

미소가공을 위한 초정밀 밀링머신 설계에 관한 연구

황 준[#], 지권구^{*}, 정의식^{**}

A Study on the Precision Milling Machine Design for Micro Machining

Joon Hwang[#], Kwon-Gu Ji^{*}, Eui-Sik Chung^{**}

(Received 4 March 2009; received in revised form 20 March 2009; accepted 22 March 2009)

ABSTRACT

This paper presents the results of miniaturized micro milling machine tool development for micro precision machining process. Finite element analysis has been performed to know the relationship between design dimensional variables and structural stiffness in terms of static, dynamic, thermal aspects. Design optimization has been performed to optimize the design variables of micro machine tool to minimize the volume, weight and deformation of machine tool structure and to maximize the stiffness in terms of static, dynamic, and thermal characteristics. This study presents the assessment of the technology incentive for the minimization of machine tool in the quantitative context of static, dynamic stiffness, thermal resistance and thus the accuracy implications. This study can also be provided a basic knowledge for further research of micro factory development.

Key Words : Precision Machining(정밀가공), Micro Milling Machine(마이크로 밀링기), Finite element analysis (유한요소해석), Optimization(최적화)

1. 서 론

최근, 기술의 급속한 발전에 따라 전자, 항공우주, 바이오산업 등을 중심으로 미소 또는 초미소급(micro or nano scale)의 소재 및 부품과 관련된 수요가 증대될 것으로 기대된다. 이미, 소재분야 및 전자분야를 중심으로 미소급의 MEMS 장치제작을

위한 부품소재기술이 개발되어 적용되기 시작했으며, 한차원 높은 NEMS 장치제작을 위한 기술개발이 21세기의 핵심역량을 키울 수 있는 중점기술로서 인식되기 시작하였다^[1].

한편, 이러한 수요에 대한 대응기술로서 2차원 가공과 화학적 또는 물리-화학적 가공방법에 기인한 식각방식이 주로 이용되고 있으며 또한 레이저가공, 전기-화학적 방법, 제한된 재료에서만 가공이 가능한 주사탐침에 의한 가공 등이 주류를 이루고 있으나, 기술경쟁력의 중요 요소인 생산성 향상과 생산원가 절감 측면에서 그 한계를 나타내고 있는 실정이다^[1]. 특히, 자유로운 3차원 형상제작에 대한 수요 증대와 친환경적 측면에서의 에너지사용을 극소화하기 위한

교신저자 : 충주대학교 항공·기계설계학과

E-mail : jhwang@cjnu.ac.kr

* 베루코리아

** 한밭대학교 기계설계공학과

가공제작기술의 개발이 앞으로 절실히 요구되는 시점에서 볼 때, 보다 효율적인 가공기술개발이 시급히 요망되고 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 초정밀, 초미소 가공에 의한 표면정밀도, 제작 가능한 부품의 크기, 제작 방식의 자유도 등을 비교해 볼 때, 각각의 방법들은 장단점을 지니고 있으며, 특히 마이크로 머시닝(micro cutting or micro grinding)에 의한 제작기술은 3차원 형상의 직접 제작가능, 생산성 측면에서 충분한 경쟁력을 갖고 제 역할을 다할 수 있을 것으로 검토되고 있다^[2].

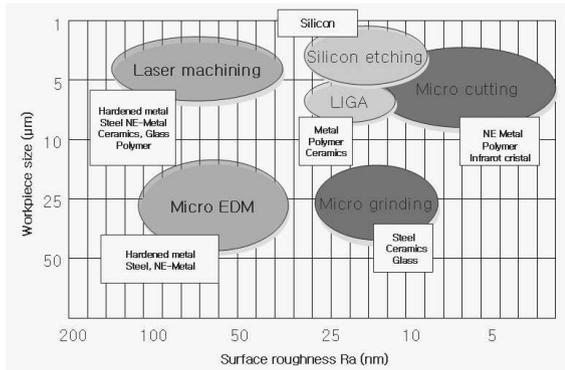


Fig. 1 Comparison of technologies for ultra precision, micro or nano size manufacturing

이러한 시대적 요청을 충족하기 위해서는 기존의 기술개발개념에서 벗어난 가공장치기술 개발이 필요하며, 이러한 기술개발을 통해 초정밀 수준(ultra precision level)의 미소 또는 초미소 크기(micro or nano scale)를 갖는, 친환경적이며, 다양한 형상 및 재료에 적용이 가능한 소재, 부품, 제품 및 금형 제작이 가능하리라 판단된다.

