

머신비전을 이용한 구멍 정밀도의 기상측정시스템 개발

On-Machine Measurement System Development of Hole Accuracy using Machine Vision

김민호¹, 김태영^{1,✉}
Min Ho Kim¹ and Tae Young Kim^{1,✉}

¹ 전북대학교 기계시스템공학부 (Division of Mechanical System Engineering, Chonbuk Univ.)
✉ Corresponding author: kimty@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2371

Manuscript received: 2009.11.10 / Accepted: 2010.3.2

The integrity and accuracy of the drilling hole are decided by positional error, diameter error, the roundness, the straightness, the cylindricity, size of the burr, the surface roundness and others. Among these parameters, positional error and diameter error have the most important parameters. The diameter error has been widely studied, but there has been little research done about the positional error due to the difficulty of measuring it. The measurement of hole location and diameter would be performed by CMM(Coordinate Measurement Machine). However, the usage of CMM requires much time and cost. In order to overcome the difficulties, we have developed a hole location and diameter error measuring device using machine vision. The developed measurement device attached to a CNC machine can determine hole quality quickly and easily.

Key Words: On-Machine Measurement (기상계측), Hole Accuracy (구멍 정밀도), Drilling (드릴링), Machine Vision (머신 비전)

1. 서론

구멍의 품질을 표현하는 기준으로는 구멍의 위치 오차, 직경 오차, 진원도, 직진도, 원통도, 버(burr)의 크기 등 여러 가지가 있으나 이 중 기본은 구멍의 위치 오차와 직경 오차이다. 구멍의 위치 오차를 측정하기 위해서는 구멍주위에 있는 3 개 이상의 점 위치를 검출해야 한다. 단지 두 점의 직선거리를 측정하는 길이 측정 보다 6 배 이상의 데이터가 필요하다. 또한 기준점에 대해 측정하고자 하는 점의 x, y 값을 얻어내야 한다는 것과 평행한 두 번이나 두 면 사이의 거리 측정처럼 측정기에 측정점을 접촉시키는 것이 쉽지가 않다. 이러한 이유로 구멍의 위치 오차측정을 위해서는

고가의 3 차원 측정기를 사용해야 한다. 3 차원 측정기를 이용한 구멍 오차 측정은 피삭재를 가공 후 공작기계에서 분리하여 측정기로 이동하여 측정해야 하고 측정에도 많은 시간을 요하기 때문에 시간과 비용이 많이 소요된다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 기상측정이 있다. 기상측정(On-Machine measurement, OMM) 시스템이란 공작기계에 측정기능을 부여하여 공작기계상에 가공과 측정을 동시에 수행하게 함으로써 제품의 생산비용과 생산시간을 줄이고 가공정밀도를 높여 제품의 품질 향상을 목적으로 하는 시스템이다.^{1,2}

기상측정시스템을 구현하기 위한 센서에는 터치프로브, 스테닝프로브, 레이저프로브 등이 있으

며 이를 이용한 시스템 개발과 연구가 다양하게 이루어져 왔다.¹²

하지만 구멍의 위치 오차 측정과 같이 다수의 점데이터를 얻어 내야 하는 경우 위와 같은 센서를 이용한 기상측정은 비효율적이다.

본 연구에서는 구멍오차를 간편하고 빠르게 측정할 수 있도록 평면상의 점데이터를 빠르게 획득할 수 있는 머신비전을 이용한 기상측정 시스템을 개발하였다. 획득된 영상을 PC 에서 볼 수 있고 구멍의 위치와 직경 오차값을 얻을 수 있는 프로그램을 자체 개발하였으며, 개발된 시스템의 측정 정밀도와 정확도를 검증하였고 측정시 공작기계의 백래쉬의 영향에 대해 실험해 보았다. 마지막으로 개발된 시스템을 실제 가공에 적용하여 측정의 효율성을 검토해 보았다.

2. 구멍 정밀도 측정시스템 개발

드릴가공 후 드릴구멍의 위치 오차와 직경 오차를 빠르고 간편하게 측정하기 위해 다음과 같은 측정 원칙을 적용하여 개발하였다.

첫째, 가공 후 공작물을 공작기계에서 분리하지 않고 공작기계상에서 측정한다.

