

유한요소법을 이용한 고주파 열처리시 안내면 변형에 관한 연구

홍성오*, 조규재⁺

(논문접수일 2001. 12. 28, 심사완료일 2002. 3. 28)

A Study on Slide Way Deformation from High Frequency Heat Treatment by Finite Element Method

Sung-Oh Hong*, Gyu-Jae Cho⁺

Abstract

Finite element program(ANSYS) estimated thermal deformation quantity in high frequency heat treatment process of a machine tool feed drive system slideway and apply deformation quantity in roughing process. Having processed the heat treatment, minimizing methods of the quantity of deformation heat treatment process. Having done heat treatment with high frequency after taper processing with considering the existed heat treatment generating the quantity of deformation, existed quantity of deformation can be reduced down to 80%, consequently productivity and material saving can be achieved. When high frequency heat treatment finite element method estimated deformation quantity at difference temperature and time. it is progress at cost down and saved time.

Key Words : Machine Tool(공작기계), Feed Drive System(이송계), Slideway(안내면), High Frequency Heat Treatment(고주파 열처리)

1. 서론

최근 산업의 발달과 더불어 생산품은 고기능, 경량화의 추세에 있고, 이에 따라 다양한 신소재가 개발되어지고 있으며, 제품의 정밀도에 대한 요구도 점차 높아지고 있다. 공작기계 분야에 있어서도 고생산성과 고정밀도를 갖춘 제

품을 제작하기 위한 노력이 계속되어지고 있다. 이송계 구조형태의 경우도 정밀공작기계의 고급화와 자동화에 따라 점점 고정밀도가 요구되어지고 있는 실정이다^(1,2).

구조성과 절삭성을 고려해 베이스와 새들은 GC250~300정도 재질이 권장되어지고 있다. 이러한 베이스와 새들은 보통 가혹한 조건에서 사용되므로 수명과 내구성을 향

* 주저자, 화천기공주 기술개발연구실 (hso@hwacheon.co.kr)
주소: 506-251 광주시 광산구 장덕동 976-1번지, Tel: 018-605-3743

+ 조선대

상사키기 위해 열처리를 하게 된다. 고주파 유도가열의 대표적인 이용기술인 고주파 담금질은 유도가열에 의한 급속가열과 표면가열의 특성이 있어 오스테나이트(Austenite) 결정립의 미세화와 표면부근의 높은 압축잔류 응력으로 여러 기계 부품의 강인성, 내피로성, 내마모성의 향상에 상당한 역할을 하고 있다. 고주파 유도가열법은 일반가열법에 비해 설비가 고가이고 전력소비량이 많은 단점이 있으나 급속가열, 단시간 가열 그리고 급속 냉각을 행할 수 있으며, 상승온도 시간과 전체가열 시간이 매우 짧아 미세한 결정립을 얻을 수 있어 일반적으로 노가열에 비해 기계적 특성이 우수하고^(3,4), 에너지 절감 및 원가절감을 피할수 있어 생산 현장에서 널리 사용되고 있다. 공작기계 이송계 안내면 GC(300)의 경도(HRC30→HRC50)를 높이기 위해 표면경화법인 고주파 열처리시⁽⁵⁻¹¹⁾ 고주파 열처리 공정을 설계하고 작업조건을 설정하는 것을 반복된 실험에 의해서만 찾아야만 하기 때문에 어려운 문제점이 있었다. 그러나 유한요소법을 적용하면 열처리시 작업현장에서 매우 효율적인 열처리 공정설계가 가능하다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 고주파 열처리후 발생된 변형량을 유한요소법을 이용하여 예측하고 황삭가공시 보정 가공함으로써 열처리 후 발생하는 변형을 최소화하여 연삭공정의 비작업 시간을 줄이고 산업현장에서 생산성 향상과 원가 절감을 피할수 있는 방안을 제시함을 연구 목적으로 하였다.

