

정밀가공을 위한 원통도 검사방법 제안

김 강

A Suggestion for Cylindricity Inspection in Precision Machining

Kang Kim



- 김 강(국민대 기계공학·기계설계학과 교수)
- 1958년생
- 무심연삭공정 및 형상공차를 전공하였으며, 동시공학 및 생산자동화 분야에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

기하학적 형상공차(geometric tolerance)는 제품의 성능과 부품들의 기구적인 관련을 고려하여 설계시에 부품의 형상을 규정하는 수단으로서 이러한 부품의 경제적이고 효율적인 생산을 위한 도면표기법이며 아울러 일종의 생산 및 검사 기법으로 간주되고 있다. 형상공차의 개념은 1960년대에 이르러 미국의 군수 및 항공산업 부문에서 처음으로 표준화되어 활용되었으며 1970년대와 1980년대를 거치면서 수차에 걸친 개정, 보완이 이루어졌다. 1970년대 이후의 고정밀, 고부가가치 민수용 제품의 출현 및 급격한 시장 팽창으로 인하여 현재는 민수산업의 많은 부문에서 이의 활용이 보편화되고 있다.

그림 1의 원통도(cylindricity)는 원통형상(cylindrical shape) 가공물의 표면을 3차원적으로 규정하는 형상공차로서 이것은 그림 2에 나타낸 바와 같이 각각 2차원적으로 축

방향에 수직인 임의의 단면과 축을 포함하는 임의의 단면의 형상을 규정하는 진원도(roundness)와 평행도(parallelism) 및 1차원적으로 축방향의 임의의 표면선을 규정하는 진직도(straightness)가 서로 동시에 복합되어 있는 것으로 볼 수 있다.⁽¹⁾ 일반적으로 원통형상의 정밀가공은 선삭(turning), 원통연삭(center grinding) 및 무심연삭(centerless grinding) 등의 가공법에 의존하고 있으며, 현재 이러한 가공법에 의하여 제작되고 있는 대표적인 부품으로는 영상녹화 재생기(video cassette recorder), 디스크드라이버(disk driver) 및 정밀소형전동기(micro-motor)에 사용되는 정밀소형 축수 및 롤러(micro-shaft and roller)와 디젤엔진용 연료분사기(fuel injector)의 부품인 플런저(plunger)와 배럴(barrel) 등을 들 수 있다. 이 부품들의 직경은 보통 5~10 mm이며, 치수, 원통도, 진원도 및 진직도 공차들은 일반적으로 각각 $\pm 2.0 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$ 인 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

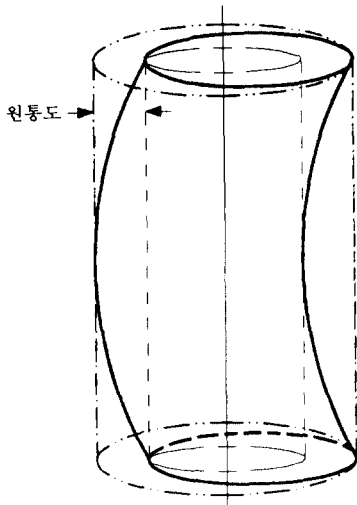


그림 1 원통도

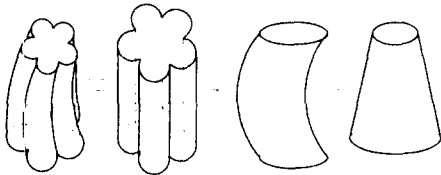


그림 2 원통도의 진원도, 진직도 및 평행도와의 관계

앞에서 언급한 바와 같이, 원통형상 부품의 경우에 있어서도 고정밀도를 보장하기 위한 원통도의 활용이 설계 단계에서 보편화되고 있는 것은 사실이나 측정 및 검사의 어려움으로 인하여 생산 현장에서의 효과적인 활용 및 정착이 안되고 있는 것이 현재의 실정이며, 이러한 사실은 관련 제품 생산업체(소재지: 미국)에 대한 실사를 통하여 쉽게 파악될 수 있었다. 따라서 본 내용을 통하여 우선 원통도의 정의, 일반적인 측정 방법과 이와 관련된 주요한 연구 내용 및 실제적인 측정시 문제점을 알아보려고 한다. 또한, 문헌조사 및 생산공정 현장조사, 품질검사 자료분석 결과 등을 바탕으로, '가정 1,2,3'을 도출하고 이미 발표되어 있는 가공물의 형상

과 가공공정의 관계에 대한 연구 결과를 분석·종합하여 그 타당성을 점검하며, 아울러 이 가정들에 근거한 새로운 검사 공정을 제시하고 현재의 전형적인 검사 공정과 정성적으로 예측, 비교 검토하고자 한다.

