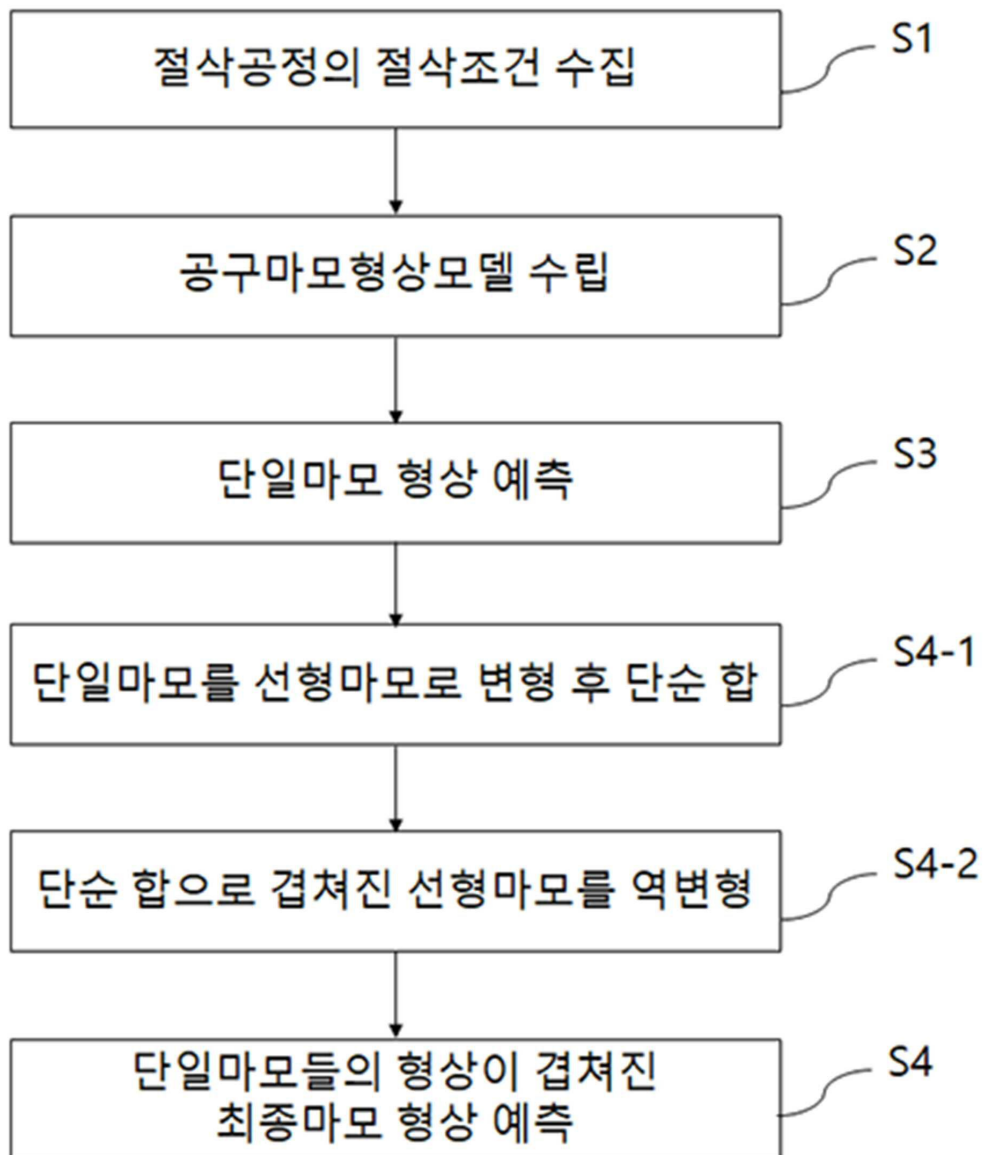
S4-1 : 예측된 단일마모들의 형상들을 시간에 대한 선형함수로 변형하여 선형마모로 변형하고 단순 합으로 겹치는 제4-1단계

