

## 절삭가공오차보상을 위한 기상측정 데이터기반 신경회로망의 응용

서태일, 박균명(한국생산기술연구원), 조명우, 윤길상(인하대학교 기계공학과)

### Application of Neural Network Based on On-Machine-Measurement Data for Machining Error Compensation

Tae-il Seo, Gyun-Myong Park(Kitech) Myeong-Woo Cho, Gil-Sang Yoon(Inha Univ.)

#### Abstract

This paper presents a methodology of machining error compensation by using Artificial Neural Network(ANN) model based on the inspection database of On-Machine-Measurement(OMM) system. First, the geometric errors of the machining center and the probing errors are significantly reduced through compensation processes. Then, we acquire machining error distributions from a specimen workpiece. In order to efficiently analyze the machining errors, we define two characteristic machining error parameters. These can be modeled by using an ANN model, which allows us to determine the machining errors in the domain of considered cutting conditions. Based on this ANN model, we try to correct the tool path in order to effectively reduce the errors by using an iterative algorithm. The iterative algorithm allows us to integrate changes of the cutting conditions according to the corrected tool path. Experimentation is carried out in order to validate the approaches proposed in this paper.

#### 1. 서론

CAD/CAM 시스템의 발전과 더불어 많은 산업현장에서 엔드밀 가공공정은 점차 그 필요성과 응용이 증가하는 추세이다. 그럼에도 불구하고 CAD/CAM 시스템에서 고려되지 않은 외란적 요인들이 실제 엔드밀 가공공정에서 발생하는 경우가 있다. 이들 요인들 중에서 본 연구는 공구의 변형에 따른 가공오차의 보상을 위한 방법론을

제시하고자 한다. 공구의 변형은 가공면의 품질과도 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 생산성과도 밀접한 관계가 있다. 공구의 변형을 극복하는 방법으로 일반적으로는 공구 이송속도를 줄이는 방법이 있는데 이 경우 생산성의 저하를 피할 수 없다. 특히 복잡한 형태의 가공을 위하여 슬랜더 형태의 길이가 긴 공구를 사용할 경우 공구의 변형은 매우 중요한 문제점으로 대두된다.

절삭가공오차의 보상을 위한 방법론으로 실시간 온라인 제어기법이 소개된 바 있다. 이는 절삭가공중에 발생하는 절삭력이 임의의 임계값을 넘지 않도록 실시간 제어를 하는 방법이다[2,8,9,13]. 다른 한편 Watanabe 와 Iwai[11,12]의 연구에서는 공구위치를 실시간 제어하여 가공오차를 감소시키는 방법을 제시한 바 있다. 또한 다른 형태의 실시간 제어기법이 소개된 바 있다[7]. 일련의 실시간 제어 방법에서는 다양한 센서류나 액츄에이터가 추가로 요구되어 가공비용이 큰 폭으로 높아지는 단점이 있다. 뿐만 아니라 절삭력이나 다른 실시간 측정데이터를 기반으로 하는 정확한 가공오차의 예측과 보상이 용이하지 않다. 이와 반대로 오프라인 형태의 접근방법이 제시된바 있는데, 이는 실제 절삭가공 이전에 가공오차의 예측과 공구의 경로를 조정하는 방법이다[3,4,5]. 이 또한 일련의 시뮬레이션 과정을 거치기 때문에 모델링 오차의 누적에 따라 정밀한 오차 보상이 용이하지 않을 뿐만 아니라, 오차보상 과정이 불필요하게 복잡해지는 단점이 있다.

Lo 와 Hsiao[6]의 연구에서는 앞서 언급한 단점들을 보완하기 위하여 측정데이터를 기반으로 한 가공오차보상 방법에 대한 연구를 소개한 바 있다. 이 연구에서는 3차원 측정기의 데이터를 기반으로 공칭공구경로를 가공오차가 허용공차를 만족할 때까지 대칭형태로 계속 수정해나가는 방법이다. 그러나 이 방법을 적용하여 특정한 형상

을 가공하기 위하여 여러 번의 가공과 측정 그리고 공구경로의 수정이 요구되는 단점이 있다. 또한 3차원 측정기 상에서 가공물의 측정이 이루어질 경우 공작물을 가공기에서 분리하여 3차원 측정기에 다시 설치하는 과정이 반복되어야 하고 이에 따라 정밀한 후가공이 불가능하다. 이는 Fig.1에서와 같이 측정과 가공의 데이터가 서로 공유되지 않고 서로 독립적인 과정으로 수행되는 기존의 방식으로 인하여 발생한다.

