

공작기계의 유연 다물체 동역학 및 제어기 연계해석

김동만⁺, 김동현*, 박강균⁺, 최현철⁺

(논문접수일 2009. 04. 28, 심사완료일 2010. 03. 17)

Coupled Flexible Multi-Body Dynamics and Controller Analysis of Machine Tool

Dong Man Kim⁺, Dong Hyun Kim*, Kang Kyun Park⁺, Hyun Chul Choi⁺

Abstract

In this study, advanced computational technique for mechatronic analysis has been developed for the efficient design and test of typical machine tool models. Flexible multi-body dynamic (FMBD) analysis method combined with motion controller including control logics is used to simulate typical operation conditions. The present FMBD machine tool model is composed of flexible column structure, rigid body spindle, vertical motion guide (arm) and screw elements. Driving motor element with rotating degree-of-freedom is interconnected and governed by the designed Matlab Simulink control logic, and then the position of the spindle is feedback into the control logic. It is practically shown from the results that the investigation of designed machine tools with controller can be effectively conducted and verified.

Key Words : Multi-Body Dynamics(다물체동역학), Machine Tool(공작기계), Finite Element Method(유한요소기법), Computational Structure Dynamics(전산 구조동역학), Feedback Control(피드백제어)

1. 서론

오늘날, 제조 산업에서의 정밀하고 빠른 제조공정의 요구에 따라 메카트로닉스(mechatronics)가 발전하고 있다. 제품의 부품가공에 사용되는 공작기계는 메카트로닉스가 활용된 주요 분야이며, 자동차, 전자 등 우리나라 주요 산업에서

제조공정에 활용되고 있는 로봇은 메카트로닉스의 한 부분이라 할 수 있다.

공작기계는 공통된 형상과 기능으로 설계되어 대량으로 생산되어 왔으나, 현재는 가공품의 특성에 맞는 다양한 공작기계를 생산을 하고 있다. 또한 공작기계의 주요 목적인 대량생산을 위해서는 구조물의 강성을 고려한 신속한 제어로

* 교신저자, 국립경상대학교 기계항공공학부 및 공학연구원 (dhk@gnu.ac.kr)
주소: 660-701 경남 진주시 가좌동 900

+ 국립경상대학교 기계항공공학부

직 설계에 달려있다. 즉, 공작기계가 신속하게 작동하기 위해서는 구조물의 흔들림 방지를 위하여 강성을 높여야 하지만 강성을 높이면 구조물이 무거워져 속도가 느려지는 결과를 낳을 수 있어 구조물의 가볍고 튼튼한 구조물을 설계하는 것이 중요하다. 하지만 구조물의 설계만으로 공작기계의 가공속도를 높이는데 한계가 있으므로 여기에 구조물의 강성을 고려한 절삭기계의 이송속도 및 경로를 정의한 제어기의 설계도 중요하다. 효율적인 공작기계를 설계하기 위하여 본 연구에서는 전산 구조동역학을 활용하여 검토하였다. 이를 위해서는 공작기계의 운동을 제어하는 수치제어 프로그램과 수치제어 프로그램으로 부터 전달되는 명령을 수행하는 동적유한요소 해석 프로그램이 상호작용하는 전산 구조동역학 기법이 필요하다.