2. 원통도

2.1 정의 및 측정법

표준화된 원통도의 정의는 국제 표준 기구(ISO)에 의하여 확립된 ISO 5459 및 선진공업국들의 공업 표준(ANSI Y14.5M-1982, DIN 7184, BS 308)에 근거하며 그 내용은 다음과 같다.

“원통도는 표면의 모든 점들이 공동축으로부터 동일한 거리에 있는 회전체의 표면을 구성하기 위한 조건이다. 원통도 공차는 표면의 모든 점들이 두 개의 동축상의 원통에 의해 결정되는 공차 범위 안에 존재하여야 함을 규정하며, 이 때 두 원통의 반경값의 차이를 공차값으로 한다.”⁽¹⁾

현재 생산 현장에서 사용되는 원통도 관련 측정법은 크게 두 가지로 구분된다. 그 첫째 방법은 그림 3과 같은 브이 블록(vee block) 위에 밀착된 측정 대상물을 360° 회전시킬 때, 브이-블록의 반대 방향에 위치하고 측정대상물과 접촉하고 있는, 고정된 다이얼 게이지(dial gauge)의 눈금의 움직임을 확인하는 작업을 축방향으로 서로 다른 3,4 군데의 위치에서 반복 수행하는 간이적인 방법으로서 가공중에 가공 설비 운전자가 직접 실시하며 이 측정 결과는 경험에 의하여 기계의 미세 조정을 위한 기준으로 활용된다. 두번째 방법은 상용화되어 있는 그림 4에 나타낸 바와 같은 전용 측정장치를 활용하는 것으로서, 서로 접촉하고 있는 측정 대상물과 측정장치의 촉수(stylus)가 수직축에 대하여 상대적인 360° 회전운동을 하며 이 운동이 완료될 때마다 단속적인 축방향 등간격 직선운동과 회전운동을 순차적으로 반복 수

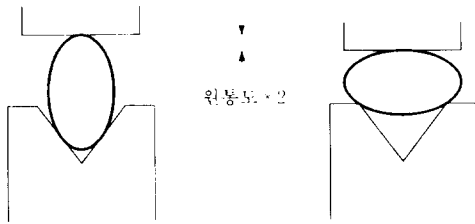


그림 3 브이블록을 이용한 원통도 측정법

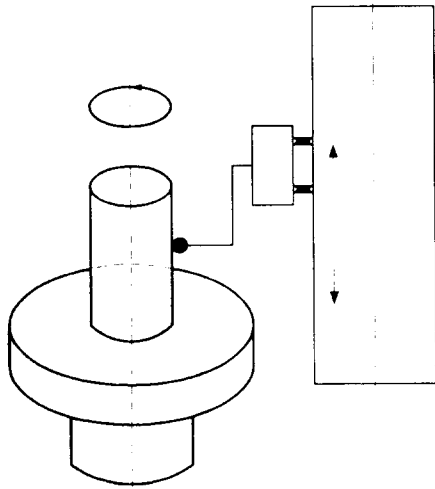


그림 4 원통도 전용 측정장치

행하여 회전운동시 입력된 축수의 상대 위치에 관한 수치정보를 기준으로 3차원 형상을 추정하게 된다. 이 방법은 주로 품질관리 부문에서 무작위 표본 추출에 의한 정밀검사에 활용된다.

2.2 관련 연구

1970년대에 들어와서 형상공차의 규정에 관한 협의가 각국의 공업표준 관련기구를 중심으로 활성화됨에 따라 원통도의 측정에 관한 연구도 현재까지 꾸준히 진행되고 있으며, 이와 관련된 연구 방향은 크게 둘로 구분될 수 있다.

