

초정밀가공의 현재와 미래



元鍾虎

충남대학교 기계공학과

1. 정밀공학 서설

최근의 생산 부품은 날이 갈수록 고정도화 되고 있다. 그러면, 부품에 고정도를 부여하는 이유는 무엇인가? 그 이유는 부품의 고정도 운동의 실현, 부품의 호환성 확보, 자동조립의 실현, 기능의 독립성 실현, 부품의 소형화, 부품수를 줄여서 누적오차를 작게 하여 확률적 신뢰성 향상, 기계의 효율을 좋게 하고, 수명을 길게 할 수 있으며, 이니셜 코스트(initial cost)와 러닝 코스트(running cost)를 작게 하고, 실제상의 안전계수를 내릴 수 있는 것 등이 있다.

일반적으로 요구정도(要求精度)가 높아지면 코스트(cost)가 지수함수적으로 높아지는 것으로 일반에 알려져 있다. 그러나, 이러한 사고는 반드시 옳지만은 않다. 고정도로 가공된다면, 각종의 조절기구가 불필요하게 되고, 조립도 간단히 되며 오히려 싸게 되는 경우가 많다. 가공법의 선택에 의해서도 사정은 대폭 바뀐다. 고정도를 내기 쉬운 가공법을 채용하면 가공비용도 내릴 수 있다.

예를 들어 어떤 모형 비행기의 가솔린 엔진을 만들 때에

고정도 가공에 의해 피스톤과 실린더의 틈새를 극히 작게 하는 것이 가능하다면 피스톤 링이 불필요하게 되며, 25%의 코스트다운(cost down) 효과가 있다. 게다가, 피스톤 링이 없으므로 해서 저항이 줄고, 보다 큰 출력을 얻을 수 있으며, 마모가 적게 되어, 조립, 분해가 용이하게 된다고 하는 훌륭한 효과를 얻을 수 있다.

초정밀가공이라는 단어를 논하기 전에 우선 정밀이라는 용어의 정의를 먼저 해두는 게 좋겠다. 우선 精密性, 正確性, 微細에 대하여 정의 해보자. 정밀성(정밀도; precision)과 정확성(정확도; accuracy)과 미세(fine, micro-)라고 하는 말이 있지만, 이것들은 자주 의미가 혼동되어 사용되고 있으므로 여기서 언급해 두어야 하겠다. 예를 들어, 부품의 치수를 L로 가공하고 싶다고 생각한다. 충분히 정도가 높은 측정기로 몇 개의 부품 치수를 재어 본 결과는 일반적으로 평균치를 중심으로 한 정규분포에 가까운 분포(보통 이것을 t 분포로 부르고 표본의 수, 즉 측정 수가 30 이상이 되면 정규분포에 근사하게 된다)를 나타낸다. 이 경우, 지정치수가 평균치 \bar{x} 로부터의 벗어난 δ_m 을 편차라고

하며, 이 편차의 적은 정도를 정확성(정확도)이라고 한다. 또 평균치로부터의 분산 ε 의 적은 정도를 정밀성(정밀도)이라고 한다. 이 정확도와 정도를 합친 것을 정도라고 부른다. 정확도 δ 와 정도 ε 이 주어져 있으면, 오차의 한계치에 상당하는 정도 r 는 $\delta + \varepsilon$ 로서 구해진다. 즉, 정도라고 하는 것은 정확도와 정도를 합한 개념이다.

정확도와 정도가 충분한 신뢰도로 추정되어 있는 경우는, 정도(精度)는 각각이 독립적으로 변동하는 성분의 분산에 준하여 구해진다고 생각하는 것이 가능하고, $\sqrt{r} = \sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$ 로 구하는 것이 가능하다.¹⁾

다음으로 미세(微細)의 의미로서, 이것은 위에서 기술한 정확성과 정밀성에는 관계없이 아주 작은 것을 말한다. 예를 들면, 흠의 폭 $0.1 \mu\text{m}$ 든지 10 nm 라고 하는 미소한 값을 말하며, 이 절대값이 어떻게 산포하든지 일반적인 개념에 비교해서 작은 것을 의미하는 개념이다.

