

## 재질 변화에 따른 초정밀가공기용 마이크로 스테이지의 안정성 해석

김재열\*, 광이구<sup>+</sup>, 김항우<sup>++</sup>

(논문접수일 2002. 11. 20, 심사완료일 2003. 5. 2)

### Stability Analysis According to Material Alteration on Micro Stage for Micro Cutting Machine

Jea-Yoel Kim\*, Lee-Ku Kwac<sup>+</sup>, Hang Woo Kim<sup>++</sup>

#### Abstract

In this paper, stability of ultra precision cutting unit is analyzed and this unit is the kernel unit in ultra precision processing machine. According to alteration of shape and material about hinge, stability investigation is performed. Through this stability investigation, trial and error is reduced in design and manufacture, at the same time, we are accumulated foundation data for unit control.

**Key Words :** Nano Technology(나노기술), Cutting Force(절삭력), Finite Element Method(FEM;유한요소해석), Ultra Precision Cutting Unit(UPCU; 미소절삭 유닛)

## 1. 서론

최근 세계의 관심은 정보기술(Information Technology), 나노기술(Nano Technology), 생명기술(Bio Technology)에 집중되고 있다. 특히 당초 반도체 미세기술을 극복하는 대안으로 연구가 시작된 나노기술은 전자와 정보통신·기계·화학·생명·에너지 등의 거의 모든 산업에 응용할 수

있어 인류 문명을 획기적으로 바꿀 기술로 떠올랐다.<sup>(1)</sup> 또한 기계분야에서 나노테크가 가장 시급하게 이루어져야 될 분야가 초정밀 가공이라 할 수 있다. 최근 전자 산업과 광 산업의 급진적인 발전과 발맞춰 이러한 관련기에 필요한 여러 가지 핵심 부품의 초정밀가공에 대한 필요성이 증대되고 있다.

급변하는 기술환경의 변화와 더불어 절삭가공의 기본이

\* 주저자, 조선대학교 기전공학과 (jykim@chosun.ac.kr)

주소: 광주광역시 동구 서석동 375

<sup>+</sup> 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

<sup>++</sup> 송원대학 자동차과

되는 가공조건 및 가공현상의 규명에도 많은 기술적 발전이 있었으며, 특히 실용화 가능한 초정밀 부품 가공 분야에서는 커다란 기술적 변화가 일어나고 있다. 가장 대표적인 예는 기존의 초정밀 경면 가공기술을 이용한 비구면, 비축대칭 반사경, 마이크로 렌즈, 회절격자 등 초정밀 고성능 광학 부품의 개발 분야이고, 두 번째는 밀링머신, 마이크로머신 등 초소형 미세 형상 부품의 수요에 대응하기 위한 각종 미세부분(Micro parts)의 초정밀 미세 가공기술의 발전이다. 이중 최근의 기계적 미세 가공기술 분야는 Micro parts 가공에 있어서 고에너지 가공이나 전기, 화학적 가공을 위주로 하는 MEMS 기술, 반도체 가공기술 등에 대응하기 위하여 나노(nm)수준의 극한정밀도의 추구 및 가공방법의 획기적 개선을 위한 노력에 심혈을 기울이고 있다<sup>(2~4)</sup>.

본 논문에서는 이러한 초정밀 가공기의 핵심 유닛이 되는 초정밀 미소절삭장치(Ultra Precision Cutting Unit ; UPCU)의 안정성 검토를 다룬 것으로써 현재의 재질의 변화에 따라 어떠한 경향이 보여지는지를 확인하고자 하였다. 이러한 안정성 검토를 함으로써 유닛 제어의 기초 자료 수집의 효과와 유닛 설계 및 제작의 시행착오를 줄일 수 있다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 유한요소 정식화

본 연구에서 이용된 유한요소해석 기법은 3차원요소(3-D Solid Element)를 이용하였으며, 물성특성(Material property)으로는 탄성체로 고려하여 해석하였다. 또한, 압전소자에서 가해지는 힘은 하나의 점으로 간주하여 집중하중을 작용시켰다. 이러한 문제의 특성을 고려한 유한요소 수식은 다음과 같다<sup>(6)</sup>.

