

CAD 모델 기반 비접촉 기상 측정에 관한 연구

권세진*, 이정근*, 박정환**, 고태조#, 김선호***

Non-contacting OMM (On Machine Measurement) based on CAD Model

Se Jin Kwon*, Jeong Geon Lee*, Jung Whan Park**, Tae Jo Ko#, Sun Ho Kim***

ABSTRACT

An industrial product is designed and fabricated, followed by the inspection process in order to check whether it is dimensionally tolerable or not. The machining process produces a part such as a mold or die, in which the three-dimensional coordinate might be measured by a CMM (Coordinate Measuring Machine) for assessment of its dimension. It is not ignorable, however, that a CMM measurement requires a lot of operating time and cost, which has led to many studies on the OMM system. The OMM system can be categorized into contact and non-contact types, and each of which has its own strengths and weaknesses. Non-contacting types generally utilize structured lights, sounds or magnetic fields. Though they show rather poor performance in positional accuracy, the measuring speed is faster than the contacting probes. This paper presents the development of an OMM system based on a non-contacting laser displacement sensing apparatus and CAD model. The system is composed of software modules of center-aligning and measuring, which has been operated and verified on a NC machining center on a shop floor.

Key Words : On-the-Machine Measuring (기상측정), Laser displacement sensor (레이저 변위 센서)

1. 서론

현재의 생산 시스템에서는 제품을 설계하고 가공하여 설계대로 가공이 이루어졌는지에 대한 확인을 위한 검사공정을 두고 있다. 공작기계를 이용한 절삭가공의 경우 가공 후 가공곡면의 오차검사는 측정을 통한 방식이 일반적이는데, 대량 생산라인의 경우에는 별도의 전용 측정 및 검사공정을 따로 두고 있으나 이 같은 방식은 다품종 소량 생산라인의 경우인 금형 제조와 같은 생산 시스템에는 부적절

하다. 따라서 정밀 측정과 유연성이 높은 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine : CMM)를 설치하여 운용하는 것이 일반적이다.¹ 그러나, CMM의 경우 측정기 자체의 한정된 크기와 값비싼 비용, 설치를 위한 별도의 공간 및 유지비용 등이 확보되어야 하며, 운용시 전문인력이 필요하다. 또한, 측정을 위해 공작물의 이동이 있어야 하며, 이에 따른 정확성에 대한 신뢰도가 보장되어야 하고, 측정시간의 지연으로 인해 생산성 저하의 요인이 될 수 있다.² 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로

접수일: 2003년 2월 3일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

* 영남대학교 기계공학과 대학원

** 영남대학교 기계공학부

교신지자: 영남대학교 기계공학부

E-mail: tjko@yu.ac.kr, Tel: (053) 810-2576

*** 한국기계연구원

공작기계에서 제품의 가공이 완료된 후, 장착된 공구를 측정용 접촉식 프로브(Probe)나 비접촉식 센서로 교체하여 공작기계 상에서 측정을 할 수 있는 시스템(On-the-Machine Measuring : OMM)에 관한 연구가 진행되고 있다.^{3,6}

OMM과 관련한 3차원 좌표 값의 측정방식은 크게 접촉식과 비접촉식, 그리고 하이브리드 방식이 있으며, 접촉식은 터치 트리거 프로브나 스캐닝 프로브를 이용한 방식이다. 한편, 비접촉식은 빛, 음향, 자기장 등을 이용한 방식이다. 또한 하이브리드 방식은 일반적으로 비전 시스템을 이용하여 전체 형상을 파악한 후 접촉식 프로브로 정밀한 측정을 수행하는 방식이다.⁹ 접촉식을 이용하는 측정 방식은 비접촉식에 비해 넓은 측정 영역을 정밀하게 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 측정시간이 오래 걸리고 프로브 반지름 보정이 어렵다는 문제를 가지고 있다. 반면, 비접촉식은 측정 속도가 빠르고, 연성 재질의 물체를 표면 손상 없이 측정이 가능하지만 측정 정밀도는 다소 열악하다.

