

가상 공작기계의 연구 개발- Part 2 동절삭력 모델, 열적 거동 모델, 이송계 모델 및 통합 소프트웨어

고정훈*, 윤원수**, 강석재***, 조동우****, 안경기*****, 윤승현*****

Development of a Virtual Machine Tool – Part 2 Dynamic Cutting Force Model, Thermal Behavior Model, Feed Drive Model and Comprehensive Software Environment

Jeong Hun Ko *, Won Soo Yun **, Seok Jae Kang***, Dong-Woo Cho****, Kyung Gee Ahn*****,
and Seung Hyun Yun*****

ABSTRACT

In Part 2, dynamic cutting force model, thermal behavior model, and feed drive model are presented for development of a virtual machine tool. Some relevant results with brief descriptions for each model are presented to verify the proposed models. Experimental results for each model agreed well with the estimated ones. The developed models in this two-part paper are partially integrated as a comprehensive software environment.

Key Words : Virtual machine tool (가상 공작기계), Dynamic cutting force model (동절삭력 모델), Thermal behavior model (열적 거동 모델), Feed drive model (이송계 모델), Comprehensive software environment (포괄적인 소프트웨어 환경)

1. 서론

현재 대부분의 산업 영역에서 CAE 기술의 역할은 증가하고 있다. 차량 동역학 해석용 소프트웨어인 ADAMS, DADS 와 FEM 해석용 소프트웨어인 ANSYS, IDEAS 뿐만 아니라 플라스틱 사출 전용 소프트웨어인 CMOLD, MOLDFLOW 등 CAE 기술은 확대되고 있다. 하지만 절삭 가공에 있어서는 해석용 소프트웨어가 존재하지 않는다. 기존의 국내외 CAM 및 공작 기계 관련 소프트웨어는 절삭 가공에서 가공성과 생산성에 영향을 미치는 절삭력, 가공 표면 그리고 가공 안정성과 같은 절

삭 성능을 예측하고 평가하는 기능을 가지고 있지 못하다. 지금까지 많은 연구들이 각각의 개별 모델 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 공작 기계에서 행해지는 가공 공정은 다양한 현상이 복합적으로 발생하기 때문에 가공 공정에 대한 모델과 기계의 파트별 모델을 통하여 통합적으로 접근하여 오차를 예측하고, 그 오차에 대응하는 보상/제어 기법들을 제시하여야만 한다⁽¹⁾.

본 논문에서 제시하는 가상공작기계의 구조는 그림 1 과 같다. 현재까지 개발된 모델들은 크게 절삭 공정 모델과 보상/제어 모듈이며 지속적인 개발을 통해 모델들을 추가할 계획이다. 가상 공

2001년 3월 9일 접수
* 포항공과대학교 대학원
** ㈜ 터보테크 기술연구소
*** ㈜ 소프트웨어
**** 포항공과대학교
***** S. M. Wu Manufacturing Research Center (WuMRC)
***** ㈜ 한라공조

작 기계의 절삭 공정 모듈은 주어진 NC 코드와 사용자가 입력하는 공작 기계 정보 및 가공 정보에 대하여 가공 상태를 미리 점검하며 최적의 절삭 조건을 사용자에게 제공한다. 가상 공작 기계의 보상 제어 모듈은 열변위 보상을 위한 열적 거동 모듈과 적응 제어 모듈로 구성되며 정밀도 향상을 위하여 적절히 보상/제어하는 것을 목적으로 한다.

본 논문의 Part 1⁽²⁾에서는 가상 공작기계에 대한 개념과 구조를 설명하였고, 절삭 공정 모델과 이송 속도 스케줄링 모듈을 제시하였다. Part 2에서는 동절삭력 모델, 열변위 모델 그리고 이송계 모델에 대한 개괄적인 내용과 결과들을 중심으로 소개하며, 그리고 부분적으로 통합된 가상 공작기계 소프트웨어 환경에 대한 결과를 제시하도록 한다.

