

PNN을 이용한 기상측정데이터 기반 가공오차보상법

서태일⁺, 김건희*, 조명우⁺⁺, 홍연찬⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 4. 5, 심사완료일 2006. 4. 26)

Integrated Machining Error Compensation Method Using OMM Data and Modified PNN Algorithm

Tae-il Seo⁺, Gun-Hee Kim*, Myeong-Woo Cho⁺⁺, Yeon-Chan Hong⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents an integrated machining error compensation method based on PNN(Polynomial Neural Network) approach and inspection database of OMM(On-Machine-Measurement) system. To efficiently analyze the machining errors, two machining error parameters are defined and modeled using the PNN approach, which is used to determine machining errors for the considered cutting conditions. Experiments are carried out to validate the approaches proposed in this paper. In result, the proposed methods can be effectively implemented in a real machining situation, producing much fewer errors.

Key Words : 가공오차보상(Machining error compensation), PNN, CAD/CAM/CAI integration, OMM(On-Machine-Measurement)

1. 서론

CAD/CAM 시스템의 발전과 더불어 대부분의 산업현장에서 엔드밀을 이용한 가공공정은 일반화 되어 있다. 그럼에도 불구하고 실제 가공 시 CAD/CAM 시스템에서 고려되지 않은 방해 요인들이 발생하는 경우가 있다. 이러한 요인들 중 공구 변형에 따른 가공 오차 발생은 생산성과 더불어 가공면의 품질에 직접적인 영향을 주는 요인이다. 특히 최근

금형 산업의 추세에 비추어 볼 때 복잡한 형태의 금형 가공을 요하는 경우가 대부분이며 이를 가공하기 위하여 슬랜더 형태의 길이가 긴 공구를 사용할 경우 공구의 변형은 매우 중요한 문제점으로 대두된다.

또한, 공구의 변형을 극복하기 위하여 공구 이송속도를 줄이는 경우에는 생산성 저하를 피할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 공구의 변형에 따른 금형 가공 오차의 보상을 위한 방법론을 제시하고자 한다.

* 교신저자, 인하대학교 기계공학과 대학원 (venkey@kitech.re.kr)

주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

+ 인천대학교 기계공학과 교수

++ 인하대학교 기계공학과 교수

+++ 인천대학교 전자공학과 교수

절삭가공오차의 보상을 위한 방법론으로 실시간 온라인 제어기법이 소개된 바 있다. 이는 절삭력을 가공 전에 원하는 값으로 유도하기 어렵기 때문에 가공 도중에 발생하는 절삭력을 임의의 임계값을 넘지 않도록 실시간으로 제어하는 방법이다^(1,2). 한편 Watanabe와 Iwai⁽³⁾의 연구에서는 공구위치를 실시간으로 제어하기 함으로써 가공 오차를 줄이는 방법을 제안한 바 있다. 이와 같은 방법을 실시간으로 구현하기 위해서는 이를 측정하기 위한 각종 측정 장비(공구동력계, 센서, 증폭기 등)가 반드시 필요하며, 이는 비용상 경제적인 부담으로 직결되며, 가공 활동에 간섭이 된다. 뿐만 아니라 절삭력이나 다른 실시간 측정데이터를 기반으로 정확한 가공오차의 예측과 보상이 용이하지 않고 가공 시간이 증가되는 현상이 나타난다. 이와 반대로 오프라인 형태의 접근방법이 제시된바 있는데, 이는 실제 절삭가공 이전에 가공오차의 예측과 공구의 경로를 수정하는 방법이다⁽⁴⁻⁶⁾. 공구 경로를 수정하기 위해서는 밀링 가공의 절삭력을 예측하기 위한 모델을 수립하고 공구 변형량 계산과 가공 표면의 오차를 예측하기 위한 연속적인 시뮬레이션 과정을 거쳐야 한다. 이 경우 모델링 오차의 누적에 따른 정밀한 오차 보상이 용이하지 않고 보상 과정이 불필요하게 복잡해지는 단점이 있다.

