論文 한국공작기계학회지 제 8 권 제 4 호 1999. 8.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

정반 평면도와 측정점 개수와의 수학적 관계

현 창 헌*

Relation between Flatness of Surface Plates and Numbers of Measurement-Point

Hyun, Chang-Hun*

Abstract

The flatness is the most important nature for the surface plates. For finding such a flatness, a surface plate is surveyed along a number of straight lines parallel to the edges of plate, which form a grid pattern. Next, the variations in height of the grid points are measured relative to a datum point. The relation, between the number of such grid points and the flatness of a measured surface plate, is formulated in this study. In addtion, it is found that the grid-point-numbers suggested by KS B 5254 and JIS B 7513 have very poor reliability for estimation of flatness, in case of the surface plates with poor original flatness.

Key words : Flatness (평면도), Surface plate(정반), Measurement (측정), Grid pattern(측정점분포양상), Reliability(신뢰도), KS(한국규격), JIS(일본규격)

1. 서 론

치수측정시에 기준평면으로서의 역할을 하는 정반은 평면부분의 기하학적 평면으로 부터의 어긋남의 크기로 정의되는 평면도[1]가 가장 중요한 속성이다. 따라서, 평면도가 원하는 등급만큼 좋아야 한다. 그 뿐만 아니라, 정반을 구입하여 사용하는 중에도 일정기간 단위로 그 평면도를 검사하여 항상 본래의 평면도가 유지되고 있는 지 조사를 해보아야 한다. 가지고 있는 평면도를 알아내기 위해서는 다음과 같은 사항이 이루어 져야 한다.

첫째, 가공된 평면의 굴곡정도를 어떤 측정기로 측정하여야 한다.

이런 측정기 종류[5]에는 오토콜리메터, 정밀수준기, 다이얼인디케이터, 3차원 측정기등이있다. 위의 측정기들 중 어느것을 사용하든 지 얻어진 측정데이터는 이산적인 것이된다.

둘째, 측정위치를 어떤 형태로 배열할 것인 지,즉 측정점들의 모임형태를 정해야한다.

M.Burdekin et al. [6]은 위 측정기들중 몇 종류에 대해서 사용하여 평면의 굴곡도를 측정해나갈 때 적용해 볼 수 있는 여러형태의 측정경로와 측정점들의 모임형태를 제시하고있다.

KS, JIS 그리고 ISO규격[1-4]에는 측정위치의 배치형상에 대하여 대각선법, 십자법, 사각형법과이들이 혼합된 법을 제시하고 있다.

R.Liang et al.[7]은 평면의 조도측정에 있어서, 동일개수의 측정점을 어떤 위치에서 측정하느냐에 따라, 평면이 지니는 고유 표면조도값을 더욱 정확히 평가할 수 있음을 보여주고 있다.

세째, 측정점 개수를 정해야 한다.

이에 대해서 KS와 JIS 규격[1-2]에 따르면, 정반 한 변의 길이가 250mm부터 2500mm인 범위를 5가지 등급

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

으로 나누고 각 등급마다 측정위치와 측정점의 개수(3 개에서 11개까지)를 규정하고 있다. 그리고 250mm 이하의 변의 길이에 대하여는 임의로 정하도록 하고 있다. 한편, ISO 규격[3-4]에는 측정점의 개수에 대해 구체적인 언급이 없다.

M.M Dowling et al. [8] 은 3 차원 측정기를 사용하는 데 있어서, 측정시간을 줄이기 위하여 측정점수를 작게 하는 것이 일반적인 사실이며 평면의 굴곡도 측정에 대략 5-8 정도를 택하고 있다고 하였다. 그리고, 측정점의 개수와 그 측정위치에 관한 연구가 거의 없다고 보고하였다.

그리고 Tai-Hung Yang et al. [9] 은 어떤 직선형상의 부품이 기계가공되었을 때를 가정해서 그 가공후 생성된 직선모습을, 임의로 cosine 함수곡선과 더욱 복잡하게 cosine과 sine함수가 결합된 곡선을 가정하고 이들을 관찰대상으로하여 측정점수의 증가와 형상오차추정관계, 그리고 형상오차추정에 위 두곡선 모습이 끼치는 영향 그리고 최소자승법(Least Square Method)과 최소영역법(Minimum Zone Method)의 형상오차추정에 대한 영향을 논하였다. 이중 측정점수와 형상오차추정관계에서는, 하나의 곡선비교에서는 측정점수가 많아질수록, 위의 두 곡선을 비교시에는, 곡선모양이 복잡해 질수록 많은 측정점수를 택해야 가공직선의 고유형상을 더욱 근접하게 추정할 수 있다는 직관적으로 당연한 결론을 내리고 있다.

