

절삭공구의 열변형 오차 및 절삭력 변형 오차에 관한 연구 Study of the thermal deflection error and the deflection error induced by the cutting force

오명석*, 윤인준**, 백대균***
Myung-Seok Oh*, In-Jun Yoon**, Dae-Kyun Baek***

<Abstract>

This paper presents a method to predict tool deflection induced by the thermal distribution and the cutting force using FEM in milling operation. The thermal distribution of cutting tool was predicted using FEM after measuring the temperature of the end of tool and of the tool holder. The thermal deflection of cutting tool was predicted using FEM as well. The tool deflection induced by the cutting force was analyzed with the solid model of cutting tool. An end mill tool caused most of tool deflection comparing to tool holder. Most of thermal deflection came from Z-direction and most of tool deflection induced by the cutting force came from X and Y direction. Precision cutting will be accomplished when tool locations are generated considering the thermal deflection of cutting tool and the tool deflection induced by the cutting force in CAD/CAM.

Key Words : *Thermal deflection, Deflection error, Cutting force, FEM, Cutting tool*

1. 서론

최근에 공작기계가 고속화, 정밀화로 되어가면서 최종 공작물의 가공오차를 줄이는 것이 큰 관심사로 대두되고 있다. 가공물의 가공오차의 주요 원인은 공작기계의 기하학적 오차, 열변형 오차 그리고 절삭력에 의한 공구의 변형 오차이다. 공작기계의 기하학적 오차는 기계 자

체의 불완전한 제조, 기계요소들의 부정렬, 정적변형 또는 기계 마모로 인해서 생긴다. 공작기계의 열변형 오차는 모터, 베어링, 유압시스템, 주위 온도로 인한 기계요소들의 열적 뒤틀림으로부터 온다. 절삭력에 의한 공구의 변형 오차는 툴홀더와 절삭공구가 절삭력에 의해 처짐이 발생하여 가공물에 오차를 발생시킨다. 그

*정회원, 영남이공대학 기계과 부교수
msoh@ync.ac.kr

**정회원, 한국 OSG(주) 선임연구원
ijyoon@osg.co.kr

***정회원, 안동정보대학 기계과 조교수
dkbaek@mail.ait.ac.kr

* Associate Prof. Dept. of Mechanical Engineering of Yeungnam College of Science & Technology

** Senior Researcher of OSG Korea

*** Assistant Prof. Dept. of Mechanical Technology of Andong Institute of Information Technology

중에 열변형 오차는 전체오차의 60~70%를 차지할 만큼 중요한 요소로 대두되고 있다.

열변형 오차를 줄이기 위해 설계단계에서 구조물의 대칭을 고려하거나, 강제 냉각방식을 도입하여 열원의 전파를 줄이고자 하나 단순히 생산기술과 디자인 기술로 극복할 수 없는 물리적인 한계가 있다.

열변형 오차를 줄이기 위해 임의의 가동조건에서 공구 끝점의 위치를 측정하고 동시에 공작기계의 여러 지점에서 온도를 측정하여 이들의 관계를 선형회귀법, 신경회로망, 시스템 검증법으로 모델링하여 열변형 오차를 예측하고 있다[1-4]. 이러한 열변형 모델은 공작기계의 구조물의 비틀림에 의한 오차해석에 중점을 두고 있으며 상당량의 오차량을 보상할 수 있다.

본 연구에서는 공작기계의 열변형 오차에서 공작기계의 전체구조물 보다는 툴홀더와 공구의 열변형에 대해서 해석하고 동시에 보상량을 예측하였다. 환경 친화적 절삭과 피삭재의 청정을 위해 고속가공을 이용하여 건식절삭에 대한 요구가 증대되고 있다. 고속절삭에 사용하는 고경도 공구재료는 고온에 견딜 수 있어 건식 절삭은 앞으로 더욱 각광을 받을 것으로 예상된다. 그러나 건식 절삭에서는 습식 절삭보다 공구의 온도가 높아 열변형은 상당히 심하나 이 부분의 온도측정은 어려운 실정이다. 또한 절삭 중에 공구교환을 위해 툴홀더와 공구 전체를 교환하므로 처음에 공구를 교환하고 공작물 원점을 새로 설정한 후 절삭을 수행하면 단시간에 공구와 툴홀더의 온도가 상승하게 된다. 따라서 본 연구에서는 건식절삭에서 공구 교환 전에 공구부의 온도를 측정하고 절삭 중에 온도를 측정하여 그 차이를 알아보았다. 또한 공구부를 간략히 모델링하고 절삭 전과 절삭 후에 측정된 공구부의 온도를 이용하여 FEM (Finite Element method)으로 해석하였다.

밀링가공에서 정확히 온도를 예측하여 공구부의 열변형을 예측하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 해석적인 결과보다는 절삭을 통한 공구부의 열변형에 관심을 가지고 연구를 수행하였다.

열변형에 의한 공작기계의 오차와 함께 절삭력에 의한 공구부의 처짐에 의하여 공작물의

정밀도가 저하되고 있다[5-7]. 본 연구에서는 툴홀더와 절삭공구를 솔리드로 모델링하여 절삭력에 대한 공구의 처짐량을 예측하였다. 이러한 열변형에 의한 공구의 처짐과 절삭력에 의한 공구의 처짐을 예측하면 CNC공작기계에서 처짐량을 보정하여 정밀한 가공을 수행할 수 있다.

2. FEM(Finite Element method)에 의한 열 변형 해석

절삭 시 발생하는 열은 절삭조건 및 경계조건에 따라 공작물, 칩 그리고 공구에 특정 온도 분포를 형성하게 된다. Fig.1에서와 같이 2차원 절삭 시 발생하는 열은 다음의 네 가지 영역에서 발생한다.