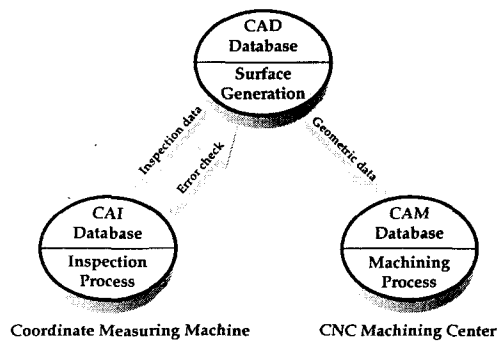


Fig.1 Conventional inspection process using CMM

기준에 널리 이용되는 측정기기인 3차원 측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)는 CNC 공작기계와는 별도의 측정공정을 수행한다. 이는 공작기계상에서 가공된 제품을 CMM상으로 이동하여야 하는데 이 경우 시간적 손실은 물론 이동에 의한 좌표계의 변동, 가공중간에 측정공정은 현실적으로 불가능하다. 결국 측정과 가공의 데이터를 공유하기 어렵게 된다.

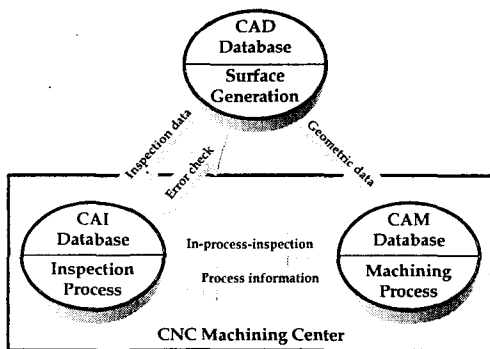


Fig.2 Improved inspection process using OMM

이러한 단점을 보완하기 위하여 현재 대두되고 있는 기상측정 시스템(OMM : On Machine Measurement system)에서는 측정 Probe를 CNC

공작기계상에 장착하여 통합된 개념의 새로운 측정공정의 전략을 수립할 수 있다. 다시 말해서 가공과 측정이 동일한 CNC 공작기계상에서 구현이 가능하여 가공과 측정의 데이터들이 유기적으로 공유가 가능하여 효율적인 가공생산공정의 구현을 가능하게 한다. 본 연구에서는 앞서 설명한 CAD/CAM/CAI 통합된 개념을 바탕으로 가공물의 표면오차를 측정한다.

본 논문의 궁극적인 목적은 CAD/CAM/CAI 통합개념의 응용으로 절삭가공오차의 보상문제를 다루는데 있다. 앞서 기존의 방법에서 언급된 단점을 보완하기 위하여 기상측정데이터를 기반으로 한 신경회로망 모델(Neural Network Model)을 이용하여 효율적인 가공오차의 예측과 반복계산 방식의 공구경로 수정 알고리즘을 이용한 보상 방법론을 제시한다. 본 연구에서 제시한 방법론을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험결과를 비교한다.

