

## 5축 공작기계 정밀도 평가를 위한 표준 공작물에 관한 연구

### A Study on the Test Workpiece for Accuracy Evaluation of 5-Axis Machine Tool

윤재웅<sup>1,✉</sup>, 김기환<sup>2</sup>, 박종탁<sup>2</sup>  
Jae-Woong Youn<sup>1,✉</sup>, Ki-Hwan Kim<sup>2</sup>, and Jong Tak Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 대구대학교 기계·자동차 공학부 (Division of Mechanical & Automotive Eng., Daegu Univ.)

<sup>2</sup> 대구대학교 기계공학과 대학원 (Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Daegu Univ.)

✉ Corresponding author: jwyoun@daegu.ac.kr, Tel: +82-53-850-6684

Manuscript received: 2014.3.31 / Revised: 2014.4.25 / Accepted: 2014.4.25

*Recently, a demand for precision 5-axis machine tools is significantly increasing, and the maintenance of machine tool accuracy becomes more important. It is very difficult to evaluate the accuracy of 5-axis M/C in the production site since it needs expensive measuring equipment and skilled engineer. On the other hand, evaluation items of 5-axis M/C are not systematically organized in the existing KS and ISO standards. In this study, the evaluation items for 5-axis M/C were derived systematically and a test workpiece was developed to evaluate the machine tool accuracy more easily. The error sources of machine tool can be estimated by machining and measuring of the test workpiece. The correlation between the machine tool accuracy and the accuracy of machined test workpiece was analyzed. As a result, the accuracy of machined test workpiece represented the accuracy of machine tool and the error sources very effectively.*

Key Words: 5-Axis Machine Tool (5축 공작기계), Test Workpiece (표준공작물), Evaluation Items (평가항목), M/C Accuracy (기계정밀도), Accuracy Evaluation (정밀도 평가)

#### 1. 서론

최근 초정밀 가공에 대한 수요가 증가하면서 다양한 고정밀 5축 공작기계가 출시됨에 따라 5축 가공에 대하여 보다 높은 정밀도를 요구하고 있다. 공작기계 자체가 가지는 정밀도를 최대한 발휘할 수 있도록 하기 위해선 공작기계의 적절한 유지/보수가 필요하다고 할 수 있다. 5축 공작기계의 정밀도를 유지함으로써 정밀가공이 가능하게 하기 위해서는 공작기계 자체가 가지고 있는 오차의 원인을 분석함으로써 그 원인을 제거해야 한다. 따라서, 공작기계를 직접 제작하여 판매하는 회사나, 공작기계를 활용하여 제품을 생산하는 업체 모두에게 공작기계를 정밀하게 측정하고 오차의 원인

을 분석함으로써 공작기계가 요구되는 정밀도를 유지하게 하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

일반적으로 5축 공작기계에서는 3축 공작기계에 비하여 회전하는 선회 축이 추가로 존재하기 때문에 다양한 오차를 가지며, 이에 따라 훨씬 더 많은 평가항목이 필요하다. 그렇기 때문에, 현재 KS 및 ISO에서 제시된 항목으로 5축 공작기계의 기계 정밀도를 평가하기에는 제한적인 부분이 많으며 추가적인 항목의 도출이 필요하다고 볼 수 있다.<sup>1</sup>

일반적으로 5축 공작기계의 정밀도를 평가하기 위해서 5축 공작기계 메이커별로 독자적인 평가항목과 평가방법을 가지고 있으나, 이는 공개되고 있지 않으며 메이커 별로 각각 다르다고 할 수 있다. 또한, 공작기계의 정밀도를 측정하기 위한 속

련된 기술자가 필요하고, 고가의 장비도 필요하며, 측정시간도 오래 걸려 사용자 입장에서는 5축 공작기계의 정밀도 평가가 매우 어려운 실정이다.

5축 공작기계의 정밀도를 판단하는 가장 보편적인 방법 중 하나는 표준공작물(Test Workpiece)을 가공하여 그 공작물의 정밀도를 측정함으로써 공작기계의 정밀도를 유추하는 방법이라고 할 수 있다. 국외 여러 대학에서 5축 공작기계의 정밀도 파악을 위한 표준공작물을 제시하였으나<sup>2,3</sup> 오차의 원인 분석이 아닌 기계의 가공능력을 제시 해주고 있는 것이 일반적이라 할 수 있다. 즉, 기준에 제시된 표준공작물은 공작기계의 성능을 정성적으로 판단할 수 있는 근거만 줄 수 있을 뿐 공작기계의 각 오차요소들을 규명한 연구는 거의 없는 상황이다.<sup>4,5</sup>