발전된 전산응용공학(CAE)을 활용하여 제어기 연계 다물체 동역학해석을 수행한 앞선 사례가 있다. 이탈리아의 R. Maj는 제어기 연계 다물체 동역학해석기법을 통하여 공작기계를 최적화방법에 대하여 연구하였으며⁽¹⁾, 벨기에의 M. Bruyneel은 공작기계의 탄성력을 고려한 공작기계의 최적화에 대한 연구를 하였다⁽²⁾. 이런 연구 사례에서 알 수 있듯이 공작기계의 형상설계와 구조특성을 고려한 듯이 공작기계를 위해서 듯이 와 전산 구조동역학을 연계한 해석이 필요하다. 듯이 와 유연다물체동역학을 직접 연계해석기법은 아직 생소한 전산해석기법에 해당한다. 공작기계의 구조해석에서 듯이 와 해석프로그램의 상호작용 없이 해석프로그램을 이용하여 해석할 경우 외부하중을 능동적으로 고려하지 못하고, 해석프로그램 내의 지정된 경로에 의해 운동하게 되어 구조해석과정에서 하중이 과하게 적용될 수 있어 최적화된 공작기계작기계를 위해서는 연계된 해석과정이 필요하다. 국내연구사례를 살펴보면, 유한요소기법을 활용하여 공작기계의 정적 및 동적하중을 적용한 구조해석 및 진동해석을 통한 구조적 안정성을 검토한 사례를 찾아 볼 수 있으나^(3,4), 듯이 와 연계된 전산 구조동역학이 이루어진 사례가 없다. 듯이 와 해석프로그램의 연계 해석기법을 확립하기 위하여 본 연구에서는 제어 프로그램으로 많이 활용되고 있는 Matlab에서 지원하는 Simulink를 사용하였고, 해석프로그램은 유럽에서 동역학 해석프로그램으로 널리 사용되는 SAMCEF Field를 사용하였다. Simulink와 SAMCEF(Ver.6.1)의 MECANO 모듈과 연계하여 공작기계의 운동을 모사하였다.

Fig. 1은 현재 부품 가공에 사용되고 있는 3축 공작기계의 형상이다. 스피들들은 스피들 헤드에 결합되어 암을 따라 상하 운동을 하고 아랫부분의 새들과 테이블이 앞뒤, 좌우 운동을

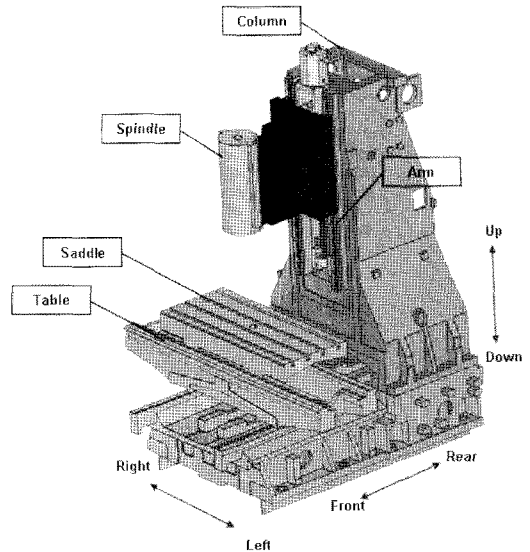


Fig. 1 Geometric configuration of the N.C. machine model

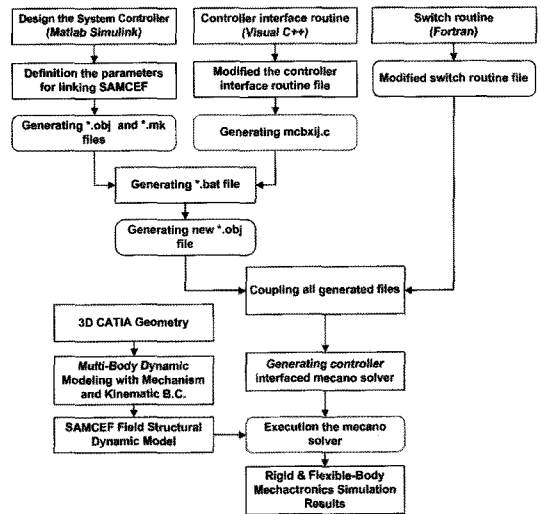


Fig. 2 Coupled numerical process of MBD and control model

한다. 이번 연구에서는 공작기계 스피들 헤드의 상하 운동에 의한 관성력만 고려하였다.

