

◆ 특집 ◆ 기계장비 정밀도 시뮬레이션 기술

기계장비 정밀도 시뮬레이션 기술 개발

Development of an Accuracy Simulation Technology for Mechanical Machines

박천홍^{1,✉}, 황주호¹, 이찬홍¹, 송창규¹
Chun Hong Park^{1,✉}, Jooho Hwang¹, Chan Hong Lee¹ and Chang Gyu Song¹

¹ 한국기계연구원 초정밀기계시스템연구소 (Department of Ultra Precision Machine & System Lab., KIMM)
✉ Corresponding author: pch657@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7117

Manuscript received: 2011.1.28 / Accepted: 2011.2.1

Authors are carrying out a national project which develops an accuracy simulation technology of mechanical machines to predict the stiffness and accuracy of machine components or entire machine in the design stage. Analysis methods in this technology are generalized to achieve the wide applicability and to be utilized as a web based platform type. In this paper, outline of the project such as concept, aim and configuration is introduced. Contents of the research are also introduced, which are composed of four main research fields; structural dynamics, linear motion analysis, rotary motion analysis and control and vibration analysis. Finally, a future plan is presented which is made up with three stages for the advance toward an ultimate manufacturing tools.

Key Words: Accuracy Simulation (정밀도 예측), Mechanical Machine (기계장비), Structural Dynamics (구조동역학), Linear Motion Error (직선운동오차), Rotary Motion Error (회전운동오차), Control & Vibration (제어 및 진동)

1. 서론

최근, 국내 장비 수요시장은 반도체, 디스플레이, 자동차 산업 등의 눈부신 도약에 힘입어 세계 5 위 수준까지 발돋움하고 있다. 그러나, 장비의 국내 자급율은 중저가형 장비를 기준으로 30% 수준에 머무르고 있어 무역수지 특히 대일 무역역조의 주요 요인으로 작용하고 있다.¹

국내 장비기술이 취약한 주요 요인의 하나로선 장비 생산하는 기업들의 영세성을 들 수 있으며 2008 년을 기준으로 실제 약 2 천개에 달하는 장비 기업 가운데 매출액 천억원 이상의 기업은 이십 여개에 불과한 상황이다. 이러한 기업의 영세성은 불가피하게 인력 부족과 모방 설계라는 악순환을 반복하게 하는 원인으로 작용한다.

이러한 국내 장비산업의 인프라를 개선할 수 있는 한 가지 방법으로 국내에 보유중인 장비 설계 관련기술을 일반화하여 장비기업이 직접 관련 전문 인력을 양성하지 않아도 기술이 상당부분 공유될 수 있도록 플랫폼화하는 방법을 생각할 수 있으며 이에 따라 저자 등은 Fig. 1 의 개요와 같이 장비 설계작업을 지원할 수 있는 기계장비 정밀도 시뮬레이션 기술의 개발을 추진하고 있다.

항공기, 자동차와 같은 수송기계의 경우, 제품 설계 단계에서의 시뮬레이션 기술은 이미 어느 정도 보편화되어 있으나^{2,3} 기계 장비의 경우, 아직 설계 단계에서 제품(장비)의 성능을 시뮬레이션할 수 있는 기술은 세계적으로 개발되어 있지 않다. 그러나, 이미 수십년 전부터 주축, 이송계 등 운동 유니트의 성능 해석, 공작기계를 중심으로한 장비

의 구조 및 동특성 해석 등 시뮬레이션을 위한 기반 기술은 꾸준히 개발되어 왔으며 이미 상당 수준 안정화되어 있는 상황이다.

최근들어서는 이러한 기술을 바탕으로 공작기계 주축을 포함한 공구와 공작물 간의 상대적인 물리적 특성을 해석하고 이를 이용하여 고속 절삭 영역을 확장하는 공작기계 채터의 시뮬레이션 연구도 상당부분 진전되고 있다.^{4,6}

또한, 장비 측면에 있어서는, Matlab 등 시뮬레이션 툴들의 발전에 힘입어 VCNC(Virtual CNC)시스템을 구축하고 이를 장비 특성 해석에 적용함으로써 장비의 추종오차는 물론 공구 궤적 생성을 통한 가공 공정상의 윤곽 제어오차까지 시뮬레이션하고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있다.^{7,9}

그러나 이들 연구 결과는 아직, 장비 설계 단계에서 장비를 구성하는 메커니즘의 특성을 고려한 정밀도나 성능을 예측할 수 있는 수준까지 도달하지는 못한 상황이며, 다양한 기계 구조나 메커니즘에 적용할 수 있을 정도로 기술이 일반화되어 있지 못한 상황이다.