네째, 이렇게 측정수집된 이산자료를 이용하여 평면도를 산출해야 한다.

산출법으로는 3 점법이 KS 와 JIS에 제시되고 있고, 그 이외에 균형평면법, 최소자승법[10-11] 등이 사용되는데 이 3가지중 최소자승법이 가장 적합하다는 비교연구가 있었다[12]. ISO 에서는 최소영역법[13-14]을 추천하고 있다.

이러한 배경에서, 서로 크기가 다른 정반들의 고유평면도를 알아내기위해 측정점수를 증가시켜가며 평면도를 산출해나갈 때, 각 정반경우마다 측정점수의 증가와 고유평면도에로의 접근정도를 알아볼 수 있는 관계식을 찾아내는 일이 우선적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

그런데 정반고유평면도 평가관련문제에서, 신뢰성만이 문제라면 정반의 전면적에 대하여 골고루 분포시켜 측정위치를 선택하고 될 수 있는 대로 측정점수를 많이채취하여 이를 근거로 최소자승법등을 사용하여 평면도를 산출하면 실제의 값에 가까워질 수있다는 것은 직관적으로 자명하다. 그러나 측정점수가 많아지면 측정채취시간과 노력이 많이들고 기타 계산상에 시간이 많이든다.

가능하면 측정점수를 작게 하면서 평면도의 믿을 수 있는 값을 산출할 수 있으면 좋은 일이다.

이런 시각에서 KS B 5254 와 JIS B 7513 [1-2] 규격에 제시된 측정점의 개수는 해당정반의 고유평면도 추정하기에 과연 믿을만한 것인지? 하는 점검을 해볼 필요가 있다.

필요한 이 두개의 작업을 위해 본 연구에서는, 측정기기는 다이얼 인디게이터를 사용하였고 측정위치의 결정방식은 사각형법을 선택하였으며 평면도 산출법으로는 최소자승법을 택하였다. 그리고 서로 크기가 다른 정반들 끼리의 현상을 크기가 동일한 상황에서 비교하기위하여 단위면적당 측정점수, 단위면적당 평면도와 단위면적당 평면도의 상대오차의 개념을 도입하였다.

이런 과정을 통해, 앞에서 언급된 두 개의 필요성을 충족시키는 것을 연구의 목적으로 한다.

2. 실험 재료

2..1 측정실험용 정반내용

KS B 5254에 규격화되어 있는 정밀정반의 재료는 주철제와 석재로 구분되며, 본 연구에서는 본 규격에서 정하는 재료로 된 화강암 석제정반이 사용되었다. 사용면의 호칭치수의 크기 및 제조회사는 Table 1 과 같다.

Table 1. Surface Plates for Experiment

Size	Material	Manufacturer
300mm × 300mm	Granite	Sung Jin Machinary Co.
450mm × 300mm	"	"
1000mm × 1000mm	"	"

2.2 정반평면굴곡정도 측정기기명세

<u>명칭 : Dial Test Indicator</u>
기종 : 513-101 TI-01H
측정범위 : 0.14 mm
최소측정단위 : 0.001 mm
제조원 : Mitutoyo, Japan

명칭 : I-Beam Type Straight Edge

기종 : 정밀계기 (0 급)
규격: 치수 1000*100*60 (mm)
평면도(μm): 상면(-2 ~ +2), 하면(0 ~ +2)
평행도(μm): 상면과 하면 높이차 (5.0)
불확실도 : ± 1.5 μm
제조원 : 금성계측기

측정시 주위온도는 약 20 ℃ 로하였다.
측정모습은 다음의 개념도에서 보는 바와 같다.

