

# 곡면가공에 있어서 공구마모예측 CAM 시스템 개발 Development of Tool Wear Prediction System in Free-form Surface Machining

\*송철원<sup>1</sup>, 강재훈<sup>2</sup>, 송준엽<sup>2</sup>, 김건희<sup>3</sup>, #아오야마 히데키<sup>1</sup>

\*C. W. Song<sup>1</sup>(song@ina.sd.keio.ac.jp), J.H. Kang<sup>2</sup>, J.Y.Song<sup>2</sup>, G. H. Kim<sup>3</sup>, #H. Aoyama<sup>1</sup>(haoyama@sd.keio.ac.jp)

<sup>1</sup>Keio University, <sup>2</sup>한국기계연구원, <sup>3</sup>전주대학교

Key words : CAM system, Tool wear, Ball end mill

## 1. 서론

종래의 CAM 시스템은 CAD 를 통한 설계를 바탕으로 적절한 공구를 지정하여 절삭가공을 수행한다. 특히 금형, 금속부품의 곡면가공에는 선단부분이 곡면으로 이루어져있는 볼엔드밀공구를 사용하여 가공을 수행한다. 볼엔드밀에 의해 가공공정은 절삭위치가 가공 형상과 가공경로에 의존하는 것과 동시에, 각각의 절삭위치에 있어서의 마모 속도가 절삭 시간·절삭 조건에 대해서 선형을 이루지 않고 있다. 종래의 공구교환은, 절삭 시간에 근거해 공구교환시기를 결정하고 있다. 현재까지의 방법은, 동일 공구에 의한 동일 제품의 가공에 대해 유효하다. 그러나, 금형, 금속부품이 가공은 단품 생산으로 행해지는 것이 많고 또한, 곡면 가공의 경우가 직선가공에 비하여 대부분을 차지 한다. 가공 시간에 근거한 공구 교환 관리는, 유용한 방법이라고 할 수 없다. 이러한 원인으로 볼엔드밀 가공에 있어서의 공구마모분포의 예측하면, 공구 마모에 의한 가공 오차를 고려한 공구 경로 생성에 의해 고정밀의 가공을 실현할 수 있는 것과 동시에, 최적의 공구 교환시기를 결정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, 실험에 의해 대표적인 절삭 조건에 있어서의 볼엔드밀 공구의 마모 형태를 분명히 파악하고, 볼엔드밀의 공구마모 예측식을 도출한다. 또한 피삭재 형상 데이터와 NC 데이터로부터 볼엔드밀 절삭날의 각 위치에 있어서의 실제 가공 조건을 파악하여, 각각의 가공 조건에 대한 실제 절삭 거리를 산출하는 절삭 조건 해석 모듈을 구축하고, 도출된 실제 가공 조건과 실제 절삭 거리를 기본으로한 공구마모 예측식으로 절삭날 각 위치에 대한 공구마모를 추정하는 시스템을 개발하고 평가를 실시한다. 본연구에서는 자유곡면가공에 있어서의 가공경로에 따른 공구마모 예측시스템을 구축하고 시스템의 유용성을 검증한다.

## 2. 볼엔드밀 마모특성 및 마모예측식

볼엔드밀 절삭날의 공구마모를 예측하기 위해서, 마모 형태를 실험적으로 파악하기 위하여, 볼엔드밀 마모형태실험을 실시하였다.

### 2.1 볼엔드밀 마모특성실험

Table 1.의 절삭 조건으로 절삭실험을 실시하여, 각 절삭날 위치에 있어서의 실제절삭거리와 플랭크마모의 관계를 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 절삭 공구는 반경 r 이 5.0 mm 와 7.5 mm 의 2 매 칼날의 고속도 공구강(HSS) 볼

엔드밀을 이용해 공작물은 기계 구조용 탄소강 S55C 를 이용했다.공작기계는 마키노(Makino)정밀 기계의 머시닝센터를 이용했다. 회전수, 이송속도, 피드, 절삭 유제, 절삭 방향은, 표 1 에 나타내는 조건으로 했다.

