한국정밀공학회지 제19권 제6호 (2002년 6월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 6, June 2002.

◆특집◆ 가상가공

디지털 기계제작과 가상 공작기계

고태조*, 백대균**, 김희술*

Digital Manufacturing and Virtual Machine Tool

Tae Jo Ko*, Dae Kyun Baek**, and Hee Sool Kim*

Key Words : Digital Manufacturing (디지털 기계제작), Virtual Machine Tool (가상공작기계), Virtual Reality (가상현실), Feed Optimization (이송 최적화)

1. 서론

컴퓨터 기술과 인터넷 기술이 발전함에 따라 가상공간에서 현실을 체험하는 가상현실(Virtual Realrity)은 이미 보편화되었다. 마찬가지로 기계제작에서도 CAD/CAM기술과 더불어 디지털 제작(digital manufacturing) 또는 e-제작 기술(e-manufacturing)이 점차 발전하고 있다. 디지털 제작기술은 컴퓨터상에서 실제 작업에서 발생할 수 있는 모든 상황을 가상으로 구현하여, 최적의 제작조건을 선정하여 생산비를 절감하고, 고품질의 제품을 생산하는 것이다. 좀 더 광범위한 개념에서는 제작에 관련하여 인터넷을 이용한 정보기술과 e-비지니스(e-bisiness)까지 포함한다. 협의의 의미에서 디지털 제작기술은 생산현장에서 기계제작에 관련된 활동을 컴퓨터상에서 시뮬레이션하여 다른 가상현실과 마찬가지로 기계제작을 저생산비, 고효율을 이루는 것이다. 즉, 컴퓨터위에서 기계공장을 건설하여 가상으로 모든 상황을 시뮬레이션한다. 가상기계제작을 포함한 가상현실에서 가장 큰 문제가 되는 것은 컴퓨터상에서 얼마나 실제상황과 똑같이 구현할 수 있는 있는가이다. 실제 상황과 일치하는 정도가 높을수록 효율 높은 가상현실을 구현할 수 있다.

가상 공작기계(virtual machine tool)는 디지털 제작기술의 한 분야로 컴퓨터 상에서 공작기계를 구현하여 가상으로 기계가공을 수행하는 기술이다. 가상가공의 구현으로 정밀 가공, 최적 가공조건 선정, 불량품 생산 방지, 작업자의 Training 등의 효과를 거둘 수 있다. 현재 생산현장에서 구현되고 있는 가상공작기계는 주로 밀링공정에 국한되고, 자유곡면가공에서 단지 가공경로 검증, 곡면 에러 예측 정도에 그치고 있다. 공작기계 진동, 공구처짐, 절삭 부하 예측, 공구마모, 칩핑 등의 실제 가공에서 문제가 될 수 있는 상황들은 상대적으로 연구진도가 느린 편이다.

본 논문에서는 컴퓨터와 인터넷 기술의 발전과 더불어 발전하고 있는 디지털 기계제작 기술의 현황을 간략히 살펴보고, 이 분야의 한 분류인 가상공작기계기술의 현황과 향후 전망에 대해 살펴보고자 한다.

2. 디지털 기계제작

컴퓨터를 이용하여 제작공정의 시뮬레이션 및

* 영남대학교 기계공학부
** Visiting Scholar, Lousiana State University
Tel. 053-810-2576, Fax. 053-813-3703
Email tjko@yu.ac.kr
정밀가공, 미세가공, 공작기계 특히, 정밀도 향상과 초정밀 이송계 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

공정감시를 수행하고 또한 로봇, 조립라인, 작업장을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 최적화하는 기술이다. 실제로 작업하기 전에 제작에 관련된 분야를 가상으로 시뮬레이션함으로서 원가절감, 불량품 방지, 생산성 향상의 효과를 가져올 수 있다.

Table 1은자동차, 항공, 중공업 그리고 조선분야의 공정에서 디지털 제작기술에 의한 생산성 향상의 예를 나타내었다[1]. Table 2는 수행하였던 프로젝트에서 생산성 향상의 예를 나타내었다[1]. 이러한 결과들에서 디지털 기계제작기술의 잠재 능력을 확인할 수 있고, 제조업체들에게 디지털 제작에 대한 좋은 본보기를 제공한다.

