

◆특집◆ 가상 가공

가상공작기계의 연구동향

조동우*, 고정훈**, 정영훈**

Trends in Virtual Machine Tool Research

Dong-Woo Cho*, Jeong Hoon Ko**, Young Hun Jeong**

Key Words: Virtual machine tool (가상공작기계), Cutting process model (절삭공정모델), Design for manufacturing (생산을 위한 설계), Hardware-In-the Loop simulation

1. 서론

가상가공 (Virtual manufacturing)이라 함은, 실가공 이전에 가능한 모든 실제 상황을 사이버공간상에서 구현하는 것을 말한다. 개발자 혹은 사용자에 따라 그 범위나 대상이 달라질 수 있으나, 대체로 위의 정의에는 공감하리라 생각된다. 최근에 회자되는 새로운 용어로서 가상 프로토타이핑 (Virtual Prototyping)이 있다. 이는 설계단계부터 시작하여 제품화되기 직전의 프로토타이핑을 사이버공간에서 제작하여 가공성/생산성 및 애초의 설계상의 허실을 파악하여 설계단계에 피이드백 하는 것을 의미하고 이것은 DFM (Design For Manufacturing)의 개념에까지 확장될 수 있다. ADAMS, DELMIA, CMOLD, MOLDFLOW 등이 그 대표적인 예이다. 기존의 CAE 도구로서 개발되었던 소프트웨어 패키지들에 기능을 추가하여 새로운 개념에 적용하고자 하는 시도들이다. 논의를 가공에 제한한다면, 언급한 위의 두 개념, 즉 가상가공과 가상 프로토타이핑이 크게 다르지 않으며, 특히 기술적

으로 거의 동일한 기반 위에 존재한다.

그 대상을 하나의 동작기계로 한정하였을 경우, 가상 동작기계의 개념으로 접근할 수 있으며, 하나의 플랫폼으로 범위를 넓힐 경우, 생산설비 전체를 대상으로 연구를 수행할 수도 있을 것이다.

2. 가상공작기계의 개념 및 연구현황

본 논문에서는 전자에 언급한 가상공작기계에 대해 논의를 제한하고자 한다. 가상공작기계 (Virtual Machine Tool, VMT)는 절삭 공정과 다양한 동작기계 요소들의 엄밀한 모델에 근거하여 실제 절삭이전에 시뮬레이션하여, 최적의 절삭조건을 얻고 나아가 정밀도 향상을 위하여 적절히 보상/제어하는 것을 목적으로 한다.

그림 1에 보여주고 있는 구조는 가상공작기계 개념의 한 예이다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭공정 모듈 (Cutting process module)이 핵심적 요소로 자리잡으며, 이의 기본은 절삭력 모델에 있다고 하겠다. 언급한 바와 같이 개발자 마다 그 구체적인 골격은 다를 수 있으나, 이와 궤를 같이 하는 연구의 동향은 다음과 같다.

우선, 북미의 대학 연구소를 중심으로 이에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 미국의 UIUC (University of Illinois at Urbana-Champaign)를 축으로 하여 Purdue 대학, Northwestern 대학이 절삭공정 모

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

Tel. 054-279-2171, Fax. 054-279-5899

Email dwcho@postech.ac.kr

생산 시스템 특히, 가상가공, 절삭공정 해석, 지능화 및 자동화, 개방화, 극소 광조형기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