Fig. 2는 Simulink의 파일을 이용하여 일련의 과정을 거쳐 제어기와 연계된 해석연산자(solver)를 생성을 하는 과정을 나타내고 있다. 새롭게 생성된 해석연산자를 사용하여 운

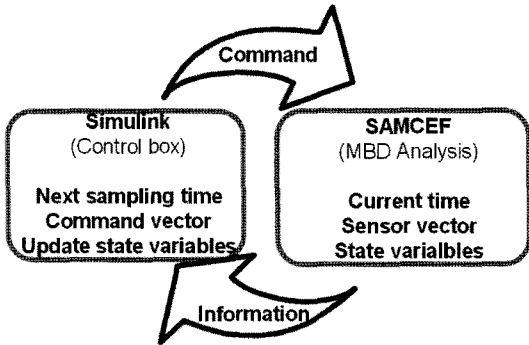


Fig. 3 Feedback mechanism between MBD and controller model

동학적 요소(kinematic element)와 경계조건으로 구성된 동적 유한요소 구조물에 적용하여 공작기계의 운동을 파악하였으며, 제어기와 연계된 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다.

2. 다물체 동역학-제어기 연계기법

제어기와 전산 구조동역학 프로그램은 Fig. 3과 같이 서로 정보를 피드백(feedback) 하면서 공작기계의 운동을 제어한다. 동적해석 정보를 제어기에 전달하면 제어기에서 전달된 정보를 바탕으로 명령을 생성하여 전산 구조동역학 프로그램에 전달한다. 전산 구조동역학 프로그램은 전달된 명령을 수행하고, 결과를 다시 제어기로 전달한다. 이런 과정은 매 시간단계(time step)마다 반복되게 된다.

2.1 제어기

제어기는 제어-동역학해석 연계에서 입력되는 정보를 바탕으로 새로운 명령을 생성 및 해석프로그램으로 전달하는 과정을 수행하는 부분으로써, 공작기계의 동적 움직임은 제어기의 프로그래밍에 의해 결정된다.

기존의 접근방법에서는 Simulink를 활용하여 동역학 방정식으로 공작기계의 동적움직임을 모사하였다. 각 구조물의 탄성효과를 반영하는데 한계가 있어 이번 연구에서는 동적해석을 SAMCEF의 비선형 다물체 동역학 해석 모듈인 MECANO로 대체하였다. Fig. 4는 Simulink에 모델링된 제어기를 나타내고 있으며, 공작기계의 동적해석을 위해 기존의 Simulink모델의 제어부분만 따로 나타낸 것이다.

제어기는 스크류의 회전변위(스핀들의 이동경로)가 Fig. 5

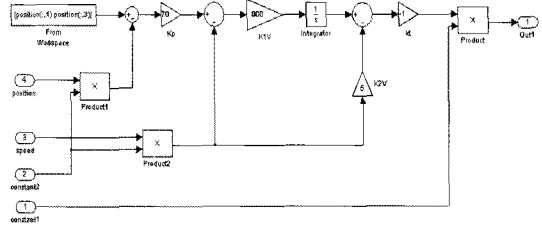


Fig. 4 Simulink controller model

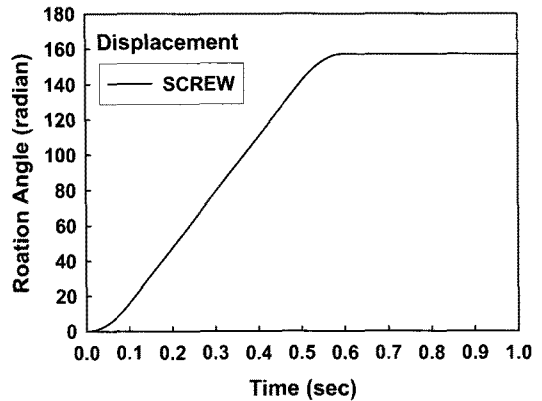


Fig. 5 Rotational displacement destination

와 같이 정의되어 있으며, 정의된 회전변위를 바탕으로 해석 프로그램으로부터 입력되는 스핀들의 변위와 이동속도와 비교하여 발생하는 오차를 바탕으로 새로운 명령을 모터에 전달하여 모터의 출력토크를 결정하는 과정을 거친다. 새로운 출력명령은 해석프로그램으로 다시 전달되어 명령을 수행하게 된다.