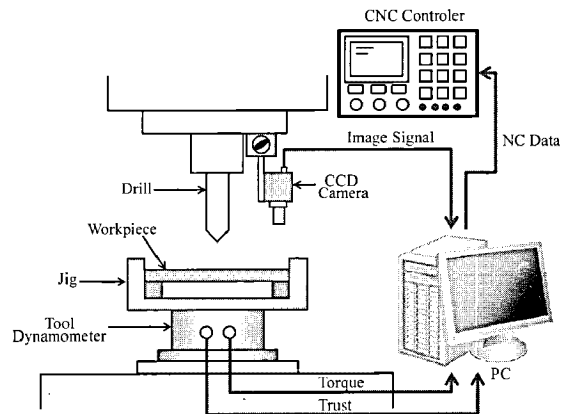
둘째, 구멍의 형상측정을 위해 접촉식에 의한 점데이터를 측정이 아닌 비접촉식 영상이미지를 이용하여 측정한다.

CNC 공작기계상에서 측정을 하게 되면 가공시와 동일한 환경에서 측정하기 때문에 환경적 측정 오차요인을 줄일 수 있는 이점이 있다. 공작물을 분리하여 측정기에 재설치하여 측정시 공작물의 변형과 가공시와 측정시의 평면도, 수직도 등의 차이와 공작기계와 측정기의 이송 정밀도 차이 등에 의한 측정 오차 요인이 발생하게 된다. 측정 시간 측면에서도 측정 대상물의 분리와 재설치에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

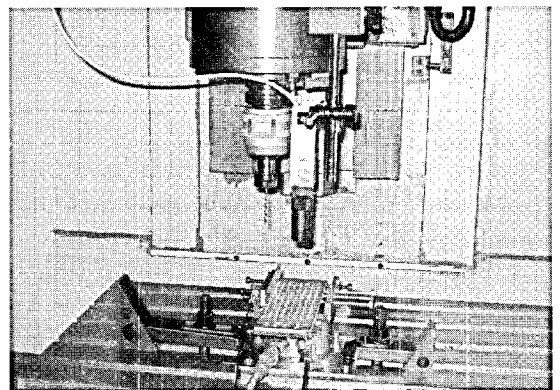
또한 측정을 위한 이송 스테이지로 1 μm 분해능을 갖는 CNC 공작기계 x, y, z 축 이송 기구를 이용할 수 있기 때문에 제작 비용을 줄일 수 있다.

구멍 형상 측정시 접촉식에 의한 점데이터 수집방식을 이용할 경우 측정 및 계산에 시간과 노력이 필요하게 된다. 이에 반해 구멍의 확대된 영상 이미지에서 사용자가 진원의 원형 이미지를 측정 구멍의 중심과 지름을 일치시켜 중심 위치와 지름을 측정하는 방식이 훨씬 더 능률적이다.

본 연구에서는 위와 같은 방식의 측정시스템을 개발하였다. 측정시스템은 Fig. 1 의 시스템 구성도에서 볼 수 있는 것처럼 CCD 카메라를 CNC 공작기계의 테이블과 수직하게 부착한 후 CCD 카메라의 영상을 컴퓨터로 획득하여 이를 Fig. 2 와 같이 컴퓨터 모니터를 통해 사용자가 공작물의 영상을 볼 수 있도록 하였다. 측정 프로그램은 볼랜드사의 Delphi7 을 이용하여 Window 용으로 개발하였다.



(a) System configuration



(b) System setup

Fig. 1 Drill hole position error measuring system

개발된 프로그램의 구성은 영상을 획득하는 부분과 획득된 영상 위에 가상의 원과 수평 수직선을 그리고 사용자가 위치와 크기를 조정할 수 있게 하는 부분 및 한 픽셀당 가로와 세로의 길이를 보정하고 원점 위치를 보정하고 저장된 보정값으로 가상원의 위치와 지름을 계산하는 부분으로 이루어져 있다.