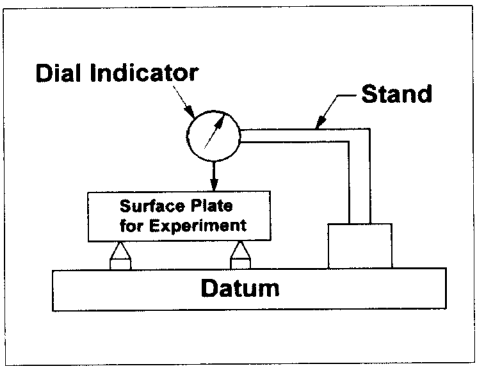

Fig.1 Concept diagram for measurment of the variations in height of the surface plates.

3. 실험 방법

3.1 평면도 산출법 및 측정점수의 증가생성법

정반의 가로 및 세로로부터 면적이 300mm × 300mm의 경우는 5%, 450mm × 300mm과 1000mm × 1000mm의 경우는 2%의 안으로 들어온 점을 시작점으로 하여 가로 및 세로에 평행하게 분필로 선을 그린다. 이렇게 생성된 가로 및 세로를 1 등분한다. 이 처음에 생성된 사각형은 4 개의 구석점을 갖는다.(이 점이 사실상 최소의 측정점수가 된다.) 이 꼭지점 중 하나에 다이얼 인디케이터의 촉침 (또는 3 차원측정기의 촉침)을 접촉하여 영점을 맞춘다. 그러면, 기준점이 되고 이 점을 제외한 나머지 점들은, 기준점에 대하여 얼마만큼 편위되어 있느냐로 굴곡도를 나타낸다. 한 측정점수의 모임마다 이러한 측정을 5 회씩 행한다. 각 횟수마다 최소자승법을 적용하여 평면도의 값을 선출하고, 이를 5로 나누어 평균을 구한다. 이 평균값을 대응하는 측정점수의 모임에 대한 평면도로 명명한다.

다음으로, 가로 및 세로의 간격을 2 등분한다. 측정점수의 크기는 9로 증가된다. 다음은 구간이 3 개가 있도록 3 등분한다. 측정점수는 16으로 증가된다.

즉,

$$(\text{등분수} + 1)^2 = \text{측정점수} \qquad (1)$$

가 되도록 한다. 다른 것은 동일하다.

실험분석 1 : 정반의 크기를 일정하게 하여 놓고, 즉, 300mm × 300mm, 450mm × 300mm, 1000mm × 1000mm에 대하여 각각, 가로 축은 측정점수, 세로 축은 평면도(단위는 μm)를 그린다.

실험분석 2 : 평면도 값이 10 μm라도, 어떤 크기의 면적을 가진 정반의 것에 대한 것인가 하는 고려가 필요한 경우가 있다. 왜냐하면, 그 값을 생성하기 위한 과정 중 어려움 정도가 면적의 크기에 따라 각각 다르기 때문이다. 따라서, 단위면적을 기준으로 할 때, 얼마만큼의 평면도를 소지하고 있느냐를 나타내는 물리량인 (평면도/정반면적)을 정할 필요가 있다.

평면도는 그 단위가 보통 μm로 나타내어진다. 한편 정반의 면적은 mm × mm 또는 cm × cm 또는 m × m로 나타낼 수 있을 것이다. 여기서는 수평축에서 사용되는 면적의 단위와 일치시키기 위해서 m × m 로 하였다. 따라서 세로 축의 단위는 μm / (m × m) 가 된다.

그리고 동일한 측정점수라도 정반의 크기에 따라 그 분포밀도정도가 다르다. 측정점수를 정반의 크기로 나누어 이를 정할 수 있다. 단위는 측정점수/(m × m)이다.

이상의 내용을 이용 300mm × 300mm, 450mm × 300mm과 1000mm × 1000mm에 정반에 대한 실험분석-1의 결과를 근거로 가로축과 세로축을 (측정점수/정반면적) vs. (평면도/정반면적)를 하나의 동일 그래프 속에 그린다.

실험분석 3 : 측정점수의 증가는 정반 가로 및 세로길이의 간격을 등분해나가는 (1)식에 따른다.

즉, 등분수

1 2 3 4 …… N 단, N = 등분수

에 대하여,
측정점수의 개수는
4 9 16 25 ······(N +1)2

처럼 제곱의 식으로 증가된다. (직사각형의 정반 경우는 가로를 등분한 길이와 세로를 등분한 1 개의 길이는 서로 다르게 된다.)