### 2.2 볼엔드밀마모특성 및 볼엔드밀마모예측식

마모 형태의 실험 결과를 정리했다.

- 플랭크마모폭은, 절삭 거리에 비례 혹은 실절삭 거리 ( $L_R$ )의 2승에 비례한다
- 초기 마모는 회전수( $N$ )나 조각칼날 위치에 의하지 않고 거의 일정하고 유지된다.
- 절삭날의 공구마모 형태 변화점 P 점이 존재하고, P 점보다 반경이 작은 절삭날 위치에서 공구마모 속도는 반경의 증가와 함께 작아지며, P 점보다 반경이 큰 절삭날 위치에는, 공구마모 속도는 반경의 증가와 함께 커진다.
- 플랭크마모폭은 각 절삭날의 위치에서, P 점으로부터의 거리의 2승에 비례하여 커진다.
- P 점의 위치( $r_p$ )는 회전수에 의존한다
- 절삭날당 이송량( $f$ )의 증가와 함께 공구마모 속도는 증가한다.
- 공구지름( $R_0$ )의 증가와 함께, P 점 부근의 공구마모 속도는 크게 저하한다.

이상의 7 항목으로 HSS 공구와 S55C 의 공작물에 의한 실험 결과로 볼 수 있던 플랭크마모 진행의 형태를 열거하였고, 위 7 항목을 기초로 하여 최소자승법을 이용하여 이하의 식(1)을 도출하였다.

$$V_B = (-0.335 R_0 + 2.67) \times (11.88 f_z - 0.188) \times (9.103 \times 10^{-10} N + 9.95 \times 10^{-6}) \times \left\{ r + 7.68 \times 10^{-4} N - 4.65 \right\}^2 + 1 \times (L_R + 2.87)^2 + 0.0249 \quad (1)$$

[ $V_B$ :Flank Wear,  $N$ :RPM,  $f_z$ :Real feedrate per tooth,  $L_R$ :Real Cutting Length,  $R_0$ :Tool Diameter,  $r$ :Cutter Radius]

공구마모 형태의 기초 실험 결과에 최소 자승법을 이용하여 전체를 1 차와 2 차로 근사를 실시한 결과, 1 차 근사보다 2 차 근사가 양호한 일치를 보였다. 플랭크마모폭  $V_B$  은, 실제절삭 거리  $L_R$  에 비례 혹은  $L_R$  의 2 승에 비례했다. 위 결과로부터 실제 절삭 거리에 함수를 표현했다.

마모 예측식에서, 플랭크마모폭( $V_B$ )에는, 회전수( $N$ ), 마모 예측 파라미터에 실제절삭 거리, 날당 이송량의 기본적인 가공 조건을 이용한다.

## 3. 공구마모예측시스템

볼엔드밀 절삭날의 마모분포를 추정하는 시스템의 개발에 있어서, Fig1 과 같은 구조의 마모시스템을 설계하였다.

Fig1.은, NC 시뮬레이터에 대한 순서도를 나타내고 있다. 입력된 공구지름 정보를 토대로 하여 절삭날 분할 모델을 구축하고, NC 데이터의 분석을 통하여 1 회전당의 이송량 및 가공경로데이터에 근거해 절삭날 분할 모델의 1 회전당 이송시켜, 절삭날 분할 모델의 각 절삭날과공작물 Z-map 모델과의 간섭 상황을 분석한다. 또한, 공작물 Z-map

Table 1. Cutting Condition of Tool Wear

Tool Material	High Speed Steel Tool
Workpiece Material	S55C
Tool Diameter	10.0, 15.0mm
RPM	1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500rpm
Feedrate per tooth	0.05, 0.10, 0.15 mm/tooth
Peak Feed	1.0mm/track
Number of Cutter	2 Cutter
Coolant	Dry
Cutting Direction	Down Cut