Lo와 Hsiao는 앞서 언급된 방법들의 단점을 보완하기 위하여 측정데이터를 기반으로 한 가공오차보상 방법에 대한 연구를 제안하였다⁽¹⁾. 이 연구에서는 CMM(Coordinate Measurement Machine)의 측정 데이터를 기반으로 공칭공구경로를 가공오차가 허용공차를 만족할 때까지 대칭형태로 계속 수정해나가는 방법이다. 그러나 이 방법을 적용하여 특정한 형상을 가공하기 위하여 여러 번의 가공과 측정 그리고 공구경로의 수정이 요구되는 단점이 있다. 또한 측정을 위한 공작물 이동에 의한 좌표축 변경 따른 오차 발생으로 정밀한 후가공이 불가능하다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근 OMM system의 도입이 새로운 측정 공정으로 관심을 모으고 있다. OMM system은 기존의 CMM과 달리 가공이 수행된 공작기계상에서 절삭 공구 대신에 측정 프로브를 장착함으로써 시간적 절약과 좌표계 변동에 따른 오차 발생 요인 제거, 가공 중 측정 수행 등의 효과를 얻을 수 있다. 또한, 가공과 측정 데이터들이 유기적으로 공유가 가능하여 효율적인 생산 공정 구현이 가능하다.

본 연구에서는 절삭가공오차의 보상을 위한 불필요한 반복 공정 소요를 줄이고 고가의 가공, 측정 비용의 소요없이 가공 오차를 현저하게 감소시킬 수 있는 방법으로 OMM

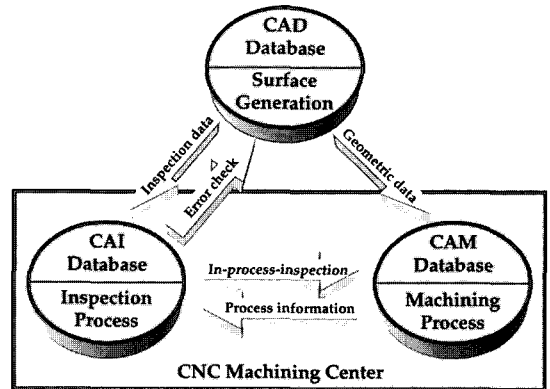


Fig. 1 OMM inspection data feedback for machining error compensation

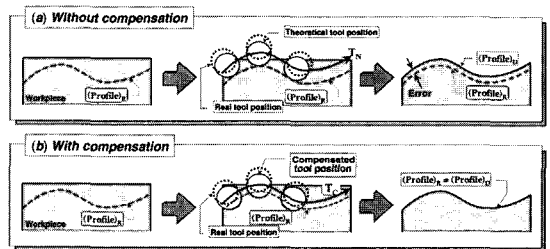


Fig. 2 Basic concept for the proposed machining error compensation

system 데이터와 수정된 PNN 알고리즘에 기초를 둔 효율적인 가공 오차 보상 방법에 대하여 제안하고자 한다. 제안된 방법에서는 OMM system의 측정 데이터를 활용하여 PNN 알고리즘을 학습시키고 이를 공구 변형량에 따른 가공 오차를 최소화 할 수 있는 수정된 공구 경로를 반복 계산에 이용하였다. 이를 증명하기 위한 실험을 수행하였으며 실험 결과를 통하여 제안된 방법론의 효율성을 입증하였다. Fig. 1은 OMM system의 기본적인 개념을 나타낸 것이며, Fig. 2는 본 연구에서 제안된 방법론의 기본적인 개념을 나타낸 것이다.

2. 절삭가공오차의 보상

일반적으로 가공 중 발생한 다양한 오차들이 가공면에 복합적인 형태로 존재한다. 이러한 오차들의 비선형적인 형태로 인해 절삭가공오차들의 분포를 해석적인 모델로 만들기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 정밀하고 효율적인 절삭가공오