이와같은 요구를 충족할 수 있는 가공기술의 하나로 3차원 형상의 공구에 의한 미소가공(solid tool micro machining)이 적용가능하며, 3차원 초정밀 제어와 공구제작이 가능해지면서 그 적용이 증대하고 있다^[2,3]. 그러나, 현재까지는 기존 범용크기의 공작기계에 위치제어 정밀도만을 높여 미소가공을 구현하고 있는 바, 가공정밀도, 가공효율 및 에너지 효율 측면에서 보다 많은 개선이 요구되고 있다. 특히, 향후 다양한 시장의 수요를 받아들이고, 생산공정의

위치와 시간에 관계없이 저렴한 비용의 제작서비스(manufacturing service with low cost)가 가능한 초소형 공장(micro factory)의 구현을 위해서는 초정밀 공작기계에 의한 3차원 미소가공기술 개발은 필수선결 사항이라 할 수 있다. NIST(미국), AIST(일본), RIKEN(일본)^[4]등에서는 초소형 초정밀 공작기계 개발에 관한 연구가 이미 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 KIMM^[9]등에서 대면적 초정밀 가공기 개발이 체계적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 Georgia Tech(미국)^[7,8]에서 공동연구진행 되었던 초정밀 밀링머신의 3호기 제작을 위하여 유한요소해석을 통한 공작기계의 정적, 동적, 열적 변형특성과 강성특성을 고찰하고, 이를 바탕으로 공작기계 소형화에 따른 구조부 설계변수와 성능과의 상관성에 대한 분석과 최적설계방안을 확립하며, 성능예측을 통한 적용가능성을 평가하여 초정밀 초소형 공작기계 설계기술을 확보하고자 한다.

2. 초정밀 밀링머신 설계

2.1 초정밀 밀링머신 요구사항

초정밀 밀링머신 개발을 위해서는 구조설계를 위한 적용 재료와 형상, 치수를 결정하여야 한다. Reshetov등^[10]에 의해 구조의 치수(dimension)와 정밀도(accuracy)는 제품군에 비례하는 경향을 보이는 것으로 보고되었으며, 이러한 이론은 공작기계의 치수결정에 있어 치수효과(size effect)가 있음을 의미한다. 즉, 공작기계의 구조치수는 공작기계의 기본 정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 설계인자가 되는 것이다. 먼저, 마이크로 밀링머신의 요구사항을 정립해 보면 다음과 같다. 1)가공품위와 절대적 관계를 가지고 있는 정적, 동적, 열적 측면의 안정된 특성을 보유한 프레임 재질을 사용하여 고강성, 초경량, 고감쇠특성, 저열팽창성 등의 특성을 요구된다. 2)공작물 또는 공구의 정밀 위치제어를 위해 높은 고분해능과 고응답성, 높은 반복정밀도를 갖는 테이블 및 초정밀 스테이지가 필요하다. 3)초정밀 스테이지의 실시간 제어를 위해 개방형 구조를 갖는 제어기가 요구된다. 4)저발열, 초고속, 낮은 런

아웃(runout) 값을 갖는 주축베어링 구조와 주축이 필요하다. 5) 고속가공에 따른 공구마멸이 최소화될 수 있으며, 적절한 형상과 강성을 갖는 공구가 요구된다.

정적 및 동적 측면의 강성과 안정성 확보를 위해 정적강성과 감쇠특성, 유효질량 등이 주요한 결정 인자가 된다. 예로서, 공작기계를 2계 선형시스템으로 모델링할 경우(Eqn.1) 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$r_{w=w_{dn}} = \frac{A_{w=w_{dn}}}{F_{w=w_{dn}}} = \frac{\sqrt{m_{eff}/k_{static}}}{c} \quad (1)$$

where, $A_{w=w_{dn}}$: amplitude response at natural frequency, $F_{w=w_{dn}}$: force amplitude at natural frequency, m_{eff} :mass, k_{static} : static stiffness of machine tool

이는 곧 공작기계의 치수가 감소할수록 고유진동수는 증가하게 되어 채터에 의한 불안정 요소를 배제한 넓은 절삭조건 범위에서의 가공이 가능함을 의미한다.

