

컴퓨터를 이용한 삼차원 측정기 및 공작 기계의 정밀도 측정기술



박희재

포항공대 산업공학과 조교수

●1961년생.
●3차원 측정기 및 공작 기계에서의 입체 오차 측정 및 해석에 대하여 전공하였으며, 정밀측정, 정밀공학 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

공작기계와 측정기기류는 산업현장에서 점점 그 수요가 증대되고 있다. 초기 단순한 기능위주의 기계의 선택, 사용으로부터 고정도, 소형, 경량화, 다기능화의 세계적 추세에 비추어 볼 때, 측정기기류와 공작기계에 있어서의 고정밀도 기술은 점점 그 수요가 증대되고 있다. 특히 현재 사용 또는 제작중인 기계의 정밀도를 측정하여 체계적으로 진단, 관리하는 정밀 측정기술은 그중의 핵심기술로서, 전통적으로 선진국의 산업현장에서 내려오든 현장기술이든 측정기술의 중요성이 본격적으로 대두된 것은 선진국에서도 비교적 최근의 일이다. 최근 컴퓨터의 발달에 힘입어, 종래의 측정기술들을 적용함에 있어서 측정자체의 온라인화, 측정해석의 정확성이 이루어지게 되었다. 이 글에서는 현장 및 학계에서 정밀측정기술에 대해서 관심을 가진 분들을 위해서 공작기계 및 측정기기의 정밀도를 측정하는 방법 등을 소개하고, 또한 이와 관련하여 포항공대 정밀측정실에서 개발 또는 개발중인 측정방법 등과 측정의 컴퓨터화 등에 대해서 간략히 소개하도록 한다.

2. 공작기계 및 측정기의 오차

2.1 오차의 정의

공작기계 및 측정기기에서 오차의 정의는 일반적으로 더욱 정확한 기준(reference standard) 등에 의해서 알고 있는 참값(true value)과 기계가 표시하고 있는 값(공칭값: nominal value)의 차이로 설명된다.

즉, 오차=참값-측정값이며, 이 때 오차는 절대치로 표시하기도 하며, 일반적으로는 부호와 함께 고려하여, 오차교정(보상) (error correction, compensation)을 위한 데이터로 사용된다. 공작기계와 측정기의 정밀도에 영향을 주는 요소와 이와 관련한 오차의 분류가 표 1에 있다.

2.2 오차의 원인에 따른 분류

(1) 기하학적, 기구학적 오차(Geometric and Kinematic Error)

기하학적 오차는 기계와 그 부품의 기하학적 부정확성(geometric inaccuracy), 기계적 마모, 조립의 오차 등의 원인으로 인해서 발생하는 오차이다. 이에는 기계눈금(scale)의 오차로 기인하는 위치오차(positional error), 가이

표 1 오차의 분류와 원인

분 류	오차의 원인
기하학적, 기구학적 오차	위치, 각도 오차 진직도 오차 직각도 오차 기능 동작 오차 원인-기계 마모 조립 오차 가공 오차 스케일 오차
하중관련 오차	기계 자중 공작물 하중 가공, 측정력
온도관련 오차	구동모터의 온도변화 투입압축공기의 온도변화 열적팽창과 구조적 힘
환경 오차	압축공기의 압력변화 외부 진동/소음
소프트웨어 오차	알고리즘 오차

드웨이의 기하학적 부정확으로 인한 진직도오차 및 각도오차, 축간의 직각이 맞지 않는 직각도오차 등이 있다. 이러한 기하학적·기구학적 오차는 기계의 정밀도를 결정하는 중요한 요소로서, 정밀한 측정방법에 의해서 측정되어야 하며 필요한 경우 교정을 위한 자료로 사용되어 진다.

(2) 하중 관련 오차(Load Induced Error)

피가공물, 피측정물 등의 하중, 기계의 자중, 그리고 가공력에 의한 기계구조 자체의 변화와 관련한 오차이며, 특히 가공력이 매우 큰 공작기계는 하중과 관련한 오차가 매우 크게 된다.

(3) 온도 관련 오차(Thermal Induced Error)

기계의 장시간 작동으로 인하여, 구동모터의 온도 등이 상승하게 되면 기계는 구조적 변형을 통해 오차를 갖게 된다. 또한 기계가 온도 조절이 되어 있지 않은 대기중에 노출되어 있을 때, 대기의 온도변화에 따라 기계의 각부위

는 변형하게 된다. 이러한 온도변화와 관련한 오차는 실제의 기계 오차측정에서 큰 영향을 보이는데, 따라서 정밀한 측정과 정밀도 관리를 위해서는 온도조절을 위한 설비를 구상하여야 한다. 일반적으로 온도와 관련한 오차는 열전대 등을 통한 온도측정과 병행하여 이루어진다.

(4) 환경 오차(Environmental Error)

환경오차는 기계에 입출하는 압축공기, 냉각수 등의 온도변화로 생기는 온도 관련 오차와 진동, 소음 등에 의한 오차 등을 들 수 있다.

(5) 소프트웨어 오차(Software Error)

현재 대부분의 측정기와 공작기계는 NC/CNC 콘트롤러에 의한 운동제어 및 측정이 되고 있으며, 이때 운동 소프트웨어, 계산 알고리즘, 아래자리 잘림오차, 보간오차 등은 측정기 및 공작기계의 정밀도에 영향을 주게 된다. 소프트웨어 오차가 정밀도의 문제로 대두된 것은 비교적 최근의 일이며, 이는 소프트웨어 게이지 등으로 측정이 가능하다. 이상의 오차중에서도 기하학적 오차는 기기의 정밀도에 직접적으로 영향을 미침과 동시에 기기자체내에 내재하고 있는 오차로서 기기의 오차교정 및 보정을 위한 중요한 오차가 된다.

2.3 오차의 특징에 따른 분류

위에서 언급한 오차는 그 특징에 따라 크게 계통오차(systematic error)와 우연오차(random error)로 나뉜다.