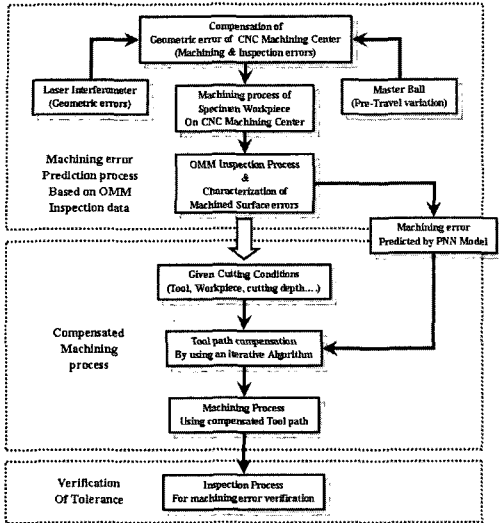


Fig. 3 A schematic diagram of the proposed method

차 보상을 위하여 오차들의 분포를 2개의 특징적인 가공 오차 파라미터를 정의함으로써 효율적으로 예측하고자 하였다. 이 파라미터를 정의하기 위하여 먼저 OMM system의 측정 데이터를 활용하여 PNN 알고리즘을 학습시킨 후 이를 통하여 공구 변형에 의한 오차를 최소화하는 수정된 공구 경로를 산출한다. 정확한 측정 데이터 획득을 위하여 OMM system이 적용되는 공작기계의 기하학적 오차와 프로빙 오차를 보정하는 과정을 수행하였다. 또한, 기존의 PNN 알고리즘을 절삭가공오차 보상에 적용하였을 경우 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 수정된 PNN 알고리즘을 적용하였다. Fig. 3은 제안된 방법론의 프로세스의 다이어그램을 나타낸 것이다.

2.1 절삭가공오차의 특성화

일반적으로 밀링 가공 시 동일한 가공 조건 하에서도 회전하는 공구의 절삭날 위치에 따라 절삭력이 변화한다. 따라서, 공구 변형량도 공구의 회전 위치에 따라 변화함으로써 가공 곡면 상의 오차들도 일정하지 않다. 이러한 가공 오차의 분포 형태의 비선형적 특징 때문에 주어진 허용 공차와 비교하기 위하여 가공오차를 특성화할 필요가 있다. 본 논문에서 제안된 방법에서는 주어진 허용 공차와 절삭가공오차를 비교하기 위하여 특성화된 가공 오차 파라미터들을 정의한다. 이를 위하여 먼저 가공 오차의 분포를 정량적으로 분석하기 위하여 공구 변형량의 의해 발생한 언더컷(under-cut)이나 오버컷

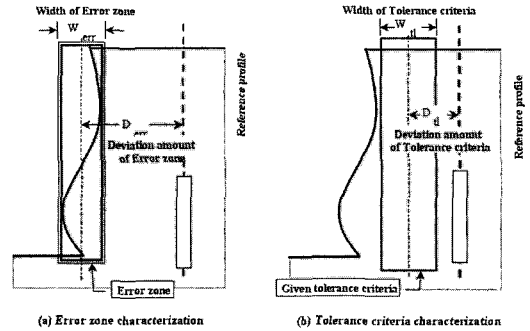


Fig. 4 Characteristic parameters of surface error and tolerance

(over-cut)에 의해 발생한 최대 오차(E_{max})와 최소 오차(E_{min})을 정의한다. 이 파라미터들을 기본으로 Fig. 4와 같이 오차 영역(Error zone)을 정한다. 이는 표면의 형상과 관계없이 절삭표면 전체를 포함하는 최소폭의 영역을 의미한다. 이 경우 오차영역폭(Width of error zone, W_{err})과 오차 영역편차(Deviation amount of error zone, D_{err})을 정의할 수 있다(cf. Fig. 4 (a)). 이 2개의 파라미터들은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$W_{err} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}, D_{err} = E_{min} + \frac{W_{err}}{2} \quad (1)$$

이들은 표면오차의 정량적 분석과 비교를 합리적으로 수행할 수 있도록 한다. 유사한 방식으로 허용공차폭(Width of tolerance criteria, W_t)과 허용공차편차(Deviation amount of error zone, D_t)을 정의한다(cf. Fig. 4 (b)). 이 파라미터들은 실제 절삭 표면에서 측정된 표면오차의 값들을 기반으로 결정되고, 절삭조건에 따른 파라미터 값들의 변동을 수학적 함수로 표현한다. 이를 확인하기 위하여 적합한 시편의 가공이 요구된다.