이때 어떤 정반에 대해서 최종의 평면도 값 즉, 대표하는 소위 고유 평면도 값을 알 수가 있다면, 다음과 같은 물리량을 도입할 수 있다.

y_{ss} = 최종평면도 값
A = 정반면적,
n = 1, 2, 3, ······ (측정점수/m2)
y_n = n 일 때의 평면도 값이라 할 때,

$$\text{절대오차} = y_{ss} - y_n \qquad (2)$$

$$\text{단위면적당 절대오차} = \frac{\text{절대오차}}{A} = \frac{y_{ss}}{A} - \frac{y_n}{A} \qquad (3)$$

$$\text{상대오차} = \frac{\left[\frac{\text{최종평면도}}{A} - \frac{\text{n일때 평면도}}{A}\right]}{\frac{\text{최종평면도}}{A}} = \frac{\frac{y_{ss}}{A} - \frac{y_n}{A}}{\frac{y_{ss}}{A}} = \frac{y_{ss} - y_n}{y_{ss}} \qquad (4)$$

이 식 (4)는 n에 해당하는 평면도가 최종평면도와의 오차를 최종 평면도 값에 대한 비율을 의미한다. n 은 면적당 측정점수를 몇 개 택했느냐 하는 정도를 나타내는 물리량과 대응되므로, 정반의 평면도를 산출하기 위하여 측정점수를 증가시켜가며 증가 매순간마다의 평면도 y_n을 계산하면서, 현재 어느 정도 상대적으로 최종값에 가까워 졌는지를 알아보는 데 사용될 수 있다.

실험분석-2의 결과로 나온 이산데이터 그래프를 적절한 연속곡선(5.고찰항의 식 (7),(8),(9) 참조)으로 접합(fitting)시킨 후 이 곡선을 참조하여 식 (4)를 세로 축으로 하고 가로축에는 (측정점수/면적)으로 하여 그래프를 그린다. 그러면 (단위면적당 평면도의 상대오차) vs. (측정점수/면적) 이 된다.

4. 실험 결과

실험분석-1에서는 가로축은 측정점수, 세로축은 평면도(단위 : μm)를 정반의 크기가 각각 300mm × 300mm, 450mm × 300mm과 1000mm × 1000mm의 것에 대하여 그리는 것이었다.
그 결과가 Fig. 2.1, Fig. 2.2과 Fig. 2.3이다.

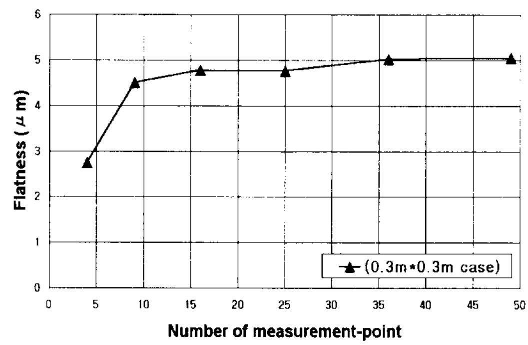

Fig. 2.1 Relation between Flatness and Measurement-points (0.3m × 0.3m case)

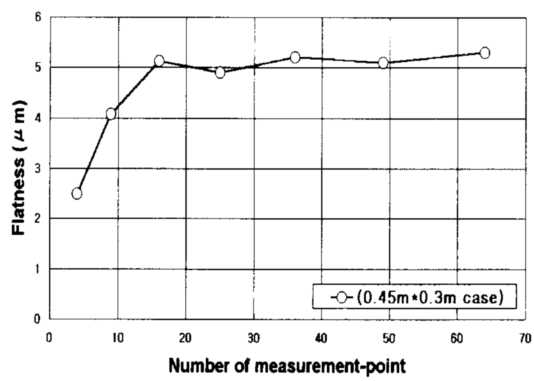

Fig. 2.2 Relation between Flatness and Measurement-points (0.45m × 0.3m case)

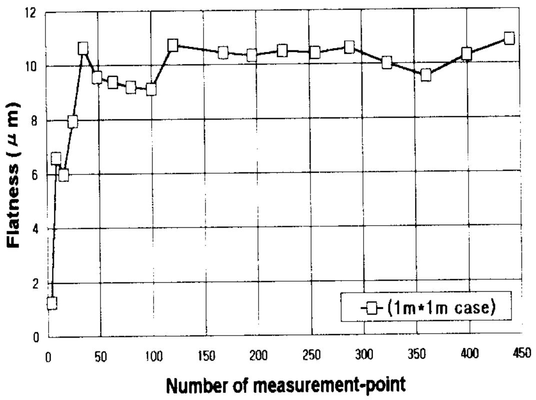

Fig. 2.3 Relation between Flatness and Measurement-points (1m × 1m case)

실험분석-2는, 실험분석-1의 결과를 근거로하여 (측정점수/정반면적) 에 대하여 (평면도/정반면적)의 관계를 도시하는 것이었다. 하나의 그림 속에 그린 결과가 Fig. 3이다.