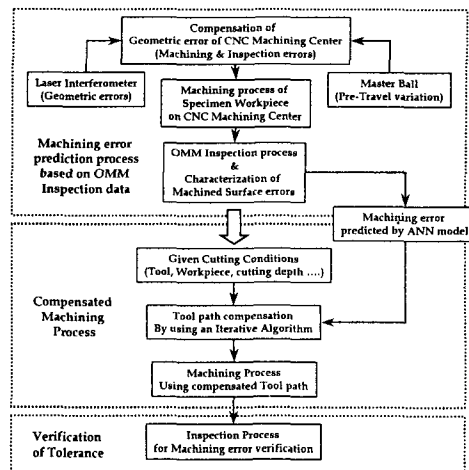


Fig.3 Global process of proposed approach

## 2. 절삭가공오차의 보상

일반적으로 절삭가공오차는 절삭면에 복잡한 형태로 분포된다. 비선형적인 형태의 절삭가공오차의 분포는 해석적인 형태의 모델링을 하기 어렵지 않기 때문에 정확한 예측이 용이하지 않다. 본 연구에서는 절삭면의 기상측정데이터를 기반으로 신경회로망 모델을 구성하여 주어진 절삭가공조건과 특성화된 가공오차와의 직접적인 관계를 도출하고자 한다. 이를 이용하여 주어진 공칭공구경로(Nominal tool path)에서 발생할 가공오차와 이를 보상할 수 있는 수정된 공구경로를 반복계산방식의 알고리즘을 이용하여 구한다. 전체적인 개요는 Fig.3과 같다. 이를 위한 구체적인

과정은 다음과 같다.

### 2.1. 공작기계의 기하학적 오차보상

일반적인 공작기계를 사용하는 기상측정은 공작기계의 정밀도가 3차원 측정기에 비하여 낮으며, 테이블의 관성 등에 의하여 측정된 결과의 신뢰도가 저하되는 단점을 가지고 있다. 이러한 정밀도에 영향을 미치는 요인으로서는 공작기계의 기하학적 오차, 열변형에 의한 오차, 동적 특성에 의한 오차, 접촉식 프로브의 오차가 복합되어 나타난다. 본 연구에서는 폐회로 구조(closed-loop configuration)[1]를 사용하여 수직형 머시닝 센터에 의한 기상측정시 발생하는 측정오차를 보정하여 측정 정밀도를 향상시키는 방법을 제시하였다. 레이저 간섭계(Laser interferometer)를 이용하여 공작기계의 정밀도를 측정한다.

기상측정에 널리 사용되는 접촉 트리거 방식 프로브의 변환기는 트리거링(triggering) 회로를 가지는데, 트리거링을 야기하는 미소변위는 프로브의 접촉방향에 따라서 변화하며, 이를 프로브 오차(probe lobbing error, pre-travel variation)라 한다. 본 연구에서는 이러한 프로브 오차를 공작기계의 기하학적 오차 모델과 결합하여 기상측정시 발생하는 측정오차를 보정한다. 이들 일련의 보상과정을 통하여 가공기의 가공 정밀도와 기상측정 정밀도를 동시에 극대화할 수 있다. 구체적인 결과는 실험부분에 나타나 있다.

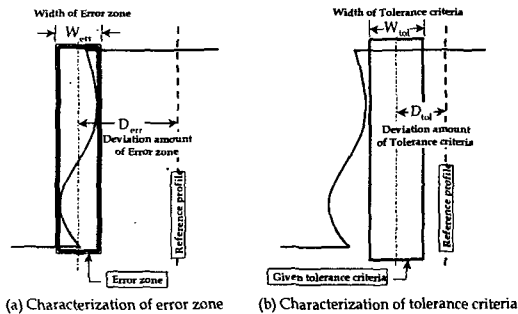


Fig.4 Characteristic parameters of machining error and tolerance

### 2.2. 절삭가공오차의 특성화

절삭가공오차의 분포는 앞서 언급한 바와 같이 비선형 형태로 분포한다. 따라서 주어진 허용공차와의 비교를 위하여 가공오차를 특성화할 필요가 있다. 본 연구에서는 절삭표면형상을 허용공차와 비교하기 위하여 특성화된 파라미터들을 정의한다. Fig.4은 이들 파라미터의 기하학적 정의를 보여준다.

를 보여준다.