(1) 계통오차(Systematic Error)

계통오차는 영국 공업표준⁽¹⁾에 따르면, 동일한 측정대상물을 반복적으로 같은 조건하에서 측정할 때, 크기와 방향이 변하지 않으며, 또한 측정조건들이 변하게 되면 일정한 법칙에 따라 변하는 오차로 정의하고 있다. 실제로 측정현장에서는 계통오차를 반복측정의 평균치로서 고려하는 것이 보통이며, 일단 오차가 계통오차인 것으로 밝혀지면, 오차보정 등을 통해서 오차를 줄일 수 있고, 또한 예측도 가능하게 된다. 운동방향에 따라서 오차의 방향과 크

기가 규칙적으로 바뀌는 히스테리시스 오차(hysteresis error)도 계통오차의 범주에 들어간다.

(2) 우연오차(Random Error)

우연오차는 계통오차와 같은 측정조건 하에서 측정이 수행될 경우, 측정오차의 크기와 방향이 예측할 수 없는 임의형태를 취하는 오차로 정의되고 있다. 실제적으로는 반복측정치들의 표준편차, 분산 등으로 표시하며, 이는 측정치들의 흩어짐(dispersion)과 관련되어 있다.

3. 측정기 및 공작기계에서의 기하학적 오차

3.1 한축운동에서의 자유도

한 방향을 따라서 운동하도록 되어있는 한 축운동기구를 고려할 때, 6개의 오차성분이 존재하게 된다. 이는 가이드웨이를 따라서는 수직방향의 진직도 오차(vertical straightness error), 수평방향의 진직도 오차(horizontal straightness error)가 있게 된다. 또한 각도오차로서 운동방향으로 존재하는 롤오차(roll error), 운동의 수직방향으로 존재하는 요오차(yaw error), 그리고 운동평면내에서 수직방향으로 존재하는 피치오차(pitch error)가 있다. 운동학적으로는 1자유도 방향으로만 움직이도록 설

계·제작되었지만, 가공에서의 오차 등으로 위치오차를 제외한 5개의 오차가 발생하고 운동방향으로는 실제거리와 기계좌표 간의 오차가 존재하여 위치오차를 이루게 된다. 즉, 6개의 오차성분을 갖게 되는데 이는 공간상에서의 한 점이 6자유도를 갖는 것과 비교될 수 있다. 이때, 진직도오차와 각도오차 등은 특히 가이드웨이의 구동요소가 가이드웨이로부터 긴팔을 갖고 있을 경우 (아베 오프셋: abbe offset) 팔 끝에서의 위치오차는 크게 증폭되어 오차가 커지는 이른바 아베의 오차(abbe error)가 생기

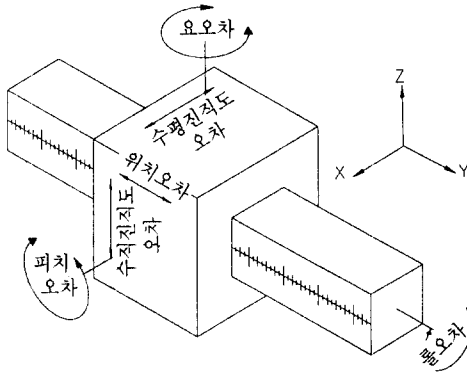


그림 2 가이드웨이를 따라서 존재하는 6자유도 오차 성분

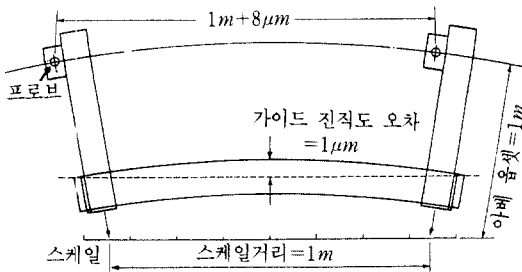


그림 1 아베오프셋과 가이드 진직도 오차가 측정에 미치는 영향

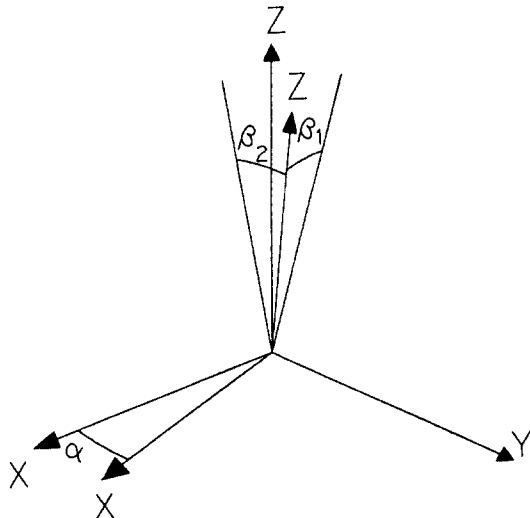


그림 3 3축간의 직각도 오차

게 된다. 그림 1은 가이드의 직각도 오차가 1 마이크로이고 아베 옵셋이 1미터일 때, 팔끝에 있는 프로브에서의 오차는 8마이크론이 됨을 보이고 있다.

일반적으로 다축기기인 경우, 한 축에 대해서 6개의 기하학적 오차 이외에도 축간의 조립 오차인 직각도 오차가 존재하게 된다. 즉, 3축 운동을 하는 기계는 각축간의 직각도 오차로서 3개의 성분이 있다. 그림 2는 가이드를 따라서 존재하는 6개의 오차성분을 보이고 있고, 그림 3은 3축기계의 경우에 축간의 직각도 오차를 정의하고 있다.

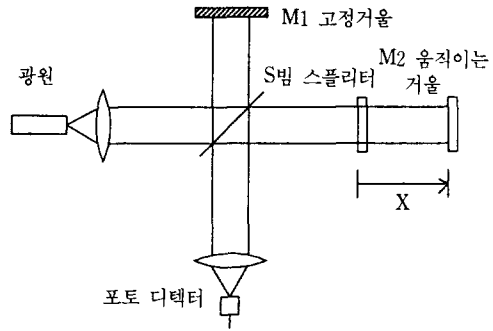
3.2 위치오차 측정

위치오차측정은 스케일의 오차를 측정하는 것으로 스케일보다도 더욱 정밀한 자로서 측정하며, 통상 레이저 측정기(laser interferometer), 정밀스케일, 스텝게이지(체크마스터), 블록게이지 등이 있다. 표 2는 산업현장 및 실험실에서 많이 쓰이고 있는 상용길이측정장비들을 보인다.

