

초정밀 가공기용 마이크로 스테이지의 힌지 형상에 따른 안정성 해석

김재열 (조선대 기계공학부), 곽이구* (조선대 대학원), 심재기(조선대 기계공학부)
안재신(조선대 대학원), 송경석(조선대 대학원), 한재호(송원대 자동차과)

Stability Analysis According to Hinge Type Alteration on Micro Stage for Micro Cutting Machine

J.Y. Kim(Mecha. Eng. Dept. CSU), L. K. Kwac(Graduate School. CSU) , S.G. Sim(Mecha. Eng. Dept. CSU)
J. S. An(Graduate School. CSU), K. S. Song(Graduate School. CSU), J. H. Han(Automobile Eng. Dept. SWC)

ABSTRACT

Ultra precision processing technology is the field which is seriously protected its technology by advanced nations. Because of this reason, this technology is very difficult to supply for domestic companies, also domestic companies are revealed the limit of technology development by itself. And then, those are depend on the technology development of advanced nations, domestic companies are not conquer application step with already developed parts. Of course, some cases of its research are succeed, those are included element technology, system technology and so on, for development of ultra precision processing system. To conquer technology holding ultra precision processing accuracy of nm level, active research are needed.

In this paper, stability of ultra precision cutting unit is analyzed, 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

21 세기로 접어들면서 세계는 산업사회 이후에 지식기반 사회라는 새로운 혁명을 준비하고 있으며, 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.⁽¹⁾

특히 기계분야에서 나노테크가 가장 시급하게 이루어져야 될 분야가 초정밀 가공이라 할 수 있다.

최근 전자 산업과 광산업의 급진적인 발전과 발맞춰 이러한 관련기에 필요한 여러 가지 핵심 부품의 초정밀가공에 대한 필요성이 증대 되고 있다.

초정밀 가공기술은 선진국의 기술보호가 가장 심한 분야로 국내에 기술보급이 제대로 이루어 지지 않아 관련 핵심 부품의 자체 개발의 한계를 보이며, 외국업체에 개발을 의뢰 하거나 외국업체에서 개발된 부품을 응용하는 단계를 벗어나지 못하고 있다. 물론 초정밀가공시스템을 개발하기 위한 요소기술, 시스템 개발기술 등의 연구에 성공한 사례도 있지만 이미 나노미터(nm) 수준의 가공정밀도를 완성한 기술에 뒤떨어지지 않기 위해서는 보다 활발한 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

본 논문에서는 이러한 초정밀 가공기의 핵심 유닛이 되는 초정밀 미소절삭장치(Ultra Precision Cutting Unit ; UPCU)의 안정성 검토를 다룬 것으로써 힌지의 형상과 재질의 변화에 따라 어떠한 결과가 나오는지 분석 하였다.

이러한 안정성 검토를 함으로써 유닛 제어의 기초 자료수집의 효과와 유닛 설계 및 제작의 시행착오를 줄일 수 있다.

2. 유한요소 모델링

유한요소해석 모델링은 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC를 활용하였으며, 유한요소해석을 위한 전·후처리(Pre/post-processing)는 MENTAT를 사용하였다.⁽⁸⁾

모델링은 각 유닛의 재질을 Table 1과 같이 스테이지는 Aluminum, 툴 홀더 지그는 연강, 툴 홀더는 텅스텐, 바이트 팁은 다이아몬드로 하였으며, 스테이지와 툴 홀더, 바이트 팁은 하나의 강체로 보았다. 그리고 압전소자의 모델링은 적층형을 하나의 강체로 생각하였다. 그리고 각 모델의 경계조건은 Table 2와 같이 하였다.

또한 탄성힌지의 형상을 일반적으로 많이 설계되고 있는 Rectangular Type과 Round Type의 두가지 형상으로 설계하여 형상에 따라 탄성힌지 부분에서 나타나는 응력분포와 변위 특성을 분석함으로 절삭력에 대한 UPCU의 안전성을 평가하고자 하였다.

Fig.1은 MENTAT에서 Rectangular Type과 Round Type을 3차원 모델링한 것이다.