Fig. 2 에 저자 등이 개발하고자 하는 기술개발 범위(진한 배경색으로 표시)와 앞서 소개한 기술 동향의 관계를 나타내었다.

본 과제에서는, 설계 단계에서 요소/유니트의 강성이나 정밀도 등의 특성을 고려한 장비 전체의 정밀도 특성을 예측할 수 있는 기술을 개발하고 이를 다양한 메커니즘을 갖는 장비에도 적용할 수 있도록 일반화하여 웹을 활용한 플랫폼 형태로 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해 네 개의 세부 분야로 나누어 2009 년부터 연구를 수행 중이며 본 특집은 이 세부 분야들을 중심으로 구성되어 있다. 본 논문은 그 가운데 총괄에 해당하는 것으로 과제 전체의 개요 및 네 개 분야를 통해 1 단계 3 년간 개발하고자 하는 주요 연구 내용을 중심으로 간략히 소개하고자 한다.

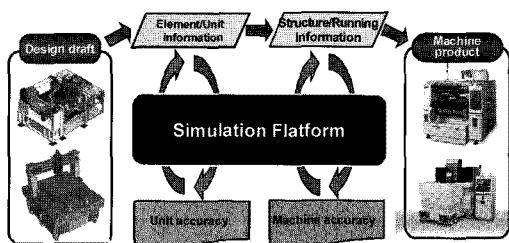


Fig. 1 Concept of simulation technology of machine accuracy

2. 정밀도 시뮬레이션 기술 플랫폼의 구성

Fig. 1 에서 나타낸 바와 같이, 기계장비 정밀도 시뮬레이션 기술은, 장비 설계에 있어, 유니트설계 단계에서 설계정보를 입력하면 그에 따른 유니트의 정밀도를 예측할 수 있으며 이를 통해 1 차로 완성된 장비의 도면과 구조, 운전 정보등을 입력하면 장비 전체의 정밀도를 시뮬레이션 할 수 있는 기술을 의미한다.

기계 장비의 오차를 유형별로 분류하면, 다축으로 구성된 장비 운동계에 있어 각 축을 구성하는 부품의 가공오차나 조립오차에 기인한 운동오차 등의 기하학적 오차, 자중 및 부하에 의한 구조변형 오차, 구조의 동역학적 특성에 따른 시간 종속적인 동적 변형 오차, 내·외부 열원에 의한 열 변형 오차, 제어기 및 제어요소의 성능에 의한 시간 종속적 제어/진동오차 등으로 구분할 수 있다.

이 다섯가지 오차 유형의 시뮬레이션을 위한 본 연구에서의 기술의 구성을 Fig. 3 에 나타내었다. 구조변형, 동적변형 및 열변형에 의한 오차 해석은 일반적으로 유한요소 해석 툴을 기반으로 이루어지며 장비 전체의 CAD 도면을 근거로 모델링할 필요가 있으므로 본 연구에서는 이를 ‘구조 동역학’ 모듈이라는 하나의 모듈로 구성하고자 한다. 또한, 직선 이송계를 중심으로 하는 시간 종속적인 동적 오차의 해석은 ‘제어/진동’모듈의 구성을 통해 이루어지며 이 모듈은 내, 외부 진동에 따른 방진구의 특성 시뮬레이션 기능을 포함한다.

한편, 기하학적 오차의 경우에는 직선 및 회전 운동오차가 주요 대상이 된다. 직선 및 회전 운동오차의 경우 기본적인 오차의 개념이나 메커니즘의 구성 요소 성격은 유사하지만 실제 오차 시뮬레이션을 위한 요소들의 종류가 광범위하고 특성 해석을 위해 서로 다른 방법론들을 적용할 필요가

