

가상 공작기계의 연구 개발 - Part 1

절삭력 모델, 가공 표면 오차 모델 및 이송 속도 스케줄링 모델

윤원수*, 고정훈**, 조동우***

Development of a Virtual Machine Tool – Part 1

Cutting Force Model, Machined Surface Error Model and Feed Rate Scheduling Model

Won Soo Yun*, Jeong Hun Ko** and Dong-Woo Cho***

ABSTRACT

In this two-part paper, a virtual machine tool (VMT) is presented. In part 1, the analytical foundation of a virtual machining system, envisioned as the foundation for a comprehensive simulation environment capable of predicting the outcome of cutting processes, is developed. The VMT system purposes to experience the pseudo-real machining before real cutting with a CNC machine tool, to provide the proper cutting conditions for process planners, and to compensate or control the machining process in terms of the productivity and attributes of products. The attributes can be characterized with the machined surface error, dimensional accuracy, roughness, integrity and so forth. The main components of the VMT are cutting process, application, thermal behavior and feed drive modules. In part 1, the cutting process module is presented. The proposed models were verified experimentally and gave significantly better prediction results than any other method. The thermal behavior and feed drive modules are developed in part 2 paper. The developed models are integrated as a comprehensive software environment in part 2 paper.

Key Words : Virtual machine tool (가상 공작기계), Virtual machining system (가상 가공 시스템), Attributes of products (가공품의 속성), Cutting process module (절삭 공정 모듈), Application module (응용 모듈)

1. 서론

CNC 공작기계는 제조업체에서 광범위하게 사용되고 있다. 국제적으로 치열한 경쟁 속에서 공작기계에 대한 생산성과 정밀도 향상은 끊임없이 요구되고 있으며 다수의 산업체와 연구 기관들에서 지난 수십 년간 실제적 그리고 이론적인 많은 개발들이 진행되어 왔다. 그러나 여전히 공작기계 사용자와 개발자들은 경험적인 지식과 시행 착오

법(try and error method)에 입각하여 CNC 공작기계를 사용하고 개발함으로 인해 생산성 저하와 낮은 효율로 인한 어려움을 겪고 있다. 이러한 시점에 가상 제조 시스템(Virtual manufacturing system, VMS)⁽¹⁾⁻⁽³⁾이 등장하게 되었으며, 가상 공작 기계 개발은 가상 제조 시스템으로 가기 위한 하나의 중요한 모듈로 자리잡게 된다.

가상 공작 기계(Virtual machine tool, VMT)는 절삭 공정과 다양한 공작기계 요소들의 엄밀한 모델

· 2001 년 3 월 9 일 접수
* 컴퓨터테크 기술연구소
** 포항공과대학교 대학원
*** 포항공과대학교

에 근거하여 사용자가 CNC 공작기계에서의 실제 절삭 이전에 실제와 유사한 가공을 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션하고 이를 토대로 최적의 절삭 조건을 얻고 나아가 정밀도 향상을 위하여 적절히 보상/제어하는 것을 목적으로 한다.

가상 공작기계는 포괄적인 시뮬레이션 환경에서 기계 가공 작업을 수행하고 가공물의 속성들의 관점에서 결과들의 물리적인 예측을 얻을 수 있는 능력을 가져야 한다⁴⁾. 공작기계의 다양한 오차 요인들에 의해 얻어진 가공품의 속성은 치수 정밀도(dimensional accuracy), 가공 표면 오차(machined surface error), 표면 조도(surface roughness) 등으로 최종적으로 표현될 수 있다. 가공품의 속성들은 주로 가공 오차와 공작기계 자체의 고유 오차에 의해 결정되며, 본 연구는 주로 가공 오차에 의한 가공품의 속성을 결과로 제시하는 가상 공작기계를 구현하고자 한다. 이러한 목적을 구현하기 위하여 절삭 가공 공정에 대해서 단순한 공구 경로를 검증하는 기하학적 모델(geometric model)이 아닌 물리적인 모델들(physical model)이 다양하게 개발되어야 하며, 또한 공작 기계 구조의 열변형 모델과 이송계와 같은 주요 파트에 대한 모델들을 통하여 공작기계 사용자와 개발자를 위한 다양한 응용 모델들이 개발되어야 한다.