S4-2 : 단순 합으로 겹쳐진 선형마모를 역변형하여 최종마모 형상을 예측하는 제4-2단계

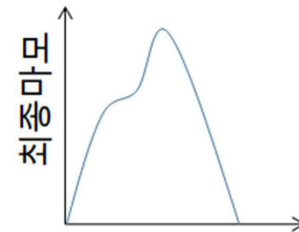
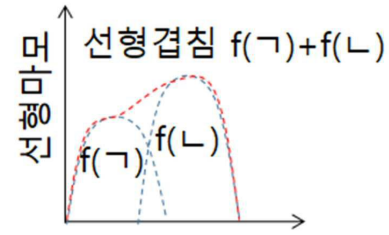
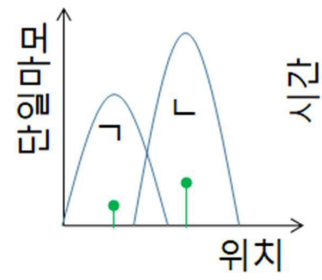
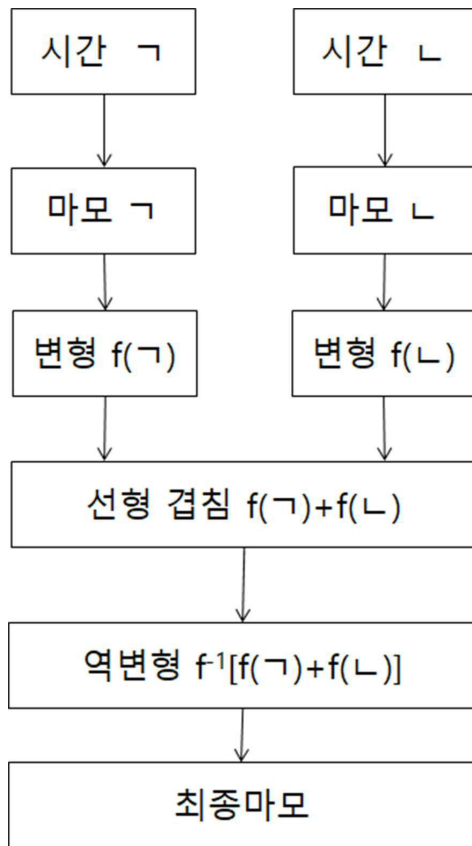
S4 : 예측된 단일마모들의 형상을 겹쳐 최종마모 형상을 예측하는 제4단계

