

초정밀 가공기용 마이크로 스테이지의 힌지 형상과 재질 변화에 따른 안정성 해석

김재열#, 광이구*, 유 신**

Stability Analysis of a Micro Stage for Micro Cutting Machine with Various Hinge Type and Material Transformation

Jac-Yeol Kim[#], Lee-Ku Kwac^{*}, Sin You^{**}

ABSTRACT

Recently, the world are preparing for new revolution, called as IT (Information Technology), NT (Nano-Technology), and BT (Bio-Technology). NT can be applied to various fields such as semiconductor-micro technology. Ultra precision processing is required for NT in the field of mechanical engineering. Recently, together with radical advancement of electronic and photonics industry, necessity of ultra precision processing is on the increase for the manufacture of various kernel parts. Therefore, in this paper, stability of ultra precision cutting unit is investigated, this unit is the kernel unit in ultra precision processing machine. According to alteration of shape and material about hinge, stability investigation is performed.

In this paper, hinge shapes of micro stage in UPCU (Ultra Precision Cutting Unit) are designed as two types, where, hinge shapes are composed of round and rectangularity. Elasticity and strength are analyzed about micro stage, according to hinge shapes, by FE analysis. Micro stage in ultra precision processing machine has to keep hinge shape under cutting condition with 3-component force (cutting component, axial component, radial component) and to reduce modification against cutting force. Then we investigated its elasticity and its strength against these conditions. Material of micro stage is generally used to duralumin with small thermal deformation. But, stability of micro stage is investigated, according to elasticity and strength due to various materials, by FE analysis. Where, Used materials are composed of aluminum of low strength and cooper of medium strength and spring steel of high strength.

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 ; 유한요소법), Ultra Precision Cutting Unit(UPCU ; 미소절삭유닛), Micro Cutting Machine(초정밀 절삭 가공기), PZT(Pb(Zr,Ti)O₃ ; 압전소자)

접수일: 2002년 11월 20일; 게재승인일: 2003년 4월 8일

교신저자: 조선대학교 기전공학과

Email: jykim@chosun.ac.kr, Tel: (062) 230-7035

* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

** 목포과학대학 메카트로닉스과

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 FE 해석 이용하여 힌지의 형상과 재질의 변화에 따라 어떠한 결과가 나오는지 분석 하였다.

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

2. 유한요소 모델링

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

모델링은 각 유닛의 재질을 Table 1 과 같이 스테이지는 Aluminum, Copper, Spring Steel, 톨 홀더

지그는 Mild Steel, 톨 홀더는 Tungsten, 바이트 텃은 Diamond 로 하였으며, 스테이지와 톨 홀더, 바이트 텃은 하나의 강체로 보았다. 그리고 압전소자의 모델링은 적층형을 하나의 강체로 생각하였다.

또한 탄성힌지의 형상을 일반적으로 많이 설계되고 있는 Rectangular Type 과 Round Type 의 두 가지 형상으로 설계하여 형상에 따라 탄성힌지 부분에서 나타나는 응력분포와 변위 특성을 분석함으로써 절삭력에 대한 UPCU 의 안전성을 평가하고자 하였다.

Fig. 1 은 MENTAT 에서 Rectangular Type 과 Round Type 을 3 차원 모델링한 것이다.