2.2 다물체 동역학 모델링

Simulink의 동적해석 부분을 대체하기 위한 동역학해석 프로그램에서는 제어기로부터 전달되는 명령을 모델링된 운동학적 요소를 통하여 수행한다. 공작기계의 운동 특성과 같은 운동학적 요소들과 재료의 성질을 갖는 물성치, 경계조건을 정의해야 한다. 정의된 요소들은 서로 유기적으로 연계하며, 제어기로부터 전달되는 명령을 수행하게 되어 실제 공작기계가 움직이는 과정과 똑같은 과정으로 운동하게 된다. 운동학적 요소는 Fig. 6과 같이 각 운동특성에 맞게 각 부분에 정의되어 있다.

힌지요소는 결합되는 두 부분의 운동을 한 방향의 회전운동을 제외하고 세 방향의 병진운동과 두 방향 회전운동을

구속하는 요소로서 1축 회전만 가능하게 한다. 힌지 요소는 동작기계에서 모터, 베어링같은 회전운동을 하는 부분에 부가되었다. 프리즈매틱(prismatic)은 결합되는 두 부분사이의 한 방향 병진운동만 가능하게 한다. 이 요소는 블록과 암사이의 운동을 모델링는 동작부가되었다. 스크류 요소는 전달되는 회전운동을 정의된 한 방향의 병진운동으로 전환하는 요소로서 모터로부터 전달되는 회전운동을 헤드가 병진운동을 하도록 부가하였다.

강체(rigid body)로 모델링된 구조물은 탄성력을 가지고 있지 않기 때문에 각 부분의 탄성력을 부가하기 위해서 스프링 요소를 부가하였다. 부가된 각 스프링 강성은 각 부분의 실제 강성을 계산하여 부가하였다.