2.2 공구 경로 수정법

기존의 오프라인 방식의 방법에는 반복계산 시 절삭력 예측모델과 공구변형량 계산 루틴이 포함되어 매우 비효율적이다. 본 논문에서 제안된 절삭가공오차를 최소화하는 공구 경로 수정법은 앞서 정의한 특성화된 가공오차 파라미터를 허용공차와 비교, 분석하여 반복계산에 의하여 공구 경로를 수정한다. 즉, 공구 경로 수정 시 생기는 절삭가공조건에 따른 변동을 공구경로 수정에 재고려 시키는 반복계산의 형태로서

실제로 설계 형상이 변경되더라도 반복적인 가공이나 측정 공정이 소요되지 않는다. 또한 신경회로망 모델을 이용하여 공구경로 수정법의 반복계산을 빠르고 정확하게 수행할 수 있도록 구현되어 있다.

반복계산 시 오차 영역폭 W_{err} 의 중심이 공차폭의 중심과 일치되도록 한다. 이때 오차영역폭이 공차폭보다 작을 때 허용공차 만족이 가능하다. 이를 위하여 CAM system으로부터 획득한 공칭공구경로를 CL-point 단위로 절삭 추이에 따른 깊이를 고려하여 나누고, 이때 각 공구위치마다 이 프로세스가 수행된다. Fig. 5는 본 연구에서 제안한 공구경로 수정법을 도식화 한 것이다. 여기서, iTP_N 은 공칭공구경로 상의 공구위치이고, iTP_C 는 i^{th} 계산에서 수정된 공구위치이다. 각각의 i^{th} 계산을 위하여 공구의 위치가 iTP_C 일 때의 절입량 iR_D 에 대하여 구현된 신경회로망을 이용하여 ${}^iW_{err}$ 와 ${}^iD_{err}$ 를 구한다. 수정된 공구위치 iTP_C 는 ${}^iD_{err}$ 값이 D_{tol} 과 일치할 때까지 ${}^iD_{err}$ 의 값만큼 계속 수정된다. 이러한 반복계산을 통하여 수정된 공구위치가 산출되고 모든 공구위

치에서 이 과정이 수행됨으로써 최종적으로 수정된 공구경로가 생성된다.

2.3 수정된 PNN 알고리즘

공구변형량과 가공오차와의 관계는 비선형적인 형태로 단순하게 정의되는 것이 불가능하다. 이러한 비선형적인 관계의 체계적인 규명을 하기 위한 알고리즘으로서 GMDH(Group Method of Data Handling)이라고 할 수 있는 PNN이 있다. 이는 다층 구조의 퍼셉트론(Perceptron) 형태의 인공지능 네트워크라고 할 수 있다. 본 연구에서는 특성화된 가공오차 파라미터와 가공조건 사이의 비선형적인 관계를 규명하기 위하여 PNN 접근법을 이용하였다.

일반적인 PNN 알고리즘에서 예측된 결과값은 각 노드(Node)의 임계값(Threshold)과 비교된다. 이때 예측된 결과값은 임계값보다 작을 경우에만 선택이 된다. 그러나 이러한 경우 요구되는 출력값과 더 근접해지기 위해서는 출력값의 반복수정공정이 증가하는 현상이 발생할 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 예측값의 비교, 분석 단계가 증가할수록 임계값을 적절히 변화시켜 반복 과정을 감소시키는 수정된 PNN 알고리즘을 적용하였다⁽⁷⁾. 즉, 이 알고리즘에서 임계값의 변화조건은 각 단계에서 계산되는 반복계산량을 증가시키지 않아야 한다.

$$R_s = RMIN_s + \delta \quad (2)$$

위 식에서 δ 는 상황에 맞게 사전에 정의된 값이다. 본 연구에서는 수정된 PNN 알고리즘을 적용하기 위하여 절삭조건(절입량, 절삭깊이, 이송속도)과 W_{err} , D_{err} 의 관계를 입력과 출력 관계로 수립하고 이를 OMM system의 측정 데이터를 기본으로 학습과정을 수행하였다. 결과적으로 수정된 PNN을 통하여 주어진 가공조건에 따라 W_{err} 과 D_{err} 이 계산되고, 수정된 공구 경로가 산출된다.