가상 공작 기계를 이용하여 공작기계 사용자는 가공 상태를 미리 경험함으로써 가공 상황을 예측할 수 있고, 최적의 가공 조건을 손쉽게 산출할 수 있다. 또한 공작기계 개발자는 생산성과 정밀도 향상을 사전에 고려하여 공작기계를 설계하고 개발할 수 있다.

2. 가상 공작기계의 구조

그림 1은 가상 공작기계의 전체적인 모듈 구성을 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 가상 공작기계 시스템은 광범위한 연구 주제를 포함한다. 지금까지 본 연구진에서 개발된 모델들을 중심으로 가상 공작기계에서 요구되는 모델들에 대해 소개하도록 한다.

가상 공작 기계는 크게 소프트웨어 환경에서 구현되는 시뮬레이션 파트와 하드웨어 환경인 온라인 제어/보상 파트로 구분할 수 있다. 일반적인 CAD/CAM 시스템으로부터 입력된 NC 코드는 절삭 조건에 대한 정보(cutting configuration)를 가지

고 있으며 이를 산출할 수 있는 알고리즘이 제공되어야 한다. 절삭 조건에 대한 정보와 더불어 절삭 공정 모델에서 요구하는 절삭 계수값(cutting coefficients)과 공구 런아웃 값들(runout parameters)이 가공 데이터베이스(machining database)로부터 주어지면 절삭 공정 모듈을 통하여 절삭력과 가공 표면 오차를 예측할 수 있다. 또한 허용 오차와 같은 사용자 사양(user specification)에 따라 최적의 절삭 조건을 산출해 낼 수 있다. 한편 동절삭력 모델을 통하여 가공 안정성과 가공성에 대해서도 확인해야 하며 안전한 가공을 위한 가공 조건을 산출해 줄 수 있어야 한다. 대체로 동절삭력 모델에 의한 가공 상태 평가는 황삭(rough cut)에서 주로 사용되며 역학적 절삭력 모델로부터 얻어진 최적의 절삭 조건은 반정삭(semi-finish cut)과 정삭(finish cut)에서 보다 효과적으로 적용될 수 있다.

절삭 공정과는 별도로 고속, 고정밀 가공을 위해서는 열변형에 대한 고려가 필요하며, 열변형 오차의 경우 일반 절삭 공정과는 구별될 수 있다. 공작기계 전체에 대한 열변형 모델로부터 열변형에 의한 오차를 줄이는 모듈이 요구된다. 또한 이송계 모델과 간접 측정된 절삭력을 이용하여 절삭력을 일정한 수준으로 유지할 수 있는 적응 제어 시스템이 개발되며 이를 통해 표면 오차를 보상할 수 있다.

이러한 포괄적인 절삭 공정 및 공작기계 자체에 대한 모델로부터 얻어진 결과로부터 실제 가공 이전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 가공품의 속

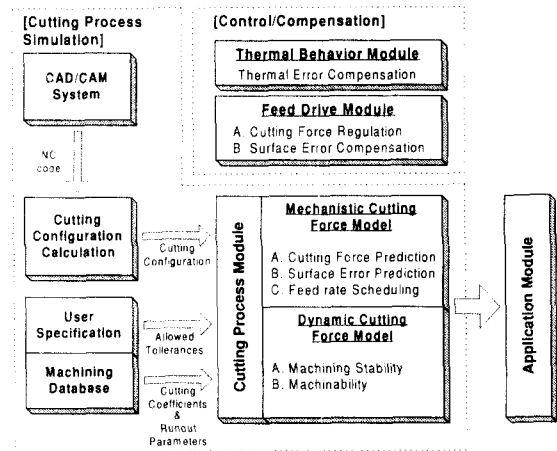


Fig. 1 Framework of VMT

성을 이해할 수 있으며 최적의 안정한 가공 조건을 얻어내고 그리고 적절한 보상에 의해 가공 성능과 정밀도를 향상시킬 수 있다.