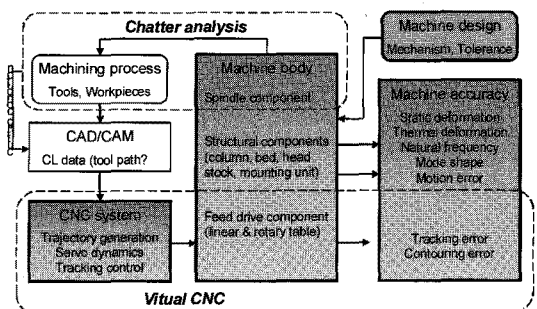


Fig. 2 Research scope of the current project

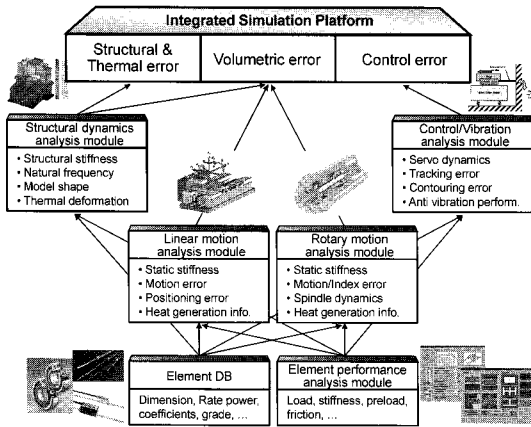


Fig. 3 Concept of accuracy simulation technology

있으므로, 각각 ‘직선운동 해석 모듈’과 ‘회전운동 해석 모듈’로 분리하여 개발을 진행하고 있다.

기계장비 정밀도의 시뮬레이션을 위해서는 이들 4 개의 주요 모듈 이외에도, 실제 시판되는 요소부품들의 치수나 제조사가 제공하는 성능 등에 대한 데이터베이스 모듈을 부수적으로 필요로 한다. 또한, 예를 들어 예압에 따른 요소 강성과 같이 제조사가 제공하지 않지만 각 모듈상에서 공통적으로 필요한 특성들을 파악할 수 있는 개별 요소의 특성 해석 모듈도 필요하다.

이상의 4 개의 주 모듈 및 2 개의 서브 모듈에서 결과치로 제공하는 주요 항목들을 Fig. 3 의 각 모듈을 나타내는 박스안에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 최종적으로, 구조 동역학 시뮬레이션 결과인 구조/열 오차, 구조 동역학 모듈에서의 구조변형 해석결과와 직선, 회전운동 해석 모듈에서의 결과를 조합한 공간오차 그리고 제어/진동 해석 모듈의 결과인 제어오차 등 세 가지 오차의 형태로 정리되어 나타내게 된다.

3. 세부 분야별 주요 연구내용

3.1 구조 동역학 해석

구조 동역학 해석 모듈은 입력된 장비 체원에 대해 구조의 정적 변형, 고유진동수, 모드형상 및 열변형 등의 해석 기능을 수행하는 모듈이다. 이를 위해 먼저, 본 과제에서의 플랫폼화 및 웹 활용 취지에 적합하도록 사용자가 설계한 3D CAD 기반 설계 파일을 전송받아 자동으로 장비의 구조 동역학을 해석할 수 있는 자동 해석모듈을 구축하고 있다. 또한, 해석 특성의 향상을 위해 베어링과

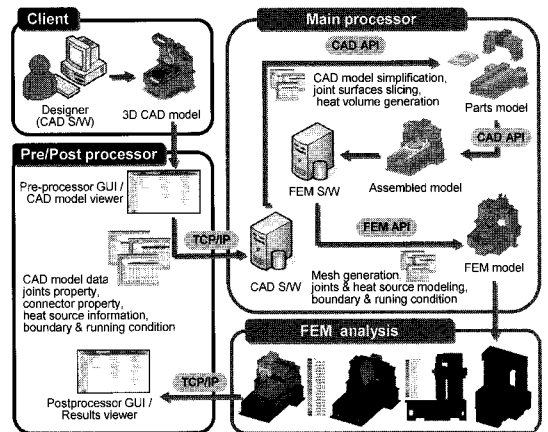


Fig. 4 Schematic diagram of a auto FEA system for 3D CAD designed machine

같은 이동 결합부, 볼트 체결부와 같은 고정 결합부 및 경계조건의 모델링 기술과 더불어 데이터베이스화를 수행하며 이 해석 모델의 실험적 검증 및 튜닝기술도 병행하여 진행할 예정이다.

