

최소거리법에 의한 온라인 편평도 측정시스템 개발

(On line flatness calibration of engineering surfaces using minimum separation technique)

H. PAHK (Dept. of Industrial Eng. POSTECH), M. BURDEKIN (UMIST, UK)

Abstract

A computer aided flatness calibration system has been developed. Rectangular grids based measurement procedure is proposed with closing error technique, giving advantages over conventional diagonal measurement procedures ('Union Jack'). A new analysis technique has been developed for flatness evaluation called 'ETT(Enclose Tilt technique)', enabling minimum separation definition which is acknowledged as standard term for flatness definition. Practical assessment shows the performance of the developed system.

1. 서론

정반, 공작기계 테이블등의 편평도 특성은 정반 작업의 정밀도, 공작기계의 정밀도 등에 직접적인 영향을 미치기에 빈번하게 측정되어야 하는데, 영국의 경우 1년에 약 100,000개의 공학평면이 편평도 측정이 이루어 지는 것으로 알려져 있다. 따라서 빈번한 편평도 측정을 효율적으로, 정밀하게 수행하기 위해서는 온라인 편평도 측정시스템이 필요하게 되며, 또한 측정데이터의 해석에 있어서도 측정과 동시에 편평도 해석을 할수있는 시스템이 바람직하고 또한 그 해석기법에 있어서도 세계표준, 각국의 국가표준등에서 규정하고 있는 최소 거리 평면에 의한 편평도 해석이 바람직한 현실이다. 따라서 본 논문에서는 편평도 측정 자체를 온라인으로 수행하며, 편평도 해석을 최소거리평면에 의하여 온라인으로 처리하는 편평도 측정 시스템의 개발을 설명한다.

2. 편평도 측정

편평도를 측정하는 방법으로서 Joseph Whitworth가 '3평면법'을 그의 공작기계현장에서 적용한 이래, 가장 많이 쓰이고 있는 방법중의 하나는 증분 각도법(incremental angular method)으로서, 이는 평면위를 각도 측정 장치를 움직여 가면서 측정을 한후, 변위로 환산하여 편평도를 측정하는 방법이다.

증분 각도법의 한 방법으로서, 측정코자 하는 평면의 대각선과 수평방향의 직선들을 따라서 측정하는 방법('Union Jack')이 있다(그림1). 이 Union Jack 방법은 대각선의 교점에서 같은 변위를 갖는 것으로 하여 측정데이터를 조절하는 것과 평면이 클 경우 많은 부분이 측정에서 제외된다는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 RPL(Rectangular Perimetre

Longitudinal Method) 및 RPLT(Rectangular Perimetre Longitudinal Transverse Method)방법을 제안한다.

그림2는 RPL를 보여주고 있는데, 이는 0점을 측정의 기준으로 하여 측정코자 하는 평면의 외곽선을 따라서 각도를 측정한다. 즉, (1), (2)의 측정선을 따라서 측정한후 (3), (4)의 측정선을 따라서 측정하게 되면, 맨마지막 측정점이 되는 A 점은 시작점 0점에 대한 상대 변위가 계산되게 되는데, 이때 (1)+(4)과 (3)+(2)의 두가지 경로가 존재하여, 각각의 경로에 따른 상대변위의 차이는 측정의 정밀도를 간접적으로 보일수 있는 닫힘 오차(closing error)가 된다. 이는 만일 측정상의 오차가 없다면 A점은 0점에 대해서 경로에 무관하게 같은 상대 변위를 가져야 하기 때문이다. 계산된 닫힘오차가 만족할 만한 정도 이면, 이제 닫힘오차는 (1)+(4)와 (3)+(2)의 경계선을 따라 분배 보정해 줌으로서 이론적으로는 영(0)의 닫힘 오차를 준다. 분배 보정된 측정선의 데이터들은 이제 경계선 내부의 편평도를 측정하기위한 기준점이 된다. 즉, 그림2에서 (5), (6), (7)의 측정선을 따라서 각도 측정을 수행한다. 각도는 변위로 환산되어 평면의 기하학적 형상이 계산되게 된다. 그림3은 세로 방향의 측정선을 추가로 측정함으로써 측정의 정확도를 올리고자 고안된 측정방법으로서 이는 고정밀도와 긴측정시간이라는 trade off가 있게 된다. RPL방법으로 측정할경우 측정의 정밀도를 0.1 um까지 구할수가 있었다. RPL 및 RPLT 방법으로 하는 경우 정밀 레벨 또는 레이저, 기타 광학적 각도 측정기등을 모두 사용할수 있으나, 일반적으로 편평도 측정의 경우는 지축에 대해서 기준점을 가지고 있는 정밀 레벨이 측정선 간의 상대 각도를 지시할수 있기 때문에 더욱 정확한 값을 갖게 된다.