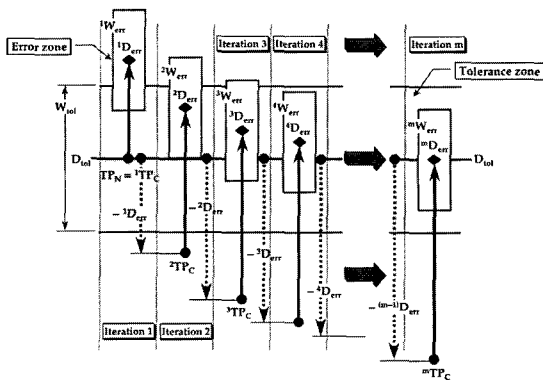


Fig. 5 Iterative procedures for tool position correction

```

 ${}^iTP_C = TP_N$ ; % 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  ${}^iTP_C$ 
 ${}^iW_{err} = PNN\ model({}^iR_D)$ ; % Calculation of  ${}^iW_{err}$  by the PNN model
 ${}^iD_{err} = PNN\ model({}^iR_D)$ ; % Calculation of  ${}^iD_{err}$  by the PNN model
  If  $(D_{tol} - {}^iD_{err} \approx 0)$ 
    Exit of "For statement";
  Else
 ${}^{(i+1)}TP_C = D_{tol} - {}^iD_{err}$ ;
  End

```

Fig. 6 Summarized algorithm

3. 실험결과 및 고찰

3.1 OMM system의 오차보정

OMM system은 가공이 수행된 공작기계 상에서 측정공정을 수행한다. 따라서, CAD/CAM/CAI의 데이터베이스를 동시에 고려하여 측정 데이터베이스를 구축함으로써 효율적인 가공, 측정 공정을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 보다 정밀한 OMM system의 측정데이터를 획득하기 위하여 OMM system 자체 오차에 대한 보정을 수행하였다. OMM

system은 공작기계 상에서 측정 프로브를 이용하는 것이기 때문에 정밀도는 공작기계의 기하적 오차와 접촉식 프로브의 구조적 특징에 따른 오차에 의해 좌우된다.

먼저 3축 수직형 공작기계의 기하학적 오차를 측정하기 위하여 레이저 간섭계(Laser interferometer)를 이용하여 측정된 오차요소들을 기초로 동차변환행렬을 결정하였고, 절삭공구나 측정에 사용되는 프로브의 위치 데이터가 주어졌을 때 이를 이용하여 위치를 보정하였다. 또한, 측정 프로브 자체의 오차를 보정하기 위하여 기준구(Renishaw, $\Phi 25\text{mm}$)를 틸트각(Tilt angle)과 롤각(Roll angle)을 변화시키며 프로빙 오차를 측정하여 오차맵을 구성하였다. 따라서 CAD 데이터를 기준으로 프로브의 접근 각도에 E라는 프로빙 오차를 모델링하여 임의의 접근각도에 따른 오차보상을 가능하게 하였다.

3.2 절삭가공오차의 예측

앞서 공작기계와 프로브의 기하학적 오차를 보정함으로써 가공과 측정 오차는 현저하게 감소한다. 따라서 공구 변형과 공구의 런아웃(Run-out)의 영향이 가공오차를 발생시키는 주요 요인이 된다. 먼저 2개의 공작물을 Fig. 7에 나타난 바와 같이 가공을 수행한 후 W_{err} 과 D_{err} 의 변화 양상을 확인한다. 사용된 공구와 가공 조건은 Table 1에 나타난 것과 같다. 이때 절삭가공오차는 OMM system을 이용하여 측정을 한 후 W_{err} 과 D_{err} 를 결정함으로써 각 측정점 위치마

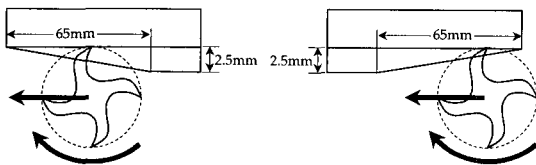


Fig. 7 Machining process of specimen workpiece

Table 1 Specifications of machining process

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

다 W_{err} 과 D_{err} 에 대응되는 공구의 절입량을 분석할 수 있다. 이러한 데이터를 이용하여 수정된 PNN 알고리즘을 학습시키고 절삭오차를 예측한다. Fig. 8은 그 결과를 나타낸 것이다.

3.3 실험결과

본 논문에서 제안된 공구경로수정 방법의 효율성을 검증하기 위하여 Fig. 9에 나타나 있는 직선구간과 원호구간이 복합되어 있는 형상으로 2mm의 균일한 offset이 주어지는데 공구경로에 따라서 측면절삭깊이의 변동이 발생한다.