2. 열변형 해석

고주파 열처리 공정에서 유한요소법을 이용하여 안내면 변

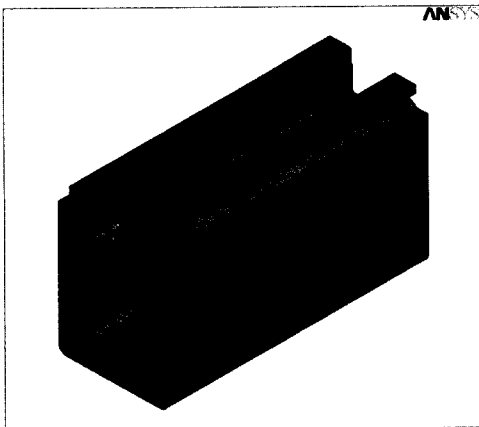


Fig. 1 3-D Modeling of slideway

형량을 예측하기 위하여 범용 FEM 해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였으며, 아래 Fig. 1은 전용 3-D Modeling 프로그램인 Pro-e를 통하여 3-D Modeling을 한 후 ANSYS의 Pre-processor로 불러들인 그림이다.

해석을 하기 위해 탄성계수(Young's modulus), 항복응력(Yield stress), 열팽창계수(Expansion Coefficient), 등의 물성치(Material Properties)들이 모두 온도 의존 함수들인 관계로 열전도문제와 열탄성, 소성문제가 서로 연관된 형태이지만 온도 의존관계를 준정적상태(quasi-static)로 가정함으로써 온도분포와 응력분포 사이의 상호연관성은 무시할 수 있다. 따라서 온도분포는 응력해석전에 독립적으로 수행할 수 있다. 고주파 열처리공정의 변형량을 예측하기 위해서는 먼저 열해석을 수행한 후 다시 그 결과 값을 바탕으로

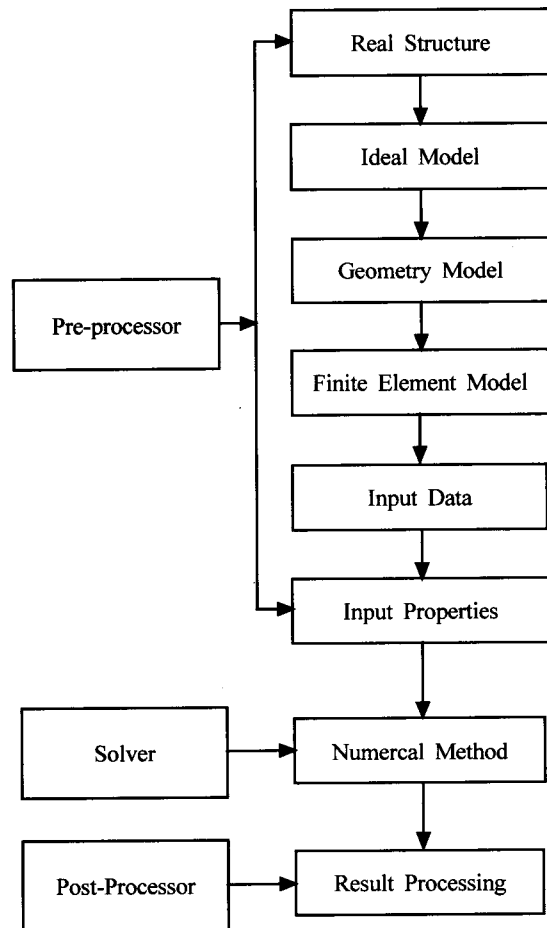


Fig. 2 Schematic diagram of the analysis

Table 1 Material Properties of GC300

1. Density (Kg/m^3)	7400
2. Young's Modulus (N/m^2)	140×10^9
3. Poisson's Ratio	0.3
4. Thermal Conductivity ($W/m \cdot K$)	Temperature (K)
57.36	293.15
54.01	373.15
51.08	473.15
48.57	573.15
46.05	673.15
40.61	773.15
39.36	873.15
38.52	973.15
8.79	1073.15
37.68	1173.15
5. Thermal Expansion Coefficient ($\times 10^{-8}/K$)	Temperature (K)
3.66	293.15
4.03	373.15
4.58	473.15
4.94	573.15
5.13	673.15
5.31	773.15
5.49	873.15
6.22	973.15
8.79	1073.15
9.88	1173.15
6. Specific Heat ($J/Kg \cdot K$)	Temperature (K)
544.19	293.15
548.37	373.15
577.67	473.15
594.42	573.15
611.16	673.15
623.72	773.15
648.84	873.15
682.33	973.15
715.81	1073.15
740.93	1173.15

구조 · 연성해석을 실시하여야 한다.

안내면의 열전달 특성은 시간 의존적인 비정상 과도문제 (Time Dependent Unsteady Transient Problem)이고 열전달계수(Thermal Conductivity), 비열(Specific Heat)등 열전달과 관련된 재료 특성치들도 또한 온도에 따른 온도 의존성을 보인다. 다음의 Fig. 2와 같은 온도 분포 해석 흐름도를 바탕으로 해석을 수행하였다.

