

공구 궤적 재구성에 의한 밀링 가공 오차의 보상에 관한 연구

장 이브 하스퀘트*, 필립 데팡세*, 서 태 일*

A Study on the Compensation of Milling Errors by Regenerating of Tool Trajectory

Jean-Yves Hascoët*, Philippe Dépincé*, Tae-il Seo*

ABSTRACT

In this paper we present our research dealing with the problem of tool deflection during the milling. We try to compensate the errors by considering a new tool trajectory. In order to determine the compensated tool trajectory, the problem is divided in three steps : cutting forces model, tool deflection model and trajectory compensation. Starting from experimental data, we determine a cutting forces model, which allows us to anticipate the tool deflection along one nominal path. In order to determine the compensated tool trajectory, we propose in this paper a method of path compensation, called "mirror method". This method of tool path optimization allows to minimize errors due to tool deflection. Several examples are processed in simulations and validated experimentally.

Key Words : End Milling (엔드밀 가공), Tool Deflection(공구 변형), Tool Path Compensation (공구 궤적 보상)

1. 서 론

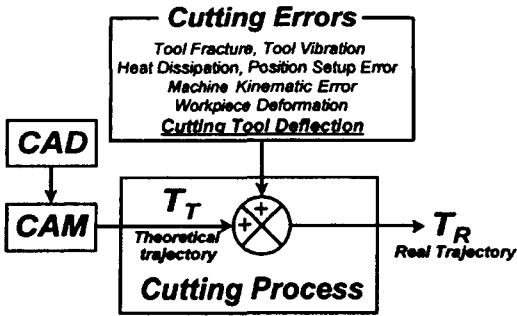
엔드밀 가공(End Milling)은 현재 산업현장에서 널리 이용되는 절삭가공중의 하나이다. 더불어 CAD/CAM 시스템은 설계에서 생산까지의 과정을 통합하여, 절삭가공 시에 요구되는 오퍼레이터의 역할을 극소화하는데 그 목적을 두고 있다.

수치 제어 공작기계(NC Machine)와 CAD/CAM 소프트웨어 시스템의 발전에도 불구하고, 실제 절삭 가공에

있어서 여러 가지 요인에 의해 가공 오차(Cutting errors)가 발생한다(참조 Fig.1). 이들 요인 중에서 절삭공구의 변형(Tool deflection)은 생산성의 극대화를 방해하는 가장 큰 요인으로 지목되고 있다. 일반 밀링머신의 사용자들은 그들의 노하우에 기인한 절삭속도의 최적화에 노력하고 있지만, 이 방법은 결국 생산성을 저하하게 하는 결과를 초래한다.

따라서 본 연구는 절삭공구(Cutting tool)의 변형을 고려한 새로운 공구 궤적의 결정을 통하여 생산성의 극대

* Ecole Centrale de Nantes, France



$$Abs(T_T - T_R) = \text{Trajectory Error}$$

Fig. 1 Global cutting process

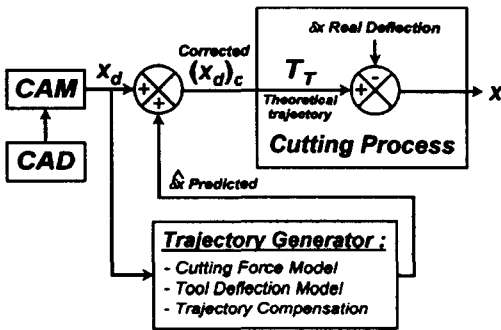


Fig. 2 Tool trajectory generator

화로 향하는 궁극적 목적을 달성하기 위한 방법론을 제시한다. 이를 위하여 CAD/CAM 시스템을 포함한 전체 절삭공정과 독립된 하나의 모듈을 설계하고, 그 모듈에 의한 새로운 공구 궤적의 보상을 시도한다(참조 Fig.2). 공구 궤적 보상(Tool trajectory compensation) 공정은 다음의 3가지 단계로 구성된다.