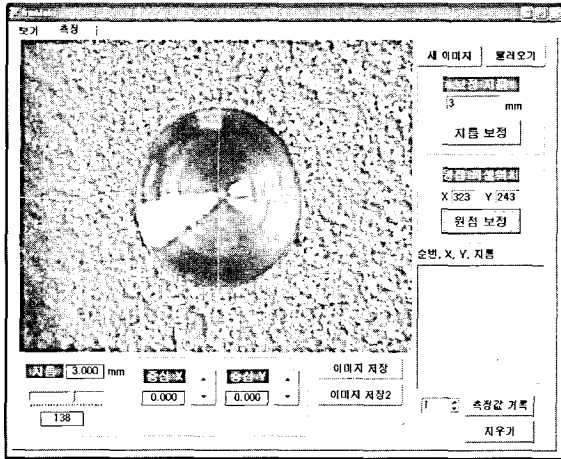


Fig. 2 Drill hole error measuring program

Table 1 The Specifications of machine vision apparatus

Machine vision apparatus	Model
CCD Camera	Hitachi KP-M20
Frame grabber	NI PCI-1405

영상장비들은 Table 1 과 같으며 640(H)×480(V) 픽셀의 256 레벨의 흑백영상을 얻기 위해 선정되었다. 개발된 프로그램은 Frame grabber 가 필요한 아날로그형과 디지털형 카메라 모두 사용할 수 있다. Frame grabber 는 프로그래밍을 위한 컴포넌트가 제공되는 NI사 제품으로 저가형을 이용하였다.

개발된 시스템으로 구멍을 측정하기 위한 과정은 Fig. 3 과 같다. 먼저 이미지에서 길이와 위치에 대한 보정을 위해 중심 위치 오차와 지름 오차가 없도록 센터드릴로 기준 구멍을 가공한다. 기준 구멍을 카메라로 찍을 수 있게 공작기계의 x, y 축을 이동시키고 z 축을 이동시켜 초점을 맞춘다. 기준 구멍 영상에서 사용자가 마우스와 키보드를 사용하여 구멍의 중심 위치와 지름을 가상의 진원과 맞춘 후 지름값을 입력하고 위치보정과 지름보정을 한다. 이후 기준 구멍에서 상대위치만큼 이동하여 가공된 구멍의 오차를 측정하기 위해 공작기계 테이블을 상대위치만큼 이동시킨다. 그 위치에서 획득한 구멍의 영상에 프로그램상의 가상원의 지름과 위치를 가공구멍과 맞추면 프로그램은 보정했을 때 중심 위치와 지름의 차이를 자동계산하여 실시간으로 화면상에 오차값을 출력해 준다.

Fig. 4 는 이러한 측정과정을 도식화 한 것이며 Fig. 5 는 보정 후 측정하고자 하는 구멍으로 이동

하여 그 구멍의 위치 오차와 지름을 측정하는 프로그램 화면이다.

