

정밀가공 부품의 진원도 특성 평가에 관한 연구

오상록*, 이갑조+, 김종관**

A study on evaluation of roundness characteristics about precise machined parts

SangLok Oh*, Gab-jo Lee+, Jong-Kwan Kim**

Abstract

The dimensions and forms of precise machined parts are different to kinds of machine. It will be variant according to machine wear, tool form, cutting method and cutting condition at the same machine. At that time, the most important things are controlled and measured by appropriate measuring instruments. This paper aims to contribute to improving measurement accuracy through evaluation and consideration about various roundness in the machining company.

Key words : Cutting Method(절삭 방법), Cutting Condition(절삭 조건) Measurement Accuracy(측정 정확도), Roundness(진원도)

1. 서론

최근 반도체, 컴퓨터, 정밀기계산업 등의 급속한 발달로 인해 고성능, 고기능화를 추구함에 있어 부품의 성능을 최대한 발휘하도록 하기 위하여, 각종 고부가가치의 기계요소 및 부품들에 대한 초정밀 가공^{1~2)}의 필요성이 점점 요구되어지고 있다.

Taniguch³⁾, Loewen⁴⁾, McKeown⁵⁾ 등은 1980년대부터 각각 정밀공학의 중요성을 이론적으로 제기하였으며 따라서 일본, 미국 등 공업선진국을 중심으로 막대한 연구비를 투자하여

범국가적인 차원의 산·학·연 대형 연구 과제를 수행하고 있다. 일본의 경우 1985년도에 일본정밀공학회의 사업부회가 “Nano-Technology 체계화”를 위한 분과회를 설치하여 정밀계측, 제어장치, 가공법 등 각 분야의 연구 현황과 동향 등을 조사, 연구하였다. 영국의 경우는 1986년에 NION project가 NPL을 중심으로 시작되어 산·학·연이 공동으로 연구 과제들을 수행하고 있으며, 미국의 경우는 Molecular Measuring Machine 등의 개발이 NIST을 중심으로 정부와 대학, 기업 간의 공동연구⁶⁾로 이뤄지고 있다.

* 오상록, 조선대학교 기계학과 대학원(kglok@naver.com)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 이갑조, 조선대학교 기계공학과 대학원
++ 김종관, 조선대학교 기계공학과

국내에서도 형상 및 치수정밀도 100nm 이하, 표면거칠기 10nm 이하의 초정밀 가공을 위한 기술 개발 및 체계적인 연구가 대학, 기업 간의 공동연구로 활발히 진행되고 있다.

정밀절삭 가공부품의 성능 평가에 있어서, 치수 및 형상공차는 사용한 공작기계의 종류에 따라 달라질 수 있고, 같은 공작기계를 사용했을 경우에도 기계의 마모, 절삭공구의 조건, 절삭방법, 작업자의 습관, 환경조건 등에 따라 달라진다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 그와 같은 상태들이 적절한 측정기를 이용하여 평가되고 규제되어야 한다.

본 연구에서는 정밀선반으로 가공된 시험편의 진원도^{7~8)}를 다양한 측정방법을 이용하여 측정 후 그 결과들을 비교 평가하였고, 특히 진원도 측정기에 의해 측정된 반경법의 측정결과를 해석, 고찰하여 산업현장에서 측정 정확도 향상에 기여하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 진원도의 정의

진원도라 함은 둥근 봉, 둥근 구멍, 둥근 추 또는 구 등이 진원에서 벗어난 정도의 크기를 말한다. 우리나라는 2002년에 개정된 KS B 5545에 의하여 진원도를 정의하고 있으며, 그 정의에 따르면 진원도란 원형부분의 기하학적인 원으로부터의 어긋남의 크기를 말한다. 이는 ISO 6318을 그대로 번역하여 KS 규격으로 확정한 것이다. 진원도의 측정 및 표시는 각국의 규격에 따라 다르나 크게 직경법, 3점법, 반경법으로 표시할 수 있다. 반경법의 평가방법으로는 최소 제곱원법, 최소 영역원법, 최소 외접원법, 최대 내접원법 등 4가지 방법으로 규정하고 있다.