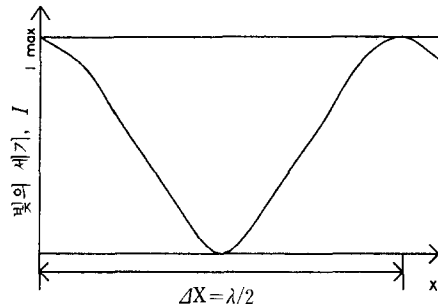
레이저 측정기는 ISO에서 규정한 정확히 1미터를 구현하는 구체적 장치이며, 이는 633나노미터의 파장을 갖는 헬륨-네온 레이저광원을 마이클슨 간섭계 원리를 이용하여 측정코자 하는 길이 안에 있는 파의 개수를 계산하여 파장을 곱해서 거리를 측정하는 장치이다. 이는 공작기계 및 측정기 정밀도를 측정하는데 사용되는 핵심적인 장비중의 하나이다. 그림 4와 그림 5는 각각 마이클슨 간섭계의 원리와 현재

상용의 레이저 측정기의 원리를 보여준다.

측정방법은 레이저발전기, 간섭계, 반사경, 거리표시 및 보정장치 등으로 구성된 측정기를 기계에 설치하고 기계의 축을 움직여 가면서 실제 거리를 레이저로 측정하고 그 때의 기계의 좌표를 읽어서 두 값의 차이로 오차를 계산하는 것이다. 길이 측정장치로 축을 측정할 때의 전형적인 칼리브레이션 곡선이 그림 6에 나



(a) 측정장치



(b) 측정신호

그림 4 마이클슨 간섭계의 원리

표 2 상용 길이 측정장비의 측정범위와 정밀도

장 치	측 정 범 위	해 상 도	정 밀 도
레이저 측정기	100M	0.025UH	3p.p.m ^(*)
길이 스케일(현미경 부착)	1M	0.05UM	2UM
스텝 게이지(인디케이터 부착)	0.5~1.5M	1~2.54CM	0.1UM ^(**)

* 위의 정밀도를 얻기 위해서는 세밀한 환경조건의 보상을 요한다.

** 위의 정밀도는 매우 정확한 온도의 조절하에서 칼리브레이션된 스텝게이지와 전자식 표시기를 이용하여 얻을 수 있다.

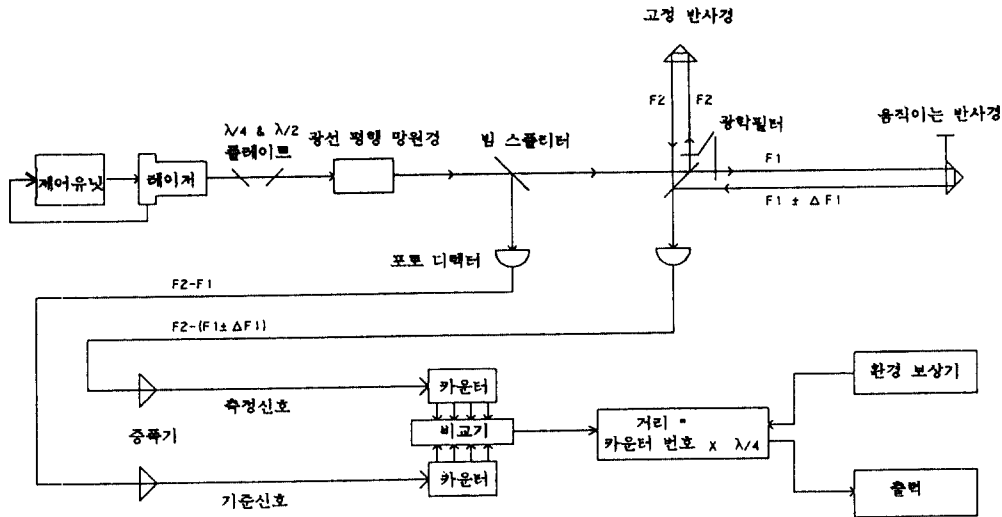


그림 5 상용레이저 측정기

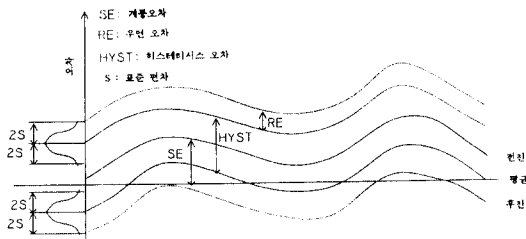


그림 6 길이 오차 칼리브레이션 곡선

타나 있다. 그림 6에서 전진과 후진에 따라서 측정을 수행하는 이유는 공작기계에서 흔히 나타나는 백래시 오차(back lash error)를 측정하기 위한 것이다. 마이크로 컴퓨터의 발달로 레이저 측정기를 이용한 측정은 거의 온라인 측정이 가능하며 상용의 소프트웨어도 나와 있는 상황이다. 레이저를 이용할 때 주의해야 할 사항은 환경의 영향이 정확하게 모니터링되지 않으면, 매우 부정확한 측정값이 나오게 된다. 섭씨온도 1도, 0.1인치 수은주압력차이, 30% 습도차이 등은 각각 측정치에서 1ppm(part per million, 즉, 1미터에 대해서 1마이크론)의 오차를 유발시키게 되므로 주의를 요한다. 또한 데드패스가 작도록 레이저를 설치해야 하는데, 데드패스는 간섭계와 리셋점과의 거리를 말하

며, 실제로 이 거리는 온도의 영향을 고려하지 못하는 거리이므로 오차의 원인이 되게 한다.

측정코자 하는 축과 레이저광선이 평행이 되지 않는 원인에 의한 오차로 코사인 오차가 있다. A를 평행오차, L을 측정길이라고 할 때, 코사인 오차는 $(1 - \cos A)L$ 이 되며 1미터에서 1밀리미터의 평행도 오차가 있을 경우 이로 인한 코사인 오차는 약 0.5 마이크로 정도이다. 따라서 레이저 인디케이터의 광선의 세기(intensity)를 전측정구간에서 높게 갖도록 세트해야 한다.