3. 절삭 공정 모델

Kimura⁽⁵⁾는 제품과 공정 모델링을 가상 제조 환경을 위한 핵심으로 고려하였다. 본 연구에서도 가상 공작 기계의 구현을 위하여 그림 1에 나타난 절삭 공정에 대한 모델들이 우선적으로 개발되어야 한다. 일반적인 절삭 공정에 대해서 가공 상태를 모니터링하고 예측하기 위해서는 다양한 절삭 조건에 대해서 효과적으로 절삭 상태를 예측할 수 있어야 하며 단일 공구 경로에 제한적이지 않아야 한다. 본 연구는 일반적인 공정에 대해서 절삭력과 가공 표면을 예측하고, 이송 속도를 계획하는 것을 목적으로 한다.

먼저 상용의 CAM 시스템의 NC 코드로부터 가공 깊이, 가공 폭, 날당 이송량, 공구의 지령 위치, 그리고 공구 진입각 등을 포함하는 절삭 구성이 산출되어 절삭 공정 모델로 입력된다. 또한 사용자 입력에 의한 허용 오차 값(tolerances), 절삭 데이터베이스로부터의 절삭 계수 값과 런아웃 값들이 절삭 공정 모델로 입력된다.

절삭 공정 모델은 크게 지령 이송 값, 공구 휨과 런아웃에 의한 공구 중심 좌표의 변화를 고려한 역학적 절삭력 모델과 공구와 공작물의 상대 변위를 고려하는 동절삭력 모델로 구분할 수 있다.

3.1 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 있다^(6,7).

본 연구는 포켓 가공과 같은 일반적인 절삭 공정에 대해서 절삭력을 예측하고 가공 표면을 예측하도록 한다. 이를 위해 다양한 절삭 조건 혹은 가공 중에 변화하는 절삭 조건에 대해서 절삭 계수값이 효과적으로 결정될 수 있어야 한다.

3.2 절삭력 예측

본 연구팀에서는 앞서 발표한 논문에서 절삭 계수 값을 효과적으로 결정하는 방법을 제시하였다. 요약하면, 절삭 계수값은 주어진 공구와 가공물에 대해서 재료의 물성치인 것으로 고려할 수 있다. 따라서 절삭 조건이 변하더라도 절삭 계수값은 변하지 않으며, 절삭 계수 값은 절삭력과 미변형 칩두께의 선형적인 관계를 나타내는 재료의 물성치로 고려될 수 있음이 개발된 모델과 절삭 실험으로부터 검증되었다^(8,9). 그러나 미변형 칩두께가 아주 작은 경우에 발생하는 치수 효과(size effect)⁽¹⁰⁾에 의해서 절삭 계수 값에서 비선형성이 존재하게 되며, 보다 정밀한 절삭력 예측을 위하여 절삭 계수 값과 미변형 칩두께의 비선형 관계식을 유도하였다. 이를 통하여 기존의 연구 결과들에 비해 손쉽게 가공 데이터베이스를 구축할 수 있다. 다시 말해서 공구와 공작물이 주어지면 절삭 조건에 관계없이 절삭 계수 값들을 데이터 베이스로부터 얻어낼 수 있는 것이다.

하나의 예로 그림 2에 나타난 것과 같은 코너 절삭에 대해서 절삭력을 예측한 결과가 그림 3에 나타나 있다.