따라서, 본 연구에서는 먼저, KS 및 ISO 규격에 제시되어 있는 5축 공작기계의 성능평가 항목에 대해 분석을 실시한 후 기존의 규격에서 체계적으로 제시하지 못하고 있는 평가항목 부분을 추가적으로 도출하고자 한다. 또한, 5축 공작기계 표준공작물에 대하여 ISO규격에서 정의하고 있지 않기 때문에 본 연구를 통해 5축 공작기계에 대한 표준공작물을 제안하고자 한다. 본 연구에서는, 표준공작물을 가공하여 가공결과를 측정함으로써 오차의 원인에 대한 정량적 분석이 가능하게 할 수 있는 표준공작물을 제안하고자 한다. 최종적으로 개발된 표준공작물의 가공과 5축 공작기계의 정밀도 측정을 통하여 각 평가항목에 대한 기계 정밀도와 표준공작물의 가공정밀도와의 상관관계를 분석하고자 한다. 이와 같은 연구의 결과는 향후 표준공작물의 가공만으로 공작기계의 각 정밀도 요소 및 오차의 원인을 분석할 수 있게 될 것이라 판단된다.

## 2.5 축 공작기계 정밀도 평가

### 2.1 5 축 공작기계 평가항목

5축 공작기계의 기계정밀도를 측정하기 위한 평가항목에 관하여 KS 및 ISO 규격을 분석한 결과, 5축 공작기계에 대한 측정항목들에 대해서 독립적으로 다루지 않고 있으며 공작기계 전체에 몇 가지 선회 축에 대한 항목들만 제시되고 있었다.<sup>1</sup> 즉, 3축 공작기계 평가항목에 비해 5축 공작기계 평가항목에 대해서는 체계적인 그룹화와 정리가 필요한 상황이었다. KS/ISO 각 규격에 제시되어 있는 5축 공작기계에 대한 평가항목은 Table 1과 같다.

한편, 현재 제시되어 있는 5축 공작기계 정밀

Table 1 Evaluation Items of 5-axis machine tool presented in the ISO series

Standard	Evaluation Items
Test conditions for bridge-type milling machines	
KS B ISO 8636-2	- Parallelism of about reference plane - A-axis Angular Accuracy - C-axis run-out of error - Accuracy of spindle axis and table
Test conditions for machining centers	
KS B ISO 10791-2	- Squareness of C-axis about X,Y axis motion - Squareness of C-axis about reference plane - Existence of S-axis and A-axis in the same plane - Concentricity of S-axis and C-axis - Intersection of A-axis and C-axis - Squareness of A-axis and C-axis - Existence of A-axis and C-axis in the same plane - Accuracy of spindle axis and table
Evaluation of thermal distortions	
KS B ISO 10791-10	- Thermal distortions of S-axis

도만으로 5축 공작기계의 모든 정밀도 요소를 파악하기에는 제한적인 부분이 있기 때문에 추가적인 평가항목의 도출이 필요하다. 즉, 기존의 KS/ISO에 제시된 5축 공작기계에 관련된 항목은 총 21항목이 존재하였지만, 해당 항목들로 5축 공작기계에 대한 모든 오차요소들을 표현하기에는 많은 부분이 미흡하다고 할 수 있다. 현재 제시되어 있는 21항목은 기하학적 오차를 평가하는 항목들이 대부분을 차지하고 있는데, 열 변형 및 각 축간의 상관관계 등에 대한 정밀도 평가항목에 추가되어야 할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 3축 공작기계 평가항목에 입각하여, 선회 축이 포함된 5축 공작기계에 요구되는 평가항목들을 추가적으로 도출하였으며 기하학적인 정밀도뿐만 아니라 열 변형, 강성 및 각 축들의 상관관계 등에 대한 평가항목을 추가적으로 도출하였다. 이로써, 최종적으로 30 항목의 5축 공작기계 정밀도 평가항목을 수립하였으며 해당 평가항목에 대한 내용은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 체크되어 있는 항목은 기존 KS 및 ISO 규격에 산발적으로 포함되어 있는 항목이며, 체크되어 있지 않은 항목은 본 연구를 통해 새롭게 도출된 평가항목이다. 평가항목 가운데 점선으로 체

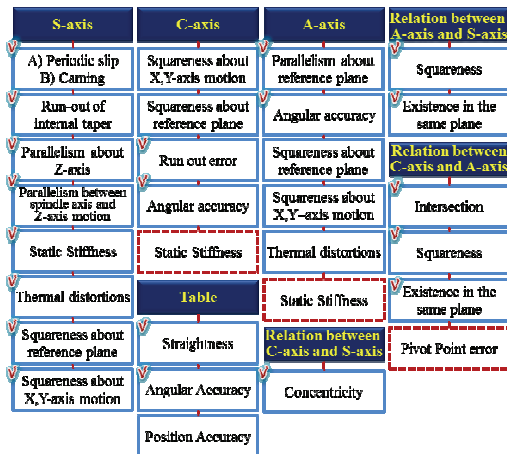


Fig. 1 Proposed evaluation items for 5-axis machine tool accuracy

크되어 있는 항목은, 축의 강성과 선회축의 Pivot Point 등에 해당되는 항목으로서, 그 특성상 개발된 5축 표준공작물에는 반영이 되지 않았다.

