

Ball-Bar 를 이용한 NC Controller 성능 평가 연구

A Study on the Performance Evaluation of NC controller using Ball-Bar

Chang Ho Shin*, Eung Suk Lee**, Suk Hwan Suh*

*Computer Automated Manufacturing Lab, Dept. of Industrial Engineering, POSTECH

** Automation Div., Research Institute of Science & Technology (RIST)

Abstract

NC 공작기계의 contour 운동 오차를 측정하기 위하여 사용되는 Ball-Bar 에 의한 원호 보간 시험 데이터를 이용하여 NC controller 의 성능을 평가 할 수 있는 S/W 에 의한 방법을 제시한다. 본 논문에서는 지금까지는 분석이 어려웠던 Master-Slave Changeover 의 분석을 가능하게 하였으며, Ball-Bar 로부터 얻어지는 데이터를 Weighted Residual Method 에 의한 종합적인 분석을 하였으며, 오차 원인별 비교를 위해 Extra Sum of Squares Method 를 도입하였다. 본 연구의 실제 적용을 위한 측정 및 분석 S/W 를 개발하였으며, 결과적으로 NC controller 의 성능평가에 유용함을 알 수 있었다. 무부하 조건에서의 Ball-Bar 에 의한 분석 데이터와의 비교를 위하여 원형 시편을 가공하고, 진원도 측정 및 분석을 통하여 유사한 오차 pattern 을 가짐을 알 수 있었다.

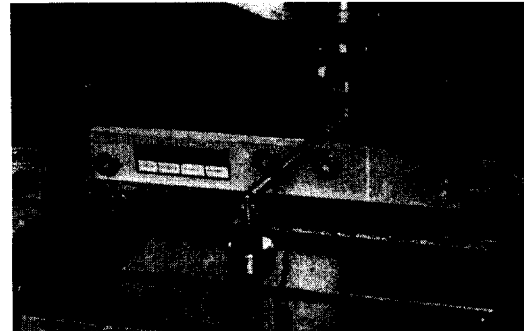
Key words : 수치제어장치(NC controller), Ball-Bar, 원호보간시험(Circular Interpolation or Contouring Test), Weighted Residual Method, Extra Sum of Squares

1. 서론

최근들어 초정밀 가공기술의 필요성이 증가함에 따라 공작기계의 가공정도에 영향을 미치는 공작기계의 운동오차에 대한 평가가 많은 관심을 모으고 있다. 최근에는 NC공작기계의 운동정도를 측정하는 방법으로 원호 보간 시험을 많이 사용하고 있다. 원호보간시험이란 공작기계의 3축중 어느 두축에 대해 원 운동을 발생시키면서, 전용의 측정기기에서 측정된 기준축간의 상대적 거리 변동으로부터 기준 원 운동에서 벗어난 정도를 분석하여 공작기계의 운동 오차를 파악하는 방법이다. 측정을 위해 개발된 방법으로는 마스터 실린더를 이용한 LVDT와 같은 1차원 측정기 또는 투영기와 같은 2차원 측정기를 이용하는 방법, 동적측정이 가능한 Ball Bar를 이용하는 방법 등[1-2]이 있다. 특히 Ball-Bar의 경우는 간단한 시스템으로서 NC 공작기계의 다양한 오차 측정이 가능하기 때문에 최근 영국, 일본 등에서 상품화되어 점차 그 사용이 증가 하고 있다[3].

Ball-Bar는 2개의 정밀 마스터볼 사이에 1개의 LVDT로 연결된 길이 측정기이며, 1개의 마스터 볼은 공작기계의 스핀들 공구위치에 다른 1개는 머신 테이블 위에 위치시킨다 (Fig 1). Ball-Bar를 장착하고 스핀들의 원호 보간 운동 (Contouring)으로 LVDT에 의해 측정되는 2개의 마스터볼 사이의 길이는 NC

controller에 표시는 스핀들 좌표로부터 계산되는 공간상의 길이와 비교되어 NC 공작기계의 Contouring 성능을 알 수 있다.