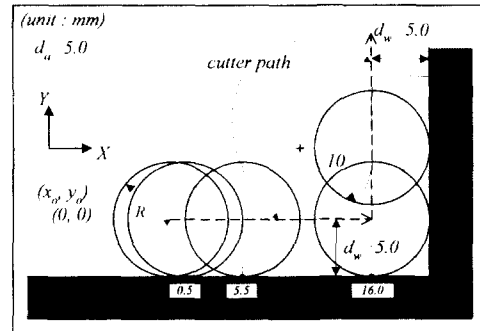
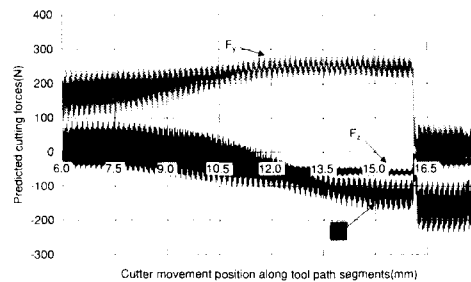
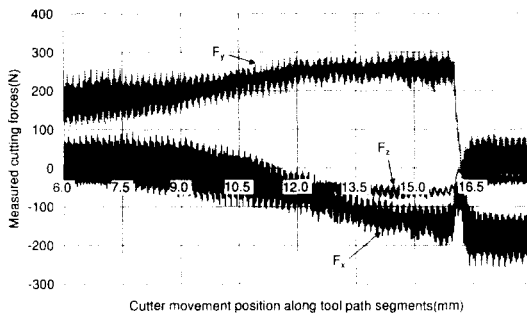


Fig. 2 Transient cut example



(a) Predicted cutting forces



(b) Measured cutting forces

Fig. 3 Predicted and measured cutting forces for the transient cut of Fig. 2

3.3 가공 표면 예측

가공 표면에 남겨진 오차에 대한 해석과 예측은 엄밀한 절삭력 모델에 기초해서 수행된다. 공구의 힘과 런아웃은 이러한 표면 형상 오차의 주요인이다.⁽¹¹⁾ 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 손쉽게 얻을 수 있어 일반 가공에 대해서 가공 표면을 3 차원 오차 맵(map) 형태로 예측할 수 있다.

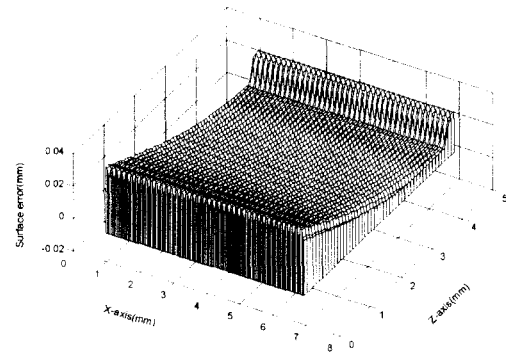
Table 1 Cutting conditions

| Test No. | d_a (mm) | d_u (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 |

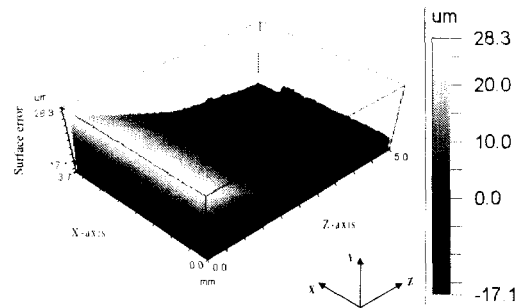
Table 2 Comparison of peak-to-valley of the predicted and measured surface

| 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% |

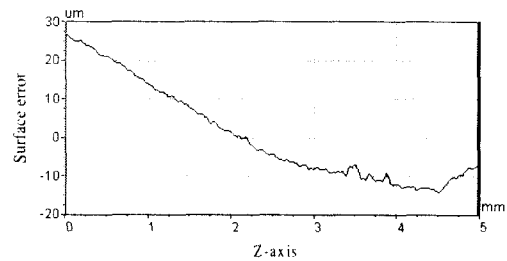
표 1 은 개발된 모델의 검증을 위한 절삭 조건이며, 헬릭스 각이 30°, 공구 상면각이 11° 그리고 직경 10mm 인 4 날 고속도강(HSS) 공구를 이용하여 수직형 머시닝 센터에서 실험하였다. 공구 동력계(Kistler, type 9257B)를 이용하여 3 축 방향의 순간 절삭력을 측정하였으며, 가공물 재질은 알루미늄 2014-T6 를 사용하였다.



