

머시닝센터의 기계능력지수 평가 및 기계특성과의 분석

홍원표^{a*}

Machine Capability Index Evaluation of Machining Center and Comparative Analysis with Machine Property

Won-Pyo Hong^{a*}^a Korea Institute of Industrial Technology, 1278-18, Sa 3-dong, Sangrok-gu, Ansan, 426-791, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	August	2012
Revised	24	December	2012
Accepted	7	March	2013

Keywords:

Machining center
Machine capability index
Machine property
Straightness
Roundness
Positioning accuracy

ABSTRACT

Recently, there is an increasing need to produce more precise products with small deviations from defined target values. Machine capability is the ability of a machine tool to produce parts within a tolerance interval. Capability indices are a statistical way of describing how well a product is machined compared to defined target values and tolerances. Today, there is no standardized way to acquire a machine capability value. This paper describes a method for evaluating machine capability indices in machining centers. After the machining of specimens, the straightness, roundness, and positioning accuracy were measured by using CMM (coordinate measuring machine). These measured values and defined tolerances were used to evaluate the machine capability indices. It will be useful for the industry to have standardized ways to choose and calculate machine capability indices.

1. 서론

자동차, 전자 등 전통 주력산업 및 IT 기기, 광학 등 신산업 분야에서의 고정밀 고부가가치 부품 수요 증가에 따라 수요자의 요구 품질 수준에 부합하는 제품이 생산되도록 공정을 관리하고 평가하는 것이 중요하게 되었다. 제품의 제조 단계에서 생산 공정의 품질 변동 정도를 측정하고 규격과 비교 분석하여 변동의 폭을 감소시키기 위한 목적으로 공정능력 분석을 수행하게 된 것이다.

공정능력(Process Capability)이란, 공정이 관리 상태에 있을 때 그 공정에서 생산되는 제품의 품질 변동이 어느 정도인가를 나타내는 것이다. 즉, 생산 공정이 얼마나 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있는지를 반영하는 공정의 고유 능력을 의미한다^[1-3].

일반적으로 공정능력은 4 M(Man, Machine, Material, Method)에 의하여 영향을 받으며, 공정능력 향상은 품질 변동에 영향을 주는 요소에 적절한 조치를 취함으로써 가능하다. 4 M 중에서 공정능력에 가장 큰 영향을 주는 것은 장비능력(Machine Capability)이다^[4,5]. 이에 따라 연속적인 생산 품질을 유지할 수 있는 장비의 개발이 요구된다.

기계능력지수(Machine Capability Index) 분석은 다른 요소들의 영향이 없는 조건하에서 제품 생산 공정에 설치된 장비 즉, 기계 자체만의 성능에 의해 목표로 하는 품질 공차를 충족하는지를 평가하는 것이다^[6].

다양한 산업분야에서 장비능력의 요구수준은 높아지고 있으나, 전 세계적으로 이의 평가 방법에 대한 표준이 없는 실정이다. 이에

* Corresponding author. Tel.: +82-31-436-8056

Fax: +82-31-436-8050

E-mail address: wonpyodr@kitech.re.kr (Won-Pyo Hong).

장비 개발과 동시에 장비의 능력을 효과적으로 검증할 수 있는 표준화된 평가 방법이 필요하다.

머시닝센터의 능력을 평가하는 기존 방법으로 측정기를 이용한 이송정밀도, 속도 등의 성능 평가 방법과 규격 시편 가공을 통한 공작정밀도 평가 방법이 있었다. 그러나 이러한 방법은 생산 공정에서 요구하는 균일한 품질의 제품을 생산하는 능력을 평가하기 어렵다.

본 연구에서는 시편 가공을 통한 기계능력지수 평가방안을 제시하고, 이를 바탕으로 머시닝센터의 기계능력지수 성능지표를 평가하였다. 또한 기계능력지수 평가 결과와 기계특성 평가 결과의 비교 분석을 수행하였다.

