

◆특집◆ 기상측정

기상측정방법에 의한 가공과 측정공정의 통합

조명우*, 서태일**

Integration of Machining and Measuring Processes Using OMM Technology

Myeong-Woo Cho* and Tae-II Seo**

Key Words: OMM(On-Machine Measurement), CAI(Computer-Aided Inspection), CAM(Computer-Aided Manufacturing), Integration, Inspection Planning, Tool Path Compensation, Neural Network

1. 서론

기상측정(OMM: On-Machine Measurement)은 CNC 공작기계에서 공구 대신에 접촉식 또는 비접촉식 측정장치를 부착하여 공작기계를 측정기로 사용할 수 있는 방법으로, 최근에 많은 연구가 진행되고 있다^[20,22,23]. OMM 은 3 차원측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine)와 측정방법이 유사하나, 공작기계의 정밀도가 CMM 에 비하여 낮기 때문에 측정결과에 대한 신뢰도는 떨어진다고 할 수 있다. 그러나, 현재 공작기계의 기하학적 오차 및 열변형 오차의 보상을 통하여 이의 정밀도를 높이는 방법이 꾸준히 연구되고 있으며^[1,22], 사용 가능한 측정장치 또한 다양한 종류의 것들이 시도되고 있어 CMM 정도는 아니지만 상당히 정밀도를 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 근본적으로 OMM 은 CMM 에 의한 측정방법과는 달리 공작물을 이동하지 않고 측정작업을 수행할 수 있다는 장점이 있어, 가공 중에 있는 공작물의 형상오차를 판별하여 후속가공을 계속 진행할 것인지, 또는 공구경로 및 절삭조건에 수정에 대한 필요성은

없는지 등에 대한 판단을 할 수 있다. 따라서, 비록 측정정밀도는 CMM 에 비하여 좋지 않다고 하여도 현대의 가공공정을 구성하고 있는 중요한 근간인 CAD/CAM/CAI 의 통합에 대한 기술개발 방향을 제시할 수 있고, 이를 기반으로 자율가공시스템의 개발이 가능하다는 면에서 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 CAD/CAM, CAD/CAI 통합 외에 OMM 에서 가능한 가공 데이터와 측정 데이터의 통합을 이루기 위한 CAM/CAI 통합 방법을 설명하였다. 먼저, 가공면의 형상정보에 기초하여 OMM 에 적절한 측정계획을 수립하는 방법을 소개하였으며, 다음으로는 절삭력에 의해 야기되는 공구의 변형에 의한 가공오차를 감소시키기 위하여 OMM 데이터와 신경회로망을 적용하여 반복적으로 공구경로를 수정하는 방법을 소개하였다.

이러한 방법을 기반으로 모든 생산데이터가 통합적으로 운용되는 CAD/CAM/CAI 의 통합이 가능하게 되어 유연한 생산시스템 운용이 가능하게 될 것으로 사료된다.

2. CMM 과 OMM 의 측정방법 비교

CMM 과 OMM 은 가공이 완료된 공작물에 대한 형상정밀도 측정에서는 유사한 방법으로 측정작업을 수행할 수 있으나, 공정 중에 있는 공작물을 측정대상으로 하였을 경우에는 사용되는 기기의 목적과 기능이 서로 다르기 때문에 측정방식도

* 인하대학교 기계공학부

** 한국생산기술연구원

Tel. 032-860-7306, Fax. 032-868-1716

Email chomwnet@inha.ac.kr

생산시스템 특히, CAD/CAM/CAI 통합에 의한 자율가공시스템의 개발과 Metrology, Reverse Engineering, Process Monitoring 분야에 주로 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

달라져야 한다. 따라서, 다음과 같이 두 기기의 측정방식의 차이점을 비교하였다.

