

# 實加工型 CAM 시스템 연구: 가공형상의 예측 및 실험 검증

김형우(포항공대 대학원), 서석환, 신창호(포항공대)

## A Study on the Virtual Machining CAM System: Prediction and Experimental Verification of Machined Surface

H.W. KIM (Graduate School, POSTECH), S.H. SUH , C.H. SHIN (POSTECH)

### ABSTRACT

For geometric accuracy in the net shape machining, the problem of tool deflection should be resolved in some fashion. In particular, this is crucial in finish cut operation where slim tools are used. The purpose of this paper is to verify the validity and effectiveness of the prediction model of the machined surface. Experimental results are presented for the cut of steel material with HSS endmill of diameter 6mm on machining center. The results shows that 1) the machining error due to tool deflection is serious even in the low cutting load, 2) by using the mechanistic simulation model with experimental coefficients, the machining error was predicted with maximum prediction error of 10% which was significantly reduced to the desired level by the path modification method.

**Key Words :** Virtual CAM System(實加工型 CAM 시스템), Surface Prediction(표면 예측), Path Compensation(경로 보정), Net Shape Machining(정형 가공), Tool Deflection(공구 치감), Flat End Mill(플랫엔드밀)

### I. 서 론

수치제어공작기계는 컴퓨터로 제어되는 수치제어장치가 탑재된 대표적 산업기계로 현대산업에 있어서 가공의 핵심 장비이다. 현재의 수치제어기는 사전에 계획된 NC 머신의 동작을 수치정보로 받아 이를 하드웨어 동작으로 구현하는 트래킹 기능에 국한되어 있으며, 온라인 모니터링 및 보정기능이 취약하다. 반면에 현재 개발된 대부분의 CAD/CAM 시스템은 파트의 설계에서 가공프로세스에 이르는 다양한 기능을 제공하고 있지만, 공구 경로의 생성 및 검증에 관한 기하학적 연산에 시우시고 있다. 이는 공구 경로 및 절삭조건의 산출에 있어서 온라인 역학(절삭력, 공구 치감, 열변형, 기계오차 등)이 고려되지 않고 있음을 뜻하며, 이와 같은 방식으로 생성된 공구 경로 및 시뮬레이션 결과는 온라인 외란(on-line disturbance) 및 오자요인으로 인하여 실제와의 유리를 피할 수 없다. 온라인 역학의 감안은 기하학적 정밀도 뿐만 아니라, 절삭력을 하용 범위안에 유지하면서 소재제거율과 같은 수행도 지표를 극대화하는 최적 절삭을 위해서도 필수적이다. 본 연구에서는 온라인 역학 중에서 오프라인상에

서 지금까지 부분적으로 수행되어온 이론적 연구 [1-2]와 절삭가공분야를 중심으로 연구, 실험했다. 특히, 오프라인상에서: 가) 가상의 상황에서 가공상태를 예측해 줄 수 있고, 나) 예지된 에러요인을 보정해 주는 보정기능과 이를 통한 다) 정밀도 향상을 가능하게 할 수 있도록 하는데 있다.

### 2. 가공형상 예측모델

기하학적 정밀도를 저해하는 가장 큰 요인으로 지목되고 있는 공구 치감 현상을 예측하는 모델은 다음과 같은 순서로 예측 된다. 구체적으로, 본 연구에서 계획하는 실가공형 CAM 시스템은: 가) 절삭력 예측, 나) 공구 치감량 및 가공면 예측, 다) 가공오자의 보상의 순서이다.

절삭력 모델은 순간 절삭력 모델인 Martellotti [3-4]와 Klein[5] 모델을 사용하였다. 매 순간에 공구에 걸리는 절삭력의 합은 다음의 식에 의해서 주어진다.

$$t_c = f \sin \alpha \quad (1)$$

여기에서  $t_c$ 는 순간의 침 두께,  $f$ 는 feed (mm/tooth),  $\alpha$ 는 공구날의 각위치이다.

접선방향절삭력과 중심방향절삭력은 각각 다음과 같다.

$$dF_T = K_T D_z t_c, \quad dF_R = K_R dF_T \quad (2)$$

여기에서  $K_T$ ,  $K_R$ 은 절삭력 모델에서 feed rate, radial depth of cut(RDC), axial depth of cut(ADC)에 의해서 결정되는 계수이다. 위의 세 조건의 조합으로 여러 조건에 대해서 많은 실험을 수행해서 절삭력 예측 모델을 수립하였다.