2. 기계능력지수 평가 방안

2.1 평가 방법

기계능력지수란 해당 장비에서 얼마나 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있는지 장비의 능력을 평가하는 척도를 의미한다.

일반적으로 제품 생산을 위한 공정 평가시 공정능력지수(Process Capability, C_p)를 가장 많이 사용한다. 공정능력지수 범위에 따른 공정능력의 등급 판정은 Table 1과 같다⁷⁾.

공정능력지수가 영향인자 4 M을 모두 포함한 생산 능력을 평가하는 지수인 반면, 기계능력지수는 장비 자체의 능력만을 평가하는 지수로 구분할 수 있으며 평가 방법은 유사하다.

품질 특성의 분포가 양쪽 규격 중앙에 위치하여 치우침이 없고, 규격상한(USL : Upper Specification Limit)과 규격하한(LSL : Lower Specification Limit) 값이 주어진 경우에는 식 (1)과 같다⁸⁾.

$$C_m = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

where, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}$; standard deviation

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$
 ; average

품질 특성의 분포가 양쪽 규격의 중앙에 위치하지 않고 한쪽으로 치우쳐 있는 경우에는 치우침을 고려한 C_{mk} 를 사용한다.

평균값이 중심값보다 클 경우에는 식 (2)와 같고, 중심값보다 작을 경우는 식 (3)과 같다.

$$C_{mu} = \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} \quad (2)$$

$$C_{ml} = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \quad (3)$$

즉, C_{mk} 는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$C_{mk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \right\} \quad (4)$$

2.2 평가내용

한국산업규격의 공작기계 시험 및 검사에는 머시닝센터 공작정밀도 검사 조건인 KS B ISO 10791-7이 규정되어 있다.

KS B ISO 10791-7 규격 시편의 공작정밀도 검사 항목으로는 Table 2와 같이 진원도, 진직도, 위치정밀도 등이 있으며, 각 검사 항목에 따른 허용값이 규정되어 있다. 공작물의 규격 시편은 크기에 따라 10791-7A 160과 320 2종류로 구분되며, Fig. 1은 10791-7A 160이다⁹⁾.

Table 1 Process capability level

	C_p	Grade
1	$C_p \geq 1.67$	A very capable
2	$1.67 > C_p \geq 1.33$	A highly capable
3	$1.33 > C_p \geq 1.00$	A barely capable
4	$1.00 > C_p \geq 0.67$	Not capable
5	$0.67 > C_p$	Very not capable

Table 2 Inspection requirements of specimen

Object		Tolerance
Central hole	a) Cylindricity	0.010
	b) Squareness between the hole axis and the basis A	0.010
Square	c) Straightness of the sides	0.010
	d) Squareness of the adjacent sides to basis B	0.010
	e) Parallelism of the opposite side to basis B	0.010
Diamond	f) Straightness of the sides	0.010
	g) Accuracy of 75°angles to basis B	0.010
Circle	h) circularity	0.015
	i) Concentricity of the external circle and the internal bored hole C	0.025
Sloping faces	j) Straightness of the faces	0.010
	k) Accuracy of the angles to basis B	0.010
Bored holes	n) Position of the holes with respect to hole C	0.050
	o) Concentricity of inner hole to outer hole D	0.020