간단한 예를 든다면 화살을 쏘아 과녁에 맞히는 경우 과녁의 표적을 4분하여 x, y 좌표로 보기로 하자. 화살이 쏘인 분포가 한 곳으로 모여지진 않았지만 그 평균값이 0에 가깝다면 정확도가 좋은 것이고, 평균값은 0과 떨어져 있지만 임의의 좌표위치에 몰려 있다면 정밀도가 높은 것이라고 할 수 있다.

이상의 용어의 이해로부터 보면, 우리가 흔히 쓰는 정밀도라고 하는 용어는 위에서 논한 것보다는 조금 광의의 의미로 사용되고 있고, 정확도와 정밀도 양쪽과, 경우에 따라서는 미세의 개념도 포함하는 것으로 한다.

우리가 여기서 정밀가공을 논하려 하고 있지만 정밀가공이라고 하면 단순히 치수정밀도가 높은 가공만을 생각하기 쉽다. 그러나, 정밀가공을 하려면 정밀도가 높아질수록 단순히 가공에 관한 지식만으로는 고정도의 부품을 생산하는데 있어서 많은 문제점에 봉착하게 된다. 초정밀가공에 있어서는 단순한 치수정밀도 뿐만이 아니라 가공기 자체의 정도가 문제되며, 또한 가공기의 정도뿐만 아니라 가공기의 구조나 구성재료, 설계등의 문제와 열, 외력, 진동, 습도, 먼지등의 노이즈의 가공환경의 영향을 고려하여야 하며, 재료 자체의 결함, 공구의 물리, 화학적 특성, 절삭력, 가공메카니즘, 측정에 관한 지식 등 광범위한 지식이 필요하다. 즉, 정도가 높은 기계를 실현하기 위해서는 정밀공학

이라는 학문이 필요하다.

이것은 좋은 기계를 만들려면 기계공작법에 관한 지식만이 필요한 것이 아니라, 역학이나 설계, 열전달, 진동등과 같은 기계공학 전반에 걸친 지식이 필요한 것과 마찬가지로이다.

앞서 말한 정밀의 정의대로 하자면, 정밀공학이라고 하기보다는 정도공학(精度工學)이라고 하는 편이 한층 합리적이지만, 정밀공학이라고 하는 말은 위에서 말한 의미로 이미 일반적으로 사용되고 있기 때문에, 여기서도 일부러 정밀공학으로 부르기로 했다. 본문 중 특히 정밀이라고 하는 말이 본래의 정밀성만을 의미하는 때는 협의의 정밀이라고 단정하는 것으로 한다. 또, 정도, 정확도가 높은 것을 하나로 합쳐 고정도라고 하는 말로 표현한다.

정밀공학은 고정도(高精度) 기계를 실현시키는 학문으로 이것을 뒷받침하는 학문 분야는 매우 넓다. 그러나, 정밀가공에 직접 관련되는 항목은 측정과 설계를 들 수 있다. 측정이나 설계에서는 정밀, 초정밀, 나노라고 분류하지는 않고 그대로 정밀측정, 정밀설계라고 부르지만 가공에서는 정밀가공, 초정밀가공, 마이크로가공, 나노가공이라는 말로 나누어 붙이는 것이 보통이다. 정밀, 초정밀, 나노가공의 한계는 고정된 값으로는 표현하기 곤란하며, 시대의 변화에 따라 그 한계가 변화된다고 할 수 있다. 20년 전의 정밀가공한계가 오늘날에는 보통가공의 정밀도가 되어버리며, 초정밀의 한계는 정밀가공의 한계가 되어버린다. 정확한 정의는 될 수 없으나, nm 수준의 가공한계를 나노가공이라 한다면 초정밀, 정밀의 가공한계는 각각 십단위, 백단위 높은 한계를 갖는다고 할 수는 있겠다. 어쨌든 궁극적 가공한계라는 것은 원자(0.3 nm) 이상을 초월 할 수 없는 것이므로 원자 단위가 그 궁극의 가공한계라 할 수 있다. 그러나, 이러한 가공은 모두 정밀가공의 범주에 속한다고 할 수 있다.