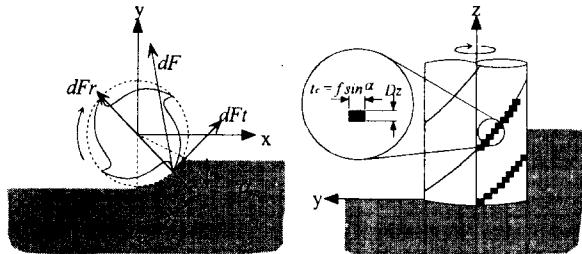


그림 1. 절삭력 예측 모델

공구처짐량 및 가공면 예측은 외팔보 모델을 사용하였으며 식은 다음과 같다.

$$\delta(u) = \frac{1}{6EI} \sum_{i=1}^{N_z} F_i [c u - l_i]^3 - u^3 + 3u^2 l_i \quad (3)$$

여기에서 적용된 힘  $F_i$ 는 각각의 공구 디스크에 걸리는 분포 하중을 사용하였다. E는 공구의 영률, I는 공구 절단면 2차 모우멘트를 의미한다.

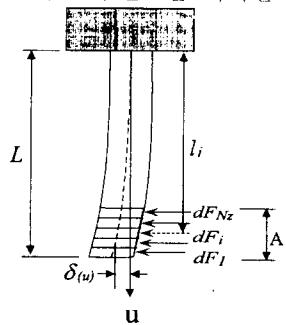


그림 2. 공구처짐량 모델

EI값에 대해서는 다음 파트인 실험검증에서 자세히 설명하겠다.

### 3. 실험 장치 및 실험 조건

위의 실험은 3축 수직형 머시닝 센터에서 수행하였으며, 고속도강의 헬릭스 각도가 30도이고 4날이며 공구경이 6mm이고 길이는 35mm인 날이 긴 풀

렛엔드밀 공구를 사용하고 공작물의 재질은 steel인 SS41을 사용하였다. 여기에서 날이 긴 공구를 사용한 것은 실험 시에 발생 할 수 있는 외란의 영향 중에서 절삭력에 의한 영향이 공구의 치짐량에 많이 반영되도록 하기 위함이다. 절삭조건은 실험계획법에 의해서 표 1과 같이 선정하였다.

실험 순서	RDC	ADC	Feed rate
1	0.5mm	2.0mm	0.005mm/tooth
2	0.5mm	2.0mm	0.01mm/tooth
3	0.5mm	2.0mm	0.02mm/tooth
4	0.5mm	4.0mm	0.005mm/tooth
5	0.5mm	4.0mm	0.01mm/tooth
6	0.5mm	4.0mm	0.02mm/tooth
7	0.5mm	6.0mm	0.005mm/tooth
8	0.5mm	6.0mm	0.01mm/tooth
9	0.5mm	6.0mm	0.02mm/tooth
10	1.0mm	2.0mm	0.005mm/tooth
11	1.0mm	2.0mm	0.01mm/tooth
12	1.0mm	2.0mm	0.02mm/tooth
13	1.0mm	4.0mm	0.005mm/tooth
14	1.0mm	4.0mm	0.01mm/tooth
15	1.0mm	4.0mm	0.02mm/tooth
16	1.0mm	6.0mm	0.005mm/tooth
17	1.0mm	6.0mm	0.01mm/tooth
18	1.0mm	6.0mm	0.02mm/tooth
19	2.0mm	2.0mm	0.005mm/tooth
20	2.0mm	2.0mm	0.01mm/tooth
21	2.0mm	2.0mm	0.02mm/tooth
22	2.0mm	4.0mm	0.005mm/tooth
23	2.0mm	4.0mm	0.01mm/tooth
24	2.0mm	4.0mm	0.02mm/tooth
25	2.0mm	6.0mm	0.005mm/tooth
26	2.0mm	6.0mm	0.01mm/tooth
27	2.0mm	6.0mm	0.02mm/tooth

표 1. 예측모델 수립 실험 조건

스핀들 속도는 1250 rev/min이였다. 예측의 정확성을 확인하기 위해서 표 1의 조건이외에 다른 조건에 대해서도 실험을 하여 가공형상 예측모델에 대한 정확성에 대해서 비교, 분석하였다. 절삭력을 동력계(Kistler model 9257B), 앰프, 테일 래코드, A/D 커버터를 이용하여 1KHz로 측정, 분석하였다.

#### 4. 실험 검증

절삭실험시에 공구 setting 후 Indicator로 공구 run out을 측정 후 공구의 run out이 적은 상태(3um이내)에서 실험을 수행하여 모델에 들어갈 조건에 대한 절삭력 data를 얻어서 각 조건에 대해서 평균값을 구하고, 구한 평균값에서 각 조건에 대한  $K_T, K_R$ 을 구한 후에 3가지 조건에 대해서 regression을 시켜 일반화 시킨 가공형상 예측모델의 첫번째 모듈인 절삭력 모델을 세운다.

실험시에 공구처짐량의 측정은 절삭후에 절단면의 여러점을 온미시닝상에서 터치 프로11로(반경 0.5mm) 측정하는 방식과 3차원 좌표 측정기(CMM)를 이용한 2가지 방식으로 측정하였다.