<Fig.1> Ball-Bar set up in NC machine

원호 보간 시험법에 의해 측정된 운동오차는 운동 정도에 대한 단순한 평가뿐만 아니라 근래에는 스핀들 위치 선정에 영향을 미치는 주요 오차 원인의 진단을 목적으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고, 기본이 되는 운동오차원인의 종류 및 각각의 원인에 의해 발생하는 운동오차 양상에 대해 많은 연구가 계속되어 왔다. Knapp[1]은 2차원 프로브와 기준원판을 이용해 공작기계의 정밀도 성능을 평가할 수 있음을 보였고, Kakino[2]등은 다양한 가공

기계의 오차성분과 기구볼바의 원호보간 성능과의 관계를 보여 주었으며, Kunzmann[4]등은 기구볼바의 사용과 파라메타 오차 성분에 대한 해석식을 제안하였으며, 홍성욱 등[5]은 원호보간측정 데이터를 주파수 분석법을 이용하여 해석하는 방법을 제안 하였다.

그러나 실제 NC공작기계에서 원호 보간 시험법으로 운동오차의 원인을 진단하기 위해서는 오차에 대한 체계적인 분석을 필요로 하며, 특히 여러가지 오차가 동시에 결과에 영향을 미치므로 이 오차들을 각각 분리해 내는 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 NC 공작기계의 운동정도의 측정을 위해서 원호 보간 시험법을 이용하여 NC 공작기계의 수치제어장치에 기인하는 운동오차를 분석하기 위하여 한 개의 Ball-Bar를 이용하고 수치제어장치의 성능을 평가 하는 방법을 개발하였다. 개발된 시스템을 공작기계에 실제로 적용하여 공작기계의 수치제어장치에 의한 오차 진단에 유용함을 알 수 있었다.

2. 원호보간 시험

2.1 NC 공작기계의 Contouring Test

일반적으로 NC공작기계의 Contouring에 의한 위치 운동 정밀도에 대한 오차는 다음과 같이 크게 두 종류로 분류된다.[4]

- a) 공작기계 자체의 부정확한 기하학적 상태에서부터 발생하는 오차 : 위치결정오차, 직각도 오차, 룰오차 및 여현 오차, 진직도 오차, 비선형성 기하학적 오차 등
- b) NC제어기와 구동부의 오차 : Interpolation, Hysteresis, 속도오차, Loop gain에 의한 오차, Stick slip 오차 등

여기서, 본 연구의 대상이 되는 오차는 NC시스템과 구동부의 수치제어장치에 기인되는 오차이며, 이러한 오차들이 크기와 방향에 따라 다른 특성을 나타내게 된다. Contouring Error의 유형으로는 Offset change, Plot discontinuity, Plot rotation, radius change등이 나타난다.

공작기계의 Contouring 운동정도를 측정하는 방법으로서 Circular test piece를 가공 후 정밀 측정하여 그 오차를 가지고 평가하는 방법이 있다. Direct test라고 부르고 있는 이 방법은 가공과 측정의 두 단계를 거쳐야 하는 번거로움이 있으며, 많은 시간과 노력을 필요로 할 뿐 아니라 측정하는 측정기의 측정정도가 문제 된다. NC공작기계의 성능검

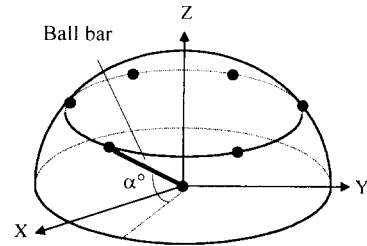
사는 이 방법으로 2개의 Ball을 연결시킨 것으로서 NC구동으로 원호보간시험(Circular Interpolation Test)이 가능한 공작기계, 3차원측정기, Robot Manipulator등의 운동 정도를 측정이 가능하게 된다. 오차원인을 판정하는 방법으로서 여러 연구자들이 각 원인마다의 정해진 오차 벡터를 구하고 이 pattern이 운동오차 궤적 중에서 존재 하는가를 판정한다. DBB 측정법은 공작기계의 가공정밀도 평가를 고정밀도와 고능률로 가능하게 하기 때문에 많은 연구가 수행되고 있다.