첫단계는 절삭력 예측 모델(Cutting force model)이다. 절삭력 예측을 위하여 가장 널리 알려진 Kline의 모델^(1,2)을 이용한다. 두 번째 단계는 공구 변형 모델(Tool deflection model)이다. 공구 변형량을 계산을 위하여 Kops의 유효 공구 직경(Equivalent tool diameter)⁽³⁾의 개념을 도입하여 공구 변형량 계산의 정확도를 높인다. 세 번째 단계는 공구 궤적의 보상이다. 이를 위하여 본 연구에서는 “거울법”(Mirror Method)⁽⁴⁾으로 명명된 공구 궤적 보정 알고리즘을 소개하고 그 적합성과 장점을 설명한다. 이들의 이론적 바탕을 토대로 일련의 시뮬레이션과 실험 결과들이 제시 및 비교된다.

2. 절삭 공구 모델

2.1. 절삭력 예측 모델(Cutting force model)

예측을 위하여 본 연구에서는 Kline 모델^(1,2)이 이용된다. 이 모델은 특정한 절삭공구와 절삭재료의 조합에 대해 실험적으로 절삭특성이 결정되어지고, 그 특성이 결정되어진 절삭 조건 범위 내에서 다양한 절삭력의 예측이 가능하다. 이를 위하여 특정한 절삭 조건 범위 내에서 평균 절삭력의 측정이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 Table 1에서 정의된 절삭공구와 재료가 채택되고 실험에 의해 다양한 절삭 조건하에서 평균 절삭력(Average cutting force)이 측정되었다. 수행된 실험 결과를 통하여 Kline 모델에서 이용된 특성계수인 K_T 와 K_R 의 식이 다항식형태로 결정되고, 임의의 방향에 따른 분포 절삭력과 집중 절삭력의 계산이 가능해졌다.

이들 절삭력은 세가지 절삭조건 즉, 측면 절삭 깊이(Radial depth of cut), 축방향 절삭 깊이(Axial depth of cut)와 공구 이송 속도(Feed rate)에 의해 결정된다. 또한 집중 절삭력이 작용하는 작용점(Force center)

Table 1 Milling conditions

공구직경	6 mm
공구의 헬릭스각	30°
공구 유효 길이	30 mm
공구날 갯수	4 개
공구 재질	HSCo(80%Co)
절삭 재료 재질	Middle steel
공구 회전 속도	1250 RPM
절삭 모드	Down milling

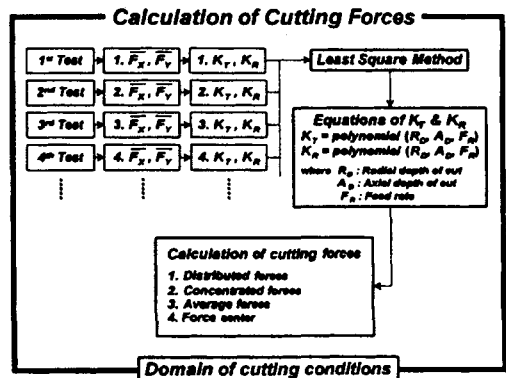


Fig. 3 Calculation of cutting forces

은 분포절삭력에 의해 발생하는 휨모멘트(Bending moment)와 등가인 모멘트가 발생하도록 결정된다. Fig. 3은 Kline 모델에 의한 절삭력 예측 과정을 보여준다.

2.2. 공구 변형 모델(Tool deflection model)

절삭력에 의해 발생하는 공구 변형(Tool deflection)량의 계산은 단순보(Cantilever beam) 모델에 의해 결정된다. 절삭 공구는 복잡한 기하학적 형상을 가지고 있다. 따라서, 관성모멘트의 계산이 용이하지 않다. 단순보 모델은 관성모멘트의 복잡한 계산 과정을 단순화한다. 그러나 이로 인해 생기는 공구 변형량 계산의 부정확성을 고려하여야 한다. Kops⁽³⁾는 절삭공구의 복잡한 기하학적 형상으로 생기는 변형량 계산의 부정확성을 보정하기 위하여 유효 공구 직경(Equivalent tool diameter)의 개념을 도입하였다. 유효 공구 직경은 실험에 의해 결정될 수 있다. 실제 절삭면에서 측정된 예로부터 공구 변형량을 역계산하는 방법으로 결정된 유효 직경은 단순보 모델에 의해 무시되는 여러요인들을 종합적으로 포함한다. 따라서 본 연구에서는 실제 공구 직경의 80%를 유효 공구 직경으로 고려하여 공구 변형량을 계산한다.