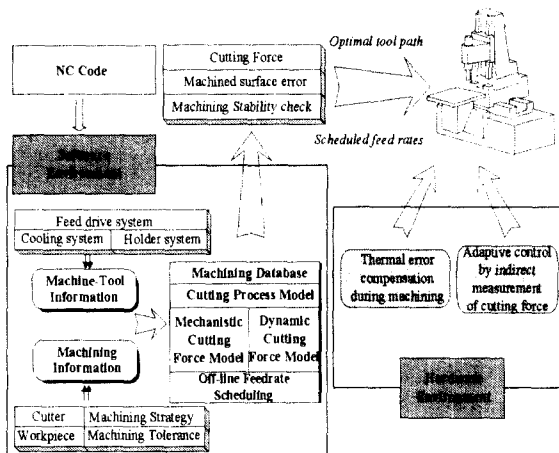


Fig. 1 Structure of a Virtual Machine Tool

2. 동절삭력 모델

엔드밀은 공구가 회전함에 따라 절삭 날이 주기적으로 절삭에 참여하게 된다. 즉, 다절인(multi-point tool) 공구가 회전함에 따라 단속 절삭을 하게 되고 절삭하는 동안 칩의 두께가 계속 변하게 된다. 동절삭 모델은 이로 인해 발생하는 진동에 의한 공구와 가공물의 상대 변위로부터 절삭력 변동 성분을 해석하여 절삭력의 동적 특성을 해석하고자 하는 것이다⁽³⁾.

구조 동역학과 절삭력 모델을 토대로 한 절삭 시스템에 대한 모델이 우선적으로 개발된다. 절삭

이 진행되면서 절삭력이 공구에 가해지면 공구의 상대 운동이 발생하게 된다. 이러한 상대 운동은 다시 절삭력 모델에 반영되어 절삭력의 변화를 유발시키고 이는 다시 상대 운동을 유발하는 형태를 취하게 된다. 공구의 상대 운동은 수치적분으로 구했으며 계산의 정밀도를 유지하면서 고계 도함수를 필요치 않는 장점을 가진 4 차의 Runge-Kutta 방법을 사용하였다⁽⁴⁾.

동절삭력 모델로부터 확장할 수 있는 응용 모듈은 가공 안정성(machining stability)에 대한 예측과 가공성(machinability)에 대한 평가이다.

가공 안정성은 가공 중 chatter 발생 유무를 실제 가공 이전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 예측하는 것을 의미한다. 반면 가공성은 chatter와 같은 극한적인 상황이 아니라도 공구의 지나친 상대 운동에 의해 과도하게 발생하게 되는 표면 오차로 인한 가공 자체의 부실함을 평가하는 것이다. 이는 사용자의 허용 값에 의해 평가될 수 있다. 대개의 경우 chatter 발생에 대한 판별은 고정된 절삭 조건의 단일 공구 경로에 대해서 일종의 로브 다이어그램(lobe diagram)을 만들어 두고서 특정한 절삭 조건을 피하고자 하는 연구가 대부분이다. 그러나 일반 가공에서 흔히 발생하는 코너 가공과 같은 경우에는 로브 다이어그램에서 제시하는 절삭 조건보다 경한 조건에 대해서도 chatter가 발생할 수 있으며⁽⁵⁾, 본 연구는 보다 실제적인 상황을 고려하여 절삭 조건이 변하는 상황에 대해서 chatter 혹은 과도한 진동에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과로부터 코너 가공과 같은 과도 영역에서는 고정된 절삭 조건의 단일 경로 가공에서 가공 안정성에 차이가 있음을 확인할 수 있었다⁽⁶⁾.

그림 2는 코너 가공에서의 chatter가 발생한 경우를 보여주고 있다. 이 실험에 사용된 공구는 지름 20mm의 고속도강이며 가공물 재질은 알루미늄 2014-T6이다. 표 1에 가공 조건이 나타나 있다. 일반적으로 코너 가공의 경우 절삭 폭이 변하여 공구 경로가 바뀌는 지점에서는 슬롯 가공 형태로 절삭 폭이 커지게 된다. 따라서 표 1의 Case A는 절삭 폭이 10mm에서 20mm로 증가하게 된다. 그림 3은 절삭 폭이 20mm로 고정되어 있는 직선 가공에서 측정된 절삭력 값이다. 그림 2와 3에서 알 수 있는 바와 같이 그림 3의 단일 경로에서는 chatter가 발생하지 않지만, 그림 2과 같이 절삭 조건이 지속적으로 증가하는 경우에는 그림

3 과 같은 절삭 조건에 도달하기도 전에 채터가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 4 와 5 는 그림 2 과 그림 3 의 조건에 대해서 예측된 절삭력 값이다. 예측 결과에서도 실험과 동일하게 단일 경로 일 경우(그림 5)에는 채터가 발생하지 않지만, 과도 영역인 경우(그림 4)에는 채터가 발생하는 것을 알 수 있다⁽⁶⁾.