2.2 유한요소해석 및 최적설계방법

공작기계 자중 및 절삭력 변화에 의해 마이크로 밀링머신 프레임 구조에는 변형이 발생하게 되며, 가공정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 다음과 같은 지배방정식을 설정하여 구조물의 정적강성을 분석하였다.

$$[K]\{u\} = \{F^{ac}\} \quad (2)$$

밀링머신의 동적특성은 안정적인 가공과 밀접한 관련을 갖고 있으며, 특히 외부로부터의 진동(vibration)과 내부진동(chatter)등의 가진 요소들이 존재할 때, 이에 대한 응답성이 중요한 요소이다.

따라서 공작기계는 이와 같은 가진력에 대한 충분한 감쇠능력을 보유하여야 한다. 프레임의 과도응답특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 운동방정식을 정의하였다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \quad (3)$$

미소 또는 초미소급의 초정밀가공에 있어서 열 및 온도변화는 열팽창과 수축을 동반하게 되며, 가공정밀도에 절대적 영향을 미치게 된다. 주변 환경온도 변화, 절삭열에 의한 온도 상승이 주요 원인이 될 수 있다. 따라서 다음과 같은 평형방정식을 설정하고, 열-구조 연성해석(thermal-structural coupled field analysis)을 통해 열하중으로부터 응력해석을 수행하여 온도변화에 따른 열적 강성해석을 수행하였다.

$$[a]\{\Delta T\} = \{u\} \quad (4)$$

초정밀 공작기계 구조의 설계변수의 결정에 따라 시스템의 정특성(정강성), 동특성(동강성), 열적특성(열강성)은 크게 좌우될 수 있다.

본 연구에서는 최적화 설계기법으로 시뮬레이티드 어닐링(SA : Simulated Annealing) 알고리즘을 채택하여 마이크로 밀링머신 구조의 최적설계를 수행하였다.

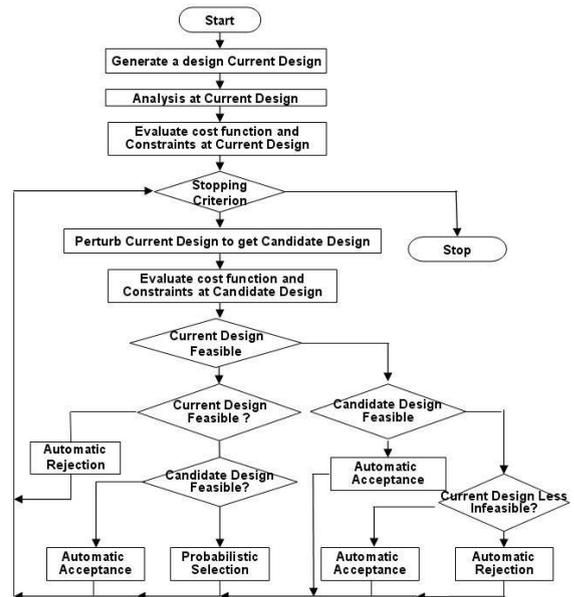


Fig. 2 Flow chart of simulated annealing optimization algorithm

이 방법은 설계민감도를 사용하지 않고 함수 값만을 이용하여 평가·비교하여 최적치를 구하는 방법으로 적용이 용이하고, 폭넓은 설계공간의 탐색능력 및 국소해(local optimum) 탈출이 쉬우므로 전역 탐색(global search)을 통한 보다 나은 해를 얻을 가능성이 높은 특성이 있다. 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 초기설계안을 설정하고 초기설계안에 변화치(perturbation)을 가해 후보설계안을 만든 후, 양쪽을 평가·비교하여 더 우수한 쪽을 다음 초기설계안으로 설정하여 설계변수 하한과 상한 값 범위 내에서 목적함수를 만족하는 최적 해를 찾게 된다.

2.3 초정밀 밀링머신 형상설계 및 물성

본 연구에서 개발될 밀링머신을 초기설계안을 Fig.3에 나타내었다. 베이스(base), 컬럼(column), 주축부(spindle head), 보강리브(reinforced rib)의 구조부재로 구성되는 해석 및 평가모델을 구성하였다.