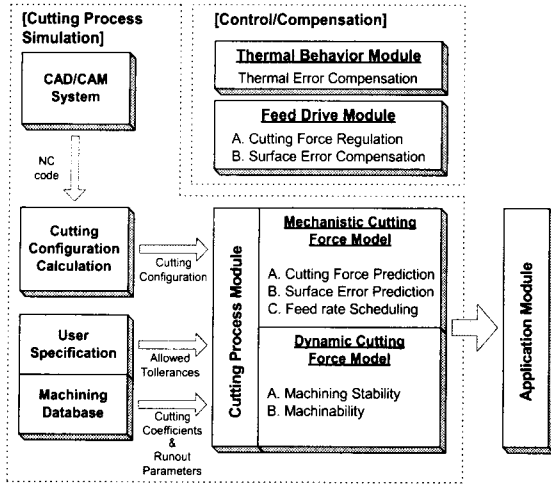


Fig. 1 Framework of VMT

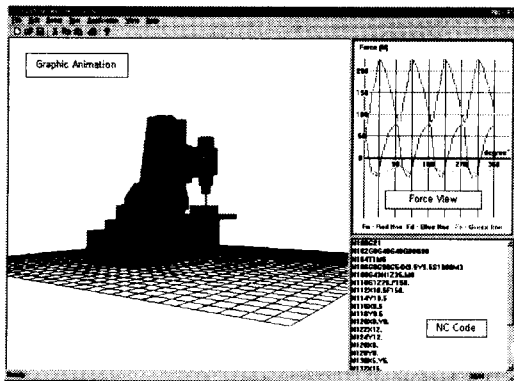


Fig. 2 Main screen of a virtual machine tool

델에 관한 연구를 공동으로 수행하여 왔다.⁽¹⁾ 절삭 해석 기술에 있어서 소프트웨어의 형태로 개발된 경우를 보면, 미국의 UIUC 에서는 EMSIM, TAPSIM, FMSIM, DRISIM 등의 절삭공정 시뮬레이션을 위한 것들이 있다.⁽²⁾ 또한 캐나다의 UBC (University of British Columbia)에서는 CutPro 라는 절삭공정 시뮬레이션 소프트웨어를 개발 중이다.⁽³⁾ 이 소프트웨어는 채터 예측을 위한 동절삭력 시뮬레이션 모듈, 가공표면 오차 예측 모듈, 그리고 공구의 설계모듈이 있다.

다시 그림 1 로 돌아가서, 가상공작기계의 기능에 대해 구체적인 시각을 갖기 위해, 본 연구팀에서 진행된 대표적인 몇 가지 결과를 소개하기로 한다. 아래의 그림 2 는 가상 공작기계 소프트웨어

의 한 화면을 보여주고 있다. 그림 2 에서 왼편은 가공 상황 모니터링, 오른쪽 상단은 가공 중에 예측되는 절삭력, 그리고 하단은 가공 중인 NC 프로그램을 보여주고 있다. 가상 공작 기계를 위한 소프트웨어에 탑재된 기능은 절삭력 예측, 가공 표면 오차 예측, 이송 속도 스케줄링 그리고 가공 상태 모니터링이다. 사용자가 NC 코드와 가공 정보를 입력하면 절삭력과 가공 표면 오차를 확인할 수 있으며 기준 절삭력을 입력하게 되면 최적화된 이송속도를 가진 NC 코드를 생성할 수 있다.

2.1 역학적 절삭력 모델

지금까지 절삭력 예측과 가공 표면 오차에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 일반적인 공정에 대해서 절삭력을 예측하는 데에 적용하기에는 상당히 제한적이었다. 대체로 종래의 모델들은 고정된 절삭 조건을 가지는 단일 공구 경로에 대해서 절삭력을 예측하고 있으며, 절삭 조건이 바뀔 때마다 절삭 계수 값을 다시 결정해야 하는 문제점들을 가지고 있었다⁽⁴⁾.

본 연구팀에서는 앞서 발표한 논문에서 절삭 계수 값을 효과적으로 결정하는 방법을 제시하였다.⁽⁵⁾ 요약하면, 절삭 계수값은 주어진 공구와 가공물에 대해서 재료의 물성치인 것으로 고려할 수 있다. 따라서 절삭 조건이 변하더라도 절삭 계수 값은 변하지 않으며, 절삭 계수 값은 치수 효과 (size effect)를 반영한 절삭력과 미변형 칩두께의 비선형적인 관계식으로 나타낼 수 있음이 증명되었다. 이를 통하여 기존의 연구 결과들에 비해 손쉽게 가공 데이터베이스를 구축할 수 있다. 그림 3 에 나타난 것과 같은 절삭 조건이 변하는 과도 절삭의 한 예인 코너 절삭에 대해서 예측된 절삭력과 측정된 절삭력의 비교가 그림 4 에 나타나 있다.