해석에 필요한 Material Properties들은 Table 1과 같이 온도에 따라 변하는 값으로 입력하였다.

GC300의 물성치 Newton Rapson법(ANSYS 5.5)에 의한 자체에서 수치해석한 결과 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5와 같은 그래프로 표시되었다.

Fig. 3은 GC300(물성치)의 온도변화에 따른 열팽창률(상수) 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 900~1000K 부근에서 열팽창률이 급격히 증가하는데 이것은 조직의 오스

테나이트화로 인해 열팽창률이 급격히 증가하는 것임을 알 수 있다.

또한 Fig. 4는 온도에 따른 비열이고 Fig. 5는 온도에 따른 열전달률이다. 마찬가지로 900~1000K 부근에서 비열은 급격히 증가하고 열전달률은 변화가 감소한다. 이 또한 조직의 오스테나이트 변화로 인한 영향임을 알 수 있다.

해석을 하기 위해서 Model에 격자분할 후 이 물성치들을 적용시킴으로서 해석작업을 수행할 수 있다. Model은 3-D Model과 2-D Model이 있으나 본 연구는 3면에 열이 가해지는 형태로써 2-D로는 불가능하기 때문에 3-D로 Modeling 하였다. Fig. 1과 같은 3-D Model은 축대칭이므로 한쪽만 Modeling후 격자분할 하였다. Fig. 6과 같이 안내형상을 사면체 요소를 사용하여 946,146개의 Element와 173,308개의 Node로 분할하였으며 Element Type은 3-D Solid70을 사용하였다.