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial w / \partial z \\ \partial v / \partial z + \partial w / \partial y \\ \partial w / \partial x + \partial u / \partial z \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \psi_x^T & 0 & 0 \\ 0 & \psi_y^T & 0 \\ 0 & 0 & \psi_z^T \\ 0 & \psi_z^T & \psi_y^T \\ \psi_z^T & 0 & \psi_x^T \\ \psi_y^T & \psi_x^T & 0 \end{bmatrix} (\psi_x \ \psi_y \ \psi_z) \quad (2)$$

$$\psi_x^T = \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial x} \right],$$

$$\psi_y^T = \left[ \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right],$$

$$\psi_z^T = \left[ \frac{\partial u}{\partial z} \quad \frac{\partial v}{\partial z} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \right],$$

$$d\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} d(\hat{A}\hat{\psi}) = \frac{1}{2} d\hat{A}\hat{\psi} + \frac{1}{2} \hat{A}d\hat{\psi} \quad (3)$$

형상함수  $N$ 과 절점 매개변수  $\hat{a}$ 의 항으로 변위  $\hat{\psi}$ 를 나타내면  $\hat{\psi} = \hat{G}\hat{a}$ ,  $d\hat{\epsilon} = \hat{A}\hat{G}d\hat{a}$ 와 같다. 이때, 변형률행렬  $B$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$B = \hat{A}\hat{G} \quad (4)$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

또한, 재료의 물성에 대한 행렬  $D$ 는 다음과 같이 탄성체의  $E$ (영율)와  $\nu$ (프아송비)로 나타내어진다.

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 응력  $\hat{\sigma}$ 와 변형률  $\hat{\epsilon}$ 와의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = D\hat{\epsilon} \quad (7)$$

따라서, 임의의 3차원 요소에 대한 강성행렬과 유한요소 해석 정식(Finite Element Formulation)은 다음과 같이 얻

어지게 된다.

$$k^e = \int_{v^e} B^T D B dv^e \quad (8)$$

$$f^e = k^e \hat{a} \quad (9)$$

여기에서,  $f^e$ 는 작용력 벡터(Applied or Reaction Force vector),  $k^e$ 는 요소 강성행렬(Element stiffness matrix) 이며,  $\hat{a}$ 는 절점의 매개변수 벡터(Nodal displacement variables vector)를 나타낸다.

### 2.2 유한요소 모델링

유한요소해석 모델링은 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC를 활용하였으며, 유한요소해석을 위한 전·후처리(Pre/postprocessing)는 MENTAT를 사용하였다<sup>(8)</sup>.

모델링은 각 유닛의 재질을 Table 1과 같이 스테이지는 알루미늄(Aluminum), 구리(Copper), 스프링 강(Spring Steel), 툴 홀더 지그는 연강(Mild Steel), 툴 홀더는 텅스텐(Tungsten), 바이트 팁은 다이아몬드(Diamond)로 하였으며, 스테이지와 툴 홀더, 바이트 팁은 하나의 강체로 보았다. 그리고 압전소자의 모델링은 적층형을 하나의 강체로

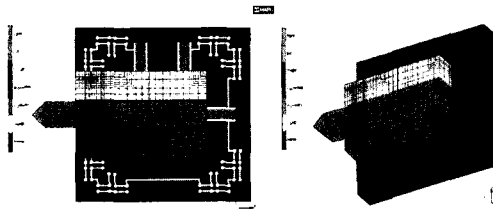


Fig. 1 FEM Modeling of Ultra Precision Cutting Unit

Table 1 Material Properties

Unit	Material	E kg/mm <sup>2</sup>	$\nu$	$\rho$ kg/mm <sup>3</sup>
Stage	Aluminium	7,000	0.32	2.7e-6
	Cooper	9,800	0.30	8.6e-6
	Spring steel	19,000	0.26	7.8e-6
PZT	AE0505D16	4,400	0.34	2.50e-6
Byte Zig	Mild steel	21,000	0.26	7.8e-6
Tool Holder	Tungsten	68,730	0.22	1.48e-6
Byte Tip	Diamond	114,550	0.20	3.50e-6

생각하였다. 또한 탄성힌지의 형상을 일반적으로 많이 설계되고 있는 Round Type의 형상으로 설계하여 재질변화에 따라 탄성힌지 부분에서 나타나는 응력분포와 변위 특성을 분석함으로써 UPCU의 안전성을 검토하고자 하였다.

Fig. 1은MENTAT에서 Round Type의 UPCU를 3차원 모델링 한 것이다.

또한 본 시스템은 초정밀가공기에서 사용을 목적으로 하기 때문에 3분력의 절삭력에 대한 안정성이 있어야 한다. 따라서 바이트 팁 부위에 3분력의 힘을 가하여 FEM해석을 하였으며, 그에 대한 근거는 정밀 선반의 바이트 팁 부분에서 직접 측정된 값을 적용하였다. 본 시스템이 초정밀 가공에서 사용되기 때문에 절삭량은 극히 작은 수치이지만, 안전성을 고려하여 최대 2mm까지 절삭한다고 가정하였다. 측정된 값은 Fig. 2와 같다.