첫째로 표면오차에서는 오차영역(Error zone)을 정의한다. 이는 표면의 형상과 관계없이 절삭표면전체를 모두 포함하는 최소폭의 영역을 정의한다(cf. Fig.4-(a)). 이 경우 오차영역폭(Width of error zone)  $W_{err}$ 과 오차영역편차(Deviation amount of error zone)  $D_{err}$ 를 정의할 수 있다. 이들은 표면오차의 정량적 분석과 비교를 합리적으로 수행할 수 있도록 한다. 유사한 방식으로 허용공차폭(Width of tolerance criteria)  $W_{tol}$ 과 허용공차편차(Deviation amount of error zone)  $D_{tol}$ 를 정의한다(cf. Fig.4-(b)). 이들 정의된 파라미터들은 실제 절삭표면에서 측정된 표면오차의 값들을 기반으로 결정되고, 절삭조건의 변화에 따른 파라미터 값들의 변동을 수학적 함수로 표현한다. 이를 위하여 적합한 시편의 가공이 요구된다.

### 2.3. 신경회로망을 이용한 절삭가공오차의 예측

본 연구에서는 앞서 정의된 특성화된 가공오차 파라미터  $W_{err}$ 과  $D_{err}$ 를 예측하기 위하여 우선적으로 특정한 가공조건이 연속적으로 변화하는 시편의 가공을 수행한후 기상측정을 통하여 전체 표면오차들을 측정한다. 이를 기반으로 Radial Basis 함수[10]를 이용한 신경회로망을 구현한다(참조 Fig.). 따라서 임의의 주어진 가공조건하에서 발생할 특성화된 가공오차를 미리 예측할 수 있다.

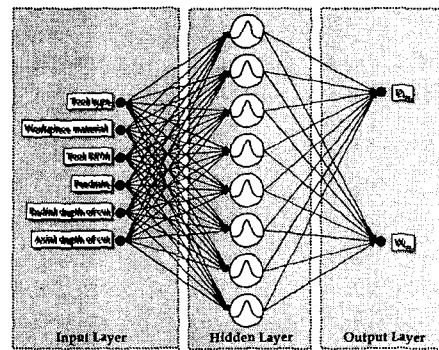


Fig.5 Artificial Neural Network model

### 2.4. 공구경로 수정법

본 연구에서는 공구의 변형에 따른 표면오차를 최대한 감소시키기 위하여 반복계산에 의하여 공구의 경로를 수정한다. 이는 공구경로 수정시 생기는 절삭가공조건의 변동을 다시 공구경로 수정에 재고려를 시킴으로써 반복계산의 형태를 갖는다. 기존의 접근방법에서는 이 반복계산에 절삭력 예측모델과 공구변형량 계산 루틴이 포함되어

매우 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 앞서 구현한 신경회로망 모델을 이용하여 공구경로수정법의 반복계산을 빠르고 정확하게 수행할 수 있도록 한다. 이 반복계산을 오차영역폭  $W_{err}$ 의 중앙이 공차폭의 중앙에 오도록 한다. 이때 오차영역폭이 공차폭보다 작을 때 허용공차 만족이 가능하다. 이는 가능한 전체 절삭조건하에서 오차폭과 공차폭을 비교함으로써 알 수 있다.

Fig.6은 공구경로 수정법을 도식화하여 보여준다. 여기서,  $TP_N$  분할된 공칭공구경로상의 공구 위치이고,  ${}^iTP_C$ 는  $i^{th}$ 번째 계산에서 수정된 공구 위치이다. 각각의  $i^{th}$ 번째 계산을 위하여, 공구의 위치가  ${}^iTP_C$ 일때의 측면절삭깊이  ${}^iR_D$ 에 대하여 구현된 신경회로망을 이용하여  ${}^iW_{err}$ 와  ${}^iD_{err}$ 의 값을 구한다. 수정된 공구위치  ${}^iTP_C$ 는  ${}^iD_{err}$  값이  $D_{tol}$ 과 일치할 때까지  ${}^iD_{err}$ 의 값만큼 계속 수정한다. 결국 임의의  $m^{th}$ 번째 계산에서  $(m^1)D_{err}$  값에 의하여 수정된 최종 공구위치  ${}^mTP_C$ 를 구할 수 있다. 이 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