측정에서는 측정 오차 또한 관심을 가져야 하는 부분인데, OMM의 경우는 특히 공작기계의 작업환경, 체적오차, 열변형, 공작물 체결에 따른 탄성변형 그리고 측정기 자체의 오차 등이 고려되어야 할 주요 오차들이다. 이러한 오차 보정에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.^{7,8,10}

본 논문은 NC 가공 후 가공 면에 대한 오차를 수치적으로 측정하고 평가하기 위해 CAD 모델을 기반으로 비접촉식 기상측정 시스템 개발에 관한 것이다. 비접촉식 측정기로서는 레이저 변위센서를 사용했으며, 이를 장착하여 측정을 수행할 CNC 밀링머신은 개방형 CNC 장치를 장착한 기계를 대상으로 했다. 즉, 개발된 각종 소프트웨어 모듈들을 CNC 장치에 탑재함으로써 별도의 외부 컴퓨터 시스템을 사용하지 않으며, 기존의 CAD/CAM 소프트웨어를 활용하여 CAD/CAM 일체형의 측정기반을 구축할 수 있도록 하였다. 따라서 센서를 구동시키고 측정을 수행하게 할 측정 모듈의 개발은 설계된 CAD 모델을 기반으로 상용 CAM 소프트웨어의 API(Application Programming Interface)를 활용하여 구축했다. 개발된 기술의 적용과 평가는 개방형 CNC를 가지는 특별히 제작된 밀링머신을 이용하였으며, 이때의 측정 결과를 CMM 결과와 비교하

여 봄으로써 본 연구의 유용성을 검증했다.

2. 시스템 구성

Fig. 1은 본 시스템의 전반적인 정보 흐름을 보여주고 있다. 이는 크게 레이저 변위 센서의 보정, 측정 및 검사 모듈로 이루어진다.

먼저, 본 연구에서 사용하는 비접촉식 센서인 레이저 변위 센서의 보정 모듈은 측정용 레이저 변위 센서를 가공이 끝난 후 공작기계에 장착할 때 스핀들 축과 레이저 변위 센서 광원 사이에 발생하는 편심(center shift)을 보정하는 작업을 수행한다.

다음, 측정 및 검사 모듈은 CAD 모델상의 측정 대상 점들의 위치를 설정할 수 있도록 한다. 그 이후, 그 측정 점들을 이용하여 측정 경로 계획(path planning)을 수립한 후 측정용 공작기계의 NC 제어가 되도록 한다. 이를 통하여 측정점에서의 실제 측정값을 이용하여 CAD 모델을 기준으로 한 가공 오차를 계산한다.

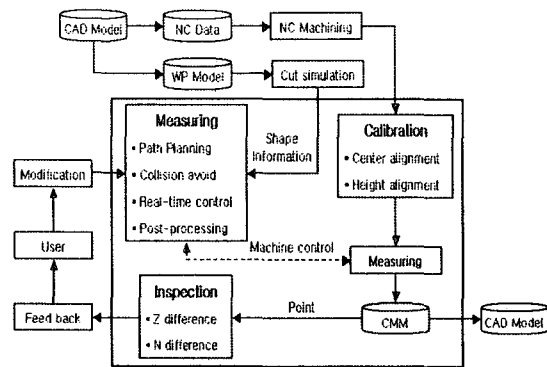


Fig. 1 Overall information flow

Table 1 Hardware specification

Sensor	<ul style="list-style-type: none"> · Resolution : $\pm 1 \mu\text{m}$ · Reference distance : 30 mm · Measuring range : $\pm 5 \text{ mm}$ · Spot diameter : Approx. 30 μm (at reference distance) · Analog output voltage : $\pm 5 \text{ V}$ · Weight : Approx. 260g
Machine Controller	· SIEMENS Shopmill(SINUMERIK 810D)

레이저 변위 센서는 KEYENCE사의 LK-031 모델을 사용하였다. 센서 및 테스트 공작 기계의 CNC 장치 사양은 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용한 레이저 변위 센서는 $\pm 5\text{mm}$ 의 측정 범위를 가지고 이 범위 내에서 $\pm 5\text{V}$ 의 전압과 4~20mA의 전류를 출력하고 측정 범위를 넘어 측정이 불가능할 경우 +12V의 전압과 31.2mA의 전류를 출력한다. 또한 사용한 공작기계의 CNC 장치는 개방형 CNC 장치인 SIEMENS사의 SINUMERIC 840D이다.