2.2 진원도 측정방법에 대한 이론

2.2.1 직경법

직경법에 의한 측정은 원형부분을 평행한 2개의 직선 사이에 끼울 때, 그 2개의 직선 사이의 거리를 측정하여 최대값과 최소값의 차로써 나타내는 방

법이다. 실제로는 축이면 외측 마이크로미터와 전기 마이크로미터 등을 이용하고 구멍의 측정면이면 내측 마이크로미터나 실린더 게이지 등을 이용하여 몇 군데를 측정하여 그 측정값의 최대값과 최소값의 차를 구한다.

이 방법은 진원도를 쉽고 빠르게 측정할 수 있으며 타원형상의 측정에는 유효한 방법이지만 측정단면에 요철이 있을 때나 등경의 원일 경우 문제가 된다. 특히 직경법으로 측정하여 얻은 데이터로부터 피측정물의 형상을 정확히 파악할 수 없다는 것이 직경법의 가장 큰 문제점이 있다.

2.2.2 3점법

3점법에 의한 측정은 원형부분을 2개의 점으로 지지하여 회전시키고 그 2개점의 수직 이등분선상에 걸친 윤곽의 이동거리를 가지고 표현하는 방법이다. 실제로 측정물이 축이면 V블록과 축미기, 인승 게이지 등을 이용하고 구멍이면 삼각 게이지를 이용하여 축미기의 최대 변위량으로 진원도를 정의한 것이다.

그러나 이 방법은 등경의 원 혹은 일그러진 원의 경우 진원도 판단이 가능하나 측정물의 형상과 지지점의 끼움각의 선정에 따라서는 측정값에 큰 오차가 발생할 수 있다.

2.2.3 반경법

반경법에 의한 측정은 측정물 또는 검출기를 기준 축을 중심으로 피측정물을 360° 회전시켰을 때 축미기 지침의 최대값과 최소값의 차이로써 진원도를 표시하는 방법으로 원형부분의 형상을 이론적으로 가장 정확하게 구할 수 있다.

피측정물의 중심은 센터의 축선이 되는데 센터가 잘못된 위치에 있을 때 잘 못된 결과를 얻게 된다. 따라서 회전주입과 피측정물의 중심과의 차이를 계산, 보상에 주어야 한다. 종래에는 이런 측정값의 처리를 위한 계산방식이 복잡하였으나 최근 전자기술의 급성장으로 회전축의 중심과 피측정물의 중심 차이의 보상을 마이크로프로세서에 의해 쉽게 행할 수 있게 되었다. 그러나 이 반경법의 경우에는 중심의 위치에 따라 진원값의 차이가 생기기 때문에 측정된 형상의 중심을 잡는 방법이 필요하다.

2.3 진원도 측정기에 대한 이론

진원도 측정기를 이용하여 진원도를 측정하기 위해서는 피측정물의 원주 주위를 회전하면서 측정면의 윤곽을 검출해야 하기 때문에 정확하게 회전하는 장치가 필요하게 되며, 이와 같은 회전장치에 따라 재물대 회전식과 검출기 회전식으로 분류한다.

진원도 측정기의 기본 구성요소는 테이블이나 측정자를 회전시켜 주는 회전장치, 피측정물과 접촉하여 측정단면의 윤곽을 전기적인 신호로 변환시키는 검출기, 전기적인 신호를 증폭시켜주는 증폭기, 측정면의 요철에 대한 신호를 전기적으로 줄여주는 필터, 그리고 필터에서 나온 신호인 측정면의 윤곽을 기록하는 기록계로 나누어진다.

2.3.1 회전 장치

회전축이 회전할 때 흔들리게 되면 측정 오차의 발생으로 실제의 윤곽과 다른 윤곽을 그리게 된다. 따라서 회전 시 원주방향 및 축방향 회전정도가 좋아야 한다. 또한 외부진동에 대해 빨리 감시를 하여야 하며, 오랫동안 사용할 수 있도록 견고해야 한다. 그리고 재물대 회전식의 경우 어느 정도의 무게를 견디어야 하고 마찰이 적어 에너지 소모가 적어야 한다.

2.3.2 검출기

검출기는 축침의 미소변위를 전기적 신호로 바꾸어 주는 장치를 말한다. 검출기 회전식의 경우 한 개의 검출기만 사용되는데 재물대 회전식의 경우 2개의 검출기를 동시에 사용한 측정기가 있어 동심도 및 평행도를 쉽게 측정할 수 있다. 검출기의 측정자가 원주방향으로 이동하게 되면 피봇(pivot)을 회전축으로 하여 철심이 움직이게 되고 이로써 코일에 유도되는 전압이 변하게 되어 측정자의 이동변위 즉 피 측정물의 윤곽을 측정할 수 있다.