- (1) Primary plastic deformation zone
- (2) Secondary plastic deformation zone
- (3) Tool-chip interface
- (4) Tool flank-work interface

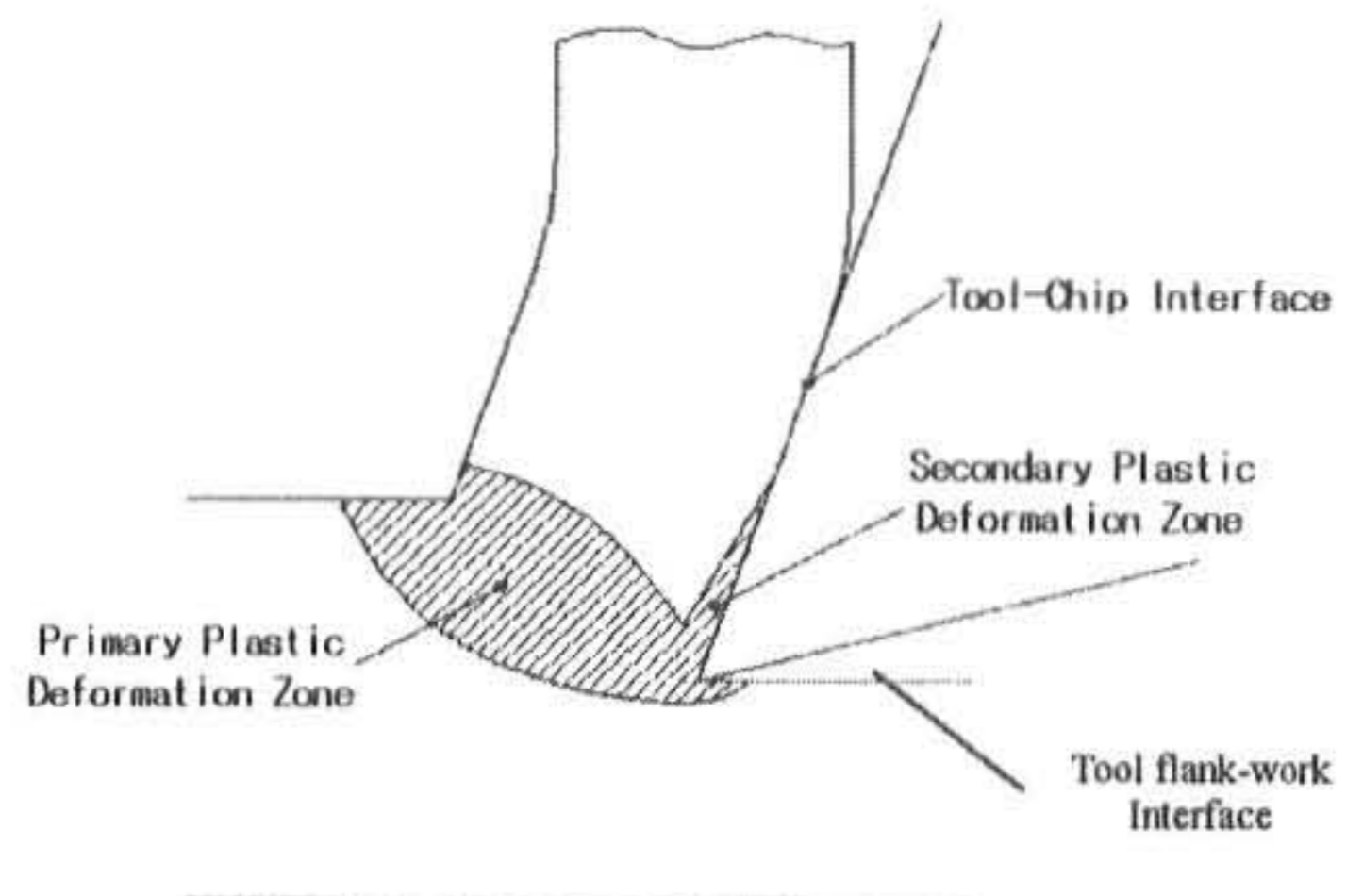


Fig. 1 Heat distribution of orthogonal cutting region

이러한 열은 칩과 함께 외부로 배출되고, 절삭유 또는 Air coolant와 함께 외부로 배출된다. 절삭열에 대하여 coolant가 없는 건식에 대한 연구는 많이 이루어져 있고, 실제의 절삭환경에 보다 접근하여 절삭유가 공급될 때에 대한 연구가 최근에 수행되었다. 그러나 실제의 절삭과정에서 다양한 절삭환경, 공구의 마모, 복잡한 coolant 조건에서 공구의 온도를 정확히 해석한다는 것은 매우 어렵다. 특히, 밀링의 절삭에서는 절삭현상이 3차원 가공일 뿐만 아니

라 단속절삭으로 더욱더 해석이 어렵게 된다.

따라서 본 연구에서는 밀링공구의 FEM을 이용한 열변형 해석을 위해서 공구를 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 그림에서 보는 것과 같이 절삭 중에 공구부분 a에서 Heat flux가 발생하여 공구가 회전하면서 대류 열전달이 발생하고 c 부분에서 스피들으로 전도가 일어난다.