3. 편평도 해석

측정되고 변위로 환산된 데이터는 적절한 해석 방법으로 해

석되어져야 한다.

즉, 측정된 데이터는 기준면 자체가 기울어진 데이터도 포함하고 있기 때문에 순수히 평면의 특성을 나타내는 편평도와는 차이가 있기 때문이다.

즉, (X_i, Y_i) 위치에서의 측정된 변위를 Z_i 라고 하면, 구하고자 하는 평면의 편평도는 이 변위에서 평면의 기울기에 의한 데이터를 제거한 값, 즉, 어떤 평균 평면에 대한 상대변위가 곧 편평도가 된다.

$$\text{편평도 } F_i = Z_i - (AX_i + BY_i + C) \quad (1)$$

여기서 A, B, C 는 평균평면의 평면 상수가 된다.

전통적으로 A, B, C의 결정을 위해서는 기준이 될 수 있는 세 점을 지나는 평면을 평균 평면으로 하는 방법이 있으며, 최소 자승법에 의한 평균 편평도 많이 사용되고 있는 현실이다. 그러나 세계공업표준 및 각국의 공업표준에는 최소거리에 의한 평균편평을 편평도의 기준으로 잡도록 규정하고 있다. 새로이 개발된 ETT(Enclose Tilt Technique)을 간단히 설명하기 위해 친척도의 문제를 고려해 보았다. 그림3에 1차원 편평도 문제 곧 친척도 문제를 고려해보면, 두 평행한 직선간의 거리를 최소로하는 평균 직선은 최대점과 최소점이 고번하게 뒹매임을 알 수있다. 따라서 이를 2차원 편평도로 확장하면 그림4,5와 같은 최대점과 최소점을 가질 때임을 직관적으로 알게된다. 평행한 두 기준면 사이에서의 편차로 정의되는 편평도를 계산하기 위해서는 두 기준면을 먼저 계산해야 한다. 즉, 두 기준면의 방정식은 다음과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$Z_u = AX + BY + C_u \quad (2)$$

$$Z_l = AX + BY + C_l \quad (3)$$

여기서 식 (2)는 윗면의 방정식 (3)은 아랫면의 방정식을 나타내고 있다. 이제 상수 A, B, C_u, C_l을 결정하기 위해서는 최소 4점이 있어야 하므로 직관적으로 3-1 모델(3점은 윗 평면, 1점은 아랫평면; 또는 1 점은 윗 평면, 3점은 아랫평면)이거나, 2-2 모델(2점은 윗 평면, 2점은 아랫 평면)이면 방정식 (2), (3)을 만족하는 상수들을 결정 할 수가 있음을 알 수 있다.