도면

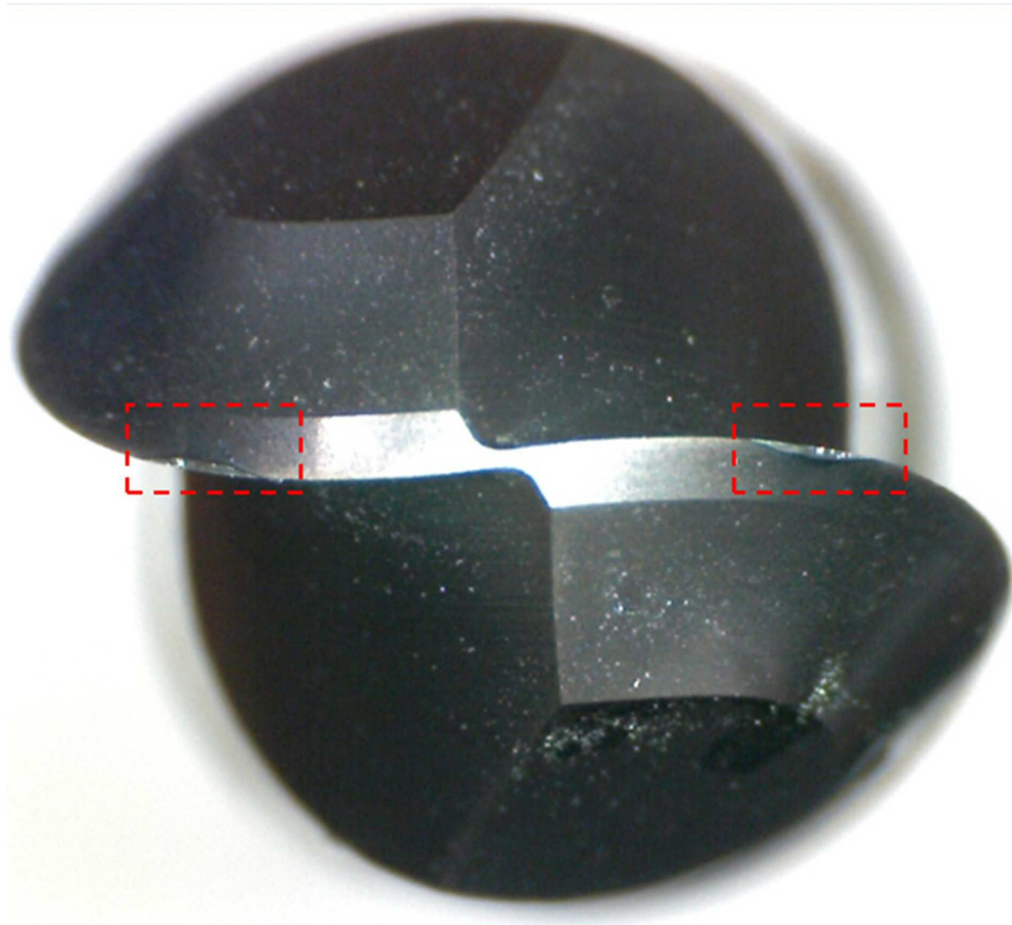
도면1



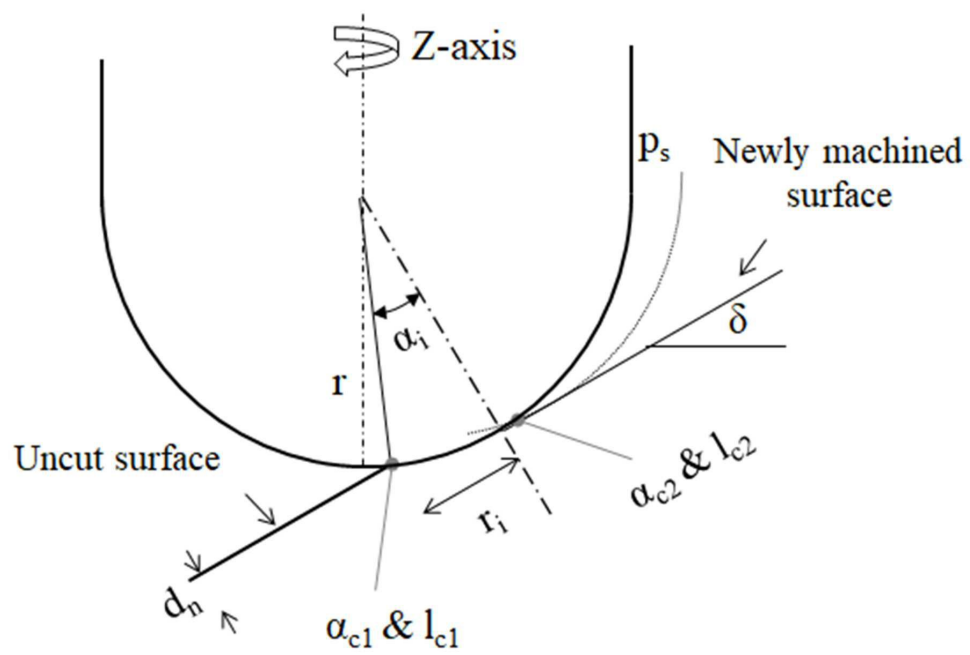