공구의 EI값 산정에 있어서 수식모델을 이용하는 것은 앤드밀의 기하학적 구조가 실린더 형상이 아니기 때문에 부적합 하다고 판정되었으며[2], 따라서 본 연구에서는 실험에 근거한 다음의 2가지 방식을 시도하였다. 첫번째 방법은 실험(UTM 장비)을 통해서 공구의 EI 측정하였다. 이 방법은 실제 의미의 EI값이다. 그러나, 이 방법에 의해 측정된 EI값으로 가공형상 예측모델을 세울 때는 실제와 예측치의 많은 차이를 보이는 것을 실험으로 확인하였기 때문에 두번째 방법을 사용하였다. 이 방법은 측정된 공구처짐량에서 역으로 EI값 계산하여 각 조건에 대해서 나온 EI값을 multiple regression modeling하여 가공형상 예측모델을 세웠다.

regression시에  $R^2$ 를 최대값으로 갖는 model을 기준으로 삼고 regression modeling을 했다. 통계 프로그램은 Statgraphics를 사용했다. 여기에서 사용된 EI값은 실제 의미의 EI값이 아니고 동역학적인 요소까지 포함하는 요소인  $EI'$ 으로 정의해서 사용하였다.

$$R^2 = 0.9420$$

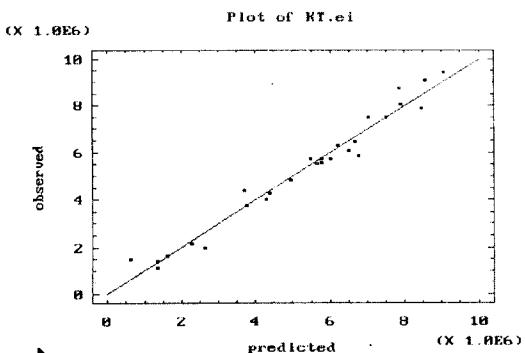


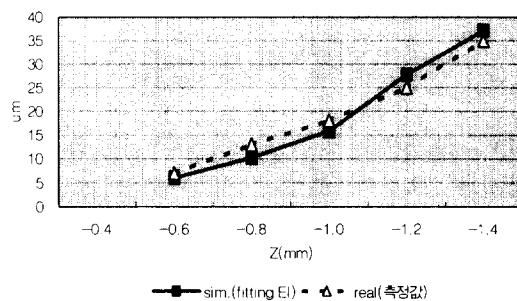
그림 3.  $EI'$  multiple regression

공구의  $EI'$ 을 분석하여 보면, feed rate의 영향에 대해서는 모든 조건에서 feed rate가 클수록  $EI'$  값

이 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 같은 절삭력 이더라도 feed rate가 클수록 공구가 더 많이 처지는 것을 의미한다. 이런 현상은 공구의 처짐에 절삭력 뿐만 아니라, 다른 동역학적인 요인의 영향도 작용하였다 생각되며, 앞으로 이런 현상에 대한 연구가 필요하다. RDC, ADC에 대해서는 큰 경향은 없으나, 일반적으로 조건이 황삭에 가까울수록 다른 요인의 영향으로 공구의  $EI'$  값이 적어짐을 알 수 있었다.

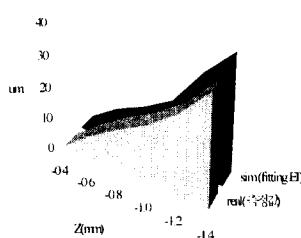
이런 절차로 가공형상 예측모델을 세워 모델에 참가하지 않았던 중간조건에 대해서도 실험을 통해 검증하는 방법으로 진행하였다. 실제 가공형상과 예측된 가공형상사이에 오차는 그 조건에서의 공구의 처짐량의 10%이내로 드는 것을 확인 할 수 있었고 실제 이 시스템을 사용시에도 10%이내의 오차를 감안하고 사용될 수 있다.

Deflection



(a) Top view

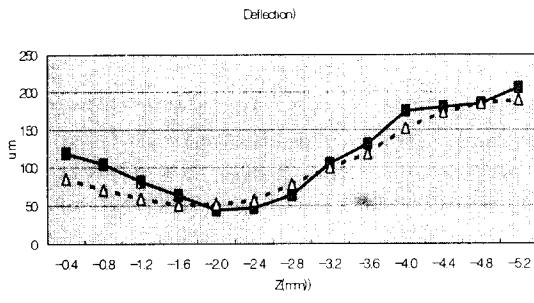
Deflection



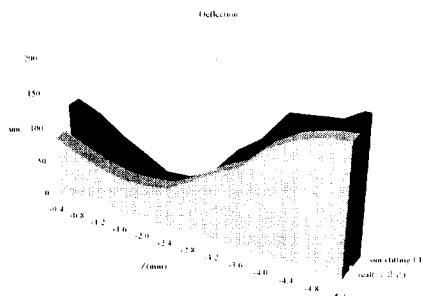
(b) ISO view

그림 4. 실제가공형상과 예측가공형상 비교(1)

그림 4는 한 예를 보이는 것으로 절삭조건은 RDC 1.0mm, ADC 2.0mm, feed rate 0.005mm/tooth에 대한 것으로 공구의 최대 처짐량은 실제치가 35um인 것에 대해 실제치와 예측치의 최대오차는 35um의 8%인 2.8um이다.