2.3. 공구 궤적 보상(Trajectory compensation)

공구 변형을 고려한 공구 궤적 보상의 어려움은 공구 궤적의 변화에 따라 절삭조건이 변화하는데 있다. 매순간 절삭력과 공구 변형량의 재계산이 필수적으로 요구되며, 따라서 이를 포함한 반복 계산 알고리즘이 필요하다.

공구 궤적 보상을 위한 Lo⁽⁵⁾의 연구에서는 단순히 초기 공구 변형량만을 고려한 새로운 공구 궤적 구축에 중점을 두고 있다. 따라서 보정된 공구 궤적은 순간 공구 위치에 대응한 변형량을 계산하고, 그와 대칭인 보정된 공구위치의 집합에 의해 결정된다. 이 연구에서는 직선과 원호 형태의 공구 궤적만을 다루었다.

Suh⁽⁶⁾의 연구에서는 새로운 공구 궤적의 결정을 위하여 두 종류의 반복 계산 알고리즘이 제시되었다. 첫째로 지역적 수정법(Local correction)은 반복 계산 알고리즘이 분리된 공구의 공칭 위치(Nominal tool position)에 국부적으로 적용되는 개념이다. 따라서 독립적으로 각각의 공구 공칭 위치에 대하여 순간공구 변형량에 대응하는 새로운 공구 위치를 결정하고, 그에 따른 절삭조건을 변화를 다시 고려하는 방식의 반복계산(Iteration)이다. 절삭 조건의 변화에 따른 공구 변형량의 재고려를 위하여

미리 결정된 임의의 하중계수(Weight factor)를 이용하였다. 이 하중계수는 새로운 공구 위치의 결정을 위한 현재 공구 변형량의 영향력을 결정한다.

둘째로 종합적 수정법(Global correction)은 지역적 수정법과는 달리 모든 공구 위 변화의 상호간 영향력을 모두 고려한 방법이다. 본 연구에서는 기존의 방법들에서 생길 수 있는 어려움 즉, 반복계산의 발산 가능성, 계산 과정의 복잡성, 하중계수 결정 방법의 불명확성 등을 피할 수 있는 보상 알고리즘을 소개한다.

3. 공구 궤적의 보상 (Tool trajectory compensation)

3.1. 공구 궤적 보상의 개념

공구 궤적의 보상을 통하여 절삭표면 오차를 최소화하는 방법의 일반적인 개념은 그림 4에 의해 설명된다. Fig. 4-(a)는 공구 궤적 보상 개념이 적용되지 않은 일반적인 절삭 가공을 묘사하고 있다. 우선 절삭 재료의 절삭에 의해 구현될 프로파일 (Profile)W가 주어진다. 이 프로파일을 구현하기 위한 공칭 공구 궤적 (Nominal tool trajectory) TN은 일반적으로 CAD/CAM 시스템에 의해 결정된다. 실제 절삭 가공시 발생하는 절삭력에 의해 공구가 변형을 하여 절삭 표면에 변형된 프로파일 (Profile)D를 남긴다. 따라서 표면오차는 (Profile)W와 (Profile)D의 차이에 의해 결정된다.