도면2



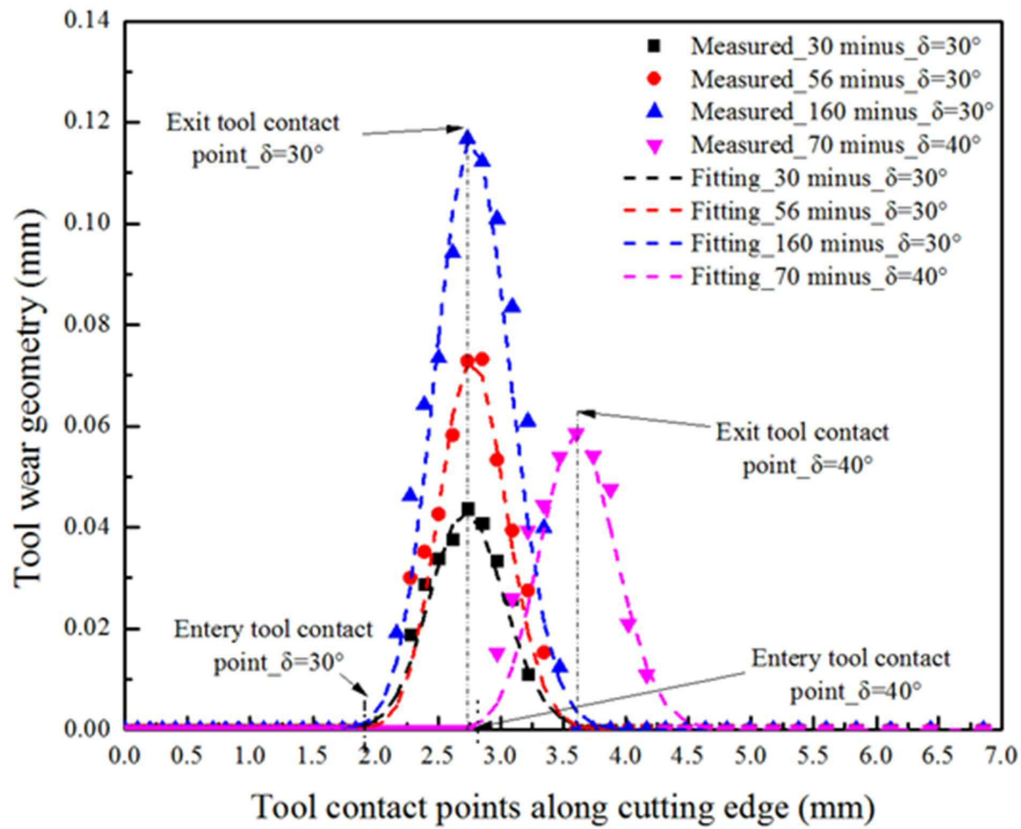
도면3



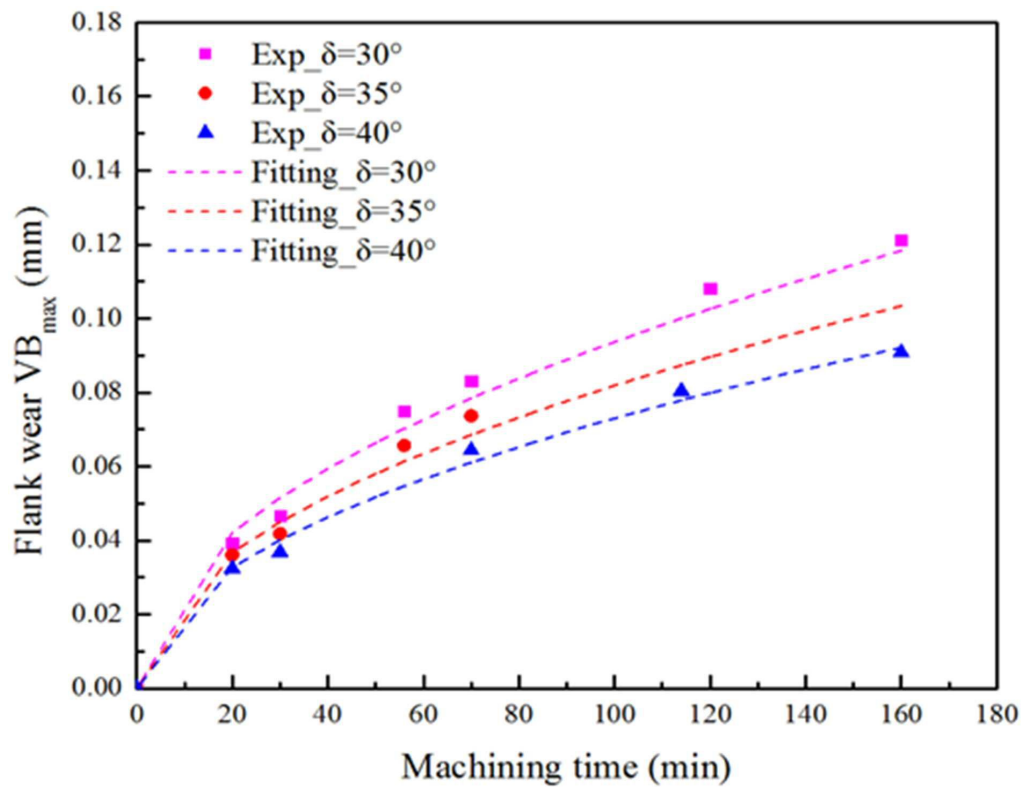