첫번째 방향은 기존의 진원도 측정법을 기

본으로 하여 읽혀지는 정보들로부터 전자계산기를 이용하여 원통도를 구하는 알고리즘의 개발에 관한 것으로서, 대표적인 연구로는 심플렉스법(simplex method)을 이용한 원통도 평가방법,^(3,4) 형상 측정 정밀도와 측정 데이터의 샘플링과의 관계⁽⁵⁾ 및 3차원 측정기로 측정된 데이터의 통계적 접근에 의한 형상 공차 평가법⁽⁶⁾ 등을 들 수 있다. 두번째 방향은 새로운 측정 기구 및 장치에 관한 것으로서, 대표적인 연구로는 측정 축수의 원통면에 대한 나선운동에 의한 측정법,⁽⁷⁾ 절삭공구의 자국(cutting tool mark)에 의한 조도의 영향을 제거하기 위한 전기식 갭 센서(electro-static-capciance type gap sensor)를 활용한 측정법⁽⁸⁾ 및 측정기의 회전축에 대한 피측정물의 편심 및 기울기 등과 같은 세팅(setting) 오차보정기구 개발⁽⁹⁾ 등이 있다.

2.3 문제점

원통도의 정의에 따르면, 정확한 측정을 위해서는 형상 표면의 무수히 많은 모든 점들의 상대적인 위치를 알 수 있어야만 한다. 따라서 비록 설계 단계에서의 형상 공차 개념의 도입 및 활용은 전혀 어려움이 없으나, 생산 공정에 있어서의 검사 측면에서 볼 때에는 큰 문제점을 내포하고 있음을 쉽게 알 수 있다.

앞서 언급된 현장에서의 측정법 중 브이블록 활용법의 경우, 일반적으로 가공물의 중심축과 임의의 위치의 회전 단면의 중심이 서로 일치하지 않는 것만 보더라도 이 방법이 정밀 원통형 가공물의 형상 공차 측정법으로 부적합함을 알 수 있다. 상대 회전 운동에 의한 축수 활용법의 경우는, 브이블록 활용법의 경우에 있어서의 중심축과 회전단면 중심의 불일치 문제는 해결이 가능하나, 여전히 일부의 단면에 대한 정보만을 알고 있으므로, 정의를 만족시킬 수 없게 된다. 아울러 형상공차는 정밀가공물에 관련된 사

항이므로 원칙적으로 최종 제품의 성능 확보를 위하여 전수·검사되어야 한다는 점에서 볼 때, 이미 제기된 정의의 만족 여부에 관한 문제뿐만 아니라, 측정에 소요되는 시간이 짧아야 하는 것도 필요한 요건 중의 하나이다. 그러나 측정 정확도 측면에서 가장 유리한 측수 활용법의 경우, 숙련자가 한 개의 가공물을 측정시 20~30분이 소요되므로, 이것 역시 개선되어야 할 문제점으로 보아진다. 점차 사용이 보편화되고 있는 3차원 측정기가 형상 공차 측정에 활용되지 못하는 이유도 측정 시간의 문제에서 기인된다.

이러한 모든 문제들은 측정 방법이나 측정기 자체의 한계일 수도 있으나, 근본적인 문제의 원인은 가공 및 검사를 도외시하고 설계 위주로 과도하게 일반화된 형상을 기준으로 하여 규정된 현재의 정의 자체에 있다고 사료된다. 그러므로 문제들의 효과적인 해결을 위하여서는 가공과 검사를 염두에 두고 측정기술과 정의 자체에 대한 연구가 동시에 양 방향에서 추진되어야 할 필요가 있다.

3. 가 정

가공물의 가공 후 표면 조도 특성이 가공

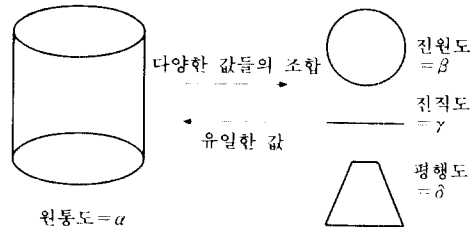
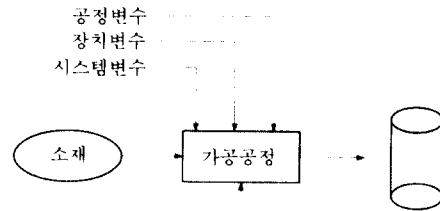


