

실험 계획법과 유한 요소 해석을 이용한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 변위 오차 예측

이희범*, 이원재⁺, 김석일⁺⁺

(논문접수일 2011. 07. 22, 수정일 2011. 08. 02, 심사완료일 2011. 08. 03)

Displacement Error Estimation of a High-Precision Large-Surface Micro-Grooving Machine Based on Experimental Design Method and Finite Element Analysis

Hee-Bum Lee*, Won-Jae Lee⁺, Seok-II Kim⁺⁺

Abstract

In this study, to minimize trial and error in the design and manufacturing processes of a high-precision large-surface micro-grooving machine which is able to fabricate the molds for 42 inch LCD light guide panels, the effects of the structural deformation of the micro-grooving machine according to the positions of the X-axis, Y-axis and Z-axis feed systems were examined on the tool tip displacement errors associated with the machining accuracy. The virtual prototype (finite element model) of the micro-grooving machine was constructed to include the joint stiffnesses of the hydrostatic bearings, hydrostatic guideways and linear motors, and then the tool tip displacement errors were measured from the virtual prototype. Especially, to establish the prediction model of the tool tip displacement errors, which was constructed using the positions of the X-axis, Y-axis and Z-axis feed systems as independent variables, the response surface method based on the central composite design was introduced. The reliability of the prediction model was verified by the fact that the tool tip displacement errors obtained from the prediction model coincided well those measured from the virtual prototype. And the causes of the tool tip displacement errors were identified through the analysis of interactions between the positions of the X-axis, Y-axis and Z-axis feed systems.

Key Words : High-Precision Large-Surface Micro-Grooving Machine(초정밀 대면적 미세 그루빙 머신), Experimental Design Method(실험 계획법), Finite Element Analysis(유한 요소 해석), Displacement Error(변위 오차), Tool Tip(공구 선단)

1. 서론

우리나라가 대외 경쟁력을 가진 것으로 평가되는 LCD,

OLED(organic electroluminescence display), 그리고 연료 전지는 모두 마이크로미터 단위의 미세 형상을 갖는 부품이 요구된다. 그 대표적인 예로는 LCD의 도광판과 연료 전지의 분리

* 한국항공대학교 대학원

+ 한국항공대학교 대학원

++ 교신저자, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (sikim@kau.ac.kr)

주소: 412-791 경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

판을 들 수 있다. 최근에는 이러한 미세 형상 부품들의 대형화 및 고집적화가 요구되면서 대면적 미세 형상을 보다 효율적으로 가공할 수 있는 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다.

일반적으로 미세 형상은 미세 방전 가공 방법이나 LIGA (lithography, galvanofarming and abformung)⁽¹⁾와 같은 마이크로 전자 에칭(etching) 가공 방법에 의해서 주로 가공되어 왔다. 이러한 가공 방법은 동일한 형상을 대량 가공하는 경우에는 유리하지만, 원리적으로 가공 형상에 제약이 있고, 비교적 작은 수량의 다양한 부품들을 가공하는 경우에는 부품별로 고가의 마스크(mask)를 제작해야 한다는 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제점 때문에 미세 형상을 미소 절삭 공구로 직접 가공하는 미세 형상의 절삭 가공 방법이 주목을 받고 있다. 미세 형상의 절삭 가공 방법은 가공 선폴이 상대적으로 미세하지 않지만, 표면 조도가 우수하고, 가공 가능한 재료나 형상도 다양하며, 고속 가공이 가능하다. 또한 형삭, 선삭, 밀링 공정 등과 같은 전통적인 절삭 가공 메커니즘(mechanism)을 그대로 적용할 수 있기 때문에 비교적 용이하게 새로운 공정에 대응할 수 있다는 것도 장점의 하나이다⁽²⁾.

초정밀 미세 형상 가공기의 하나인 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신(high-precision large-surface micro-grooving machine)은 Toshiba, Nachi-Fujikoshi, Nagase, Okamoto 등과 같은 일본 기업들이 전세계 시장을 대부분 장악하고 있는 실정이다. 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신은 특히 디스플레이의 대면적화와 생산 효율화 요구에 따라서 대형화와 초정밀화가 급속하게 진행되고 있는데, 현재 Toshiba가 70인치, Nachi-Fujikoshi가 39인치, 그리고 Nagase가 68인치 수준의 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신을 연구 개발 및 제작하는 중이다. 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신과 관련된 국내 기술 수준은 아직 일본과 비교할 때 상당히 미흡한 상태이지만, 한국기계연구원이 20인치 수준의 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기를 연구 개발한 사례가 있다⁽³⁾.

본 연구에서는 42인치 수준의 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신을 개발하는 과정에서의 시행 착오를 최소화함과 동시에 체계적인 설계 기술의 축적 및 성능 개선을 도모하기 위한 노력의 일환으로 초기 설계 단계에서 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 구조 변형이 가공 정밀도와 관련된 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 검토하는 데 초점을 두었다. 이를 위해서 먼저 유정압 안내 방식과 리니어 모터 구동 방식을 기반으로 하는 문형 구조의 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델을 구축한 후, X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 구조 변형을 해석하고, 그 결과로부터 가공 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 공구 선단부의 변위 오차를 도출하였다. 특히 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치를 독립 변수로 하고, 공구 선단부의 변위

오차를 종속 변수로 하는 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 정립하기 위해서 중심 합성 계획(central composite design)에 기반을 둔 반응 표면법(response surface method)⁽⁴⁾을 이용하였다. 예측 모델의 신뢰성은 다양한 구조 해석 조건들로부터 얻어진 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값(구조 변형 해석 결과로부터 도출한 값)과 예측값을 비교함으로써 입증하였다. 또한 구조 해석 모델을 이용한 구조 변형 해석, 그리고 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 이용한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 교호 작용 분석을 통해서 실험적으로 파악하기 어려운 공구 선단부의 변위 오차의 발생 원인을 규명하였다.