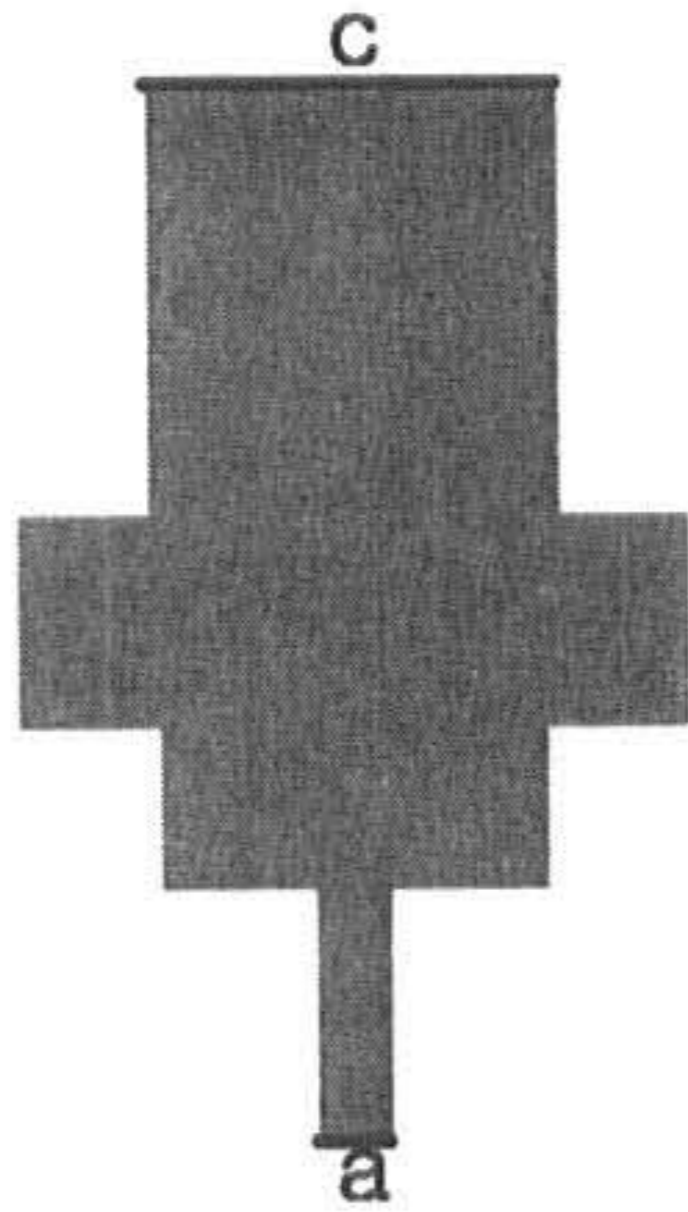


Fig. 2 The schematic modeling of a tool

이 두 부분의 정확한 온도 값을 알아야 정확한 온도분포의 예측과 열변형 예측이 가능하다. 그러나 밀링에서도 선삭과 마찬가지로 절삭 조건과 공구, 피삭재의 종류 그리고 공구마모에 따라 a 부분의 Heat flux는 다양하게 변하고 열대류도 주위의 환경에 따라 변한다. 본 연구에서는 건식 절삭중에 a 부분의 온도를 적외선 온도계로 측정하고, 또한 c부분의 온도도 측정하였다. 공구를 교환하기 전에 공구부의 온도(상온온도)를 측정하여 기준온도로 설정하고 절삭 중에 측정한 두 온도(a, c)를 이용하여 FEM으로 공구부의 변형을 예측하였다. FEM은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 온도분포 해석과 열변형 해석을 수행하였다.

절삭속도 400 (m/min)에서 Fig. 2에서 a 부분의 온도를 측정하니 80 °C를 나타내었다. Fig. 3은 방사온도계로 공구의 온도를 측정하는 모습을 나타내고 있다.

절삭 도중에 툴홀더 c부분의 온도를 측정하는 것은 곤란하므로 스피들을 고정시키고 툴홀더를 빠른 시간 내에 뽑아내어 온도를 측정하니 25 °C를 나타내었다. Ansys를 이용한 FEM

해석에서 공구의 끝부분의 경계조건을 실험에서 측정한 80 °C로 하고 툴홀더 c 부분의 경계조건을 25 °C로 설정하였다. 사용 툴홀더는 강이고 공구는 초경공구를 사용하였다. 사용한 툴홀더와 공구의 사양, 그리고 각각의 Material property를 사용하여 위와 같은 경계조건으로 ANSYS로 온도를 해석한 결과는 Fig. 4와 같다.