Table 1 Cutting conditions

	Cut Type	Width of cut
Case A	Corner cut	10mm → 20 mm
Case B	Straight cut	20mm

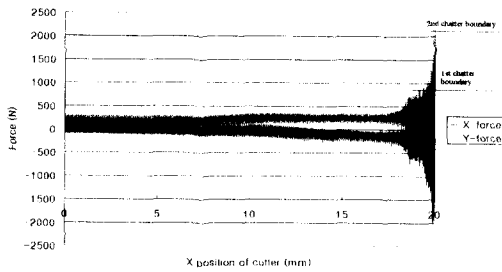


Fig. 2 Measured cutting forces in the corner for Case A

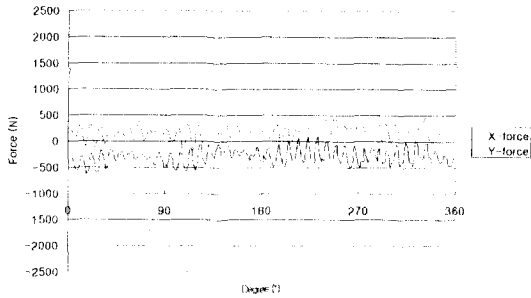


Fig. 3 Measured cutting forces in the straight path for Case B

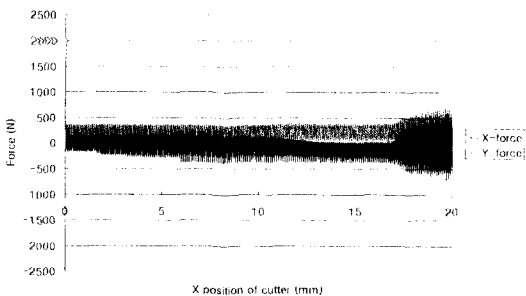


Fig. 4 Predicted cutting forces for in the corner Case A

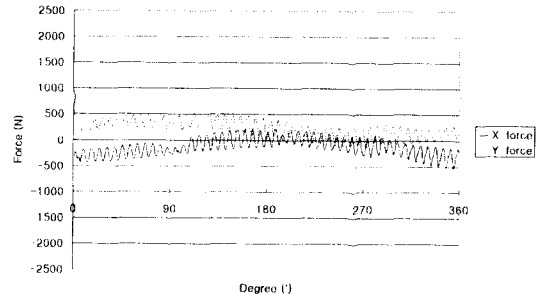


Fig. 5 Predicted cutting forces for in the straight path Case B

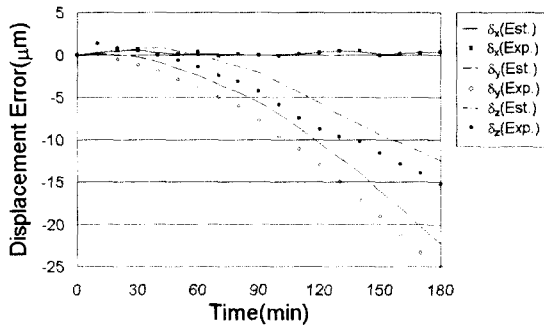
3. 열적 거동 모델

공작기계의 정밀도에 대한 성능은 공구와 공작물 사이의 상대 변위에 대한 오차로 정의되며 특히 정밀 가공에 있어서는 다양한 오차들 중에서 열변형에 의한 오차가 전체의 40~70%를 차지한다. 열변형을 예측하고 이를 줄이기 위하여 공작기계의 열 대칭적 재설계, 열원의 분리, 열변형 오차의 보상 등 여러 가지 방법들이 개발되어 왔다. 점차적으로 공작기계의 열변형 오차를 예측하는데 있어서 실험적으로 구해진 모델들이 보다 효과적이라고 알려지고 있다⁽⁷⁾. 그러나 공작기계가 실제로 공작물을 가공할 때 발생하는 열변형 오차를 측정하거나 예측하는 연구는 극히 드물다. 본 연구에서는 공작기계가 실제로 공작물을 가공할 때 발생하는 열변형 오차를 측정할 수 있는 측정 시스템을 제작하고, 이들 측정된 데이터를 이용하여 신경 회로망 기법을 적용하여 열변형 오차를 예측할 수 있는 시스템을 구현하였다⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