2. 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 설계

2.1 기계 구조

본 연구의 해석 대상인 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조와 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신은 기본적으로 문형 구조로 설계되었는데, X축 이송계는 컬럼(column)을 가로지르는 크로스 빔(cross beam) 위에서 좌우 이송을 수행하고, Y축 이송계는 베드 위에서 전후 이송을 수행하며, Z축 이송계는 X축 이송계의 전면에 탑재된 상태에서 상하 이송을 수행하고 있다. 그리고 B축 이송계는 Z축 이송계에 탑재된 상태에서 공구 교환을 위한 터릿(turret) 공구대의 각도 분할 기능을 담당하고 있으며, C축 이송계는 Y축 이송계에 탑재된 상태에서 공작물의 선회 기능을 담당하고 있다⁽⁵⁾.

특히 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신은 X축 이송계의 전면에 위치한 Z축 이송계의 테이블, 그리고 그 테이블에 탑재된 B축 이송계와 터릿 공구대가 연직 방향으로 상하 이송하는 구조이기 때문에 그들의 자중을 보상하지 않으면 Z축 이송계가 상향 이송할 때와 하향 이송할 때의 제어 특성이 서로 달라지게

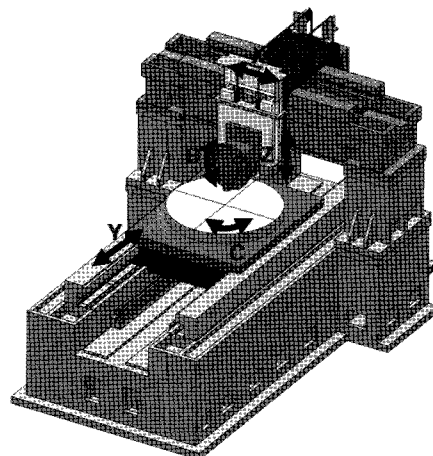


Fig. 1 High-precision large-surface micro-grooving machine

Table 1 Specifications of the grooving machine

X-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 900mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10mm resolution
	Feedrate	Max. 18m/min
Y-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 1,320mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10nm resolution
	Feedrate	Max. 9m/min
Z-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 116mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10nm resolution
	Feedrate	Max. 3m/min
B-axis	Guideway	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feedback	Encoder with $\pm 0.0001^\circ$ resolution
	Feedrate	10rpm
C-axis	Guideway	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feedback	Encoder with $\pm 0.001^\circ$ resolution
	Feedrate	300rpm

되고, 또한 편심 때문에 X축 이송계가 롤(roll) 운동을 하게 됨으로써 공구대에 장착된 공구가 위치 오차를 갖게 된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 연직 방향으로 상하 이송하는 Z축 이송계의 테이블, B축 이송계와 터릿 공구대의 자중 전체와 동일한 크기의 카운터 밸런스 웨이트(counter balance weight)를 X축 이송계의 후면에 위치시키고, X축 이송 테이블의 전방 측면과 후방 측면에 설치된 2쌍의 볼러를 지나는 2줄의 와이어 로프를 이용해서 Z축 이송계의 테이블과 연결하는 방법을 적용하였다.

2.2 이송계

초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도는 베드, 컬럼 및 크로스 레일의 구조 강성 외에도 X축, Y축, Z축, B축 및 C축 이송계의 강성과 운동 정밀도에 의해서 영향을 받기 때문에 이송계들의 고강성화와 고정밀화 설계가 필요하다. 이러한 점을 고려해서 직선 이송을 수행하는 X축, Y축 및 Z축 이송계는 모두 유정압 안내면, 코어리스 리니어 모터(coreless linear motor), 그리고 피드백(feedback) 신호 검출을 위한 분해능 10 nm의 레이저 스케일(laser scale)을 사용하였다. 또한 B축과 C축 이송계는 유정압 베어링, 브러쉬리스 DC 서보 모터 (brushless DC servo motor), 그리고 피드백 신호 검출을 위한 분해능 0.0001°와 0.001°의 엔코더(encoder)를 각각 채용하였

다. 특히 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리를 각각 900, 1,320 및 116mm로 설정함으로써 42인치 수준의 LCD 도광판을 가공할 수 있도록 설계하였다. 또한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 최대 이송 속도는 각각 18, 9 및 3m/min이고, B축과 C축 이송계의 최고 회전수는 각각 10과 300rpm이다.

일반적으로 직선 이송계에 적용되는 유정압 안내면의 법선 방향 강성은 이송 테이블에 설치되는 탐재물의 자중이나 하중을 고려해서 설정할 필요가 있고, 횡 방향 강성은 제품의 치수 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송 테이블의 요(yaw) 운동이 작게 되도록 설정할 필요가 있다. 따라서 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 유정압 안내면의 구조로는 레일이 유정압 베어링을 감싸기 때문에 유정압 안내면의 강성과 조립성 향상을 도모할 수 있는 양면 지지형 패드(double pad) 방식의 역 구속형을 채용하였다⁽⁶⁾. 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스(recess) 압력은 모두 1MPa로 설정되어 있는데, 특히 유정압 안내면의 리세스 압력에 의해서 발생하는 안내면 구조의 탄성 변형을 최소화하기 위한 레일의 고강성화 설계, 그리고 이송 정밀도의 향상을 도모하기 위한 이송계의 좌우 대칭 구조 설계 등을 수행하였다. 이러한 개념들을 토대로 설계한 X축, Y축