### 2.3 유한요소 해석결과 및 분석

본 논문에서는 재질의 변화에 따라 초정밀 가공기용 마이크로 스테이지의 안정성이 어떻게 변화하는지를 아래와 같은 두 가지 방법으로 확인하고자 하였다.

1. 재질 변화에 따른 스테이지의 응력 분포
2. 재질 변화에 따른 스테이지의 변위 응답성

#### 2.3.1 재질 변화에 따른 스테이지의 응력 분포

스테이지의 재질은 알루미늄, 구리, 스프링강을 적용하였

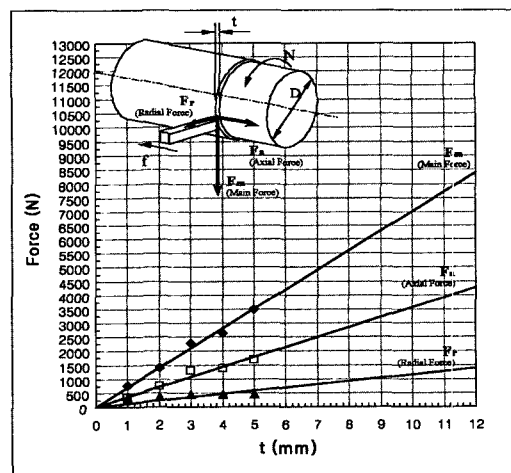


Fig. 2 Cutting Force of Micro Cutting Machine

다. 또한 일반적으로 마이크로스테이지 재질은 열변형이 적은 듀랄루민(Duralumin)을 사용하고 있지만 본 논문에서는 재질의 강도적 측면의 경향을 살펴보기 위한 것이기 때문에 연한강도의 알리미늄, 강한강도의 스프링강 중간적 강도의 구리를 FEM 해석기법을 이용하여 재질 변화에 따른 마이크로 스테이지의 탄성 및 강도 특성을 살펴 봄으로써 안정성 검토를 하였다.

경계조건은 스테이지 외곽은 고정되어 있으며, PZT는 스테이지만의 안정성 확인을 위해 모델링에서 제외하였으며, 3분력의 절삭력을 바이트 팁 부분에 가중하였다.

스테이지 재질에 따른 안전성 검토 결과 힌지 부분에서 응력집중이 발생하였지만 안전계수가 2.86~5.57로 나타났다. 따라서 3가지 재질 모두 힌지 부분에서의 크랙은 발생하지 않으며, 안전하다고 사료된다.

또한 스테이지 재질이 강할수록 스테이지에 걸리는 최대 전단 응력값은 Aluminium 재질에 비해 2.6%~7.1% 정도

증가함을 확인하였다.

따라서 강도적 측면에서 볼 때 3분력의 절삭력에 대한 스테이지의 안정성은 강한 재질일수록 안전하지만, 연한재질인 알루미늄에서도 크랙의 염려는 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 3~Fig. 5는 응력분포에 대한 각 재질의 FEM 해석 결과이다. 그리고 Table 2는 그 수치를 나타낸 것이다.

### 2.3.2 재질 변화에 따른 스테이지의 변위 응답성

다음은 PZT에 85kg의 하중을 가하여 바이트 팁에서의 변위 응답성을 파악한 것이다. 또한 PZT의 가중에 의한 바이트 팁 부분의 변위특성을 알아보기 위해 3분력의 절삭력은 가하지 않은 상태이다. 이것은 재질의 변화에 따라 PZT 입력에 대한 바이트의 응답특성이 어떻게 변화하는지를 파악하고자 한 것이다.

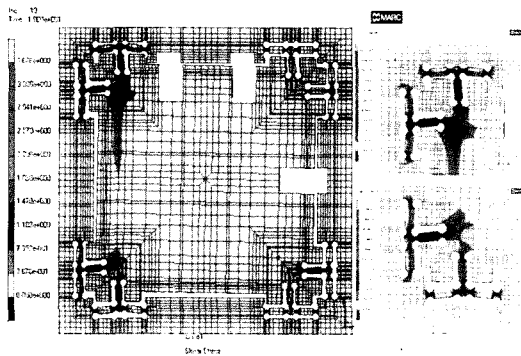


Fig. 3 Von-Mises Stress Distribution of Micro Stage (Aluminum)