또한, 구조재의 정적, 동적, 열적 거동 특성평가를 위해 Table 1에 나타난 바와 같이 물질제거율(material removal rate: MRR)과 공작기계 강성에 밀접한 관계가 있는 설계변수(A, B)와 구조재 강성보강과 밀접한 설계변수(C, D)를 설계변경하면서 유한요소해석을 실시하였고, 그 결과를 고찰하였다.

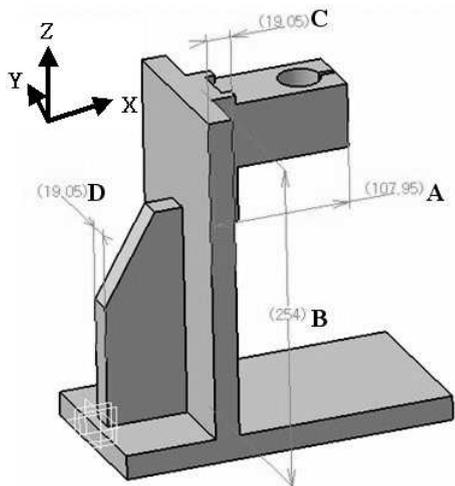


Fig. 3 Initial design of micro milling machine frame

Table 1 Dimension of initial design variables

Design variables	Dimensions
A; Overhang [mm]	101.6 ~ 152.4
B; Column height [mm]	203.2 ~ 304.8
C; Column width [mm]	19.05 ~ 22.5
D; Column reinforced rib width (D) [mm]	19.05 ~ 22.5

초미소 초정밀 가공에 있어서 공작기계에 가해지는 열과 온도변화에 따른 열변형에 의한 가공정밀도 변형 극소화는 매우 중요한 문제이며, 이러한 문제 해결을 위해 저 열팽창계수의 합금 채택이 늘고 있다. 본 연구에서는 Invar36을 마이크로 밀링머신 프레임 소재로 채택하였으며, Table 2와 Table 3에 기계적 성질과 화학적 조성을 각각 나타내었다.

Table 2 Comparison of mechanical properties

Material properties	Invar	1020steel
Modulus of elasticity (GPa)	141	205
Density (Kg/m ³)	8050	7870
Yield Strength (MPa)	276	350
Poisson Ratio	0.3	0.3
Thermal Expansion Coefficient(x10 ⁻⁶ /°C)	0.6	12
Thermal Conductivity (W/m-K)	10.15	51.9

Table 3 Chemical properties for invar material(wt%)

Material	C	Si	Mn	Ni	Fe	etc
36% Ni Invar	≤0.04	≤0.25	0.2 ~ 0.4	36± 0.5	Bal	B, Cu, Cr, Al, P, O, N

3. 강성특성분석결과

응력해석프로그램인 ANSYS를 이용, 유한요소모델(Fig.4)을 구성하였으며, 주축부에 각각 X, Y 방향으로 4KN의 분포하중이 작용하고, 공작기계 바닥면을 고정시키는 경계조건을 설정하여 개발될 마이크로 밀링머신 초기설계안에 대한 정적, 동적, 열적 강성변화를 예측하였다.