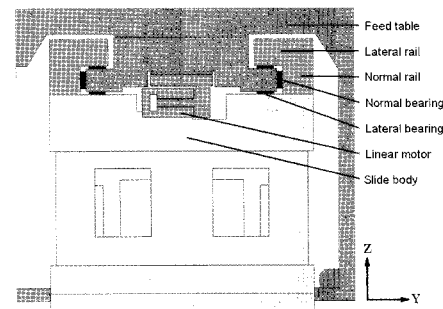


Fig. 2 Structure of the X-axis feed system

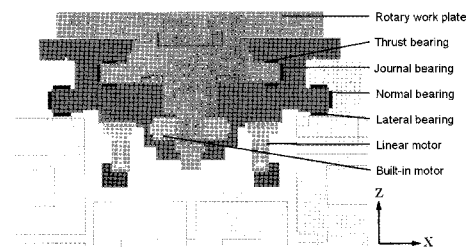


Fig. 3 Structure of the Y-axis and C-axis feed systems

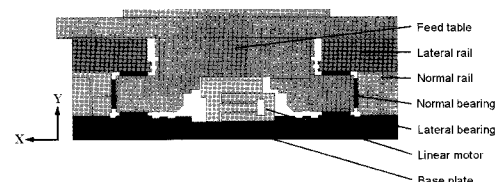


Fig. 4 Structure of the Z-axis feed system

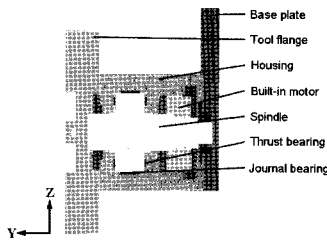


Fig. 5 Structure of the B-axis feed system

및 Z축 이송계의 유정압 안내면 구조는 각각 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에서 볼 수 있으며, B축과 C축 이송계의 유정압 베어링 구조는 Fig. 5와 Fig. 3에서 볼 수 있다.

3. 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 및 변위 오차 예측

3.1 구조 해석 모델

Fig. 6은 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 특성을 평가하기 위해서 유한 요소법을 토대로 구축한 구조 해석 모델을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 7은 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구성을 이해하기 쉽도록 구조 해석 모델을 주요 구조 모듈들로 분해해서 나타낸 것이다. 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델은 175,942개의 절점(node), 그리고 645,213개의 솔리드 요소(solid element)와 1,204개의 매트릭스 요소(matrix element)로 구성되었다. 매트릭스 요소들은 X축, Y축 및 Z축 이송계의 유정압 안내면의 강성, B축과 C축 이송계의 유정압 베어링의 강성, 그리고 리니어 모터의 축방향 강성 등을 표현하기 위해서 사용된 것이다. 특히 정위치 제어 상태의 리니어 모터는 가동자와 고정자 사이의 상대 운동이 거의 없다고 볼 수 있기 때문에 본 연구에서는 리니어 모터의 축 방향 강성

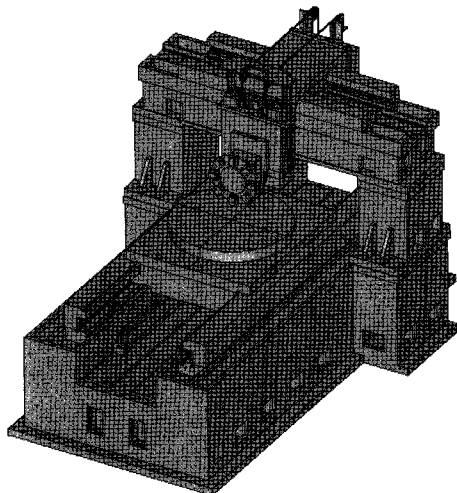


Fig. 6 Virtual prototype of the micro-grooving machine

은 모두 무한 강성으로 가정하였다. Table 2에는 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 특성을 평가하기 위해서 사용한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 유정압 안내면의 강성, 그리고 B축과 C축 이송계의 유정압 베어링의 강성을 모두 제시하였다. 또한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 지지점들은 모두 24개로 수직 방향에 대해서 구속하였고, 유정압 효과에 의한 구조 변형을 모사하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스 압력을 부하 조건으로 고려하였다.

Table 3은 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석에서

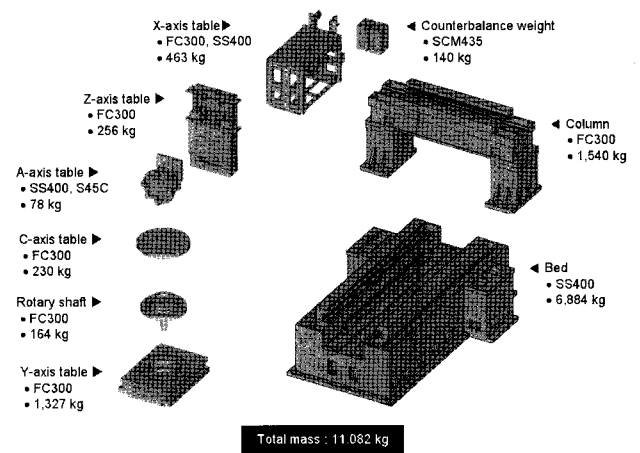


Fig. 7 Major structural modules of the virtual prototype

Table 2 Stiffnesses of hydrostatic guideways and bearings

Feed system	Normal guideway	2,528MN/m
	X-axis feed system	Lateral guideway
Y-axis feed system	Normal guideway	5,350MN/m
	Lateral guideway	2,675MN/m
Z-axis feed system	Normal guideway	3,165MN/m
	Lateral guideway	1,165MN/m
B-axis feed system	Thrust bearing	896MN/m
	Journal bearing	498MN/m
C-axis feed system	Thrust bearing	3,540MN/m
	Journal bearing	1,770MN/m

Table 3 Material properties for the virtual prototype

Material	Density	Elasticity	Poisson's ratio
FC300	7,300kg/m ³	90.0GPa	0.25
SS400	7,870kg/m ³	205.0GPa	0.26
S45C	7,860kg/m ³	205.8GPa	0.28
SCM440	7,300kg/m ³	205.8GPa	0.30
SUS304	8,000kg/m ³	197.0GPa	0.29
Cu	8,930kg/m ³	205.8GPa	0.34
Fe-Si	7,700kg/m ³	21.3GPa	0.30

사용한 구조 재료의 물성을 보여주고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 베드는 SS400, 컬럼과 크로스 빔은 FC300, X축 이송계는 FC300과 SS400, Y축 이송계는 FC300, Z축 이송계는 FC300, B축 이송계는 SS400과 S45C, C축 이송계는 FC300, 카운터 밸런스 웨이트는 SCM435를 이용해서 설계하였으며, 구리(Cu)와 규소 강판(Fe-Si)은 모터의 권선부와 적층 강판부를 모사하기 위해서 적용하였다. 또한 Fig. 7에 제시한 주요 구조 모듈들의 질량은 베드 6,884kg, 컬럼과 크로스 빔 1,540kg, X축 이송계 463kg, Y축 이송계 1,327kg, Z축 이송계 256kg, B축 이송계 78kg, C축 이송계 394kg, 카운터밸런스 웨이트 140kg이며, 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 총 질량은 약 11,082kg으로 예측된다.