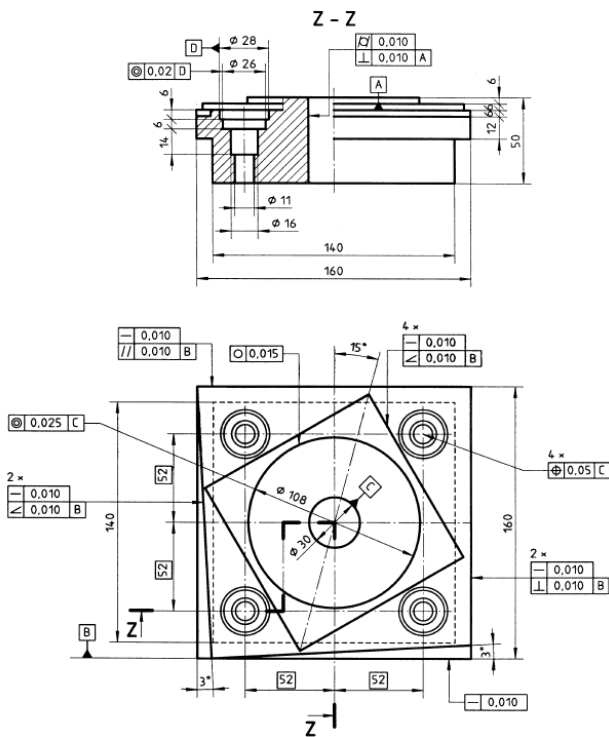


Fig. 1 KS B ISO 10797-7A 160 specimen

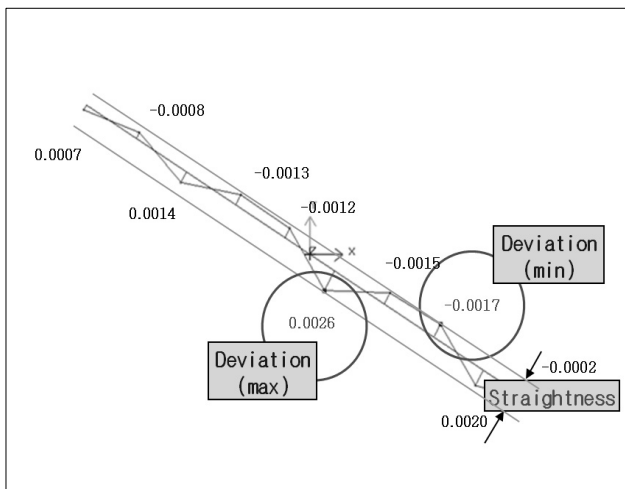


Fig. 2 Measurement of straightness

본 연구에서는 머시닝센터의 기계능력지수를 직선가공능력, 원호가공능력, 위치이송능력의 3가지 항목으로 평가하였다. 평가에 사용된 진직도, 진원도, 위치정밀도는 3차원측정기를 이용하여 측정하였으며 다음과 같이 적용하였다.

첫째, 진직도는 형체의 표면 또는 축선이 기하학적인 정확한 직선으로부터 벗어난 크기이며, 평탄한 표면이나 원통형체의 표면과 축선에 진직도 공차가 규제된다. Fig. 2와 같이 최대편차와 최소편차의 차이로 나타낼 수 있다^[10,11].

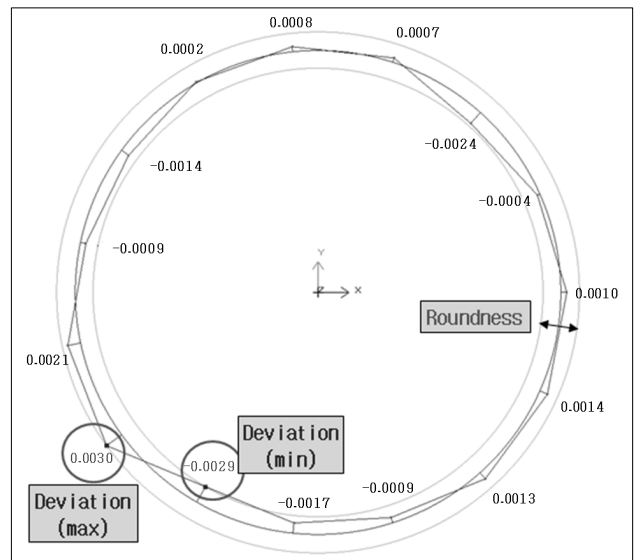


Fig. 3 Measurement of roundness

둘째, 진원도는 표면의 모든 점이 공통의 중심 또는 축선으로부터 두 개의 동심원으로 둘러싸인 공차역으로, 공통의 중심 또는 축선에 수직인 표면의 반지름상의 공차이다. 진원도는 Fig. 3과 같이 최대편차와 최소편차의 차이 값으로 나타낼 수 있다^[11,12].