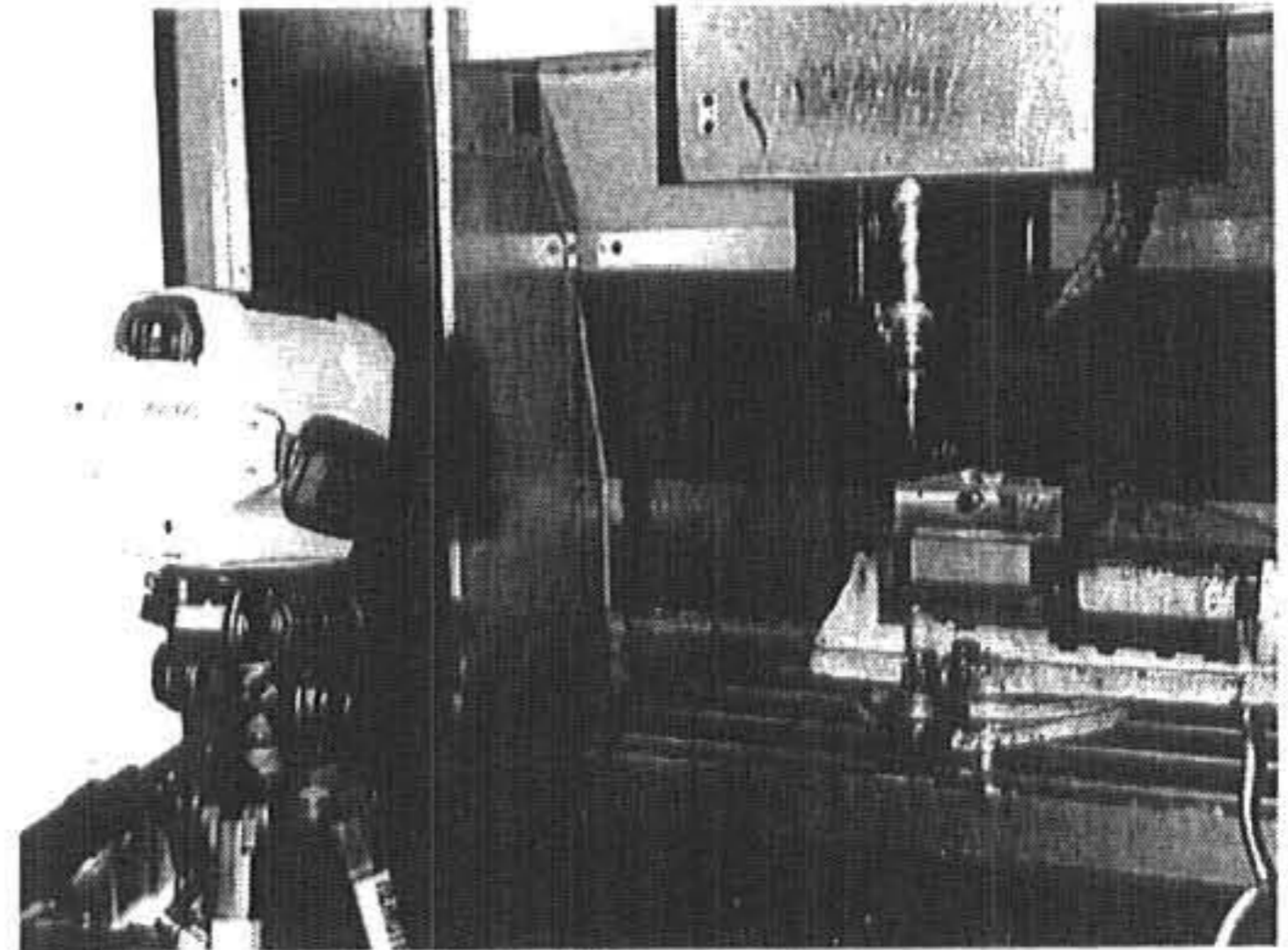


Fig. 3 Temperature measurement using spot thermometer.

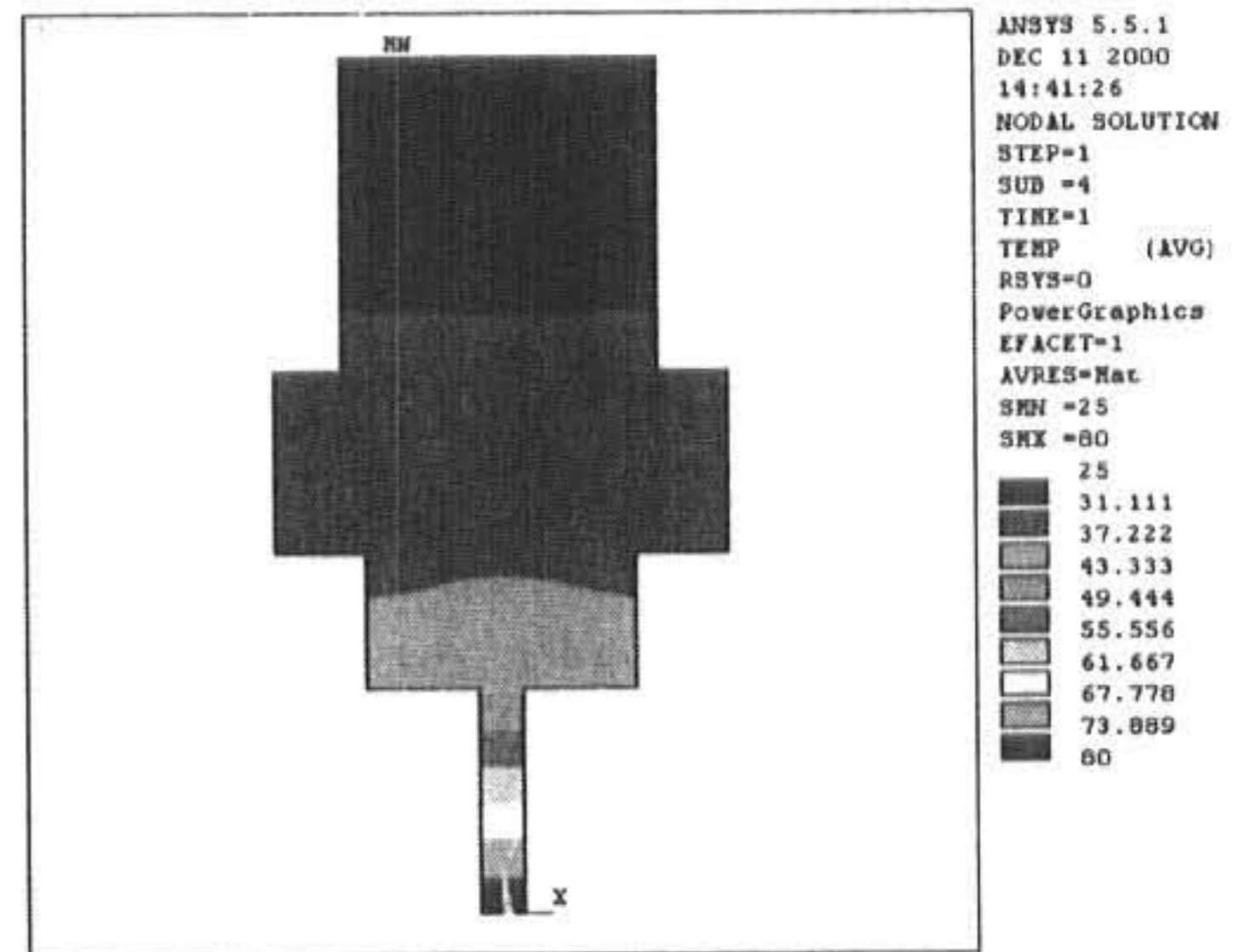


Fig. 4 The temperature distribution of the tool

Fig. 4에서 살펴보면 툴홀더에서 밀링머신과 결합되는 c부분의 온도가 25 °C이다. 그러나 공구를 교환하기 전의 온도를 측정하면 대기의 상온온도 20 °C이다. 절삭 중에 공구의 끝에서 Heat flux가 전달되고 스피들에서도 열이 전달되어 툴홀더와 공구의 온도는 상승하였다. 따라서 온도 변화에 따른 공구부의 열변형 해석을 위하여 기준위치를 Fig. 4에서 툴홀더의 끝부분

인 c 를 설정하였다. 즉 본 연구에서는 틀홀더와 공구의 변형만 관심을 두었다. 공구를 교환하기 전의 온도가 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 상온이므로 열변형 해석을 위한 기준온도를 상온인 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고 Fig. 4의 온도분포에 의한 변형을 해석하였다. 위와 같은 조건으로 Fig. 4의 열변형 해석을 하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 살펴보는 것처럼 공구교환 전과 절삭도중의 열변형에 의한 축방향 오차는 약 $25\mu\text{m}$ 로 나타났다.