그림 5 가정 1



가공전형상

그림 6 가정 2

법 및 가공변수에 의하여 결정된다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 이와 마찬가지로, 가공된 후의 가공물 형상도 가공법 및 가공변수와 밀접한 관계에 있어서 마치 인간의 지문과 같은 양상을 띄게 된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 이를 기초로 하여 생산 현장에서 활용이 가능한 새로운 검사 공정을 제안하기 위하여 가

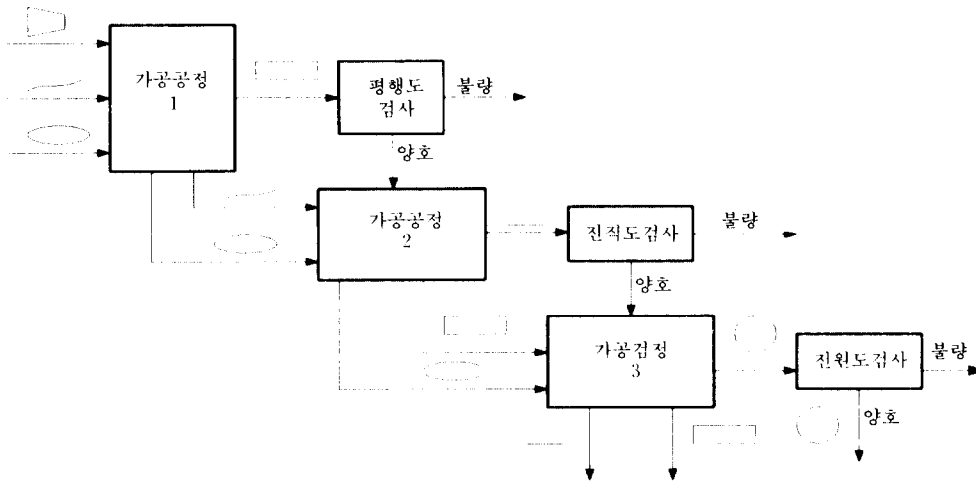


그림 7 가정 3

정 1,2,3을 수립하게 되었으며, 그 내용은 다음과 같다.

가정 1: 원통형상에 대하여 주어진 진원도, 진직도 및 평행도 공차들로부터 추정되는 원통도 공차는 유일한 값을 갖으나, 주어진 원통도 공차를 만족시키는 진원도, 진직도, 및 평행도 공차들의 값들은 무한히 많은 서로 다른 조합을 구성할 수 있다. (그림 5)

가정 2: 가공물의 가공 후 기하학적 형상은 가공공정 및 가공변수들의 영향을 받을 뿐만 아니라 가공 직전의 기하학적 형상과도 밀접한 관계를 갖고 있다. (그림 6)

가정 3: 서로 다른 원통형상 가공공정들, 혹은 동일 가공공정일지라도 가공변수들의 값이 다른 경우들은 각기 다른 형태의 가공전 기하학적 형상 오차를 효과적으로 교정할 수 있다. (그림 7)

4. 가공법과 가공물 형상의 관계

위의 가정들의 타당성을 살펴보면, 가정 1은 이미 알려진 내용이고 가정 2는 직관적으로 유추가능하므로 일단 논란의 여지가 적을 것으로 사료된다. 그러나 가정 3의 경우에는, 이와 관련된 직접적이고 포괄적인 연구 결과의 부족으로 인하여, 논리있게 일반적인 타당성을 제시하기에는 어려움이 있다. 따라서 본절에서는, 비록 단편적이거나 가정 3과 관련된 일부 연구결과를 요약하여 가정의 가능성을 타진해보고자 한다.

4.1 선삭

선삭과 가공형상의 관계에 있어서 가장 많이 연구되어 있는 내용은 척(chuck)에 의한 가공물의 고정성 선삭 후 형상에 미치는 영향에 관한 것으로서, 회전축에 직각인 단면

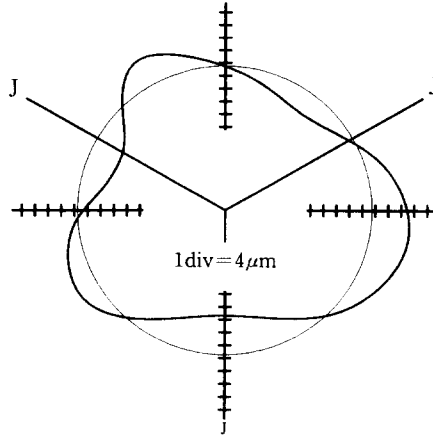


그림 8 3-조 척으로 고정되어 선삭가공된 가공물의 단면형상
J: 조위치, 축방향 가공면 길이: 145 mm, 주축회전속도: 450 rpm, 절삭깊이: 3 mm, 공작물직경: 60 mm