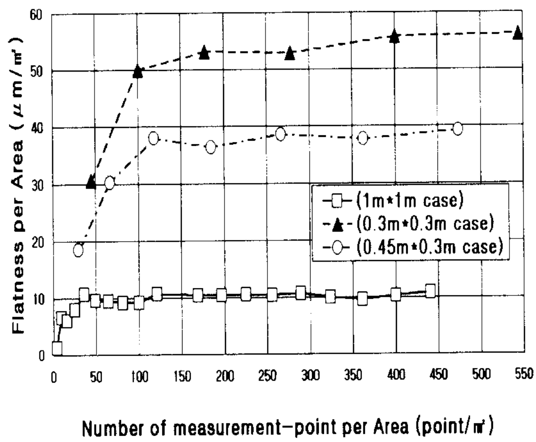

Fig. 3 Measurement-points/Area vs. Flatness/Area

실험분석-3은, 실험분석-2의 결과인 Fig.3의 이산데이터 그래프를 연속곡선으로 접합시키고, 이를 근거로하여 측정점수/정반면적에 대한 단위면적당 평면도의 상대오차 관계를 도시하는 것이었다. 그 결과는 Fig. 4이다.

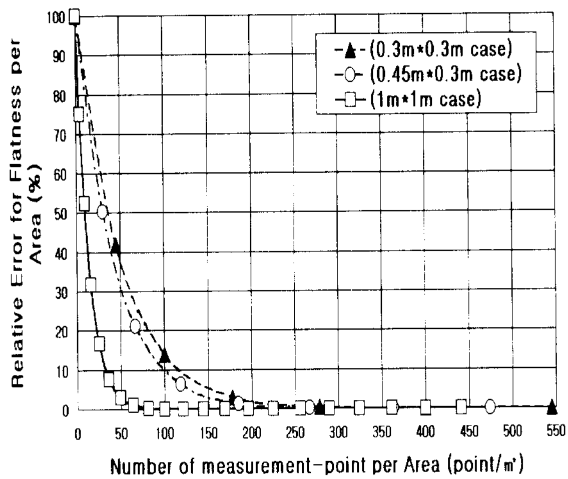

Fig.4 Measurement-points/Area vs. Relative Error of Flatness/Area

5. 고 찰

서로 크기가 다른 정반의 고유평면도를 알아내기위해 측정점수를 증가시켜가며 평면도를 산출해나갈 때 각 정반경우마다 측정점수의 증가와 고유평면도에로의 접근정도를 알아볼 수 있는 관계식을 찾아내는 문제를 해결하기 위하여, 먼저 실험분석-1의 결과인 Fig.2.1, Fig.2.2 그리고 Fig.2.3를 본다. 모두가 측정점수증가에따라 평면도값이 급격히 상승해나가다가 일정한 값으로 수렴하고 있다.

실험분석-2의 결과인 Fig. 3은, 서로 크기가 다른 정반들 끼리의 현상을 크기가 동일한 상황에서 비교한 것이다. 즉 300mm × 300mm과 450mm × 300mm의 두 정반경우가 1 ㎡ 정반에 대한 내용으로 변경되었다. 단위면적당 측정점수, 단위면적당 평면도의 개념을 도입하므로써 가능하였다.

Fig. 2.1, Fig. 2.2 그리고 Fig. 2.3에서 최종평면도는 4.8, 5, 10 ㎛정도로 되어 있어 Fig. 2.3의 경우가 앞의 두 경우보다 2 배정도 덜 정밀한 것처럼 보인다. Fig. 3에서보면, Fig. 2.3의 것이 상대적으로 작아지고 있다. 즉 1000mm × 1000mm의 정반이 더 공들여 가공되었음을 알려주고 있다.