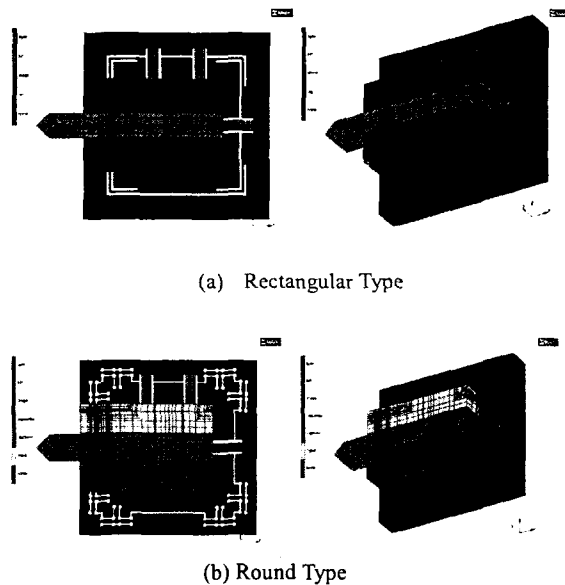


Fig.1 FEM Modeling of Ultra Precision Cutting Unit

Table 1 Material properties

Unit(Material)	E(kg/mm ²)	ν	$\rho(\text{mm}^3/\text{kg})$
Stage(Aluminum)	7,000	0.32	2.70e-6
PZT(AE0505D16)	4,400	0.34	2.50e-6
Tool Holder zig(Mild steel)	21,000	0.26	7.80e-6
Tool Holder(Tungsten)	68,730	0.22	1.48e-6
Byte Tip(Diamond)	114,550	0.20	3.50e-6

Table 2 Boundary conditions

PZT right-side	Fixed
Stage outside	Fixed
PZT/Stage contact area	Treated by Contact problem
Loading at Right-center PZT	Free
Loading at Top PZT	Free
Loading at Byte Tip(x/y/z-direction)	25/100/-140Kgf

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

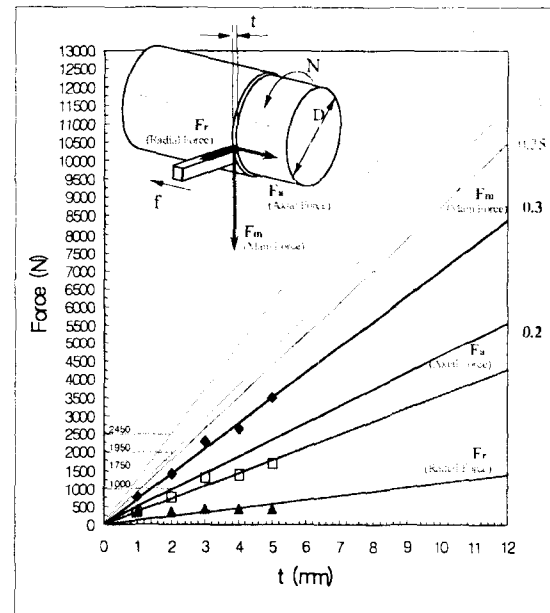


Fig. 2 Cutting Force of Micro Cutting Machine

3. 유한요소 해석결과 및 분석

본 논문에서는 다음과 같은 3 가지 안으로 안정성 해석을 하였다.

1. 힌지의 형상에 따른 안정성 검토
2. 절삭력 부하에 따른 안정성 검토
3. 재질 변화에 따른 변위 응답성 및 안전성 검토

3.1 힌지 형상에 따른 안정성 검토

본 논문에서는 2 가지의 힌지형상으로 UPCU 의 마이크로 스테이지를 설계하여 FEM 해석을 하였다.

먼저 PZT 를 포함한 마이크로 스테이지 모델의 바이트 팁에 Fig.2 의 2mm 절삭시의 3 분력을 가하여 힌지부 응력분포와 변위 특성을 알아보았다. Fig.3 과 Fig.4 는 PZT 에 하중을 가하지 않았을 때의 모델의 응력 분포와 변위 특성을 보여주고 있으며, Table 3 은 스테이지의 형상 변화에 따른 FEM 데이터를 나타내고 있다.