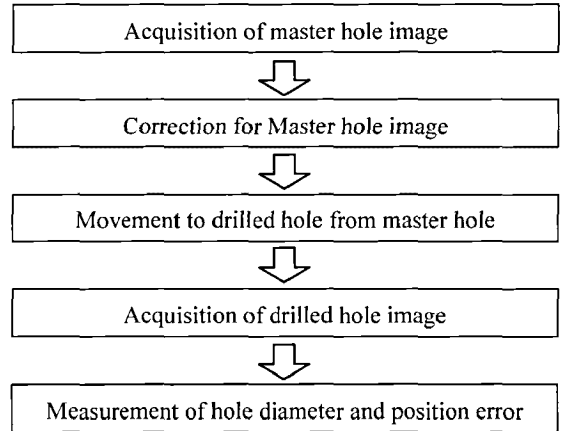


Fig. 3 Flow chart of measuring system

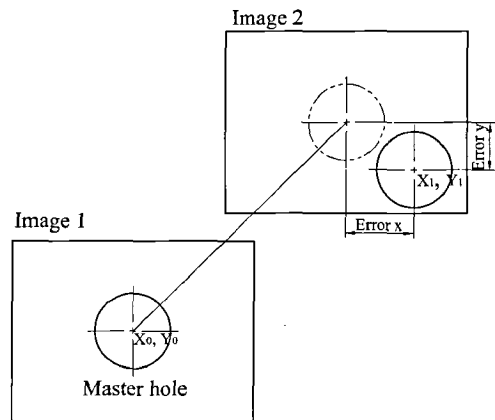


Fig. 4 Hole error measuring process

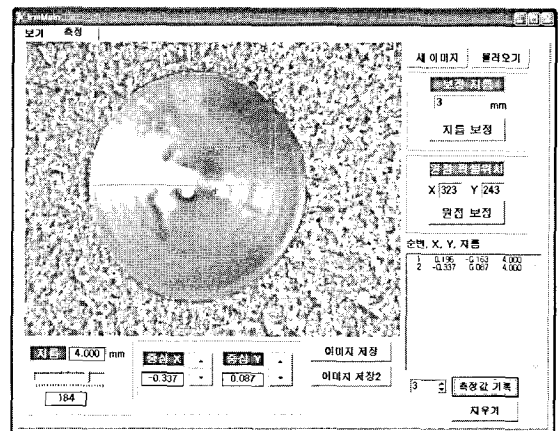


Fig. 5 Drill hole error measurement

3. 측정시스템 검증

3.1 검증 방법

개발된 구멍 정밀도 기상측정시스템의 측정 성능을 검증하기 위하여 버니어캘리퍼의 눈금 위치를 본 시스템으로 측정하여 X, Y 축 방향에 대한 위치 측정의 선형성과 치우침에 대해 검증하였다. 다음으로 본 시스템은 기상계측이므로 공작기계의 이송 정밀도가 측정에 영향을 주기 때문에 공작기계의 백래쉬를 측정하여 공작기계의 이송 위치 정밀도를 측정하였다.

또한 본 측정시스템의 분해능 이하의 위치 오차로 구멍을 가공하는 센터드릴로 가공된 구멍들을 측정하여 본 측정시스템의 측정분해능을 최종 점검하였다.

본 실험에 사용된 CNC 공작기계는 (주)화천기공에서 생산된 Hi SUPER-4 와 SIRIUS-2 이며 각 모델에 대한 제원은 Table 2 와 같다.

Table 2 The Specifications of CNC milling machine

Item	Model	
	HWACHEON Hi SUPER-4	HWACHEON SIRIUS-2
Table Size(mm)	1,350×450	1,300×550
X/Y/Z Axis(mm)	950/430/500	550/550/1,150
Rapid Traverse (X/Y/Z)(m/min)	12/12/8	40/40/40
Max. Spindle Speed(rpm)	10,000	10,000

버니어캘리퍼를 CCD 카메라 영상의 Y 축과 평행하게 놓고 Fig. 6 과 같이 측정프로그램에서 영상을 획득한 후 최대 눈금 5 개의 눈금 높이로 5 mm 지름 보정을 하였다. 지름 보정 후 맨 아래 눈금에서 가상의 십자선을 맞추고 원점보정을 한 후 각 눈금의 위치측정을 3 회 실시하여 측정된 값으로 상용 통계 프로그램인 Minitab 14 에서 ‘Gage 선형성 및 치우침 분석’을 실시하였다. 분석결과는 Fig. 7 과 같이 Y 축의 선형성은 0.05%, 치우침은 0.06%이다. 이는 5mm 를 측정할 경우 선형성에 의해 2.5 μm의 오차가 발생할 수 있고, 치우침에 의해 3.0 μm의 오차가 발생할 수 있다는 것으로 측정 성능이 매우 우수함을 알 수 있다.

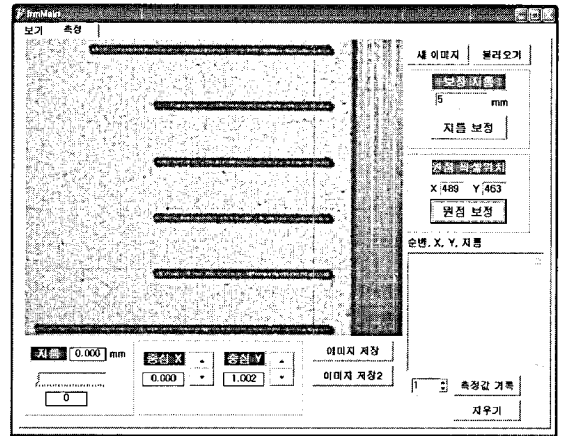


Fig. 6 Test of y axis accuracy

3.2 측정시스템 검증

측정시스템 오차는 정확도와 정밀도의 두 범주로 분류할 수 있는데, 정확도는 부품의 측정값과 실제 값 사이의 차이를 말한다. 정밀도는 동일한 부품을 동일한 장치로 반복해서 측정했을 때 나타나는 변동을 말한다.