디지털 제작기술은 개념과 응용범위에 따라 여러 분야로 확장할 수 있지만 본 연구에서는 Table 3과 같이 분류하고 각 분야에서 담당하고 있는 역할을 간략히 살펴보았다.

Table 1 Productivity improvement through digital manufacturing - Discrete process and projects

Discrete process		
Process	**Industry**	**Improvement**
Tool design	Aerospace	75% reduction overall in time and labor
Castings	Heavy equipment	50% reduction in errors from suppliers
Factory line layout	Automotive	20% reduction in retooling time
Robot welding line layout	Automotive	85% reduction in changes required after implementation

2.1 공정계획(Process planing) 시뮬레이션

새로운 제품을 생산하기 위해서는 수년 내지 몇 달이 소요된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 공정계획에서 잘못된 공정을 피하고 필요 노동력, 생산을 위한 공간, 투자경비에 대한 정보를 알 수 있다. 원가기획(Target costing)을 위해 주어진 가격에 알맞은 부품, 특별히 요구되는 장비 및 기술적 요구조건 등을 알 수 있다. 공정계획에서 무엇보다 중요한 것은 조립라인의 설계다. 작업자, 로봇 그리고 기계적인 방법 등을 이용한 시뮬레이션을 할 수 있고, 또한 충돌 여부와 틈새와 끼워 맞춤정도를 파악할 수 있다. 즉, 제품설계 단계에서 조립과 분해를 시뮬레이션하여 조립라인을 최적화한다.

Table 2 Productivity improvement through digital manufacturing - Projects

Projects		
Project	**Industry**	**Improvement**
Production first set of development parts	Aerospace	58% reduction in time and labor (single test case)
New process learnout	Aerospace	96.8% reduction (single test case)

Table 3 The classification of digital manufacturing

Division	**Roles**
Process Planning	Preliminary Planning, Target Costing
Machining	Virtual Machine Tool
Robotics	Robotic Simulation
Measuring	Virtual CMM
Factory Simulation	Optimal layout
Ergonomics	Simulation of Operating Sequences in Production and Assembly
Cost Calculation	Technical Calculation of Material- and Production Costs

2.2 기계가공(Machining) 시뮬레이션

가상공작기계를 이용하여 기계가공을 시뮬레이션한다. 2축, 2.5축 그리고 3축 공작기계의 NC데이터를 검증하고 과절삭과 미절삭을 검증한다. 주로 시각적으로 미절삭과 과절삭을 검증한다. 가공물과 설계 모델링과 일치하는 지를 가공하기 전에 컴퓨터상에서 시뮬레이션하여 불량품을 방지한다. 또한 작업자들의 훈련 키트로 유용하게 사용된다. 실제 기계에서 NC프로그램과 기계조작을 연습하는 것은 작업자에게 위험할 뿐만 아니라 기계에도 치명적인 손상을 가져올 수 있기 때문이다. 가상 밀링머신의

한 예를 Fig. 1에 나타내었다.

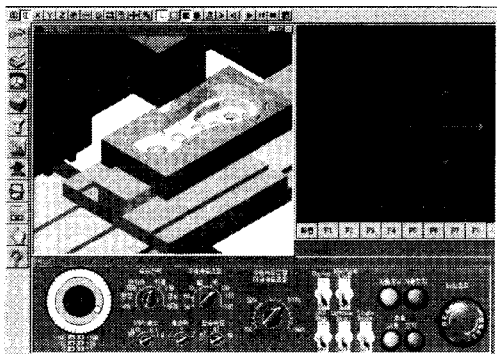

Fig. 1 An example of virtual milling machine

2.3 로보틱스(Robotics) 시뮬레이션

가상공작기계와 마찬가지로 3차원 로봇운동을 컴퓨터에서 시각적으로 시뮬레이션한다. Off-line으로 로봇운동을 프로그램할 수 있고, 보정과 충돌의 검증으로 프로그램을 최적화한다. 로봇을 이용한 용접, 도색, 마무리가공, 디버링 등의 공정을 컴퓨터에서 실제 작업전에 시뮬레이션한다. 또한 PLC (Programmable Logic Controller)시뮬레이터는 PLC 프로그램을 디버그하고 최적화한다. 이러한 소프트웨어를 이용하여 로봇조작과 PLC프로그램 사용할 작업자들을 교육할 수 있다. Fig. 2는 가상 로봇의 예이다.