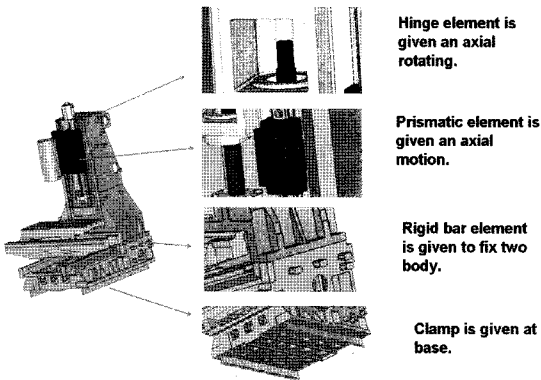


Fig. 6 Kinematic modeling for multi-body dynamics analysis

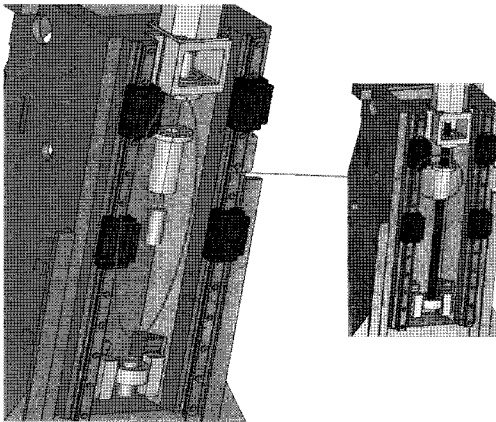


Fig. 7 Screw element for vertical motion

3 해석결과 및 검토

모델링된 동적유한요소모델을 이용하여 제어기와 연계하지 않고 모터 회전변위 명령을 Fig. 4와 같이 부가하여 나타나는 결과를 도출하였다. 그 결과 헤드의 Z-축 방향 변위가 Fig. 8의 “Not Linked” 같이 나타났다. 이와 같은 결과가 우리가 원하는 이상적인 결과이지만, 동작물을 절삭하는 제작과정 중에 발생하는 반력을 고려하지 못하고 주어진 경로를 따라서 운동한 결과이다. 동작기계의 작동과정 중 발생하는 반력을 고려한 실제 작동환경에 대한 동적구조해석을 위해 제어기와 동적유한요소모델을 연계해야 한다. 제어기와 연계하여 해석한 결과 동작기계의 변위가 Fig. 8의 “Linked”와 같이 나타났다. Fig. 8의 두 결과 그래프를 확인해보면 두 결과사이에 시간차이가 있음을 확인할 수 있다. 이런 두 결과사이에 시간차이가 나타나는 것은 제어기와 해석프로그램사이의 피드백에 걸리는 시간과 구조물의 관성력의 영향 때문이다. 본 연구의 결과는 외력은 고려하지 않고 구조물 관성력의 영향만 고려하였다. Fig. 9은 동작기계가 작동을 멈추는 순간, 두 결과 그래프를 확대한 것이다. 결과를 보면 원래 경로를 넘어섰다(over shoot) 다시 회복하는 것을 알 수 있다. 이 역시 피드백의 시간차 때문이다. 두 결과의 비교를 통해 나타난 시간적 오차는 시간단계를 줄여서 시간차이를 줄일 수 있으나, 시간단계를 줄일 경우 해석이 오래 걸리고 실제 작동환경과 달라질 수도 있다.

Figs. 10, 11의 해석결과와 스펀들의 이동 속도와 가속도를 비교해보면 눈에 띄는 차이를 알 수 있으며, 이런 차이로 인해 제어기 연계해석의 필요성을 알 수 있다. 해석된 결과를 바탕으로 설계된 제어기가 원하는 경로로 작동하고 있는

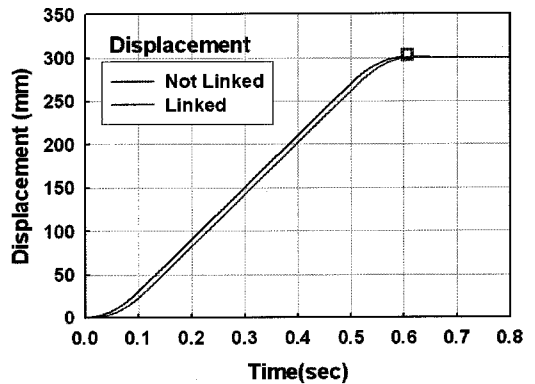


Fig. 8 Z-displacement of spindle structure

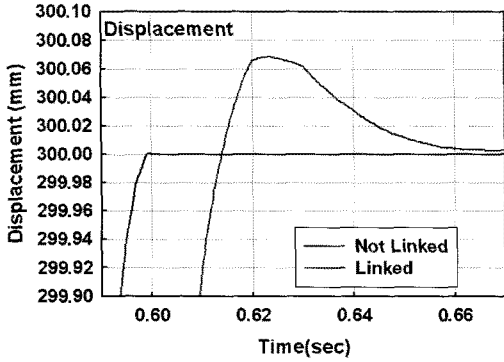


Fig. 9 Zoomed view of overshoot displacement (head structure)