2.2 Ball Bar 측정 이론

볼바를 이용한 측정 방법의 기본 이론은 다음과 같다.

테이블위 강구의 중심의 좌표를 $O(0,0,0)$, 주축위의 강구의 중심 좌표를 $P(X,Y,Z)$ 라 하고, 테이블 위의 강구의 중심좌표에서 주축위 강구 중심까지의 거리를 R 이라 하면 R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (1)$$



<Fig 2.> Measuring points by a Ball-Bar on a circular path with tilting angle α°

NC공작기계가 공구를 점 $P(X,Y,Z)$ 로 이동하도록 지령 받았을 때, 공구는 실제로 전술한 여러 가지 오차의 원인으로 점 $P'(X',Y',Z')$ 로 이동하고, 오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X' - X, \Delta Y = Y' - Y, \Delta Z = Z' - Z \\ C &= (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \\ \Delta R &= (X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) / R \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 C 는 오차 벡터이고, Ball-Bar 방향의 오차 ΔR 은 위 식으로부터 같이 된다. 위 식을 이용하여 원호보간으로 얻은 볼바 측정 데이터를 오차 벡터와 연관 시킬수 있다. Bar의 오차량 ΔR 은 LVDT로 검출하고 아날로그 데이터를 변환시켜 수치로 표시한다. PC는 측정된 ΔR 수치를 일정한 Sampling time을 기준으로 원형 궤적을 극좌표로 표시한다

3. NC Controller의 특성

3.1 Controller error에 근거한 Error pattern

Backlash (positive , negative)

X,Y 양 축이 동시에 운동 시 기계적인 불일치 Step이 발생할 때 Step의 크기는 공작기계의 Feed rate에 영향을 받지 않는다. 이유는 Ball leadscrew의 Drive system 또는 guideway에 tolerance가 크게 발생한 형태이다. 또는 NC 공작기계의 Backlash compensation의 양이 너무 크기 때문이다. Drive system과 guideway의 tolerance를 제거하거나 Controller의 Backlash 보정이 필요하다.[6] Error pattern의 특징을 잘 나타낼 수 있는 파라미터를 가지고 일종의 기준이 되는 그래프를 그릴 수 있는데 이를 mask라 한다. Backlash를 특징지을 수 있는 mask의 오차 벡터는 다음과 같다.

$$\bar{C} = (a, b, 0) \quad (3)$$

여기서, a는 X 축의 Step의 크기를 말하고, b는 Y 축의 step의 크기를 말한다. 그리고 2차원의 평면상의 Error의 형태이므로 Z축의 Error는 없다. 이의 오차 벡터를 이용하여 Scale의 신축량에 의한 Error의 량은 다음과 같다.

$$\Delta R = \left(\frac{a}{2} R \cos \theta + \frac{b}{2} R \sin \theta \right) / R \quad (4)$$

Master-Slave Changeover

Master-Slave는 45° point에서 Step이 생기는 현상을 말하는데, 이유는 두 개의 축이 하나는 Master축이 되고 다른 하나는 Slave축이 되어 한축에 대한 Complex interpolation을 수행할 때 발생한다. 즉 한축은 일정한 Feedrate를 가지고 있을 때 다른 한축이 Feedrate를 변화하면서 arc를 생성할 때 발생된다. Master-Slave Changeover는 Feedrate가 증가함에 따라 step의 크기가 증가하는 특성을 지니고 있다. 그런데 이 Master-Slave Changeover의 Error pattern은 이제까지 다른 Diagnostic s/w에서는 진단이 안되었다. 본 연구에서는 이를 mask화 하였으며 진단이 가능하게 하였다. Master-Slave Changeover를 특징지을 수 있는 오차 벡터는 다음과 같다.