Fig. 4 는 임의의 사용자가 설계한 3D CAD 모델을 자동으로 넘겨 받아 그 성능을 시뮬레이션하는, 본 연구에서 개발하고 있는 CAD 모델 자동 해석 모듈의 정보 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저, 사용자는 자동화를 위해 일부 사전 약속된 마킹이 포함된 3D CAD 모델을 pre processor 를 통해 서버로 보내며, 서버에서는 CAD API 를 이용하여 실제 유한요소 해석을 위한 모델링이 가능하도록 도면상의 불필요한 부분(예: 챔퍼, 작은 구멍 등)을 생략하는 단순화 기능을 수행한다. 또한, 이와 함께 결합면 모델링을 위한 면 분할 등의 작업도 자동으로 수행하여 해석을 위한 모델을 재생성한 후 유한요소 해석 S/W 로 전송한다. 유한요소 해석 S/W 에서는 FEM API 를 이용하여 자동으로 메쉬를 생성하면서 본 연구에서 해석 정밀도 향상을 위해 고려하고 있는 여러가지 해석을 위한 경계조건 등을 부가한 해석을 수행하고 결과를 뷰어를 통해 사용자에게 전송한다. 현재, 모델 입력은 Inventor, 해석 solver 는 ANSYS 를 기본으로 하여 개발을 수행 중에 있다.

3.2 직선운동 해석

직선운동 해석 모듈은 직선운동 유니트의 각 방향 정강성, 각 방향 운동오차, 위치절정오차 및 발열원의 발열량 등을 시뮬레이션하는 기능을 수행한다. 이를 위한 주요 연구내용으로는 먼저, 직선

운동 시스템을 구성하는 베어링, 볼스크류 등 각 요소별 특성을 해석하고 실험적 검증하여 S/W 화하는 것이며 이들 요소 특성 해석을 기반으로 직선운동시스템의 6 자유도 운동오차를 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하고 실험적 검증을 거쳐 S/W 화 하는 것이다. 또한, 기본적인 해석 알고리즘이 정립되면 시스템을 구성하는 각 요소의 가공 및 조립 공차에 따른 영향을 파악함으로써 설계시 주요 부품의 공차에 따른 정밀도 변화 특성에 대한 데이터를 제공할 수 있도록 할 예정이다.

Fig. 5 는 직선운동 시스템의 6 자유도 운동오차 해석을 위한 시뮬레이터의 구조를 나타낸 것이다. 일반적인 수치해석 방법을 적용하는 경우, 시스템에 작용하는 힘들에 대한 평형방정식을 풀기 위해 레일의 형상오차를 고려한 베어링내 반력의 변화를 반복계산에 의해 구해야 한다. 본 과제에서는 안내 레일의 형상오차를 구성하는 공간주파수에 대한 베어링내 반력 변화를 의미하는 전달함수를 도입하고, 베어링 형식에 상관없이 전달함수만을 미리 계산해서 알고리즘에 입력함으로써 간단히 운동오차를 해석할 수 있도록 전달함수법을 이용한 운동오차 해석 모델을 개발하였다.¹⁰ 이 모델에 있어서는 모든 요소들의 영향이 힘의 변화로 모델링되므로 Fig. 5 와 같이 고려하고 싶은 베어링 형식이나 요소를 병렬 구조 형태로 선정하여 해석할 수 있는 장점도 지니게 된다.

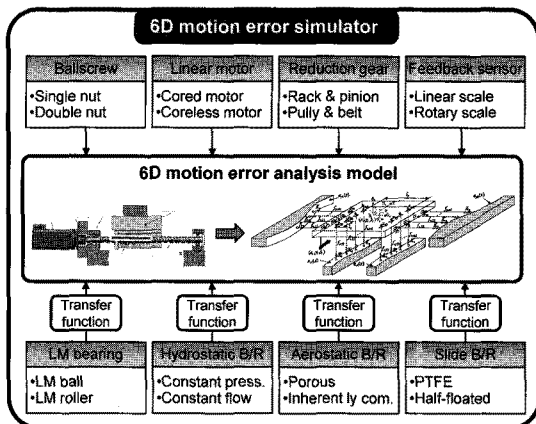


Fig. 5 Parallel type 6 DOF linear motion error simulator

3.3 회전운동 해석

기계장비에 있어 회전운동을 하는 유니트로는 상대적으로 고속의 회전운동을 얻기 위해 사용하

는 주축(spindle)과 정확한 회전 위치결정 기능을 위해 사용하는 인텍스테이블 등이 있다. 회전운동 해석 모듈은 이들 주축 및 인텍스테이블을 대상으로 정적 강성, 회전정밀도(비동기성분 포함), 인텍스정밀도, 고유진동수, 모드형상 및 발열량 등을 시뮬레이션하는 기능을 수행한다.