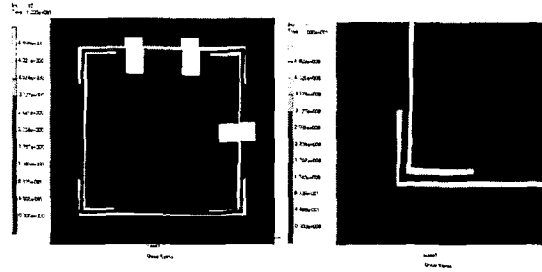
Table 3 FEM Data According to Hinge Type Alteration on Micro Stage

Hinge Type	Rectangular		Round(Circle)		
PZT/Stage	Applied contact problems				
PZT load	0	85Kg	0	85Kg	
ϵ_{max} on Stage	4.468 kg/mm ²	4.455 kg/mm ²	2.212 kg/mm ²	2.844 kg/mm ²	
Crack (Safety Factor)	No (2.35)	No (2.36)	No (3.57)	No (3.69)	
Right-center PZT	X	+2.42738	-6.14675	+1.749790	-4.708660
	Y	+18.39650	+20.26030	+6.274620	+6.041340
disp.(μ m)	Z	-14.19080	-15.57820	-3.085020	-3.066800
Left-top PZT	X	-32.14010	-31.82750	-6.434690	-6.095680
	Y	+11.85260	+3.34388	+9.587570	+3.034800
disp.(μ m)	Z	+5.16686	+5.17251	+0.366429	+0.406138
Right-top PZT	X	0.00000	0.00000	0.000000	0.000000
	Y	0.00000	-8.87839	0.000000	-8.878390
disp.(μ m)	Z	0.00000	0.00000	0.000000	0.000000

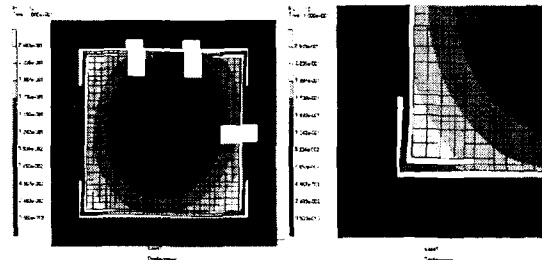
Hinge 형상^o Rectangular type 의 경우 PZT center 변위가 최대 32 μ m 정도인 반면에 Round type 의 경우 9.6 μ m로 rectangular type 의 28% 수준이었다. 따라서, Rectangular type 의 경우 변위량이 크게 나타남에 따라 PZT 에 의한 변위 제어(최대 11.6 \pm 2.0 μ m)가 곤란한 상태임을 확인 할 수 있었다. Stage 상에서의 최대 전단응력값이 Round type 에 비해 Rectangular type 이 좌측하단 또는 좌측상단에서 약 2 배정도 크게 발생하지만 안전계수 2.35~3.69 정도로 안전한 구조라 볼 수 있다.

또한, PZT 에 하중을 가하면 Stage hinge 에서의 전단응력값이 0.3~3.2%정도 감소하는 경향을 알 수 있다. 이러한 전단응력 감소는 Byte tip 의 Axial Force 에 대한 PZT 加重 저항력발생(Hinge 부 변형의 감소)에 기인한 것으로 사료된다.

따라서 힌지부 크랙발생 측면에서 볼때는 두가지 타입모두 안전하지만, 변위특성을 볼 때 Round Type 이 안정적임을 확인하였다.

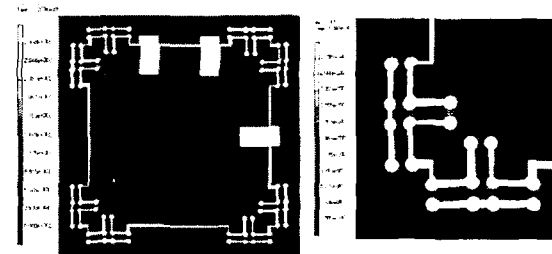


(a) Von-Mises Stress Distribution

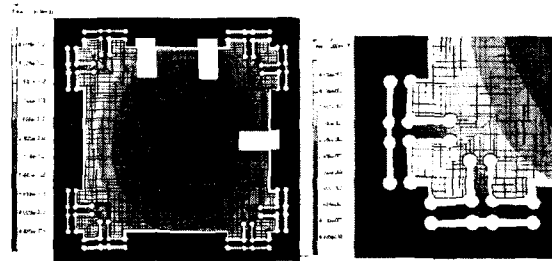


(b) Deformation

Fig. 3 FEM Data of Rectangular Type (No PZT Loading)