2.1 CMM 에 의한 측정

CMM 에 의한 측정의 주목적은 공작기계에서 가공이 완료된 공작물의 최종형상에 대한 정밀도 판정에 있으며, Fig.1 은 CMM 을 이용하여 가공물의 정밀도 측정을 하는 방법에 대한 개요를 나타내고 있다. 먼저 CAD/CAM 에 의하여 요구되는 형상을 가공하고, 가공이 완료된 공작물을 CMM 으로 이동하여 형상정밀도를 측정하며, CAD/CAI 통합에 의하여 수립된 측정계획에 의하여 측정된 결과를 CAD 데이터와 비교하여 오차를 판별한다. 이 방법은 CMM 자체가 높은 정밀도를 가지고 있기 때문에 가공물의 최종 정밀도 판정결과에 대한 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 가공공정과 측정 공정 사이의 통합은 이루어지지 않기 때문에 가공 중에 있는 공작물의 형상정밀도를 측정하여 후속 작업을 결정하는 등의 기능은 수행할 수 없다.

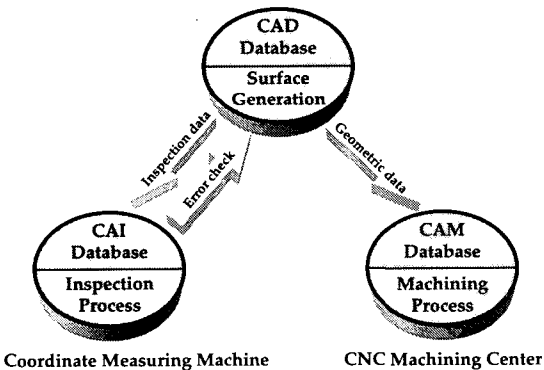


Fig. 1 Inspection procedure using CMM

또한, CMM 에서 공작물의 형상오차측정을 위해서 등간격으로 측정점을 배열하는 방법이 일반적으로 사용되나, 공작기계에서 공작물은 황삭공정에서 정삭공정까지 여러 단계의 과정을 통하여 완성되며, 이 때마다 공구의 종류 및 가공경로등에 의해 공구의 이동흔적(cusp)이 가공표면에 남게 된다. 따라서, 이러한 상황에 대한 정확한 고찰이 없이 종래의 방법으로 측정하였을 때에는 측정점이 cusp 의 끝부분이나 밑부분 등 일정하지 않은 곳에 위치할 가능성이 있기 때문에 이에 의한 측

정오차가 발생할 가능성이 크다^[23].

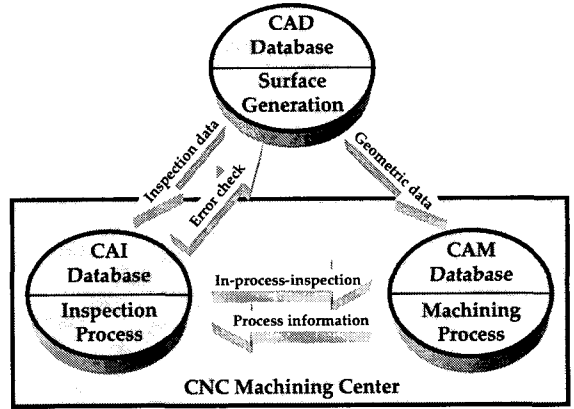


Fig. 2 Inspection procedure using OMM based on CAD/CAM/CAI integration

2.2 OMM 에 의한 측정

Fig.2 는 가공 중에 있는 공작물의 측정을 위하여 사용되는 OMM 방법에 대한 개요를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 OMM 에서는 공작물의 이동 없이 가공과 측정이 하나의 공작기계 내에서 이루어지기 때문에 CMM 측정에서는 불가능하였던 CAM/CAI 의 통합이 가능해지며, 이에 근거하여 선행 기계가공공정의 데이터를 기반으로 적절한 측정계획의 수립과 측정된 결과를 다시 가공공정에 feedback 하여 요구되는 작업을 달성할 수 있다. 물론, 공작기계는 CMM 에 비하여 정밀도가 낮고 동일한 공작기계에서 가공과 측정이 진행되므로 측정 정밀도면에서 신뢰도가 낮다고 할 수 있으나, 최근 기상측정의 정밀도를 높이기 위한 연구가 진행되고 있어 CMM 수준은 아니더라도 이에 근접한 정도의 정밀도 향상이 기대되고 있다. 본 연구에서는 CAM/CAI 공정의 통합을 위하여 선행 가공정보를 기초로 가공물의 OMM 을 위한 측정계획을 가공경로를 고려하여 수립하는 방법에 대하여 다음과 같이 설명하였다.