$$\bar{C} = \left(a \cos \frac{\pi}{4} + b \sin \frac{\pi}{4}, -a \sin \frac{\pi}{4} + b \cos \frac{\pi}{4}, 0 \right) \quad (5)$$

여기서 a는 45° 와 225° 의 Step size를 의미하며, b는 135° 와 315° 의 Step size를 나타낸다. 이 오차 벡터를 이용하여 Error의 크기를 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta R = \left(aR \cos \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) + bR \sin \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \right) / R \quad (6)$$

Servo Mismatch

기계의 X축과 Y축의 속도가 서로 달라서 나타나는 Error의 형태로 Squareness 에러와 비교되는 것으로서, Squareness error는 Feed의 방향에 상관없이 한쪽 방향으로 Distorted된 타원의 형태로 Ball-bar로부터의 signal이 plotting된다. Servo Mismatch는 45° 와 135° 방향으로 Distorted되고 Distortion의 량은 Feedrate에 비례한다. Error vector는 회전방향에 따라서 달라지는데 다음과 같다.

$$\bar{C} = \left(-\frac{V_x}{K_{sx}}, -\frac{V_y}{K_{sy}}, 0 \right) \quad (7)$$

$$V_x = \mp F \sin \theta, V_y = \pm F \cos \theta$$

여기서, F는 원주속도(Circumference speed)이고, V_x, V_y 는 X,Y축의 Feedrate 이고, K_{sx}, K_{sy} 는 X,Y축의 position loop gain이다. 복호동순의 부호중에서 위의 부호는 CCW부호이고, 아래 부호는 CW부호이다. 이 오차벡터를 이용하여 Error 량을 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta R = \frac{F}{2} \sin 2\theta \left(\frac{\pm K_{sx} \mp K_{sy}}{K_{sx} \times K_{sy}} \right) \quad (8)$$

3.2 Weighted Residual Method에 의한 Error Pattern

Error pattern별로 결과에 대해 미치는 양상은 이미 위에서 언급한 바와 같이 알려져 있으므로 원호보간시험에 의한 Error의 원인 진단은 결국 결과에 영향을 미치는 pattern은 이미 주어져 있고 각 pattern에 어느 정도의 입력이 있을 때 측정된 결과가 나오는가를 파악하는 문제가 된다. 임의 각도

θ 에서의 각 Error pattern들의 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_i a_i \times \Delta R_i(\theta), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (9)$$

여기서, a_i 는 i 번째 Error source의 양을 나타내고, $\Delta R_i(\theta)$ 는 i 번째 Error source의 Error pattern을 나타낸다. 한편, 이와 같은 근사화의 결과, 측정된 Error signal $\Delta R(\theta)$ 와 주어진 각 Pattern과의 차이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(\theta) = \Delta R(\theta) - \sum_{i=1}^l a_i \times \Delta R_i(\theta) \quad (10)$$

즉, 위의 식은 Residual 이라고 볼 수 있다. 이상의 식에서 나타나는 오차항의 모든 θ 영역에서 최소가 되도록 계수 a_i 를 구하면 원래의 운동계적 오차 $\Delta R(\theta)$ 의 발생원인을 찾는 것이 된다. 위식으로 주어지는 Residual은 평균적인 관점에서 다음과 같은 가중 적분을 통해 최소화 시킬 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} e(\theta) \Phi_i(\theta) d\theta = 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (11)$$

여기서 $\Phi_i(\theta)$ 는 서로 독립적인 가중함수 (Weighting function)이며 항의 수를 늘리게 되면 오차는 점차 감소함이 잘 알려져 있다. 이때 가중함수는 편의에 따라 정의할 수 있으나 여기서는 오차 pattern 함수 $\Delta R_i(\theta)$ 자체를 가중함수로 두기로 한다.

$$\int_0^{2\pi} \left\{ \Delta R(\theta) - \sum_{i=1}^l a_i \Delta R_i(\theta) \right\} \Delta R_i(\theta) d\theta = 0, \quad (12)$$