2.2 5 축 공작기계 정밀도 측정

한편, 5축 공작기계는 일반적으로 2개의 추가적인 선회 축을 갖는데, 본 연구에서는 도출된 평가 항목이 범용적으로 적용될 수 있는지 판단하기 위하여, 주축 Head가 2개축으로 선회하는 5축 공작기계와 Table이 2개축으로 선회하는 5축 공작기계를 각각 실험에 활용하였다. 이중 주축이 선회하는 공작기계는 정밀도가 좋지 않은 상태였으며, Table이 선회하는 공작기계는 정밀도가 높은 상태의 공작기계였다. 본 연구에 사용된 두 타입의 5축 공작기계는 Fig. 2와 같다.

먼저, 본 연구에서는 최종적으로 도출된 30항목에 대하여 5축 공작기계 정밀도 측정을 실시하였다. 도출된 30항목 가운데, 기존 규격에 있는 21항목에 대해서는 KS/ISO에 기재된 측정방법에 입각하여 기계정밀도를 측정하였다. 한편, 새롭게 도출된 9항목은 주로 직각도 및 위치정밀도에 해당되는 항목으로서, 기존 KS/ISO 규격에서 제시되어 있는 방법을 준용하였다. 각 5축 공작기계에 대한 기계정밀도 측정 결과의 일부는 Table 2와 같다.

Table 2에서 각각 A축과 C축의 각도 정밀도는 고가의 측정장비를 보유하지 못해 본 실험에서는 측정하지 못했다. 종합적으로 5축 공작기계에 대한 두 타입의 기계정밀도를 측정한 결과, Head



Fig. 2 Two different types of 5-axis machine tool for accuracy evaluation(Head-tilt and Table-tilt type)

Table 2 M/C accuracy measurement results for 5-axis machine tool(Selected)

Evaluation Item	Head - Type Result	Table - type Result
Caming of spindle	10µm	2µm
Periodic axial slip of the spindle	15µm	2µm
Run-out of internal taper of the spindle	6µm	1µm
	10µm	6µm
Parallelism of the spindle axis to the Z-axis motion	40µm	3µm
Squareness between the spindle axis and the reference plane for the 90° A-axis position	30µm	1µm
A-axis Angular accuracy	N/A	
C-axis Angular accuracy		
Squareness between the spindle axis and XY plane	15µm	4µm
Intersection of the horizontal spindle	30µm	3µm
C-axis and the A-axis shall be in the same plane	20µm	17µm
Squareness between the spindle axis and the A-axis	60µm	17µm
The spindle axis and the A-axis shall be in the same plane	30µm	17µm
Checking of coincidence of the spindle axis with the C-axis	16µm	3µm

tilting type 공작기계는 최대 100µm를 상회하는 상당히 큰 오차를 보이고 있었다. 반면에, Table tilting type 공작기계는 최대 20µm를 넘지 않는 상당히 양호한 정밀도를 보였다.

각각의 5축 공작기계에 대한 정밀도 측정을 실시해본 결과, 30개의 평가항목에 대하여 모든 오차를 측정하기에는 상당히 많은 시간이 소모되었다. 또한, 고가의 측정장비 미 보유로 인하여 정밀도 측정을 실시하는데 문제가 발생하였으며, 측정을



Fig. 3 Accuracy measurement of 5-axis machine tool

실시하는데 숙련자 또는 전문가의 부재 등 많은 부분에서 측정에 문제가 되었다. 이러한 문제들을 보완하여, 5축 공작기계의 오차의 정도와 원인을 파악 할 수 있는 표준공작물이 개발 된다면, 공작기계 정밀도를 측정하고 오차의 원인을 파악하는데 발생할 수 있는 많은 제한적인 부분이 해결될 것이라 판단된다. 따라서, 5축 공작기계 정밀도 오차에 대하여 원인 파악이 가능한 5축 표준공작물을 개발하고, 개발된 표준공작물을 가공하여 그 결과를 3차원 측정함으로써, 공작기계의 오차와 그 원인을 분석하고자 한다.