3. 가공데이터에 의한 측정점 결정 방법

본 연구에서는 접촉식 프로브를 이용하여 가공물을 측정할 때, 가공표면의 오차예측을 통하여 가장 오차가 크게 발생할 가능성이 있는 부분에

측정점을 위치시켜 적은 측정점수로 최적의 결과를 얻을 수 있는 방법과 가공 시에 계산된 공구접촉점(cutter contact point)에 측정점을 위치시켜 가공 중 발생하는 cusp 에 의한 측정오차를 최소화시킬 수 있는 방법에 대하여 다음과 같이 설명하였다.

3.1 가공오차의 예측에 의한 측정점 결정

일반적으로 측정점이 오차발생 가능성이 높은 부분에 위치하게 되면 보다 효율적으로 가공면에 대한 형상오차 측정이 가능해지며, 곡률이 큰 부분에 측정점을 주로 위치하여 효율적인 측정작업을 수행하는 방법에 대한 연구가 수행되었다^[2,21]. 본 연구에서는 가공표면의 시뮬레이션을 통하여 황삭 또는 정삭가공된 자유곡면의 오차를 예측하는 방법^[3,4,5]을 통하여 적절한 측정점의 위치를 선정하는 방법을 소개하고자 한다. Fig.3 과 4 에 가공표면의 오차예측 결과가 나타나 있으며, 이를 기초로 예측된 오차값이 큰 부분을 선정하면 일정한 측정점 수에 대해 효율적인 측정이 수행될 수 있다.

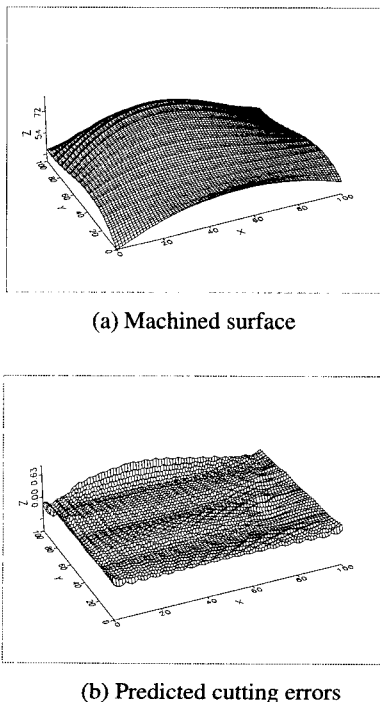
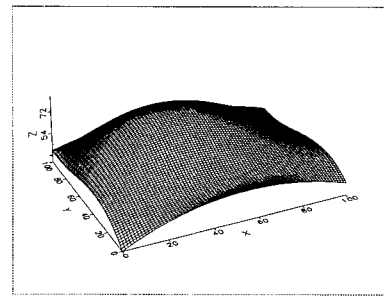
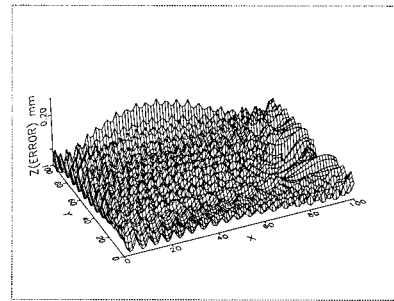


Fig. 3 Simulation result of rough cutting (tool radius=10mm, 311 CL-data)



(a) Machined surface



(b) Predicted cutting errors

Fig. 4 Simulation results of finish cut (tool radius=5mm, 1766 CL-data)

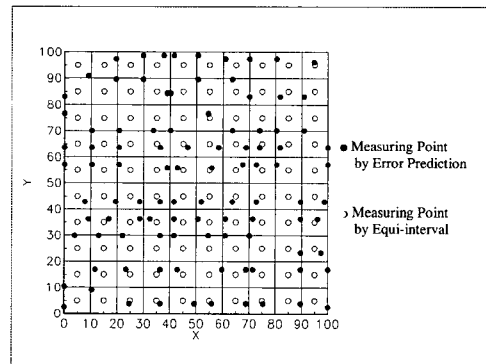


Fig. 5 Measuring points selection method based on cutting simulation.