OMM system 측정데이터를 기반으로 PNN 알고리즘을 구성하여 특성화 파라미터 W_{err} 과 D_{err} 의 값을 구할 수 있다. 이들을 앞에서 제시한 공구경로수정 방법에 적용하면 가공오차를 최소화할 수 있는 새로운 공구경로를 얻을 수 있다. 오차보상의 정량적 비교를 위하여 공칭공구경로와 수정된 공구경로를 이용하여 절삭가공을 수행하고 가공오차를 측정하여 비교하였다. Fig. 10은 이들의 측정 결과를 보여주는 것이며 약 90%의 가공오차감소 효과를 얻을 수 있었다.

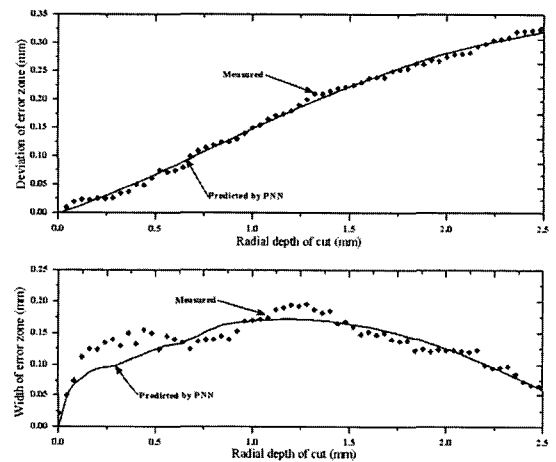


Fig. 8 Characterization of W_{err} and D_{err}

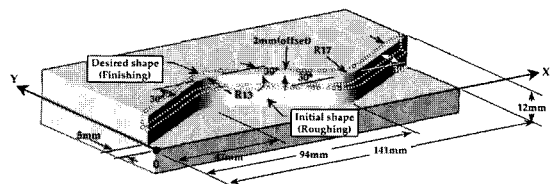


Fig. 9 Desired shape of machining part

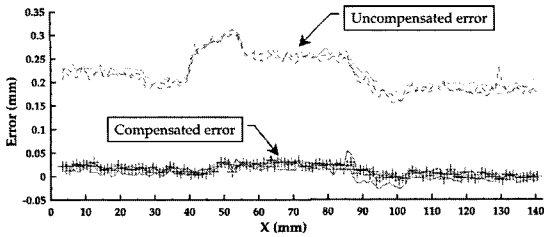


Fig. 10 Compensated machining error distributions

4. 결론

본 연구의 목적은 OMM system의 측정데이터를 활용하여 학습된 PNN 모델을 기초로 평 앤드밀링 공정 시 효율적인 절삭가공오차 보상 프로세스를 구현하는 것이다. 수정된 PNN 모델을 이용하여 임의의 가공조건에 대한 가공오차의 직접적인 관계를 규명하였고, 오차를 감소시키기 위한 공구 경로수정을 위하여 공구 위치를 반복계산하는 프로세스를 적용하였다. 제안된 방법을 검증하기 위한 실험결과로부터 제안된 방법을 이용하여 수정된 공구경로를 적용할 경우 보상전 공구 경로에 비해 약 90%의 오차가 감소됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Lo, C. C. and Hsiao, C. Y., 1998, "CNC Machine Tool Interpolator with Path Compensation for Repeated Contour Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 55~62.
- (2) Qian, S., 1993, "Automatic Feed-rate Control command generation-A step toward to intelligent CNC," *Computer in Industry*, Vol. 25, pp. 199~204.
- (3) Watanabe, T. and Iwai, S., 1983, "A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling," *Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 222~229.
- (4) Lechniak, Z., Werner, A., Skalski, K. and Kedzior, K. 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, No. 1, pp. 42~48.
- (5) Lim, E. M. and Menq, C. H., 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.
- (6) Lim, E. M., Menq, C. H. and Yen, D. W., 1997, "Integrated Planning for Precision Machining of Complex Surface-III: Compensation of Dimensional Errors," *International Journal of Machine, Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 9, pp. 1313~1326.
- (7) Hong, Y. C. and Ohm, S. S., 1998, "Modeling of Nonlinear Dynamic Systems Using a Modified GMDH Algorithm," *Journal of Korea Fuzzy and Intelligent System Society*, Vol. 8, No. 3, pp. 50~55.