본 연구에서 개발된 구멍측정시스템은 640×480의 픽셀 영상으로 구멍을 측정하게 된다. 지름 Ø4의 드릴가공에서 구멍의 위치 오차는 ± 0.5 mm 이하일 것으로 가정하여 480 픽셀에 5 mm 정도의 영상이 잡히는 렌즈를 CCD 카메라에 장착하였다.

모든 구성이 완료된 측정시스템의 측정 정도를 검증하기 위해 1 mm 단위로 눈금이 새겨져 있는

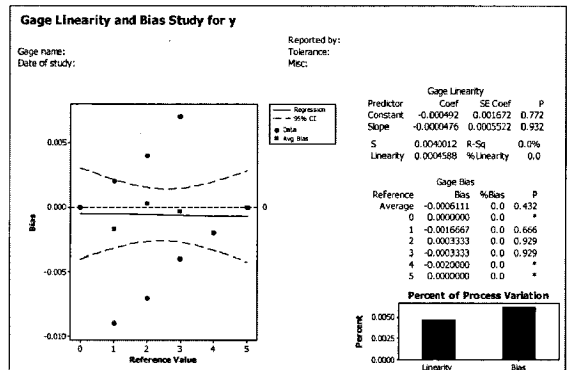


Fig. 7 Test of y axis accuracy

같은 방법으로 X 축에 대해서도 Fig. 8 과 같이 측정프로그램을 이용하여 눈금의 각 위치를 3 회 측정된 값으로 Gage 선형성 및 치우침 분석을 한 결과는 Fig. 9 와 같다. 분석결과 X 축의 선형성은

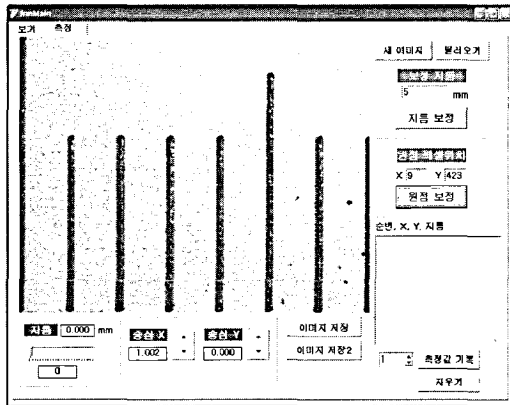


Fig. 8 Test of x axis accuracy

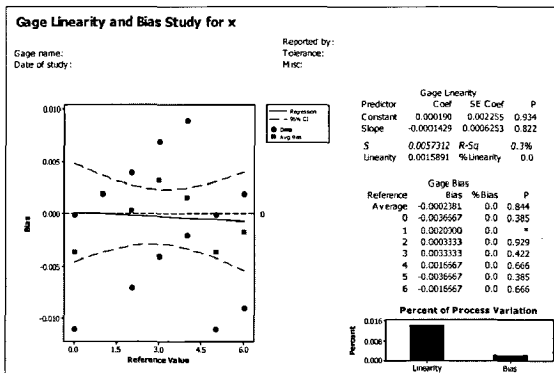


Fig. 9 Test of x axis accuracy

0.02%이고, 치우침은 0.02%이다. 이는 5 mm를 측정할 경우 선형성에 의해 1.0 μm의 오차가 발생할 수 있고, 치우침에 의해 1.0 μm의 오차가 발생할 수 있다는 것으로 측정능이 매우 우수함을 알 수 있다.

구멍오차 측정시스템의 정밀도와 정확도는 영상시스템과 함께 공작기계의 위치 정밀도에도 영향을 받기 때문에 공작기계의 위치정밀도를 측정해 보았다. 본 연구에서 사용한 CNC 공작기계는 (주)화천기공의 'Hi SUPER-4'와 'SIRIUS-2' 두 가지이다. 따라서 이들 공작기계에 대한 테이블이송 위치정밀도에 대해 측정해 보았다.