그러나, 측정점의 위치결정을 단순히 최대 오차발생 부분에 집중시키는 방법은 대상 곡면 전체에 대한 일반성이 결여되어 만족스러운 결과를 얻지 못하는 현상이 발생할 수도 있다. 이러한 가

능성을 최소화하기 위해서는 먼저 곡면을 주어진 측정점의 수로 분할하고, 각 분할된 영역에서 최대 가공오차가 예측된 곳을 측정점으로 결정하는 방법을 사용할 수 있으며, Fig.5 에 이러한 방법을 사용하여 선정된 측정점의 위치를 나타내었다.

본 방법은 가공표면에 발생하는 cusp 에 대한 고려를 하지 않았기 때문에, 황삭가공에 적용할 때 cusp 에 의하여 실제로 목적하였던 측정결과가 영향을 받을 수 있으며, 따라서 상대적으로 cusp 이 작게 형성되는 정삭가공의 경우에 효율적으로 사용될 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

가능성이 있다. 이러한 현상은 상대적으로 cusp 이 크게 생성되는 황삭가공 단계에서 발생할 가능성이 매우 높으며, 이에 대한 정확한 고찰 없이 측정작업을 수행하였을 경우에 그 측정결과에 대한 신뢰도를 저하시키는 요인이 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 오차발생 요인을 제거하기 위하여 가공 데이터를 근거로 측정위치를 효율적 결정하는 방법을 소개하였다.

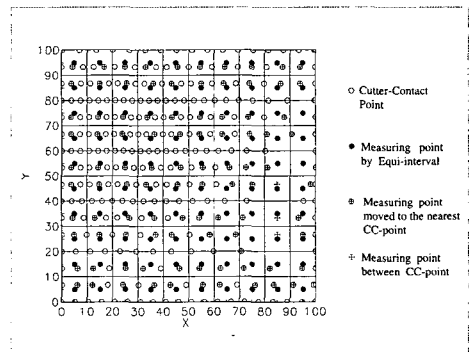
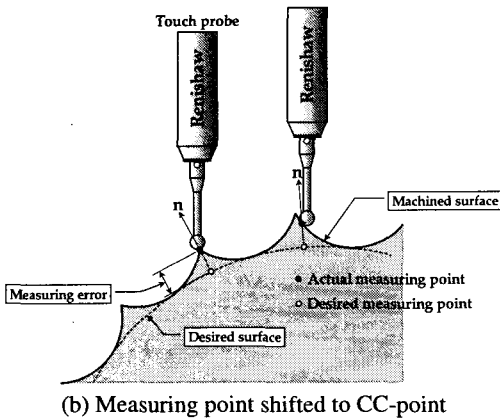
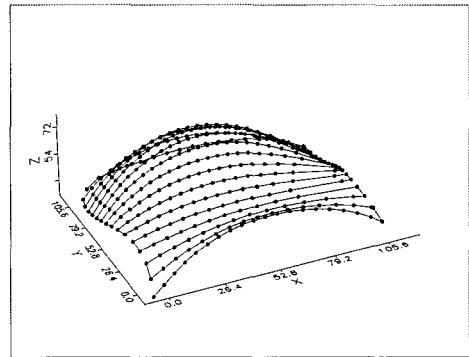
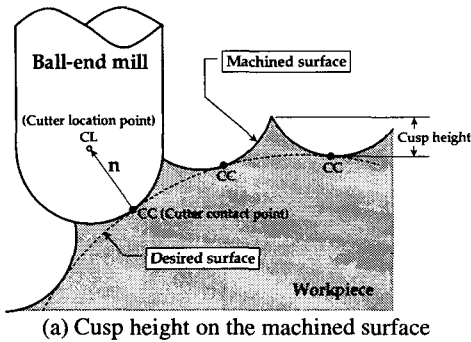


Fig. 6 Correction of measuring points considering cusp height on the machined surface

3.2 공구경로 데이터에 의한 측정점 결정

일반적으로 사용되는 등간격 측정방법으로 가공면에 대한 측정을 수행하면 측정점의 위치가 가공 시 발생한 cusp 의 끝이나 밑부분에 불규칙하게 분포할 수 있으며, 이로 인한 측정오차의 발생