의 전형적인 형상은 그림 8에서 볼 수 있듯이 조의 숫자 및 위치에 대응되는 기복을 갖는 것을 알 수 있다. 이와 관련된 연구로는 3개의 조를 가진 척(3-jaw chuck)이 가공형상에 미치는 영향에 대한 해석 및 실험,⁽¹¹⁾ 척과 가공물계(chuck-workpiece system)의 강성의 변화가 진원도와 평행도에 미치는 영향,⁽¹²⁾ 척킹조건(가공물을 척에 고정할 때 주는 힘, 척에 물린 부분의 길이 및 조와 가공물의 접촉형태 등)이 형상에 미치는 영향⁽¹³⁾ 및 척킹조건 최적화,⁽¹⁴⁾ 최적 척킹조건하에서 주어진 진원도를 만족시키며 단위 시간당 절삭량을 극대화할 수 있는 가공변수 결정방법⁽¹⁵⁾ 등이 있다.

이와 아울러, 선삭 후의 형상에 왕복대의 운동 및 진동이 미치는 영향,⁽¹⁶⁾ 주축 회전 정밀도가 미치는 영향⁽¹⁷⁾ 및 가공물에 장력을 작용시킬 수 있도록 고안된 심압대를 활용한 진원도 개선⁽¹⁸⁾ 등에 대한 연구도 수행되어졌다.

4.2 원통 연삭

원통 연삭 가공 중에 가공물은 선삭과 마

찬가지로 척에 의해 고정되기도 하지만 일반적으로 주축대와 심압대의 양 센터들에 의해서 고정되는 것이 보편적이며 확실한 고정을 위하여 가공물의 양단에는 센터 구멍이 미리 준비되어 있기 마련이다. 따라서 이 고정 방법이, 가공 후 형상에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 왔으며 이 영향으로 인하여 가공물의 회전축에 직각인 단면 형상은 타원이나 삼각형 특징을 갖는 원의 형태를 띠게 된다.⁽¹⁹⁾ 구체적인 연구 내용으로는 센터 구멍의 진원도가 가공물의 진원도에 미치는 영향,⁽¹⁹⁻²¹⁾ 연삭 슷돌의 회전축에 대한 가공물 회전축의 부정확한 얼라인먼트가 형상에 미치는 영향,⁽²¹⁻²³⁾ 구형 센터가 형상에 미치는 영향^(21,24,25) 등이 있다.

이 외에 스파크아웃(spark-out)이 평행도에 미치는 영향⁽²⁶⁾에 대한 연구결과도 발표된 바 있다.

4.3 무심 연삭

무심 연삭 공정은 수많은 가공변수 중, 경험에 의해 알려진 가공물의 센터 높이가 진원도에 미치는 영향을 제외하고는, 주요 가공변수의 선정에 어려움이 있을 뿐만 아니라 3차원적인 연삭 기구(mechanism)모델이 미완성인 상태이므로, 여타의 다른 가공법에 비하여 다양한 연구가 시도되었으나 그 내용이 대부분 진원도에 관한 것으로 국한되어 있다. 진원도에 관련된 대표적인 연구 내용으로는 가공물의 센터 높이가 미치는 영향,^(27,28) 조정 바퀴(regulating wheel) 형상 오차에 의한 영향,⁽²⁹⁾ 가공 시스템의 강성의 영향,^(30,31) 단위 시간당 인피드량(infeed rate)의 영향,^(32,33) 슷돌바퀴 회전속도의 영향⁽³⁴⁾ 등이 있다.

가공 중 축방향운동이 존재하는 관통 이송 연삭(through-feed grinding)의 경우에는, 발표된 연구 결과는 없으나, 가공 후 가공물의 축을 따라서 단면의 유효직경이 점차 감소하다가 다시 증가하는 벨-마우스 형상(bell-

mouthed shape)을 나타내는 것을 현장조사를 통하여 공통적으로 발견할 수 있었다.