따라서, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_k \lambda_{ik} a_k = \mu_i, \quad i, k = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

$$\lambda_{ik} = \int_0^{2\pi} \Delta R_k(\theta) \Delta R_i(\theta) d\theta$$

$$\mu_i = \int_0^{2\pi} \Delta R(\theta) \Delta R_i(\theta) d\theta$$

각 오차의 정량적인 추출을 위해서는 일차독립인 오차 함수들을 택한 경우 λ 가 Nonsingular가 되어 유일해가 있다.

그러나, $e(\theta)$ 가 0으로 수렴한다고 하여 a_i 값이 Error pattern 'i' 라고 단정하기는 힘들다. 각 Pattern $\Delta R(\theta)$ 값의 부호(Sign)에 의한 변화가 여

기서는 고려되지 않았으며, 이것은 다음의 Extra Sum of Squares 개념을 도입하여 해결할 수 있다.

3.3 Extra Sum of Squares를 이용한 Error 평가

위에서 언급한 Weighted Residual Method를 사용해 얻은 결과는 a_i 의 값으로 나타난다. 문제는 a_i 가 크다고 해서 해당하는 Error pattern의 영향이 항상 크지는 않다는 것이다. 이제 a_i 의 값에 따라서 Error pattern의 원인에 따라서 원호보간 시험을 하면서 나온 결과 data를 가지고 각각의 Error pattern 영향의 크기를 나타낼 수 있는 효과적인 방법을 강구해야 된다. 본 연구에서는 Extra Sum of Squares의 개념을 도입하여 이를 해결하였다.

Extra Sum of Squares는 주로 실험계획법의 Multiple Regression에서 하나의 독립변수 (Independent variable)가 모델 안에 추가될 때 모델에 미치는 marginal effect를 설명하는데 쓰인다.[7] 즉, Regression의 reduced model를 다음과 같이 정의하고

$$y = a_0 + a_1 x_1 \quad (14)$$

위의 모델에서 x_2 의 변수를 추가하면 다음과 같은 full model을 생각할 수 있다.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (15)$$

Full model에 변수 x_2 가 추가됨으로서 발생하는 Marginal effect를 나타내면 다음과 같다.

$$SSR(x_1 | x_2) = SSE(x_1) - SSE(x_1, x_2) \quad (16)$$

여기서, $SSE(x_1)$ 는 Reduced model의 sum of squares를 의미하고, $SSE(x_1, x_2)$ 는 Full model의 sum of squares를 의미한다. 수정한 식은 다음(17-20)과 같다.

$$SSE_{-R_i} = \int_0^{2\pi} (\Delta R(\theta) - (\sum_{k=1}^l a_k \Delta R_k(\theta) - a_i \Delta R_i(\theta)))^2 d\theta$$

$$SSE_{-all} = \int_0^{2\pi} (\Delta R(\theta) - (\sum_{k=1}^l a_k \Delta R_k(\theta)))^2 d\theta$$

$$SSR_{-R_i} = SSE_{-R_i} - SSE_{-all}$$

$$MSR_{-R_i} = SSR_{-R_i} / \{(n-l) - (n-l-1)\}$$

위식에서 SSE_{-R_i} 는 i 번째 Error pattern을 제외한

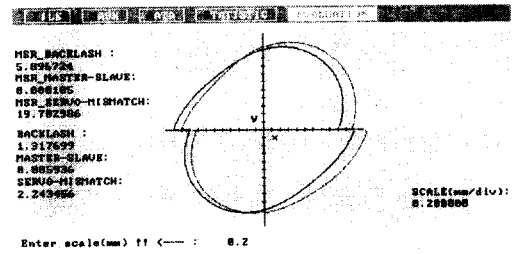
Sum of Squares를 나타내고 SSE_all 은 모든 Error pattern을 고려한 Sum of Squares를 나타낸다. 그리고, SSR_R_i 는 i번째 Error pattern을 제외한 Extra Sum of Squares를 나타내고, MSR_R_i 는 SSR_R_i 의 mean squares를 나타내고 n은 data갯수를 나타낸다.