3.5 축 표준공작물

3.1.5 축 표준공작물 개발

앞서 언급한 바와 같이, 5축 표준공작물은 3축과는 달리 KS/ISO 규격에서 표준공작물의 형상이나 측정구간을 제시하고 있지 않다. 또한, 5축 표준공작물에 관련하여 발표된 논문은 대부분 기계의 가공능력을 정성적으로 나타내기 위한 용도일 뿐이며, 기계의 요소별 정밀도를 분석하기 위한 표준공작물은 거의 없는 상황이다.

5축 공작기계는 제어하는 축이 증가하기 때문에 발생하는 오차의 원인도 다양하다고 할 수 있다. 따라서, 5축 표준공작물에는 기하학적 정밀도뿐만 아니라 열 변형 및 여러 축들간의 상관관계에 대한 오차를 파악하는 요소가 추가적으로 요구되며, 테이블, 주축 스핀들, A축, C축 각각의 요소에서 A축과 C축의 관계 및 S축과 A축의 관계 등 좀 더 다양한 오차 성분 등에 대한 평가가 필요하다.

이러한 근거를 바탕으로 기존의 ISO규격에 제시 되어 있는 3축 표준공작물의 형상을 기반으로 하는, 다양한 정밀도 평가가 가능한 3차원 형상의 표준공작물을 개발함으로써 추가되는 선회축의 요소 별 오차분석이 가능하도록 하였다. 뿐만 아니라, 5축 공작기계의 오차 요소 가운데 큰 영향을

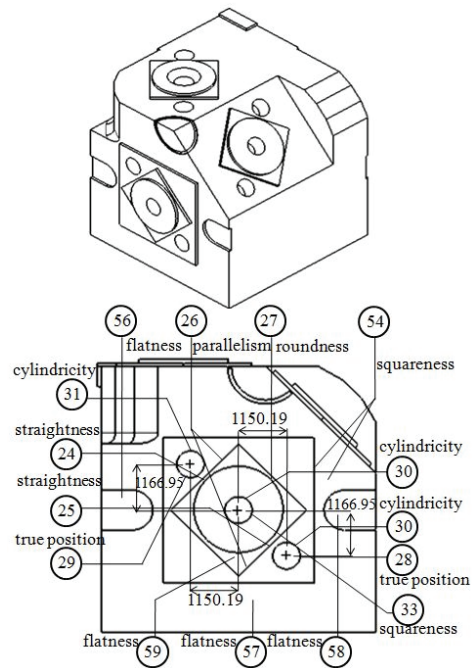


Fig. 4 Proposed test workpiece for 5-axis M/C

Table 3 Machining methods for the test workpiece (Selected)

Machining Region			
①	②	③	④
⑤	⑥	⑦	⑧

미치는 요소들을 독립적으로 파악 할 수 있도록 하기 위하여, 각 평가항목에 부합하는 형상들을 별도로 추가하였다. 개발된 표준공작물의 형상은 Fig. 4와 같다.

표준 공작물의 가공을 통해 오차요인을 파악하기 위해서는 가공 시 공구의 자세나 가공방법이 정의되어 있어야 한다. 개발된 표준공작물의 구간 별로 오차요소를 분석하기 위한 공구자세, 가공방법 및 해당구간에 관련된 평가항목을 Table 3에 나타내었다.



Table 3은 개발된 표준시편의 가공방법을 나타낸 것으로서, 다양한 가공부위 중 A축의 정밀도에 대하여 3항목, C축의 정밀도에 대하여 4항목, 축과 축사이의 관계에 대하여 1항목 등 총8개 항목만을 선택하여 나타낸 것이다. 각 구간에 따른 가공방법은 다음과 같다.

- ① 각 경사진 면의 각도에 따라 A축을 30°, 45°, 60°씩 선회시킨 후 고정하고, X축으로 이동하면서 가공
- ② A축을 가공면의 중심에서부터 ±30°선회하면서 원호 가공 실시
- ③ Y축으로 평행하게 이동하면서 해당 면 가공과 동시에, C축을 360°회전하면서 가공
- ④ Pivot Point를 가공면의 중심에 위치하고 C축을 ±30° 선회하면서 가공
- ⑤ A축을 일정 각도로 약간 기울인 상태에서 C축을 360° 회전시키면서 가공
- ⑥ A축을 90° 선회한 뒤 고정하고, 각 경사진 면의 각도에 따라 C축을 30°, 45°, 60°씩 위치하고, Z축 방향으로 이동하면서 가공
- ⑦ 체크된 부분의 홀 가공을 실시하는데, 가공 순서를 제일 마지막에 가공 실시
- ⑧ A축을 90° 선회한 상태에서 고정하고 체크된 면을 가공한다. 가공이 완료되면 대칭되는 면으로 이동하면서 A축을 -90° 선회하여 가공