Fig. 7 Measuring points considering cusp height

Fig.6(a)에 자유곡면에 대한 가공개요를 나타내었으며, 그림에 나타난 바와 같이 ball-end cutter 를 사용한 자유곡면의 가공 시 주어진 공차범위를 만족시키는 범위 내에서 연속적으로 공구 접촉점이 결정되며, 많은 경우에 직선보간에 의하여 공구 접촉점 사이를 공구가 이동하여 절삭작업을 수행한다. 따라서, 이 때 결정된 공구 접촉점은 다른

오차요소가 없다고 가정하였을 때, 가공하고자 하는 곡면 상에 항상 존재하게 되기 때문에, 가공물의 형상오차 측정을 위해서는 실제 공구와 곡면이 접촉하는 가공점(CC-point)에 대한 고찰을 통하여 이에 대한 측정점 위치의 수정이 필요하다. Fig.6(b)는 실제 가공 시에 공구와 공작물이 접촉하는 CC-point 와 이러한 정보를 이용하여 수정된 측정점의 위치를 나타내고 있다. Fig.8 은 본 방법을 이용한 OMM 장면을 나타내고 있으며, 측정결과 는 Table I 과 같다.

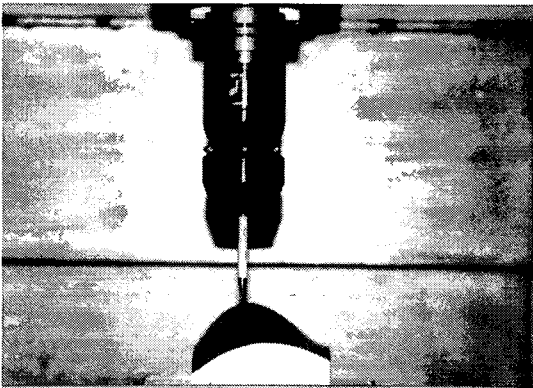


Fig. 8 OMM process after sculptured surface machining

Table 1 Calculated errors using proposed methods

(a) Measured error after rough cut

측정방법	RMS error(mm)
등간격 측정	0.185
CC-point 로 이동	0.091

(b) Measured error after finish cut

측정방법	RMS Error(mm)
등간격 측정	0.096
CC-point 로 이동	0.095
오차예측에 의한 측정	0.126

4. OMM 데이터에 의한 공구경로 수정방법

기계가공 시 절삭력에 의하여 발생하는 공구의 변형은 가공면의 품질 및 생산성과 밀접한 관계가 있다. 공구의 변형에 의한 오차를 보상하기 위한 방법으로는 다양한 센서를 사용하여 절삭력

을 제어하는 on-line 제어에 의한 방법^[12,14,19]과 절삭가공 이전에 가공오차를 예측하고 이에 의해 공구의 경로를 조정하는 방법^[6,7,8] 등 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 전자의 방법은 고가의 부가장치가 필요하고, 후자는 모델링 오차의 누적에 따라 정밀한 오차보상이 용이하지 않으며, 오차보상 과정이 불필요하게 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 CAM/CAI 통합에 기초하여 가공된 표면을 OMM 으로 측정하고 이를 기반으로 신경회로망 모델(neural network model)을 이용하여 효율적인 가공오차의 예측과 반복계산방식의 공구경로 수정방법에 의한 공구경로의 보정방법을 소개한다.

4.1 절삭가공오차의 보상

일반적으로 절삭가공오차는 절삭면에 복잡한 형태로 분포되며, 비선형적인 형태의 절삭가공오차의 분포는 해석적인 형태의 모델링이 용이하지 않다. 본 연구에서 소개하는 OMM 데이터를 기반으로 하여 수정된 공구경로를 계산하기 위한 개요도를 Fig.9 에 나타내었다