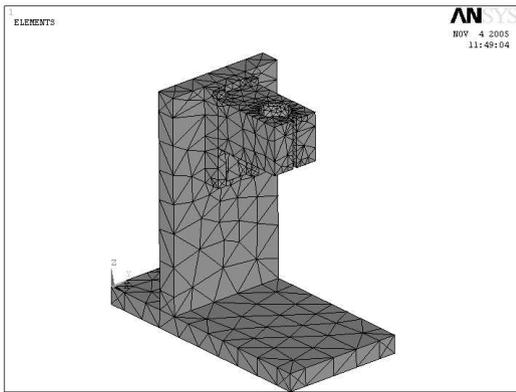


Fig. 4 Finite element model for micro milling machine tool

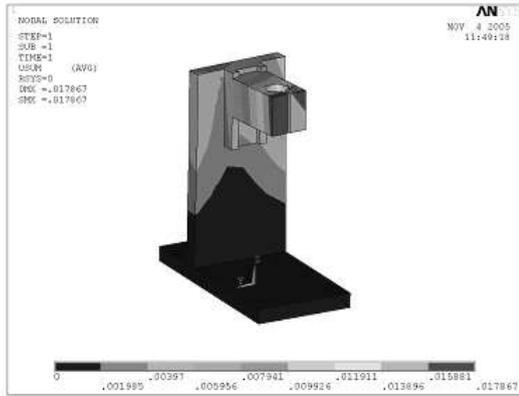


Fig. 5 Static deformation distribution of micro milling machine tool

마이크로 공작기계의 정적 구조특성분석 결과에서 알 수 있는 바와 같이, Fig.5에는 공작기계의 정적변

위분포를 나타내었다. 또한, Fig.6에 나타낸 바와 같이 주축부의 overhang 길이가 증가할수록 변위는 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 이에 반비례하여 공작기계 강성값은 감소하는 결과(Fig.7)를 나타내고 있다. 이는 곧, 공작기계의 구조부의 크기가 작아질수록, 또는 overhang과 같은 돌출부의 길이가 짧아질수록 정강성이 증가하는 구조특성 나타남을 확인할 수 있었으며, 127mm overhang 이상에서는 정적변위의 급증으로 인한 강성감소가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

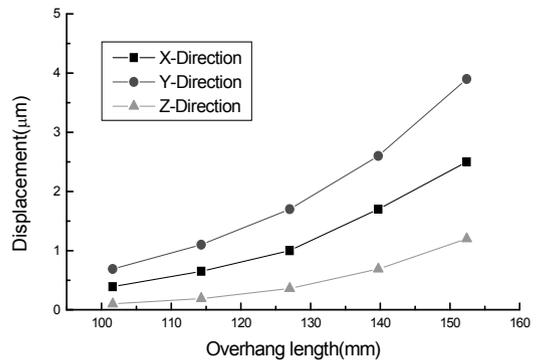


Fig. 6 Effect of overhang length on static displacement of micro milling machine frame

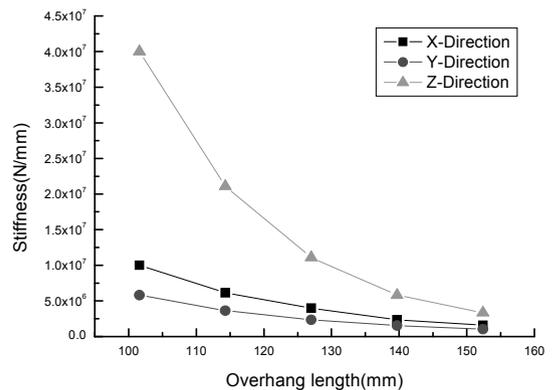


Fig. 7 Effect of overhang length on static stiffness of micro milling machine frame

기계가공 시에 공구와 공작물간의 채터, 외부 진동, 주축의 고속 회전시에 발생하는 진동에 대한 안정성 등과 밀접한 관련을 갖는 공작기계 동적 거동 특성 인자중의 하나가 고유진동수이며, 이에 대하여 설계시 예측이 반드시 필요하다. 마이크로 밀링머신 초기설계안에 대해 고유진동수와 모드형상을 확인하고, 각 모드에서의 동적 변형에 대한 강성 변화를 고찰하였다.

마이크로 밀링머신의 고유진동수 해석을 위해 overhang 길이와 column 높이의 비율을 Table 4에 나타낸 바와 같이 5가지 type으로 설정하고, 해석을 수행하였다.

Table 4 Ratio of overhang per column height for natural frequency analysis

Design variables	Overhang length [mm]	Column height [mm]
Type 1	101.60	203.20
Type 2	114.30	228.60
Type 3	127.00	254.00
Type 4	139.70	279.40
Type 5	152.40	304.80

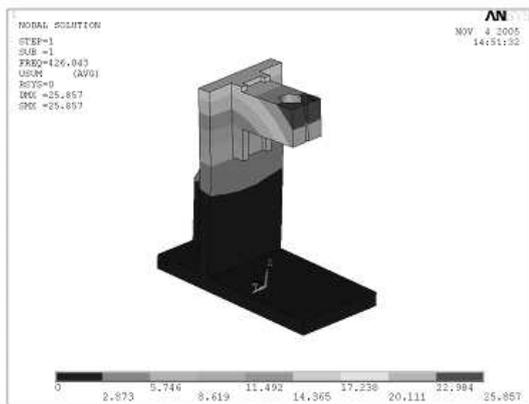


Fig. 8 Deformation of micro milling machine tool (type1) at 1st order natural frequency