### 3.2 NC 데이터 생성

설계된 표준공작물의 가공을 위해 위의 가공조건들을 반영한 NC 데이터를 생성하였다. 공작기계 정밀도 측정과 동일하게, 서로 다른 두 타입의 5축 공작기계에 대하여 각각 가공을 실시하였으며, 가공 소재는 변형률이 낮은 워커블 레진(Workable Resin)을 사용하였다. 한편, 가공 시 공구변형에 의한 가공오차를 최소화해야 5축 공작기계의 오차요소를 파악할 수 있기 때문에, 가공은 황삭과 정삭 두 번에 걸쳐서 진행 하였으며, 정삭은 최대한 가공부하를 줄일 수 있도록 하였다. 표준공작물 가공에 적용된 가공조건은 Table 4와 같다.

### 3.3 5축 표준공작물 가공

표준공작물의 가공은 그 정밀도가 매우 높아야 하므로, 본 연구에서는 표준공작물 가공을 위한 지그(Jig)를 설계하여 제작하였다. 본 지그는 가공

Table 4 Cutting conditions for the test workpiece

Spindle speed	2,000 rpm
Feed rate	100 mm/min
Depth of cut	0.5 mm
Tool length	35 mm, 40 mm
Tool diameter	16 mm, 10 mm

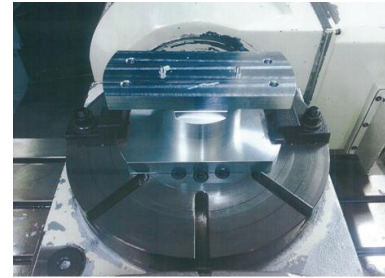


Fig. 5 Machining jig

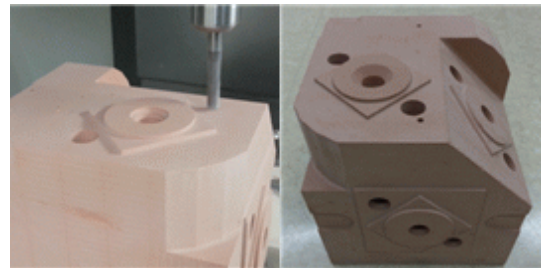


Fig. 6 Machining of 5-axis test workpiece

의 정밀도를 보장하기 위해, 기준면의 평면도 및 가공 시 공작물이 공고하게 고정될 수 있도록 설계/제작 되었다. Fig. 5는 5축 표준공작물의 형상을 보여주고 있다.

표준공작물은 서로 다른 두 타입의 공작기계에서 각각 가공되었다. 가공된 두 공작물은 각 구간에 대하여 3차원 측정을 실시함으로써, 두 공작기계가 가지는 정밀도를 분석할 수 있다. 또한, 기계 정밀도와 가공정밀도의 상관관계 분석을 통하여 가공된 표준공작물이 공작기계의 오차요소를 잘 반영하는지 분석하고자 한다.

## 4. 표준공작물 3차원 측정 및 결과

최종 가공된 두 표준공작물에 대하여 가공 정밀도를 분석하기 위해 3차원 측정을 실시하였다. 3차원 측정기는 Carl Zeiss사의 CONTURA G2모델을 사용하였다.

Table 5 Measurement list of 5-axis test workpiece

Measurement items for spindle and table accuracy	44 items
Measurement items for A-axis accuracy	8 items
Measurement items for C-axis accuracy	6 items
Measurement items for the relation between A-axis and C-axis	3 items
Measurement items for the relation between S-axis and C-axis	1 items
Measurement items for the relation between A-axis and S-axis	3 items

Table 6 CMM measurement results (selected)

Measuring item	Evaluation item	Table-type result(mm)	Head-type result(mm)
Measurement items for spindle and table			
Item #2	Straightness	0.015	0.040
Item #9	Cylindricity	0.040	0.041
Item #11	Squareness	0.004	0.009
Measurement items for tilting axis and relation of axis			
Item #47	Parallelism	0.007	0.013
Item #48	Squareness	0.005	0.017
Item #58	Parallelism	0.020	0.055
Item #60	Flatness	0.002	0.014
Item #61	Parallelism	0.006	0.020
Item #62	Parallelism	0.012	0.005
Item #63	parallelism	0.015	0.034

5축 표준 공작물에 대한 가공오차 측정을 위하여 측정항목의 선정이 필요하다. 먼저, 가공된 5축 표준공작물에서 각각의 면마다 측정하고자 하는 구간을 항목들을 선정하여 표현하였으며, 축과 축사이의 관계를 포함하여 각각의 축에 대한 오차요소를 파악하고자 하는 항목을 작성하여 나타내었다.