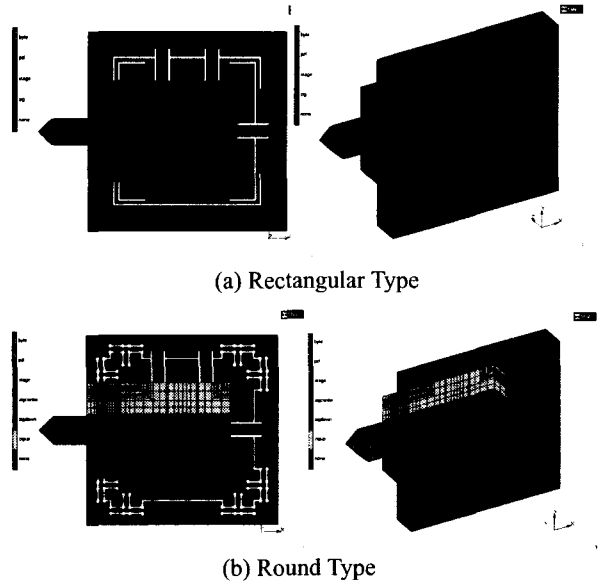


Fig. 1 FE Modeling of ultra precision cutting unit

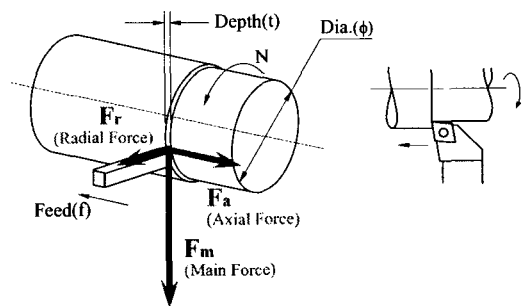


Fig. 2 Direction of cutting force

Table 1 Material properties of ultra precision cutting unit

Unit(Material)		E (kg/mm ²)	v	ρ (mm ³ /kg)
Stage	Aluminum	7,000	0.32	2.70e-6
	Copper	9,800	0.30	8.6e-6
	Spring Steel	19,000	0.26	7.8 e-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

또한 본 시스템은 초정밀가공기에서 사용을 목적으로 하기 때문에 가공시 발생하는 3 분력의 절삭력에 대한 안정성이 있어야 한다. 따라서 바이트 팁 부위에 3 분력의 힘을 가하여 FE 해석을 하였으며, 그에 대한 근거는 정밀 선반의 바이트 팁 부분에서 직접 측정된 값을 적용하였다. 본 시스템이 초정밀 가공 에서 사용되기 때문에 절삭량은 극히 작은 수치이지만, 안전성을 고려하여 최대 2mm 까지 절삭한다고 가정하였다. Fig.2 는 절삭시 발생하는 3 분력이 작용하는 방향을 나타낸 것이다. Fig. 3 은 Feed (f)량은 0.3 mm/rev 이고, Speed(V)는 150 m/min 이며, SM45C 를 가공 할 때 측정된 값을 나타내었다.

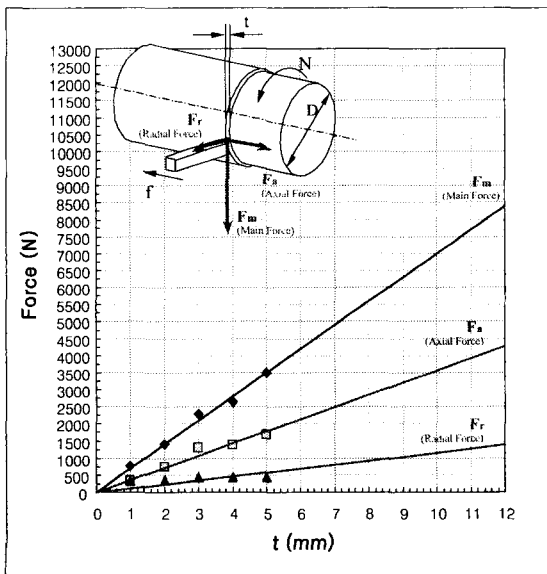


Fig. 3 Cutting force of micro cutting machine

3. 유한요소 해석결과 및 분석

힌지의 형상은 탄성적 측면과 하중에 대한 안정성 및 강도적 측면을 고려하여 설계되어진다. (5) 본 논문에서는 Round Type 과 이를 단순화한 Rectangular Type 의 두가지 형상으로 설계를 하여 힌지 형상에 따른 마이크로 스테이지의 탄성 및 강도 특성을 FEM 을 이용하여 분석 하였다.

그리고 초정밀가공기용 마이크로스테이지는 3 분력의 절삭력을 가해지는 절삭중의 조건에서도 힌지의 형상을 유지하여야 하며, 절삭력에 대한 변형이 최소화 되어야 한다. (9) 이러한 절삭력 부하에 따른 탄성 및 강도 특성을 검토하였다.