반대로 Fig. 4-(b)는 공구 궤적 보상 개념이 적용된 경우이다. 공구 궤적 결정 모듈 내에서 공구 변형에 의해 발

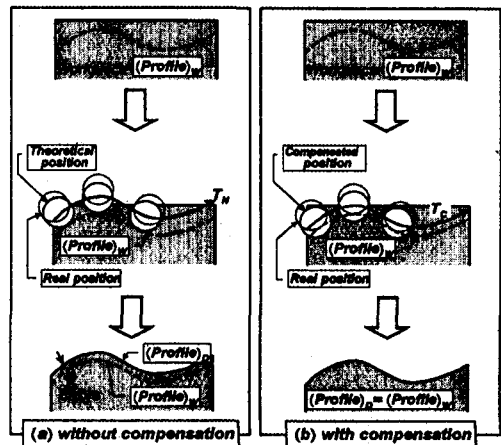


Fig. 4 General concept of compensation

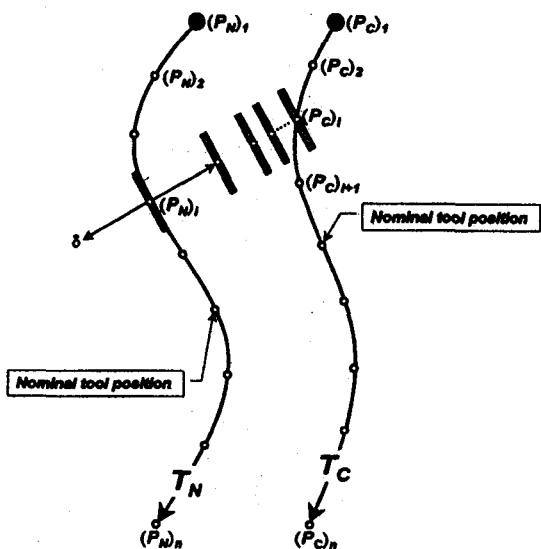


Fig. 5 Mirror method

생할 오차를 없애기 위해 새로운 공구 궤적을 계산한다. 따라서 (Profile)W와 동일한 (Profile)D를 구현할 수 있게 된다.

3.2. 거울법(Mirror method)

본 연구에서 소개할 공구 궤적 보상 알고리즘은 "거울법(Mirror method)"⁽⁷⁾으로 명명한다. 이 알고리즘은 거울의 반사에 의해 실상에 대칭인 허상이 생기는 거울의 특성과 비교하여 설명할 수 있다.

본 방법은 다음의 4가지 기본목적들을 충족시킬 수 있도록 고려되었다.

- ① 순간 공구 위치가 일관적인 방법으로 수정되어야 한다.
- ② 절삭조건(Radial depth of cut, Axial depth of cut, Feed rate)은 수정된 순간 공구 위치에 대해 재결정되어야 한다.
- ③ 재결정된 절삭 조건들에 대해 공구 변형량이 계산되어야 한다.
- ④ 공구 변형량과 절삭조건들의 변화량이 매순간 비교되어야 한다.

Fig. 5는 거울법의 기본 개념을 설명하고 있다. 공구 변형을 고려치 않은 공칭 공구 궤적(Nominal tool tra-

jectory) T_N 은 n 개의 공칭 공구 위치(Nominal tool position) $(P_N)_i$ ($i=1,2,\dots,n$) 집합에 의하여 표현된다. 공칭 공구 궤적 T_N 과 직각 방향의 순간 공구 변형량은 이전 순간의 절삭조건에 의해 결정된다. 이 순간 변형량은 T_N 과 접하게 가상으로 설치된 거울에 반사하여 허상을 만들고, 그 허상에 의해 새로운 보상 공구 위치 $(P_C)_i$ ($i=1,2,\dots,n$)이 결정된다. 매 순간 새로운 보상위치 $(P_C)_i$ 에 대한 새로운 순간 공구 변형량이 계산되고 공구 위치변화와 변형량이 비교된다. 두 비교값의 차이가 최소값 이하가 될 때까지 위에 설명된 과정은 반복 계산에 의해 계속된다.

거울법의 가장 큰 특징은 공칭 공구 궤적 T_N 에 직각방향의 공구 변형량만을 고려한다는 점이다. 이는 다음의 세 가지 이유에 의해 설명된다.

첫째로, 접선방향 절삭력(Tangential cutting force)은 법선 방향 절삭력(Normal cutting force)에 비하여 상대적으로 약하다. 둘째로, 접선방향 절삭력은 측면 절삭깊이의 증가에 따라 양수값에서 음수값으로 변화한다. 다시 말해서 접선 방향 절삭력은 어떤 임의의 경계점을 중심으로 돌연히 절삭력의 작용 방향을 180도 바꾼다는 의미이다.