고정도 기계를 실현하기 위해서는 다음의 네 가지 기본적인 기능적 요구항목이 만족되지 않으면 안 된다. 첫째, 완전한 운동기준이 내장되어 있을 것. 둘째, 그 기준에 따라서 완전한 운동을 실현하기 위해 필요한 완전한 대우(對偶; 서로 접촉 또는 일정 간격을 유지하고 움직이는 한 쌍의 기계요소)가 갖추어져 있을 것. 셋째, 그러한 시스템을

운전할 때, 기계 내외에 존재하는 노이즈(noise: 내부는 운동기준과 대우에 있는 제작 오차, 열 등, 외부는 외력, 진동 등. 열 등)에 의해 정확한 운동이 흐트러지지 않는 구조를 하고 있을 것. 넷째, 기계의 운동을 정확히 검출할 수 있는 기능을 가지고 있을 것이다.

첫째와 둘째에 관해서는 완전한 운동기준과 대우(對偶)를 만들라고 하는 지시를 하는 것뿐이기 때문에 설계에 있어서는 간단한 문제이다. 따라서, 이들의 기능적 요구항목은 제작기술 쪽이 창의와 연구에 의해 어떻게든 좁혀진 것으로 하는 노력이 요구되는 영역이다. 그러나 가공기술의 관점에서 보면 사용하는 재료를 포함해서 완전운동기준과 대우를 만드는 것은 불가능하며, 게다가 여러 가지 노이즈가 존재하기 때문에 설계상의 연구에 의해 이러한 장애를 뛰어넘어 정확히 운동할 수 있는 기계를 구성하지 않으면 안 된다. 이러한 의미로 셋째는 설계가 담당하지 않으면 안 되는 기능적 요구항목이 된다. 게다가, 기계의 구조상 또는 기계의 사용상 기계의 운동을 정확하게 검출하는 기능도 불가결이다. 그것이 넷째이다.

이상으로부터, 보다 완전한 운동기준과 대우를 만드는 가공상의 원리를 취급하는 것이 가공론이며, 노이즈에 영향 받지 않고 정확한 운동이 실현될 수 있도록 하는 원리를 취급하는 것이 설계론이라고 할 수 있다. 설계는 그 고정도 기계의 본래적, 본질적인 성능의 한계를 정하여 버리는 것이다. 최초의 설계가 나쁘면, 나중의 가공에서 아무리 손을 써 봐도 어떻게 되지 않는 것이다. 공정의 흐름에 있어서도 최초에 설계에 의한 일이 먼저이다. 고정도의 공작기계가 설계, 또는 제작되었다면, 그 다음으로 설계된 것을 도면, 명세서의 의도하는바 그대로 가공할 것이 요구된다. 정밀기계부품 가공은, 일반적인 기계부품 가공에는 볼 수 없는 높은 정도(精度)가 요구된다. 이 요건은 종래에는 없었던 원리, 기술 등이 가공에 요구되는 것을 의미한다. 또한, 고정도 가공을 실현하기 위해서는, 그 결과를 평가하기 위한 계측이 필요하게 된다. 그리고 앞의 넷째에서도 말한 것처럼, 고정도 기계 자신도 측정하는 기능을 가지지 않으면 안 된다.

2. 초정밀가공의 정의

그러면, 초정밀가공(Ultraprecision machining)이라고 하는 가공법은 加工精度를 취급하는 가공법일까? 이것을 공작기계의 발달사를 더듬어 초정밀가공의 범위를 밝혀 보기로 한다. 윌킨슨(J. Wilkinson)이 1774년에 완성한 보링머신(boring machine)의 개발에 의해, 보링가공의 정도가 급격히 향상되었고, 와트(J. Watt)가 증기기관의 발명을 완성할 수 있는 밀바탕이 되었다. 그 성과는, 1760年代에 영국에서 시작된 産業革命에 큰 영향을 미쳤다. 그러한 동력원의 혁명적인 변화는, 근대공업을 급속히 발전시켰다. 또한 무즈레이(H. Maudslay)가 종래의 보링머신에 왕복대기구를 붙여서 母性原則(copying principle)에 따라 가공이 가능한 선반(lathe)을 발명한 것이 1797년의 일이었다.