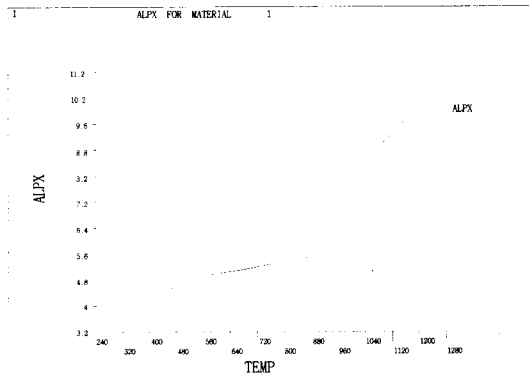


Fig. 3 Thermal expansion coefficient on temperature

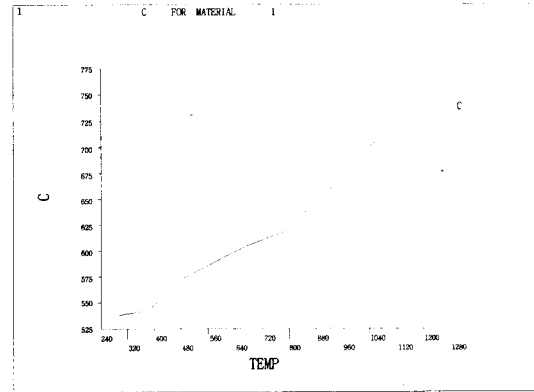


Fig. 4 Specific heat on temperature

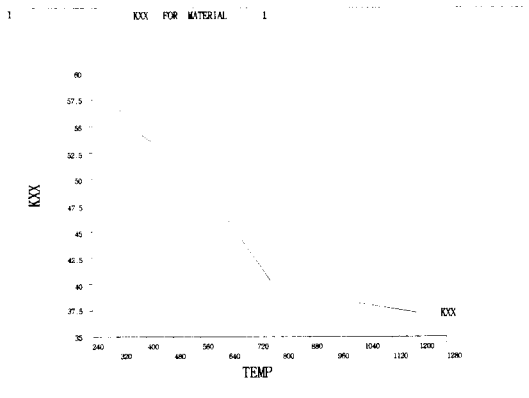


Fig. 5 Thermal conductivity on temperature

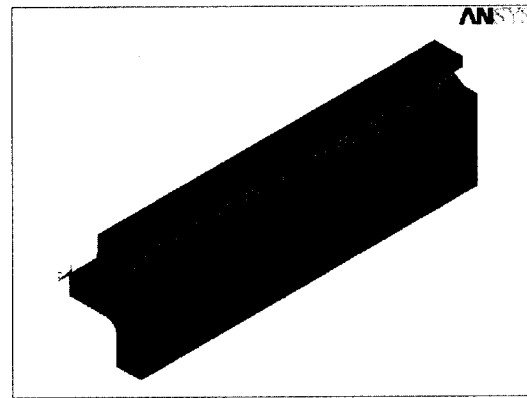


Fig. 6 Meshing of slideway

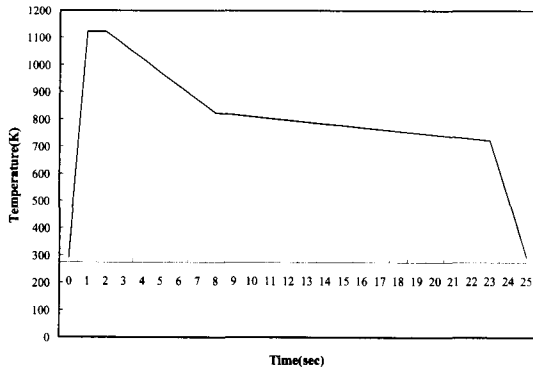


Fig. 7 High frequency heat treatment cycle

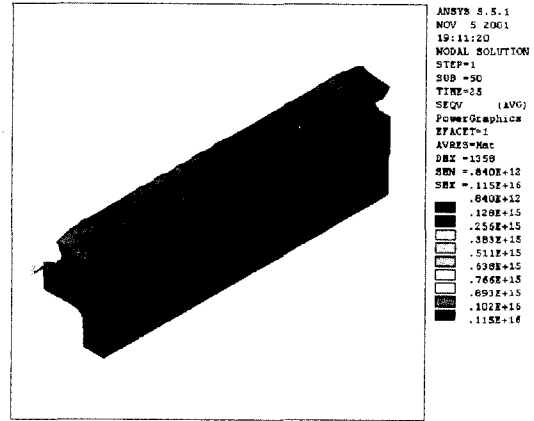


Fig. 8 Residual stress at final (space)

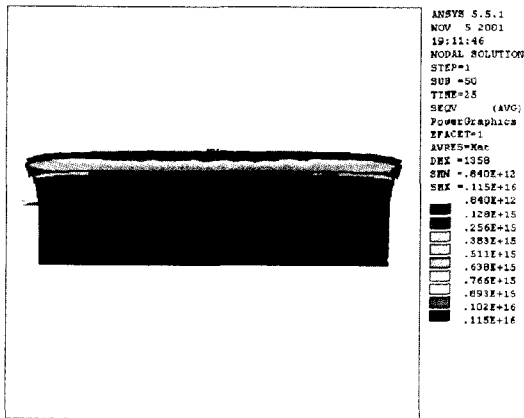


Fig. 9 Residual stress at final (front)

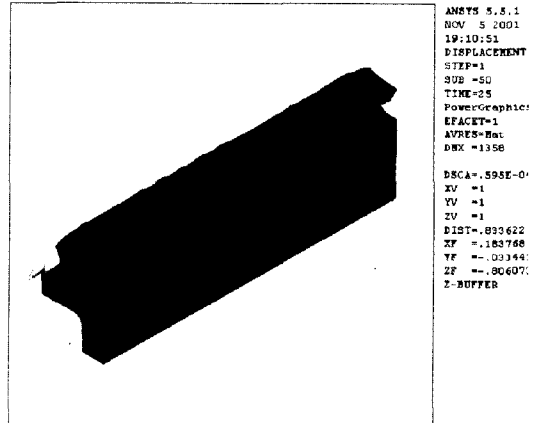


Fig. 10 Final deformed shape of the analysis

Fig. 7은 시간에 따른 고주파 열처리 온도 사이클인데 최고온도는 1123.15K이며 25초시 상온으로 냉각된다. 이 열처리 사이클을 이용하여 온도를 격자분할한 모델 형상에 시간에 따라 반복적으로 가함으로써 해석을 수행하였다.

해석은 Slideway의 길이에 따라 1600, 3000mm 2가지로 나누어 수행하였으며 각각 조건은 동일하게 입력하였다.

1600mm Slideway를 해석한 결과 잔류응력 분포와 변형된 형상은 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같이 나타났다. Fig. 8, 9는 안대면 모델형상을 해석한 후 정면과 공간상의 잔류응력 분포를 채색된 등고선 형태로 나타낸 그림이다. 여기서 붉은색(.115E+16)으로 표시된 부분이 가장 잔류응력이 크며 그림에서 베드면 중앙 부분이 붉게 표시되어 가장 잔류응력이 크음을 알 수 있다. 최종 변형된 형상은 Fig. 10과 같

이 나타났다.