6-(a)에서와 같이 법선 방향 절삭력은 두가지 절삭 조건(Radial depth of cut, Axial depth of cut)의 증가에 의해 일정한 증가 함수 형태를 취하고 있으나, Fig. 6-(b)에서와 같이 접선 방향 절삭력은 절삭력이 영(0)이 되는 하나의 경계를 중심으로 음수값으로 나타난다. 접선 방향 절삭력을 고려한 반복 계산 알고리즘은 절삭 조건이 이 임계 경계지역에 가까울 경우 발산의 위험이 존재한

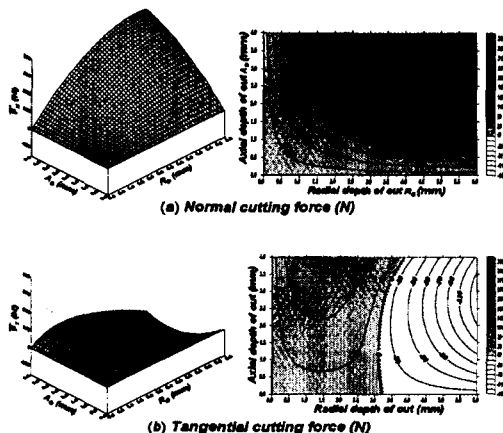


Fig. 6 Tangential and normal forces

다. 셋째로 절삭표면 오차는 실제 절삭 표면(Real milled surface)과 이상 절삭 표면(Ideal milled surface) 사이의 법선 방향 거리에 의해 결정된다. 따라서 접선 방향 공구변형량이 절삭표면 오차에 미치는 영향은 상대적으로 무시될 수 있다.

다음은 거울법의 알고리즘을 순차적으로 나타내고 있다.

1. 절삭이 요구되는 프로파일(Wished profile)을 초기화한다.
2. 요구된 프로파일(Wished profile)을 절삭하기 위한 공칭 공구 궤적 T_N 을 설계한다.
3. 공칭 공구 궤적 T_N 을 n 개의 공칭 공구 위치 $(P_N)_i$ ($i=1,2,\dots,n$)에 의해 분리한다.
4. 보상 공구 위치 $(P_C)_i$ ($i=1,2,\dots,n$)을 공칭 공구 위치 $(P_N)_i$ ($i=1,2,\dots,n$)에 의해 초기화한다 ($(P_C)_i = (P_N)_i$).
5. 세 가지 절삭조건(Radial depth of cut, Axial depth of cut, Feed rate)을 $(P_C)_i$ 에 대하여 결정한다.
6. 공구 변형에 의한 오차를 계산한다.
 - 3가지 절삭조건에 대한 법선 방향 절삭력 F_N 을 계산한다.
 - 법선 방향 절삭력 F_N 에 대해 법선 방향 공구 변형량 N 을 계산한다.
7. 절삭면의 오차를 계산하고, 임계값 이하인가를 확인한다.
 - 만일 $\text{Abs}(\text{error}) < \text{이면}$, 다음단계로 계속된다.
 - 만일 $\text{Abs}(\text{error}) > \text{이면}$, 거울법 개념을 적용하여 $(P_C)_i$ 를 다음과 같이 수정한다 ($(P_C)_i = -N$).
8. 현재 다루는 공구 위치가 마지막인가를 확인한다.
 - 만일 $i=n$ 이면 다음단계로 계속된다.
 - 만일 $i < n$ 이면, i 를 증가($i=i+1$)하고 단계4로 돌아간다.
9. 새로 결정된 모든 $(P_C)_i$ ($i=1,2,\dots,n$)를 선형 보간법(Linear interpolation)에 의해 연결하고, 그 연결된 궤적이 보정 공구 궤적이다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1. 사다리꼴(Trapezoid) 형상의 절삭 가공

여기서는 거울법에 의한 보상공구 궤적의 결정을 위하

여 사다리꼴(Trapezoid) 형상의 절삭가공 문제를 고려한다. Fig. 7은 공구와 절삭재료와의 기하학적 관계를 보여준다.

절삭 과정에서 측면 절삭 깊이를 제외한 모든 절삭 조건은 고정되어 있다. 측면 절삭 깊이는 공구의 외곽선과 절삭 재료의 초기 형상 외곽선의 교차점에 의해 결정된다. 절삭 재료의 초기 형상은 사다리꼴임으로 세 개의 다른 직선에 의하여 구성된다. 따라서 거울법의 반복 계산중 측면 절삭 깊이의 변화를 계산하기 위해 절삭 재료의 초기 형상은 외곽선의 불연속점을 기준으로 세 개의 구역으로 나누어진다.