도면4



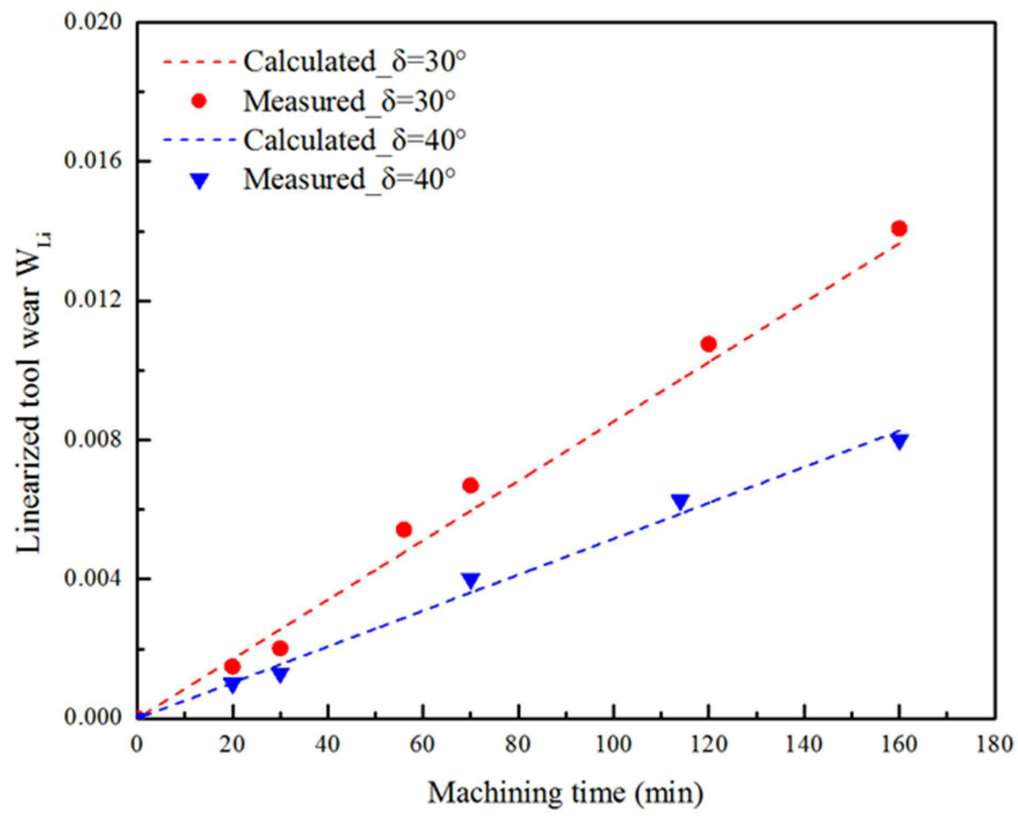
도면5