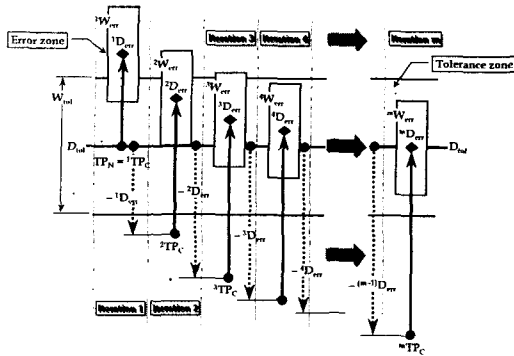


Fig.6 Iterative procedure to correct a tool position

```

 ${}^1TP_C = TP_N$ ; % Initialization of the corrected tool position  ${}^iTP_C$ 
For  $i = 1$  to  $M$  do
Begin
 ${}^iR_D = f({}^iTP_C)$ ; % Calculation of the radial depth of cut  ${}^iR_D$  with respect to  ${}^iTP_C$ 
 ${}^iW_{err} = ANN\ model({}^iR_D)$ ; % Calculation of  ${}^iW_{err}$  by the ANN model
 ${}^iD_{err} = ANN\ model({}^iR_D)$ ; % Calculation of  ${}^iD_{err}$  by the ANN model
If ( $D_{tol} - {}^iD_{err} < 0$ )
Exit of For statement;
Else
 $({}^{i+1})TP_C = D_{tol} - {}^iD_{err}$ ;
End

```

이 알고리즘을 분할된 모든 공칭공구위치에 적용하면 최종적으로 수정된 공구경로를 얻는다. 뿐만 아니라 특성화된 가공파라미터  $W_{err}$ 를  $D_{tol}$ 과 미리 비교하면 공구경로보상에 의하여 가공오차를 허용공차 이내에 존재하도록 할 수 있는지 미리 예측할 수 있다.

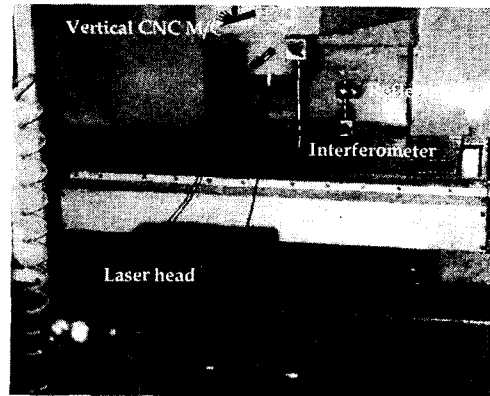


Fig.7 Measuring process of error components by using laser interferometer

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제시한 접근방법을 실험적으로 검증하기 위하여 다음의 실험을 수행하였다.

#### 3.1. 공작기계의 기하학적 오차보상

공작기계상에서 임의의 공구위치 오차와 프로브 위치오차를 구하기 위하여 각각의 기하학적 오차 성분으로 구성된  $4 \times 4$  동차변환행렬을 이용한다 [1]. 따라서 이들 오차성분이 결정되면 임의의 오차를 구할 수 있다. 본 연구에서는 수직형 공작기계(HiMac-V100, Hyundai)를 대상으로 하였고 오차성분을 구하기 위하여 레이저 간섭계(laser interferometer)를 이용하였다(참조 Fig.7). 이를 이용하여 오차맵을 구성하여 주어진 공구위치에 따른 오차값을 구하고 그만큼 보상이 가능하게 되었다.

#### 3.2. 프로빙 오차보상

앞서 언급한 프로빙 오차를 보상하기 위하여 기준구(Renishaw, 25mm-diameter)를 측정하였다. 틸트각(tilt angle)과 롤각(roll angle)을 변화시키면서 프로빙 오차를 측정하여 오차맵을 구성하였다.

따라서 CAD 데이터를 기준으로 프로브의 접근 각도에 따른 프로빙 오차를 모델링하여 임의의 접근각도에 따른 오차보상이 가능하게 되었다.