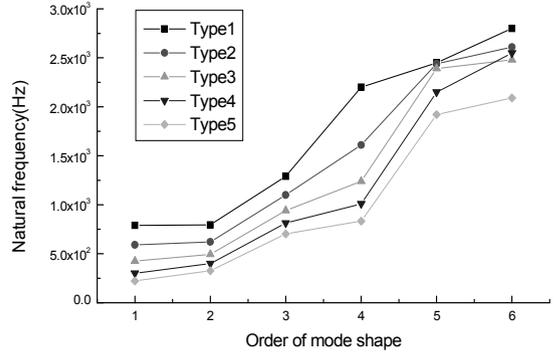


Fig. 9 Comparison of natural frequency with respect to ratio of overhang per column length

해석결과, Fig.8의 결과에서 알 수 있듯이, 고정되어 있는 바닥면을 기점으로 주축부로 이동하면서 변형량이 증가하여 주축단에서 최대값을 나타낸다.

각 type별 고유진동수 결과 비교(Fig.9)에서도 overhang 대 column 높이 비율이 모두 0.5를 이루더라도, 전체 길이가 증가할 경우, 고유진동수는 감소하게 된다. Overhang 길이가 감소할수록 고유진동수는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 해석결과 790Hz에서 최대 고유진동수가 발생됨을 확인하였다.

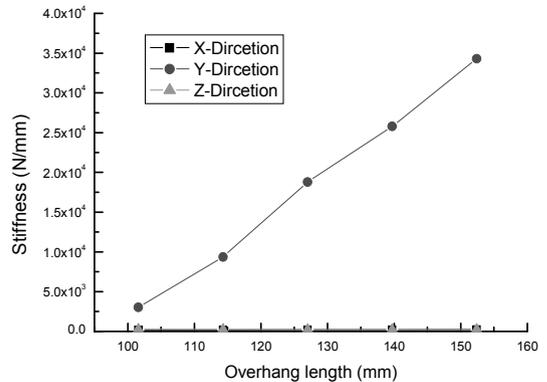


Fig.10 Effect of overhang length on dynamic stiffness of micro milling machine frame at 1st order natural frequency

Figure 10에는 1차 고유진동수에서의 동적변형량을 근거로 계산된 동적강성 값으로 공작기계 Y축 방향의 동적 변위는 overhang 길이변화에 밀접한 영향이 있음을 확인하였다.

초정밀 미소가공에서는 열 및 온도변화에 따른 열변형으로 인해 가공정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 열-구조 연성해석을 위해 마이크로 밀링머신의 초기 온도를 20℃로, 주변온도가 10℃ 변화할 때, 열변형량을 계산하였으며, 열변형량이 열하중의 형태로 작용하도록 하여 온도변화에 따른 마이크로 밀링머신의 열변형량과 열응력 계산을 통해 열적 강성을 예측하였다. 고정되어있는 바닥면 대비 주축부의 열변형이 크게 나타나며, 이번 설계치에서는 주축단에서 최대 2 μ m의 열변형량 발생을 예측하였다.

Figure 11에는 마이크로 밀링머신의 열변형 거동 해석결과를 나타내었으며, 열전달에 의해 밀링머신 주축부의 열변형이 가장 크게 나타남을 확인하였다.

Fig.12과 Fig.13에 각각 나타낸 바와 같이, 마이크로 밀링머신 구조부의 설계치수 변화에 따른 열변형량은 공작기계 구조부 치수증가에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 수직(Z) 방향의 열변형량이 가장 크게 나타났다. 이러한 열변형 결과는 강성에도 반영되어 X축 설계변수(주축부 길이)와 Y축 설계변수(컬럼 횡방향) 부분의 열강성이 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