(a) Top view



(b) ISO view

그림 5. 실제가공형상과 예측가공형상 비교(2)

그림 5는 또 다른 예를 보이는 것으로 절삭조건은 RDC 1.0mm, ADC 6.0mm, feed rate 0.005mm/tooth이며 이 경우에도 오차가 크지 않음을 알 수 있고, Z축에 대해서 단면의 모양이 일반적으로 생각하는 모양이 아닌 특이한 모양도 정확하게 예측이 된다.

위와 같이 정확한 가공형상 예측모델에서 정확한 예측의 결과를 바탕으로 가공 오자의 보상은 다음의 식을 이용해서 보상해 주어야 할 보상값을 계산할 수 있었다.

$$E(W, C) = \delta_y [W + C] - C \leq T \quad (4)$$

$E(W, C)$ 는 보상후의 가공 오자이고,  $\delta_y$ 는 Y축 방향으로의 공구의 치짐량이며,  $C$ 는 보상하는 값이고  $T$ (tolerance)는 공차이다.  $E(W, C)$  값인 보상후의 가공 오자가 공차의 범위 안에 모든 점에서의 오자가 있을 때까지 보상을 계속해 주는 방법을 사용하였다.

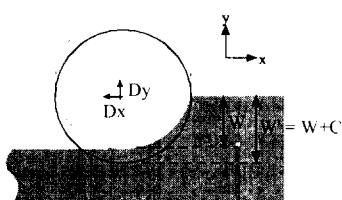


그림 6. 1 차원 형상에 대한 보상

그림 6은 1차원 형상에 대한 알고리즘의 개념을 보여주고 있다. 1차원 보상을 통해서 각 공구의 경로를 segment(절삭조건이 일정한 경로 segment)로 잘라서 각 segment에 대해서 보상 해 줌으로써 일반적인 경로에 대해서도 보상이 가능하다. 경로보상에 관한 세부적인 알고리즘은 참고문헌[1-2]을 참조를 바라며, 단지 본 연구에서는 아직 보상알고리즘의 실험검증은 안된 상태이다.

## 5. 결론 및 추후 과제

본 연구에서는 가공형상 예측 모델에 대한 이론 연구 및 프로토타입 시스템 구축과 구축된 시스템의 실제 절삭실험을 통한 검증을 통한 재반이론 및 시스템의 타당성을 연구하였다. 절삭시 정삭조건에 있어서는 제시한 이론 및 구축된 시스템이 최대 공구 치짐량의 10%이내의 오차범위내에서 예측 해줄 수 있다. 그러나, 조건이 황삭에 가까워질수록 잘 맞지 않는 것을 알 수 있었다. 실제로 가공시에 마지막 형상에 관계되는 정삭시에 본 연구를 적용시켜 한 번의 정삭 가공시에 공차범위내로 형상을 가공 함으로써 후처리가공을 없애거나, 크게 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

앞으로 정확하게 모든 조건에 대해서 가공형상을 예측하기 위해서는 본 연구에서 고려한 절삭력 뿐만 아니라, 다른 외란의 영향까지 모두 반영할 수 있는 연구가 진행 되어야 할 것이다. 또한 앞에서 제시한 일반적인 경로에 대한 보상에 대한 실험검증이 필요하며, 이를 통하여 실제 가공을 예측하고 보상 할 수 있는 시스템, 이른바 實加工型 CAM System을 구축 할 계획이다.

## 참고문헌

- [1] S. H. Suh, J. H. Cho, J. Y. Hascoet, "Incorporation of tool deflection in tool path computation: Simulation and analysis," *SME J. of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 3, 1996.
- [2] J. H. Cho, S. H. Suh "Experimental verification for path modification scheme toward net shape machining," *Pacific Conference on Manufacturing*, Vol. 2, 1996, pp.31-36
- [3] M. Martellotti, "An analysis of the milling process," *Trans. ASME*, Vol. 63, Nov. 1941.
- [4] M. Martellotti, "An analysis of the end milling process, Part II - down milling," *Trans. ASME*, Vol. 67, May 1945.
- [5] W. Kline, R. DeVor, and J. Lindberg, "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts," *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, 1982, pp. 7-22.