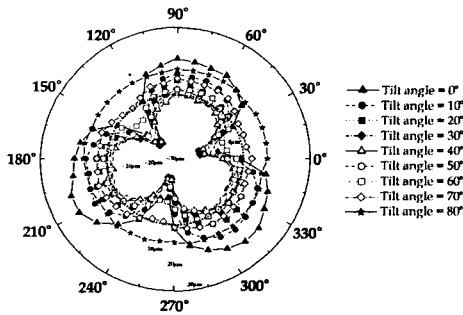


Fig.8 Pre-travel variation according to tilt and roll angles

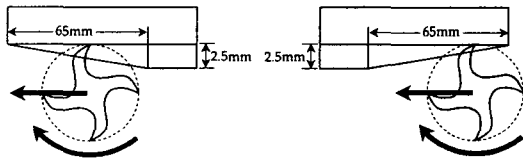


Fig.9 Machining process of specimen workpieces

Tool		Machining conditions	
Flute part $\phi$	6mm	Spindle Speed	1500rpm
Cylindrical part $\phi$	8mm	Feedrate	30mm/min
Used length	50mm	Milling mode	Down milling
Flute part length	30mm	Radial depth	0mm- 2.5mm
Flute number	4	Axial depth	6mm (fixed)
Helix angle	30	Workpiece	Mild steel

Table 1 Specifications of machining process

### 3.3. 신경회로망을 이용한 가공오차 예측

특성화된 가공오차의 파라미터 값을 구하기 위하여 특정시편의 가공을 수행하였다(참조 Fig.9). Table 1은 가공시 주어진 조건을 보여준다. Fig.9에서 나타나 있는 시편의 특징은 측면절삭깊이가 점차 증가(Up mode cutting) 혹은 감소(Down mode cutting)하는 형태로 되어있다. 이들의 절삭가공면으로부터 기상측정에 의하여 측정된 절삭가공오차분포를 통하여  $W_{err}$ 과  $D_{err}$ 의 값들을 구할 수 있다. 따라서 주어진 측면절삭깊이에 따른  $W_{err}$ 과  $D_{err}$ 의 값들의 변동을 신경회로망을 이용하여 모델링하였다. 이들 결과는 Fig.10에 나타나 있다.

### 3.4. 공구경로의 수정과 절삭가공

실험적 검증을 위하여 Fig.11에 나타나 있는 시편을 선정하였다. 직선구간과 원호구간이 복합되어 있는 형상으로 2mm의 균일한 offset이 주어져 있는데 공구경로에 따라서 측면절삭깊이의 변

동이 발생한다.

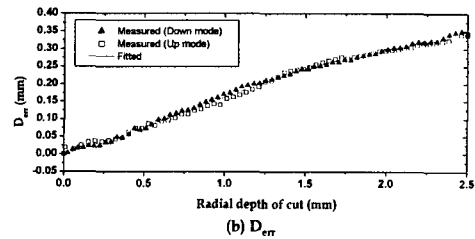
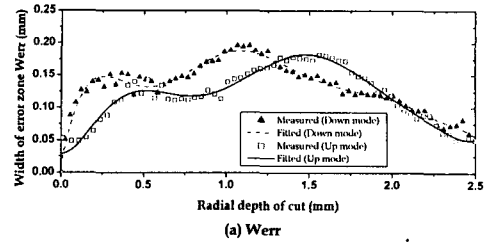


Fig.10 Characterization of  $W_{err}$  and  $D_{err}$

기상측정 데이터를 기반으로 신경회로망을 구성하여 특성화 파라미터  $W_{err}$ 과  $D_{err}$ 의 값을 구할 수 있다. 이들을 앞에서 제시한 공구경로수정 알고리즘을 적용하면 가공오차를 최소화할 수 있는 새로운 공구경로를 얻을 수 있다. 오차보상의 정량적 비교를 위하여 공칭공구경로와 수정된 공구경로를 이용하여 절삭가공을 수행하고 가공오차를 측정하여 비교하였다.

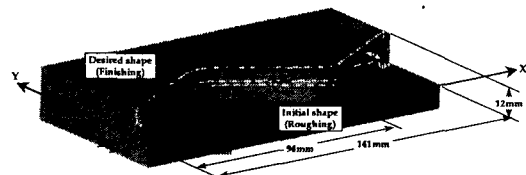


Fig.11 Desired shape of machining part

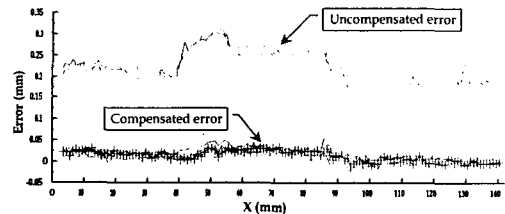


Fig.12 Machining error distributions

Fig.12는 이들의 측정결과를 보여준다. 수정된 공구경로를 이용한 가공에서 약 90%의 가공오차 감소를 실현하였다.