5. 새로운 검사 공정

새로이 제안되는 검사 공정에 대한 이해를 돕기 위하여 우선 현재 공정의 문제점을 알아보면 다음과 같다. 그림 9는 정밀가공, 조립공정의 전형적인 예가 되는 플런저와 배럴의 생산공정을 개략적으로 보여주고 있다. 그림을 보면 알 수 있듯이 비록 각 공정에서 설비 운전자에 의하여 간이적으로 형상공차의 검사가 실시되고 있으나 원통도의 검사는 원칙적으로 최종 가공 후 무작위 표본 추출에 의존하며, 실제적으로는 평균 직경의 측정에 의한 분류만이 수행되고 있다. 따라서 엄밀한 의미에서 보면 형상 공차에 의한 품

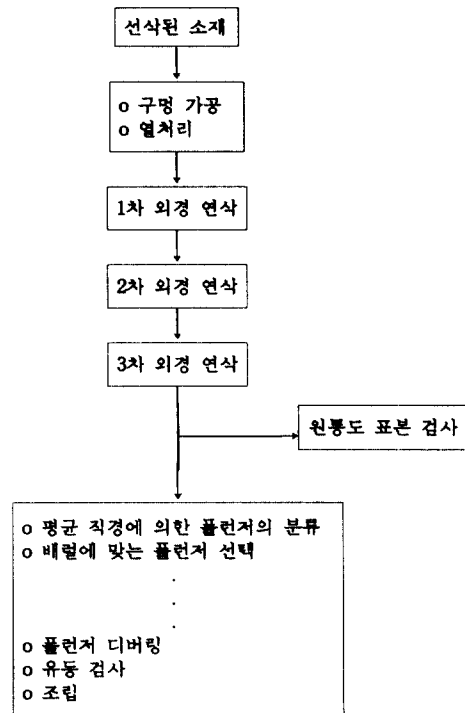


그림 9 플런저와 배럴의 전형적인 정밀가공, 조립공정

질검사는 거의 이루어지지 않는다고 볼 수 있다. 현장 조사가 실시된 생산현장의 품질 관리 자료에 의하면, 설계시 공차가 과장되게 주어졌는지는 알 수 없으나, 최종 가공 후 85% 이상의 가공물이 정상공차 측면에서 볼 때, 설계 기준에 미달인 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 새로이 제안되는 검사 공정을 개략적으로 보여주고 있는데, 이는 가정 1, 2, 3을 토대로 하여 확립된 것이다. 우선 가정 1에 의해 성능 및 기능 확보를 위하여 필요한 원통도로부터 원통도보다 상대적으로 측정 시간이 짧고 간편한 진원도, 평행도 및 진직도로 공차를 배분하고, 가정 2의 근거 하에 임의의 가공 직후의 형상을 만족시켜야 하는 이들 세 가지 공차들로부터 이 가공공정과 가공형상과의 고유한 특성을 염두에 두고 역으로 가공 직전의 형상을 갖추어야 하는 이 세 가지 공차의 값을 추정할 수 있게 된다. 또한 정밀 가공물은 여러 단계의 공정을 거쳐서 가공되므로 가정 2에서의 가공 직전의 형상은 바로 앞서 실행된 가공 직후의 형상과 일치되게 되므로, 결국 최종 형상에 요구되는 공차들로부터 최초의 가공 직전의 형상에 필요한 공차들까지 각각 가공 단계별

로 정량적인 공차값들의 추정이 가능해진다. 그러므로 만일 가정 3에 의하여 공정설계시 각 공정들이 진원도, 진직도, 평행도 중 각각 어떤 한 가지의 공차에 대하여 효과적일 수 있도록 공정의 설계가 가능하다면, 앞에서 설명한 정상공차의 분리 및 역추정에 의한 공차들을 단계별로 배분할 수 있다.

따라서 현재의 공정과는 달리 매 가공 직후 그 공정에 대응되는 특정한 정상공차를 검사함으로써, 그림 7에서 보여준 바와 같이 중간 단계에서의 잠재적인 불량품의 우선 제거가 가능해지며, 전수검사를 통한 최종 제품의 신뢰성 확보가 용이해진다.