셋째, 위치정밀도는 크기를 갖는 형체가 다른 형체나 데이터와 관련된 형체와의 규정된 정확한 위치로부터 벗어난 크기로 정의한다. 위치정밀도는 복합공차로써 규제 형체의 형상에 따라 진직도, 평행도, 진원도, 직각도, 동심도 등이 암시되어 규제될 수 있으며, 대부분의 부품은 위치를 갖는 형체이므로 기하학적 특성 중 가장 다양하고 널리 사용되고 있다. 위치를 갖는 원형 형상의 축이나 구멍에 대한 위치, 비원형 형상의 홈이나 돌기부분의 위치, 위치를 갖는 눈금선의 홈이나 돌기부분의 위치를 규제하는데 적용된다. 본 연구에서는 위치를 갖는 원형 형상의 구멍에 대한 위치로 적용하였다^[13,14].

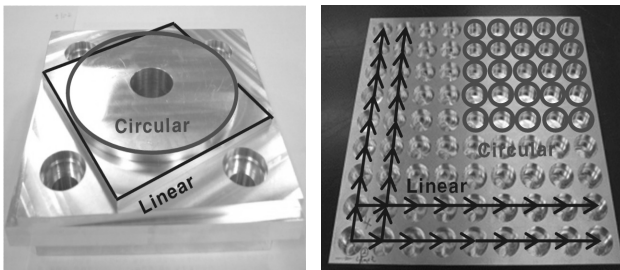
3. 기계능력지수 평가 결과

본 연구에서 기계능력지수 평가 장비는 새로 개발된 수평형 머시닝센터(모델 A)를 대상으로 하였고, 사양은 Table 3과 같다. 머시닝센터 개발시 Ram형 주축 헤드시스템, 주축 내장형 변위 센서, Twin ball screw 방식 이송시스템, Box-in-box 구조를 적용하여 가공 능력 및 정밀도의 향상을 추구하였다.

머시닝센터의 기계능력지수 평가를 위한 시편으로 Fig. 4(a)의 KS B ISO 10791-7A 160 규격 시편과 별도 설계한 Fig. 4(b)의 다공 시편 2가지를 이용하였다. Fig. 4(a) KS 규격 시편은 마름모의 직선부와 Ø108 mm 원호부의 가공 정도 능력인 직선가공능력

Table 3 Specifications of machining center

	Contents	Values
 (Model A)	Travel length (mm)	500×500×500
	Spindle speed (rpm)	24000
	Rapid feed rate (m/min)	60 (X,Y,Z)
	Cutting feed rate (m/min)	15 (X,Y,Z)
	Thermal Displacement (μm)	10
	Rotational Accuracy (μm)	10@24000
	Repeatability	1
	Acceleration (G)	1
	Max. loading weight (kg)	700
	Controller	Siemens 840D



(a) KS B ISO 10791-7A 160 (b) Hole specimen

Fig. 4 Test specimens

과 원호가공능력을 평가하였다. Fig. 4(b) 다공 시편은 $\varnothing 26$ mm 원호부를 X, Y축 30 mm간격으로 가공하여, 81개 원호부의 가공 정도와 원호부 중심 사이의 거리 측정을 통해 원호가공능력과 위치 이송능력을 동시에 평가하였다.

평가를 위한 모든 시편은 Al 6061재료로 하였고, 동일한 공구와 절삭조건으로 가공하였다. 공구는 2날 $\varnothing 12$ 평엔드밀을 사용하였고, 절삭속도는 5,300 rpm, 1,000 mm/min, 날당이송량은 0.1 mm/tooth로 하였다.