또한 일반적으로 마이크로스테이지 재질은 열 변형이 적은 듀랄루민을 사용하고 있지만 본 논문에서는 재질의 강도적 측면의 경향을 살펴보기 위한 것이기 때문에 연한강도의 Aluminum, 강한강도의 Spring Steel, 중간적 강도의 Copper 를 FEM 을 이용하여 재질 변화에 따른 마이크로 스테이지의 탄성 및 강도 특성을 살펴 봄으로써 안정성 검토를 하였다. (5)

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 응력분포 및 변위 응답성 검토

위와 같이 3 가지 방법으로 안정성을 검토 함으로써 힌지의 형상과 재질의 변화따라 마이크로 스테이지의 안정성이 어떠한 경향을 나타내는지 파악할 수 있으며, UPCU 제작의 시행착오를 줄일 수 있다. 또한 차후 UPCU 제어의 기초 데이터 베이스에 이용될 것이다.

3.1 힌지 형상에 따른 안정성 검토

힌지형상에 따른 안정성 검토를 하기위한 모델의 경계조건은 PZT 를 포함한 Aluminum 재질 마이크로 스테이지 모델의 바이트 팁에 Fig. 3 의 2mm 절삭시의 3 분력(절삭력)을 가하며, PZT(Piezo)에 하중을 가하지 않는 상태로 하였다. 이때 힌지 부 응력분포와 변위 특성은 Fig. 4 와 Fig. 5 같은 결과를 보여주었으며, Table 2 에 힌지 형상에 따른 최대 전단응력 값과 변위 값을 나타내었다.

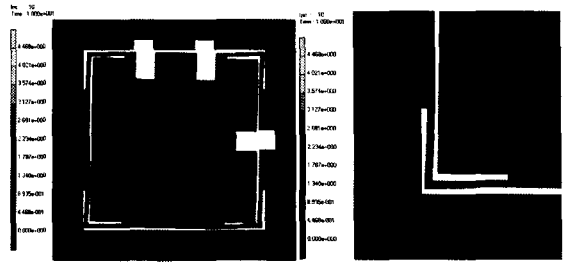
Hinge 형상이 Rectangular type 의 경우 PZT center 변위가 최대 32 μm 정도인 반면에 Round

type 의 경우 9.6 μm 로 rectangular type 의 28% 수준 이었다.따라서, Rectangular type 의 경우 변위량이 크게 나타남에 따라 PZT 에 의한 변위 제어(최대 18.6± 2.0 μm)가 곤란한 상태임을 확인 할 수 있었다. 스테이지상에서의 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. 따라서 힌지부 크랙발생 측면에서 볼때는 두가지 타입모두 안전하지만, 변위특성을 볼 때 Round Type 이 안정적임을 확인하였다.

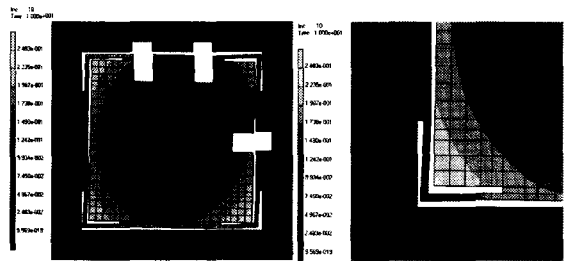
위의 결과를 명확히 확인하기 위해 Fig. 6 과 Fig. 7 과 같이 바이트 팁에 3 분력을 가하고 PZT 에 85kg 의 하중을 가하여 해석해 보았다. PZT 의 최대 하중이 320kg 일때 Rectangular Type 에서는 변위제어가 곤란하다는 것을 확인 할 수 있으며, Round Type 에서는 제어가 가능 할 것으로 사료된다. 또한, PZT 에 하중을 가하면 스테이지 hinge 에서의 전단응력값이 0.3~3.2%정도 감소하는 경향을 보이는데, 이러한 전단응력 감소는 Byte tip 의 Axial Force 에 대한 PZT 加重 저항력발생(Hinge 부 변형의 감소)에 기인한 것으로 사료된다.