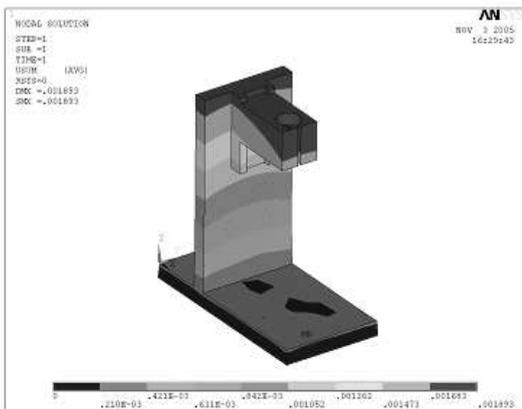


Fig. 11 Thermal deformation distribution of micro milling machine tool

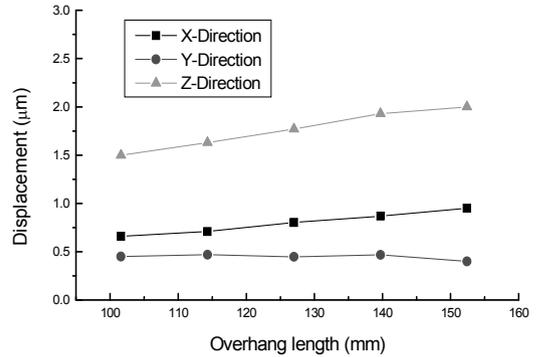


Fig. 12 Effect of overhang length on thermal displacement of micro milling machine frame

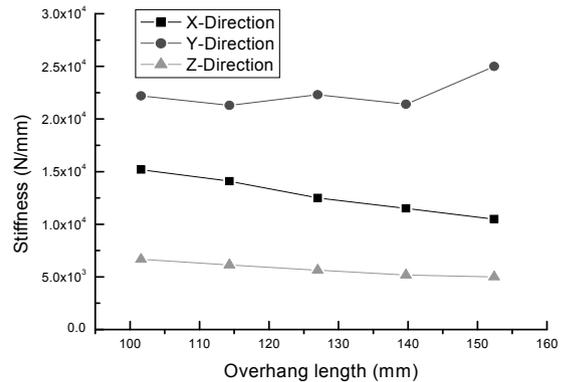


Fig.13 Effect of overhang length on thermal stiffness of micro milling machine frame

4. 밀링머신 최적설계

4.1 최적설계변수 및 목적함수 설정

최적화 목적함수로서는 마이크로 밀링머신 구조부의 변형량(deformation)을 대상으로 하여 그 값이 설계치 변화 중에 최소화(minimize) 하는 문제로 설정하였으며, 시뮬레이티드 어니링(simulated annealing) 알고리즘을 적용하여 최적화를 수행하였다.

마이크로 밀링머신의 최적설계를 위해 Fig.3의

초기설계모델의 4개 설계변수(A,B,C,D)를 대상으로 하여 Table 5에 나타난 바와 같은 설계 하한치 및 상한치 범위를 설정하였다.

Table 5 Constraint ranges for design optimization

Design variables	Lower limit	Upper limit
A [mm]	114.3	139.7
B [mm]	228.6	279.4
C [mm]	17.05	21.05
D [mm]	17.05	21.05

4.2 최적설계결과분석

마이크로 밀링머신 초기설계안에 대한 최적화를 통해 얻어진 각 설계변수 별 최적치를 Table 6에 나타내었으며, 최대 60회까지 반복 연산 조건에서 목적함수를 만족하는 설계변수 값을 얻을 수 있었다.

Table 6 Design change after optimization of micro milling machine tool

Design variables	Initial design value	Optimal design value
A [mm]	127.00	120.50
B [mm]	254.00	228.80
C [mm]	19.05	20.57
D [mm]	19.05	20.81
Surface area [m ²]	0.205	0.197
Volume [m ³]	0.002	0.002
Weight [kg]	13.816	13.672

최적화 목적함수가 변형량 최소화이므로 초기설계안과 비교해 볼 때, 설계변수 주축부길이(A)와 컬럼 높이(B)는 감소한 반면, 컬럼부 두께(C)와 컬럼부 보

강리브 두께(D)가 각각 증가하였다.

또한, Table 7에는 최적설계 적용 전·후 마이크로 밀링머신의 구조부의 한 정적, 동적, 열적측면에서의 변형량, 강성 및 고유진동수 변화에 대한 분석 결과를 요약하여 나타내었다.