한편 레이저 측정기는 대개 풀세트의 경우 정밀급의 경우 약 5천만원 정도를 호가하며, 사용방법 등을 능숙하게 조작하기 위해서는 잘 훈련된 요원이 필요하게 되어 중소기업 및 측정전문 인력을 확보하지 못한 현장에서는 애로점이 되어왔다. 포항공대 산업공학과 정밀측정 실험실에서는 이러한 현실에서 레이저에 비해 매우 경제적이며, 정밀도도 레이저 못지 않는 스텝게이지를 이용한 길이 측정방법을 개발하였다. 스텝게이지(현장에서는 통상 체크마스타라고 부름)는 정밀한 블록게이지를 일정한 스텝으로 강체구조에 배열한 것으로 길이는 대개 300밀리에서 1500밀리까지의 것이 있다. 이 스

탭게이지를 레이저측장기로 정확하게 측정하여 실제의 블록간 간격을 정확히 안 후 이 데이터를 마이크로로 컴퓨터에 입력시켜 스텝게이로 측정을 할 때마다 측정치를 교정토록 한다. 실제로 600밀리의 스텝게이지를 정밀 측정하여 교정한 후, 상용 3차원 측정기에 온라인으로 연결하여 위치오차 측정을 마이크로 컴퓨터 상에서 수행하여 매우 정확하며 효율적인 방법임을 입증할 수 있었다. 그림 7은 3차원 측정기의 한 대각선을 스텝게이지와 온라인으로 연결된 마이크로 컴퓨터 상에서 측정된 결과이다.

개발된 이 시스템⁽⁶⁾에서는 스텝게이지를 측정기의 작업공간 임의의 위치에서 초기의 몇 정을 입력시켜주면 자동적으로 측정기의 측정 경로가 생성되어 측정기에 다운로드된 후 자동 측정을 수행하며 측정치의 해석 및 오차계산을 실시간에서 수행하여 결과를 컴퓨터 화면에 띄어주게 된다.

한편 이와는 별도의 프로그램으로서 상용 레이저 측정기와와의 접속(interface)이 가능해서 측정기와 공작기계를 레이저 측정기로 측정하여 오차를 해석하는 프로그램도 개발되었다.⁽³⁾

3.3 각도 오차

측정기 및 공작기계의 각도오차는 기본적으로 길이측정으로부터 구해진다. 즉, 윗셋거리를 갖는 평행한 두 측정선의 측정을 통하여 각도오차를 측정함이 가능하다. 레이저 측정기를 이용하여 각도를 측정하는 원리를 그림 8에 보이고 있다. 즉, 발전기에서 나온 주파수 F1, F2의 레이저 광선은 일차로 빔스플리터 (beam splitter)를 통해 분리되어 F2-F1의 주파수 차이가 비교기(comparator)로 가고, 잔여 F1, F2는 빔 벤더 (beam bender), 트윈 리플렉터 (twin reflector)를 통해서 각각의 길이가 측정되게 된다. 거리에 따라서 변화된 레이저의 주파수의 차이가 다시 비교기로 가서 원래의 주파수차이 F2-F1과 비교하여 변위차를 구하고 각도를 구하게 된다. 윗셋거리를 갖는 스텝 게이지측정을 통해서 각도오차 측정이 또한 가능

하다. 이러한 레이저 측정기나 스텝 게이지로는 각도오차 중에서도 피치오차, 요오차 등을 측정하는 것이 가능하다. 롤오차와 기타 각도를 측정하기 위한 정밀각도측정장치로서 정밀 레벨이 있다. 이는 진자의 연직방향의 지지특성을 이용한 것으로 수직한 진자의 양단에는 정밀선형측정장치(LVDT : linear variable displacement transducer)가 들어 있어서 진자와 진자의 하우싱 간의 상대 변위를 측정하여 각도를 계산한다. 표 3에는 현재 각도 측정장치들의 종류와 측정범위, 해상도 및 정밀도 등을 보이고 있다. 이러한 각도오차 측정장치는 각도오차 자체뿐만 아니라 변위 증분 방법에 의한 진직도 및 편평도를 측정할 수 있다.

3.4 진직도 오차 측정

진직도 오차도 레이저 측정기에 진직도 옵틱

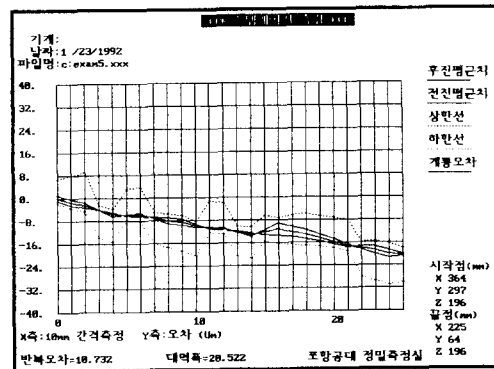


그림 7 3차원 측정기의 대각선 칼리브레이션

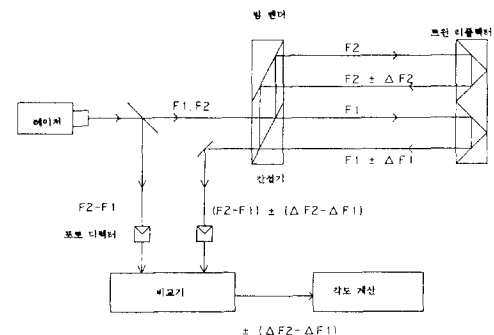


그림 8 레이저 측정기를 이용한 각도 오차 측정원리

표 3 상용의 미세각도 측정장비의 측정범위와 정밀도

장 치	측 정 범 위	해 상 도	정 밀 도
레이저 측정기	+50 min (linear ra.) +10 deg (with corr.)	0.1 sec	0.1 sec
오토콜리메터 (거울 장착)	10 min~10sec	range/1000	0.1 sec ^(*)
스피릿레벨	10 min	1 sec	1 sec
전기정밀레벨	+1 deg	0.5~0.1 sec	0.1 sec ^(**)

* 위의 수치는 성능이 좋은 오토콜리메터의 경우이다. 이 정밀도는 장치의 범위에 영향을 받는다.