기계능력평가 수치의 신뢰도 확보를 위하여 1회 평가시 최소 25개 이상의 데이터를 확보하도록 시편 가공을 수행하였다. 즉, 기계능력지수 1회 평가 때마다 Fig. 4(a) KS 규격 시편은 25개, Fig. 4(b) 다공 시편은 1개씩을 활용하였다. 이는 기초실험 결과 Fig. 5와 같이 시편 20개 이상의 데이터로부터 기계능력지수를 산출할 경우 안정적으로 수렴함을 확인하였기 때문이다.

Fig. 6은 기계능력지수 평가 방안에 대하여 나타낸 것이다. 평가 시편의 공작정밀도 측정은 접촉식 3차원측정기를 이용하여 직선 구간은 10 point, 원 구간은 15 point 이상 측정하였다. 측정 결과는 통계 소프트웨어인 MINITAB을 사용하여 데이터를 분석함으로써 기계능력지수 평가를 수행하였다.

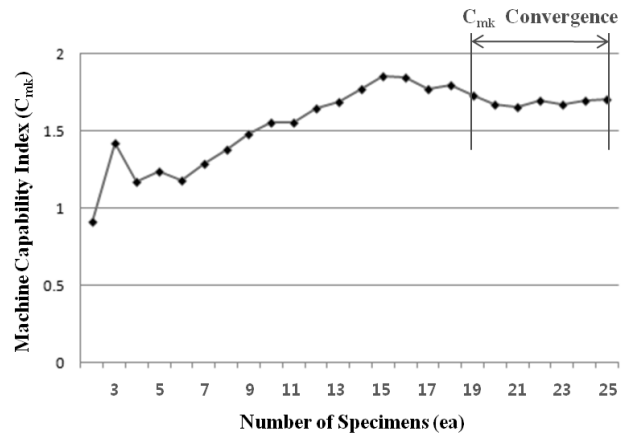


Fig. 5 C_{mk} Variation in terms of the number of specimens

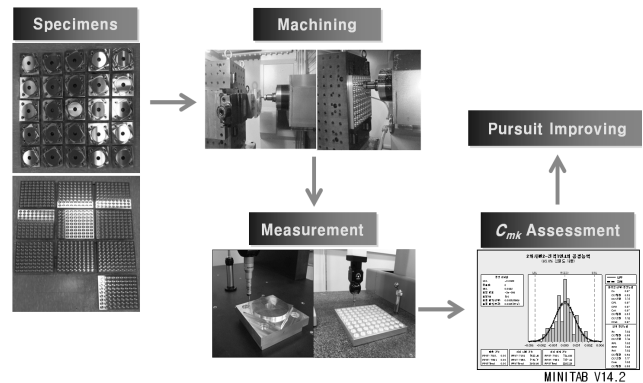


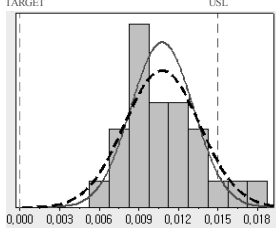
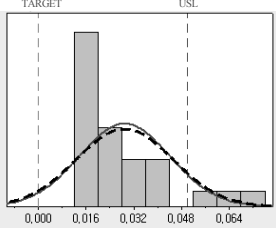
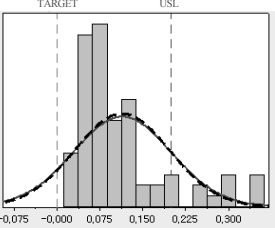
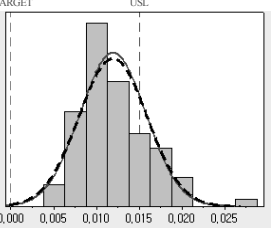
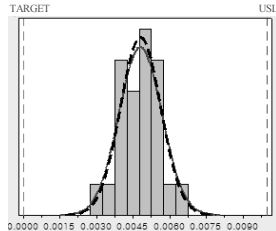
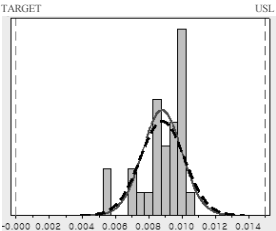
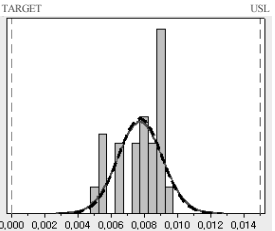
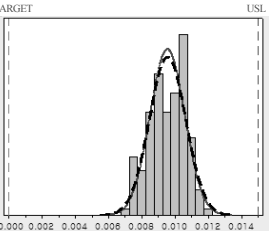
Fig. 6 Procedure of C_{mk} evaluation