2.3.3 증폭기

진원도 측정시 측정단면의 굴곡은 매우 작은 양으로 측정자의 수직 변위량도 매우 작다. 이 작은 양을 눈으로 감지할 수 있게 그래프로 그리려면 이 변위를

증폭(V_p)해야 한다. 이러한 장치를 증폭기라 하며, 대부분의 진원도 측정기는 대략 20배~20000배까지 증폭할 수 있다.

2.3.4 필터

필터는 피측정물의 형상을 쉽게 파악하기 위한 전기장치이다. 아주 거친 표면을 갖는 피측정물의 경우 그 거칠기 때문에 형상파악이 불가능하기 때문에 거칠기는 그래프에서 없애주고 그 형상만 그래프에 그려야 한다. 반면 피측정물의 거칠기를 알기 위해서는 로브(lobe)를 없게 하고 거칠기만 그래프에 그리게 해야 한다.

보통 필터의 표시는 필터링(filtering)된 후 그래프에 그려질 수 있는 동일 각도 간격의 요철수로 정의하며, 스피들의 회전수에 따라 달라지나 보통 15에서 150까지 있다.

2.4 반경법의 진원도 평가에 대한 이론

2.4.1 최소 제곱원법

구할 평균원과 실측단면과의 반경의 차를 제곱하여 그 제곱의 총합이 최소가 되는 그런 평균원을 구했을 때 그 평균원을 최소 제곱원이라 하고 그 원의 중심에서 실측단면까지의 최대반경과 최소반경과의 차이로 진원도를 정의한다. 즉 이 중심을 가진 동심 2개의원에 측정형상을 끼울 때의 2개의 반경차가 최소 제곱 원법에 의한 진원도이다.

2.4.2 최소 영역원법

최소영역원법은 측정형상을 2개의 동심의 기하학적 원에 끼울 때, 동심 2개의 간격이 최소가 되는 중심을 기준으로 하는 평가 방법이다. 이 2개원의 반경차가 최소영역원법에 의한 진원도이다.

2.4.3 최소 외접원법

최소 외접원법은 측정형상에 대한 최소반경의 외접원을 구해 이 외접원의 중심을 기준으로 하는 평가 방법이다. 이 중심과 동심에 외접하는 원에 측정형상을 끼울 때의 2개원의 반경차가 최소외접원법에 의한 진원도이다.

2.4.4 최대 내접원법

최대 내접원법은 측정 형상에 대한 최대 반경의 내접원을 구해, 이 내접원의 중심을 기준으로 하는 평가 방법이다. 이 중심과 동심에 내접하는 원에 측정형상을 끼웠을 때의 2개원의 반경차가 최대 내접원 법에 의한 진원도이다.

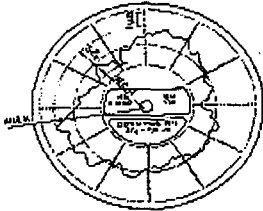


fig.1 최소 제곱원법 진원도 평가

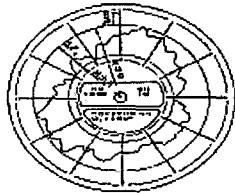


fig.2 최소 영역원법 진원도 평가

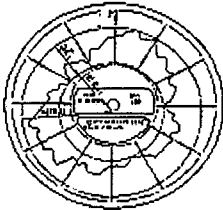


fig.3 최소 외접원법 진원도 평가

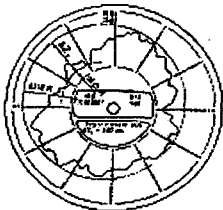


fig.4 최대 내접원법 진원도 평가

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

정밀절삭 가공면의 진원도 평가를 위하여 합금 주철(GC 30)로 원통형 시편($\phi 60 \times 31 \ell$)을 국내 H

사에서 제작한 나노가공을 위한 초정밀선반으로 가공하였으며 기계의 외관과 세부사양을 fig. 5, Table.1에 도시 하였다

시편의 진원도 측정에 사용된 측정기는 fig.6의 Rank Taylor Hobson사에서 제작한 테이블 회전식 진원도 측정기로 분해능은 10nm, 정확도는 75 nm이다. 측정 가능한 반경법의 평가방법으로는 최소 제곱원법, 최소 영역원법, 최소 외접원법, 최대 내접원법 등이 있으며, 최고 배율이 20000배이고 필터는 15-500, 1-15, 1-50, 1-150, 1-500을 사용하였다.