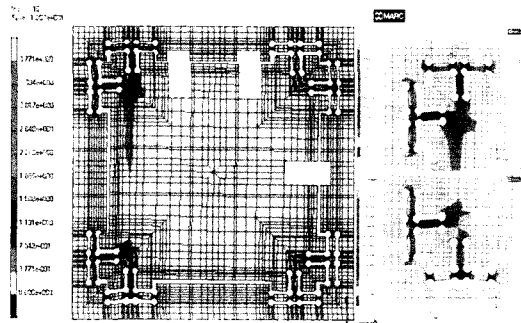


Fig. 4 Von-Mises Stress Distribution of Micro Stage (Copper)

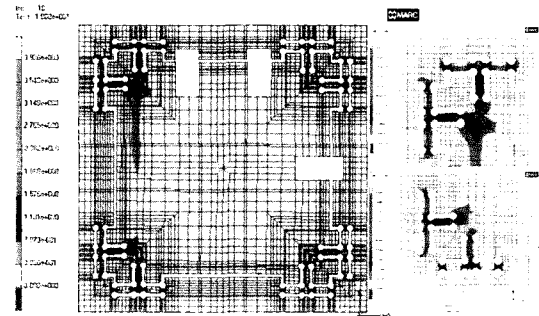


Fig. 5 Von-Mises Stress Distribution of Micro Stage (Spring Steel)

Table 2 FEM Data According to material Alteration on Micro Stage

PZT load	0		
Byte load	Radial(25Kg), Axial(100Kg), Main(-140Kg)		
Type	Aluminium	Cooper	Spring steel
$\tau_{max}$ on Stage(kg/mm <sup>2</sup> )	3.676	3.771	3.936
Yielding stress(kg/mm <sup>2</sup> )	21	42	40
Criterion Factor "Y"(kg/mm <sup>2</sup> )	7.352 (100%)	7.54 (102.6%)	7.872 (107.1%)
Safety Factor	2.86	5.57	5.08
Crack	No	No	No

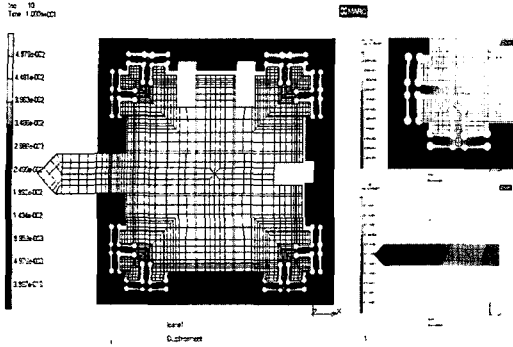


Fig. 6 Response of Displacement(Aluminum)

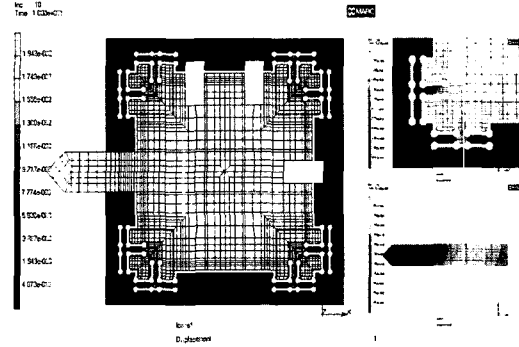


Fig. 8 Response of Displacement(Spring Steel)

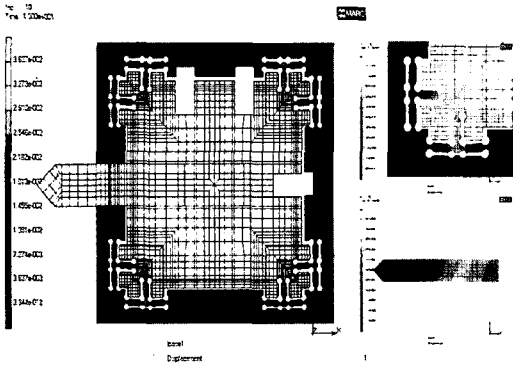


Fig. 7 Response of Displacement(Copper)

Table 3 Displacement Response of Byte Tip According to material Alteration on Micro Stage

PZT load		85Kg		
Byte load		Radial(OKg), Axial(OKg), Main(OKg)		
Disp. of Byte tip	material	Aluminium	Cooper	Spring steel
	X(μm)	-21.237700 (100%)	-15.5298000 (73.1%)	-8.31574000 (39.2%)
	Y(μm)	-41.956700 (100%)	-30.6252000 (73.0%)	-16.33900000 (38.9%)
	Z(μm)	+0.163368 (100%)	+0.0785229 (48.1%)	-0.00316555 (1.94%)

