

2 Stage연동 모션제어에 의한 레이저 고속가공기 오차보정

The Error Correction of Dual Stage Cross-Coupling Control System

*이유성¹, #최인휴², 이제훈³, 김경훈⁴

*Y. S. Lee¹, #I. H. Choi(ihchoi@cscam.co.kr)², J. H. Lee³, K. H. Kim⁴

¹ 씨에스캠(주), ² 씨에스캠(주), ³한국기계연구원, ⁴한국기계연구원

Key words : Error Correction, Cross-Coupling, Dual Stage, Galvano, Compensation

1. 서론

본 논문은 Scanner-stage 실시간 연동 시스템의 오차보정에 관련된 문헌조사를 하고, 주요 오차요인에 대한 이론적 배경과 보정방법에 대하여 기술한다. 먼저 레이저 장비는 크게 모션을 생성하는 기구부, 레이저 빔을 전달하는 광학부, 그리고 스테이지 제어와 갈바노 스캐너의 2축 미러를 제어하는 제어부로 구성이 된다. 이러한 레이저 장비에 의한 절단가공으로 발생하는 오차는 FPCB, Coverlay, Wafer 등 평판 형상의 가공물에 남겨진 치수오차이므로 XY 평면상의 오차이다. 이 오차를 오차 요인에 따라 분류하면 기구오차(geometrical error), 광학오차(Optical Error), 그리고 제어오차(Tracking Error)로 구분된다. 각각의 오차요인에 대한 분석과 오차보정 방법에 대하여 서술한다.

2. 기구오차

기구오차는 XYZ 스테이지의 구동부의 조립이나 주위온도에 의한 열팽창등에 의하여 발생한다.

2-1 갠트리형 스테이지의 오차 모델링과 오차보정

3축 갠트리형 스테이지의 경우, 기하학적오차 (geometric error)의 반복오차 성분은 공칭위치 (x, y, z)에서 각 축방향에 대해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Xerror &= Xlinear+Ystraight(x)+Zstraight(x)+(Xpitchz)+(Yrollz)+(Xyawy)+ \\ &\quad (XZsquarez)+(XYsquarey) \\ Yerror &= Ylinear+Xstraight(y)+Zstraight(y)+(Xrollz)+(Ypitchz)+(YZsquarez) \\ Zerror &= Zlinear+Xstraight(z)+Ystraight(z)-(Xrollz) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Xpitch, Xyaw, Xroll 은 X 캐리지가 브리지 상에서 X축 이송시에 발생하는 피치, 요, 롤의 각운동오차 이고, Ypitch, Yroll 은 브리지가 정반 상에서 Y축 이송시에 발생하는 피치, 롤의 각운동 오차이다. Ystraight(x) 는 Y축 이송시 x 방향의 이송 오차 (수평진직도 오차), Zstraight(x) 는 프로브가 Z축 방향으로 이송시 x 방향의 이송오차 (수직진직도 오차), XZsquare 는 XZ 축 사이의 직각도오차, Xlinear 는 X축방향 이송시의 위치결정오차 이다.

레이저측정기, 오토콜리메이터, 전자수준기 또는 기준물을 이용하면 식(1) 내의 각축의 위치결정오차, 진직도오차, 각운동 오차 등을 측정 및 보정 (calibration) 할 수 있으며, 공칭위치 (x, y, z)에서 3차원 위치오차는 식(1)과 같이 산출된다. 이 오차는 대부분 조립오차와 열팽창 계수의 차이 등이 원인이 된다.

식(1) 에 제시한 각 축마다의 오차량을 소프트웨어 보상제어 하기 위해서는 각 축마다 보정위치에서 피치오차 보정량의 산출이 필요하다. 또한, 초정밀 위치결정 장치를 제작하기 위해서는 식(1)을 이용한 오차맵 (error map)을 세분된 위치에서 산출하는 것이 필요하다. 그러나, 피치오차 보정량을 모든 위치에서 측정하는 것이 불가능하므로 동일한 간격에서 측정된 측정치와 공칭값의 차로부터 얻어진 오차량을 가지고 측정 간격 사이의 오차를 보간한다.