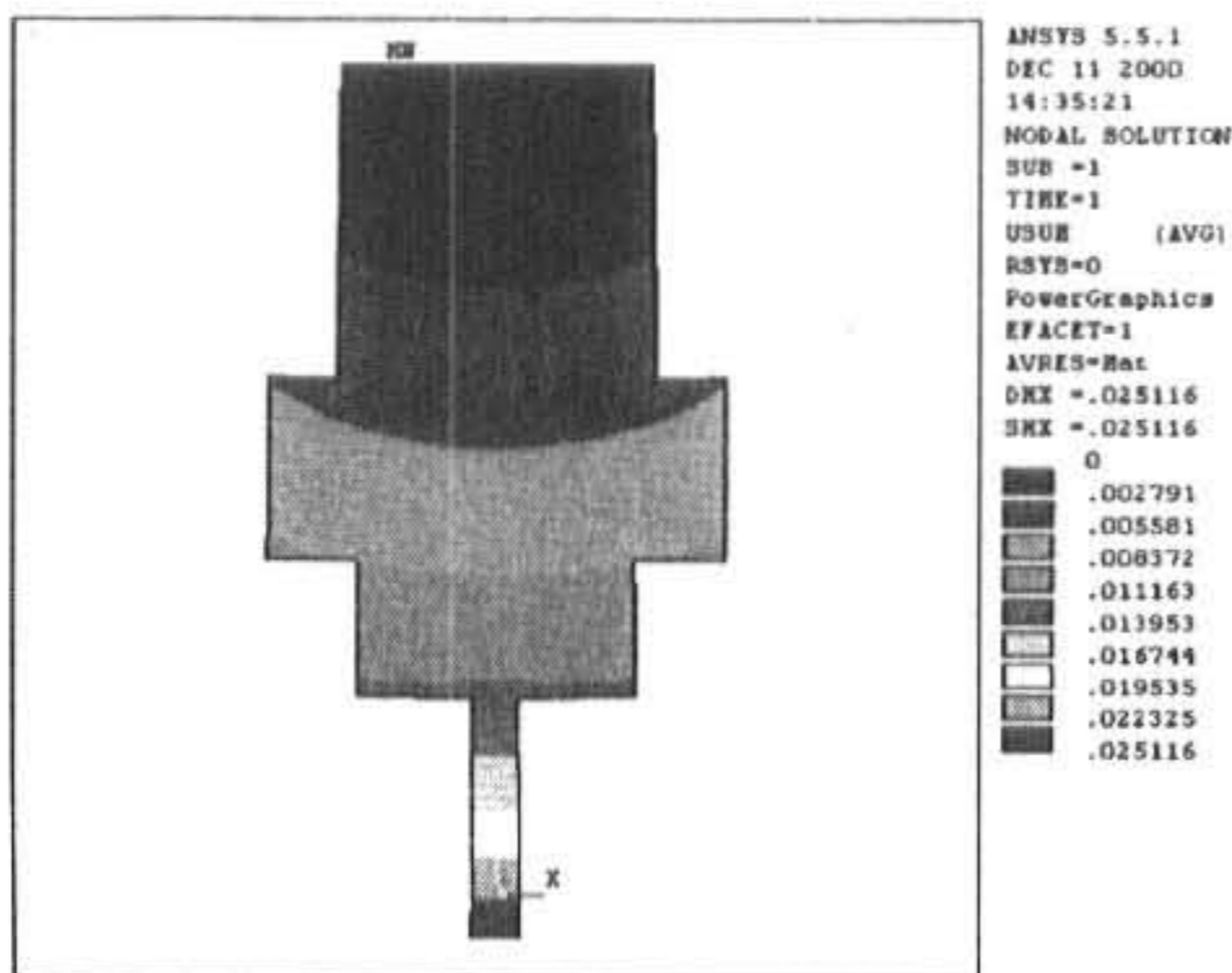


Fig. 5 The tool deflection induced by temperature

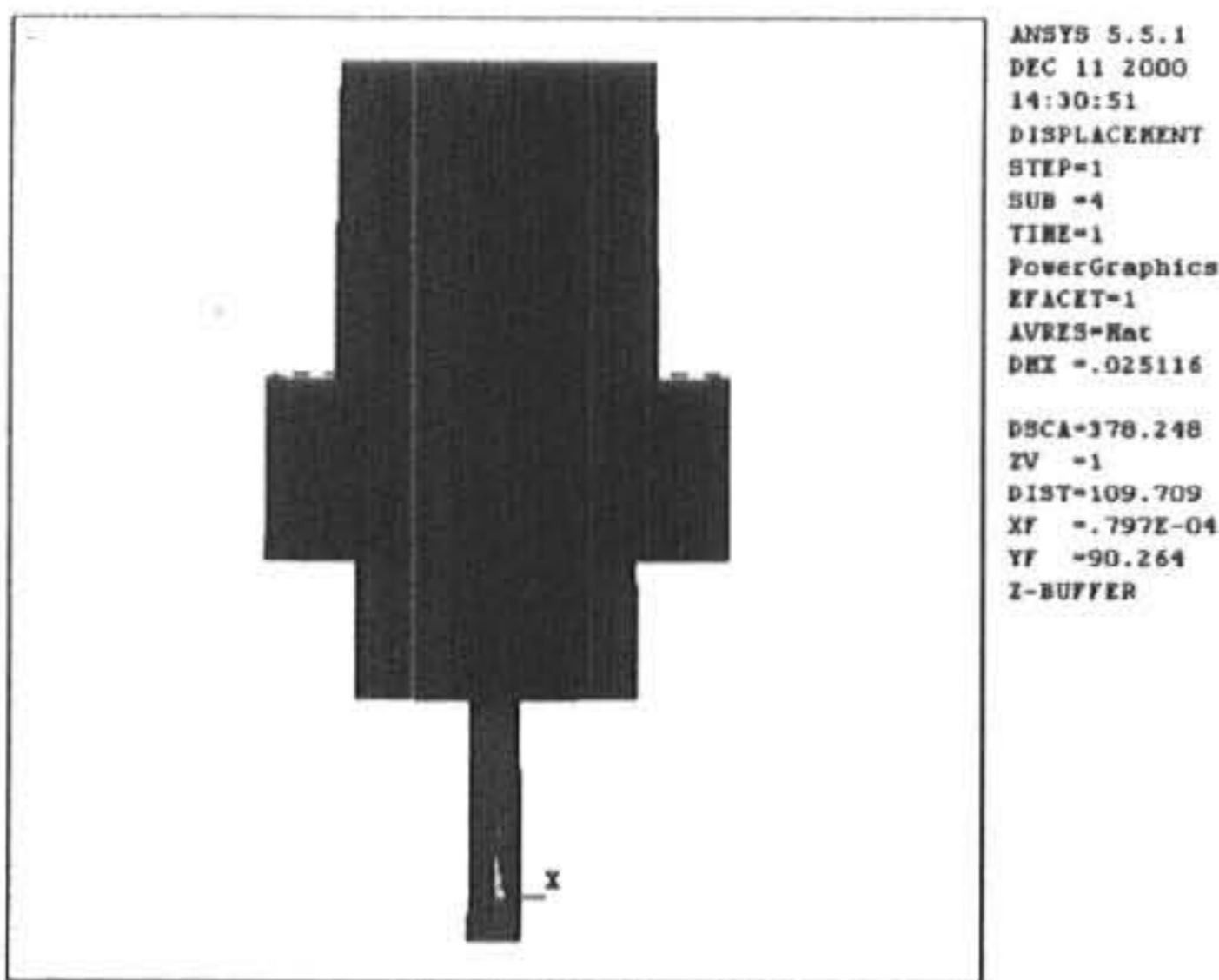


Fig. 6 The deformed and not deformed shapes of the tool

밀링머신을 오랜 시간 동안 사용하고 있는 도중에 새로운 공구교환을 위해서 틀홀더를 뽑아내고 다른 공구를 교환하게 되면 온도 분포와 열변형에 의한 오차는 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 나타날 것이다. 다시 말해 공구를 교환하고 Z 방향의 원점을 새로 설정하고 작업하게 되면

절삭도중에 틀홀더와 공구만의 열변형은 Fig. 5와 같이 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 열변형하기 전의 공구의 현상과 열변형 후의 공구의 현상을 나타내었다.