Fig. 8은 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 8-(a)는 절삭가공시 예측 절삭력을 보여주고 있다. 앞에서 언급한

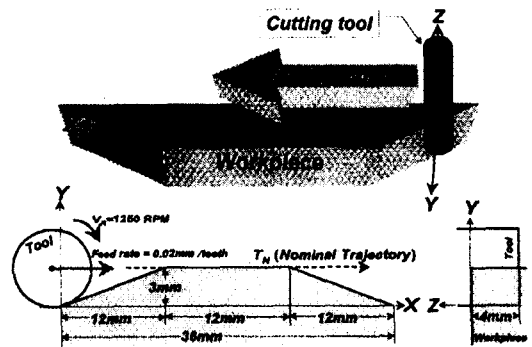


Fig. 7 Trapezoid workpiece

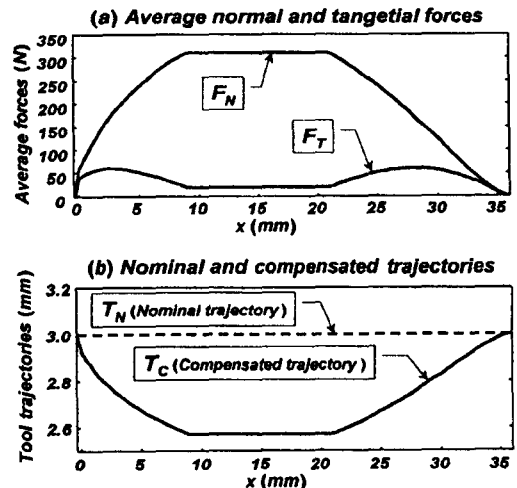


Fig. 8 Simulation results

것과 같이 법선방향 절삭력 F_N 이 약 300N 가량 증가하는데 반하여 접선 방향 절삭력 F_T 이 약 50N 이하에 머무는 사실을 이 결과를 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 8-(b)는 거울법에 의해 재결정된 공구궤적 T_C 을 보여준다. T_C 는 최고 약 0.4mm의 공구 궤적의 수정을 포함하고 있다.

이 예제는 절삭 재료의 초기 형상이 수학적 함수로 표현될 수 있을 경우 거울법을 적용하여 공구궤적의 보상이 가능하다는 것을 보여준다. 불연속 함수의 경우에도 연속 함수로 표현되는 여러개의 구간으로 나누어 궤적의 보상이 가능함을 확인할 수 있다.

4.2. 원호(Cylinder) 형상의 절삭가공

두 번째 예제로 원호 형상의 절삭재료의 가공 문제를 고려한다. Fig. 9는 절삭 재료의 초기형상과 절삭 조건들을 보여준다.

이 문제에서도 역시 공구 이송에 따른 측면 절삭 깊이의 순간 변화량을 계산하기 위하여 두 원(공구와 절삭재료의 초기형상)의 교차점을 고려한다.

Fig. 10은 거울법의 적용에 의한 공칭 공구 궤적과 보상 공구 궤적을 보여준다. 공구의 초기 위치는 공구가 절삭재료 표면에 접하는 순간으로 정의하여 거울법을 적용하였다. 다음의 시뮬레이션 결과를 이용하여 공칭 공구 궤적과 보상 공구 궤적에 의한 두 가지 절삭 가공을 실시하였다. 실제 가공중에 두방향 절삭력이 측정되었다.

Fig. 11은 예측 절삭력과 측정 절삭력을 동시에 보여준다.

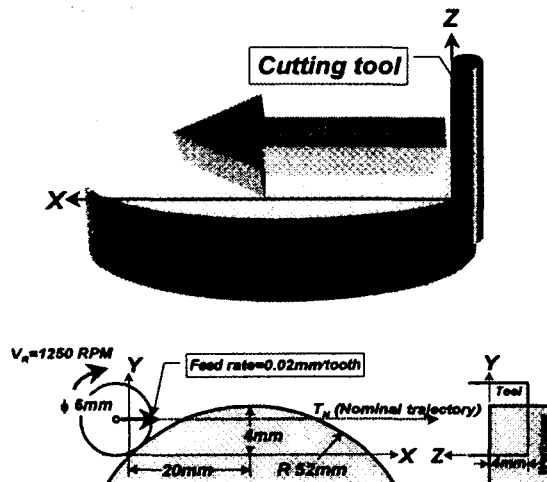


Fig. 9 Cylindrical workpiece

다. 시뮬레이션에 의해 예측된 절삭력과 측정치가 매우 정확히 대응됨을 알 수 있다.