1차원 보간의 경우 i 와 i+1 위치에서 오차량 Xerror(i)와 Xerror(i+1)로부터 임의의 X(j) 위치에서 오차량은 식(2)와 같다.

$$Xerror(j) = (X - X(i)) \cdot \{[Xerror(i+1) - Xerror(i)]/[X(i+1) - X(i)]\} + Xerror(i) \quad (2)$$

마찬가지로 2차원 보간의 경우는 주변의 4개 오차값을 가지고 보정량을 보간하고, 3차원인 경우는 주변의 6개 오차값을 가지고 오차량을 보정한다. 그러나, 이 경우 얻어진 보간값은 단지 측정된 오차량을 보간한 것으로 보간값에 고주파수 성분을 증대시키게 된다. 이것을 방지하고 부드러운 오차량을 보간하기 위해서 IIR (Infinite impulse response) 필터를 사용하여 식 (3)과 같이 보간된 오차량을 부드럽게 한다.

$$Xerror(j)F = (1 - \lambda i)Xerror(j) + \lambda iXerror(j-1)F \quad (3)$$

임의의 위치 j에서 필터링된 오차량 Xerror(j)F는 식 (3)을 통해서 얻어진 오차량을 가지고 각 축마다 Xerror(j)F 산출하여 배열을 구성하면 오차량에 대한 look-up 테이블을 완성할 수 있다.

식 (3) 에 제시된 각 축마다의 오차량을 소프트웨어 보상제어 하기 위해서는 각 축마다 보정위치에서 피치오차 보정량의 산출이 필요하다.

X축으로 이송하는 경우 j 위치에서 발생하는 오차량을 Xerror(j)F로 정의하고, 이 때 j 위치에서 피치오차증분 보정량을 Xcalibration(j)F 라고 하면, X축 상의 총 N 개의 보정위치 중 j 위치에서 피치오차증분량은 식(4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Xcalibration(j)F &= Round [Xerror(j)F - \sum_{k=1}^{j-1} X_{calibration}(k)F], j = 2, 3, \dots, N \\ Xcalibration(1)F &= Round [Xerror(1)F] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Round (Xerror(j)F)는 오차량을 정수로 반올림한 오차량을 의미한다. 식(4)에서 피치오차 증분량 Xcalibration(j)F 은 각 공칭위치에서 ±1/2BLU 이내로 보정된다. 단, 보정량 계산시에는 기존의 보정파라미터를 리셋 또는 0으로 초기화 한 후에 식 (1)로 주어지는 각 축 마다의 오차량을 측정하고 식 (4)를 이용하여 산출한다. 그리고, 산출된 보정량은 Look-up 테이블로 나노제어기의 메모리에 저장하여 위치제어루프에서 매 사이클타임 (cycle time) 마다 위치제어 시에 보정이 이루어지도록 한다.

단, 3축 스테이지의 경우, Look-up 테이블은 3차원 매트릭스로 만들어지며, 매트릭스의 각 요소는 작업공간내의 보정점에서의 오차보정량을 의미한다. 이 Look-up 테이블은 3D 공간에서 각 축마다 N개의 보정점을 갖는다면, N³ 개의 요소로 이루어진 매트릭스가 되며, 초정밀기계를 위한 제어기에서는 나노제어 관점에서 보정이 이루어져야 하기 때문에 N의 숫자가 128인 경우, 2M 워드의 정보를 저장해야 하며, 그에 따라서 큰 메모리 (32MB)를 필요로 하게 된다.