3. 편심 보정

측정을 위해 레이저 변위 센서를 스피indle에 장착할 때 Fig. 2 (a), (b)와 같이 장착되는데, 이 때 Fig. 2 (c)와 같이 스피indle 축과 레이저 변위 센서의 광원(laser source) 사이에 편심이 발생하며 실제로 가공물의 측정을 위해서는 이 편심량 (δx , δy)을 계산하여 측정 시 이를 보정 해 주어야 한다.

만일 측정 시 중심이 어떤 쪽으로라도 편심이 되어 있으면 형상의 목표 위치와 실제 측정 위치가 차이가 나게 되어 정확한 측정이 되지 않는다. 본 연구에서는 편심량의 보정을 수행하기 위해 이미 중심 좌표 값을 알고 있는 기준 카운트 싱크(reference counter sink) 가공 면을 활용하였다. 일반적으로 접촉식 OMM 측정에서의 편심 보정은 드릴 구멍이나 측벽 등의 특정형상을 활용하는데, 레이저 변위 센서의 경우는 이러한 방식이 경계 부위에서 레이저 빔의 산란 등의 영향으로 그다지 좋은 결과를 얻지 못하였다.

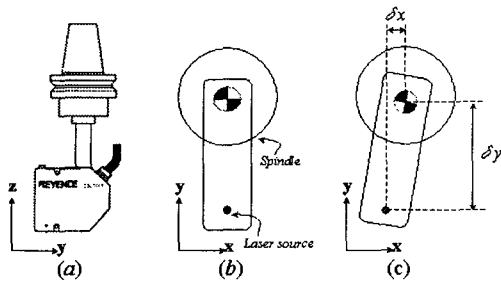


Fig. 2 Center shift in LK-031 setup

본 연구에서는 공작기계 테이블 위에 중심의 기계 좌표값(P_c)을 아는 기준 카운트 싱크를 미리 가공하여 준비하고, 레이저 변위 센서 측정값(높이값)

이 일정한 4개 점(P_1, P_2, P_3, P_4)을 활용하는 방법을 사용하였다. Fig. 3은 편심량 보정에 사용된 기준 카운트 싱크 면과 이 면 위에 있는 동일한 높이를 가지는 4개 점의 위치에 대한 예를 나타내고 있다.

우선 P_1, P_2, P_3, P_4 의 좌표를 구하기 위해 $\pm X, \pm Y$ 네 방향으로 카운트 싱크 면을 측정한다. Fig. 4는 $\pm X$ 방향에 대한 측정 예를 보이고 있는데, 초기 레이저 빔의 위치를 카운트 싱크 중심 부근에 두고 바깥쪽으로 이동하면서 측정을 수행한다. Fig. 4에서 P_1, P_2 는 $-X$ 및 $+X$ 방향으로 측정을 수행한 후 동일한 높이값을 가지는 두 점을 나타낸다.

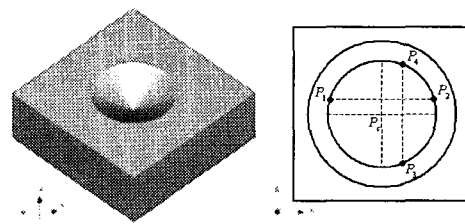


Fig. 3 Center alignment method using reference counter sink

이때 실제 초기 측정 데이터는 일정 거리 간격으로 측정된 전압 값인데, Fig. 5에 예를 보이고 있다. 결과적으로 측정 전압 값의 정밀도는 AD 보드의 분해능(resolution)에 의존하므로, 원하는 일정 높이(예: 0볼트)에 해당하는 위치를 찾아내는 작업은 경우에 따라 적절한 근사 과정이 필요할 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 근사화를 위하여 선형