분석결과에서 알 수 있는 바와 같이, 초기설계안(현 2호기)과 비교하여 최적설계 적용 후 응력해석 결과, 정적 특성 항목에서는 정적 변위가 44% 감소되고, 정강성은 68% 향상되는 효과를 나타내었다. 또한 동적 강성 항목에서는 구조부의 고유진동수가 초기설계안 대비 41% 증가, 향상되어 고 회전 주축 회전에 대한 동적 안정성을 높여줄 수 있을 것으로 판단된다. 열적 특성 항목에서는 열변형은 7.5% 감소, 열적 강성은 0.76% 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 7 Comparison of performance characteristics (static, dynamic, thermal) through design optimization of micro machine tool

Performance Characteristics	Stage	Deformation	Stiffness [N/mm ²]	Natural Frequency [Hz]
Static	Initial	2.00e-3	4.64e+6	-
	Optimal	1.12e-3	7.80e+6	-
Dynamic	Initial	2.66e+1	1.91e+4	425.20
	Optimal	2.72e+1	7.41e+3	600.12
Thermal	Initial	2.00e-3	2.62e+4	-
	Optimal	1.85e-3	2.64e+4	-

5. 결론

본 연구에서는 초정밀 마이크로 밀링머신 개발을 통해 미소가공을 구현하는 연구를 수행하였으며, 이

를 위해 설계단계에서는 마이크로 공작기계 구조의 정적, 동적, 열적 측면에서의 강성특성을 예측하고, 구조 설계 변수 최적화를 통한 강성 개선 방안에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마이크로 밀링머신 구조부가 소형화 될수록 정적, 동적, 열적 강성값은 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 정적강성 $4.6 \times 10^6 \text{N/mm}^2$, 동적강성 $1.9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, 열적강성 $2.6 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ 로 계산되었으며, 이들 요소들의 복합적인 영향이 전체 미소가공 정밀도에 영향을 줄 수 있음을 고찰할 수 있었다.
2. 마이크로 밀링머신 구조의 최적설계결과, 정강성 68%, 고유진동수 41%, 열변형 7.5%의 개선효과를 얻을 수 있었다.
3. 향후, 본 연구에서 얻어진 최적설계안을 바탕으로 마이크로 밀링머신 개선에 적용할 계획이며, $10 \mu\text{m}$ 문형가공과 직경 $50 \mu\text{m}$ 마이크로 기어 등의 가공과 같은 3차원 복합곡면 및 초소형 부품에 대한 초정밀 미세가공에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후기

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

1. Corbett, J., McKeown, P. A., Peggs, G. N., and Whatmore, R., "Nanotechnology: International Developments and Emerging Products," Keynote Paper, Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 2, 2002.
2. Takacs, M., Vero, B., "Material Structural Aspects of Micro-Scale Chip Removal," Material Science Forum, 414-415, pp. 337-342, 2003.
3. Weule, H., Trischle, H., "Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirement in Miniaturization," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 1, pp. 61-64, 2001.

4. Okazaki, Y., Mori, T., Morita, N., "Desk-top NC Milling Machine with 2000 kpm Spindle," Proc. of ASPE Annual Meeting, pp. 192-195, 2001.
5. Lu, Z., Yoneyama, T., micro Cutting in Micro Lathe Turning system," International J. of Machine Tool and Manufacture, Vol.39, No.7, pp.1171-1183, 1999.
6. Vogler, M. P., Liu, X., Kapoor, S. G., Devor, R. E., Ehmann, K. F., "Development of Meso-Scale Systems," Trans of North American Manufacturing Institution, SME, pp.653-661, 2002.
7. Cox, D., Newby G., Park, H. W., Liang, S. Y., Liu, W. L., Hsieh, S. B., and Hwang, J., "The Development of Micro-Scale Machining Center", CD Proceeding of International Conference of HNICEM, 2005.
8. Cox, D., Newby G., Park, H. W., Liang, S. Y., Liu, W. L., Hsieh, S. B., and Hwang, J., "Precision Machining with Micro-Scale Vertical Machining Center," J. of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 10, No. 2, pp. 187-195, March 2006.
9. Song, C. K., Khim, G., Kim, B. S., Song, Y. C., Park, C. H., "Development of a Multi-functional Ultra Precision Machine to Generate Micro Features on Large Surfaces," Proceeding of Korean Society of Precision Engineering Annual Meeting, pp. 192-195, 2007.
10. Reshetov, D. N., Protoman, V. T., "Accuracy of Machine Tools," ASME Press, 1988.
11. Boothroyd, G., Knight, W. A., "Fundamentals of Machining and Machine Tools," Marcel Dekker, Inc., 1989.