2-2. 열팽창에 대한 대책

거의 모든 물질이 온도의 상승에 따라 팽창을 하게 되어 있는데 이를 열팽창(Thermal Expansion)이라 칭한다. 그러나 어떤 재질이 나에 따라 열팽창의 정도가 차이가 있는데, 이에 대한 구분은 열팽창 계수 (Thermal Expansion Coefficient)의 크고 작음으로 분류하고 있다. 일반적으로 열팽창의 단위는 측정학에서 주로

사용하고 있는 20°C를 기준으로 하여 1°C 증가할 때를 기준으로 Part Per Million (PPM) meter로 정의하는데, 예를 들면 10ppm/°C의 Steel의 경우는 1°C 증가할 때마다 1미터당 10마이크론씩 팽창함을 의미하며, 따라서 만일 22°C로 주변온도가 변하면 1미터의 Steel이 1000.040mm로 팽창하게 된다는 의미이다.

시스템을 구성하고 있는 모든 요소들의 열팽창이 동일하고 일정하게 이루어지고, 이 시스템에 의해 작업되는 work piece의 열팽창도 동일하게 이루어진다면 그에 대한 대책은 좀 쉬워지지만, 거의 모든 시스템이 이렇게 구성하기가 어려우게 현실이다. 따라서 정밀 제어를 위해서는 각 요소들의 열팽창 계수를 정확히 분석하고, 이들 요소들간의 계수차이를 최대한 줄여주는 노력이 첫 번째로 필요하며, 두 번째로는 열팽창이 고르게 일어나도록 시스템을 설계하려는 노력이 필요하다. 열팽창이 고르게 일어나게 하는 방법에서는 우선 시스템의 Body를 디자인할 때 그 프로파일의 넓이를 고르게 하는 것도 고려 대상이며, 여기에 설치되어 수치를 알려주는 리니어 스케일도 고른 팽창이 되도록 해주는 노력이 필요하다.

이것은 즉, 1000mm 길이의 시편일 경우 주변온도가 20°C에서 25°C로 변할 경우, 이들 시편의 길이는 Steel은 1000.0525mm, Aluminum은 1000.0850mm이고 Glass는 1000.04mm가 변한다는 의미이다. 여기서 한가지 중요한 사항은, 리니어 스케일의 재질과 WORK PIECE의 재질의 열팽창계수 차이이며, 이에 따른 에러를 도표로 표시하면 다음과 같습니다.

Table 2 각 재질별 열팽창계수 차이에 따른 에러량

25°C 일 경우 1000mm work piece 기준		
Scale 재질 및 늘어난 길이	Workpiece	Error
Glass Scale = 1000.040	Steel = 1000.052	12 micron
Steel Scale = 1000.052	Steel = 1000.052	0
Glass Scale = 1000.040	Aluminum = 1000.085	45 micron
Steel Scale = 1000.052	Aluminum = 1000.085	33 micron

열팽창에 적극 대응하기 위한 방법은 스케일과 workpiece와의 열팽창을 동일하게 하고, 시스템 body와 스케일의 body의 재질은 가능하면 계수차이가 작도록하고, 열팽창을 고르게 발생하도록 하여 설계자가 예측할 수 있는 설계를 하는 것이다. 스케일을 단순히 양면접착제만을 이용하여 시스템바디에 부착시에는 고른 열팽창을 기대하기 어렵으므로 Carrier를 사용하는 것이 좋다. 측정 혹은 가공하고자 하는 Work piece와 동일한 혹은 비슷한 재질의 스케일을 사용하는 것이 열팽창에 의한 오차를 최대한 줄일 수 있다.

3. 광학오차

스캐너의 내부에는 2축의 위치를 결정하는 갈바노 미러가 직각으로 위치하고, Object Lens에 의하여 집광을 하도록 구상되어 있다. 이때 2차원 갈바노 미러에 의한 pillow 모양의 왜곡이 발생하고, f-θ object 렌즈에 의한 barrel 모양의 왜곡이 생긴다. 이 둘이 더해져서 pillow-barrel 모양의 Scan field의 왜곡이 발생한다. 이를 바로 잡기 위하여 보상과정이 반드시 필요하며 이를 Correction이라고 한다.