### 3. 결론

본 논문에서는 초정밀 가공기용 마이크로 스테이지의 설계에서 어떠한 힌지의 재질을 사용해야 될 것인지를 결정하기 위한 것으로서 UPCU의 제작의 시행착오를 줄이기 위하여 FEM 해석을 하였으며, 그 경향을 파악 하고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 알루미늄, 구리, 스프링 강 3가지 재질을 적용하였을 때 모두 크랙은 발생하지 않았으며, 안전함을 확인하였다.
- (2) PZT의 하중을 가하고 질삭력을 가하지 않았을 경우, 연한 재질이 변위 응답성이 우수함을 확인하였다.
- (3) 3가지 재질의 FEM 해석결과 본 논문에서의 UPCU에 사용될 재질은 크랙이 발생하지 않으며, 변위 응답성이 좋은 알루미늄이 적합한 것으로 사료된다.

위와 같이 FEM 해석을 통하여 힌지의 재질 선택에 따라

PZT 가중에 따른 바이트 팁에서의 변위응답성을 검토한 결과 스테이지의 재질이 강할수록 변위응답성이 좋지 않은 것을 확인할 수 있었다.

Table 3에서는 스테이지의 재질 변화에 따른 변위 응답성에 대한 FEM 해석 데이터를 나타내었으며, Fig.6~ Fig.8은 재질의 변화에 따른 마이크로 스테이지 및 바이트 팁 부분의 변위 특성을 보여 주고 있다.

해석결과 변위 응답성 측면에서 볼 때 PZT를 이용한 초정밀 가공용 스테이지는 강한 재질보다는 연한 재질을 선택하는 것이 변위응답 특성이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 강한 재질일수록 PZT에 의한 변위 제어의 스트로크가 줄어들고, 더 많은 힘을 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

파이크로 스테이지의 안정성 경향이 어떻게 변화하는지의 경향을 확인하였으며, 해석 결과는 UPCU의 설계 및 제작에 기초 데이터 베이스로 사용 할 것이다. 또한 스테이지의 재질을 선택 할 때는 재질의 열적 특성 및 힌지의 형상 등이 중요한 요소가 되며, 기타 다양한 조건을 검토하여 재질을 선택하여야 할 것며, 스테이지의 사용 용도에 따라 해석 방법도 달리 하여야 할 것이다.

## 후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2002년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) M. Shiraishi, K. Uehara, 1979, "In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning," *Annal of The CIRP*, Vol. 28, pp. 333~337.
- (2) H. NAKAZAWA, 1994, "Principles of Precision Engineering," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 75~82, 140~167.
- (3) D.Keith Bowen, 1992, "Development in Nanotechnology," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95-129.
- (4) Jae. Yeol Kim, Haeng. Nam. Lee, Lee. ku. Kwac, Jae. ho. Han, Young. Tae. Cho, Choong. Geug. Jun, 2000, "Control performance evaluation of ultra precision Positioning apparatus," Proceedings of The 2000 International Symposium on Mechatronics and Intelligent Mechanical System for 21 Century, ISIM, pp. 252~255.
- (5) S.T.Smith and D.G.Chetwynd, 1992, "Foundation of Ultra Precision Mechanism Design," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95~128.
- (6) Thomas J. R. Hughes, 1987, "The Finite Element Method," Prentice-Hall International Editions, pp. 90~91.
- (7) M. Shiraishi, K. Uehara, 1979, "In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning," *Annal of The CIRP*, Vol. 28, pp. 333~337.
- (8) MSC, 1994.MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D
- (9) Jong. Du. Kim, 1998, "A Study on the Waviness Compensation System of Ultraprecision Machining," *KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 132~140.
- (10) Lee. Ku Kwac, Jae. Yeol. Kim, Jae. Ho. Han, 2002, "Simulation and Control performance evaluation of ultra precision single plane X-Y stage," PROCEEDING OF KSMTE SPRING CONFERENCE, pp. 422~423.
- (11) Jae. Yeol. Kim, K.yu. Tae. Lee, Lee. Ku. Kwac, Jae. Ho. Han, Chang. Hun. Kim, 2002, "Computer Simulation and Control Performance Evaluation for Feedback System of Ultra Positioning by using Laser Interferometer," *KSMTE*, Vol. 11, No. 1, pp. 17~25.
- (12) Ki. hyung. Park, Jae. Yeol. Kim, Lee. Ku. Kwac, 2002, "Simulation and Control Performance Evaluation of Ultra-precision Single Plane X-Y Stage," *KSMTE*, Vol. 11, No. 5, pp. 65~72.