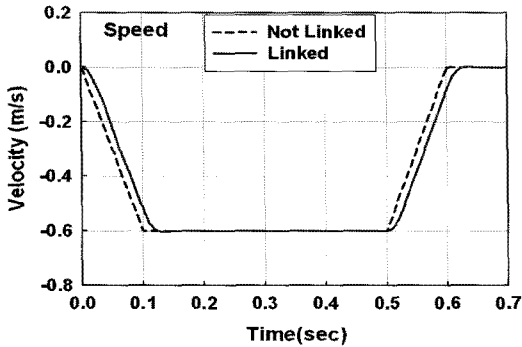


Fig. 10 Comparison of velocity response for moving head structure

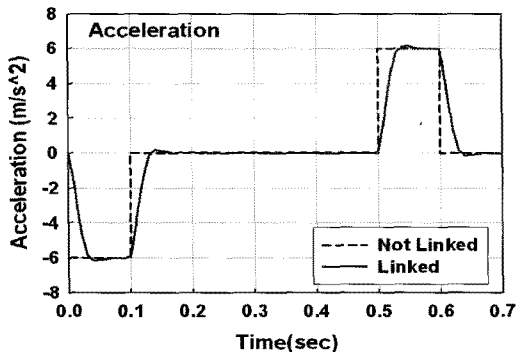
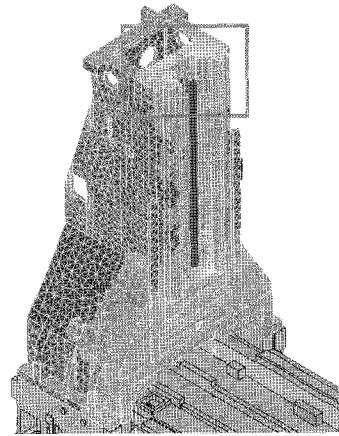
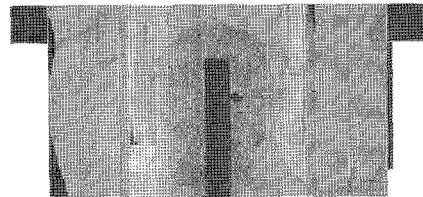


Fig. 11 Comparison of acceleration response for moving head structure

지를 확인해 볼 수 있다. 만약, 0.01mm의 오차를 허용할 경우 설계된 시간보다 0.05sec의 시간이 더 필요로 한다. 공작



(a) Stress contour on the column



(b) Zoom in maximum stress region

Fig. 12 Instantaneous dynamic stress contour

기계의 구조물의 유연체적 특성의 영향으로 인하여 계획한 것 보다 오랜 시간동안 구조물이 안정되지 않을 경우는 공작 기계의 이동속도를 변화시킬 필요성이 있다. 이와 반대로 충분한 강성을 가질 경우 모터의 출력을 높여 더 빨리 이동하도록 설계할 수 있다. 전산 구조동역학과 제어를 연계함으로써 설계한 제어분포가 제대로 설계되었는지 검토할 수 있다.

지금까지 공작기계의 몸체를 강체로 고려하고 해석하였다. 몸체를 강체로 고려할 경우 각 부분의 관성력은 고려될 수 있으나, 각 몸체의 형상과 재질에 따른 강성이 정확히 고려되지 않아 실제 작동환경에서 나타나는 거동이 나타나지 않을 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 각 부분의 계산된 강성을 부가하여 해석할 수 있으나, 형상을 고려한 정확한 강성 계산이 거의 불가능하므로 탄성구조물의 강성을 고려하기 위하여 형상을 토대로 한 유한요소모델을 생성하였다.

공작기계의 구조물의 탄성력을 고려하기 위하여 칼럼을 유한요소모델로 모델링하였다. 동적구조해석 결과 Fig. 12와 같이 응력분포가 나타났다. Fig. 12-(b)에서 살펴보면 응력분포를 살펴보면 스크류를 지지하는 부분에서 가장 큰 응