** 높은 해상도의 A/D 인터페이스를 사용할때, 0.1sec의 정밀도를 얻을 수 있다.

표 4 상용의 큰각도 측정장비의 측정범위와 정밀도

장 치	측 정 범 위	해 상 도	정 밀 도
옵티컬 테이블	360deg	40deg	1sec ^(**)
인덱싱 테이블	360deg	10min	0.1sec ^(**)
그레이팅 스케일	360deg	1sec	1sec
샤프트 인코더	360deg	0.01deg	0.03deg

* 이 정밀도는 사용한 오토콜리메터와 거울의 질에 많은 영향을 받음.

** 더욱 정밀한 샤프트 인코더가 사용 가능하지만, 사용범위가 매우 제한됨.

스를 장착하면 측정이 가능하다. 그러나 진직도 옵틱스는 길이 또는 각도 옵틱스에 비해서 장착 및 일직선 맞춤(alignment)이 용이하지 않으며, 가격도 상당히 비싼 것이 흠이 되고 있다. 이 글에서는 스트레이트 에지를 이용해서 동작기계 또는 측정기의 진직도 오차를 정밀하게 측정하는 방법을 소개하기로 한다.

(1) 스트레이트 에지 칼리브레이션

스트레이트 에지는 탄소강, 세라믹, 석제품들이 있으며, 국내에서 정밀가공을 하는 업체에서 제작 및 구입이 가능하다. 통상 직사각형의 단면이 보편적으로 많이 쓰이고 있는데, 양쪽 에지부분에서 진직도가 나오도록 가공되어져 있다. 가공된 스트레이트 에지는 공인 검교정 기관에서 검교정을 받아서 납품받게 되는

데, 이 때 에지전체의 진직도공차가 KS 등의 규격에 맞는지를 주로 측정하기 때문에 에지내의 상세한 진직도오차 측정을 수행해보는 것이 바람직하다.

에지의 진직도는 각도측정을 수행할 수 있는 장비는 어느 것이나 사용할 수 있다. 즉, 정밀레벨, 오토콜리메터(auto collimator), 레이저(laser) 등의 미세각도 측정장치로 에지면을 따라서 각도의 변화를 측정한다. 측정된 각도의 변화는 변위로 환산되어 측정기준면에 대한 에지의 형상이 계산된다. 계산된 에지면의 형상은 임의의 측정면에 대한 것이므로 어떤 상대적 기준면을 잡아서 그 면으로부터의 상대 변위를 진직도로 하는 것이 바람직하다. 이 때 기준면을 고려하는 방법에는 세 가지가 있다.

1) 양끝점 기준선(Terminal Based Reference Line)

측정된 에지 데이터의 맨처음과 나중을 연결하는 선을 기준선으로 하는 것으로 전통적으로 내려오던 방법이다. 양끝점 기준선에 의한 진직도계산은 측정데이터 그래프로부터 매우 쉽게 찾아질 수 있으며, 진직도오차는 이 기준선으로부터의 상대 변위로 하여 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 진직도 계산의 중심이 되는 기준선을 설정하는데 있어서 중간데이터의 크기에 관계없이 양끝점만으로 한다는 점에서 양끝점의 데이터에 오차가 있을 경우 문제가 생기게 된다.

2) 최소 자승 기준선(Least Squares Reference Line)

측정된 에지의 변위데이터를 모두 고려하여 최소자승법에 의하여 기준선을 결정한다. 즉, 어떤 기준선을 찾는데 있어서 그선에 대한 상대변위의 제곱의 합이 최소가 되게 하는 기준선은 수학적으로 유일한 값이 존재하며, 이는 변분원리에 의해서 쉽게 구할 수 있다. 한편 기준선을 구하는데, 양끝점만이 아닌 모든 측정점이 사용된다는 점과 측정에서의 오차가 최소화될 수 있다는 면에서 매우 유용한 방법이라 하겠다. 그러나 데이터가 많아질 경우, 수치계산의 양이 많아져서 컴퓨터 등을 필요로 한다.

3) 최소거리 또는 최소영역 기준선 (Minimum Separation or Minimum Zone Reference Line)

진직도오차를 정의할 때, KS와 ISO 등과 같은 기준에 의하면 진직도공차(straightness tolerance)는 측정데이터를 모두 포함하면서 거리가 최소가 되는 평행한 두 직선을 기준으로 했을 때에, 그 두 직선 간의 거리를 진직도공차로 정의하고 있다. 따라서 측정 데이터로부터 최소거리를 갖는 두 직선을 구하는 것이 필요하며, 이는 일종의 최적화의 문제로서 몇 가지 방법들이 제시되었다. 현재 포항공대 정밀측정 실험실에는 그 중에서도 마이크로 컴퓨터에 연결하여 쓸 수 있는 시스템의 씨워 들리

기(enclose tilt) 방법의 컴퓨터 코드가 있으며, 현재 새로운 방법에 의해서 진직도, 원통도, 평행도 등을 구하는 방법이 개발되고 있다. 표 5는 주어진 기하학적 형상 데이터로부터 양끝점 기준선, 최소자승기준선, 최소거리 기준선방법에 의해서 진직도 오차를 해석한 예를 보여주고 있다. 여기서 최소자승법과 최소거리법은 상당히 가까운 거리를 보이나 양끝점 기준선에 의한 진직도는 비교적 큰 것을 알 수 있다. 또한 최소거리기준선에 의한 진직도가 최소값을 줌을 알 수 있다.

진직도가 측정된 스트레이트 에지는 이제 동작기계와 측정기의 진직도 오차측정에 보정데이터로 사용되어 정밀한 진직도 측정이 가능하게 된다. 즉, 에지를 기계측과 평행하게 놓고 선형측정장치로 에지면을 따라서 읽어주면 그 측정값은 에지의 진직도에서 기계의 진직도를 뺀 값이 되므로, 기계의 진직도를 계산할 수 있다.