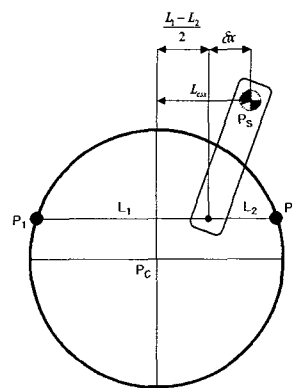


Fig. 4 X-directional center shift

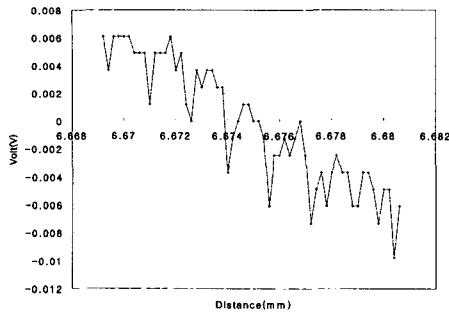


Fig. 5 Example of voltage output from LK-031

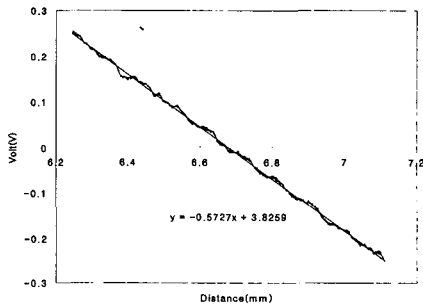


Fig. 6 Measured voltage & regression analysis using quadratic polynomial

회귀분석을 활용하였으며, Fig. 6에 그 예를 보이고 있다.

즉, 카운터 싱크의 중심 부근 임의의 위치에 센서의 빔을 두고 +X 방향으로 프로브를 이동하여 구한 회귀분석 그래프로부터 전압 0에 해당하는 점을 찾으면 이점이 L_1 거리이고, 반대로 -X 방향으로 움직여서 전압 0점을 찾으면 동일 위치의 L_2 거리가 나온다. Y방향에 대해서도 마찬가지로 할 수 있다. 다음으로 식 (1), (2)를 이용하여 편심량 δx , δy 를 구한다.

$$\delta x = \frac{L_1 - L_2}{2} - L_{csx} \quad (1)$$

$$\delta y = \frac{L_3 - L_4}{2} - L_{csy} \quad (2)$$

여기서 L_{csx} , L_{csy} 는 각각 주축의 기계좌표로부터 카운터 싱크 중심의 기계좌표를 뺀 X 및 Y축 방향의 값을 말한다.

4. 측정 및 검사

4.1 구현 환경

본 시스템의 소프트웨어는 Windows 2000 환경에서 Visual C++를 이용하여 개발하였으며, 편심보정 모듈, 측정 모듈은 기존 상업용 CAM 시스템인 Z-Master 2000¹¹의 API 기능을 활용하였다. Fig. 7은 본 시스템의 편심 보정 및 측정모듈 화면의 예를 나타내고 있다. 하드웨어적인 구성은 데이터 획득용으로 LK-031 레이저 변위 센서를 사용하였으며, SINUMERIK 810D 컨트롤러를 장착한 PC-NC 기반의 SIEMENS Shopmill 밀링 머신에서 가공 및 측정을 하였다.