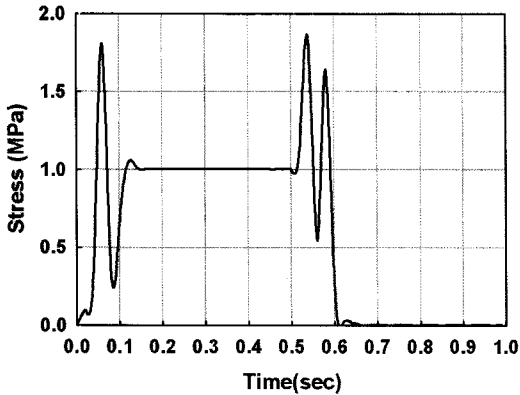


Fig. 13 Dynamic induced stress on column support structure

력이 발생하였다. 이는 스프링헤드부의 회전관성에 의해 발생하는 반력이 모두 전달되기 때문이다. 가장 큰 응력이 발생한 부분의 시간에 따른 응력을 보면 Fig. 13과 같이 나타났다. 운동의 변화가 큰 시간에서 응력이 크게 발생한 것을 알 수 있으나, 응력의 크기가 구조물에 큰 영향을 미치지 않을 정도로 나타났다. 이는 관성력만 고려한 결과 하중이 매우 작기 때문이다. 칼럼을 유한요소모델로 모델링 한 경우 역시 스프링들의 경로를 기준값과 비교하였으나 하중의 크기가 작아서 강체로 모델링 된 경우와 차이가 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구는 Matlab(Ver. 6.5) Simulink와 SAMCEF(Ver. 6.1)를 활용하여 제어기와 유연다물체동역학을 효율적으로 연계한 해석을 수행하였다. 전산해석프로그램과 제어기를 동시에 연계한 해석을 수행하지 않을 경우 제어로직의 설계를 완료한 후 실제 동작기계에 적용하려면 제어로직에서는 구조물의 유연체적인 특성을 완전히 반영할 수 없어 상당한 기간을 더 필요의 설다. 본 연구의 제어기 연계 해석한 결과를 활용하면 실제와 유사한 작동환경에서 제어기한 손상작동 유무를 사전에 파악할 수 있다. 또한, 유연체적 특성을 설계과정에 직접 반영할 수 있어 동작기계의 정밀도 향상 및 개발기간 단축에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구가 잘 진행될 수 있도록 다양한 협조를 해 주신 두산인프라코어 공기자동화BG 관계자 여러분께 감사드리며, 아울러 본 연구는 2단계 BK21 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Maj, R. and Bianchi, G. 2005, "Mechatronic Analysis of Machine Tools," *9th SAMCEF Users Conference 2005*.
- (2) Bruyneel, M. and Granville, D. 2007, "Mechatronic Analysis of a Flexible Mechanism Using SAMCEF: Application to Robotics," *NAFEMS Semina*.
- (3) Choi, Y. H., Park, S. K., Jung, T. S., Cho, B. H., Kim, J. H., and Choi, Y. J., 2000, "A Case Study on the Static and Dynamic Design Improvement of a Machine Tool Structure by Using F.E.M," *Korea Society of Machine Tool Engineers Annual Spring Conference*, pp. 726~733.
- (4) Jeong, S., Kim, J., Kim, S., and Na, Y., 2001, "Dynamic Characteristic Analysis of Tilting Turret Systems Using Finite Element Modeling," *Transaction of the Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 60~70.
- (5) SAMCEF, 2006, *User's Manual ver 11.1*, SAMTECH Co, Rep. of Korea.
- (6) Maj, R., Modica, F., and Bianchi, G., 2005, "Machine Tools Mechatronic Analysis," *Proc. IMechE*, Vol. 220, Part B.
- (7) Morelle, P., Granville, M., and Goffart, M., 2004, "SAMCEF for Machine Tools resulting from the EU MECOMAT Project," *NAFEMS Seminar-Mechatronics in Structural Analysis*, Wiesbaden, Germany, May 5-6, 2004.
- (8) Kim, D., Kim, Y., Kim, D., and Yang, J., 2007, "Multi-body Dynamic Structure Analysis Considered Backup Emergency Egress Conditions of Canopy System of Supersonic Fighter," *The Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 81~87.