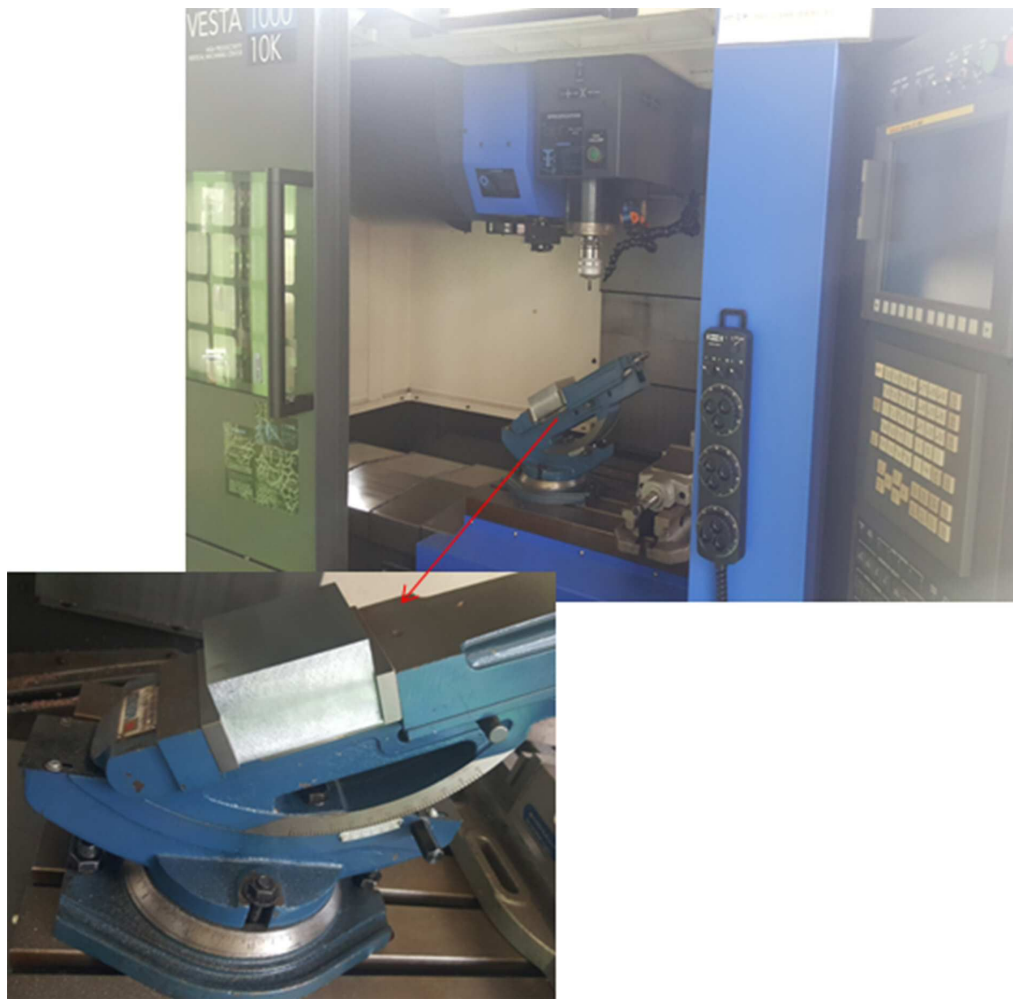
도면6



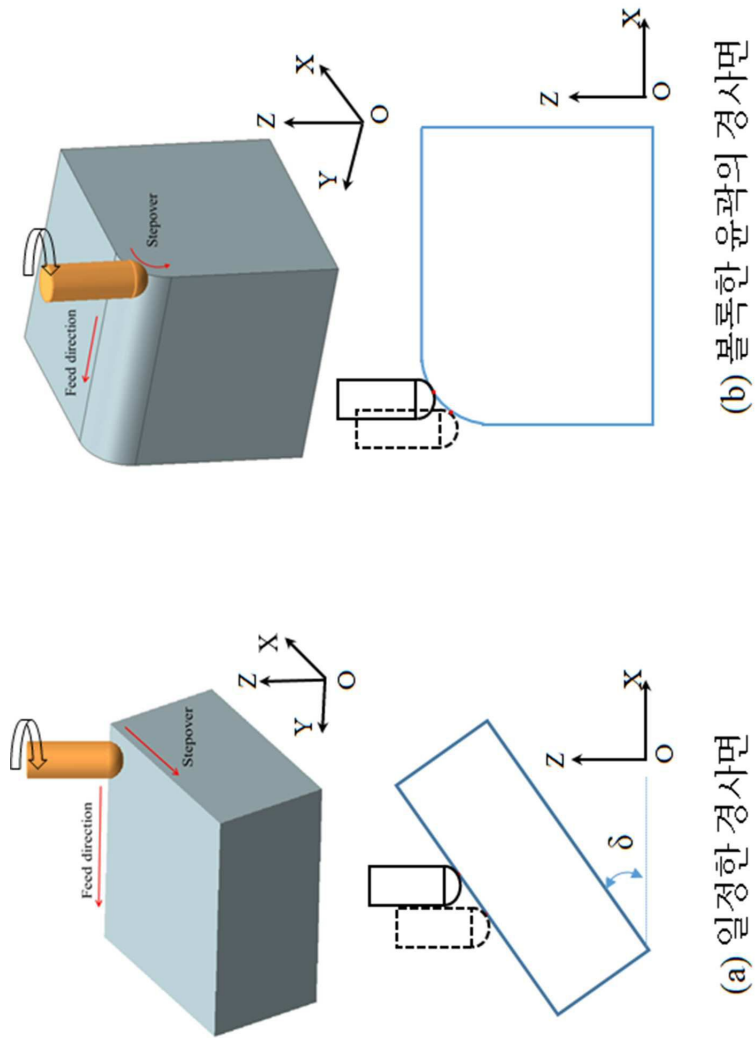
도면7