이는 반복적 수행을 통해서 점들을 차례로 탐색하면서 4점을 선택하게 된다. 즉 4점을 통해서 평면 방정식이 결정되므로 3-1모델(그림4) 또는 2-2모델(그림5)이 만족되면 이제 평균 평면을 구한후 편평도를 구하면 된다. 실제적으로 3-1, 또는 2-2 모델을 찾아내는 작업은 최위 돌리기 (Enclose Tilt)에 의해서 계산하였으며, 최위돌리기의 기본 메카니즘이 그림6에 보이고 있다. 최위돌리기는 먼저 측정 평면의 데이터에서 최대점과 최소점을 시작으로 하여 두점을 지나는 평면을 회전운동시켜 다음의 가능한 최우는 점(enclosing points)을 잡고, 이제 3점으로부터 평면을 결정하여 거리를 최소화 시

키는 방향으로 돌림으로서 다음번의 가능한 최우는 점을 찾는다. 이런식으로 계속 돌려나가면서 최우는 점으로 나타난 점들의 기하학적 형상이 위에서 언급한 2-2, 3-1 모델을 만족하게되면 이제 반복적인 iteration은 그치게 되며, 그점들로 결정된 평면이 이제 기준평면이 되어 편평도 해석을 수행하게 된다. 실제로 최위 돌리기 방법을 적용하기 전에 최소 자승법을 통한 근사계산을 수행한후 최위돌리기를 적용하면 매우 빠른 탐색 작업을 수행할 수 있었다.

4. 실제 평면의 적용

중분 각도를 측정 하기 위해서 정밀 레벨 (Talyvel)을 PC와 인터페이스 하여 사용하였다. 측정의 효율을 높이기위해 데이터 입력 모듈은 A/D를 통한 ASSEMBLY로 구현되었으며, 레벨의 움직임을 자동적으로 감지하여 각도를 읽어 들이는 시스템을 개발하였다. 레벨로부터의 입력은 적절한 노이즈 제거회로를 통해 들어오며 측정의 신뢰성을 위해 30-100회의 반복 측정을 통해서 읽어지게 된다. 한편 측정을 하기에 앞서 정밀레벨의 정확도를 레이저를 통하여 calibration 하였으며, 그 결과가 그림6에 있다. 그림 6에서 레벨의 arcsec와 A/D 입력값의 선형도를 보여주고 있는데, 최대 선형오차가 0.055 arcsec인것으로 계산되었으며, 이는 레벨의 양단에서 0.1 um 보다 작은 오차를 갖는 것을 의미한다. 36인치 X 24 인치의 정반에 실제 측정을 수행하였으며 10 스텝 X 7 스텝의 측정 그리드를 레벨이 따라 움직이면서 각도 측정이 수행되었다. 그림7은 환산된 측정결과이며, 최소 자승법에 의한 편평도가 그림8에 있다(최소자승법에 의한 편평도 8.71 um). 개발된 ETT(최위돌리기)에 의한 최소거리편평도가 그림8에 있다.(최소거리편평도 8.08 um) 그림 9는 최소거리 편평도의 3차원 형상으로서, 측정된 평면은 오목한 평면임을 보여 주고 있다. 3회의 반복측정에서 단함오차는 최대 1.14 um로서 이는 1.14/2/(9+6)=0.038 um의 오차를 각측정 노드마다 평균적으로 가진 것으로 볼때, 정밀한 측정이 수행되었음을 알 수 있다. 또한 3회 반복측정의 결과로부터 최소거리 편평도의 2s(2배의 표준편차)는 0.1um으로서 이는 95%의 신뢰도를 갖는 데이터임을 알 수 있다. 측정에 소요된 시간은 약 15 분 내외였다(RPL의 경우). 최소자승법에 의한 편평도는 최소 거리법에 의한 편평도보다 약 10%정도 크게평가됨으로써 최소 자승법에 의한 편평도보다 항상 작은 값을 가지는 최소 거리 편평도가 존재함을 알 수 있었다. 레벨의 무게도 정밀한 측정에서는 고려되어야 한다. 레벨의 무게에 의한 정반표면의 변형은 정반의 편평도에 직접적인 영향을 미치는데, 이는 정반의 강성도 시험으로 측정될 수 있다. 정반의 강성도 시험은 정반위에 무거운 하중을 올려 놓고 레벨을 놓고 편평도를 측정한다. 하중이 있는 경우의 편평도와 하중이 없는 경우의 편평도를 비교하면 하중에 의한 정반의 강성도를 측정할 수있다. 그림9는 정반 중심부에 293N의 하중이 걸리고 있을때, 이로 인한 편평도의 차이는 1.37 um 있음을 보여 주고 있다. 평면이 레벨의 무게에 의해서 움직이는 강성운동(Rigid body motion)은 그림 10에서 처럼 레벨을 중심에 놓