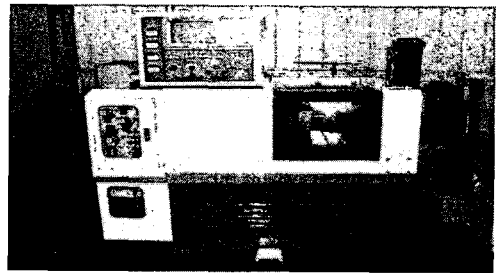


fig.5 정밀 선반

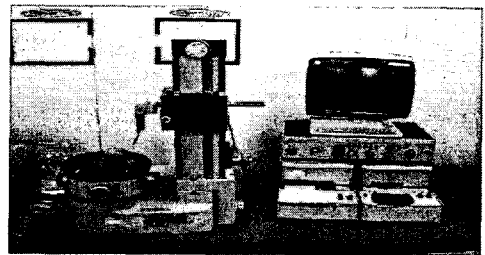


fig.6 진원도 측정기

Table.1 정밀 선반 및 진원도 측정기의 규격

Precision machine	Specifications	Roundness tester	Specifications
Machine Name	UPL	Model	Talyrond-200
Max. Spindle Speed	10,000 rpm	Maker	Rank Taylor-Hobson
NC System	HYD-3000T	Magnification	x100 ~ x20000
Min. movement unit	0.05 μm	Resolution	10 nm
Head cooling system	Oil Jet	Worktable size	Max. $\phi 200 \text{ mm}$
Spindle Motor	3.7/5.5 Kw	Control system	Windows based PC

3.2 실험방법

시편은 증공축으로 치수가 $\phi 60\text{mm} \times 31\ell\text{mm}$ 이고 Table.2의 화학적 성분을 가지며, fog.7과 같다.

Table.2 진원도 시편의 화학적 성분

Elements	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
wt(%)	3.00 ~ 3.60	1.80 - 2.24	0.50 ~ 1.00	0.15	0.30	0.20 ~ 0.40	0.50 ~ 1.00	0.15 ~ 0.40

진원도는 직경법과 3점법, 반경법으로 각각 측정 후 진원도 측정기를 이용하여 최소 제곱원법, 최소 영역원법, 최소 외접원법, 최대 내접원법으로 측정하였다.

측정은 각각 3회를 실시하여 평균하였고, 개인 오차를 줄이기 위하여 정밀측정 국가 기술 자격증을 소지한 1인이 수행하였다. 직경법은 외측마이크로미터를, 3점법은 V블록과 전기마이크로미터를, 반경법은 최소 영역원법을 이용하여 각각 측정하였으며, 끝으로 반경법의 4가지 측정방법 평가를 위해 fig.6의 진원도 측정기를 이용하여 측정하였다.

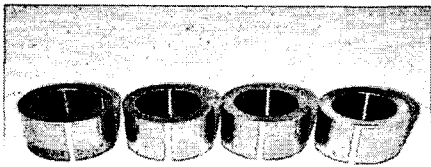


fig.7 진원도 시험편

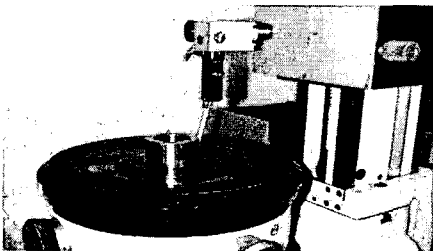


fig.8 시험편의 진원도 측정과정

3.3 진원도 측정 및 평가방법

진원도 측정으로 얻어진 결과의 평가는 측정방법에 따른 평가와 반경법의 측정방법별 평가로 두 가지로 구분하여 실시하였다. 먼저 측정방법에 따른 평가는 직경법과 3점법, 반경법으로 각각 진원도 측정을 실시하여 얻은 결과 값을 평가하고 분석하였다. 이는 측정방법이 달라짐에 따라 시편의 형상이 측정 결과에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. 측정 환경은 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 로 관리되는 정밀 측정실에서 실시하였다.

반경법의 평가는 최소 제곱원법, 최소 영역원법, 최소 외접원법, 최대 내접원법에 대한 진원도 측정결과를 평가하고 분석하였다. 이는 같은 형상을 가진 실험편이 평가 방법이 달라짐에 따라 진원도에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다.