2.2 가공 표면 예측

가공 표면에 남겨진 오차에 대한 해석과 예측은 엄밀한 절삭력 모델에 기초해서 수행된다. 공구의 휨과 런아웃은 이러한 표면 형상 오차의 주요인이다.⁽⁶⁾ 앞서 언급한 바와 같이 일반적인 절삭 조건에 대해서 가공 표면 오차를 예측하기 위하여, 본 연구에서는 공구의 움직임을 따라서 절삭력을 예측하고 있으며 이로 인해 공구의 실제 움직임을

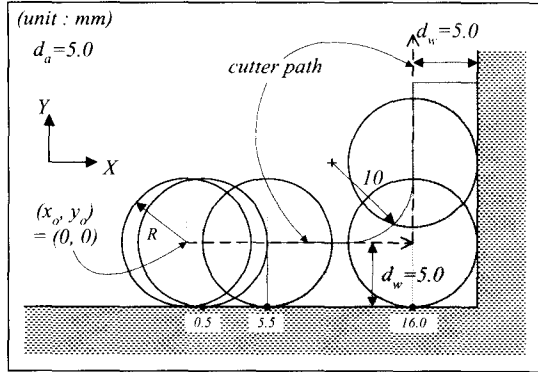
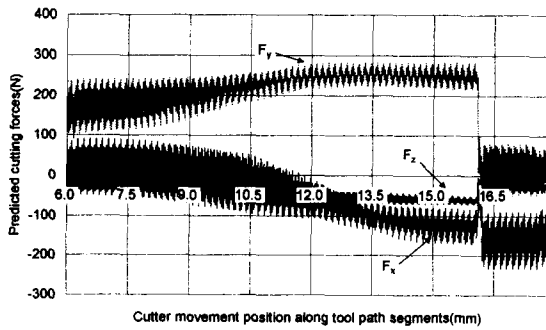
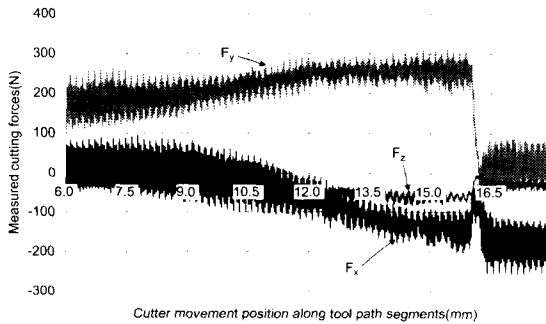


Fig. 3 Transient cut example



(a) Predicted cutting forces



(b) Measured cutting forces

Fig. 4 Predicted and measured cutting forces for the transient cut of Fig. 3

손쉽게 얻을 수 있어 일반 가공에 대해서 가공 표면 오차 3 차원 오차 맵(map) 형태로 예측할 수 있다.

표 1 은 개발된 모델의 검증에 위한 절삭 조건이며, 헬릭스 각이 30°, 공구 상면각이 11° 그리

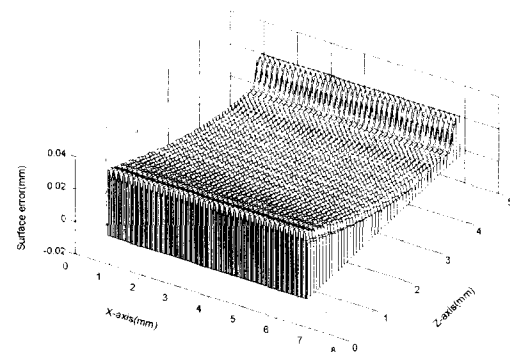
Table 1 Cutting conditions

Test No.	d_a (mm)	d_w (mm)	f_t (mm/tooth)	RPM
1	2.0	5.0	0.0375	1000
3	5.0	5.0	0.0375	1000
7	5.0	2.5	0.0375	1000
17	5.0	5.0	0.0500	1000
18	5.0	5.0	0.0375	800