테이블의 이송 위치정밀도 측정방법은 Fig. 10과 같이 0.01 μm의 분해능을 가진 LVDT(Tesa GT-22)와 지시계(Tesa TT-80)를 이용하였다. 먼저 X축 이송 위치 정밀도 측정을 위해 LVDT를 X축 이송방향과 평행하게 테이블에 설치하여 테이블을 이송시 LVDT가 척에 닿도록 하여 영점보정을 한 후 테이블을 후퇴 후 영점위치로 다시 이동시키면 이전 위치와 오차를 측정할 수 있다. 이를 반복

측정하여 최대 오차값을 얻어 낸다. Y축도 같은 방법으로 측정한다. 이러한 오차 측정을 한 공작기계에 대해 드릴실험을 실시할 테이블 범위 내에서 4곳을 측정하였다.

또한 공작기계의 X, Y축 백래쉬(backlash)도 측정하기 위해 위치 정밀도 측정 때와 같이 LVDT를 설치하고 테이블을 -X 위치에서 영점 위치로 가서 영점보정을 한 후 테이블을 +X 쪽으로 10 μm이상 이송하였다. 다시 영점위치로 이동하였을 때 LVDT가 나타내는 값이 X축의 백래쉬값이 된다. 백래쉬값도 여러 번 측정하여 최대값을 측정하였다.

이와 같이 공작기계의 이송 위치정밀도와 백래쉬를 측정한 결과는 Table 3과 같다. Hi SUPER-4가 SIRIUS-2보다 위치 정밀도와 백래쉬 모두 큰 것으로 측정되었다.

두 기계 모두 위치 정밀도는 구멍측정시스템의 영상화면 분해능인 11 μm보다 20%로 작기 때문에 측정에 영향을 주지 않는다. 하지만 백래쉬가 측정분해능과 비슷하고 Hi SUPER-4의 Y축 백래쉬는 3배 이상이 된다. 실제 측정시스템으로 두 공작기계의 X, Y축 모든 백래쉬는 감지가 되어 측정에 영향을 주었다. 따라서 측정시에는 가공 경로대로 따라 가면서 측정을 함으로써 백래쉬의 영향이 없도록 했다.

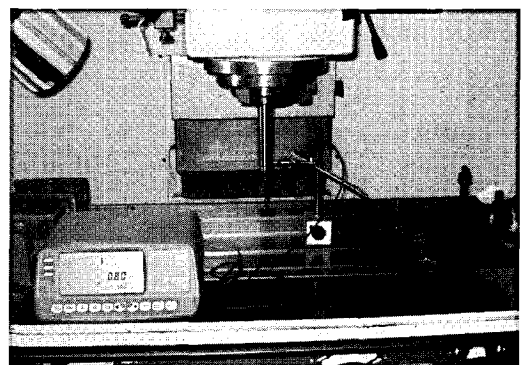


Fig. 10 CNC Machine for accuracy measuring

Table 3 The position error and backlash of CNC machine

CNC Machine	Position error		Backlash	
	X(μm)	Y(μm)	X(μm)	Y(μm)
HWACHEON Hi SUPER-4	Max. ± 1	Max. ± 2	Max. 7.7	Max 36.5
HWACHEON SIRIUS-2	Max. ± 0.4	Max. ± 0.4	Max. 1.5	Max 6.0

Fig. 11 은 측정시스템 검증의 정확도를 보기 위해 STS304 재질의 피삭재를 $\varnothing 3$ 의 센터드릴로 회전수 1200 rpm, 이송 0.06 mm/rev, 절삭깊이 1mm의 가공조건으로 18 개의 구멍을 8mm 간격으로 가공하여 측정한 구멍 위치 오차이다. 이송은 공작기계의 백래쉬를 최소화하기 위해 가공과 측정시 같은 방향으로 이송하였으며 또한 한쪽 방향으로 하였다. 가공 구멍의 위치 오차가 측정시스템의 분해능 이하라고 가정하였을 경우 측정시스템은 X, Y 축 모두 $\pm 11 \mu\text{m}$ 이내의 오차를 보였다. 이로써 측정시스템의 정밀도는 이미지의 2 픽셀 내외인 $\pm 11 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