기존의 열변형에 의한 오차해석에서는 공작기계의 비틀림에 의한 오차에 관심을 두었다. 그러나 위에서 살펴본 것처럼 절삭열에 의한 공구부의 열변형도 상당히 커서 오차해석에서 고려해 주어야 한다는 것을 알 수 있다. 특히 절삭작업 중에 새로운 공구를 교환하면 공구부는 상온에서 상당히 높은 온도까지 상승하여 그 오차가 심하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법으로 공구의 온도를 측정하여 FEM해석으로 공구의 변형을 예측하여 공구의 원점을 보정하면 더욱 정밀한 절삭을 수행할 수 있다.

3. FEM(Finite Element method)에 의한 공구의 절삭력 변형 해석

절삭공구를 3차원 Solid modeling을 하여 절삭력에 의한 변형을 해석하였다. 먼저 MDT R4.0으로 모델링하고 IGS로 변환하여 ANSYS에서 파일을 읽었다. Fig. 7은 MDT에서 모델링한 그림을 나타내고 있다.

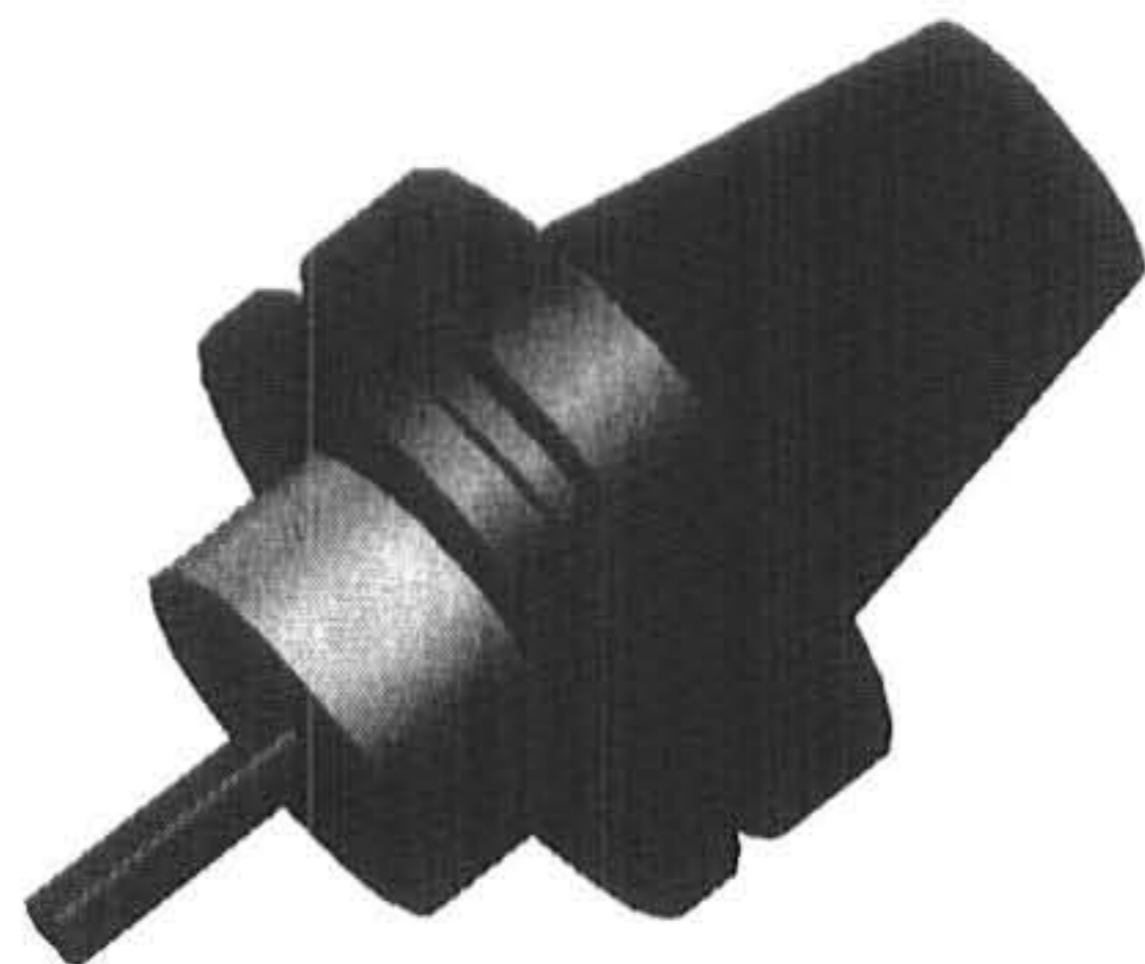


Fig. 7 The solid modeling of tool and tool holder

ANSYS에서 읽은 공구부의 3차원 데이터를 이용하여 1000 (N) 의 절삭력에 대한 공구의 변형량을 예측하였다. 틀홀더와 공작기계가 접촉하는 부분에서 변형이 없다는 경계조건을 이용하여 해석하였다.