(2) 리버설 테크닉을 이용한 진직도 측정기술 스트레이트 에지 등으로 진직도 오차를 측정할 때 적용되는 방법으로 리버설 테크닉이 있다. 이는 에지의 진직도와 가이드의 진직도가 동시에 측정될 수 있는 방법으로서 그 개요가 그림 9에 있다. 즉, 에지를 가이드에 가능한 평행하게 놓고 선형측정계이지 등으로 에지면을 측정하면 그 때 측정값은 에지면의 진직도 오차와 가이드의 진직도 오차의 차이로 나

표 5 기준선에 따른 진직도 오차의 비교

비 교 치										
기 준 선		기 울 기(UM/M)			절 편(UM)			거 리(UM)		
양끝점 기준선		1.544			-0.322			3.352		
최소자승 기준선		3.175			-1.341			2.699		
최소거리 기준선		3.238			0.243			2.674		
측정데이터										
Xi(MM)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Yi(UM)	0	-0.87	-0.86	-1.17	-1.38	-0.39	0.49	1.08	2.59	1.39

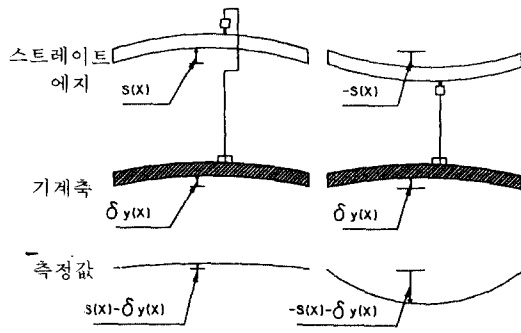
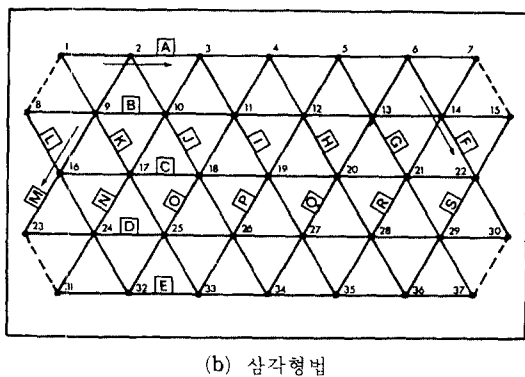
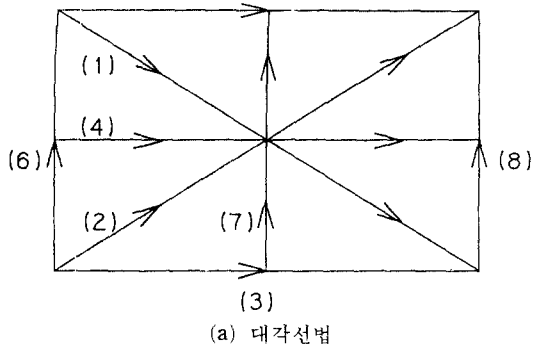


그림 9 리버설 테크닉을 이용한 진직도 오차 측정

타난다. 이제 에지를 180도 돌려서 에지의 같은 면을 따라 선형측정장치로 측정하면 측정값은 에지면의 진직도와 가이드의 진직도 오차의 합으로 나타난다. 따라서 첫번째 측정값과 두번째 측정값을 합산하면 기계의 진직도 오차가 나오며, 그 두 값의 차이는 에지의 진직도 오차를 주게 된다. 이 방법은 3차원 측정기의 경



우에 진직도 오차를 매우 쉽게 측정할 수 있는 방법이며, 공작기계의 경우는 측정프로브를 공작기계 공구홀더에 부착하여 측정이 가능하다.

3.5 편평도 오차 측정

편평도는 기하학적으로는 진직도 문제를 2차

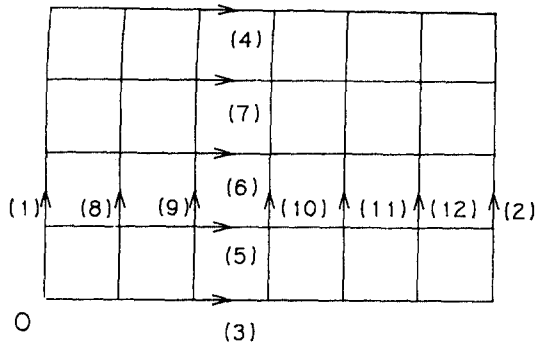
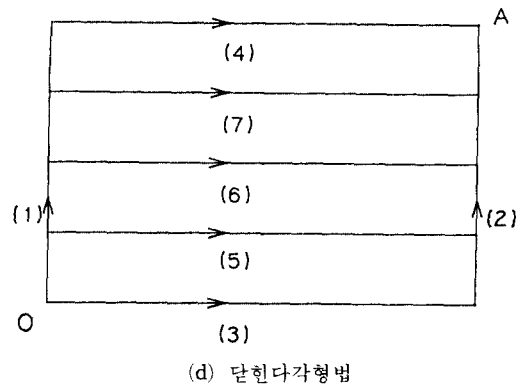
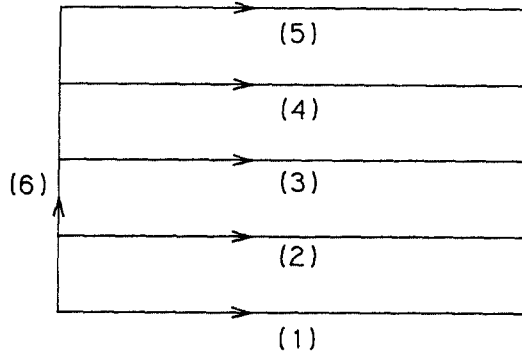


그림 10 여러가지 편평도 측정법

원으로 확대한 것이며, 현장에서는 기계의 가이드평면, 정반 등의 편평도 오차가 정밀측정에서는 중요한 요소 중의 하나이다. 편평도 측정은 기본적으로 진직도 오차측정의 경우와 같아서, 각도 측정기구를 사용하여 피측정물의 기하학적 편차를 측정 계산하게 된다. 각도측정기구 중에서도 특히 정밀레벨이 편평도 측정에 선호되고 있는데 이는 정밀레벨은 연직방향을 기준으로 해서 각도오차를 측정하기 때문에 레이저측장기 또는 오토콜리메터(auto collimator) 등과 같은 상대적 각도만을 측정하는 장비로는 측정할 수 없는 평면의 롤오차(roll angular error) 등의 측정이 가능하기 때문이다. 원래 편평도 측정은 플래너 평삭기를 처음 개발한 영국의 Joseph W.가 제안한 3평면법으로부터 시작하여, 여러가지 방법들이 제안되었다. 그림 10은 현재 사용되고 있는 편평도 측정 방법을 보이고 있다.