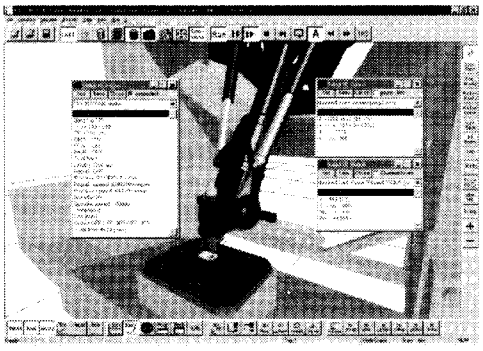

Fig. 2 An example of virtual robot

2.4 측정(Measuring) 시뮬레이션

가상 CMM (Virtual Coordinate Measuring Machine)은 3차원 측정을 위한 프로그램을 제공하고, 프로그램을 최적화한다. 프로그램 작성 시간을 단축시키고 측정할 때 발생할 수 있는 에러를 제거하며, 프로브 충돌을 피하게 한다. CMM을 구입하지 않고, 또한 실제 부품을 제작하기도 전에 CAD 데이터로부터 CMM프로그램을 얻을 수 있고, 시뮬레이션을 통하여 모든 문제를 사전 점검하고 프로그램을 최적화한다. CMM측정 작업자들에게 좋은 훈련 키트가 될 수 있다. 다른 디지털 기계제작분야와 마찬가지로 실제 연습에서 발생할 수 있는 충돌을 피하고 저렴한 가격으로 교육 효과를 거둘 수 있다. Fig. 3은 가상 CMM의 예를 나타내었다.

Fig. 3 An example of virtual CMM

2.5 공장(Factory) 시뮬레이션

공장시뮬레이션은 공정흐름(Process flow)을 시뮬레이션하여 최적의 공정흐름을 설계한다. 실제로 설비를 설치하여 시행착오로 경비를 소모하기 전에 효과적으로 공정흐름을 설계한다. 공정흐름에서 버퍼링, 자동공급장치, 복합공정들을 선택된 논리규칙에서 시뮬레이션할 수 있다. 공장시뮬레이션은 효율적인 공정흐름 해석뿐만 아니라 고객, 경영자, 공학자들에게도 효과적인 자료를 제공한다. 4D 시뮬레이션으로 더욱 이해가 쉽고 보기 좋은 결과를 제시한다.

2.6 인간공학(Ergonomics) 시뮬레이션

생산현장에서 수작업을 이용한 조립은 여전히 필수불가결이고 많은 장점을 가지고 있다. 최근에 생산기술은 수작업에도 높은 생산성을 요구하고 있다. 만약 잘못된 작업라인의 설계로 작업자에게 피

로를 유발시키고, 불필요한 운동을 요구하면 생산성이 떨어질 것이다. 작업자의 효과적인 일의 순서와 작업에서 발생할 수 있는 문제점을 해결하는 것이 인간동학 시뮬레이션이다. 다양한 시나리오를 가지고 인간운동과 작업을 해석하여 최적의 작업순서와 작업환경을 제공한다. 설계에서 인간공학을 고려하면 많은 장점이 있다. 작업자의 요구조건에 맞는 환경을 제공함으로서 생산성이 증가하고 산업재해, 질병 등을 예방할 수 있다. 인간공학 시뮬레이션은 이러한 점에서 작업라인을 설치하기 전에 많은 해답을 준다.