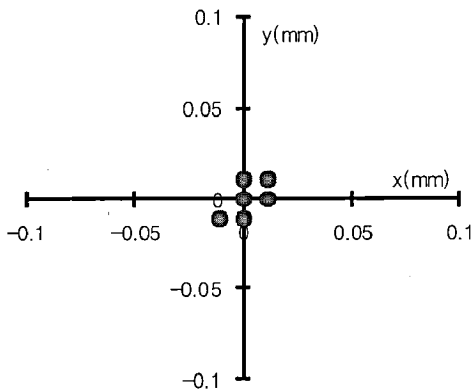


Fig. 11 The accuracy measuring of CNC machine

4. 측정시스템 활용 예

개발된 측정 시스템을 활용하여 드릴 가공시 센터드릴링으로 미리 구멍 위치를 가공하고 할 경우와 그렇지 않은 경우의 구멍 위치 오차를 비교하는 측정 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 드릴은 직경 $\varnothing 4$, 비틀림각 30° HSS 드릴을 사용하였다. 절삭조건은 건절삭으로 회전수 900, 1200, 1500 rpm, 이송률 0.04, 0.06, 0.08 mm/rev 을 조합한 9 가지 조건으로 1 개의 구멍씩을 가공 후 다시 역순으로 1 회 더 가공하여 총 18 개의 구멍을 CNC 밀링머신(HWACHEON SIRIUS-2)으로 가공하였다.

피삭재로는 STS304 재질로 두께 10mm 의 강판을 사용하였으면 표면은 다듬질 되지 않은 상태에서 Fig. 12 와 같이 18 개의 구멍을 연속 가공하였다.

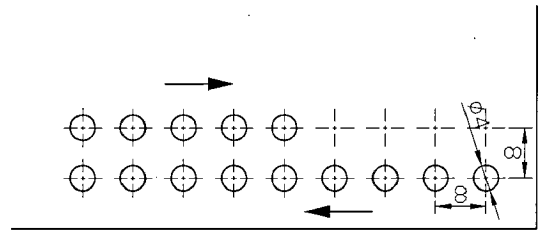


Fig. 12 Shape and dimension of specimen

Fig. 13 은 위와 같은 조건으로 드릴가공 후 본 연구에서 개발한 측정시스템을 이용하여 각 구멍에 대한 위치 오차를 측정된 결과이다. 위치오차는 X 축 방향으로 최대 0.391mm, Y 축방향으로 0.239mm 발생하고 있는 것을 볼 수 있으며, 표준편차는 X 축 방향으로 0.160, Y 방향으로 0.125 이다.

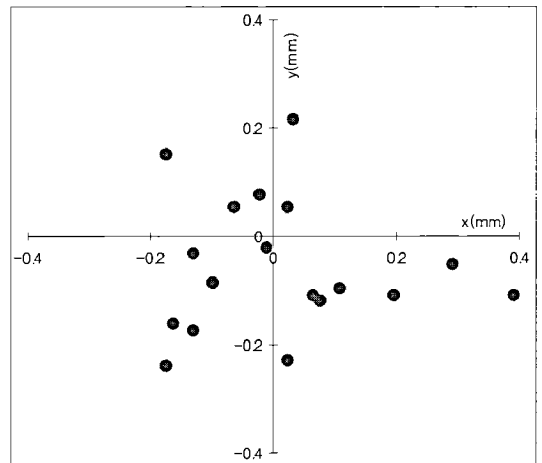


Fig. 13 Center error(HSS Stand., No Centerdrilling, $\varnothing 4$)

Fig. 14 는 드릴가공 전에 직경 $\varnothing 3$ 의 센터드릴로 구멍깊이 1 mm 로 드릴 구멍 위치를 미리 가공한 후 드릴가공을 하여 그 구멍의 위치오차를 측정된 결과 이다. 위치오차는 X 축 방향으로 최대 0.033 mm, Y 축방향으로 0.033 mm 가량 발생하고 있는 것을 볼 수 있으며, 표준편차는 X 축 방향으로 0.011, Y 방향으로 0.016 이다.