따라서 위의 Extra sum of squares를 고려하면 위에서 언급한 Weighted Residual Method를 사용한 결과의 a_i에 따른 각각의 Error pattern에 대한 영향의 크기를 평가할 수 있는 효과적인 방법이 된다.

4. NC 수치제어장치 성능평가 시스템 실험

본 연구에서는 앞에서 소개한 NC Controller의 성능평가를 실제시스템에 적용할 수 있도록 프로그램을 개발 하였다. 개발된 프로그램은 PC486 이상의 기종에서 사용 가능하다. 본 연구에서 개발한 방법들을 적용하기 위해 사용된 NC 기계의 controller는 HEIDENHAIN TNC 407이며 머신 톨은 Bridgeport SERIES II INTERACT II이다. 그리고 Ball-bar의 length는 100mm를 사용하였다. Test plane은 XY를 사용하였고, Feedrate는 1000mm/min 이고, sampling rate 는 15.625/sec를 사용하였다.

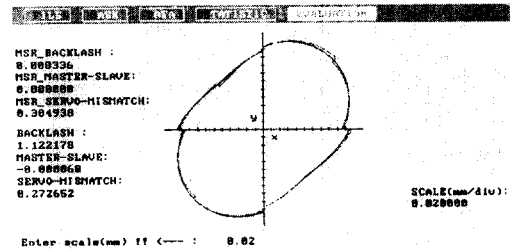
<Fig 3>는 각 Error pattern들을 종합적으로 분석한 것으로서 Weighted Residual Method와 Extra Sum of Square를 사용해 나온 결과이다. 그림에서와 같이 왼쪽 하단부의 값은 Weighted Residual Method를 사용한 결과의 a_i값으로서 backlash: 1.317699, Master-Slave Changeover: 0.005936, Servo-Mismatch: 2.243456이다. 그리고, MSR backlash: 5.896724, MSR_Master-Slave: 0.000105, MSR_Servo-Mismatch: 19.782986이다. 이상의 결과에서 MRS의 결과로부터 Servo-mismatch의 영향이 가장 큼을 알수 있고,그 다음으로 Backlash의 영향이 크고,Master-Slave Changeover의 영향은 가장 작은 것으로 나타났다. 그런데 위의 그림에서 Patternd는 비슷하지만 정량적으로 정확하게 일치하지 않는 이유는 Bridgeport m/c으로부터 얻은 data가 무부하 상태시 controller가 자유롭게 움직여 마찰력이 적기 때문이다.



<Fig 3> Evaluation result.

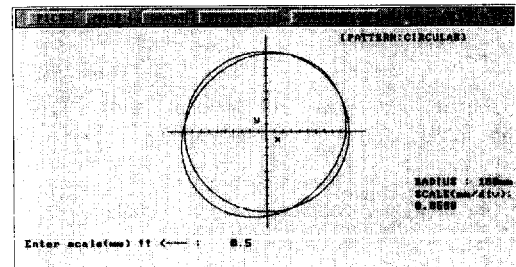
본 연구에서 개발한 S/W를 검증하기 위해 Backlash, Master-Slave Changeover, Servo-Mismatch등의 Error pattern으로부터 이들 pattern의 조합으로 임의의 Data를 만들어 본 S/W로 평가를 해보았다.

<Fig 4>는 이들 Error pattern 조합으로부터 만들어진 Data의 분석 결과를 나타내고 있다.

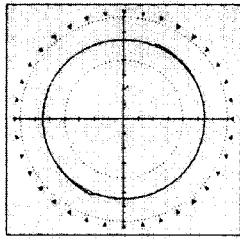


<Fig 4> Evaluation result of combined error patterns.