2.7 원가 계산(Cost calculation) 시뮬레이션

기업은 가격경쟁력을 유지하면서 기업의 생존과 성장에 필요한 수익을 확보하기 위해 끊임없는 원가절감을 요구받고 있다. 제품원가의 발생은 제품기획단계와 설계단계에서 대부분 결정되므로, 제품의 기획, 설계단계에서 원가절감을 도모하는 구체적인 수단이 절실히 필요하다. 따라서 디지털 기계제작에서 원가 계산 시뮬레이션을 이용하여 제품생산에 필요한 재료비, 생산비를 빠르고 정확하게 계산한다. 제품원가는 광고, 마켓팅, 설계, 제작 등 다양한 부분에서 발생하는데 디지털 제작에서는 생산에 필요한 원가를 시뮬레이션한다.

3. 가상공작기계의 현황과 전망

현재의 가상공작기계는 주로 가상밀링머신이 연구의 대상으로 개발되어 사용되고 있다. 개발제품의 설계 모델과 가공물이 정확히 일치하는지를 시뮬레이션하기 위해 여러 가지 방법으로 검증모델을 제시하고 있다.

Fig. 4는 볼엔드밀 가공에서 발생하는 에러의 한 예를 나타내었다. 여기서 t는 황삭가공 후 정삭여유를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 공구선택의 잘못으로 설계된 표면과 가공된 면은 일치하지 않고 에러가 발생한다. 가공 후에 이런 에러를 발견하게 되면 막대한 경제적, 시간적 손실을 가져온다. 따라서 가상공작기계에서 가공전에 모든 상황을 시뮬레이션하여 문제를 해결하면 많은 장점이 있다.

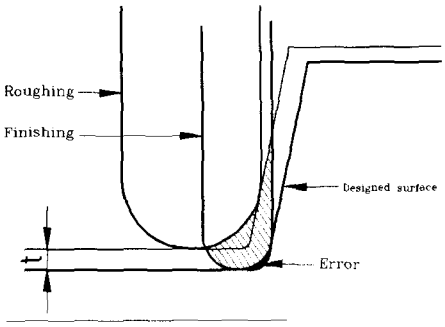

Fig. 4 Error in ball end mill machining

3.1 가공 검증모델

3.1.1 체적소거법에 의한 가공 검증모델

현재 상용화된 가상공작기계는 가공 검증을 위해 Z-map 모델을 이용하고 있다. 이는 체적소거법(Swept volume)을 이용하여 NC프로그램을 입력하여 가공물을 검증한다[2-4]. Fig. 5에서 보는 것처럼 NC가공에서 한 블록의 소거체적을 구하여 공작물의 체적에서 불리안(Boolean) 연산에 의해 가공물의 형상을 예측하는 방법이다. 이러한 방법으로 Fig. 4에서 보는 것처럼 자유곡면 가공에서 기하학적인 에러를 예측하거나 미절삭(Under cut)의 원인을 알 수 있다. 경우에 따라서는 CAM에서 생성한 NC데이터의 오류로 과절삭(Over cut)이 발생한다. 즉, 설계된 표면보다 더 깊게 가공하는 것으로 완전히 공작물을 버리고 새로 가공해야 되므로 반드시 가공전에 예측해야한다. 현재 상용화된 가상공작기계에서는 설계곡면과 가공된 곡면을 컴퓨상에 동시에 표시하여 시각적으로 에러를 검증하는 방법을 주로 채택하고 있다.

3.1.2 이송속도를 고려한 가공 검증모델

앞절에서 언급한 것처럼 현재 상용화된 가상공작기계는 주로 기하학적인 에러를 예측할 수 있다. 그러나 실제 절삭에서는 기하학적인 에러와 함께 다양한 에러가 존재한다. Fig. 6은 절삭력에 의한 공구처짐의 예를 나타내었다. 가공 공구는 외팔보