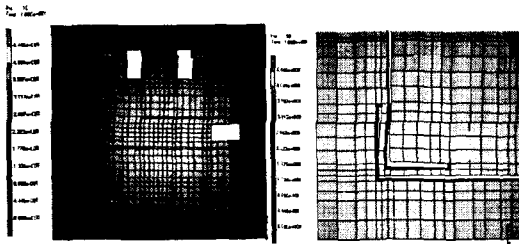
(a) Von-Mises Stress Distribution



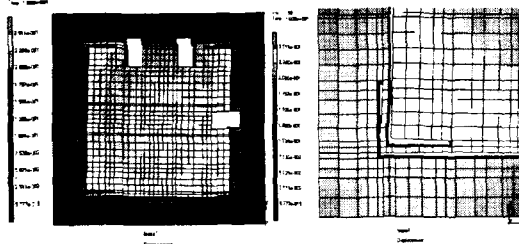
(b) Deformation

Fig. 4 FEM Data of Round Type(No PZT Loading)

다음의 Fig. 5 와 Fig. 6 은 바이트 팁에 3 분력을 가하고 PZT 에 85kg 의 하중을 가했을 때의 해석 결과이다. PZT 의 최대 하중이 320kg 일때 Rectangular Type 에서는 제어 한계를 넘어서 변위가 일어나고 있는 것을 확인 할 수 있으며, Round Type 에서는 제어가 가능 할것으로 사료된다.

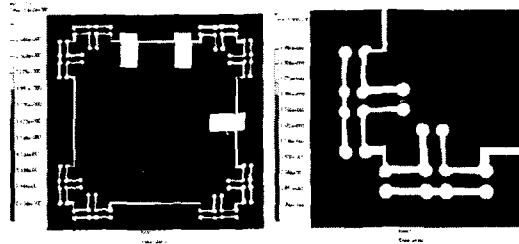


(a) Von-Mises Stress Distribution

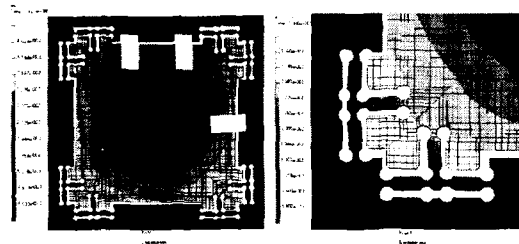


(b) Deformation

Fig. 5 FEM Data of Rectangular Type(PZT Loading)



(a) Von-Mises Stress Distribution



(b) Deformation

Fig. 6 FEM Data of Round Type(PZT Loading)

3.2 절삭력 부하에 따른 Stage 안전성 검토

다음은 신뢰성있는 스테이지의 안정성 검토를 위해 PZT 를 포함하지 않는 모델에서의 3 분력의 절삭력을 가하였을 경우의 스테이지의 변위 특성을 파악하였다.

Fig.7 과 Fig.8 에서 볼 수 있듯이 확실하게 Round Type 에서 변위가 안정적임을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 9 에서 스테이지의 재질을 Spring Steel 을 적용하였을 경우에 절삭력 부하에 따른 변위 안정성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Rectangular type 이 Round Type 에 비해 변위가 약 8 배정도 크게 발생되며, 절삭력에 의해 변형이 크게 일어나기 때문에 PZT 에 의한 변위 제어 안정성이 저하될 것으로 사료된다.

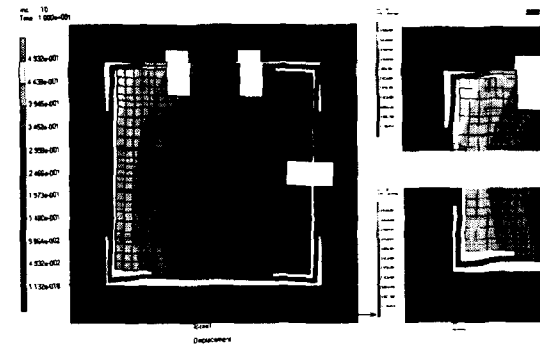


Fig. 7 Deformation of Rectangular Type(aluminum)