실험결과 구멍의 위치를 센터드릴로 미리 가공하여 드릴링할 경우 매우 우수한 구멍 위치 정확도와 정밀도를 보임을 알 수 있었다. 또한 본 연구로 개발된 측정 시스템을 이용하여 18 개의 구멍의 위치오차를 측정하는데 약 20 여분 정도 밖에 소요되지 않아 측정이 매우 빠르고 간편함을 알 수 있다.

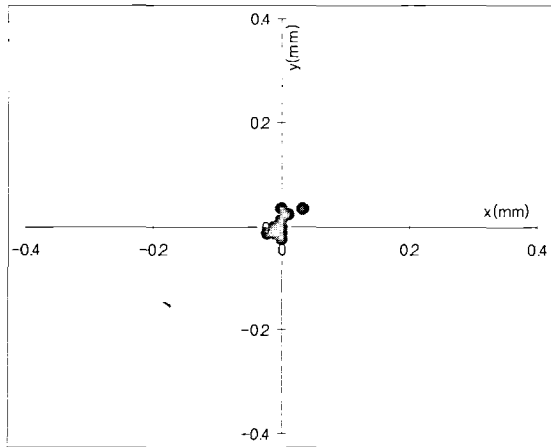


Fig. 14 Center error(HSS stand., Centerdrilling depth 1mm, $\varnothing 4$)

5. 결론

공작기계상에서 CCD 카메라를 이용하여 드릴 구멍 오차를 측정할 수 있는 측정시스템을 개발한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 개발된 구멍오차 측정시스템은 가공 후 CNC 공작기계상에서 공작물을 가공상태 그대로 유지한 상태로 오차를 측정할 수 있어 오차 측정에 영향을 주는 요인들을 최소화 할 수 있다.

2) 개발된 구멍오차 측정시스템은 CNC 공작기계의 이송시스템을 이용할 수 있어 저렴한 제작비용으로 오차 측정의 정밀도를 높일 수 있다.

3) 구멍형상 측정시 다량의 점 데이터를 얻는 방법으로 CCD 카메라는 데이터 획득과 측정에 유용하다.

4) 세로 길이 5mm 까지 한 화면에 담을 수 있는 렌즈를 사용할 경우 측정 분해능은 약 11 μ m이다.

5) 공작기계의 위치정밀도는 측정 오차에 영향을 주지 않을 만큼 충분하나 백래쉬에 의한 오차는 측정 오차를 발생시킬 만큼 크다. 따라서 측정시 백래쉬를 고려하여 가공경로를 따라 측정한다면 백래쉬에 의한 오차를 없앨 수 있다.

6) 센터드릴로 가공된 구멍들을 개발된 측정시스템으로 측정한 결과 측정 오차는 $\pm 11 \mu$ m로 오차가 2 개 픽셀 내에 있어 우수한 정밀도를 가지고 있음이 증명되었다.

참고문헌

1. Kim, S. H. and Kim, D. H., "On-the-Machine Measurement System," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 16, pp. 9-18, 2001.
2. Choi, J. P., Min, B. K. and Lee, S. J., "Machining Accuracy Improvement by On Machine Part Measurement and Error Compensation," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 12, pp. 34-41, 2003.
3. Kahng, C. H. and Ham, I., "A Study on Sequential Quality Improvement in Hole-Making Process," Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 27-32, 1975.
4. Ei-Tammimi, A. and Darwish, S. M., "Geometric accuracies of NC and conventionally drilled holes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 75, No. 1, pp. 111-116, 1998.
5. Kaminski, J. and Crafoord, R., "Position Accuracy of Drilled Holes," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 503-506, 1991.
6. Lehtihet, E. A., Gunasena, U. N. and Weill, R., "Statistical Models for the Relationship between Production Errors and the Position Tolerance of a Hole," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 569-572, 1990.
7. Wang, K., "Drilling Process Evaluation by Predicting Drilled Hole Quality and Drill Bit Wear With On-Line Acoustic Emission Signals," Oregon State University, 1997
8. Kim, M.-H., "A Study on Vision Measurement System and Dynamic Signal Analysis for Improving Hole Accuracy in Drilling," Ph.D. Thesis, Department of Precision Mechanical Engineering, Chonbuk National University, 2009.