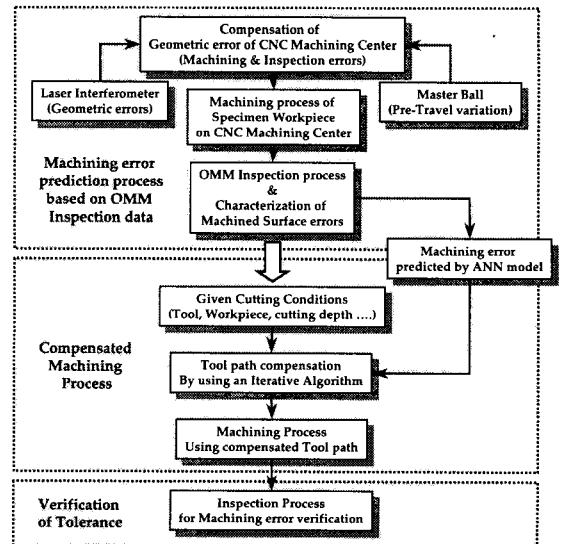


Fig. 9 Machining error compensation procedure based OMM data

4.2 절삭가공오차의 특성화

절삭가공오차는 비선형 형태로 분포하기 때문에 주어진 허용공차와의 비교를 위해서는 가공오

차를 특성화해야 하며, Fig.10 은 절삭표면의 형상을 허용공차와 비교하기 위하여 특성화된 파라미터들의 기하학적 정의를 나타낸다. 먼저 표면오차에서는 오차영역(error zone)을 정의하며, 이는 표면형상과 관계없이 절삭표면전체를 포함하는 최소폭의 영역으로 정의된다(Fig.10-(a)). 이 경우 오차영역폭(width of error zone) W_{err} 과 오차영역편차(deviation amount of error zone) D_{err} 를 정의할 수 있으며, 이러한 값들은 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(Fig.10-(b)). 이들 정의된 파라미터들은 실제 절삭표면에서 측정된 표면오차의 값들을 기반으로 결정되고, 절삭조건의 변화에 따른 파라미터 값들의 변동을 수학적 함수로 표현한다.

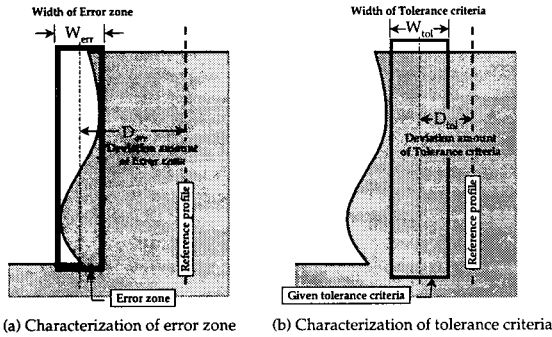


Fig. 10 Characteristic parameters of machining error and tolerance

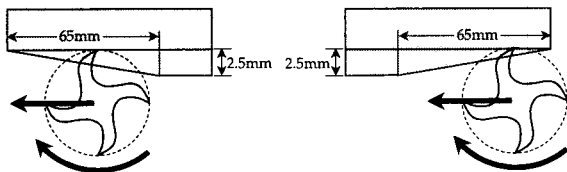


Fig. 11 Machining process of specimen workpieces

4.3 절삭가공오차의 예측

앞에서 정의된 가공오차 파라미터 W_{err} 과 D_{err} 는 Fig.11 과 같이 가공조건이 연속적으로 변화하는 시편의 가공을 수행한 후 기상측정을 통하여 전체 표면오차들을 OMM 으로 측정하고, 이를

기반으로 Radial Basis 함수^[15]를 이용한 신경회로망(Fig.12)을 적용하면 모델링할 수 있으며, 그 결과를 Fig.13 에 나타내었다.

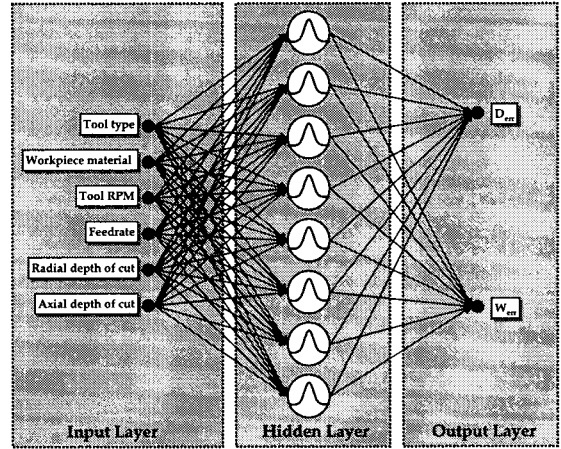
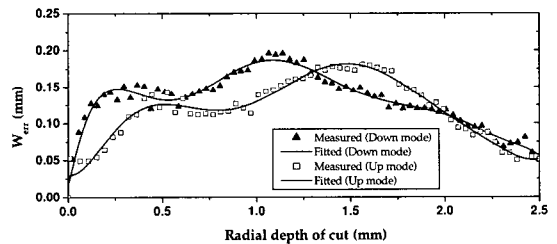
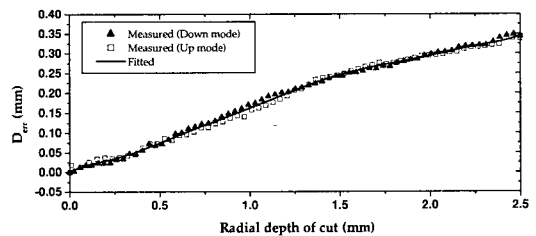