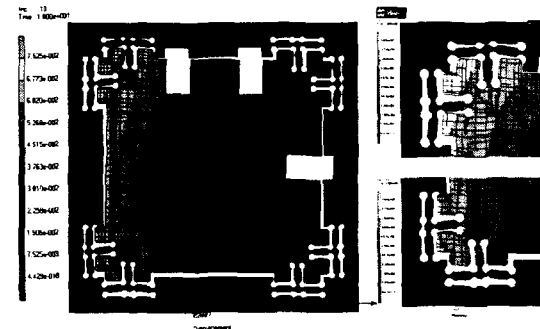


Fig. 8 Deformation of Round Type(aluminum)

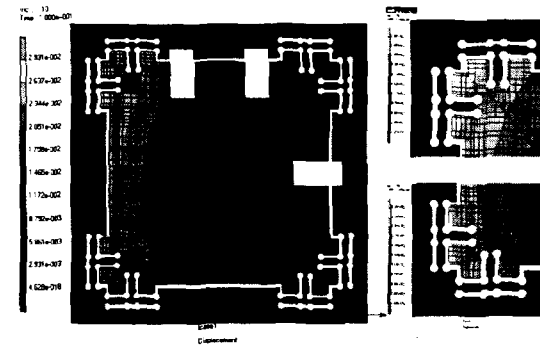


Fig. 9 Deformation of Round Type(Spring Steel)

Table 4 는 PZT 가 접촉되어질 Stage 정점에서의 변위를 파악한것이다.

Table 4 FEM Data According to Cutting Force

Stage hinge Type		Rectangular	Round	
Byte loading		Radial(25), Axial(100), Main(-140Kg)		
Stage material type		Aluminum	Aluminum	Spring Steel
Right-	X-disp(μm)	+56.8241	+6.43605	+2.4450000
Center	Y-disp(μm)	+89.4994	+1.44530	+0.0566193
PZT	Z-disp(μm)	+19.9862	+3.09150	+1.2157700
Left-	X-disp(μm)	+187.1000	+29.94560	+11.6798000
Top	Y-disp(μm)	+276.1480	+35.89340	+13.9607000
PZT	Z-disp(μm)	-102.4940	-13.19030	-5.0916500
Right-	X-disp(μm)	+186.7900	+29.47760	+11.4329000
Top	Y-disp(μm)	+163.3700	+13.53080	+5.2457000
PZT	Z-disp(μm)	-39.2176	-3.94369	-1.5727420

3.3 재질변화에 따른 변위 응답성 검토

다음은 Round Type 에서 PZT 에 85kg 의 하중을 가하여 바이트 팁에서의 변위 응답성을 파악한 것이다. 이것은 재질의 변화에 따라 응답특성이 어떻게 변화하는지를 파악하고자 한것이다.

PZT 加重에 따른 Byte tip 에서의 변위응답성을 검토한 결과 Stage 의 재질이 강할수록 변위응답성이 좋지 않은 것을 확인할 수 있었다.

Table 5 에서는 스테이지의 재질 변화에 따른 FEM 해석 데이터를 나타내었으며, Fig. 10 ~ Fig. 12 는 재질의 변화에 따른 마이크로 스테이지 및 바이트 팁부분의 변위 특성을 보여 주고 있다.

Table 5 FEM Data According to material Alteration on Micro Stage

Hinge Type		Round(Circle)			
PZT load		85Kg			
Byte load		Radial(0Kg), Axial(0Kg), Main(0Kg)			
Material Properties (E, v, ρ)	PZT	AE0505D16	4,400 kg/mm ²	0.34	2.5e-6 kg/mm ³
	Byte Zig	Mild steel	21,000 kg/mm ²	0.26	7.8e-6 kg/mm ³
	Holder	Tungsten	68,730 kg/mm ²	0.22	1.48e-6 kg/mm ³
	Byte Tip	Diamond	114,550 kg/mm ²	0.20	3.50e-6 kg/mm ³
PZT Material propeties	Type	Aluminum	Cooper	Spring steel	
	E	7,000 kg/mm ²	9,800 kg/mm ²	19,000 kg/mm ²	
	v	0.32	0.30	0.26	
	ρ	2.7e-6 kg/mm ³	8.6e-6 kg/mm ³	7.8e-6 kg/mm ³	
Disp. of Byte tip	X(μm)	-21.23770(100%)	-15.529800(73.1%)	-8.31574000(39.2%)	
	Y(μm)	-11.95670(100%)	-30.625200(73.0%)	-16.33900000(38.9%)	
	Z(μm)	+0.163368(100%)	+0.0785229(48.1%)	-0.00316555(1.94%)	