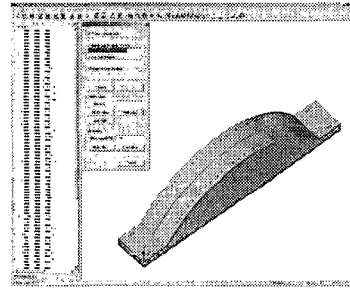


Fig. 7 OMM software

4.2 측정 경로계획

본 연구에서는 CAD 모델을 기반으로 측정하고자 하는 점을 사용자가 임의로 결정하여 선택할 수 있도록 구현하였다. 사용자는 측정하고자 하는 점의 x, y 좌표값을 입력하고, z 값은 CAD 모델로부터 얻어낸다. 그리고 사용자가 입력한 측정 점을 바탕으로 측정 경로를 생성하게 된다. 이때 측정 경로 좌표는 앞에서 계산한 편심량을 보정한 값이며, 측정 시 측정 점들간의 이동에서 레이저 변위

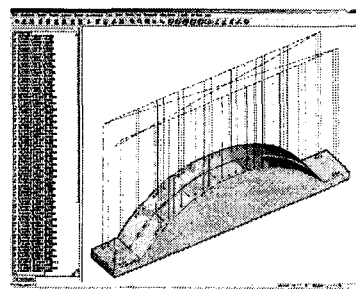


Fig. 8 Path planning for measuring

센서와 가공물간의 충돌이 발생하지 않도록 적절한 안전 높이를 주었다. Fig. 8은 측정 점들과 측정 경로의 예를 보이고 있다.

4.3 측정 모델 및 가공

본 연구에서 테스트한 모델은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 형상의 변화에 따른 가공 특성을 측정 실험에 반영하기 위해 15°, 30°, 45° 경사면을 가진 "평면부"와 일정한 반경을 가진 원호 형상의 "곡면부"로 이루어져 있다. 측정에 사용한 시편의 재질은 Al 70, 크기는 270 x 40 x 57 mm 이며 공작 기계 상에서 가공 후 편심 보정 및 측정 테스트를 수행하였다.

가공에 사용된 공구와 가공 조건은 Table 2 에 나타내었으며 정삭가공 시 커슥(cusp) 높이는 0.26 μm가 되도록 가공정밀도를 조절하였으며, -X로의 일방향(single) 가공을 수행하였다.

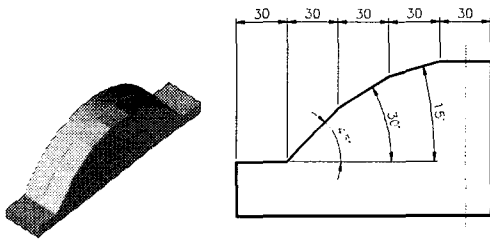


Fig. 9 Test model & dimension

Table 2 Machining condition

Process	Tool(mm)	Feedrate (mm/min.)	Speed (rpm)
Rough	∅20 ball-end mill	1,000	2,000
Semi-finish	∅12 ball-end mill	800	3,000
Finish	∅8 ball-end mill	500	3,600

4.4 측정 및 결과

가공이 완료된 후 공구를 제거하고 센서를 장착한 후, 편심량을 보정하기 위해 Fig. 10과 같은 ∅20*30°카운터 싱크를 이용하여 기준 카운터 싱크면을 만들었다.

편심량 보정 후 Fig. 11과 같이 가공물의 평면부와 곡면부에 각각 27개의 측정 점을 선정하였다.

측정을 위한 주축의 이송속도는 1000mm/min으로 하였으며, 센서의 전압 값을 받기 위해 12bit 아날로그 디지털 컨버터를 사용하였다.

이후, 측정은 평면부와 곡면부에 대해 각각 3회 반복 측정하였다. 측정 순서는 번호 순이며, 평면부 측정 후 곡면부를 측정하였다. 레이저 변위 센서는 광 축 방향으로의 변위에 대해서만 전압 신호를 발생시킨다. 그리고 이때 발생한 전압(V)과 거리(mm)는 1:1 스케일을 이룬다. 곧 측정에서 얻어진 출력 전압이 바로 가공 오차가 되는 것이다. Fig. 12 및 13은 평면부와 곡면부에서의 OMM 측정 결과를 보이고 있다. 여기서 음의 값은 과절삭(over cut)을 나타내고 양의 값은 미절삭(under cut)을 나타내고 있다. 실제 측정에서는 공작물 좌우에 위치한 평면부를 기준 평면으로 삼았다. 따라서 이 점의 값이 영점 세팅 값이 되며, 측정점으로 이동하였을 때 실제 모델과의 차이 값 만큼 전압의 차이를 발생시킴으로써 구성하였다.