### 3. 결론

본 연구의 목적은 Flat-end milling을 이용한 윤곽가공에서 공구변형에 의한 표면오차를 감소시키는 공구경로생성에 있다. 이를 위하여 기존 Off-line형태의 공구경로수정 알고리즘이 요구하는 절삭력과 공구변형량의 모델링없이 단순하고 효율적인 알고리즘을 개발하였다. 이는 임의의 시편을 가공하고, 기상측정시스템을 이용하여 오차분포를 측정함으로써 절삭조건과 표면오차간의 수학적 함수관계를 유도하는데 기초를 두고 있다. 허용공차와 표면오차의 합리적인 비교분석을 위하여 각각의 폭과 떨어진 거리를 정의하고, 절삭조건 변화에 따른 이들의 거동을 신경회로망을 이용하여 모델링 하였다. 따라서 측면절삭깊이가 변화할 때의 오차분포를 미리 예측하고, 이를 이용하여 공구경로의 변화에 따른 절삭조건변동을 고려함으로써 반복계산 형태의 공구경로생성 알고리즘을 제시 할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제시된 측정데이터를 기반으로 한 공구경로수정법을 검증하기 위하여 실제절삭가공을 공칭공구경로와 수정된 공구경로를 이용하여 수행하였다. 수정된 공구경로를 이용하여 약 90%의 가공오차 감소를 실현할 수 있었다.

### References

- [1] Cho, J.H., M.W. Cho, and K. Kim, (1994), Volumetric Error Analysis of a Multi-Axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece, *International Journal of production Researches*, Vol.32, No.2, pp.345-363.
- [2] Huang, S.-J. and C.-Y. Shy, (1999), Fuzzy Logic for Constant Force Control of End Milling, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.46, No.1, pp.169-176.
- [3] Lechniak, Z., A. Werner, K. Skalski and K. Kedzior, (1998), Methodology of Off-line Software Compensation for Errors in the Machining Process on the CNC Machine Tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.76, pp.42-48.
- [4] Lim, E.M. and C.-H. Menq, (1997), Error Compensation for Sculptured Surface Productions by the Application of Control Surface Strategy Using Predicted Machining Errors, *Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.119, pp.402-409.
- [5] Lim, E.M., C.-H. Menq, and D.W. Yen, (1997), Integrated Planning for Precision Machining of Complex Surfaces-III. Compensation of Dimensional Errors, *International Journal of Machine, Tools and Manufacture*, Vol.37, No.9, pp.1313-1326.
- [6] Lo, C.C. and C.Y. Hsiao, (1998), CNC Machine Tool Interpolator with Path Compensation for Repeated Contour Machining, *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No.1, pp.55-62.
- [7] Ni, J., (1997), CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-Time Error Compensation, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.119, No.4(B), pp.717-725.
- [8] Qian, S., (1993), Automatic Feed-rate Control command generation - A step toward to intelligent CNC, *Computer in Industry*, Vol.25, pp.199-204.
- [9] Rober, S.J., Y.C. Shin and O.D.I. Nwokah, (1997), A Digital Controller for Cutting Force Control in the End Milling Process, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.119, pp.146-152.
- [10] Schalkoff, R.J., (1997), Artificial Neural Networks, McGraw-Hill Book Co, Inc.
- [11] Watanabe, T. and S. Iwai, (1983), A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.105, pp.192-199.
- [12] Yang, M.Y. and J.G. Choi, (1998), A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement, *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.120, pp.222-229.
- [13] Yang, S., J. Yuan, and J. Ni, (1997), Real-Time Cutting Force Induced Error Compensation on a Turning Center, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.37/11, pp.1597-1610.