고 무게를 위한 블록을 정반 평면 양단에 놓고 레벨의 지지치를 읽어 그 차이로부터 X 방향과 Y 방향의 변형의 차이를 구하는 식이 그림 10에 있다.

이 X와 Y의 변형치는 레벨의 중분 각도 측정시 포함되어 있으므로 실제 편평도 계산에서는 배제되어야 한다.

또한 레벨의 무게에 의해서 평면 자체의 움직임이 많을 경우는 (예, 공기 베어링으로 테이블이 지지될때등) 두개의 레벨을 이용해서 측정해야 하는 데, 두 레벨의 사용여부는 편평도 측정을 수행하기 전에 확인하여 측정하도록 한다.

전체적으로 측정, 해석하는 시스템은 PC와 그 주변기기들에 의해 구현되었다. 그림11은 구현된 온라인측정시스템을 보이고 있다.

5. 결론

(1) 온라인 편평도 측정 시스템이 개발되었으며, 매우 정밀하고 효율적인 측정 방법임이 실제 측정을 통해서 입증되었다.

(2) 개발된 최소거리 편평도 해석 알고리즘은 (ETT) 은 PC 컴퓨터 레벨에서 편평도의 표준정도에 부합한 결과를 내는 것이 확인되었다. 이는 최소거리법에 의해서 해석되어 발표된 다른 논문들의 결과와도 일치한다.

(3) RPL 및 RPLT 측정 절차가 매우 작은 단립 오차를 가져왔음을 통해 볼때, 정밀도 면에서의 측정의 효율성 면에서 매우 좋은 방법임이 확인되었다.

(4) 정반의 강성도가 측정되었으며, 레벨의 자중에 의한 영향이 구려되었다. 0.5 μ m정도의 영향을 편평도에 주는 것으로 측정결과를 통해서 볼때, 0.5 μ m이하의 측정의 정밀도를 필요로 하는 경우에는 레벨의 자중이 고려되어야 함을 의미하고 있다.

(5) 측정기 또는 공작기계의 편평도를 측정한 후에는 측정된 평면 자체가 기준면으로서 자체계계의 정밀도를 측정하는 데 사용되어 질수 있다.

참고 문헌

(1) Burdekin, M., and Pahk, H. The application of a micro computer to the on-line calibration of the flatness of engineering surfaces, Proc. of Insn Mech Engrs, Vol 203 pp127-137, 1989

(2) Birch, K.G., Cox, M.G. Calibration of flatness of surfaces: a least squares approach, National Physical Laboratory report MOM 5, 1973

(3) Murthy, T.S.R. and Abidin, S.Z. Minimum zone flatness analysis of surfaces, Int. J. mach. Tool. des Res. 1980, 20, 123-136

(4) Pahk, H. Computer aided volumetric error calibration of coordinate measuring machines, PhD thesis, UMIST, 1990