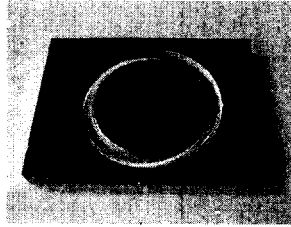
<Fig 4>는 각 pattern의 조합으로 만들어진 data를 종합 분석한 것으로서 Weighted Residual Method의 a_i가 값이 가장 크다고 결과에 가장 큰 영향을 미치리라고는 말할 수 없다. 이는 Extra Sum of Squares의 값을 비교해 봄으로서 정확히 알 수 있다.



(a) Ball-Bar data under no load condition.



(b) Roundness measurement after machining



(c) Workpiece

<Fig 5> The comparison of Ball-Bar and machining data

<Fig 5>는 실제 가공후 data와의 비교를 위해 가공데이터와 무부하시 Ball-Bar Data비교를 나타낸 것인데, 측정스케일은 0.05mm이고 가공방향은 CW이다. 무부하시 Ball-Bar data와 진원도 측정기를 사용해 나타난 pattern은 비슷한 것으로 나타났다. Fig.5(a)는 무부하시 Ball-Bar Data를 나타내는 것이고, Fig.5(b)는 가공후 진원도 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig.5(c)는 가공대상물의 가공된 모습이다.

5. 결론

본 연구에서는 원호보간시험에 의해 측정되는 Contouring 데이터를 이용하여 NC 공작기계의 수치제어장치의 오차원인 및 성능평가를 위한 방법 및 이를 적용한 S/W를 개발하였다. 또한 그전까지는 분석이 안되었던 Master-Slave Changeover의 Mask를 만들고 분석을 가능하게 하였다. Ball-Bar로부터 얻어지는 데이터를 Weighted Residual Method로 종합적인 분석을 하였고, 오차원인별 정량적인 비교를 위해 Extra Sum of Squares를 도입하였다.

본 연구에서 개발된 NC 수치제어장치 성능평가 S/W는 자체의 Simulation으로 검증하였으며, 또한

실제 공작기계에 적용하여 그 가능성을 확인하였다. 아울러 무부하 조건에서 측정된 Ball-bar 데이터를 실제 Test piece를 가공하여 비교하였으며, 유사한 Pattern을 얻을 수 있었다. 부하조건에서의 정량적인 차이에 대해서는 가공조건에서의 마찰력 관계 등 추후 연구가 필요하다. 또한 공작기계의 여러 가지 오차 원인들이 원호보간시험시 모두 독립적인 오차를 발생시키지 않기 때문에 원호보간 시험에 의해 모든 오차원인을 추출할 수는 없으며, 따라서 이에 대한 적절한 방법도 강구되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Knapp, W., "Test of the Three dimensional Uncertainty of machine tools and measuring machines and its relation to the machine errors," Annals of the CIRP, Vol.32, No.1, pp.459-464, 1983.
- [2] Kakino, Y., Ihara, Y. and Nakatsu, Y. "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of Their Origin by Using Telescoping Magnetic Ball-Bar Method", Annals of the CIRP, vol.36, pp377-380, 1987.
- [3] M. Burdekin and J. Park, "CONTISURE- A computer aided system for assessing the contouring accuracy of NC machine tools", 26th Int. MTD Conf., Manchester, England, 1987.
- [4] H. Kunzmann, et al., "On Testing Coordinate Measuring Machine(CMM) with Kinematic Reference Standards(KRS)", Annals of the CIRP, Vol.32, No. 1, 1983.
- [5] S.W. Hong, Y.J. Shin and H.S. Lee, "An Efficient Method for Identification of Motion Error Sources from Circular Test Results in NC Machines", Int. J. Mach. Tools. Manufact., Vol.37, No. 3, pp327-340, 1997.
- [6] RENISHAW, RENISHAW Ball Bar Diagnostic Manual. 1992
- [7] J. Neter, W. Wasserman and M.H. Kutner, Applied Linear Statistical Models, pp.271-275, IRWIN, 1990.