3.2 구조 해석 조건

초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 자중이나 부하에 의한 공구 선단부의 변위 오차는 미세 형상에 대한 가공 정밀도와 밀접한 관계를 갖는다. 특히 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따라서 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 강성도 변화하기 때문에 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따라서 공구 선단부의 변위 오차도 변화하게 된다. 만약 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 변위 오차를 미리 파악할 수 있다면, 대면적 미세 형상을 가공하는 과정에서 공구 선단부의 위치 보정을 통해서 가공 정밀도를 높일 수 있을 뿐 아니라 가공 불량률을 감소시킬 수 있게 된다. 그러나 X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리 내의 모든 위치에 대해서 공구 선단부의 변위 오차를 실험이나 해석을 통해서 파악하려면 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 따라서 실험 횟수나 해석 횟수를 최소화하면서도 공구 선단부의 변위 오차와 관련된 유의미한 결과를 도출하기 위해서는 실험 계획법의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 계획법으로써 반응 표면법을 사용하였다. 반응 표면법은 여러 개의 독립 변수들의 복합적인 작용에 의해서 야기되는 반응 변수의 변화가 형성하는 반응 표면에 대한 통계적인 분석 방법을 의미한다. 특히 반응 표면법에서는 독립 변수들과 반응 변수 사이의 함수 관계를 실험 결과나 해석 결과로부터 추정할 후, 그 함수 관계를 토대로 독립 변수들의 변화가 반응 변수에 미치는 영향을 예측하고, 최적의 반응을 나타내는 독립 변수들의 조건을 찾아낼 수 있다. 본 연구의 경우에는 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 반응 표면법의 독립 변수들에 해당하고, 공구 선단부의 변위 오차가 반응 변수에 해당한다.

또한 본 연구에서는 공구 선단부의 변위 오차를 산정하기 위한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석의 횟수와 조건을 결정하기 위해서 적은 수의 정보로부터 2차 회귀 방정식을 구할 수 있는 중심 합성 계획을 사용하였다. 중심 합성 계획에

서는 반응 표면을 추정하기 위해서 중심점(central point)과 축점(axial point)들을 표본점에 포함시키기 때문에 X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리(stroke)의 중심 위치를 중심점으로 설정하고, X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리를 균등하게 4등분한 위치들을 축점들로 설정하였다. 따라서 3개의 독립 변수들인 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치는 Table 4에 제시한 바와 같이 모두 5 수준의 값을 가지게 되며, 이 경우에는 중심 합성 계획에 의해서 Table 5와 같은 총 15가지의 구조 해석이 필요한 것으로 나타났다.

3.3 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델

Table 6의 좌측에 제시한 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값은 중심 합성 계획에 의해서 Table 5와 같이 결정된 총 15가지의 구조 해석 조건들을 Fig. 6에 제시한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델에 적용한 후, ANSYS를 이용해서 얻은 구조 변형 해석 결과로부터 도출한 것이다. Table 6에서 δ_X^m , δ_Y^m 및 δ_Z^m 은 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차에 대한 측정값을 의미하고, δ_{Total}^m 은 δ_X^m , δ_Y^m 및 δ_Z^m 의 벡터 합의 크기인 총 변위 오차를 의미한다. 특히 초정밀 대면적 미

Table 4 Levels of independent variables

Factor	Sign	Levels				
		-2	-1	0	1	2
X-axis position (mm)	X	-450	-225	0	+225	+450
Y-axis position (mm)	Y	-660	-330	0	+330	+660
Z-axis position (mm)	Z	-58	-29	0	+29	+58

Table 5 Structural analysis conditions

No.	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	+225	+330	-29
2	+225	-330	+29
3	0	0	0
4	-225	+330	+29
5	-225	-330	+29
6	-225	-330	-29
7	+225	+330	-29
8	+225	+330	+29
9	+225	-330	+29
10	+450	0	0
11	0	0	+58
12	0	-660	0
13	0	0	-58
14	0	+660	0
15	-450	0	0

세 그루빙 머신의 구조 변형은 구조 요소들의 자중 효과와 함께 유정압 안내면이나 유정압 베어링의 리세스 압력에 의한 유정압 효과를 고려한 상태에서 해석하였다.

Fig. 8은 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 모두 0mm 인 경우인 Table 4의 3번째 조건에 대한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 변형 해석 사례를 보여주고 있다. 수직 방향으로 움직이는 Z축 이송계와 B축 이송계의 질량이 카운터