Table 2 Boundary conditions and FE analysis result according to hinge type transformation on micro stage

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

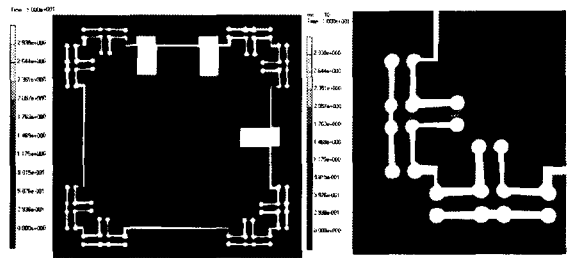


(a) Von-mises stress distribution

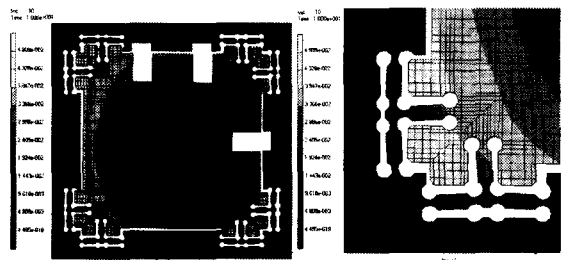


(b) Deformation

Fig. 4 FE analysis result of rectangular type (No PZT loading)

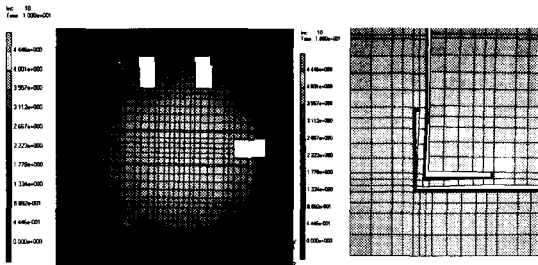


(a) Von-Mises Stress Distribution

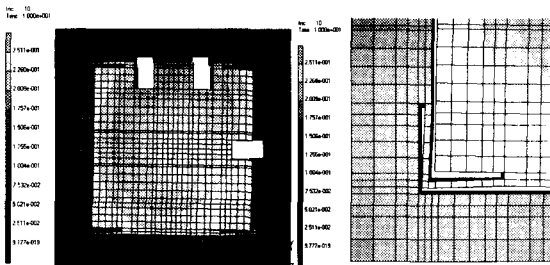


(b) Deformation

Fig. 5 FE analysis result of round Type (No PZT Loading)

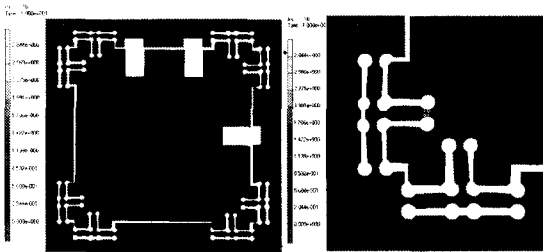


(a) Von-Mises stress distribution

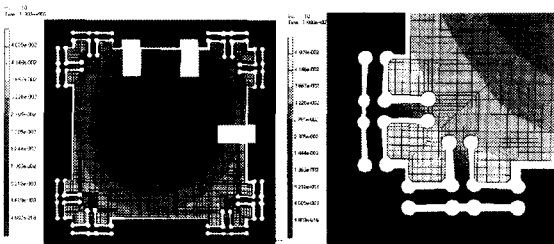


(b) deformation

Fig. 6 FE analysis result of rectangular type (PZT loading)



(a) Von-Mises stress distribution



(b) Deformation

Fig. 7 FE analysis result of round type (PZT loading)

3.2 절삭력 부하에 따른 스테이지 안전성 검토
 다음은 신뢰성있는 스테이지의 안정성 검토를 위해 PZT 를 포함하지 않는 모델에서의 3 분력의

절삭력을 가하였을 경우의 스테이지의 변위 특성을 파악하였다.

Fig. 8 과 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 확실하게 Round Type 에서 변위가 안정적임을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 10 에서 스테이지의 재질을 Spring Steel 을 적용하였을 경우에 절삭력 부하에 따른 변위 안정성이 뛰어난을 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. 또한 강한 재질 일수록 변위 안정성이 뛰어난을 알 수 있었다.

Table 3 은 PZT 가 접촉되어질 스테이지 정점에서의 변위를 파악한 것이다.