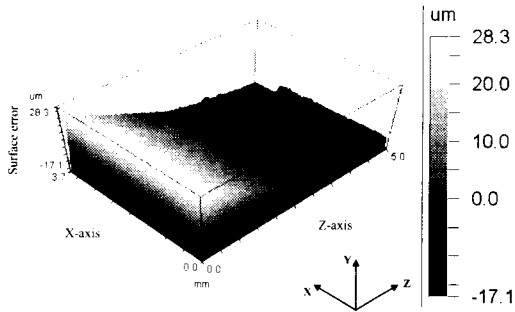
Table 2 Comparison of peak-to-valley of the predicted and measured surface

Test No.	Peak-to-valley of predicted surface error (μm)	Peak-to-valley of measured surface error (μm)	Prediction error(%)
1	33.01	31.00	6.5%
3	47.60	46.04	3.4%
7	37.65	41.06	8.3%
17	61.60	66.31	7.1%
18	58.30	61.17	4.7%

고 직경 10 mm 인 4 날 고속도강(HSS) 공구를 이용하여 수직형 머시닝 센터에서 실험하였다. 공구 동력계(Kistler, type 9257B)를 이용하여 3 축 방향의 순간 절삭력을 측정하였으며, 가공물 재질은 알루미늄 2014-T6 를 사용하였다. 표 2 는 가공 표면 오차의 예측값과 측정값을 비교하여 제시한 것으로 그 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 5 는 표 1 의 Test 7 의 고정된 절삭 조건에 대해서 예측된 표면 오차와 측정된 값을 보여주고 있다. 또한 그림 2 의 가공 상황에 대해 예측된 3 차원 표면 오차 맵이 그림 6 에 나타나 있다.



(a) Predicted surface error



(b) Measured surface error- 3 dimensional plot

Fig. 5 Predicted and measured surface errors for Test 7

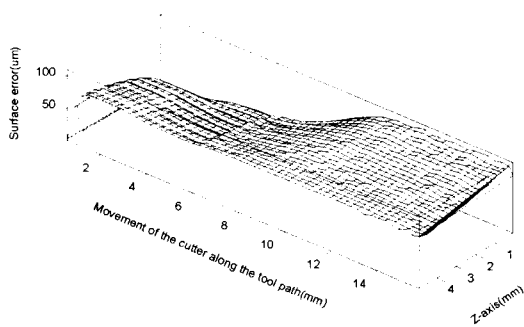


Fig. 6 Predicted surface error map – for the case of Fig. 3

2.3 이송 속도 스케줄링

절삭 조건을 최적화하기 위한 한 방법으로 이송 속도를 변화시킴으로써 절삭력을 조절할 수 있다. 최근 국내의 CAM 소프트웨어 회사에서는 시장 경쟁력을 향상시키기 위해 이송 속도 최적화 방법을 도입하고 있다. 하지만 현재 대부분의 CAM 소프트웨어에서 사용하는 이송 속도 최적화 방법은 피삭재와 공구간의 기하학적 관계를 고려하여 소재 제거량 (MRR: material removal rate)을 일정하게 유지하는 방식이다. 그러나 MRR 을 이용하는 방식은 절삭력의 정확한 조절 및 절삭력 계수의 데이터 베이스화의 견지에서 상당히 불합리한 단점을 지니고 있다. 절삭력은 주어진 절삭 깊이에서 절삭 속도와 이송 속도에 따라 변함으로 같은 MRR 에서도 절삭력의 크기는 상당히 다르게 나타날 수 있기 때문에 이러한 방식은 곧 경쟁력