그리고, Fig.3에서도, 단위면적당 측정점수가 증가함

에 따라 (평면도/면적)이 급격히 증가하다가 일정한 값으로 수렴하고 있다. 이때의 일정한 값은 각 정반의 단위면적당 평면도로 명명되는 (y_{ss} / A)이다. 여기서, A 는 정반면적 값이다.

이산데이터의 이 그래프들은 다음의 연속곡선 식으로 접합시킬 수 있다.

$$f(t) = a - a \exp(-t/\tau) \qquad (5)$$

여기서, τ 는 t = 0 에서의 접선기울기

이 t를 일정간격의 불연속 점 n마다 채취하고 (6)을 다음의 이산함수로 만든다.

$$f(n) = a - a \exp(-n/\tau) \qquad (6)$$

여기서,
a = y_{ss} / A= 단위면적당 최종평면도(μm/m^2)
n = 단위면적당 측정점의 개수(측정점수/m^2)
f(n) = n 일 때, 단위면적당 평면도 (μm/m^2)
이다.

식(6)은 임의의 정반 단위 면적 당 평면도와 단위 면적당 측정점수를 관계지우는 일반식이다.

최소자승법[11]을 사용하여, 식 (6)의 각 계수를 각 정반에 대하여 구하면 다음과 같다.

300mm x 300mm 의 경우,

$$f(n) = 55.2647 - 55.2647 \exp(-n/50.9323) \qquad (7)$$

450mm x 300mm 의 경우,

$$f(n) = 38.4847 - 38.4847 \exp(-n/43.0356) \qquad (8)$$

1000mm x 1000mm의 경우,

$$f(n) = 10.1371 - 10.1371 \exp(-n/13.9274) \qquad (9)$$

Fig. 3에서 측정점수의 증가에 따라 단위면적당 평면도값 a (= y_{ss} / A) 에 어느정도 접근하는 지 알아보기 위하여 실험분석-3이 이루어 졌고, 이때 식(7), (8), (9)가 이용되었고, 그 결과가 Fig. 4이다. 300mm × 300mm의 경우 1 ㎡당 측정점수가 200개(즉, 200 x 0.3 x 0.3 = 18 개), 450mm × 300mm 의 정반경우는 1 ㎡당 측정점수가160개 (즉, 160 x 0.45 x 0.3 = 21.6 =대략 22개)과 1000mm × 1000mm의 경우는 50개 정도는 되어야 상대오차 2% 정도이하로 떨어지게 된다. a 의 값은 1000mm × 1000mm, 450mm × 300mm 과 300mm × 300mm 의 순으로 커져서 a의 값이 클수록 더 많은 측정점수를 택해야 2% 이하로 접근됨을 보여 주고 있다.

즉, τ 가 작을수록 원점 쪽으로 더 굽혀진 모양을 하게되고 또한, a 값이 작은 것이됨을 알 수 있다. 그리고 a 값이 큰 것 즉, 단위면적당 평면도값이 좋지 않은 정반일수록(다른 말로는 가공정도가 좋지 않을 수록) 많은 측정점을 택해야 신뢰있는 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

이 가공정도관련 사항은 Tai-Hung Yang et al. [9] 도 가상적인 두곡선을 예로 들어 곡선의 모양이 복잡해질수록 많은 측정점을 사용해야 그 곡선의 형상을 더욱 근접하게 추정할 수 있음을 언급하였고 한편으로는 직관적으로도 당연한 사실이다.

이와같이 정반의 크기만 기준으로 삼아 최소로 필요한 경제적인 측정점수를 정하는 KS 와 JIS 방식은 신뢰도에 문제를 야기시킬 수 있음을 보여주고 있는 것이다.

지금까지의 논의의 내용을 KS B 5254와 JIS B 7513의 " 표-4 측정점의 간격 및 측정점수 " 에 제시된 측정점수에 대해, 그 신뢰성 점검에 적용해보면 다음과 같다.

크기 1000mm x 1000mm의 정반 경우 일변의 길이가 1000mm이므로 이에 대하여 최소 7 개의 측정점이 요구된다. 전 면적에 대해서는 7 x 7 = 49개가 최소요구된다.(이것은 Fig.4에서 보면 대략 2%이내의 오차를 갖고 예측할 수 있는 값이다.)