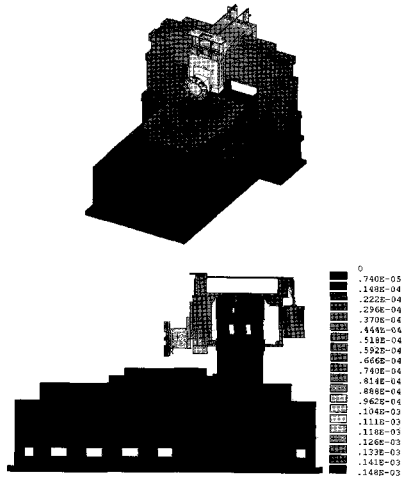


Fig. 8 Structural deformation of the virtual prototype

Table 6 Measured and predicted tool tip displacement errors

No.	Measured displacement error (μm)				Predicted displacement error (μm)			
	δ_X^m	δ_Y^m	δ_Z^m	δ_{Total}^m	δ_X^p	δ_Y^p	δ_Z^p	δ_{Total}^p
1	2.279	90.625	-120.800	151.032	2.170	89.087	-122.306	151.327
2	-0.861	78.977	-116.897	141.078	-0.242	77.303	-118.810	141.745
3	0.635	82.312	-123.107	147.945	0.831	82.800	-123.000	148.275
4	1.732	78.769	-115.890	140.136	1.648	77.321	-118.014	141.098
5	1.788	79.250	-116.930	141.267	1.708	77.581	-118.744	141.852
6	2.362	91.216	-121.903	152.271	2.242	89.447	-123.084	152.169
7	-1.350	90.947	-120.313	150.826	-0.760	89.401	-121.921	151.188
8	-0.771	78.511	-115.900	139.991	-0.142	77.067	-118.142	141.056
9	-1.441	91.503	-121.340	151.981	-0.848	89.737	-122.638	151.966
10	-0.935	82.394	-120.697	146.141	-1.909	83.942	-119.832	146.320
11	1.382	69.173	-114.210	133.532	1.903	70.640	-112.821	133.125
12	0.711	82.536	-123.120	148.227	0.461	84.031	-122.680	148.700
13	1.233	93.212	-121.093	152.819	1.009	94.840	-120.941	153.696
14	0.745	82.389	-122.310	147.473	0.489	83.711	-121.232	147.326
15	2.502	82.360	-120.800	146.226	2.971	83.906	-120.152	146.579

밸런스 웨이트에 의해서 보상되었음에도 불구하고 X축, Z축 및 B축 이송계가 크로스 빔을 중심으로 선회하면서 공구 선단부가 아래로 쳐지는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 X축 이송계의 전면에 설치된 구조물들의 질량이 후면에 설치된 구조물들의 질량보다 크고, Z축 이송계에 연결된 와이어 로프의 연결점이 Z축 이송계와 B축 이송계의 무게 중심을 통과하는 수직선 상에 위치하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우에 대해서 측정된 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차는 각각 0.635, 82.312 및 -123.107μm이다.

본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 조건들과 그에 대응되는 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값들로부터 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 도출하기 위해서 Minitab⁽⁷⁾을 이용하였다. 그리고 Table 4에서 알 수 있듯이 3개의 독립 변수들인 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 크기가 서로 다르고, 특히 Z축 이송계의 이송 위치는 다른 독립 변수들에 비해서 그 값이 매우 작기 때문에 본 연구에서는 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 크기를 정규화⁽⁸⁾한 후, 그 정규화 독립 변수들을 이용해서 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 도출하였다. X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 대한 정규화 독립 변수 \bar{X} , \bar{Y} 및 \bar{Z} 는 독립 변수 X , Y 및 Z , 독립 변수의 최대값 X_{max} , Y_{max} 및 Z_{max} , 그리고 독립 변수의 최소값 X_{min} , Y_{min} 및 Z_{min} 을 이용해서 식 (1), (2) 및 (3)과 같은 형태로 정의하였다.

$$\bar{X} = 2 \left(\frac{2X - X_{max} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) \quad (1)$$

$$\bar{Y} = 2 \left(\frac{2Y - Y_{max} - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \right) \quad (2)$$

$$\bar{Z} = 2 \left(\frac{2Z - Z_{max} - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} \right) \quad (3)$$

공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 정규화 독립 변수들의 2차 회귀 모형의 형태로 구한 결과는 식 (4), (5) 및 (6)에 나타내었다. 여기서 δ_X , δ_Y 및 δ_Z 는 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차를 의미한다.

$$\delta_X = 0.831 - 1.220\bar{X} + 0.007\bar{Y} + 0.021\bar{Z} - 0.075\bar{X}^2 - 0.089\bar{Y}^2 + 0.055\bar{Z}^2 + 0.040\bar{X}\bar{Y} + 0.003\bar{Y}\bar{Z} + 0.285\bar{X}\bar{Z} \quad (4)$$

$$\delta_Y = 82.8 + 0.009\bar{X} - 0.149\bar{Y} - 6.050\bar{Z} + 0.281\bar{X}^2 + 0.302\bar{Y}^2 - 0.015\bar{Z}^2 + 0.006\bar{X}\bar{Y} + 0.025\bar{Y}\bar{Z} - 0.142\bar{X}\bar{Z} \quad (5)$$

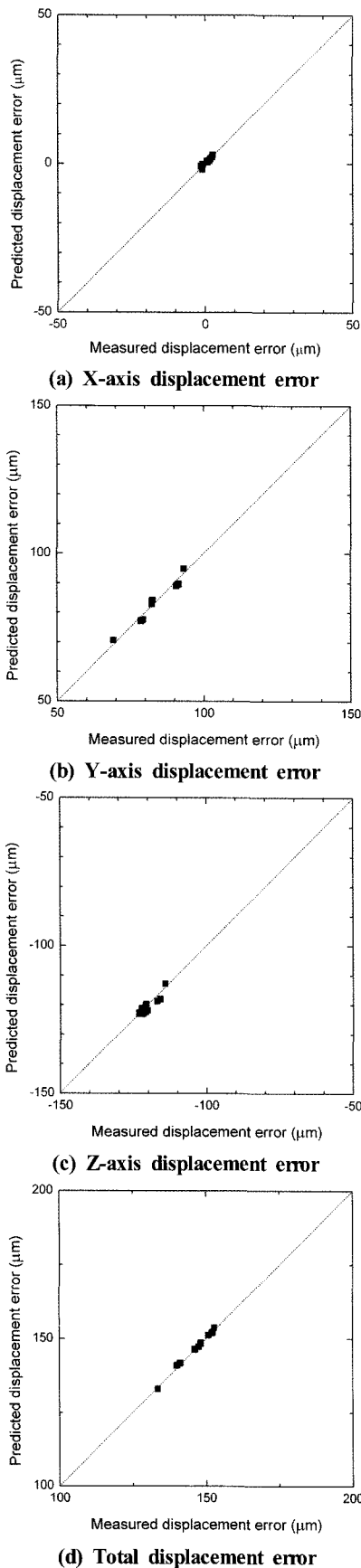


Fig. 9 Correlation between the measured and predicted tool tip displacement errors

$$\delta_z = -123.0 + 0.080\bar{X} + 0.362\bar{Y} + 2.030\bar{Z} + 0.752\bar{X}^2 + 0.261\bar{Y}^2 + 1.530\bar{Z}^2 - 0.015\bar{X}\bar{Y} - 0.012\bar{Y}\bar{Z} - 0.128\bar{X}\bar{Z} \quad (6)$$