KS 규격 시편으로 직선가공능력 평가시 허용값은 KS 규격 0.01 mm를 적용하였으며, 평가 결과 기계능력지수 값이 1.96~3.58로 매우 우수한 수준으로 평가되었다. 원호가공능력은 KS 규격 허용값 0.015 mm를 적용하였으며 기계능력지수 값은 1.72로 우수한 수준으로 평가되었다.

다공 시편으로 위치이송능력 평가시 KS 규격 허용값 0.05 mm보다 작은 0.015 mm를 적용하였을 때 기계능력지수 값이 1.77로 우수한 수준으로 평가되었다. 원호가공능력은 KS 규격 허용값 0.015 mm를 적용하였으며 기계능력지수 값은 1.74로 우수한 수준으로 평가되었다.

평가 대상 머시닝센터로 정상가공을 수행하기 전과 후를 비교한 결과 Table 4와 같이 정상가공 수행 전에는 KS 규격의 허용값보다 낮은 수치에서도 0.3~0.5로 모두 매우 낮은 수준이었던 반면, 정상가공 수행 후에는 최근 공작기계에 요구되는 기계능력지수 값 1.67을 상회하는 수준으로 향상됨을 확인하였다.

Table 4 Evaluation result of C_{mk} (Machining center Model A)

	Linear machining capability (KS 0.010)	Circular machining capability (KS 0.015)	Positioning capability (KS 0.050)	Circular machining capability (KS 0.015)
C_{mk} (Before finish cutting)	0.59 (0.015)	0.45 (0.050)	0.33 (0.200)	0.27 (KS 0.015)
				
C_{mk} (After finish cutting)	1.96~3.58 (KS 0.010)	1.72~1.77 (KS 0.015)	1.77~1.79 (0.015)	1.71~.79 (KS 0.015)
				

4. 머시닝센터의 기계특성 평가

기계능력지수 평가는 시편 가공을 통한 직접적인 평가 방법론으로 시간, 비용 측면에서 불리한 측면이 많다. 실제 평가에 앞서 시편의 준비가 필요하고, 시편 가공과 정밀 측정에 많은 시간이 소요된다. 기계능력지수 평가 1회 수행시마다 KS 규격 시편 25개의 가공과 측정이 필요하다. 가공시간은 시편 1개에 약 30분으로 25개 가공시 약 13시간이 소요되고, 측정시간은 시편당 약 40분으로 25개 측정시 약 17시간이 소요된다.

이에 평가 시편 가공의 과정 없이 기계능력지수를 가늠해볼 수 있는 방법론으로 기계특성 평가를 통한 기계능력지수와와의 비교 분석을 수행하였다. Fig. 7에 기계특성 평가를 통한 기계능력지수와 시편 가공을 통한 기계능력지수의 비교 분석에 대하여 나타내었다. 기계특성 평가에는 레이저측정기를 이용한 위치이송측정과 불바측정기를 이용한 원호이송측정을 수행하였고, 기계특성 측정 데이터를 이용하여 기계능력지수를 분석하였다.