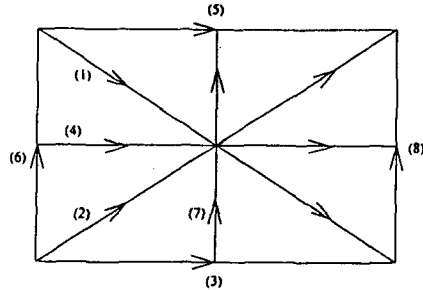


그림 1 'Union Jack' 평면 측정

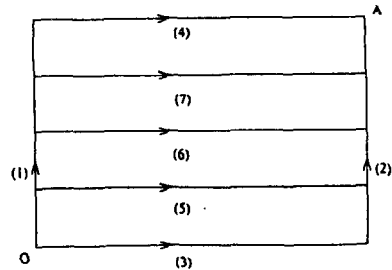


그림 2 RPL(Rectangular Perimeter Longitudinal) 평면 측정

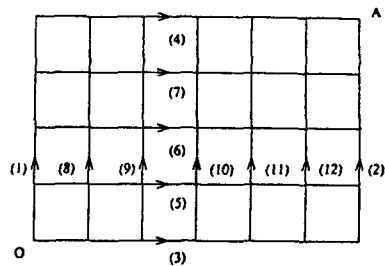


그림 3 RPLT(Rectangular Perimeter Longitudinal Transverse) 평면 측정

Upper plane $Z = aX + bY + c_U$
 Lower plane $Z = aX + bY + c_L$

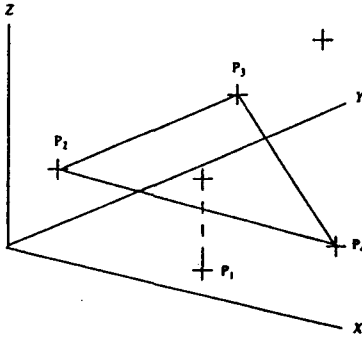


그림 4 3-1 모델

LEVEL 2 : 25 ARCSEC F.S.

POSTAL = -02.64 X ARCSEC + (2389.86)

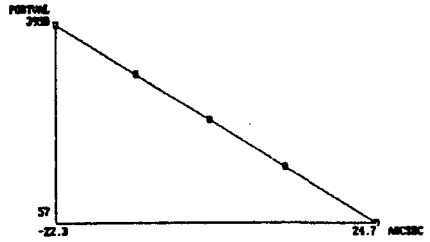


그림 7 정밀 레벨 calibration

Upper plane $Z = aX + bY + c_U$
 Lower plane $Z = aX + bY + c_L$

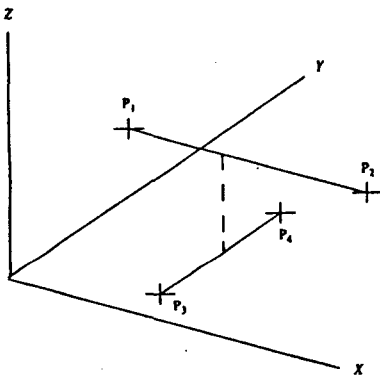


그림 5 2-2 모델

DEPTH LEVEL DATA (ORIENT, IN)

11.85	8.88	7.51	6.95	7.88	7.87	9.22	11.36	14.56	17.45
8.61	6.14	4.65	4.14	4.31	5.17	6.47	8.25	11.48	14.74
6.61	4.28	3.26	3.82	3.89	3.69	4.98	6.74	9.56	12.48
5.25	3.41	2.12	1.99	1.89	2.38	3.43	5.46	8.18	11.18
4.58	3.88	1.82	1.46	1.24	1.82	2.68	4.62	7.36	10.48
3.68	2.48	1.45	0.88	0.64	1.87	1.91	3.88	6.74	9.48
2.25	1.49	0.78	0.22	0.88	0.38	1.65	2.52	5.67	8.81

그림 8a 평면의 측정 데이터

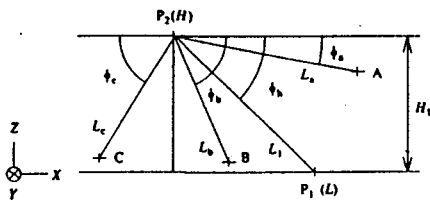


그림 6 최위돌리기(Enclose Tilt Technique)

FLATNESS LIMIT SLOPE DATA (ORIENT, IN)