6. 맺음말

제품 기능의 고도화에 부응하여 요구되는 부품의 정밀도가 높아지고, 이러한 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 정상 공차에 대한 관심과 활용은 증대되고 있다. 그러나 특히 3차원적 특성을 갖고 있는 원통도와 같은 정상 공차는 그 정의 자체가 내포하고 있는 문제점 및 측정기술의 한계로 인하여 정상공정과 직접적인 연결 및 활용에 큰 어려움이 있다. 따라서 원통도의 특성, 가공 형상에 영향을 미치는 인자 및 가공 공정과 가공형상과의 관계를 분석·종합한 결과를 기초로 하여 현재의 문제점들에 대처할 수 있는데 기본이 되는 세 가지 가정을 도출하였다. 이러한 가정들을 이용하여 제안되는 새로운 검사공정은 검사 소요시간, 불량품 검출과 최종제품의 성능 및 신뢰도 확보 측면에서 효과적일 것으로 기대된다.

본문 중에서도 밝힌 바와 같이, 일부 가정은 그 타당성의 근거가 되는 연구 결과가 불충분하여 가능성만을 타진하였다. 따라서 이러한 분야에 대한 연구는 지속적으로 계속되어야 하며, 평면도와 같은 다른 정상공차에 대하여 제시된 방법론의 수정 적용 가능성도 검토되어야 할 것이다.

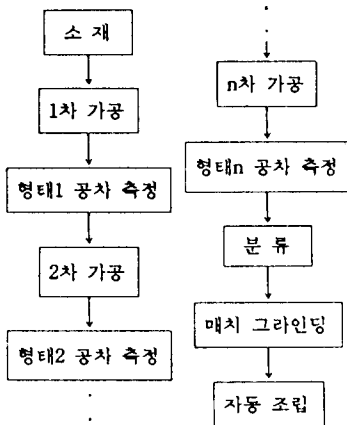


그림 10 가정 1, 2, 3에 근거한 정상 공차 검사공정

참고문헌

- (1) Foster, L. W., 1986, *GEO-METRICS as Based upon ANSI Y14.5-1982 Practices* Revised 1986 ed., Addison-Wesley Pub. Co., Inc., U.S.A.
- (2) Eda, H., 1986, 초정밀가공기술, ISBN4-88657-602-8 C3055, 일본.
- (3) Tsukada, T. and Kanada, T., 1986, "Minimum Zone Evaluation of Cylindricity Deviation by Some Optimization Techniques," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 13~18.
- (4) Shunmugam, M. S., 1987, "Comparison of Linear and Normal Deviations of Form of Engineering Surfaces," *Precision Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 96~102.
- (5) Kanada, T. and Tsukada, T., 1986, "Sampling Space in Discrete Measurements of Cylindrical Form," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 165~170.
- (6) Menq, C. H., Yau, H. T., Lai, G. Y. and Miller, R. A., 1990, "Statistical Evaluation of Form Tolerances Using Discrete Measurement Data," *Advances in Intergrated Product Design and Manufacturing*, PED-Vol. 47, The Winter Annual Meeting of the ASME, pp. 135~148.
- (7) Tsukada, T., Anno, Y., Yanagi, K. and Suzuki, M., 1977, "An Evaluation of Errors of Cylindrical Machine Parts by Spiral Tracing Method," *Proc. 18th Int'l Mach. Tool Des. and Res. Conf.*, pp. 529~535.
- (8) Tsukada, T. and Kanada, T., 1982, "Measurement of Cylindrical Form Errors Using a Non-Contact Detector," *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 152~158.
- (9) Tsukada, T., Kanada, T. and Liu, S., 1988, "The Development of a Computer-Aided Centering and Levelling System for Cylindrical Form Measurement," *Precision Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 13~18.
- (10) Hocken, R. J., 1980, *Technology of Machine Tools*, Vol. 5: Machine Tool Accuracy, Lawrence Livermore Nat'l Lab., Univ. of California, U.S.A.
- (11) Pahlitzsch, G. and Hellwig, W., 1967, "The Clamping Accuracy of Three-Jaw Chucks," *Proc. 8th Int'l Machine Tool Design and Research Conf.*, pp. 97~118.
- (12) Rahman, M. and Ito, Y., 1979, "Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by Three-Jaw Chuck," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 7~12.
- (13) Rahman, M., 1985, "Effect of Clamping Conditions on Chatter Stability and Machining Accuracy," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 339~342.
- (14) Rahman, M., 1986, "Factors Affecting the Machining Accuracy of a Chucked Workpiece," *Precision Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 34~40.
- (15) Rahman, M. and Narananyan, V., 1986, "Optimization of Error-of-Roundness in Turning Processes," *Annals of the CIRP*, Vol. 35, No. 1, pp. 377~380.
- (16) Sawabe, M. and Fujimura, N., 1978, "Influence of Radial Motion on Form Error of Workpiece in Turning," *Annals of the CIRP*, Vol. 27, No. 1, pp. 505~509.
- (17) Mitsui, K., 1982, "Development of New Measuring Method for Spindle Rotation Accuracy by Three Point Method," *Proc. 23rd Int'l Machine Tool Design and Research Conf.*, pp. 115~121.
- (18) Rivin, E., Karlic, P. and Kim, Y., 1990,