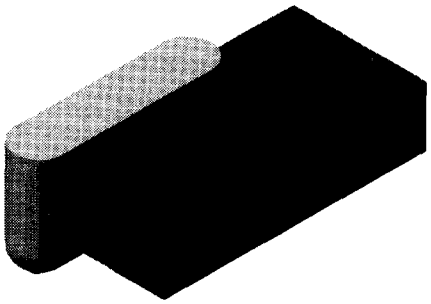

Fig. 5 Swept volume in verification model

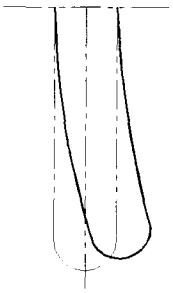

Fig. 6 Tool deflection in ball end milling

의 구조를 가지므로 공구처짐[5-6]과 진동(7-8)은 피할 수 없다. 가상공작기계에서 공구처짐과 진동을 예측하려면 먼저 절삭력을 예측해야한다. 절삭력 예측을 위해서는 날당 칩체적을 구한 후 미절삭 칩 단면적을 구해야 한다. Fig. 7은 볼엔드밀 가공에서 한 날이 절삭할 칩체적의 예를 도시하였다. 비교적 정확한 절삭력 예측을 위해 Fig. 7의 그리드 간격을 작게하면 컴퓨터의 계산시간과 메모리의 용량 문제로 현실적으로 가상공작기계에서 절삭력을 예측하기는 힘들다. 그러나 현재 컴퓨터의 성능향상과 가상공작기계에 대한 더 많은 요구로 절삭력 예측이 필요하다.

날 당 칩체적을 구하기 위해 가공검증모델에서 NC프로그램의 절삭좌표와 함께 이송속도를 고려하면 실제 절삭공정과 유사하게 표현할 수 있다. 이송속도를 고려한 검증모델[9]에서는 다음과 같은 방법을 사용한다. Fig. 5에서 가공시작점에서부터 매 날당 공구 위치를 계산하여 칩체적을 구한다. 구해진 날당 칩체적은 이송속도 최적화, 절삭력 계산에

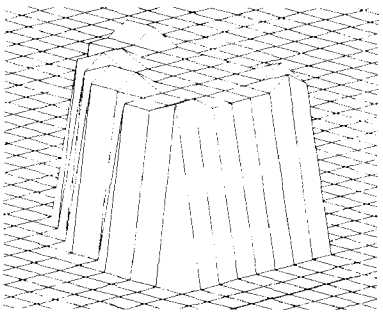

Fig. 7 Chip volume per tooth

사용될 수 있다. 그리고 구해진 날당 칩체적을 공작물 Z-map에서 제거한다. Fig. 8은 이송속도를 고려한 가공검증모델에서 예측한 튜브형상의 정삭가공 후의 최종형상이다. Fig. 9는 황삭가공 후 정삭가공에서 가공해야할 Z-map을 나타내었다. Fig. 4에서 설명한 것처럼 Fig. 9를 살펴보면 코서리 부분에서는 날 당 칩부하가 증가하여 공구처짐과 칩핑의 원인이 되는 것을 알 수 있다. 황삭가공에서도 그 전가공의 커섭모양에 따라 칩핑이 발생할 수 있고, 과도한 공구처짐과 진동으로 오버컷까지 발생하는 경우도 있다.

이송속도를 고려한 가공 검증모델은 절삭력 예측의 기본이 되는 날 당 칩체적을 구할 수 있고, 공구 처짐과 진동을 고려한 동검증모델(Dynamic verification model)로 확장이 가능하다.

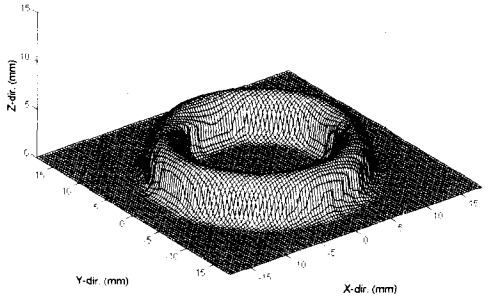

Fig. 8 Verification of a surface in finish cutting.

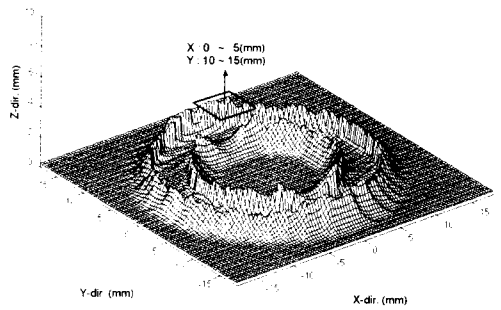

Fig. 9 Z-map in finish cutting.