Table 5는 표준공작물에서 분석하고자 하는 각 축에 대한 오차요인을 항목별로 정리한 표이다. 주축 및 테이블의 오차 측정항목이 가장 많으며, 총 65개의 항목으로 구성되어 있다. 또한, 선회 축에 대한 오차요소를 독립적으로 파악하기 위하여 각 선회축과 축간의 관계에 대한 항목을 나타내었다.

본 연구에서는 총 65항목에 대하여 3차원 측정을 실시하였다. Fig. 4의 공작물 모델링 도면에 각 부위별로 측정항목을 체크하여 구분하였으며, 5축 표준공작물 전체에 대한 측정구간을 번호로 표기하였다. Table 6에 가공된 표준공작물 각 구간에 대한 측정결과를 제시하였는데, 65항목에 대한 측정

결과를 모두 반영하는데 다소 제한적인 부분이 존재하기 때문에, 주축 및 테이블에 대한 오차요소 구간과, 선회축 및 축간의 관계에 대한 오차요소 구간으로 구분하여, 대표적인 항목에 대한 측정결과를 제시하였다.


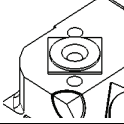
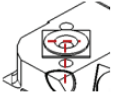

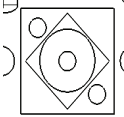
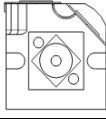

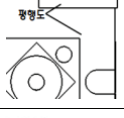
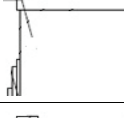

Table 6에 제시된 측정결과를 살펴보면, 표준공작물의 가공정밀도에서 Table -tilting Type의 가공오차보다 Head-tilting Type에 대한 가공오차가 더 크게 발생 하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이것은 기계정밀도 측정결과와 비슷한 양상으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 주축 및 테이블 구간 뿐만 아니라, 선회축과 축사이의 관계에 대해서도 동일하게 나타나고 있다.

이와 같은 결과로부터, 표준공작물의 가공정밀도는 공작기계의 정밀도를 반영한다는 것은 알 수 있었으나, 오차의 원인이 어디서 발생하는지에 대한 명확한 분석은 안되었으며, 오차의 원인에 대한 분석이 필요하다고 할 수 있다. 따라서, 표준공작물의 각 구간에 가공오차가 발생한 근본적인 오차 원인을 파악하기 위하여, 기계정밀도 측정결과와 가공정밀도 측정결과를 이용하여, 두 오차의 상관관계를 분석함으로써 최종적으로 가공된 표준공작물로부터 공작기계의 오차 원인을 파악해보고자 한다.

### 5. 가공오차와 기계오차의 상관관계 분석

5축 표준공작물 각 구간별로 발생하는 오차의 원인이 기계정밀도의 오차 요소와 상관관계가 있다는 점을 입증하기 위해, Table 7과 같이 표준공작물 각 구간의 가공오차와 해당 구간의 오차 원인으로 판단되는 기계정밀도 항목을 제시하여 분석하였다. 예를 들어, Table 7의 첫번째 항목은 표준공작물의 진원도 오차를 의미한다. 표준공작물의 진원도 오차는 Table-type이 0.015mm이고, Head-type은 0.04mm로 나타나고 있으며, 진원도 오차와 관계가 있는 정밀도 평가항목은 X, Y 축의 진직도와 위치 오차에 의해 결정된다고 판단된다. 이 때, 이 두 요소의 기계 정밀도 오차 항목의 합은 각각 0.013mm와 0.036mm로 측정되었다. 여기서 두 오차 항목의 합을 기준으로 하는 경우, 두 오차가 중첩된 최대 오차라는 문제가 발생할 수 있지만, 오차의 원인을 파악하는데는 큰 문제가 없다고 판단되어, 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 오차의 원인을 분석하였다. 이와 같은 방법으로 나머지 표준공작물의 가공오차와, 그 오차가 발생한

Table 7 Comparison of M/C accuracy and machining accuracy (Selected)

Measuring point	Machining error	Related evaluation item	Machine accuracy
	Table	- Straightness of X,Y-axis - Position accuracy of X,Y-axis	Table
	0.015		0.013
	Head		Head
	0.040		0.036
	Table	Thermal distortions of S-axis	Table
	0.040		0.043
	Head		Head
	0.041		0.049
	Table	- Parallelism of the spindle axis to the Z-axis motion - Squareness between the spindle axis and XY plane	Table
	0.004		0.004
	Head		Head
	0.010		0.013
	Table	Squareness between the C-axis and XY plane	Table
	0.007		0.004
	Head		Head
	0.013		0.015
	Table	Squareness between the spindle axis and the reference plane for the 90° A-axis position	Table
	0.005		0.003
	Head		Head
	0.017		0.020
	Table	Squareness of the S-axis and the A-axis	Table
	0.020		0.017
	Head		Head
	0.055		0.060
	Table	Checking of coincidence of the spindle axis with the C-axis	Table
	0.002		0.003
	Head		Head
	0.014		0.016
	Table	Squareness between the C-axis and X,Y-axis motion	Table
	0.006		0.004
	Head		Head
	0.020		0.023
	Table	Parallelism of the A-axis to the reference plane when milling heads swivel	Table
	0.012		0.013
	Head		Head
	0.005		0.009
	Table	Existence of S-axis and A-axis in the same plane	Table
	0.015		0.017
	Head		Head
	0.034		0.030