Fig. 12은 공칭 공구 궤적과 보상 공구 궤적에 의한 두 절삭 표면을 보여주고 있다. 전체적으로 절삭표면의 보상 공구 궤적에 의해 약 80% 줄일 수 있었다.

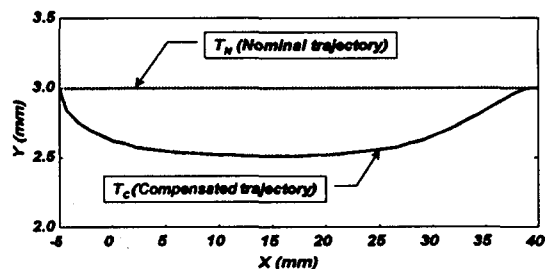


Fig. 10 Compensated trajectory

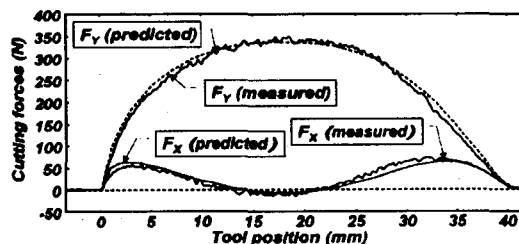
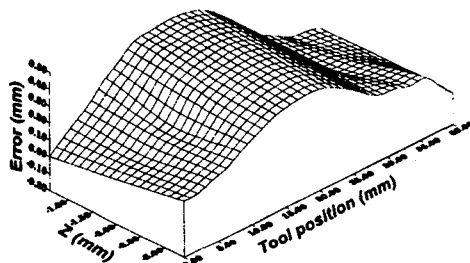
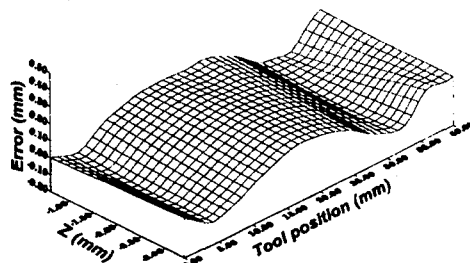


Fig. 11 Cutting forces



(a) Without compensation



(b) With compensation

Fig. 12 Milled surfaces

4.3. 실험 결과 분석 및 고찰

공구 궤적의 보상후 많은 오차를 줄일 수 있음을 Fig. 12을 통하여 확인하였다. 하지만 보상후에도 절삭면에 오차가 남아 있음을 동시에 확인할 수 있다. 이는 공구 변형량의 계산에서 취한 단순화에 따른 공구 궤적 보상 오차임을 예상할 수 있다. 거울법은 공구 궤적 보상 모듈에서의 절삭력 예측 모델과 공구 변형량 계산 모델과 독립적으로 구성되었다. 따라서 공구 궤적의 보상에 의한 절삭 표면 오차의 극소화를 위하여 공구 변형량 계산 모델의 수정이 필요시 된다. 예를 들면 공구의 회전에 의한 절삭력 변동의 고려^(1, 2)나 실제로 공구날과 재료가 만나는 접촉점의 고려⁽⁶⁾는 본 연구에서 보여진 절삭표면의 오차를 더욱더 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 공구 변형량 계산 모델의 수정에도 불구하고 거울법은 독립된 모듈로서 항상 적용이 가능하다.