식 (4)에 나타난 공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차 δ_x 는 \bar{X} 의 계수가 가장 크다는 점에서 X축 이송계의 이송 위치의 영향을 가장 많이 받는다고 판단된다. 또한 식 (5)와 (6)에 나타난 공구 선단부의 Y축과 Z축 방향의 변위 오차 δ_y 와 δ_z 는 \bar{Z} 의 계수가 상수항을 제외한 다른 항들의 계수보다 크다는 점에서 Z축 이송계의 이송 위치의 영향을 가장 많이 받는다고 할 수 있다.

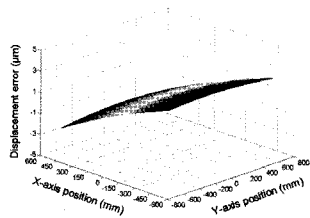
Table 6의 우측에는 중심 합성 계획에 의해서 Table 5와 같이 결정된 총 15가지의 구조 해석 조건들을 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델인 식 (4), (5) 및 (6)에 적용해서 산정한 공구 선단부의 변위 오차에 대한 예측값들을 나타내었다. Table 6에서 δ_x , δ_y 및 δ_z 는 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차에 대한 예측값을 의미하고, δ_{Total} 은 δ_x , δ_y 및 δ_z 의 벡터 합의 크기인 총 변위 오차를 의미한다. Fig. 9는 Table 6에 제시한 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값과 예측값을 각각 수평축 좌표값과 수직축 좌표값으로 활용해서 15개의 점들로 나타낸 것이다. 측정값과 예측값이 일치할수록 해당 점의 위치는 45° 각도의 점선에 근접하게 되는데, 다양한 해석 조건들로부터 얻은 15개의 점들이 45° 각도의 점선에 근접하게 분포하고 있다는 사실로부터 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델인 식 (4), (5) 및 (6)의 신뢰도는 매우 높다고 판단된다. 또한 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값과 예측값 사이의 편차를 수치적인 관점에서 살펴보면 X축 방향의 변위 오차가 0.080~0.974 μm , Y축 방향의 변위 오차가 0.488~1.769 μm , Z축 방향의 변위 오차가 0.107~2.242 μm , 그리고 총 변위 오차가 0.002~1.065 μm 수준의 매우 작은 편차를 갖는다는 점에서 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델에 대한 신뢰도를 재확인할 수 있다.

3.4 이송계의 이송 위치와 공구 선단부의 변위 오차 관계

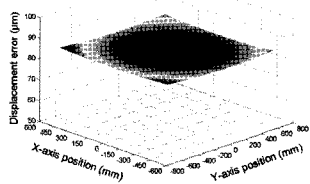
초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도는 공구 선단부의 변위 오차와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 분석하기 위해서 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델인 식 (4), (5) 및 (6)을 토대로 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 변위 오차를 산정하였다. 특히 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 교호 작용이 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차에 미치는 영향을 분석하기 위해서 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치 중에서 1개의 이송계의 이송 위치는 고정시키고, 다른 2개의 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 또한 X축 이송계의 이송

위치는 -450~450mm, Y축 이송계의 이송 위치는 -660~660mm, 그리고 Z축 이송계의 이송 위치는 -58~58mm로 해석의 범위를 국한하였으며, 공구 선단부의 총 변위 오차는 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차에 대한 벡터 합의 크기로 산정하였다.

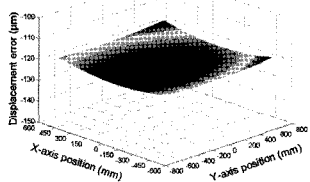
Fig. 10은 Z축 이송계의 이송 위치를 0mm로 고정시킨 상태에서 X축과 Y축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 변위 오차를 보여주고 있다. X축 방향의 변위 오차는 X축에 대해서 점 대칭 형상이고, 다른 변위 오차들은 X축에 대해서 축 대칭 형상을 가지고 있는데, 이것은 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조가 좌우 대칭이기 때문에 나타나는 현상이다. 특히 이 경우에 대한 공구 선단부의 변위 오차로서 X축 방향의 변위 오차는 -2.439~2.986 μm 로 최대 편차가 5.425 μm , Y축 방향의 변위 오차는 82.781~85.442 μm 로 최대 편차가 2.661 μm , Z축 방향의 변위 오차는 -123.102~-118.103 μm 로 최대 편차가 5.001 μm , 그리고 총 변위 오차는 145.203~148.601 μm 로 최대 편차가 3.398 μm 인 것으로



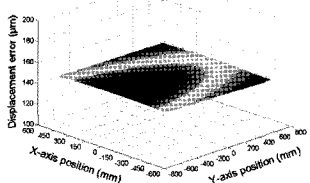
(a) X-axis displacement error



(b) Y-axis displacement error



(c) Z-axis displacement error



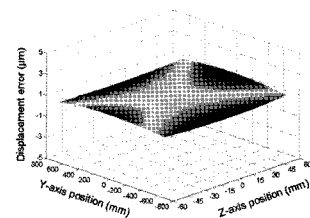
(d) Total displacement error

Fig. 10 Tool tip displacement errors of the virtual prototype due to the positions of the X-axis and Y-axis feed systems

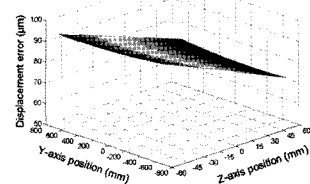
나타났다.