Fig. 12 Artificial neural network model



(a) W_{err}



(b) D_{err}

Fig. 13 Characterization of W_{err} and D_{err}

4.4 공구경로 수정법

본 연구에서는 공구의 변형에 따른 표면오차를 최대한 감소시키기 위하여 반복계산에 의하여 공구의 경로를 수정하는 방법을 소개하였다. 기존의 접근방법에서는 반복계산에 절삭력 예측모델과

공구변형량 계산과정이 포함되어 비효율적이었으나, 여기에서는 앞에서 설명한 신경회로망 모델을 이용하여 공구경로수정법의 반복계산을 빠르고 정확하게 수행할 수 있도록 하는 방법을 설명하였다.

Fig.14 는 공구경로 수정법을 도식화하여 보여주고 있다. 여기에서, TPN 는 분할된 공칭공구경로상의 공구위치이고, iTPC 는 i 번째 계산에서 수정된 공구위치이다. 각각의 i 번째 계산을 위하여, 공구의 위치가 iTPC 일때의 측면절삭깊이 iRD 에 대하여 구현된 신경회로망을 이용하여 iWerr 와 iDerr 의 값을 구한다. 수정된 공구위치 iTPC 는 iDerr 값이 Dtol 과 일치할 때까지 iDerr 의 값만큼 계속 수정한다. 결국 임의의 m 번째 계산에서 (m1)Derr 값에 의하여 수정된 최종 공구위치 mTPC 를 구할 수 있다^[16,17].

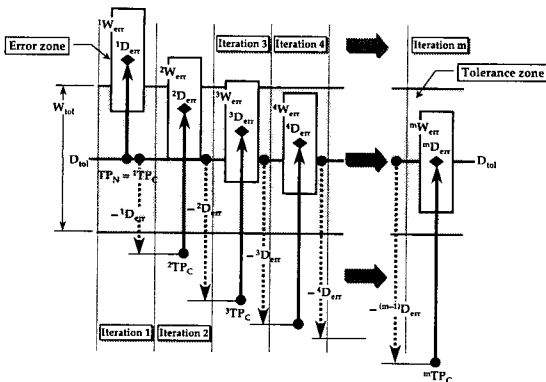


Fig. 14 Iterative procedure for tool position modification

상기의 방법을 Fig.15 에 나타낸 공작물을 대상으로 적용하였을 때, 보상 전과 후의 가공오차의 변화를 Fig.16 에 나타내고 있으며, 약 90% 정도의 가공오차 감소효과를 실현할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기상측정방법을 이용하여 가공 데이터와 측정데이터를 통합하는 방법을 소개하였으며, 이를 기반으로 가공 중의 공작물에 대한 측정계획 수립방법과 공구의 변형에 의한 가공오차를 보정하는 방법을 소개하였다. 이러한 방법은 기존의 CAD/CAM, CAD/CAI 의 통합방법과 연계하여 생산공정을 이루고 있는 3 개의 근간인 설계,

가공, 측정의 통합을 이룰 수 있는 기술의 발전으로 진행될 것으로 사료된다. 또한, CAD/CAM/CAI 의 통합에 의한 생산방식은 다양한 센서시스템과의 결합을 통하여 현재 진행 중인 지능형 생산시스템의 개발 및 역공학(Reverse Engineering) 등 그 응용분야가 다양할 것으로 사료된다.