전체적인 메시(mesh) 크기는 0.005 (mm) 로

하였고 공구 끝에 힘을 가하는 부분은 메시를 더 세밀하게 분할하여 정밀도를 높였다. Fig. 8은 절삭력 1000(N)에 대한 공구 변형의 해석결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 절삭력에 대하여 약 36(μm)의 변형이 발생하였다.

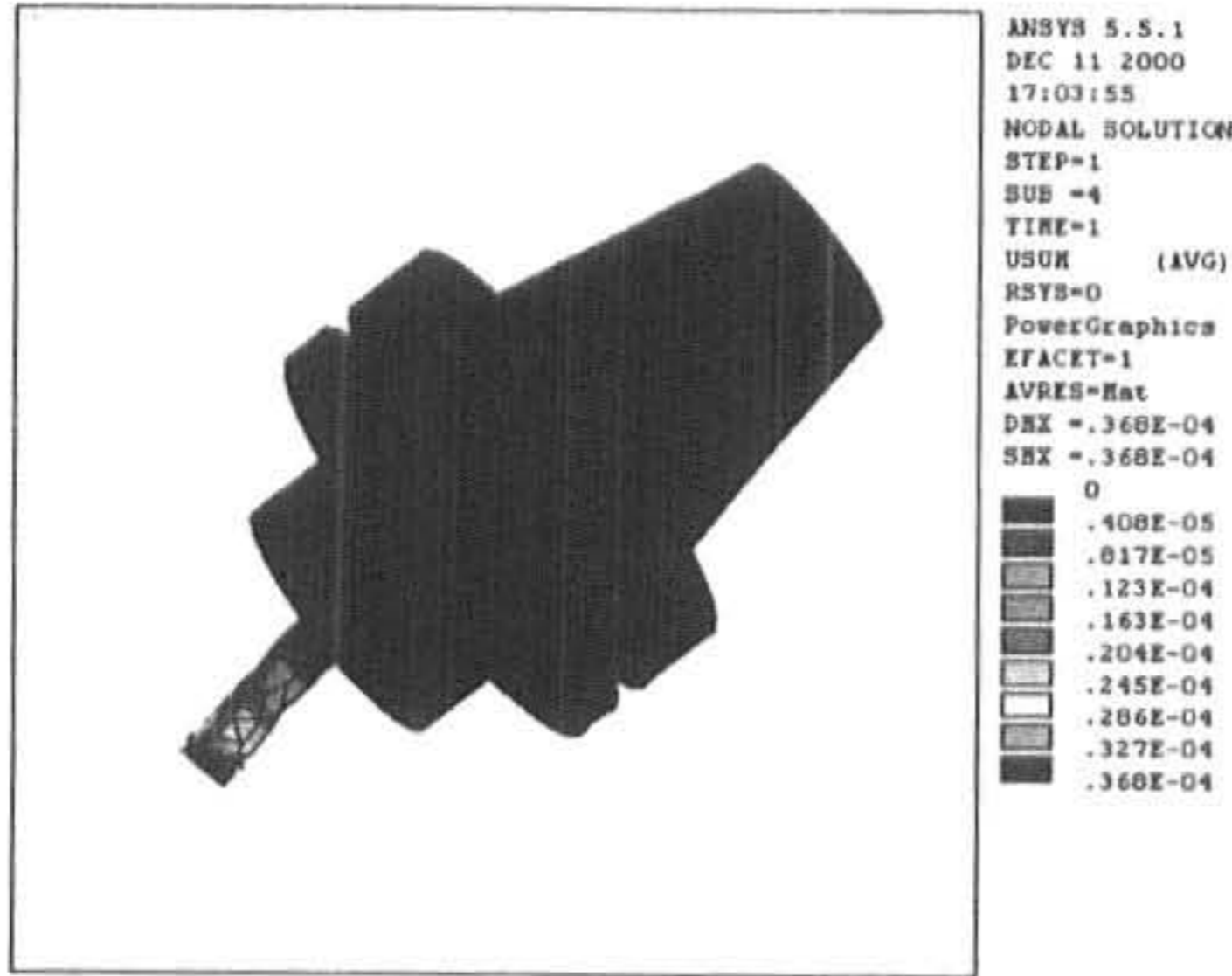


Fig. 8 The tool deflection induced by cutting force

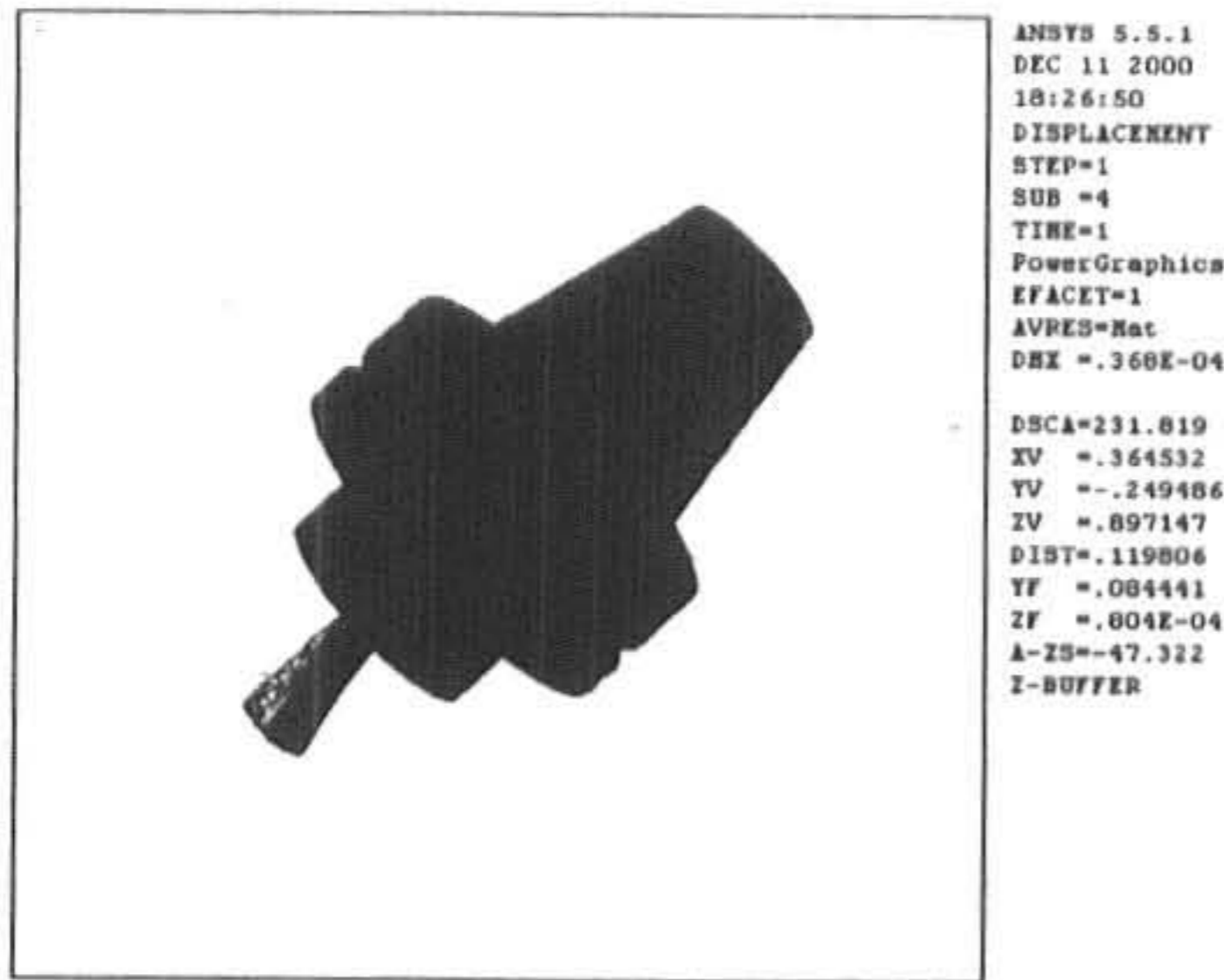


Fig. 9 The deformed and not deformed shapes of the tool

Fig. 9는 절삭력에 의한 공구의 변형전과 변형후의 그림을 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 대부분의 변형은 절삭공구에서 발생하는 것을 알 수 있다. 절삭력에 의한 공구의 처짐은 X, Y방향과 함께 Z방향으로도 발생한다는 것을 알 수 있다. CAM에서 절삭력을 예측하고 NC프로그램을 생성할 때 본 연구에서 제시한 방법으로 공구의 처짐량을 예측하여 보정된 NC데이터를

생성하면 더욱 정밀한 절삭을 수행할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 FEM을 이용하여 밀링에서 공구의 열변형에 의한 처짐과 절삭력에 의한 변형을 해석하였다. 밀링가공은 3차원 절삭이고 다양한 절삭조건 때문에 공구의 정확한 온도를 예측하기는 어렵다. 본 연구에서는 건식절삭에서 절삭중에 적외선 온도계로 공구의 끝부분과 툴홀더의 온도를 측정하여 FEM해석으로 공구부의 온도분포를 예측하였다. 예측된 온도 분포로부터 마찬가지로 FEM해석을 이용하여 공구부의 열변형량을 예측하였다. 툴홀더와 절삭공구를 솔리드 모델링하여 절삭력에 의한 공구부의 변형량을 FEM해석으로 예측하였다. 절삭력에 의한 공구의 처짐의 대부분은 절삭공구에서 발생하였다.

본 연구에서 해석하여본 결과 공구와 툴홀더에서 온도에 의한 변형량은 약 25 μm 가 발생하였고, 절삭력에 의한 공구의 처짐은 약 36 μm 였다. 온도의 변형은 주로 Z방향으로 발생하였고, 절삭력에 의한 처짐은 주로 x, y방향으로 발생하였다. 따라서 CAD/CAM에서 이러한 공구의 변형량을 예측하여 공구경로를 보정하면 더욱 정밀한 가공을 할 수 있다.

참고문헌

- 1) Sugishita, H.: Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamics and the thermal Structural Behavior, Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1. 1988.