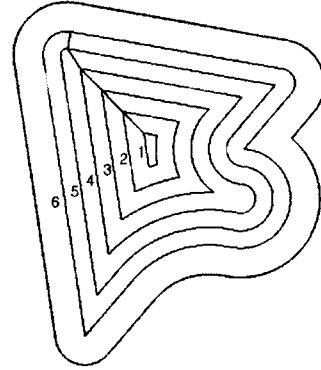


Fig. 7 Workpiece geometry and tool path for pocket machining

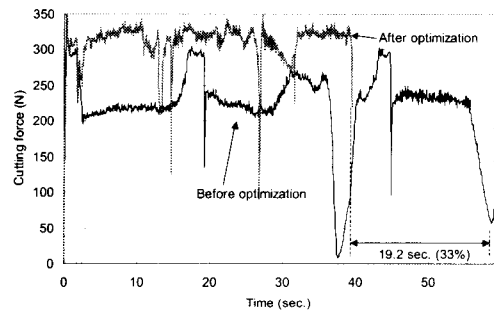


Fig. 8 Comparison of the maximum cutting force before and after feed rate scheduling for loop 5.

을 상실할 것으로 예측된다. 따라서 절삭력 모델을 기반으로 한 이송 속도 스케줄링의 방식이 개발되어야 하며 절삭력 모델이 정확하다면 이송 속도 스케줄링에도 효과적으로 적용될 수 있다.⁽⁷⁾

그림 7 의 가공 형상을 공구 경로 5 를 따라 일정한 이송 속도 150 mm/min 으로 가공할 때와 절삭력 300 N 을 기준 절삭력으로 설정하여 스케줄링된 이송 속도로 가공할 때 절삭력과 가공 시간을 비교하였다. 이때, 스케줄링 방식은 이송방향과 수직 이송 방향의 힘의 최대 합력이 300 N 으로 일정하게 유지되도록 한 것이다. 원래의 NC 코드에 스케줄링된 이송 속도가 부가되면서 새로운 NC 코드가 자동 생성된다. 그림 8 은 스케줄링 후 절삭력이 약 300 N 으로 유지되며 가공시간이 스케줄링 이전보다 33 % 단축되었음을 보여주고 있다.⁽⁸⁾ 사용자가 입력한 기준 절삭력의 크기에 따

라 가공 시간은 더 줄어들 수도 있다.

그림 1 에 소개한 framework 에, 열변형 오차와 연계되어, 3 차원 입체오차의 계산 및 변환행렬 모듈을 추가할 수도 있으며, 이에는 사용자가 공작기계의 기본적인 기구학적 오차를 측정하여 입력하는 모듈이 필요하게 된다. 즉, 제어기오차를 제외한 최종적인 (공작기계 자체 오차를 포함한) 가공오차를 예측할 수 있게 해준다.

3. 가상공작기계의 확장 및 전망

최근에 OAC (Open Architecture Control) 가 대세로 인식되고 조만간 보편화 될 것이라는 기대 하에, 공작기계에서의 HILS (Hardware-in-the-loop system) 개념이 제안되었다⁽⁹⁾. 공작기계에서의 HILS 개념은 공작기계에서 제어기를 제외한 하드웨어 프레임워크를 역학적으로 모델링하여 소프트웨어화하고, 상용의 OAC 를 이와 연결하여 완전한 형태의 가상의 공작기계가 구성되도록 하는 것이다. 이때 상용의 OAC 를 공작기계 프레임 모델과 연결한다는 점에서 HILS 의 개념이 도입된 것으로 볼 수 있다. 그러나 또한 최근 공작기계에 HILS 의 개념을 적용하는데 있어 중요한 또 한가지의 특징은 이에 사용되는 상용의 OAC 가 소프트웨어 NC 형태를 띠는 것이다. 이는 앞으로의 제어기가 사용자 편의성과 기능성을 모두 고려할 때 소프트웨어화 될 것이라는 추세에 맞춘 것으로, 결국에는 공작기계 프레임 모듈 (S/W 1)과 상용 OAC(S/W 2)