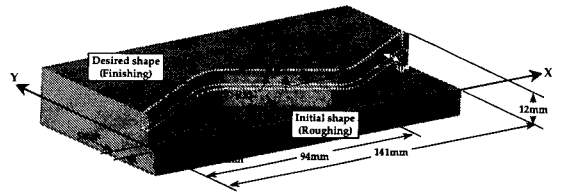


Fig. 15 Desired shape of machining part

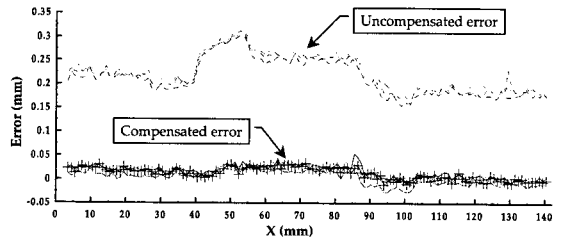


Fig. 16 Machining error distributions before and after compensation

후 기

본 원고에 서술된 내용의 일부는 1999 년도 인하대학교 교내연구비에 의해 연구된 결과입니다.

참고문헌

1. Cho, J.H., Cho, M.W. and Kim, K., "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, 1994.
2. Cho, M.W. and Kim, K., "New Inspection Planning Strategy for Sculptured Surfaces Using Coordinate Measuring Machine," International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444,

- 1995.
3. Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Geometric Simulation of NC Machining," Pro. of the ASME International Computers in Engineering Conference, Vol. 2, pp. 129-136, 1988.
 4. Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces," IEEE Computer Graphics & Applications, pp. 26-39, 1989.
 5. Kim, K., Integrated Computer Aided Manufacturing System for Sculptured Surfaces, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, 1993.
 6. Lechniak, Z., Werner, A., Skalski K. and Kedzior, K., "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, 1998.
 7. Lim, E.M. and Menq, C.H., "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, 1997.
 8. Lim, E.M., Menq, C.H. and Yen, D.W., "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, 1997.
 9. Lo, C.C. and Hsiao, C.Y., "CNC Machine Tool Interpolator with Path Compensation for Repeated Contour Machining, Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 1, pp. 55-62, 1998.
 10. Menq, C.H., Yau, H.T., Lai, G.Y. and Miller, R.A., "Statistical Evaluation of Form Tolerances using Discrete Measurement Data," ASME Winter Annual Meeting, ASME, PED, Vol. 47, pp. 135-149, 1990.
 11. Menq, C.H., Yau, H.T. and Lai, G.Y., "Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD Directed Inspection," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 2, 1992.
 12. Ni, J., "CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-Time Error Compensation," ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, No. 4(B), pp. 717-725, 1997.
 13. Pahk, H.J, Kim, Y.H, Hong, Y.S. and Kim, S.G., "Development of Computer-Aided Inspection System with CMM for Integrated Mold Manufacturing," Annals of the CIRP, Vol. 42/1, pp. 557-560, 1993.
 14. Rober, S.J., Shin Y.C. and Nwokah, O.D.I., "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, 1997.
 15. Schalkoff, R.J., Artificial Neural Networks, McGraw-Hill Book Co, Inc., 1997.
 16. Seo, T.I and Cho, M.W, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in Flat-End Milling Process (I)," KSME International Journal, Vol. 13, No. 10, pp. 738-751, 1999.
 17. Seo, T.I and Cho, M.W, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in Flat-End Milling Process (II)," KSME International Journal, Vol. 13, No. 12, pp. 918-930, 1999.
 18. Yang, M.Y. and Choi, J.G, "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, 1998.
 19. Yang, S., Yuan, J. and Ni, J., "Real-Time Cutting Force Induced Error Compensation on a Turning Center," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37/11, pp. 1597-1610, 1997.
 20. 남우선, 정성중, "3 차원 자유곡면 온더머신 측정 및 검사 시스템의 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 (II), pp. 911-914, 1997.
 21. 박희재, 안우정, 김왕도, "CAD/CAI 통합에 기초한 박형 단면을 가지는 항공기 터빈 블레이드의 정밀측정기술 개발," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 6 호, pp. 1743-1752, 1996.
 22. 조명우 외, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : I. 측정오차 모델링," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 10 호, pp. 172-181, 1999.
 23. 조명우 외, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : II. 측정계획 수립," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 12 호, pp. 109-118, 1999.