Table 3 FE analysis result According to Cutting Force on micro stage

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

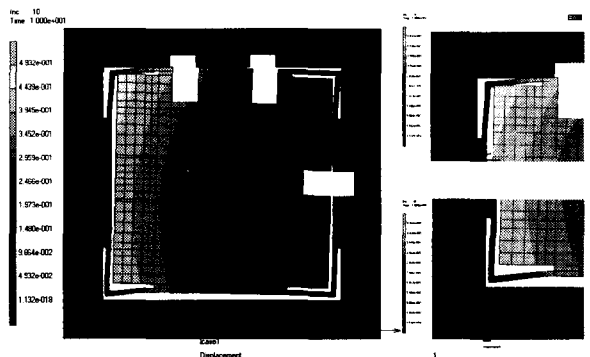


Fig. 8 Deformation of rectangular type (Aluminum)

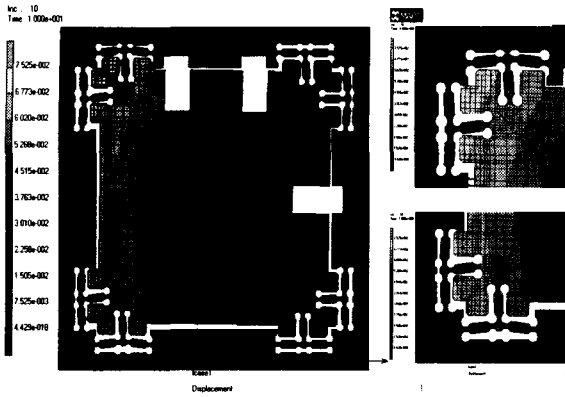


Fig. 9 Deformation of round type (Aluminum)

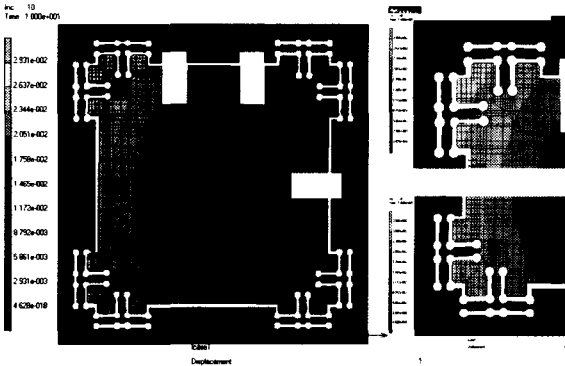


Fig. 10 Deformation of round type (Spring steel)

3.3 재질변화에 따른 안정성 검토

3.3.1 재질변화에 따른 응력분포

스테이지의 재질은 Aluminum, Copper, Spring steel 을 적용하였다. 일반적으로 사용되는 마이크로 스테이지의 재질은 듀랄루민 이지만, 강도적 측면에서의 해석을 위해 듀랄루민 대신 물성치가 비슷한 알루미늄을 적용하여 해석하였다.

따라서 알루미늄은 연한재질, 스프링강은 강한 재질, 중간적 성질을 가지는 구리 등을 FE 해석에 적용하여 그 특성을 살펴본 것이다.

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

스테이지 재질에 따른 안전성 검토 결과 결과 힌지 부분에서 응력집중이 발생하였지만 안전계수가 2.86~5.57 로 나타났다. 따라서 3 가지 재질 모두

힌지 부분에서의 크랙은 발생하지 않으며, 안전하다고 사료된다.

또한 스테이지 재질이 강할수록 스테이지에 걸리는 최대 전단 응력값은 Aluminum 재질에 비해 2.6%~7.1% 정도 증가함을 확인하였다.

따라서 강도적 측면에서 볼 때 3 분력의 절삭력에 대한 스테이지의 안정성은 강한 재질일수록 안전하지만, 연한재질인 알루미늄에서도 크랙의 염려는 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 11~Fig. 13 은 응력분포에 대한 각 재질의 FE 해석 결과이다. 그리고 Table 4 는 그 결과를 나타낸 것이다.