원인(평가 항목) 및 기계정밀도 측정결과를 Table 7에 나타내었다. 오차 발생 원인이 한 가지인 경우는, 표준공작물의 가공 정밀도가 기계 정밀도와 직접적인 관계가 있다고 볼 수 있다.

### 5.1 결과분석

Fig. 7은 Table 7의 결과를 다시 보여주는 것으로서, 표준공작물 각 측정 항목에 대한 가공정밀도와, 그 항목에 관련된 기계 정밀도를 그래프로

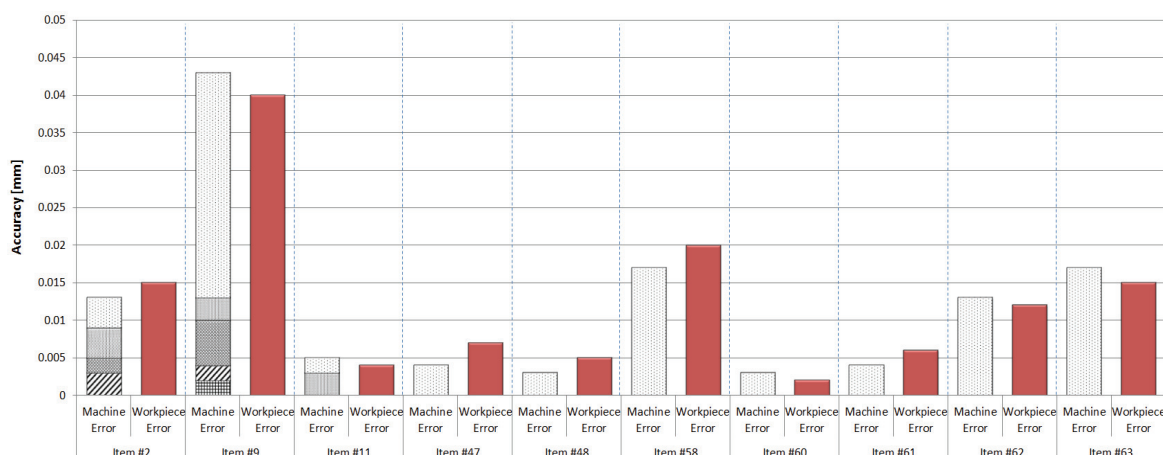


Fig. 7 Error correlation between machining accuracy of the test workpiece and M/C accuracy (Table Type)

나타낸 것이다. 그림에서 왼쪽은 관련 항목에 대한 기계 정밀도의 합을, 오른쪽은 표준공작물의 가공 정밀도를 나타낸다.

대부분의 항목에 대하여, 측정된 표준공작물의 가공오차가, 기계정밀도 오차 요소의 합과 거의 유사한 값을 나타내고 있으며, 이는 표준공작물의 해당 오차들이 공작기계의 각 오차 원인을 충분히 반영하고 있다는 것을 의미한다.

한편, 상관관계를 비교하기 위한 두 타입의 5축 공작기계 정밀도 측정 과정에서, 기본적으로 선회축의 회전 방식이 다르기 때문에 Table-type의 5축 공작기계의 경우, 4 항목에 대한 정밀도 측정이 불가하였다. 이것은 공작기계 선회축의 제한된 회전으로 인해 발생하는 불가피한 한계 때문이다. 또한, A축과 C축에 대한 각도 정밀도에서 고가의 측정장비를 보유하지 못함에 따라, 본 실험에서는 측정하지 못하였으며 이는 향후 측정장비를 확보하여 별도로 측정을 실시할 계획이다.