5. 결 론

본 연구는 실제 절삭 가공전에 수치제어에 의해 결정된 공구궤적을 수정하여 공구의 변형에 의해 발생하는 절삭 표면의 에러를 보상하는 접근방법을 제시하였다. 이를 위하여, 절삭력 예측 모델과 공구 변형량 계산 모델을 바탕으로 공구 궤적 보상 모듈을 설계하였다. 공구 궤적 보상 모듈에서는 거울법(mirror method)으로 명명된 공구 궤적 보상 알고리즘을 소개하였다. 이 방법은 공구 궤적의 변화에 따르는 절삭조건을 통합하는 반복 계산 방법이다. 공구 궤적 수정의 매순간마다 절삭조건을 재결정하고, 그 재결정된 절삭조건들에 대하여 절삭력과 공구 변형량을 재계산하는 피드백형태(Feedback form)의 반복계산 방법이다. 절삭면 에러에 가장 영향을 많이 미치는 법선 방향의 절삭력과 공구 변형량만을 고려한 것은 이 방법의 또 하나의 특징이다. 이러한 고려는 실제로 접선 방향력을 고려하였을 때 생길 수 있는 알고리즘의 발산의 위험성을 피할 수 있게 한다. 또한, 공구 궤적 보상 방법은 기존의 절삭조건 최적화(cutting condition optimization)에 따른 공구 이송 속도의 감소를 피하게 하여 최적의 생산성을 유지하도록 한다.

소개된 거울법을 이용하여 두 절삭 예제를 다루고 시뮬레이션과 실험 결과를 비교 및 분석하였다. 첫 번째 예제에서는 초기절삭 가공면의 형태에 의하여 측면 절삭 깊이의 변화를 고려하여 공구 궤적이 보상되었다. 두 번째 예제인 원호형상 절삭 가공에서는, 두 가지 절삭 실험이 수

행되었다. 공구궤적 보상이 고려되지 않은 경우에서 나타난 절삭면 에러는 공구변형의 문제점을 확인 시켜준다. 거울법 시뮬레이션에 의해 결정된 새로운 공구 궤적은 실제 절삭 가공에서 에러를 약 80% 감소시킬 수 있었다.

여기서 소개된 본 연구는 절삭면의 에러를 최대한 줄이는데 중점을 두었다. 그러나, 대부분의 절삭 가공소재는 설계시 다양한 형태의 가공 공차(manufacturing tolerance)가 주어진다. 이 주어진 공차는 에러보상의 기준이 되며, 이 가공 공차를 포함하는 공구 궤적 보상법의 고려가 가능하다.

본 연구에서 소개된 공구 궤적 보상법은 다른형태의 공구에 의한 절삭 가공 문제에도 적용이 가능하다. 예를 들면, ball-end mill에서 절삭력모델과 공구변형량 계산방법이 결정되면 거울법의 적용이 가능해진다.

6. 참고 문헌

1. W. A. Kline, R. E. DeVor, J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *International Journal of Machine Tools Designs Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
2. R. E. DeVor, W. A. Kline et W. J. Zdeblick, "A Mechanistic Model for the Force System in End Milling with Application to Machining Airframe Structures," *Proceedings of 8th North American Manufacturing Research Conference*, Vol. 8, pp. 297-303, 1980.
3. L. Kops, D. T. Vo, "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliance," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 93-96, 1990.
4. Ph. D pinc, J.-Y. Hascoët, T.-I. Seo, "Compensation de Trajectoire d'Usinage : Simulation et Experimentation," *Proceedings of 13th Congress of AUM, Poitiers in France*, Vol. 3, pp. 293-296, 1997.
5. C. C. Lo, J. F. Lin, "Error Compensation for Repetitive Machining," *Proceedings of Pacific Conference on Manufacturing, Jakarta in Indonesia*, pp. 121-128, 1994.

6. S. H. Suh, J. H. Cho, J.-Y. Hascoët, "Incorporation of Tool Deflection in Tool Path Computation," *International Journal of Manufacturing System*, Vol. 15, No. 3, 1994.
7. J.-Y. Hascoët, T.-I. Seo, Ph. D pinc, "Compensation des D formation d'Outils pour la G n ration de Trajectoires d'Usi-
nage," *Proceedings of 16th Canadian Congress of Applied Mechanics, Qu bec in Canada*, pp. 569-570, 1997.
8. Y. Fujii, H. Iwabe, M. Suzuki, "Effect of Dynamic Behaviour of End Mill in Machining on Work Accuracy," *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 20-26, 1979.