모델로부터 1회전당의 공구와 공작물의 간섭 영역을 파악함과 동시에, 각 절삭날의 실질삭거리  $L_R$ 와 실질삭날당 이송량  $f_z$ 를 도출한다. 1회전당의 절삭경로 입력된 NC 데이터에 대해서 가공시작시점에서 가공종료시점까지의 절삭날 분할 모델의 각 절삭날에 대해서, 회전수  $N$ 와 실질삭날당 이송량  $f_z$ 에 따른 실질삭거리  $L_R$ 를 산출한다. 전 가공경로에 있어서의 각 절삭날의 회전수  $N$ , 실질삭날당 이송량  $f_z$ , 실질삭거리  $L_R$ , 공구지름  $R_0$ , 절삭날모델의 회전반경  $r$ 을 공구 마모예측식(1)에 입력하여 각 절삭날모델의 마모량을 추정한다.

공구 1회전시 실질삭거리  $L_R$ , 실질삭날당 이송량  $f_z$ 의 산출 알고리즘을 단순하게 하기 위해서, 공작물을 Z-map 모델로 구축하고, 볼 엔드 밀의 절삭날을 복수의 플랫폼엔드밀의 적층 구조로 모델링하였다. Fig2(a)은, 볼엔드밀 절삭날 모델을 나타내고 있다. Fig2(b)는, 구축한 공구마모예측시스템의 실행 화면을 나타내고 있다.

#### 4. 공구마모예측시스템의 평가

곡면 가공에 있어서의 볼엔드밀 마모예측시스템의 유용성에 대해 검증하기 위하여, 곡면가공에 대한 평가 실험을 실시했다. 평가 실험에서는, 공구 직경 10 mm의 HSS 볼 엔드 밀을 이용하고, Fig.3(a)에 나타내는 공작물(기계 구조용 탄소강 S55C)에 대해서 주사선 가공을 실시하여, Fig.3(b)에 나타내는 형상이 되도록 절삭을 실시하여가공이 완료된 시점의 플랭크마모를 측정하였다. 절삭의 조건은, 회전수 2000 rpm, 전송 속도 0.10mm/tooth, 축방향 절삭 깊이량 5mm, 피크 피드 1mm, 다운 컷, 건식으로 했다. Fig.4은, 곡면 평가실험의 마모 측정 결과와 마모예측시스템을 이용하여 산출한 결과를 비교했다. 위 실험의 결과로부터 공구의 중심부만 실제의 마모가 격렬하게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 그 원인은 공구마모예측식의 도출에 사용한 실험 결과는 평행가공을 실시한 결과를 토대로 하여 마모예측식을 도출하였으나, 곡면평가 실험에 있어서는 공구중심부분은 엔드밀가공방식과 상의한 차이를 보이는 드릴가공과 같은 가공이 실시되었다. 이러한 원인으로 인하여 중심부분은 곡면평가실험의 결과와 마모예측시스템의 산출결과가 많이 차이를 나타내고 있음을 확인하였다. 공구중심부분을 제외한 그외의 공구회전반경부분에서는 최대 17%(회전반경 5mm 부분)의 오차를 보였다. 이러한 결과로부터, 마모예측시스템의 유효성을 확인하였다.

#### 5. 결론

본연구에서는, 기초 실험 마모 데이터를 기초로 하여 도출한 볼 엔드 밀 플랭크마모 예측식을 이용하여 Z-map 모델을 이용한 공구마모예측시스템을 개발하였다. 도출한 예측식에 대한 평가를 실시하였다. 볼엔드밀 마모 예측식의 유용성에 대해 검증했다. 향후, 절삭날 전체에 대한 고정밀도 예측이 가능한 시스템의 개발을 목표로 한다.