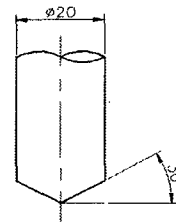


Fig. 10 Dimension of the counter sink tool

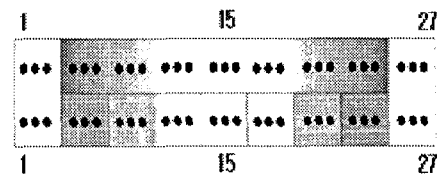


Fig. 11 Measuring points

측정 결과에 보이듯이 평면부 및 곡면부 모두 유사한 오차 경향을 보이고 있으며, CAD 모델과 비교하였을 때 대략 -30~10μm의 가공오차를 가지는 것으로 나타난다. 이를 자세히 살펴보면 절삭 조건이 가공 오차에 반영되었음을 알 수 있다. 그림에서 1, 2, 3은 평면부이며, 4, 5, 6은 45°, 7, 8, 9는 30° 그리고 10, 11, 12는 15°의 경사를 가진다. 경사

가 급할수록 CAM 에러가 크고 공구의 휨이 크게 발생하기 때문에 가공 오차도 커지게 된다. 13, 14, 15는 평면부이기 때문에 1, 2, 3과 동일한 오차 특성을 가진다. 22, 23, 24 위치에서 가공 오차가 크게 나타나는 것은 가공 특성이 잘 반영되었음을 의미한다. 그리고 3회 반복 측정에 대한 각 측정 점들의 오차의 편차를 Table 3 및 4에 나타내었다.

OMM에서 측정된 결과의 정확도를 평가하기 위해 가공된 모델을 CMM으로 옮겨 동일한 조건에서 측정을 수행하였다. CMM에서 3회 반복 측정된 결과를 Fig. 14 및 15에 나타내었다. 가공 오차는 OMM과 동일한 경향을 가짐을 알 수 있다. Fig. 16 및 17은 OMM 및 CMM의 평균 측정 결과를 함께 비교한 그림이다. CMM 측정 결과를 기준으로 보

았을 때 측정점 4~9 위치와 19~24 위치에서 10~20 μm 정도의 비교적 큰 차이를 보이고 있음을 알 수

Table 3 Deviation (plane)

Average(mm)	0.003741
Max.(mm)	0.01
Min.(mm)	0.001
The standard(mm)	0.002047

Table 4 Deviation (surface)

Average(mm)	0.003111
Max.(mm)	0.011
Min.(mm)	0.0
The standard(mm)	0.002393

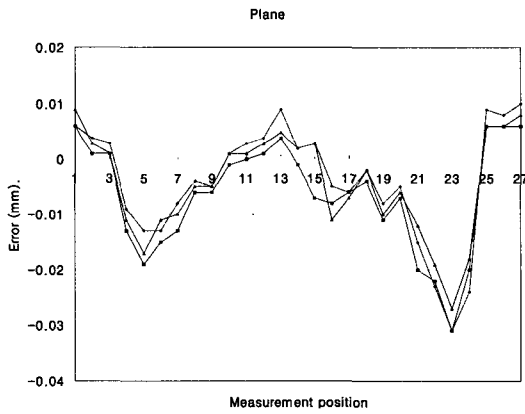


Fig. 12 Measuring result of OMM (plane)

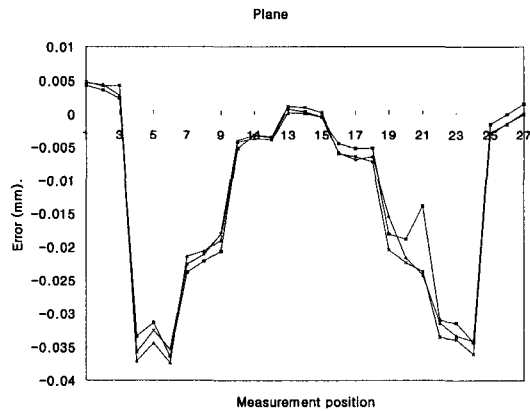


Fig. 14 Measuring result of CMM (plane)