3.2 이송속도 최적화

Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 것처럼 공구경로에 따라 칩부하가 변화하여 공구처짐과 진동이 발생한다. 모든 절삭경로에서 일정한 절삭부하로 절삭하면 강제진동이 감소되고 공구처짐에 의한 에러를 줄일 수 있고, 에러 보상도 용이할 것이다. 일정한 절삭부하로 절삭하기 위해서는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 절삭력 센서로 절삭력을 측정하여 이송속도를 제어하는 방법이고, 두 번째는 가상공작기계에서 절삭부하를 예측하여 이송속도를 최적화하는 방법이다. 첫 번째 방법은 아직 절삭력 센서의 실용화 문제와 응답성의 문제를 안고 있다. 두 번째 방법은 NC프로그램에서 이송속도를 변화시켜 절삭부하가 큰 곳에서는 이송속도를 느리게 하고 절삭부하가 작은 곳에서는 이송속도를 빠르게 하는 방법으로 가공정밀도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 생산성도 향상시킬 수 있다[10-11].

Fig. 10에서 보는 것과 같이 기본 개념은 NC데이터로부터 3.1절의 가공검증모델을 이용하여 칩부하를 예측하여 항상 일정한 칩부하가 되도록 이송속도를 계산하여 새로 NC데이터를 생성한다[12]. 해상도가 너무 작으면 그림으로 표시하기 어려우므로 Fig. 9에서 사각형으로 표시한 부분만 칩체적을 구해 Fig. 11에 나타내었다. 일정 절삭부하를 위해 절삭력을 정확히 예측하면 좋으나 앞에서 언급한 것처럼 컴퓨터의 성능문제로 칩체적으로 절삭부하를 평가한 예를 나타내었다[12]. 다음과 같이 CAM에서 주어진 고정된 이송속도를 새로 변화시켰다.

$$F_n = F\frac{S_b}{S_r}, \quad \text{for } s_r \neq 0,\ F_n < F_{\max}$$

$$F_n = F_{\max}, \quad \text{if } s_r = 0,\ or,\ F_n > F_{\max} \quad (1)$$

여기서, F_n은 새로 생성되는 이송속도
F는 CAM에서 주어진 이송속도
s_b는 일정하게 하려는 목적의 칩체적
S_r은 가공검증모델에서 구한 칩체적

식 (1)에 의해 이송속도를 변화시켜 Fig. 9의 일부분의 칩체적을 구하여 Fig. 12에 나타내었다. 이송속도가 일정한 Fig. 11과 이송속도를 변화시킨 Fig 12를 살펴보면 그 효과를 알 수 있다.

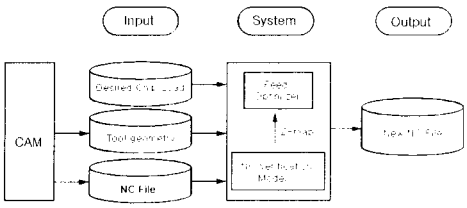

Fig. 10 Schematic diagram of feed optimization

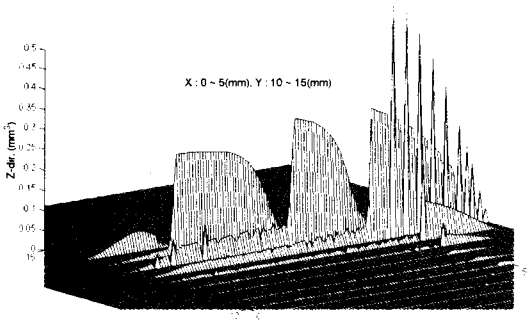

Fig. 11 Chip loads per tooth before controling feedrate.