위치이송능력은 Fig. 8과 같이 레이저측정기를 이용하여 다공 시편 가공 방법과 유사하게 X방향과 Y방향으로 각각 30 mm 간격으로의 직선이송 지령에 따른 실제 이송거리를 측정하였다. 원호가 공능력은 Fig. 9와 같이 불바측정기를 이용하여 반경 100 mm의 원호이송 지령에 따른 실제 원호이송 경로를 측정하였다.

위치이송능력 평가시 KS 규격 허용값 0.015 mm을 적용하고 레이저측정기의 측정값으로부터 기계능력지수를 분석한 결과

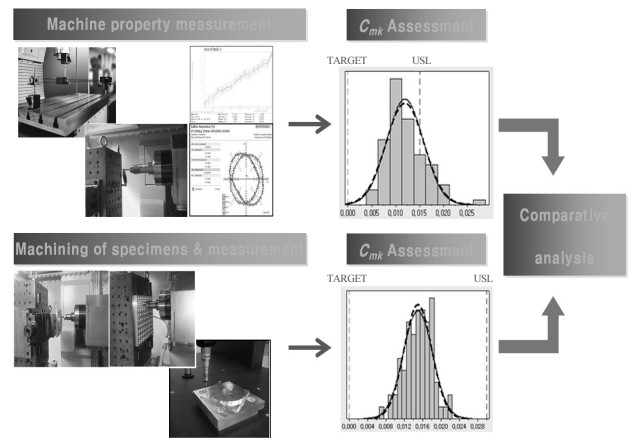


Fig. 7 Comparative analysis of machine property & C_{mk}

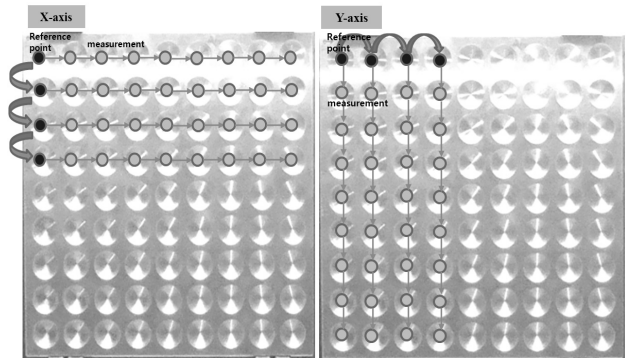


Fig. 8 Laser interferometer measurement of machining center

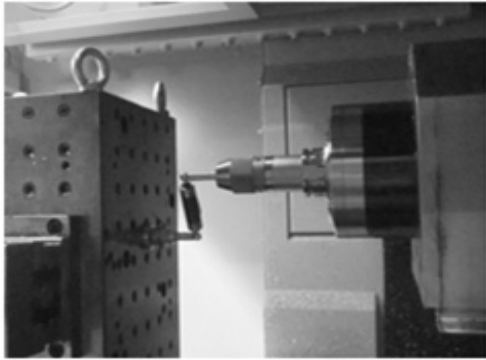


Fig. 9 Ballbar measurement of machining center

원호가공능력 평가시 KS 규격 허용값 0.015 mm을 적용하고 볼바측정기의 측정값으로부터 기계능력지수를 분석한 결과 Table 5와 같이 5.59~5.91로 높게 평가되었다. 평가 시편 가공으로부터 원호가공 기계능력지수를 분석했을 때의 1.71~1.77과 비교하면 매우 우수한 수준인 것으로 평가되었다.