#### 참고문헌

1. 송철원, 강재훈, 김건희, H.AOYAMA, "곡면가공시 볼엔드밀 마모예측에 관한 연구", 한국정밀공학회 2008년도 추계학술대회논문집 pp593-594., 2008
2. Jin KAYAMA, Tsukasa Kondo, Shunichi KANEKO, Satoru IGARASHI, "Wear Estimation of Ball End Mill and Its Application to Precision Machining of Curved Surface", Journal of JSPE, Vol67, No.9p1427-1431, 2001
3. G.Yucesan, Y.altintas, "Mechanics of ball end milling process", ASME Manufacturing Science and Engineering, Vol64, pp543-551. 1993

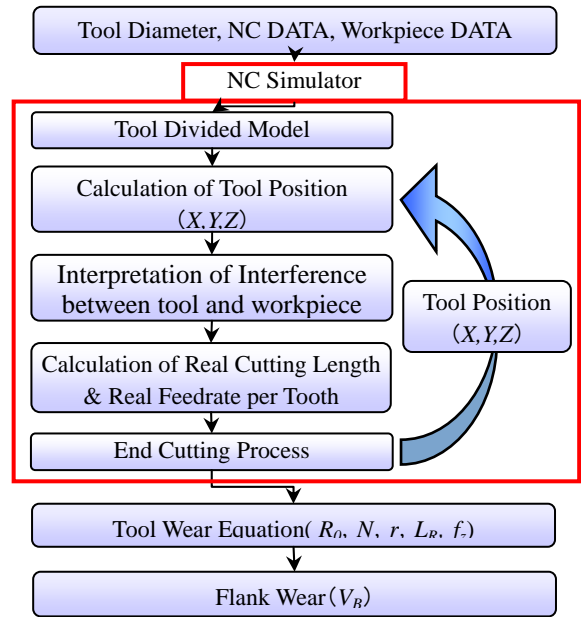
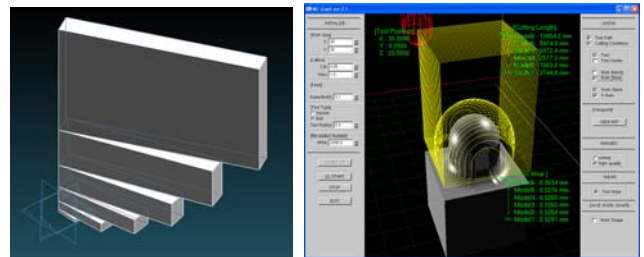
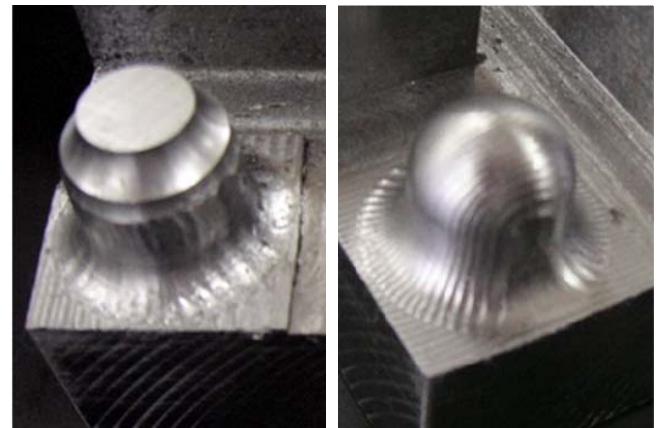


Figure1. Flow Chart of NC Simulator



(a) Tool Divided Model (b) Execution Window of System  
Figure2. Tool Wear Prediction System



(a) Initial Shapes (b) Work Shapes  
Figure3. Shapes of Work Materials

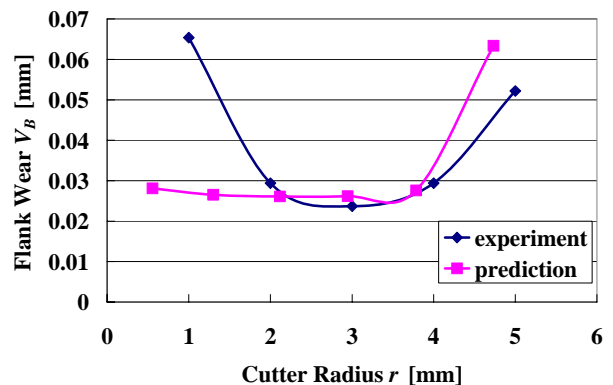


Figure4. Comparison of Experimental values and Prediction values