3000mm에서도 1600mm에서 나타났던 잔류응력과 변형된 형상은 거의 유사한 형태를 한 형상으로 나타났다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 논문에서 사용한 고주파 열처리 실험장치는 Photo 1과 같다. 고주파 열처리 실험은 고주파 유도 가열 소입 장치(日本電子, 日-180D)를 이용하여 실험을 수행하였다. 열처리 후의 변형량측정은 인디게이터(Model : 1003, 1 μ m, Mahr)를 이용하였다.

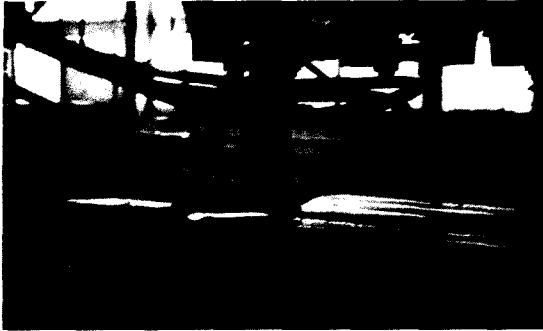


Photo 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3.2 실험방법

3.2.1 고주파 열처리 변형량 측정

본 논문은 열처리 공정 후 안내면의 변형량은 연삭공정 전의 공작물 가공 수준 의 변형량을 측정시 열처리 장치에서 열처리 공정이 시작되기 전에 인디케이터(Model : 1003, 1 μ m, Mahr)를 이용하여 안내면의 변형량을 측정하였다. 그리고 열처리 공정 후의 안내면 변형량은 연삭 공정에서 연삭 작업을 하기 위한 공작물 가공 수준의 작업을 실시 후 열처리 공정 전의 측정 방법과 동일하게 실시하였다.

현장에서 작업되어지는 고주파 열처리 공정과 본 실험에

서의 작업되어진 공정을 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 열처리 후에 발생된 변형량에 대하여 연삭가공을 시행하여 변형량을 보정하는데 본 실험에서는 황삭가공시에 유한요소법을 통하여 예측된 변형량을 고려하여 시행함으로써 열처리시 발생될 변형량을 줄일 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고주파 열처리시 실험결과와 FEM 해석결과 의 비교 고찰

공작기계의 이송계에서 테이블 이송 안내면의 경우 마모를 최소화하기 위해 고주파 열처리 공정을 수행하는데, 이 고주파 열처리 공정 수행 후 안내면에 변형이 발생하게 된다. 이러한 변형을 최소화하기 위해 열처리 앞 공정인 황삭가공 공정에서 유한요소법을 이용하여 얻어진 변형량을 고려하여 머시닝센터(5-FACE NC PLANO MILLER)로 테이퍼 가공을 한후 황삭 가공을 실시하여, 변형량을 비교 고찰 하였다.

Fig. 12는 1600mm 안내면에 대한 기존 열처리시 발생된 변형량과 유한요소법을 이용하여 얻어진 변형량을 황삭가공시 적용하여 열처리시 발생된 변형량을 나타내고 있다. 실측값에 의해 중간 지점에서 130 μ m의 최대 변형이 일어나