진원도 측정결과에는 공히 측정오차가 내포되어 있을 것으로 판단되나 본 연구의 경우에는 동일 조건에서 동일 측정자가 수행한 결과로서 미치는 오차의 영향 또한 각각 같은 것으로 판단되어 별도의 비교분석은 실시하지 않았다.

4. 실험 결과의 고찰

4.1 측정방법에 따른 진원도 해석 및 고찰

측정방법에 따른 진원도의 결과를 고찰하기 위하여 fig.7의 시편을 fig.8의 측정기로 직경법과 3점법, 반경법에 의한 측정을 실시하고, 그 결과를 fig.9과 Table.3에 각각 표시하였다.

먼저 반경법의 진원도 측정결과를 분석해 보면 로브(lobe) 형상이 정삼각형에 가까울수록 진원도 값이 작게 나오고 있음을 알 수 있다. 때문에 기계가공에 있어서 가공 중 제품을 고정하는 척의 고정압력이 제품의 형상을 결정하는 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 진원도 시편도 조도가 3개인 연동척을 사용하여 정밀선반에서 제작되었기 때문에 기계가공의 특성상 홀수인 3각형의 로브 형상이 나타나고 있다. 반경법의 평가는 최소영역법에 준하여 실시하였다.

직경법의 진원도 측정 결과를 분석해보면 No.1의 경우 반경법에 의해 측정된 값과 유사하나 No.2와 No.3은 오히려 반경법 보다 진원도 값이

크게 측정되었음을 알 수 있다. 이는 No.1의 경우 정상각형에 가까운 홀수의 로브형상으로 반경법보다 약간 작은 값으로 측정되기는 하나 오차가 덜 발생된 경우이고, No.2와 No.3의 경우는 로브형상이 타원형에 가까운 형상으로 오히려 직경의 편차가 진원도 값으로 측정되고 있음을 보여주고 있기 현상이다.

3점법의 경우 직경법 보다 반경법에 더 가까운 결과 값을 얻고 있는데 이는 3점에 의해 진원도가 측정되므로 직경법보다 로브형상의 정도가 더 감소되어 측정되고 있기 때문이다. 그러나 정상각형에서 벗어난 No.2와 No.3의 경우는 반경법과 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

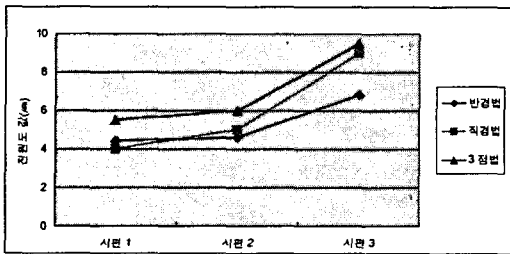


fig.9 측정방법에 따른 진원도 측정결과

Table.3 측정방법에 따른 진원도 측정값

측정방법	진원도 측정값 (μm)		
	시편 No.1	시편 No.2	시편 No.3
반경법	4.4	4.6	6.8
직경법	4.0	5.0	9.0
3점법	5.5	6.0	9.5

4.2 반경법에 따른 진원도 해석 및 고찰

진원도 측정기에 의해 측정된 반경법의 평가방법에 따라 진원도 측정 결과를 fig.11과 Table.4에 나타내었으며 그 결과를 분석하여 보면 다음과 같다.

최소 영역원법에 의한 진원도 값이 시편 No.1, No.2, No.3에서 각각 4.43μm, 4.60μm, 6.78μm로 가장 작게 나타나고 있으며, 최대 내접원법에 의한 진원도 값이 5.10μm, 6.61μm, 9.09μm로 가장 크게 나타나고 있다. 반면 최소 영역원법과 최소 외접원법에 의한 측정 결과는 최대 내접원법과 최소 영역원법의 중간 값으로 서로 비슷하게 나타나고 있다.

평가 방법에 따른 상호 편차값을 분석해 보면 로브형상이 일정하게 나타난 No.1에서는 최고 0.91μm로 안정적이거나 로브형상이 불규칙한 No.2와 No.3에서는 각각 2.01μm, 2.28μm로 다소 큰 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 결국 진원도는 완성품의 성능과 수명을 결정하는 중요한 요인의 형상공차이기 때문에 산업현장에서 양산되고 있는 부품을 규제함에 있어서 용도에 따라 적절한 평가방법이 선정되어야 할 것이다. 일반적으로 축과 축수의 물림에 있어서 축은 최대 외접원법, 축수는 최소 내접원법, 그 밖의 부품은 최소 자승원법이나 최소 영역원법이 적용되면 될 것이다.