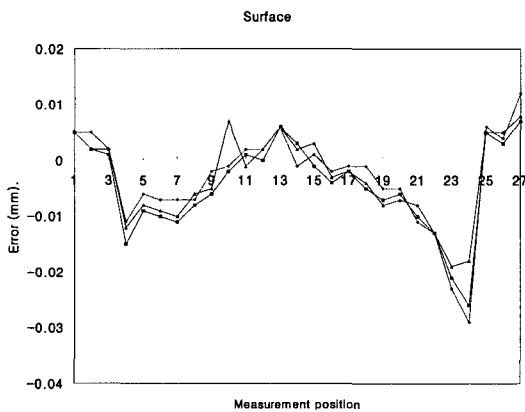


Fig. 13 Measuring result of OMM (surface)

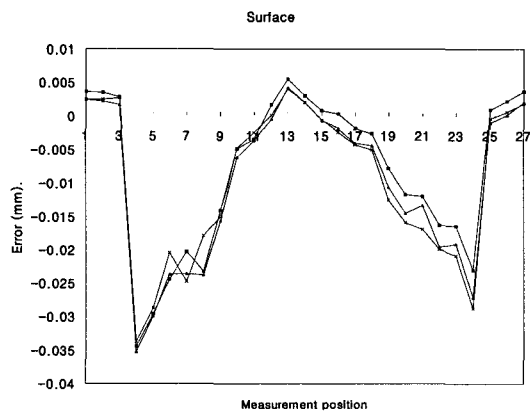


Fig. 15 Measuring result of CMM (surface)

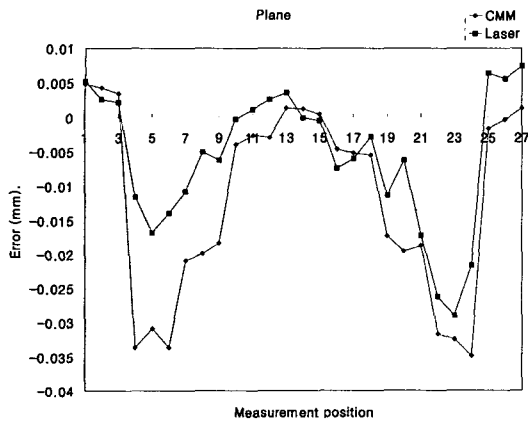


Fig. 16 Measuring result of CMM & OMM (plane)

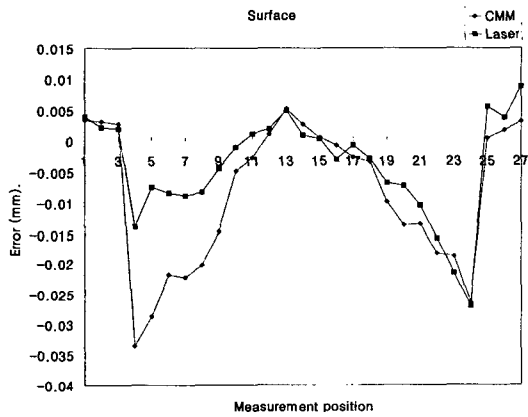


Fig. 17 Measuring result of CMM & OMM (surface)

있다. 이는 가공면의 경사도가 45°, 30°에 해당하는 위치로서 사용된 센서의 특성이 반영된 결과이다.¹² 기타 측정 위치에서는 전반적으로 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 NC 가공 후 가공면에 대한 기하학적인 오차를 수치적으로 측정하고 평가하기 위해 CAD 모델을 기반으로 비접촉식 기상 측정 시스템을 개발했다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 기상 측정 모듈은 상용 CAM API를 활용함으로써 효과적으로 개발이 가능했다. 이는 공작기

계가 개방형 컨트롤러를 가지는 이점이라 할 수 있다.