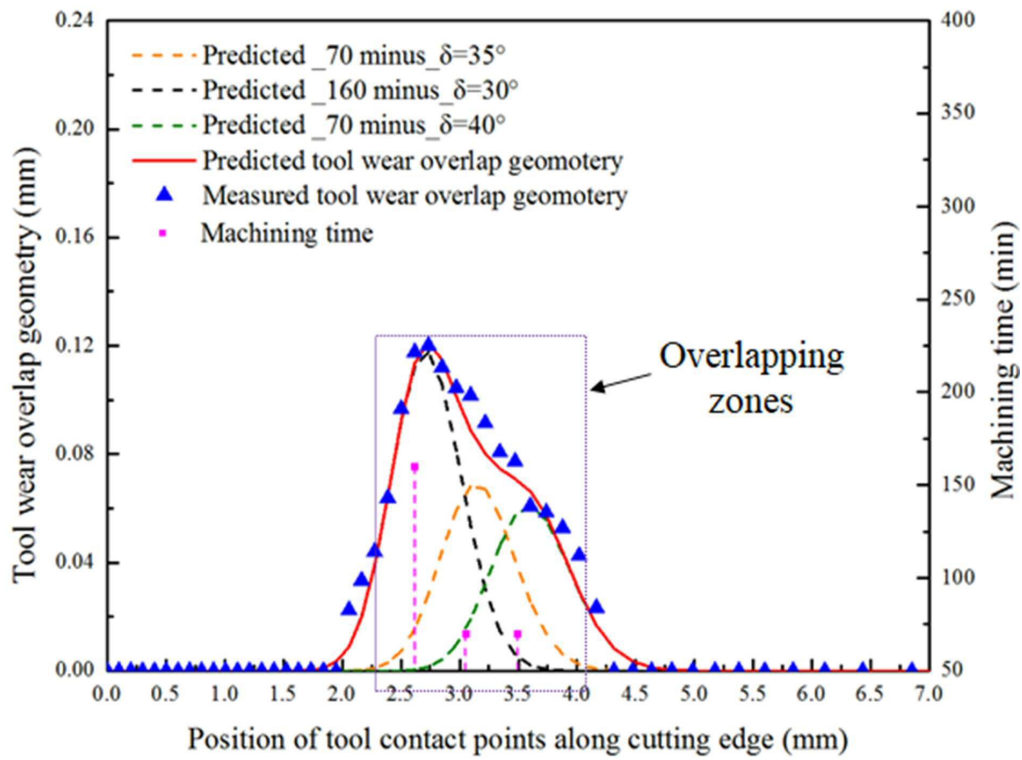
도면8



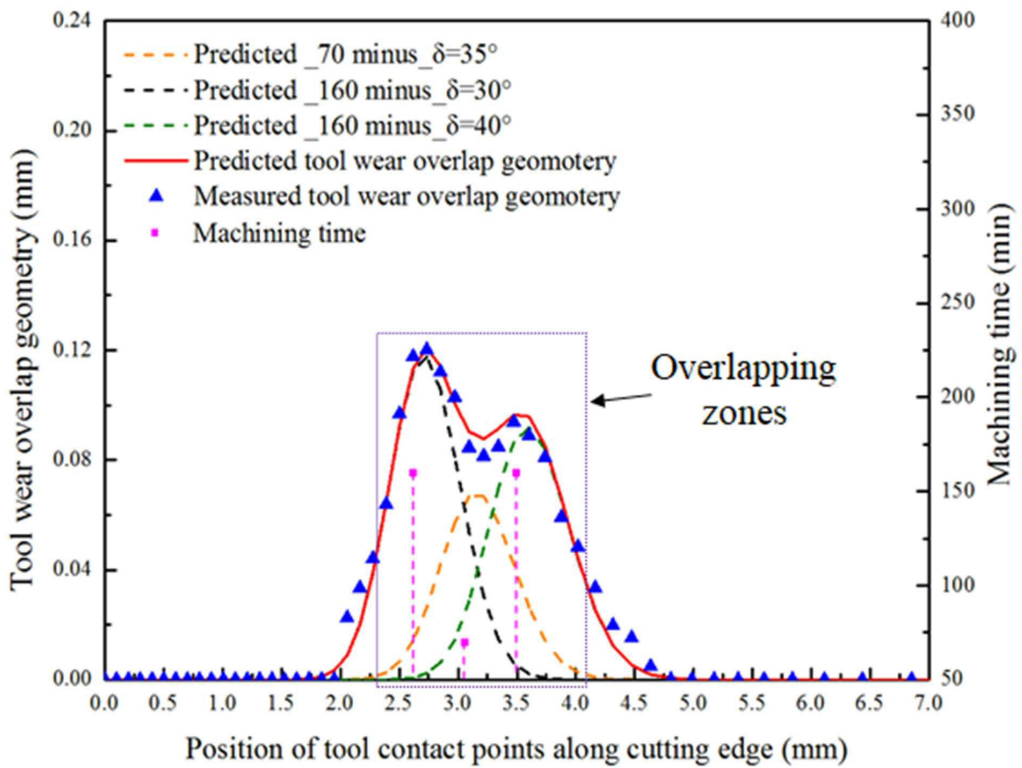