Fig. 11은 X축 이송계의 이송 위치를 0mm로 고정시킨 상태에서 Y축과 Z축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 변위 오차를 보여주고 있는데, 모든 변위 오차들이 Y축에 대해서 축 대칭 형상을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 Z축 이송계의 이송 위치는 공구 선단부의 변위 오차에 큰 영향을 주지만, Y축 이송계의 이송 위치는 공구 선단부의 변위 오차에 상대적으로 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 이 경우에 대한 공구 선단부의 변위 오차로서 X축 방향의 변위 오차는 0.462~1.093 μm 로 최대 편차가 0.631 μm , Y축 방향의 변위 오차는 70.543~97.351 μm 로 최대 편차가 26.808 μm , Z축 방향의 변위 오차는 -123.803~-111.102 μm 로 최대 편차가 12.701 μm , 그리고 총 변위 오차는 132.003~154.102 μm 로 최대 편차가 22.099 μm 인 것으로 나타났다.

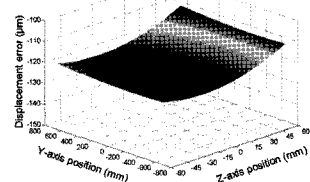
Fig. 12는 Y축 이송계의 이송 위치를 0mm로 고정시킨 상태에서 Z축과 X축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 변위 오차를 보여주고 있다. X축 방향의 변위



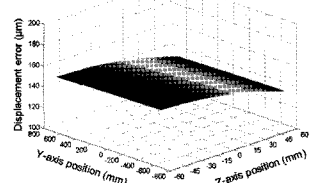
(a) X-axis displacement error



(b) Y-axis displacement error



(c) Z-axis displacement error

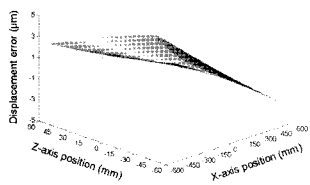


(d) Total displacement error

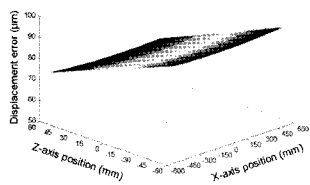
Fig. 11 Tool tip displacement errors of the virtual prototype due to the positions of the Y-axis and Z-axis feed systems

오차는 Z축에 대해서 축 대칭 형상이고, 다른 변위 오차들은 X축에 대해서 축 대칭 형상을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 Z축 이송계의 이송 위치는 공구 선단부의 변위 오차에 큰 영향을 주지만, X축 이송계의 이송 위치는 공구 선단부의 변위 오차에 상대적으로 작은 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 이 경우에 대한 공구 선단부의 변위 오차로서 X축 방향의 변위 오차는 -2.871~4.289 μm 로 최대 편차가 7.160 μm , Y축 방향의 변위 오차는 70.570~96.552 μm 로 최대 편차가 25.982 μm , Z축 방향의 변위 오차는 -123.713~-109.502 μm 로 최대 편차가 14.211 μm , 그리고 총 변위 오차는 131.003~153.401 μm 로 최대 편차가 22.398 μm 인 것으로 나타났다.

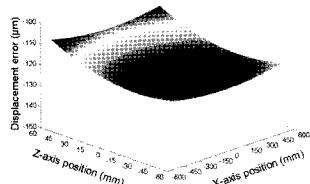
Fig. 13은 Y축과 Z축 이송계의 이송 위치가 0mm이고, X축 이송계의 이송 위치가 -450, 0, 450mm인 경우에 대한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 변형을 보여주고 있는데, 이와 같이 X축 이송계의 이송 위치만 변화시켰을 때 나타나는 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차는 각각 4.880, 1.142 및 3.170 μm 이다. Fig. 14에는 Z축과 X축



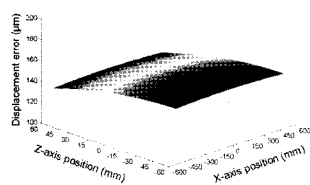
(a) X-axis displacement error



(b) Y-axis displacement error



(c) Z-axis displacement error



(d) Total displacement error

Fig. 12 Tool tip displacement errors of the virtual prototype due to the positions of the Z-axis and X-axis feed systems

이송계의 이송 위치가 0mm이고, Y축 이송계의 이송 위치가 -660, 0, 660mm인 경우에 대한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 변형을 제시하였는데, 이와 같이 Y축 이송계의 이송 위치만 변화시켰을 때 나타나는 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차는 각각 0.370, 1.524 및 1.894 μm 이다. 또한 Fig. 15에서는 X축과 Y축 이송계의 이송 위치가 0mm이고, Z축 이송계의 이송 위치가 -58, 0, 58mm인 경우에 대한 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 변형을 볼 수 있는데, 이와 같이 Z축 이송계의 이송 위치만 변화시켰을 때 나타나는 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차는 각각 0.264, 24.200 및 10.853 μm 이다.

이상과 같은 분석 결과들로부터 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 Y축 방향의 변위 오차, Z축 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 Z축 방향의 변위 오차, X축 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차, 그리고 X축 이송계의 이송 위치에 따른 공구 선단부의 Z축 방향의 변위 오차 순으로 그 최대 편차의 크기가 크다는 사실을 알 수 있다. 즉 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 대해서 Z축 이송계의 이송 위치가 가장 큰 영향을 주고, 그 다음으로 X축 이송계의 이송 위치가 큰 영향을 주며, Y축 이송계의 이송 위치는 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 영향을 주는 가장 큰 이유는 Z축 이송계의 이송 위치에 따라서 Z축 이송계

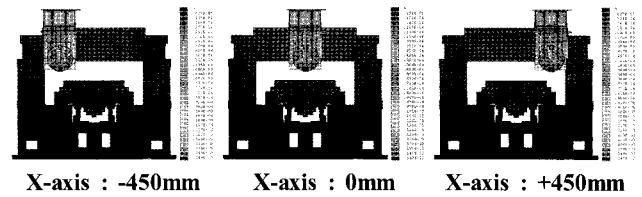


Fig. 13 Structural deformation of the virtual prototype due to the positions of X-axis feed system