Table 4 Stress distributions according to material transformation on micro stage

Hinge Type	Round(Circle)		
PZT load	0		
Byte load (Kg)	Radial(25), Axial(100), Main(-140)		
Material	Aluminum	Copper	Spring Steel
τ_{max} on Stage(kg/mm ²)	3.676	3.771	3.936
Yielding stress(kg/mm ²)	21	42	40
Criterion Factor "Y"(kg/mm)	7.352 (100%)	7.54 (102.6%)	7.872 (107.1%)
Safety Factor	2.86	5.57	5.08
Crack	No	No	No

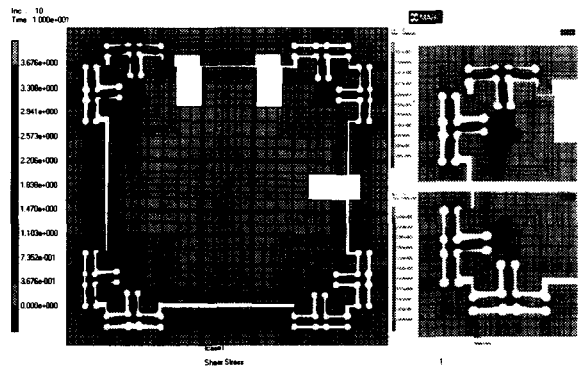


Fig. 11 Max. shear stress distribution of micro stage (Aluminum)

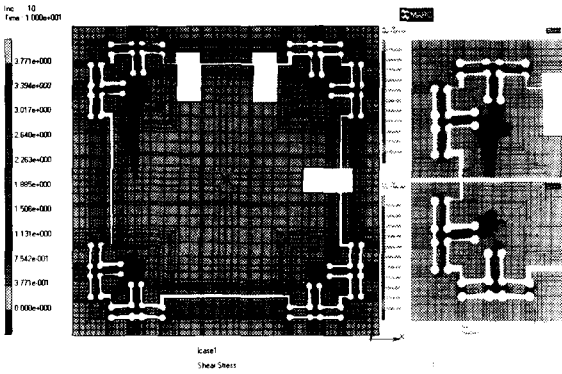


Fig. 12 Max. shear stress distribution of micro stage (Copper)

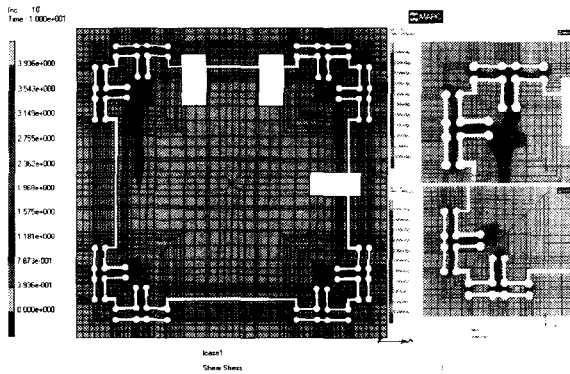


Fig. 13 Max. shear stress distribution of micro stage (Spring steel)

3.3.2 재질변화에 따른 변위 응답성

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

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

Table 5 에서는 스테이지의 재질 변화에 따른 FE 해석 결과를 나타내었으며, Fig. 14~Fig. 17 은 재질의 변화에 따른 마이크로 스테이지 및 화이트 팁부분의 변위 특성을 보여 주고 있다.

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

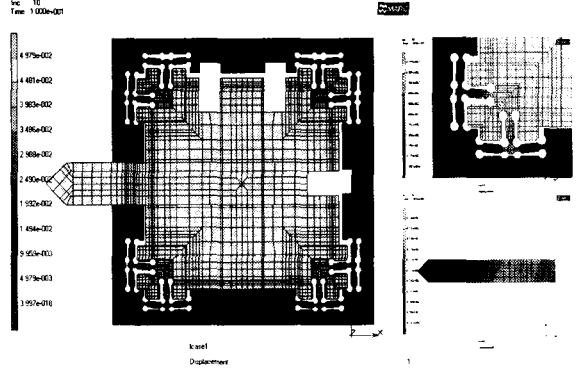


Fig. 14 Displacement response (Aluminum)