- 2) Yang, S., Yuan, J., and Ni, j.: The Improvement of Thermal Error Modeling and Compensation on Machine tools by CMAC Neural Network, Int. J. of Machine tools and Manufacture, Vol. 36, No. 4. pp. 527-537, 1996.
- 3) Camera, A., Favarato, M., Militato, L. and D'Aprilo, F.: Analysis of the Thermal Behavior of a Machine Tool Table Using the Finite Element Method, Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 1., 1976.
- 4) Jun, N.: CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real Time Error

- Compensation, ASME J. of Manufacturing and Science and Engineering, Vol. 119, No. 11., pp. 717-725, 1997.
- 5) S. Yang, J. Yuan and J. Ni: Real-Time Cutting Force Induced Error Compensation on a Turning Center, Int. J. of Machine tools and Manufacture, Vol. 37, No. 11. pp. 1597-1610, 1997.
- 6) Donmez, M. A., Blomquist, D. S., Hocken, R. J., Liu, C. R. and Barash, M., M.,: A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation, Precision Engineering, Vol. 8 No. 4, pp. 187-196, 1986.
- 7) Chen, j. S., Yuan, J., Ni, J. and Wu, S. M.: Real Time Compensation of Time-Variant Volumetric Error on a Machining Center, ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 472-479, 1993.

(2002년 7월 19일 접수, 2002년 11월 19일 채택)