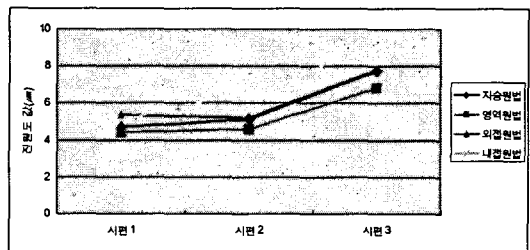


fig.11 반경법의 종류에 따른 진원도 측정결과

Table.4 반경법 종류에 따른 진원도 값

평가방법	진원도 측정값 (μm)		
	시편 No.1	시편 No.2	시편 No.3
최소 자승원법	4.70	5.14	7.72
최소 영역원법	4.43	4.60	6.78
최소 외접원법	5.34	5.17	7.79
최대 내접원법	5.10	6.61	9.06

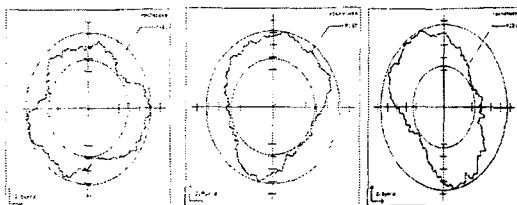


fig.10 시편별 반경법(최소 영역원법) 측정결과

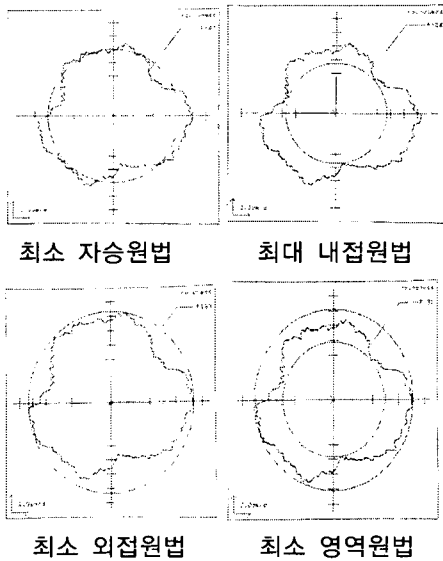


fig.12 진원도 시편 No.1의 반경법 측정결과

5. 결론

초정밀선반으로 합금주철(GC 30)을 절삭 가공한 시편의 외측면을 3종류의 진원도 측정방법과 4종류의 반경법 평가방법에 따라 진원도를 측정하고 그 결과를 해석 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직경법과 3점법의 진원도 측정방법은 기계가공의 특성에 따라 발생된 로브 형상의 영향으로 반경법에 의해 측정된 결과와는 다소 차이를 나타내고 있어 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 방법이긴 하나 정밀을 요하는 부품의 측정에는 적절하지 못함을 확인할 수가 있었다.
2. 반경법에 의해 측정된 진원도는 최소 영역원법에 의한 측정값이 가장 작고 최대 내접원법에 의한 측정값이 가장 크게 나타나고 있으며, 불규칙한 로브형상이 발생될 때 각각의 평가방법에 따른 편차는 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수가 있었다.
3. 본 연구를 통한 결론은 진원도는 완성품의 성

능과 수명을 결정하는 중요한 형상공차이기 때문에 산업현장에서 양산되고 있는 부품을 규제함에 있어서 부품의 용도에 따라 적절한 진원도 평가방법이 선정되고 규제되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 徐南燮 : 切削加工學, 東明社, 2000
2. 이징구 : 정밀가공학, 기전연구사, 2003
3. N. Taniguchi : Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing, Annals of the CIRP, 32/2/1983 pp. 573/582
4. E. G. Loewn : Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining, Annals of the CIRP, 32/2/1984 pp. 413/415
5. P. A. McKeown : the role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future, Annals of the CIRP, 36/2/1987 pp. 495/501
6. 이재경, 강재훈 : Study on the Ultraprecision machining technology with nanometer order, KIMM, 1992
7. 이징구 외 : 정밀측정공학, 기전연구사, 2002
8. 이종대 외 : 정밀측정실습, 성안당, 1996