가 상호영향을 미치는 구조로 현실세계의 공작기계와 구조적으로도 일치하기 때문에 현실세계에서의 다양한 현상을 표현 할 수 있는 것으로 알려지고 있다⁽¹⁰⁾. 그림 9 는 이러한 HILS 개념을 적용한 가상공작기계의 구조를 개념적으로 보여준다.

이러한 HILS 개념을 도입한 가상공작기계(이후 VMT-HILS, Virtual Machine Tool with Hardware In the Loop Simulation)의 장점은 크게, 공작기계와 개념적으로 동일한 구조를 가지기 때문에 가상공간에서 실제 공작기계와 유사하게 모델링 될 수 있다는 점과 현실의 공작기계가 가진 다양한 현상을 효과적으로 반영할 수 있다는 점이다. 이러한 장점이 가진 역량은 다양한 형태로 나타날 수 있는데, 그 간단한 예로 제어기의 설정과 튜닝, 공작기계의 최적설계, 가상가공을 통한 절삭조건의 최적화 등을 들 수 있겠다.

VMT-HILS 의 또 하나의 핵심적인 적용분야로 DFM 을 들 수 있다.⁽¹¹⁾ 현재까지 산업계에서 활용되고 있는 DFM 은 주로 관련 전문가로 구성된 설계 및 기획조직을 구성하여 생산단계에서 문제가 될 수 있는 사항이나 생산단계에서 효율을 높일 수 있는 사항 중 제품의 설계와 관련된 부분을 설계단계에서 고려하여 제품의 설계에 반영하는 형태를 지녀왔다. 그러나 이에 활용되는 산업계의 전문적인 지식이 주로 현장의 생산단계에서의 경험적인 지식에 치중되어 있음을 고려한다면, 이러한 지식을 체계적이고 이론적으로 접근할 수 있게 하는 VMT-HILS 는 DFM 의 효율적인 정보화를 가

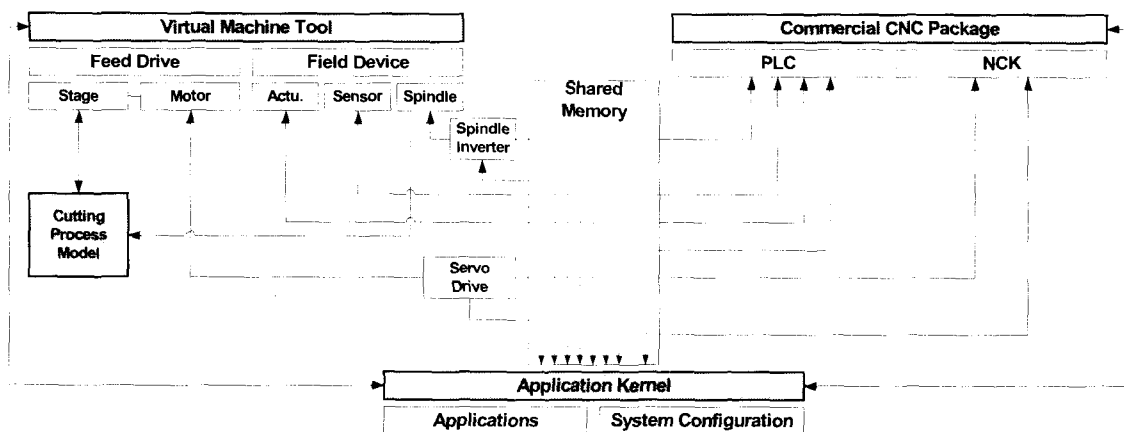


Fig. 9 Schematic diagram for virtual machine tool with HILS concept

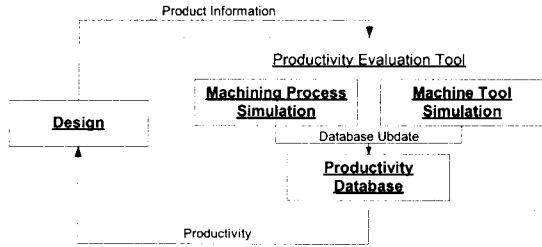


Fig. 10 A DFM system using virtual machine tool technology

능하게 할 수 있다.