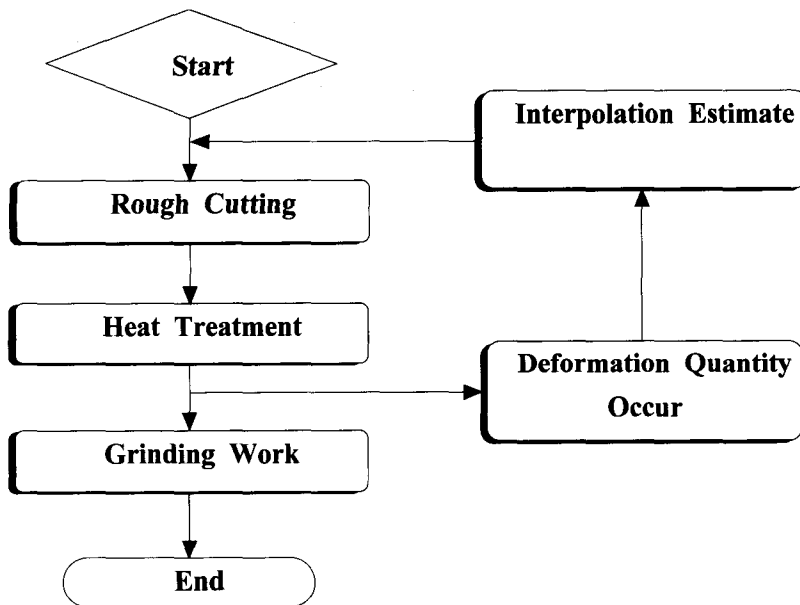


Fig. 11 Process flow chart

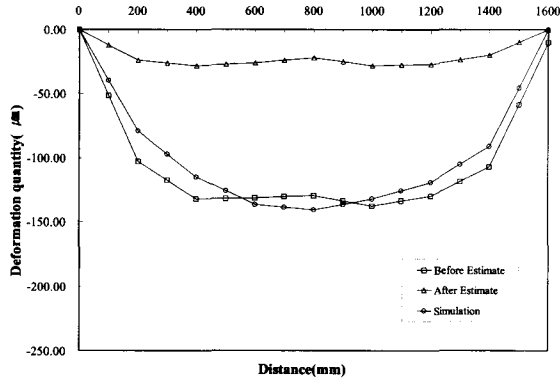


Fig. 12 Relation between distance of slideway and deformation quantity

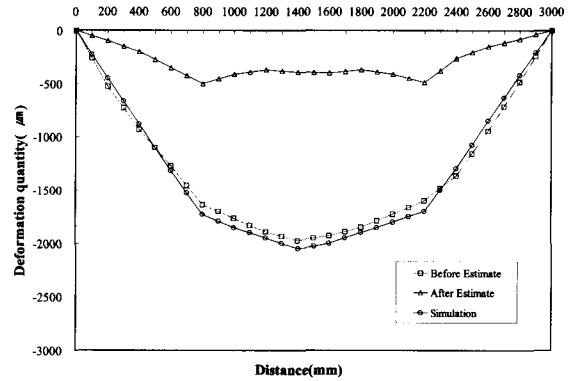


Fig. 13 Relation between distance of slideway and deformation quantity

고 유한요소법을 통해 얻어진 변형량 값도 중간 지점에서 150 μm 의 최대 변형이 일어남을 알 수 있었으며 유한요소법을 통해 얻어진 값들이 실측 값보다 대체로 완만한 곡선을 나타냄을 알 수 있었다.

이와 같이 예측된 변형량값을 황삭 가공시 머시닝센터로 테이퍼 가공을 실시한 후, 열처리 완료 후 변형량을 측정하고 열처리 공정 후 가공물의 중앙 800mm에서 22 μm 의 변형량을 나타냈다. 기존 열처리시 발생된 안내면의 변형량은 130 μm 으로 유한요소법을 이용하여 예측한 변형량을 고려한 황삭 가공한 공작물의 변형량보다 108 μm 정도가 개선됨을 알 수 있었다.

Fig. 13은 3000mm 안내면에 대한 기존 열처리시 발생된 변형량과 유한요소법을 통하여 얻어진 변형량을 황삭가공시 적용하여 열처리시 발생된 변형량을 나타내고 있다. 실측값에 의해 1500mm 지점에서 2000 μm 의 최대 변형이 일어나고 유한요소법을 통해 얻어진 변형량 값도 1500mm 지점에서 1480 μm 의 최대 변형이 일어남을 알 수 있었으며 유한요소법을 통해 얻어진 값들이 실측 값보다 대체로 완만한 곡선을 나타냄을 알 수 있었다.

예측된 변형량값을 황삭 가공시 머시닝센터로 테이퍼 가공을 실시한 후, 열처리 완료 후 변형량을 측정하고 열처리 공정 후 가공물의 중앙 1500mm에서 400 μm 의 변형량을 나타냈다. 기존 열처리시 발생된 안내면의 변형량은 2000 μm 으로 유한요소법을 이용하여 예측한 변형량을 고려하여 황삭 가공한 공작물의 변형량보다 1600 μm 정도가 개선됨을 알 수 있었다.