- "Improvement of Machining Conditions for Turning of Slender Bars by Application of Tensile Force," *Fundamental Issues in Machining*, PED-Vol. 43, The Winter Annual Meeting of ASME, pp. 283~297.
- (19) Kato, H. and Nakano, Y., 1985, "Transfer of Roundness Error from Center and Center Hole to Workpiece in Cylindrical Grinding and its Control," *Annals of the CIRP*, Vol. 34/1, pp. 287~290.
- (20) Kato, H., Nakano, Y. and Kounosu, K., 1981, "Effect of Roundness of Center Hole on Roundness of Cylindrically Ground Surface," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 107~112.
- (21) Kyusojin, A., Ogawa, K. and Toyama, A., 1986, "Comparison of Cone-Center and Ball-Center for Roundness in Cylindrical Grinding," *Precision Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 197~202.
- (22) Trmal, G. and Kaliszer, H., 1984, "Accuracy of Cylindrical Plunge-Cut Grinding," *Proc. 25th Int'l Mach. Tool Des. and Res. Conf.*, pp. 307~313.
- (23) Kato, H. and Nakano, Y., 1986, "Effect of Alignment Errors of Centers and Center Holes upon Rotation Accuracy of Workpieces," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 171~176.
- (24) Horiuchi, O., 1985, "Techniques for Improved Roundness in Cylindrical Grinding," *Milton C. Shaw Grinding Symposium*, PED-Vol. 16, The Winter Annual Meeting of ASME, pp. 237~250.
- (25) Kyusojin, A. and Todaka, R., 1988, "Development of Precision Cylindrical Grinding by Using Steel Ball," *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 190~194.
- (26) Shiozaki, S. and Miyashita, M., 1970, "Generation and Growing up Process of Self-Excited Chatter Vibration in Grinding," *Bull. Japan Soc. of Mechanical Engineers*, Vol. 13, No. 63, pp. 1139~1150.
- (27) Yonetsu, S., 1959, "Forming Mechanism of Cylindrical Work in Centerless Grinding," *Proc. Fujihara Memorial Faculty of Engineering*, Keio Univ., Vol. 12, No. 47, pp. 27~45.
- (28) Rowe, W. B. and Barash, M. M., 1964, "Computer Method for Investigating the Inherent Accuracy of Centerless Grinding," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 4, pp. 91~116.
- (29) Nakkeeran, P. R. and Radhakrishnan, V., 1990, "A Study on the Effect of Regulating Wheel Error on the Roundness of Workpiece in Centerless Grinding by Computer Simulation," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 30, No. 2, pp. 191~201.
- (30) Kaliszer, H. and Singhal, P. D., 1966~67, "Analysis of the Rigidity of the Grinding Wheel-Workpiece-Grinding Machine System," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 181, Part 1, No. 5, pp. 89~104.
- (31) Rowe, W. B., Spraggett, S. and Gill, R., 1987, "Improvements in Centerless Grinding Machine Design," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 207~210.
- (32) Willmore, J. I., 1965, "Plunge Grinding and the Accuracy of the Workpiece Geometry," *Proc. 6th Int'l Mach. Tool Des. and Res. Conf.*, pp. 543~555.
- (33) Reeka, D., 1967, Über den Zusammenhang zwischen Schleifspaltgeometrie und Rundheitsfehler beim Spitzenlosen Schleifen, Ph. D. Dissertation, T. H. Aachen, W. Germany.
- (34) Gill, R., 1986, "An Investigation into

the Effect of the Ratio of Grinding Wheel Speed to Workpiece Speed in the Centerless Grinding Process," Ph. D. Disserta-

tion, Coventry (Lanchester) Polytechnic, England. ■