제품의 가공단계에서의 절삭공정, 가공오차, 가공시간, 가공가능성 등 다양한 현상을 미리 예측할 수 있다는 점에서 DFM 전문가를 대신 하게 할 수 있다. 그림 10 은 VMT-HILS 를 이용한 DFM 시스템의 구조를 간단히 보여준다. 이 시스템의 핵심사항으로 VMT-HILS 를 이용하여 위에서 언급한 가공성의 평가를 들 수 있다. 이러한 방법은 최근의 산업계에서 제품설계 시 다양한 시뮬레이션 등을 통해 설계변수를 최적화하는 것과는 일맥상통한다는 점에서 현실적이며, 소프트웨어화되고 디지털화될 수 있다는 점에서 미래지향적이라 할 수 있겠다.

4. 결 론

가상 공작기계는 공작기계 전용의 해석 도구로서 활용될 수 있다. 공작기계 사용자는 실제 가공 전에 가공 상황에 대해서 미리 경험 함으로써 잠재적으로 생산성과 정밀도를 향상시킬 수 있다. 또한 숙련자가 아니더라도 최소한의 지식으로 공작기계에서의 가공에 대한 계획을 수립해 나갈 수 있다. 그리고 공작기계 개발자의 경우, 가공 오차 요인을 부분별 그리고 통합적으로 파악할 수 있어 공작기계 개발이나 제어 혹은 보상기의 개발을 위한 도구로써 가상 공작기계 시스템을 활용할 수 있다. HILS 개념을 도입한 가상공작기계는 가상공작기계에 대한 발전된 형태의 기술로서 실제의 공작기계와 매우 유사하게 공작기계를 모델링하는 기술이다. 이 기술은 공작기계 전체에 대한 효과적인 해석 도구로 제시될 수 있으며, 다양한 분야에 활용될 것으로 기대된다. 나아가 공작기계의

정보화 및 디지털화의 측면에서 미래지향적이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Ehmann, K. F., DeVor, R. E., De Meter, E. C., Dornfeld, D., Kapoor, S. G., Ni, J., Rajurkar, K., Shin, Y., and Sutherland, J., "A Framework For a Virtual Machine Tool (VMT)," Trans. of NAMRI/SME, Vol. XXI, pp. 143-148, 1998.
2. <http://mtamri.me.uiuc.edu/testbeds/testbed.intro.html>
3. <http://www.malinc.com/CutPro/index.htm>
4. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
5. Yun, W.S., and Cho, D.W., "An Improved Method for the Determination of 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling," Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol. 16, No. 12, pp. 851-858, 2000.
6. 이상규, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 229-236, 1999.
7. J.H. Ko, W.S. Yun, D.W. Cho, "Off-line feed rate scheduling using virtual CNC based on an evaluation of cutting performance," Computer-Aided Design, 2002, accepted.
8. 이한울, 고정훈, 조동우, "향상된 절삭력 모델 기반의 NC 코드 최적화," 한국정밀공학회 2001 년도 추계학술대회 논문집, 수원, 경희대학교, 26-27, pp. 37-42, 2001.
9. <http://erc.engin.umich.edu/>
10. <http://www.iwb.tum.de/>
11. Geoffrey Boothroyd, "Product design for manufacturing and assembly," Computer-Aided Design, Vol. 26, pp. 505-520