이상적인 Grid data로 레이저 가공하고, 이들 grid 각각의 point 위치를 비전으로 측정하여 실제 위치를 기록한다. 지령위치와 측정된 실제 위치와의 차이가 광학 오차가 된다. 이를 실시간으로 보상하기 위해서는 스캔 필드에서의 오차데이터가 작성되어 있어야 한다. 대부분의 스캐너 제어보드는 보드상에 이 기능을 보유하고 있으며, 실제 가공 시 지령 위치에 오차데이터(ctb 파일)를 참조하여 실시간 오차 보정을 수행하여 가공하게 된다.

결국, 광학오차 보정은 비전 시스템을 이용하여 보정된 리니어 스케일을 기준으로 측정된 2D 광학오차 테이블에 의하여 보정이 된다.

4. 제어오차

기구조차 보정데이터가 적용된 XY 스테이지 이송시스템에서 지령된 경로를 벗어나는 오차는 가감속시 발생하는 오차와 서보 지연오차가 있다. 일반적으로 가감속 오차는 가감속 방법에 따라서 예상할 수 있으며, 응용처에 따라서 그 크기를 설정할 수 있으며, 서보 지연 오차는 서보 계인을 조정하여 최소화 할 수 있다.

5. Scanner-Stage 연동시스템에의 오차

매크로 이송을 담당하는 스테이지와 마이크로 모션을 담당하는 스캐너를 서로 실시간 동기화를 지령된 경로로 빔의 위치를 제어하는 것이 본 시스템의 목적이다. 스테이지는 고관성 시스템으로서 속도의 변화를 최소화하는 매크로 경로를 따라 움직이게 한다. 스캐너는 저관성 시스템으로서 허용가속도는 6~10g 정도로 아주 크며, 단지 제한조건은 지정된 스캔필드 밖으로 경로를 벗어나지 않도록 유지하는 것 뿐이다. 그리고 연동제어(On-the-fly control)을 위하여 스테이지의 X, Y 엔코더 피드백신호를 분기하여 스테이지 제어기뿐만 아니라 스캐너 제어보드에서도 받도록 하였다. 여기서 스테이지의 오차성분이 스캐너 제어주기(10μsec) 마다 보정이 일어난다. 그리하여 최종 정밀도는 open loop으로 제어되는 스캐너의 정밀도에 의하여 가공물의 가공오차가 결정된다. 결국, Scanner-Stage 연동시스템에의 가공오차는 스테이지 스케일의 보정후 오차, 스캐너 광학계의 correction후 오차(측정용 비전 시스템의 오차 포함), 그리고, 스캐너 제어보드의 open loop 제어오차(갈바노 모터 repeatability, thermal drift)의 합이 될 것이다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업원천 과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. J.W. SHON, S.H.SUH, S.Y.JUNG, E.S.LEE, H.G.WI "The enhancement of 3-dimensional positioning accuracy by measuring error factors for CNC machine tools", 한국정밀공학회 '95년도 춘계 학술대회, 260-265, 1995
2. Yung, C.Shin, Henry Chin., Michael J. Brink., "Characterization of CNC Machining Centers", Journal of manufacturing systems, Vol 10, No.5 407-421, 1995
3. J.H.CHO., M.W.CHO., "Volumetric error analysis of a multi-axis machine tool machining a sculptured surface workpiece", INT. J. PROD.RES., Vol 32, No.2, 345-363, 1994
4. V.B.Kreng, C.R.Liu., C.N.Chu., "A Kinematic Model for Machine Tool Accuracy Characterization", Int J AdvManuf Technol, Vol 9, 79-86, 1994
5. K.C.FAN, J.F.LIN, S.S.LU, "Measurement and compensation of thermal error on a machining center", Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, ROC 261-268
6. M.A.Donmez, D.S.Blomquist, R.J.Hocken, C.R.Liu and M.M.Barash, "A General Method for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation", Precision Engineering, Vol8, No4, 187-195, 1986