2) 공구와 레이저 변위 센서의 편심 보정은 카운터 싱크 면을 이용한 방법의 개발을 통해 3 μ m 이내에서 보정이 가능했다.

3) 개발된 기상 측정 시스템은 45°이내의 경사면을 가지는 가공면에서 4 μ m 이내의 반복정밀도를 가진다.

4) 개발된 기상 측정 시스템은 30°이내의 경사면을 가지는 가공 면에서는 10 μ m, 30°이상의 경사면을 가지는 가공 면에서는 20 μ m의 정확도를 가진다. 이는 레이저 변위 센서의 정확도 특성이 반영된 결과이다.

이러한 결과에도 불구하고 레이저를 이용한 비접촉식 측정법은 피측정물의 법선방향으로만 측정이 가능하다는 점과 레이저 센서의 특성상 피측정물의 접선각도가 커지면 오차가 커지는 단점을 가진다. 이러한 점은 실용화시 반드시 고려가 필요한 점이라 할 수 있다.

이상과 같은 결과는 기계가 갖는 기하학적 오차, 열변형 등의 환경 오차가 반영된 결과이다. 기계의 상태가 좋으면 좋을수록 측정 정확도는 향상될 수 있을 것이다. 추후, 환경적인 측면에서 보안을 거치면 측정 및 검사 시스템으로서 현장 적용이 가능할 것으로 사료되며, 일반 고가의 CMM장비를 필요로 하지 아니하므로 측정 및 검사 시간을 단축하여 공수 및 비용 절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 2000-2-30400-002-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Choi, B. K. and Jerard, R. B., Sculptured Surface Machining: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, 1998.
2. Owen, J. V., "CMMs on the Shop Floor," Manufacturing Engineering, pp. 66-70, April 1991.
3. Kim, S. H., Lee, S. J. and Kim, O. H., "The Analysis of Measuring Error in OMM System," J.

- of the KSPE, Vol. 15, No. 5, pp. 34-42, 1998.
4. Kim, S. H. and Kim, I. H., "The Development and Evaluation of OMM (On the Machine Measuring) System Using Scanning Probe," J. of the KSPE, Vol. 13, No. 10, pp. 71-77, 1996.
 5. Kim, K. D. and Chung, S. C., "Design and Analysis of 2½ Dimensional On-the-Machine Measuring and Inspection System Using Touch Trigger Probes," J. of KSME, Vol. 23, No. 10, pp. 37-46, 1999.
 6. Nam, W. S. and Chung, S. C., "System Synthesis for On-the-Machine Measuring and Inspection of Freeform Surfaces," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 12, pp. 81-88, 1998.
 7. Lee, S. W. and Kim, S. H., "Development of On - the - Machine Measurement (OMM) System," J of KIIE, Vol. 11, No. 1, pp. 199-205, 1998.
 8. Cho, M. W., Lee, S. H. and Seo. T. I., "On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces Based on CAD/CAM/CAI Integration : 1. Measurement Error Modeling," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 10, pp. 172-181, 1999.
 9. Lee, S. J., Kim, O. H. and Kim, S. H., "The OMM System for Machined Form and Surface Roughness Measurement Concerned with Volumetric Error," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 5, pp. 232-240, 2000.
 10. Ko, T. J., Kim, H. S. and Lee, H. G., "Reverse Engineering by Effective Digitizing with Sensor Fusion," J. of the KSPE Conference, Vol. 1, pp. 419-422, 1999.
 11. Kim, Sun Ho, Ko, Tae Jo, Ahn, Jung Hwan, "Elimination of Settling Error due to Clamping Forces in on Machine, Easurement," Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol, 19, pp. 573-578, 2002.
 12. Z-Master Reference Manual, CubicTek, 2000.
 13. Instruction Manual, Keyence Corporation, 1997.