(a) Predicted surface error



(b) Measured surface error- 3 dimensional plot



(c) Measured surface error- 2 dimensional plot

Fig. 4 Predicted and measured surface errors for Test 7

표 2는 가공 표면 오차의 예측값과 측정값을 비교하여 제시한 것으로 그 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 표 1의 Test 7의 고정된 절삭 조건에 대해서 예측된 표면 오차와 측정된 값을 보여주고 있다. 또한 그림 2의 가공에 대한 3차원 표면 오차 맵이 그림 5에 나타나 있다.

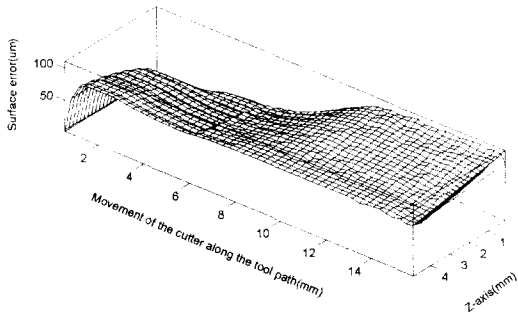


Fig. 5 Predicted surface error map – for the case of Fig. 2

4. 이송 속도 스케줄링

NC 코드를 이용하여 가공할 때 과도한 절삭 조건이 발생하는 구간에서 공구 파손 및 가공 표면의 질이 떨어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 작업자의 경험 및 가공 핸드북에 의존하여 보수적인 절삭 조건을 선정하게 된다. 이송 속도 스케줄링을 통해 NC 코드에 대해 이송 속도를 조정하는 방식이 연구되어 왔지만 일반적인 경우에 대해 절삭 조건을 최적화한 사례는 찾아 볼 수 없다. 즉 국내외의 기존 CAM 소프트웨어에서는 기하학적 형상만을 고려하여 이송 속도 스케줄링을 수행한다.

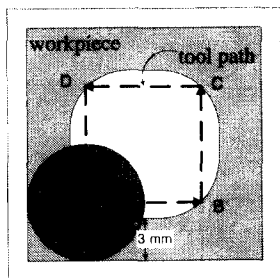


Fig. 6 Tool path of a simple rectangular pocket

절삭력 모델 기반의 이송 속도 최적화 모듈을 CAM 시스템에 적용하거나 DNC로 개발한다면 CAM의 수준을 향상시킬 수 있다. 또한 평 엔드 밀링에서 반정삭이나 금형 가공에서 절삭력 모델 기반의 이송 속도 스케줄링은 정삭 단계를 줄일 수 있으므로 생산성을 향상시킬 수 있다.

그림 6은 단순한 정사각형 포켓을 가공할 때의 공구 경로이다. 반경방향 절삭 깊이는 3mm이며 그 외 절삭 조건은 표 1의 Test 1과 동일하다. 그림 7은 공구 경로를 따라서 예측된 절삭력을 나타내고 있다. 그림 8은 좌표 변환을 통하여 공구 진행 방향(d), 크로스 피드(cross feed) 방향(n), 그리고 축방향(a)의 상대 좌표계로 변환한 것이다. 가공 중에 관심을 가지는 절삭력 성분은 크로스 피드 방향의 절삭력이며 이 성분이 가공 표면 오차에 직접적인 영향을 미치게 된다.

그림 9는 평균 절삭력을 사용자가 100N으로 제한 했을 경우의 이송 속도에 대한 계획 값을 나타내고 있으며 그림 10은 계획된 이송 속도를 적용하였을 때, 그림 6의 첫번째 경로(A-B)에서 예측된 절삭력으로 기준 절삭력 100N을 잘 추종하고 있다.