대각선(diagonal generators)법이 현재 상용의 편평도측정방법으로 많이 사용되고 있으나 이는 평면중심부의 많은 부분이 측정에서 제외되어 있어 국부적 편평도 오차를 볼 수가 없고 또한 4개의 모퉁이점을 같은 평면상에 있는 것으로 가정해야 한다는 점에서 문제점을 갖고 있다. 영국 국립 물리 연구소에서 개발된 삼각형법은 삼각형 측정선을 평면위에 다수 설정한 후 각도측정을 수행하는 정밀한 측정방법이긴 하나 많은 측정선으로 인한 측정시간의 과다와 온도변화 등에 의한 측정오차의 도입 가능성이 크다는 단점을 갖고 있다. 측정선이 많지 않으면서도 상대적으로 정확한 측정치를 낼 수 있는 사각형법을 소개한다. 그림 10에 있는 것처럼 사각형법에도 열린 사각형법(open rectangle), 닫힌 사각형법(RPL: rectangular perimeter longitude), 닫힌 겹사각형법(RPLT: rectangular perimeter longitudinal transverse) 등이 있다. 열린 사각형법은 한 개의 세로측정선을 측정한 후 이를 기준으로 가로측정선을 따라 각도측정을 수행하는 것이다. 닫힌 사각형법은 열린 사각형법에 한 개의

세로 측정선을 추가적으로 두어 측정의 정밀도를 닫힘오차(closing error)로서 확인한다는 장점이 있다. 정밀레벨로 측정할 경우 닫힘오차가 대개 1~2마이크론으로서 실제 각도측정에서의 오차는 0.1마이크로미터 정도의 뛰어난 정도를 갖고 있다. 닫힌 겹사각형법은 세로 측정선을 추가적으로 고려하여 전체 평면에 걸쳐서 가로와 세로를 측정하여 평균치로써 편평도를 측정한다. 사각형 측정법 중에서는 가장 정밀한 방법이나 추가측정선 측정에 따른 측정시간이 요구된다. 실제 측정의 경우 36인치 24인치 정반을 측정했을 경우 닫힌 사각형은 반복 편평도 오차를 0.5마이크론 정도였고 닫힌 겹사각형의 경우 0.1마이크론 정도를 보였다.⁽⁵⁾ 편평도 해석은 진직도의 경우와 매우 유사하여 전통적으로 현장에서는 3모퉁이점을 기준면으로 하여 그면에 기준한 상대변위를 계산하였으며, 최소자승평면을 기준평면으로 하는 방법이 컴퓨터 등의 발달로 많이 사용되고 있다. 한편 ISO, KS 등에서 규정하고 있는 편평도는 진직도의 경우와 마찬가지로 최소거리평면을 기준면으로 해서 편평도 오차를 정의하고 있는데, 이는 일종의 최적해를 구하는 문제로서 필자가 개발한 씌워돌리기(enclose tilt) 방법은 그중에 하나인데 이는 편평도 해석을 최소거리평면으로 하는 컴퓨터 코드이다. 편평도 측정 시스템은 현재 컴퓨터를 이용해서 온라인화되어 있어서 상용 패키지도 나와있는 상황이며, 현재 포항공대 정밀측정 실험실에는 측정에서 해석까지를 마이크로컴퓨터가 수행하는 시스템이 개발되어 있다.⁽⁷⁾

3.6 직각도 오차 측정

직각도 오차는 90도로 조립 또는 맞추어져야 하는 부품에서 90도로부터의 편차를 의미한다. 직각도를 측정하는 방법에는 레이저 간섭기의 직각도 옵틱스를 사용하면 되나, 진직도의 경우처럼 측정선 정렬에 많은 시간과 숙련된 기술이 필요하여 현장에서 측정하는데 애로사항이 되고 있다. 기계직각자를 사용하는 방법이

많이 사용되고 있는데, 이를 간략히 소개하기로 한다.

직각자의 직각도 오차를 미리 알고 있을 때에는 직각도 오차 측정이 비교적 간단하다. 그림 11에 보여진 것처럼 직각자의 직각면을 측정프로브로 측정을 수행하면 직각면의 진직도 오차가 구해진다. 이 때 진직도를 정의하는 기준선은 위에서 언급한 진직도측정의 경우와 같은데, 일단 기준선이 설정되게 되면, 기준선 사이의 각도에서 기계 직각자의 실제 직각도를 빼면 기계의 직각도 오차가 나오게 된다. 한편 직각자의 직각도 오차를 모를 경우에는 진직도

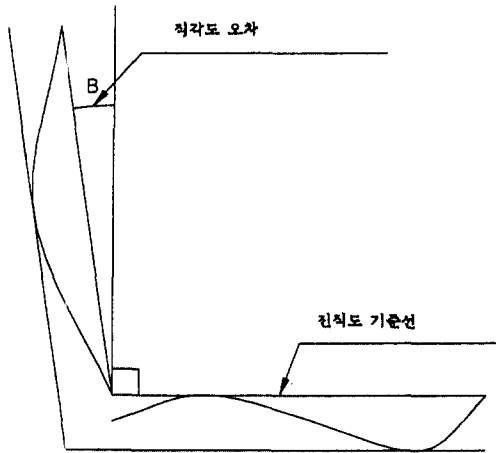


그림 11 직각도 오차 측정

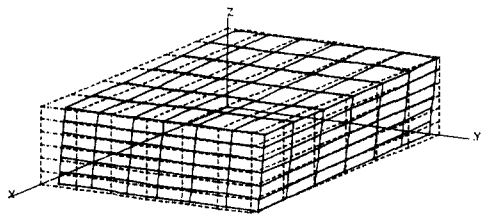


그림 12 3차원 측정기의 입체오차 측정 예

- 대각선1 오차=13.8UM
- 대각선2 오차=-48.5UM
- 대각선3 오차=-63.5UM
- 대각선4 오차=-103.0UM
- X단위 증가치=100.0MM
- Y단위 증가치=100.0MM
- Z단위 증가치= 50.0MM

측정의 경우와 마찬가지로 리버설 테크닉을 이용하면 되는데 이는 180도 뒤집어서 측정한 각도의 합과 차로부터 기계의 직각도 오차와 직각자의 직각도 오차를 구할 수 있다.