이 49개는 a =10 경우에 그렇다는 것이지 큰 것 예를 들면, 대략 a=55인 경우(Fig.3의 300mm × 300mm 인 정반참조)는 38%정도의 오차를 감수해야 하는 것임을 보여준다.

그래서 위 규격들의 측정점수제시 기준에 이런 내용이 고려된 새로운 것이 제정되어야 한다고 판단된다.

그리고 생산공정의 측정과정에 있는 어떤 정반의 평면도를 평가하는 문제를 상정해본다. 이때 식(6)을 이용하여, 신뢰성있고 경제적인 소위 최소측정점수로 측정한 후 평면도를 산출하기 위해서는 그 정반의 a 와 τ 를 알고

있어야 하므로 사전에 이를 어떻게 알아낼 수 있는 지가 문제이다. 그런데, 그것을 알고 있다면 측정할 필요도 없는 일이되겠다.

6. 결 론

크기가 다른 정반마다 그 소지하고 있는 고유 평면도 결정을 위하여 정반의 가로 및 세로를 동일구간 수가 되도록 등분해나가며 그 교차점(즉, 측정점)위에서의 평면 굴곡도를 다이얼 인디케이터를 이용하여 측정해 나갈 때, 그리고 평면도값산출에는 최소자승법을 사용하였을 때 측정점의 개수와 평면도간의 관계를 연구해본 결과 다음 결론을 얻었다.

1. 측정점수의 증가에따른 고유평면도에로의 접근정도를 알아볼 수 있는 관계식을 발견하였으며 본문 속의 (6) 식으로 표현된다.

2. 고유평면도 결정을 위해 필요한 신뢰성있고 경제적인 소위 최소측정점수를 결정하기 위해서는 정반크기와 가공정도가 기준이 되는 데 KS B 5254와 JIS B 7513에 제시된 측정점개수는 정반의 크기만을 기준하여 제공된 것이라서 가공정도가 나쁜 정반에 사용하면 신뢰성이 없을 수 있다

참 고 문 헌

1. KS B 5254, 정밀정반, 1993.
2. JIS B 7513, Precision surface plates, 1992.
3. ISO 8512-1, Surface Plates, Part 1: Cast Iron, 1990-12-01.
4. ISO 8512-2, Surface Plates, Part 2: Granite, 1990-12-01.
5. 이종대, 이진구: 정밀측정실습, 성안당, pp.267-270, 1998.
6. M.Burdekin and H.J. Pahk : "The application of a microcomputer to the on-line calibration of the flatness of engineering surfaces", IMechE, Proc Instn Mech Engrs , Vol. 203, 1989.
7. R.Liang, T.C. Woo and C-C,Hsieh: "Accuracy and Time in Surface Measurment, Part 1", Trans. ASME, J. of Manufacturing Science and Engineering, Feb., Vol. 120, pp. 141-149, 1998.
8. M.M. Dowling, P.M. Griffin, K.-L.Tsui and C. Zhou : " Statistical Issues in Geometric Feature Inspection Using Coordiante Measuring Machines", Technometrics, Feb., Vol.39, No.1, 1997.
9. Tai-Hung Yang and J. Jackman : " A Probabilis -tic View of Problems in Form Error Estimation," Trans. ASME, J. of Manufacturing Science and Engineering, Aug., Vol. 119, pp. 375-382, 1997.
10. Kiyoshi Takamasu and Shiego Ozono: " Deter- mination od Datum Plane by Least Square Method," JSPE. Vol.51, No.3, pp.101-106, 1985.
11. Steven C. Chapra and Raymond P. Canale : Numerical Methods for Engineers, 3rd edition, McGraw-Hill, pp.330-342, 1998.
12. 이강무 : "平面度 測定評價 프로그램 開發 및 評價法의 比較 硏究", 충남대학교 대학원 석사 학위논문, pp.19-22, 1994. 10.
13. T.S.R. Murthy and S.Z. Abdin : "Minimum Zone Evaluation surfaces ", Int. J. Mach.Tool Des. Res. Vol. 20, pp.123-136, 1980.
14. Akira Shimokohbe, Akira Toyama and Makoto Fukuda: " Evaluation of Form Errors by Minimum Zone Method," JSPE, Vol.50., No.4, pp.59-65, 1984.