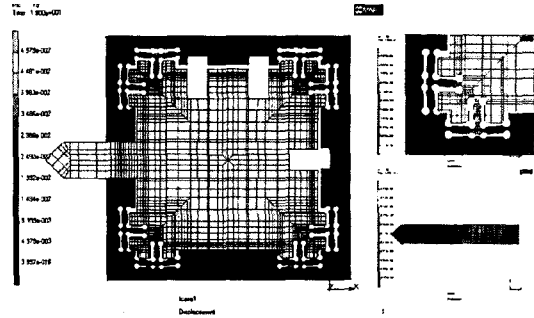


Fig. 10 Response of Displacement(aluminum)

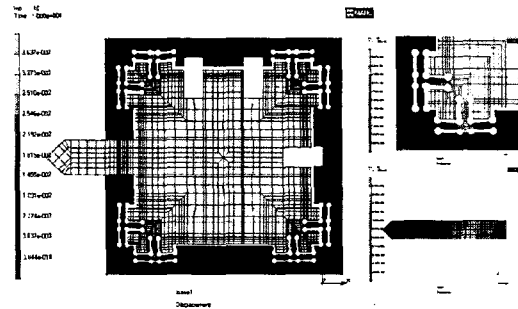


Fig. 11 Response of Displacement(Copper)

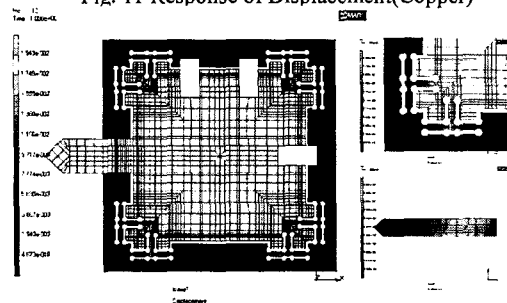


Fig. 12 Response of Displacement (Spring Steel)

변위응답성 측면에서 살펴보면 PZT 를 이용한 초정밀 가공용 Stage 는 강한 재질보다는 연한 재질을 선택하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 초정밀 가공용 마이크로 스테이지의 설계에서 어떠한 힌지의 형상과 재질을 사용해야 될것인지를 결정하기위한 것으로써 UPCU 의 제작의 시행 착오를 줄이위하여 FEM 해석을 하였으며, 그 경향을 파악 하고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 힌지의 형상은 절삭력 부하 측면서 볼 때 Round Type 이 안정적인을 확인하였다.

2. Aluminum, Copper, Spring Steel 의 3 가지 재질을 적용하였을 때 모두 크랙은 발생하지 않았으며, 안전함을 확인 하였다.
3. PZT 의 하중을 가하고 절삭력을 가하지 않았을 경우, 연한 재질이 변위 응답성이 우수함을 확인 하였다.

위와 같이 FEM 해석을 통하여 힌지의 형상 및 재질 선택에 따라 마이크로 스테이지의 안정성 경향이 어떻게 변화 하는지 확인 하였으며, UPCU 의 설계 및 제작에 기초 데이터 베이스로 사용하여 할 것이다. 또한 스테이지의 재질을 선택 할 때는 재질의 열적 특성 또한 중요한 요소이며, 여러가지 조건을 검토하여 재질을 선택하여야 할 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. 이조원, "10 억분의 1nano 가 여는 세상 - 나노기술", 사이언스 어드벤처 제 11 회 강연회 2001.
2. H. NAKAZAWA, 1994, "Principles of Precision Engineering", Gordon and Breach Science Publishers, pp. 75~82, pp. 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-Tar 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, "The Finite Element Method" Prentice-Hall International Editions , p90~91, 1987.
7. 김재열, 윤성훈, 한재호, 박이구, 김항우 "유한요소법을 이용한 초정밀 미동스테이지 설계에 관한 연구 (I)", 한국정밀공학회 춘계발표논문집, 2001
8. MARC Analysis Research Corporation manual,

VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.

9. 김정두, "초정밀가공기의 파상도 보정시스템에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 7 권 6 호, pp 132~140, 1998