8.24	5.34	3.38	2.17	1.73	1.76	2.46	3.94	6.48	8.71
7.81	3.88	1.73	0.56	0.28	0.28	0.91	2.33	4.33	7.28
6.21	3.23	1.54	0.65	0.86	0.88	0.35	1.72	3.89	6.14
6.17	3.56	1.61	0.76	0.86	0.81	0.28	1.65	3.71	6.85
6.68	4.36	2.51	1.38	0.62	0.54	0.74	2.82	4.89	6.47
6.82	4.36	3.26	2.12	1.23	0.99	1.17	2.48	4.68	6.76
6.68	5.26	3.84	2.67	1.78	1.51	2.11	3.33	4.82	6.49

그림 8b 최소 자승 평면 편평도 데이터

MINIMUM EDGE FLATNESS (MICRONS)

8.88	5.12	3.12	1.85	1.26	1.34	1.99	3.42	5.38	8.88
7.11	3.93	1.73	0.58	0.88	0.12	0.76	2.86	4.21	6.84
6.57	3.82	1.88	0.65	0.21	0.89	0.68	1.72	3.83	6.83
6.78	4.12	2.12	1.23	0.47	0.37	0.39	1.91	3.91	6.21
7.48	5.18	3.29	2.22	1.29	1.16	1.31	2.53	4.36	6.89
7.36	6.84	4.39	3.18	2.16	1.87	2.88	3.18	5.48	7.44
8.88	6.61	5.14	3.91	2.97	2.65	3.28	4.36	5.91	7.48

그림 8c 최소거리 평면 편평도 데이터

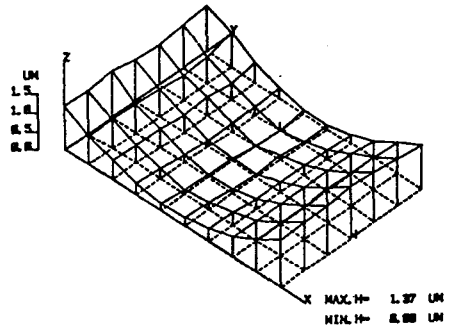


그림 10 정반 평면의 rigidity 측정 (중심하중 293N)

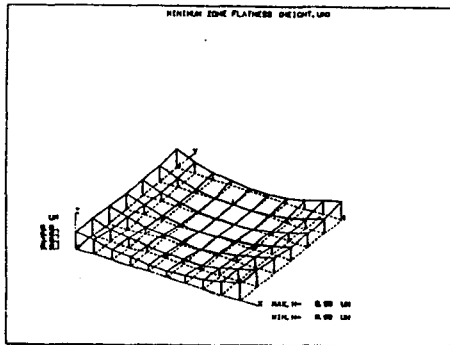


그림 8d 최소 거리 편평도의 3차원 표시

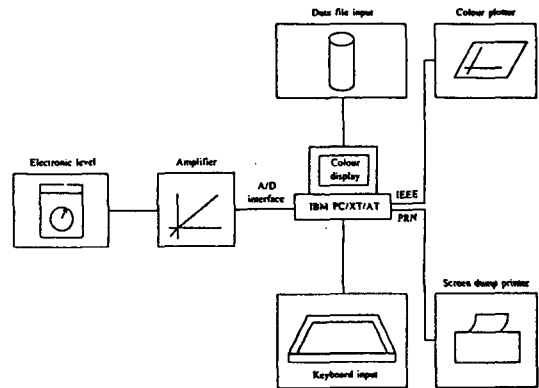


그림 11 온라인 편평도 측정 시스템

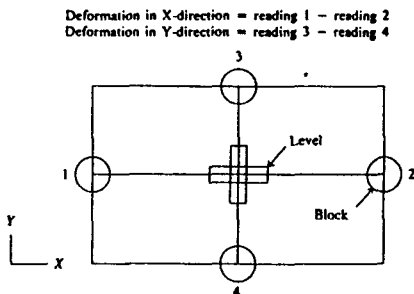


그림 9 레벨 무게에 의한 편평도 영향 측정