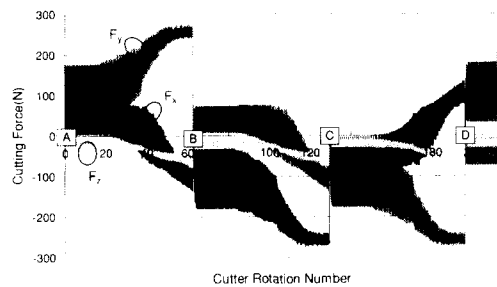


Fig. 7 Cutting force in x-y-z coordinate

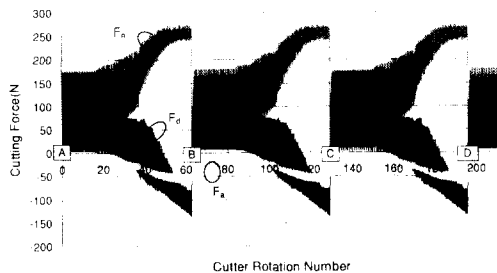


Fig. 8 Cutting force in d-n-a coordinate

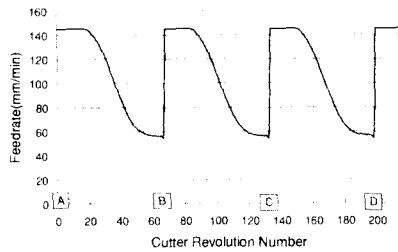


Fig. 9 Scheduled feedrate: reference average cutting force = 100 N

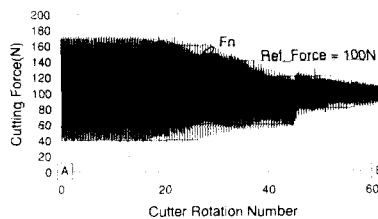


Fig. 10 Predicted cutting force with scheduled feedrate

5. 결론

본 논문에서는 가상 공작기계의 전반적인 구조에 대해서 소개하고 가상 공작기계의 주요 모듈에 대한 내용과 결과들을 제시하였다.

가상 공작기계의 핵심이라고 할 수 있는 절삭 공정 모듈에서는 실질적인 모델들을 통하여 고정된 절삭 조건 뿐만 아니라 절삭 조건이 변하는 가공 조건에 대해서 절삭력과 가공 표면 오차들이 예측되었으며 실험값과의 비교를 통하여 검증되었다. 또한 기준 절삭력을 추종하는 이송 속도를 계획 함으로서 최적의 가공 조건을 가변적으로 결정할 수 있다.

본 연구의 절삭 공정 모델은 가공 조건이 변하는 공정에 대해서 가공 상황을 손쉽게 정확히 예측 함으로서 다양한 응용 모델을 손쉽게 개발할 수 있으며, 그 적용 범위를 확장할 수 있다.

후 기

본 연구는 ㈜터보테크 주관의 1999년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제와 ㈜대우중공업 주관의 1998년도 공업기반기술개발사업의 위탁과제 그리고 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국제공동연구과제(98-I-01-03-A-023)의 지원으로 수행되었으

며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Owen, J. V., "Making Virtual Manufacturing Real," *Manufacturing Engineering*, pp. 33-35, Nov., 1994.
- Onosoto, M. and Iwata, K., "Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models," *Annals of the CIRP*, Vol. 42 No. 1, pp. 475-478, 1993.
- Iwata, K., Onosoto, M., Teramoto, K., and Osaki, S., "A Modelling and Simulation Architecture for Virtual Manufacturing System," *Annals of the CIRP*, Vol. 44 No. 1, pp. 399-402, 1995.
- 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.
- Kimura, F., "Product and Process Modeling as a Kernel for Virtual Manufacturing Environment," *Annals of the CIRP*, 42/1, pp.147-150, 1993.
- 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.
- Altintas, Y., and Spence, A. D., "End Milling Force Algorithms for CAD Systems," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 31-34, 1991.
- Yun, W.S., and Cho, D.W., "An improved cutting force model considering the size effect in end milling," *ASME IMECE*, Orlando, Florida, pp.223-229, Nov. 5-10, 2000.
- 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.
- Boothroyd, G., and Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker Inc., p. 83, 1989.
- 이상규, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제 16 권, 제 4 호, pp. 229-236, 1999.