따라서 Fig. 12, Fig. 13과 같이 안내면의 길이에 따른 변

형량의 크기 차는 동일한 조건에서 고주파 열처리를 시행하여도 재질 물성의 차와 안내면의 길이에 따른 변형량의 차이가 발생되고 중앙 부분에 변형량이 크게 발생하는 현상은 측정시 양 끝단을 기준으로 측정하였고, 안내면의 가열 후 급격한 냉각으로 인한 수축에 의한 변형으로 판단된다.

실제 실험값과 유한요소법을 통해 얻은 값은 약간의 차는 있으나 그 차는 열손실에 의한 차이로서 미비하고 따라서 기존 열처리시 발생된 변형량을 황삭가공시 변형량을 고려하여 테이퍼 가공을 행한후 고주파 열처리를 실시 함으로써 기존에 발생된 변형량을 약 80%정도 감소시킬수 있어 연삭 공정의 비작업 시간을 줄여 생산성 향상과 원가절감을 기할수 있음을 알 수가 있었다.

변형량을 줄이기 위한 목적으로 길이에 따른 실측정 변형량을 알고 유한요소법을 통해 예측된 변형량을 고려한 황삭가공을 실시한 결과 대체로 변형량을 대폭 줄일 수 있었으며 또한 실제 실험값과 유한요소법을 통해 얻어진 변형량은 약간의 차는 있으나 그 차는 열손실에 의한 차이로 사료된다.

본 연구에서는 동일한 고주파 열처리 조건에서의 단지 안내면 길이에 대한 열처리시 변형량만을 유한요소법에 의해 예측·적용하여 변형량을 예측하였으나 향후 고주파 열처리 조건, 즉 열처리 온도, 열처리 시간 등을 변화시에도 실제 실험을 하지 않고도 유한요소법을 통해 예측 가능하다.

따라서 진직도 개선에 따른 공작기계의 안내면 개선등에 폭넓게 응용할수 있고, 좀더 유용하게 기존열처리시 발생된 길이, 온도, 시간등에 따른 변형량을 예측·적용할수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

공작기계 이송계의 안내면의 고주파 열처리 공정에 의한 변형량을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 통해 열변형량을 예측 황삭 공정에서 변형량을 고려해 가공을 실시하고, 열처리 공정을 수행함으로써 열처리 공정에 의한 변형량을 최소화 할 수 있는 방법을 얻을수 있었다.

- (1) 실제 안내면의 고주파 열처리시 변형량과 유한요소법을 통해 얻어진 변형량 값과의 차는 미비하였고 그 차는 열손실에 의한 차이로 사료된다.
- (2) 안내면의 고주파 열처리시 발생될 변형량을 유한요소법을 통해 얻어진 변형량을 고려하여 테이퍼 가공을 행한후 고주파 열처리를 실시함으로써 기존 방법에서 발생된 변형량을 80% 정도 감소 시킬수 있어 연삭공정의 시간을 줄여 생산성 향상과 원가절감을 기할 수 있었다.
- (3) 고주파열처리를 실시할 때 안내면 길이에 관계없이 최대 변형량은 거의 중간 부분에서 발생하였으며 안내면의 길이가 1600mm일때 변형량은 130 μ m이고 3000mm일때 변형량은 2000 μ m으로 변형량은 길이에 따라 값이 커짐을 알 수 있었다.
- (4) 고주파 열처리 조건 즉, 열처리 온도, 열처리 시간 등을 변화시에도 실제 실험을 하지 않고도 유한요소법을 통해 예측 가능하여 원가 절감과 공정시수 측면에서 향후 많은 발전이 기대된다.

후 기

이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참 고 문 헌

- (1) J. F. Tu, J. L. Stein. "Active Thermal Preload Preload Regulation for Machine Tool Spindles with Rolling Element Bearings", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118: pp. 499~505. 1996.
- (2) 홍성오, 조규재, 김재열, "CNC 선반에서 볼나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회지. 제8권, 제1호, pp. 45~51, 1990.
- (3) 김학운, "표면열처리", 원창출판사, 1991.
- (4) 尾廣邦夫, 山下英治, 池上由洋, 松原安廣, 熱處理, 28, 94, 1983.
- (5) 정인상, 고주파 열처리, 열처리 공학회지, 제12권, 제3호, pp. 251~269, 1990.
- (6) 東京電力株式會社 電氣 加熱技術協會 : 誘導加熱, 1982.
- (7) 電氣興業株式會社 : 電興技報, No. 25~29, 1991.
- (8) 星: 熱處理大學講座, 日本熱處理技術協會, 1996.