4. 가상공작기계의 향후 전망

본 절에서는 현재 대학과 산업체에서 진행중인 연구와 발표된 연구논문들을 바탕으로 향후 가상공작기계에 대한 전망을 해보았다. 우선 앞에서도 언급한 것처럼 현재 가상밀링머신이 주류를 이루고 있고, 가상선반이 교육적인 목적으로 활용되고 있다. 아직까지는 자유곡면의 밀링가공에서 기하학적인 에러 검증과 이송속도 최적화 분야에 가상공작

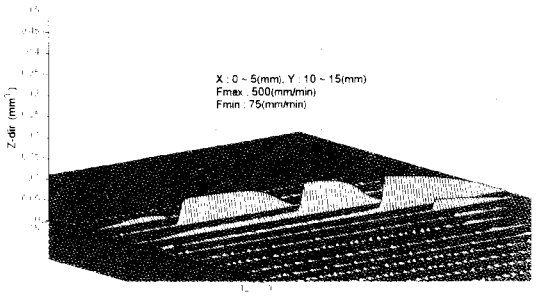

Fig. 12 Chip loads tooth after controling feed rate.

기계가 사용되고 있다. 기계가공의 생산성 향상과 정밀가공의 요구로 앞으로 실제 밀링머신에서 발생하는 많은 상황들을 고려해야할 것으로 생각된다.

Fig. 13에 미래의 가상공작기계를 도시해보았다. 입력변수에서 많은 데이터 베이스와 정보기술이 필요할 것이다. 가상공작기계에서 절삭력의 예측은 필수불가결일 것으로 예상되는데 현실적으로 비절삭저항에 대한 연구와 데이터 베이스가 부족하다. 또한 칩핑과 마모예측에 대한 연구와 데이터 베이스도 필요하다.

현재 공작기계의 기하학적 에러와 Thermal error는 공작기계에서 보정하고 있다. 만약 3차원 기하학적 에러맵 예측이 가능하면 가상공작기계에서 보정을 통합하면 효과적일 것이다. Thermal error까지 예측하여 가상공작기계에서 보정하면 더욱 효과적일 것이다.

앞으로 밀링머신과 함께 선반, 보링, 드릴링 등의 가상공작기계에 대한 연구가 필요하다. 이러한 공작기계는 기하학적인 에러가 큰 문제가 되지 않지만 마찬가지로 물리적인 요소인 공구처짐, 진동, 칩핑, 표면조도 그리고 마모 등에 대한 연구가 필요할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 디지털 기계제작 기술에 대해 간략히 소개하고, 가상공작기계의 현황과 전망에 대해 살펴보았다. 컴퓨터와 그래픽 기술의 발달로 기계제작의 많은 분야도 가상현실(Virtual reality)이