기계특성 평가와 시편 가공을 통한 기계능력지수를 비교 분석한 결과, 최종적으로 시편 가공을 통한 기계능력지수 평가 수행 전에 기계특성 평가로부터 기계능력지수의 결과 범위를 먼저 확인해 봄으로써 시간과 비용 측면에서 유리한 방법론임을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 머시닝센터의 기계능력지수 평가방안을 제시하였다. ISO KS 규격의 머시닝센터 검사조건인 가공정밀도 평가를 활용하여 시편 가공 및 측정, 분석을 수행하여 진직도, 진원도, 위치정밀도에 해당하는 직선가공능력, 원호가공능력, 위치이송능력 3가지 항목으로 기계능력지수를 평가하였다.

시편 가공을 통한 기계능력지수 평가 결과 직선가공능력은 최대 3.5를 상회하는 매우 우수한 수준으로 평가되었고, 원호가공능력 과 위치이송능력은 1.7을 상회하는 수준으로 평가되었다. 3가지 항목 모두 최근 공작기계에 요구되는 기계능력지수 값 1.67 이상의 결과를 보임을 확인하였고, 본 연구의 기계능력지수 평가 방법론이 최근 공작기계의 평가에 유용하게 적용 가능함을 검증하였다.

또한, 레이저측정기와 볼바측정기를 이용한 기계특성 평가로부터 기계능력지수를 가늠해봄으로써 시편 가공을 통한 기계능력지수 평가에 앞서 사전에 시간과 비용 측면에서 효율적인 방법론임을 확인하였다.

References

- [1] Shin, H. J., Lee, J. J., 2000, A Study on Development of Process Incapability Index Model Including Gage R&R, The Korean Institute of Plant Engineering 5 35-48.
- [2] Ko, S. G., Hwang, J. M., Kim, Y., S., 2001, Practical Guideline of Process Capability Indices, The Korean Society for Quality Management 2:1 23-33.
- [3] Lee, S. H., 2008, Engineering Statistic analysis using Minitab, Eretec, Korea.
- [4] Lee, D. K., 1999, A New Multivariate Process Capability Index, Journal Research of Kum-Oh National University of Technology 20 153-160.
- [5] Kwon, N., K., 2002, A Proposed Process Capability Index for

Table 5 Evaluation result of machine property & C_{mk} (Machining center Model A)

	C_{mk} (Machine property)	C_{mk} (Specimen Machining)
Positioning capability (0.015)	4.05 ~ 4.91 (X-axis)	1.77 ~ 1.79
	 (Y-axis)	
Circular machining capability (KS 0.015)	5.59 ~ 5.91 (CW)	1.72 ~ 1.77
	 (CCW)	

Table 5와 같이 4.05~4.91로 높게 평가되었다. 평가 시편 가공으로부터 위치이송 기계능력지수를 분석했을 때의 1.77~1.79와 비교하면 매우 우수한 수준인 것으로 평가되었다.

- Non-normal Process, Master Thesis, Kum-Oh National Institute of Technology, Korea.
- [6] Stadlbauer, P., 2007, Statistic / destructive-nondestructive testing, A ThyssenKrupp Technologies Company.
- [7] Eretec Minitab Business Team, 2005, New Minitab Working Completion, Eretec, Korea.
- [8] Larsson, A., 2002, Capability in Machining Systems, A Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [9] KS, 2007, Test conditions for machining centres - Part 7 : Accuracy of a finished test piece, KS B ISO 10791-7 : 2007, Korea Standard Association.
- [10] Choi, H. S., 2006, New Tolerance theory, Sungandang, Korea.
- [11] Kim, S. S., 1999, A Study on Measuring and Evaluation Methods of Straightness of Machining Centers, Journal of The Institute Research of Mechanical Technology 2:2 59-74.
- [12] Kang, J. G., Rhee, S. Y., 1993, A Study of the Evaluation of Circularity by the Minimum Zone Principle, Center for Advanced Materials of Kyung-Nam University 3 229-238.
- [13] Jo, S. H., 2007, Application Measurement Practice, Gijeon, Korea.
- [14] Dukin, 1999, Geometrical Tolerance(GD & T), Dukin Inc, Korea.