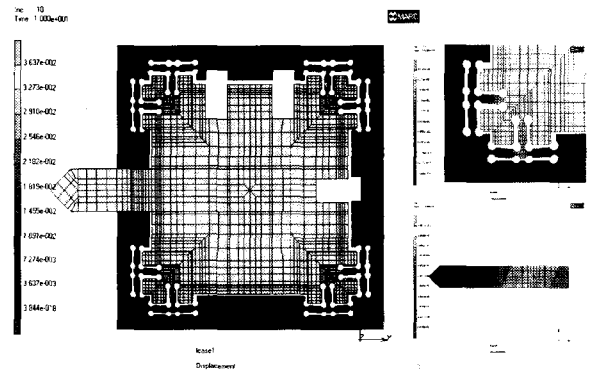


Fig. 16 Displacement response (Copper)

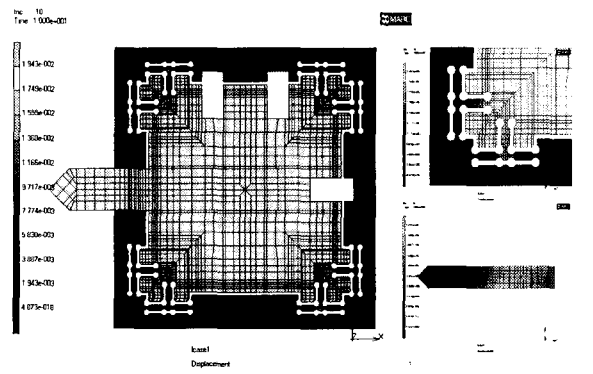


Fig. 17 Displacement response (Spring steel)

4. 결론

본 논문에서는 초정밀 가공기용 마이크로 스테이지의 설계에서 어떠한 힌지의 형상과 재질을 사용해야 될 것인지를 결정하기위한 것으로서 UPCU 의 제작의 시행 착오를 줄이기 위하여 FE

Table 5 Displacement response according to material transformation on micro stage

Hinge Type		Round(Circle)			
PZT load		85Kg			
Byte load(Kg)		Radial(0), Axial(0), Main(0)			
Material Properties (E(kg/mm ²), ν, ρ(kg/mm ³))	PZT	AE0505D16	4,400	0.34	2.5e-6
	Byte Zig	Mild steel	21,000	0.26	7.8e-6
	Holder	Tungsten	68,730	0.22	1.48e-6
	Byte Tip	Diamond	114,550	0.20	3.50e-6
Disp. of Byte tip	Material	Aluminum	Copper	Spring Steel	
	X(μm)	-21.23770	-15.52980	-8.315740	
	Y(μm)	-41.95670	-30.62520	-16.339000	
	Z(μm)	+0.163368	+0.078523	-0.0031655	

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 FE 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 사용하여야 할 것이다. 또한 스테이지의 재질을 선택 할 때는 재질의 열적 특성 또한 중요한 요소이며, 여러가지 조건을 검토하여 재질을 선택하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Lee, J. W, "Inano opened World," 11th Science Adventure, 2001.
2. NAKAZAWA, H, "Principles of Precision Engineering," Gordon and Breach Science Publishers,

pp. 75~82, pp. 140~167, 1994.

3. Keith Bowen, D., "Development in Nanotechnology," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95-129, 1992.
4. Kim, J. Y., Lee, H. N., Kwac, L. K., Han, J. H., Cho, Y. T., Jun, C. G., "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, 2000.
5. Smith, S. T. and Chetwynd, D. G., "Foundation of Ultra Precision Mechanism Design," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95~128, 250, 1992.
6. Thomas, J, Hughes, R, "The Finite Element Method," Prentice-Hall International Editions, pp. 90~91, 1987.
7. Kim, J. Y., Yoon, S. U., Han, J. H., Kwac, L. K., Kim, H. W., "A Study on the Design of Ultra Precision Positioning Apparatus using FEM (I)," KSPE Conference of spring, pp. 190~194, 2001.
8. MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.
9. Kim, J. D, "A Study on the Waviness Compensation System of Ultraprecision Machining," KSMTE, Vol7. No. 6, pp. 132~140, 1998.
10. Kim, J. Y., Kwac. L. K., Han. J. H, Kim. H. W., Shimokohbe, A., "A Study on the Optimal Structural Design Using FEM for Micro Stage," KSPE, Vol. 19 No. 10, pp. 60~65, 2002.