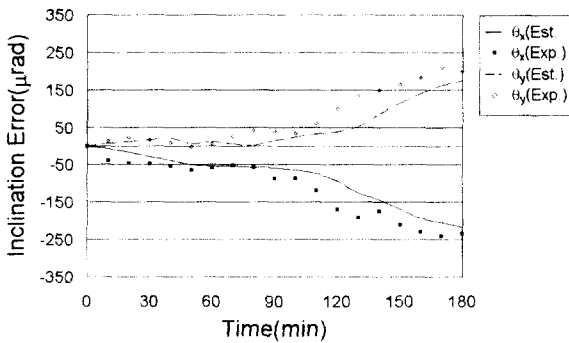
실험은 대우중공업의 머시닝 센터(ACE-V30)를 대상으로 하였으며, 5 가지 경우에 대해서 수행하였다. 4 가지 경우에 대해서 주어진 가공 조건과 측정 시스템으로부터 구하여진 열변위 오차 성분을 가지고 신경회로망에 근거한 오차 예측 모델을 학습시켰고, 나머지 한 경우에 대해서는 가공 조건을 변화시키면서 신경 회로망 모델을 적용하여 학습하지 않은 경우에 대한 공작기계의 열변형 오차를 추정하여 성능을 평가하였다. 그림 6 은 실제 측정값으로부터 구한 열변위 오차와 신경 회로망 모델로부터 추정한 오차를 비교하여 나타내었다. 그림 6(a)는 변위 오차를 그리고 그림 6(b)는 각도

오차를 각각 보여주고 있다. 비교적 정확히 열변위 오차를 추정하고 있음을 알 수 있다⁹⁾.

신경회로망을 이용한 열변형 오차 예측 모델을 보다 다양한 경우에 대하여 학습시킨다면 학습 대상인 공작기계에 대해서 실제 가공 이전에 보다 일반적인 가공 조건 하에서도 제시된 모델만으로 열변형 오차를 가상적으로 구할 수 있으며, 열변형 오차에 대한 대책을 사전에 마련할 수 있다.



(a) Displacement errors

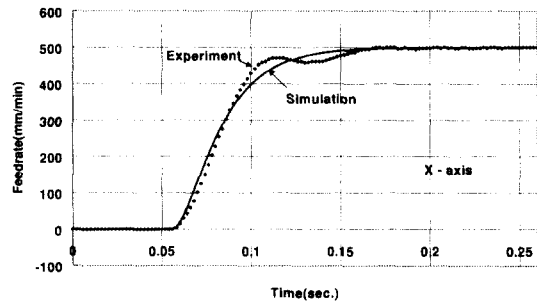


(b) Inclination errors

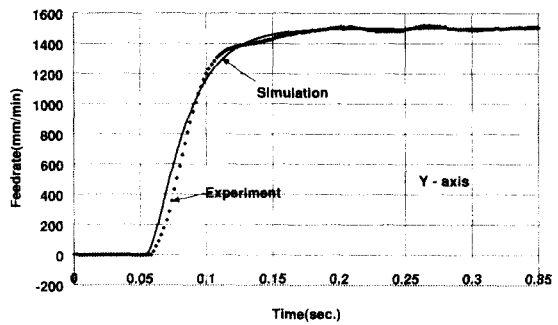
Fig. 6 Comparison between the experiment and estimation

4. 이송계 모듈

이송 속도와 절삭력과의 관계를 나타내는 전달함수를 모델링함으로써 이송 속도를 포함하는 절삭 조건에 따른 절삭력의 변동 상태를 예측할 수 있다. 이 전달함수를 이용하여 절삭력 추종 제어 시뮬레이션을 수행하여 적절한 제어 방안을 도출할 수 있다. 실제 공작 기계에 대해서 절삭력 추종 제어를 적용하기 전에 다양한 제어 기법을



(a) Step response of X-axis, 500mm/min



(b) Step response of Y-axis, 1500mm/min

Fig. 7 Comparison of experiment and simulation results

시뮬레이션으로 확인하여 가장 적절한 제어 방안을 찾고서, 실제 공작기계에서 가공을 수행하며 제어 기법을 적용 함으로서 그 타당성을 검증할 수 있다. 이를 위해서 이송 속도와 절삭력의 전달 함수, 절삭력 추종 제어 시뮬레이션, 절삭력 간접 측정 그리고 절삭력 추종 제어의 검증의 내용들이 연구되어야 한다.