최종적으로 Head-type과 Table-type에 대한 기계 정밀도 측정항목 및 측정하지 못한 항목과 상관관계 편차에 대한 결과를 Table 8에 제시하였다. 앞서도 언급한 바와 같이, 표준공작물의 가공 정밀도는 몇 개의 기계 오차 항목과 연관되어 지며, 기계 오차의 총합은 표준공작물의 가공정밀도와 비슷한 정량적 값을 가져야 한다. 그러나, 표준공작물의 가공정밀도는 각 기계 오차 요소들이 합해지거나 혹은 상쇄되어져 작용한 반면, 관련된 기계 오차의 값은 모두 합하여 얻어진 값이므로 그 값이 동일하기는 어렵다고 할 수 있으며, 본 연구

Table 8 Analysis result of 5-axis test workpiece

	Head Type	Table Type
Total No. of measuring object	65 items	61 items
No. of items couldn't be measured	6 items	6 items
No. of measurement items (A)	59 items	55 items
No. of items within $\pm 30\%$ error (B)	54 items	49 items
Correlation ratio (B/A)	91.5%	89.1%

에서는 기계오차의 총합과 표준공작물의 가공오차가 30% 정도의 오차범위 안에 들면, 그 연관성이 있다고 판단하였다.

Table 8에서 표준공작물 가공오차와 기계 오차의 연관성비(Correlation ratio)는 이와 같은, 오차범위 30% 안에 들어가는 표준공작물의 측정 항목 수를 나타내고 있으며, 이것이 평균 90% 정도에 달한다는 것은, 대부분의 항목에서 상관관계를 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 표준공작물은 5축 공작기계의 정밀도 및 그 오차 원인을 잘 나타내고 있다고 판단된다.

한편, Table 8에서 볼 수 있듯이, 정밀도가 높은 Table-type 5축 공작기계와 정밀도가 낮은 Head-type 5축 공작기계 각각이 모두 유사한 상관관계를 보이고 있으므로 표준공작물의 가공을 통해 공작기계의 정밀도뿐만 아니라 그 오차의 원인도 알 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.



## 6. 결론

본 연구에서는 먼저, 기존의 규격에서 체계적으로 제시하지 못하고 있는 5축 공작기계의 정밀도 평가항목을 체계화 하였으며, 추가로 적절한 평가항목을 도출하였다.

도출된 5축 공작기계 평가항목을 이용하여 Head 회전형 및 Table 회전형의 두 타입에 대한 5축 공작기계 정밀도 측정을 수행하였다. 또한, 5축 공작기계에 대하여 단순히 기계의 가공능력을 보여주기 위한 표준공작물이 아닌 5축 공작기계의 다양한 오차 요소들을 명확히 파악할 수 있는 5축 공작기계를 위한 표준 공작물을 개발하였다.

본 연구에서는, 개발된 5축 표준공작물을 가공하고 가공오차를 측정하여, 표준공작물에 구간별로 발생하는 가공오차의 가장 큰 원인이 공작기계의 특정한 정밀도 오차에 있다는 것을 증명하였다.

한편, 기계오차와 가공오차의 상관관계를 분석한 결과, 표준공작물 각 구간에 대한 총 65항목 가운데, 90% 이상의 오차항목에서 두 오차가 상당히 유사한 경향을 보이고 있다는 것을 알 수 있었다. 특히, 각각 정밀도가 다른 두 타입의 5축 공작기계에 대하여 모두 같은 결과가 나타난 것을 미루어 볼 때, 기계정밀도의 오차 정도에 관계없이 표준공작물의 가공만으로 충분히 5축 공작기계에 대한 오차요소를 파악할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구의 결과는, 공작기계 정밀도 평가의 다양한 문제들을 충분히 보완할 수 있을 것 이라 판단되며, 현장에서 바로 활용 가능할 것으로 판단된다.

한편, 상관관계를 좀 더 높일 수 있도록 추가적인 연구가 필요하며, 측정항목도 65개에서 보다 축소함으로써 표준공작물의 가공과 측정시간을 현재보다 단축할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업원천기술개발사업의 “대형복합형상 가공용 Gantry형 5축 가공기 개발” 과제의 일환으로 연구되었습니다.

## REFERENCES

1. ISO, “Test Conditions for Machining Centers,”

[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=54730](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54730) (Accessed date 23 April 2014)

2. Schmitz, T. L., Ziegert, J. C., Canning, J. S., and Zapata, R., “Case Study: A Comparison of Error Sources in High-speed Milling,” *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 126-133, 2008.
3. Xu, X. and Newman, S. T., “Making CNC Machine Tools more Open, Interoperable and Intelligent-A Review of the Technologies,” *Computers in Industry*, Vol. 57, No. 2, pp. 141-152, 2006.
4. Bringmann, B., Besuchet, J., and Rohr, L., “Systematic Evaluation of Calibration Methods,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 529-532, 2008.
5. Ibaraki, S., Sawada, M., Matsubara, A., and Matsushita, T., “Machining Tests to Identify Kinematic Errors on Five-axis Machine Tools,” *Precision Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 387-398, 2010.