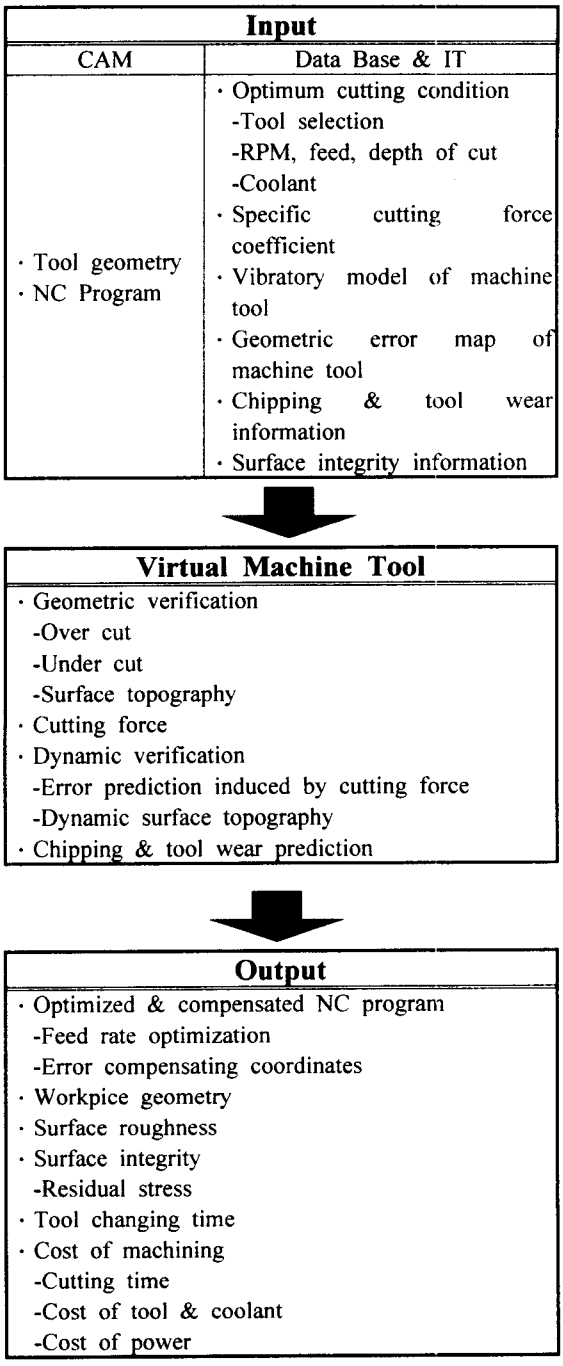

Fig. 13 Schematic diagram of virtual machine tool in the future

실용화되고 있고 발전하고 있다. 가상 시뮬레이션의 가장 핵심은 얼마나 실제 상황을 잘 모델링하여 실제 상황과 똑 같이 예측하는가이다. 현재는 주로 기하학적인 측면에서 많은 분야가 적용되고 있는데 향후 우수한 물리적인 모델들이 개발되어야 더욱 정확하고 생산성이 높은 가상현실이 실현될 것이다.

가상공작기계는 현재 자유곡면가공의 기하학적인 에러검증을 위해 밀링머신이 주로 사용되고 있다. 실제 절삭현상을 표현하고, 정밀가공과 높은 생산성을 위해 더욱 많은 물리적 모델들이 필요하다. 또한 절삭력 예측을 위한 비절삭저항, 공구마모 예측, 칩핑예측 등을 위한 데이터 베이스 기술이 필요하고, 최적의 공구 선정, 절삭조건 선정, 절삭유 선정 등을 위한 정보기술이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. *Proving its worth: Digital Manufacturing's ROI*, D. H. Brown Associates, Inc. 1999.
2. Jerard, R. B., Drysdale, R. L. and Hauck, K., "Geometric Simulation of Numerically Control Machining," Proc. ASME Int. Computer in Engineering Conf., ASME, New York, pp. 129-136, 1988.
3. Oliver, J. H., "Efficient Intersection of Surface Normals with Milling Tool Swept Volumes for Discrete Three-Axis NC Verification," Journal of Mechanical Design, Vol. 114, pp. 283-287, 1992.
4. Hsu, P. L. and Yang, W. T. "Realtime 3D Simulation of 3-axis Milling Using Isometric Projection," Computer-Aided Design, Vol. 25 No. 4, pp. 215-224, 1993.
5. S. Yang, J. Yuan, J. Ni, "Real-time cutting force induced error compensation on a turning center," International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 37, No. 11, pp. 1597-1610, 1997.
6. 이상규, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 4호, pp .229-236, 1999.
7. Baek, D. K., Ko, T. J. and Kim, H. S. "A Dynamic Surface Roughness Model for Face Milling," Precision Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 171-178, 1997.
8. Elbestawi, M. A., Ismail, F. and Yean, K. M., "Surface Topography Characterization in Finish Milling," International Journal of Machine tools and Manufacture, Vol. 34, No. 2, pp. 245-255, 1994.
9. 백대균. 고태조, 김희술, "가상 밀링에서 이송속도를 고려한 가공 검증 모델," 한국정밀공학회지, 투고중.
10. Bergs, T., Rodriguez, C., Altan, T., and Altintas, Y., "Tool path optimization for finish milling of die and mold surfaces - software development," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 24, pp. 81-86, 1996.
11. 이기우, 노상도, 신동목, 한형상, "절삭부하 예측을 통한 NC코드 후처리시스템," 한국정밀공학회지, 제17권, 제5호, pp. 116-123, 2000.
12. 백대균. 고태조, 김희술, "Z-map 기반 가공 검증 모델을 이용한 칩부하 제어," 한국정밀공학회지, 투고중.