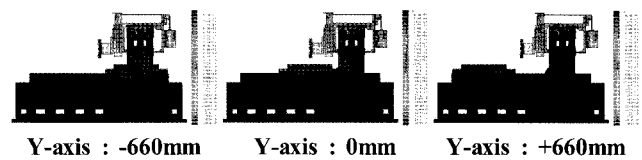


Fig. 14 Structural deformation of the virtual prototype due to the position of Y-axis feed system

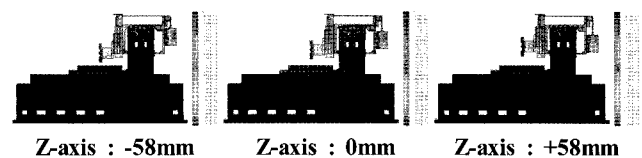


Fig. 15 Structural deformation of the virtual prototype due to the position of Z-axis feed system

의 구조 강성이 크게 변한다는 점에 있으며, X축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 영향을 주는 가장 큰 이유는 X축 이송계의 이송 위치에 따라서 2개의 컬럼들에 의해서 지지되는 크로스 빔의 굽힘 변형 형태가 변한다는 점에 있다. 따라서 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 무엇보다도 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차를 줄이기 위한 Z축 이송계와 크로스 빔의 고강성화 설계 대책이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 42인치 수준의 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 초기 설계 단계에서 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 구조 변형이 가공 정밀도와 관련된 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 검토하였다. 특히 구조 해석 모델을 이용한 구조 변형 해석, 그리고 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 이용한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 교호 작용 분석을 통해서 공구 선단부의 변위 오차의 발생 원인을 규명하였다. 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 유정압 안내 방식과 리니어 모터 구동 방식을 기반으로 하는 문형 구조의 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델은 175,942개의 절점, 그리고 645,213개의 솔리드 요소와 1,204개의 매트릭스 요소로 구성하였다.
- (2) X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위한 예측 모델은 중심 합성 계획에 기반을 둔 반응 표면법을 이용해서 2차 회귀 모형의 형태로 도출하였다. 본 연구의 경우에는 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 반응 표면법의 독립 변수에 해당하고, 공구 선단부의 변위 오차가 반응 변수에 해당한다.
- (3) 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값과 예측값 사이의 편차는 X축 방향의 변위 오차가 0.080~0.974 μm , Y축 방향의 변위 오차가 0.488~1.769 μm , 그리고 Z축 방향의 변위 오차가 0.107~2.242 μm 로 나타났다. 특히 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델에 대한 신뢰도는 이와 같이 측정값과 예측값 사이의 편차가 매우 작다는 사실로부터 확인할 수 있다.
- (4) 현재 설계된 상태에서는 X축 이송계의 전면에 설치된 구조물들의 질량이 후면에 설치된 구조물들의 질량보다 크고, Z축 이송계에 연결된 와이어 로프의 연결점이 Z축 이송계와 B축 이송계의 무게 중심을 통과하는 수직선 상에 위치하지 않기 때문에 카운터 밸런스 웨이트를 사용했음에도 불구하고 X축, Z축 및 B축 이송계가 크로스 빔을 중심

으로 선회하면서 공구 선단부가 아래로 처질 것으로 예측된다.

- (5) Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 가장 큰 영향을 주고, 그 다음으로 X축 이송계의 이송 위치가 큰 영향을 주며, Y축 이송계의 이송 위치는 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 Z축 이송계의 이송 위치와 관련해서는 Z축 이송계의 이송 위치에 따라서 Z축 이송계의 구조 강성이 크게 변한다는 점이 주 원인이며, X축 이송계의 이송 위치와 관련해서는 X축 이송계의 이송 위치에 따라서 2개의 컬럼들에 의해서 지지되는 크로스 빔의 굽힘 변형 형태가 변한다는 점이 주 원인인 것으로 판단된다.
- (6) 초정밀 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 무엇보다도 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차를 줄이기 위한 Z축 이송계와 크로스 빔의 고강성화 설계 대책이 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원을 받아서 대면적 미세 가공 장비 원천기술개발 사업의 일환으로 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Kathuria, Y. P., 2004, "L3: Laser, LIGA and Lithography in Microstructuring," *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol. 84, pp. 77~87.
- (2) Park, C. H., and Song, C. K., 2005, "Ultra Precision Machine Tools for Machining the Large Surface Micro Feature," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 7~15.
- (3) Park, C. H., and Song, C. K., 2008, "Large-surface Micro-machining Machine Technology," *Annual Report of KSME*, pp. 39~44.
- (4) Cochran, W. G., and Cox, G. M., 1957, *Experimental Designs*, Wiley-Interscience, New York, pp. 335~370.
- (5) Lee, W. J., Lee, H. B., Lee, H. D., and Kim, S. I., 2009, "Structural Characteristic Analysis and Error Estimation of a Large-surface Micro-grooving Machine," *Spring Conference of KSPE*, pp. 1031~1032.
- (6) Lee, W. J., and Kim, S. I., 2009, "Joint Stiffness Identification of an Ultra-precision Machine for Machining Large-surface Micro-features," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, pp. 115~121.

- (7) Minitab, 2010, *Meet Minitab 16*, Minitab, Inc.
- (8) Bahloul, R., Mkaddem A., Dal Santo Ph., and Potiron A., 2006, "Sheet Metal Bending Optimisation Using Response Surface Method, Numerical Simulation and Design of Experiments," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 9, pp. 991~1003.
- (9) Lee, T. H., and Choi, J. W., 2011, "Structural Analysis on Horizontal CNC Lathe," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 298~303.
- (10) Lee, M. G., Song, K. H., Choi, H. B., and Lee, D. Y., 2011, "The Displacement Minimization of the tool Center Point by the Crossrail Structure Improvement of the Portal Machine," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 310~316.