도면9



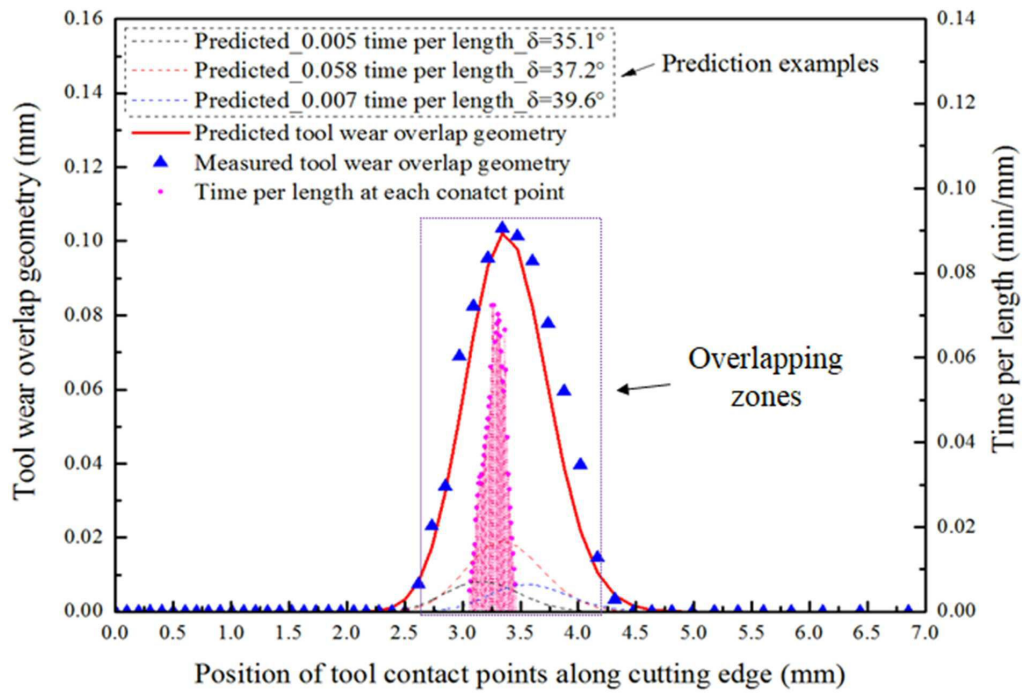
도면10



도면11



도면12



도면13