Fig. 6 에 본 연구에서 개발하고자 하는 회전운동 시스템 정밀도 시뮬레이터의 구조를 나타내었다. 직선운동 유니트와 마찬가지로 기본적으로 회전운동 유니트에 대한 6 자유도 운동오차를 해석하게 된다. 회전운동요소 들은 기하학적으로 주기함수 형태의 운동을 하게 되므로 전달함수법의 적용이 매우 용이하게 되며 따라서 직선운동 유니트에서 적용한 전달함수의 개념을 그대로 적용함으로써 해석대상 요소를 병렬 구조 형태로 선정하여 해석할 수 있는 구조를 갖고 있다.

한편, 회전 운동의 경우에는 가공오차 등 기하학적인 오차에 의한 오차 이외에도 회전체의 언밸런스 및 유연체 운동 등에 따른 동적인 오차들이 발생하게 되며, 유한요소 해석을 통해 이러한 축계의 거동을 동시에 해석할 수 있는 기능도 같이 개발하고 있다. 현재 개발된 알고리즘은 실험적인 검증 및 S/W 화 단계를 진행하고 있으며, 향후 가공 및 조립 공차에 따른 영향 해석 기능도 추가하여 개발할 예정이다.

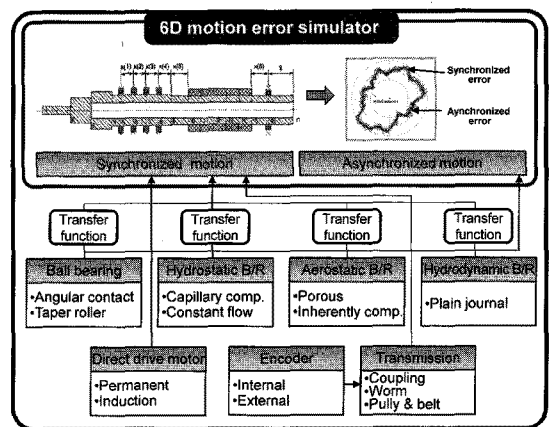


Fig. 6 Parallel type 6 DOF rotary motion error simulator

3.4 제어/진동 해석

제어/진동 해석 모듈은 기계 시스템의 운동 요소들 즉, 제어기, 모터/드라이브, 테이블, 가이드 등 기계적/전기적 요소들이 루프를 형성하여 동역

학적인 제어 루프를 구성할 때 동적인 특성을 해석하는 기능을 수행한다. 운동제어 시스템의 구성요소를 기능적으로 살펴보면 Fig. 7 처럼 실제 운동을 하는 테이블의 기계 시스템 블록(Mechanical dynamics block)과 엔코더 등과 같은 측정 블록(Measurement block), 이송 제어시 지령에 해당하는 명령 생성 블록(Reference generator block), 서보 제어 알고리즘을 포함하는 블록(Servo controller block)과 드라이브의 전기적 특성을 갖는 블록(Drive and electronics block)으로 나누어 볼 수 있다.

본 해석 모듈은 사용자에게 제어루프를 구성하는 주요 구성품들에 대하여 데이터베이스를 제공하여 사용자는 설계 단계에서 사용하고자 하는 제어 구성요소들을 데이터베이스에서 선택하고 각 요소들의 특성을 지배하는 특성 파라미터들을 선택 및 수정함으로써 전체 제어시스템에 대한 해석을 편리하게 진행할 수 있다. 또한 본 모듈은 실제 기계 시스템 설계자가 체감하는 제어 시뮬레이션의 정확도를 높여주기 위하여 상업용 제어기의 속도 프로파일러, 위치 보간기, 예견 제어(Look ahead control) 및 볼스크류 이송계의 마찰력, 강성 모델, 테이블의 6 자유도 운동 모델 등을 포함하고 있다. 따라서 일반적으로 많이 수행하고 있는 선형화된 제어 특성 해석 보다 더 세밀화된 동특성 해석 결과를 얻을 수 있다.

제어/진동 해석 모듈은 해석용 솔버로 시장에서 성능이 검증된 Mathworks 사의 Matlab 엔진을 사용함으로써 해석 결과의 신뢰도를 높이고 있다. 현재 본 모듈은 1 축 스테이지를 제작하여 실험적인 시뮬레이터 검증까지 수행한 단계이며, 다축 운동 포함 및 데이터베이스 보강 작업을 진행하고 있다.