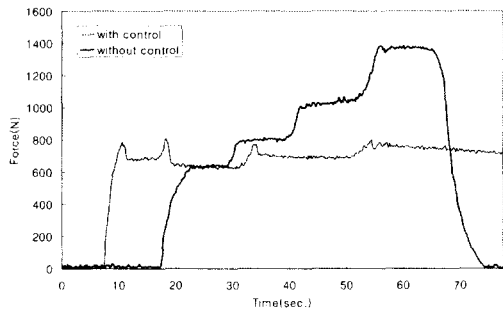
기존의 공구 동력계를 이용하여 절삭력을 측정하는 방법이 과도한 비용을 요구하고, 실제 산업 현장에 적용하기에 까다롭기 때문에 본 연구에서는 이송 모터의 전류로부터 절삭력을 간접적으로 측정하는 방법을 개발하였다¹⁰⁾.

그림 7은 본 연구에서 개발된 모델과 실제 이송계의 계단 응답(step response)를 보여주고 있다. X, Y 각 축에서 기준 이송 속도가 다른 경우에도 비교적 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과들을 통하여 가공 시의 정확한 이송 속도를 추적할 수 있으며, 절삭 공정 모델의 정확성을 더할 수 있다.

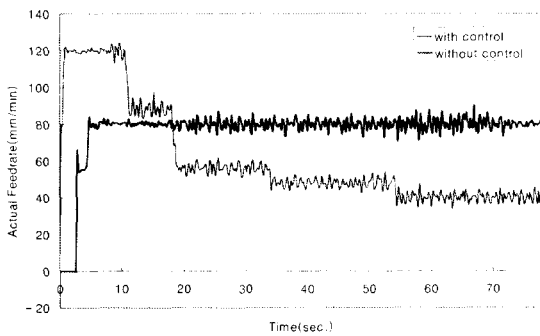
본 연구에서는 이송 모터 전류로부터 간접 측

정된 절삭력과 퍼지 로직을 이용하여 기준 절삭력을 추종하도록 하는 모듈을 개발하였다. 퍼지 로직을 이용한 제어기⁽¹¹⁾는 변수 추정을 통한 이산 비례 적분 미분 제어기에 비해 같은 조건에서 보다 나은 반응 특성을 보였다. 그러나 다양한 절삭 조건에 대해서 퍼지 제어기의 입력값과 출력값에 대한 스케일링 인수들을 다시 결정해 주어야 하는 불편함이 있다. 이를 위해 퍼지 제어기에 스케일링 인수의 실시간 변경을 적용하였다⁽¹⁰⁾.

한편 가공 면에 수직한 절삭력 만을 제어 함으로서 공구의 휨으로 인해 발생하는 가공 면의 오차를 제어할 수 있다. X 축으로 이송 시, 가공 전의 정지모터 전류를 측정하고 이 값을 기준으로 가공면에 수직한 Y 방향 절삭력을 제어했을 때 그림 8(a)와 같이 $\pm 100N$ 이내로 제어가 되었으며, 그 때의 실제 이송 속도들을 그림 8(b)에 나타내었다. 이러한 제어를 통하여 가공 표면의 오차가 50% 이상 줄어들었다.



(a) Forces normal to machined surface



(b) Comparison of feed rates
Fig. 8 Experimental results

5. 가상 공작기계 시스템의 통합 및 소프트웨어 개발

가상 공작 기계의 모든 기계작동상황 및 거동 특성은 최종적으로 절삭 성능 평가 및 가공 표면 품질의 차원에서 해석되어야 한다. 본 논문은 절삭력 예측, 공작 기계의 이상적인 거동인 채터 예측, 열적 거동 모델, 이송계 모듈, 그리고 가공 표면 오차 예측 등을 통해 가상 공작 기계의 목적을 잘 충족해 가고 있으며 앞으로 여러가지 모듈을 추가함으로써 가상 공작 기계의 형태를 완성할 계획이다.

개발된 모델들은 주어진 가공 조건 및 NC 코드에 대해서 사용자의 해석 대상 및 목적에 따라 독립적으로 기능을 수행할 수도 있으며 함께 사용될 수도 있다. 모델들을 함께 사용할 경우의 예를 들면 절삭력 예측 모델을 통해 주어진 NC 코드 대해 절삭력을 예측하여 이송 속도 스케줄링을 수행한 후 수정된 NC 코드로 가공할 때 절삭력 간접 측정과 적응 제어 기법을 적용한다면 가장 안정적이고 최적화된 가공 상태를 유지할 수가 있다.

현재까지 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.