3.7 측정기 및 공작기계의 입체오차

측정기와 공작기계가 실제 작업(측정, 가공)을 수행하는 작업공간에서의 기계오차 거동을 알아보는 것은 매우 중요한데 이는 기계가 실제 작업에서 갖는 정밀도와 직접적인 연관을 갖고 있기 때문이다. 앞절에서 설명했던 것처럼, 한축운동을 하는 기계의 경우에 6개의 독립된 오차성분이 존재하게 된다. 따라서 축수가 증가함에 따라 오차는 증가하여 3축운동을 하는 밀링기나 측정기의 경우에 18개의 축성분 오차와 축간의 조립오차에서 비롯되는 3개의 직각도 오차가 존재하여 모두 21개의 기하학적 오차가 존재하게 된다. 입체오차는 각각의 기하학적 오차를 기구학적으로 조합한 형태가 된다. 조합의 구체적인 방법은 측정기 및 공작기계의 기구학적 구성에 따라 다르다. 입체오차를 고려해 보면 각각의 기하학적 오차는 그렇게 크지는 않으나 삼차원 입체 공간에서 조합된 입체오차는 크기가 상당히 증폭되게 된다. 통상 많이 사용되고 있는 공작기계나 측정기의 경우에 입체오차는 수십 마이크로미터에 해당하는 것이 보통이다. 그림은 무빙브리지(moving bridge) 타입의 삼차원 좌표측정기의 입체오차를 표시하고 있다. 600mm×600mm×300mm의 작업공간에서 입체오차가 삼차원으로 표시되고 있는데 여기서 점선은 기계의 눈금값을 실선은 기계의 오차를 보이고 있다. 한편 대각선 방향의 오차는 1방향((0, 0, 0)에서 (600, 600, 300))으로는 13.8마이크론, 2방향((0, 0, 0)에서 (600, 600, 0))으로는 -48.5 마이크로론, 3방향((600, 0, 0)에서 (0, 600, 300))으로는 -63.5 마이크로론, 4방향((600, 0, 300)에서 (0, 600, 0))으로는 -103마이크론을 보이고 있다.^(8,9)

이상의 입체오차측정시스템은 현재 마이크로

컴퓨터 상에서 구현되며 측정절차의 관리, 수행, 결과해석과 표시 등에 있어서 핵심적인 역할을 수행하고 있다.

4. 맺음말

이상에서 정밀측정기술의 동작기계와 측정기로의 적용이라는 문제를 고려해 보기 위하여, 현재 산업현장에서 사용되고 있는 정밀측정방법들을 소개하고 측정의 효율화, 고정도화 등을 위한 연구사례들을 제시하였다.

현재 선진국들은 정밀측정·가공기술을 21세기의 미래기술로 분류하고 연구개발과 기반기술확충에 진력하고 있다. 일본이 세계의 전자산업을 현재 주도하고 있으며, 이러한 추세는 21세기에 들어서면 더욱 심화될 것이라고 하는 전망은 현재 일본이 정밀기술을 중요핵심 기술로 하여 산·학·연이 심혈을 기울이고 있는 것과 무관하지 않다. 또한 미국과 유럽의 기존 선진국들이 기술경쟁력을 뺏기지 않기 위해서 정밀기술 연구에 박차를 가하고 있는 것도 중요한 사실중의 하나이다. 또 하나 특기할 사항은 우리보다 후진국인 중국은 대만과 함께 현재 정밀측정관련기술에서는 상당한 전문가가 확보되어 있어 연구와 상품개발이 진행되고 있다는 점인데 이는 우리나라에서 기계관련 산·학·연에 종사하는 분들은 반드시 유의해야 할 부분이라고 생각된다. 이런 관점에서 이 글이 우리나라 기계기술, 정밀측정관련 기술 부문에 도움이 되었으면 하는 바람이다.

참고문헌

(1) BS6808 ; 1987 British Standard for Coordinate Measuring Machine, British Standard

Institution.

- (2) ANSI/ASME B89.1.12M-1985 An American National Standard, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines, 1985, The ASME.
- (3) Pahk.H.J., 1990, Computer Aided Volumetric Error Calibration of Coordinate Measuring Machines, PhD Thesis, UMIST.
- (4) Hocken,R., 1977, Three Dimensional Metrology, Annals of CIRP, Vol.26, No.2.
- (5) Burdekin,M. and Pahk,H.J., 1990, The Application of Microcomputer to the Online Flatness Calibration Engineering Surfaces, Proc. Institution of Mechanical Engineers, (Journal of Engineering Manufacture), Vol. 203B, pp.127~137.
- (6) Pahk, H.J. and Kim, J.H., 1992, Development of Computer-Integrated Error Calibration for CMMs Using Calibrated Mechanical Artefacts and Touch Probe, Korea-Taiwan International Conference on Metrology.(in Submission)
- (7) 박희재, 1991, 온라인 편평도 측정시스템 개발, 대한기계학회 추계학술발표대회 논문집, pp. 371~374.
- (8) 박희재, 1991, 3차원 좌표측정기 및 동작 기계의 입체오차와 길이측정오차 평가에 대한 연구, 대한기계학회 추계학술발표대회 논문집, pp. 235~238.
- (9) Pahk.H.J., Burdekin,M. and Peggs,G., 1992, Development of Computer Software for Calculation of Volumetric Error Map in 3axis Coordinate Measuring Machines, 상우 김동원 교수 정년퇴임 기념논문집, pp. 419~446. 