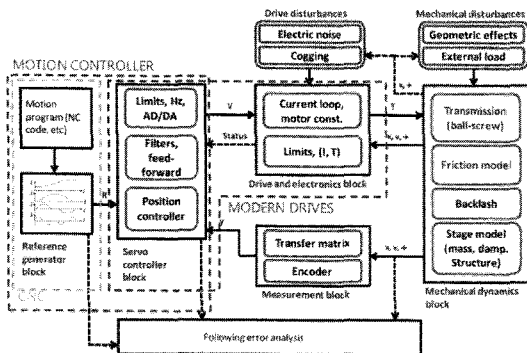


Fig. 7 Functional block diagram of a motion control system

4. 결론 및 향후 계획

장비를 설계하는 입장에서는, 장비에 요구되는 성능에 맞추어 각 구성요소의 성능을 배분하고 각각 배분된 성능에 따른 요소별 최적 설계를 수행할 수 있는 설계 프로세스가 가장 이상적인 형태라고 할 수 있다. 본 논문에서 소개된 기술 개발 내용은 그를 위한 첫 단계로, 성능 시뮬레이션을 위한 인프라 구축을 위해, 무부하 상태에서의 정밀도 시뮬레이션 기술을 중심으로 하고 있다. 향후 예정하고 있는 본 기술의 전개 방향을 Fig. 8에 나타내었다. 기술의 일반화 및 정밀도 시뮬레이션 기술이 확립되면, 2 단계로, 공작기계와 같이 가공부하를 받는 장비를 대상으로 가공 프로세스 해석이 연계된 시뮬레이션 기술을 추구하여 산업적으로 한층 유용한 기술 개발이 되도록 추진할 예정이다.

또한, 궁극적으로는 설계 결과에 대한 시뮬레이션 뿐만 아니라 설계 과정에서의 성능 최적화 및 그를 통한 설계 수정이 가능한 기술 개발로 전개되어 나아가야 할 것으로 판단되며, 이를 위해서는 상호 통합을 전제로 CAD 및 해석에 관련된 많은 소프트웨어 툴들과의 협력 개발도 크게 필요할 것으로 예상된다.

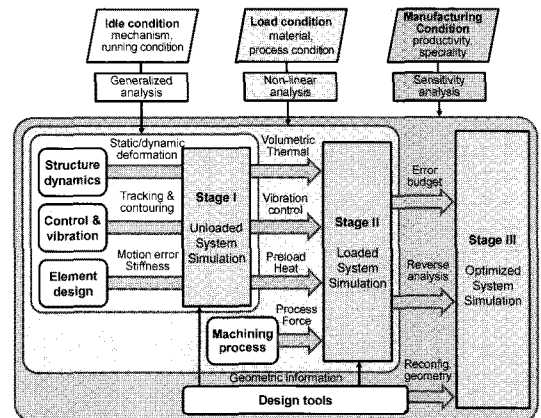


Fig. 8 Future plan of simulation technology for mechanical machine

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ministry of Knowledge Economy, "Report on the development plan of an accuracy simulation technology for mechanical machines," 2009.
2. Haupt, M. C. and Horst, P., "With Public Domain Software to Integrated Design and Analysis Tools," Proc. ICAS 2002, pp. 143.1-143.10, 2002.
3. Sobieski, J. S., Kodiyalam, S. and Yang, R. J., "Optimization of Car Body under Constraints of Noise, Vibration, and Harshness (NVH) and Crash," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 22, No. 4, pp. 295-306, 2001.
4. Altintas, Y. and Weck, M., "Chatter Stability in Metal Cutting and Grinding, Annals of the CIRP," Key Note Paper of STC-M, Vol. 53, No. 2, pp. 619-642, 2004.
5. Altintas, Y. and Cao, Y., "Virtual Design and Optimization of Machine Tool Spindles," Annals of the CIRP, Vol. 54, No. 1, pp. 379-382, 2005.
6. Brecher, C. and Witt, S., "Static, Dynamic and Thermal Behaviour of Machine Tools with Regard to HPC," Proc. of Int. CIRP Conf. of High Performance Cutting (HPC), pp. 227-240, 2004.
7. Yeung, C. H., Altintas, Y. and Erkorkmaz, K., "Virtual CNC System, Part I: System architecture," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 10, pp. 1107-1123, 2006.
8. Erkorkmaz, K., Yeung, C. H. and Altintas, Y., "Virtual CNC System, Part II: High speed contouring application," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 10, pp. 1124-1138, 2006.
9. Pritschow, G. and Röck, S., "Hardware in the Loop Simulation of Machine Tools," Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 295-298, 2004.
10. Park, C. H., Oh, J. S. and Khim, G. H., "Modelling of 5 DOF Motion Errors in the Precision Linear Motion Stage," 4th International Conference on Positioning Technology, pp. 307-310, 2010.