아래의 그림 9는 가상 공작기계 소프트웨어의 한 화면을 보여주고 있다. 그림 9에서 왼편은 가공 상황 모니터링, 오른쪽 상단은 가공 중에 예측

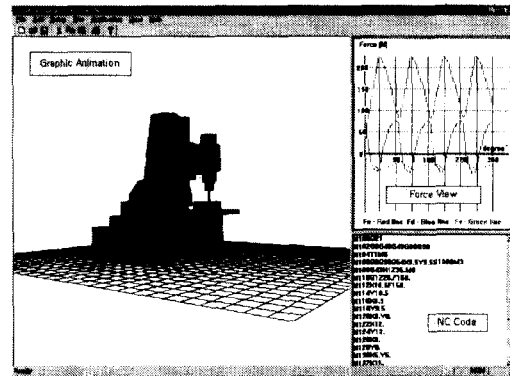
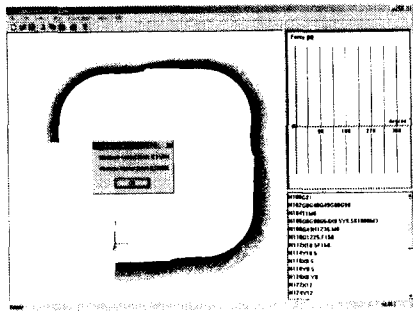


Fig. 9 Main screen of a virtual machine tool



(maximum error = 118 μm , minimum error = 2 μm)
 Fig. 10 Three-dimensional error map of a machined surface

된 절삭력, 그리고 하단은 가공 중인 NC 프로그램을 보여주고 있다. 그림 10은 한 예로 포켓 가공 후 예측된 가공 표면의 3차원 오차 맵(map)을 보여주고 있다.

6. 결론

본 논문은 Part 1 과 Part 2 로 구분하여 가상 공작기계에 대하여 개괄적으로 소개하였다. 가상 공작기계는 공작기계 전용의 해석 도구로서 활용될 수 있다. 공작기계 사용자는 실제 가공 전에 가공 상황에 대해서 미리 경험 함으로서 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 도구로서 가상 공작기계 시스템을 활용할 수 있다.

본 연구에서는 현재까지 많은 모델들을 개발하였으며 개별적으로 우수한 성능을 보이고 있다. 향후 이러한 모델들을 통합 평가할 수 있는 시스템을 구축 할 것이며, 공작기계에서의 가공에 있어 오차에 대한 분석 자료를 만들어 내는 시스템으로 나아가야 한다.

후 기

본 연구는 (주)터보테크 주관의 1999년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제와 (주)대우중공업 주관의 1998년도 공업기반기술개발사업의 위탁과제 그리고 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국제공동

연구과제(98-I-01-03-A-023)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Ehmman, K. F., DeVor, R. E., De Meter, E. C., Dornfeld, D., Kapoor, S. G., Ni, J., Rajukar, 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. 윤원수, 고정훈, 조동우, "가상 공작기계의 연구 개발- Part 1," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 11, pp. 74-79, 2001.
3. Takata, S., Tsai, M. D., and Sata, T., "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation using a Workpiece Model," Annals of the CIRP, Vol. 38(1), pp. 417-420, 1989.
4. 황철현, 조동우, "엔드밀링에서의 동절삭력 모델을 이용한 채터예측," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 2, pp.104-115, 1999.
5. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudio, C., "New NC Routines for Quality in Milling," Annals of the CIRP, Vol.40/1, pp. 517-521, 1990.
6. Kang, S.J., Cho, D.W., and Chun, C.K., "Evaluation Stability of a Transient Cut during Endmilling using the Dynamic Cutting Force Model," Int. Jour. of the KSPE, Vol. 1, No. 2, pp. 67-75, 2000.
7. Yang, S., Yuan, J., and Ni, J., "The Improvement of Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by CMAC Neural Network," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 4, pp. 527-537, 1996.
8. 이강인, 조동우, "수정된 신경망을 이용한 공작기계의 열변형 오차 예측모델 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, 서울, 고려대학교, pp. 226-230, 1999.
9. Ahn, K.G. and Cho, D.W., "In-process Modeling and Estimation of Thermally Induced Errors of a Machine Tool During Cutting," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.15, pp.299-304, 1999.
10. Yun, S. H., "Adaptive Control of Milling Force by Indirect Measurement of Cutting Forces," M.S Thesis, POSTECH, 1999.