여기서, 母性原則에 대해서 간단히 명해 두겠다. 공작기계에 있어서 공구나 피삭재의 基本的인 運動은, 정밀한 축받침에 의해 지지되는 회전축의 진원의 회전운동과 직진의 안내면(베드)에 안내되는 테이블의 직선운동의 두 가지가 있다. 이와 같이 올바른 회전운동이나 직선운동을 공구 및 피삭재에 주어, 양자의 상대운동으로 절삭가공을 행한다. 이와 같이, 母性原則을 따르는 공작기계에서는 그와 같은 운동부분의 정도가 공구의 절삭작용에 의해서 피삭재에 전사된다. 加工되는 제품의 정도는 공작기계 축받침과 안내면의 정도에 의해서 결정된다. 이것이 공작기계의 母性原則이다.

공작기계는 윌킨슨의 보링머신의 완성 이래 200년 이상의 역사를 가지고 있다. 대량생산을 위한 공작기계인 밀링머신, 자동선반, 정밀가공을 가능하게 하는 연삭기는 미국에서 발명되고 개량되었다. 이와 같은 공작기계의 발달과 더불어 달성된 가공정도도 동시에 高精度化되었다.

高精度化의 향상은 공작기계의 운동정도의 향상 뿐 만 아니라, 측정기의 측정정도의 향상과도 밀접한 관련이 있다는 것은 말할 필요도 없다. 측정기의 정도는 요구되는 가공정도 보다 한 자리수 이상 상회하지 않으면 안 된다. 1900년 이후의 측정기 정도향상과 더불어 가공정도는 급속히 향상되었다. 1960년대에 미국의 Union Carbide 사의 마이크로인치머시닝(精密다이아몬드선반)의 研究開發로 加

工精度가 0.1 μ m에 도달하였다. 그 후의 각종의 초정밀가공기의 개발에 의해, 가공정도의 도달 가능한 값은 0.01 μ m에 육박하는 추세이다.

앞에서 기술한 바와 같이, 工作機械의 진보와 測定器의 測定精度의 향상에 매우 큰 영향을 받아, 가공정도는 시대와 더불어 향상을 계속하는 것이다. 그런데, 초정밀가공을 어떻게 정의하는 것이 합리적인 것일까? 그의 하나는, 다음과 같이 定義하고 있다. 즉, 안정되고 達成可能한 加工精度의 上限을 추구하는 가공법을 精密加工(precision machining), 특별한 조건이 만족되는 때에만 실현되는 最高의 精度를 추구하는 가공법을 초정밀가공이라고 하는 것이다. 여기서 말하는 정도의 절대적 스케일은, 시대에 따라서 급속히 변화한다. 초정밀 가공에서 얻어지는 가공정도는 그의 고정밀 가공한계 보다 거의 1단계 높다. 현재 초정밀가공의 부류에 들어가 있는 가공법도 장래에는 정밀가공의 부류에 들어가는 가공법이 될 것이다.

매우 예리한 공구에 의해, 매우 피삭성이 좋은 공작물표면에 매우정도가 높은 공작기계의 운동을 전사하는 것이 가능하면 비로소 초정밀가공이 가능해 진다. 지금부터가 위에서 말한 특별한 조건이다.

우리 人類가 관계하는 것이 가능한 最大의 길이는, 宇宙 관측의 한계가 되는 1026m(약100억광년), 最小의 길이는 量子的으로 요동하고 있는 코오크의 場으로서 10~15m(1fm:펨토메터)이다. 그러나, 현재 통상 사이즈의 부품의 극미세가공의 가공정도는 치수, 형상정도에 대해서는 0.1 μ m 이하, 표면거칠기에 대해서는 0.01 μ mRy 이하에 달하고 있다. 더욱이, 치수·형상정도, 표면거칠기에 대해서는 나중에 구체적으로 설명하겠다. 이 가공정도는 일반의 절삭가공의 정도보다 2 자리수 이상 높은 레벨이다. 이 레벨의 치수는 바이러스의 크기(100 nm), DNA의 크기(10 nm)에 필적하는 것이다.

그렇지만, 초정밀가공되는 부품에는 천체망원경의 주반사경과 같이 그의 직경이 10m 에 가까운 것도 포함되어 있다. 천체의 상을 정확히 관측하기 위해 표면의 다듬질 정도를 파장의 수백 또는 수천 분의 일보다 높이지 않으면 안 된다. 상이 번지지 않는 것, 간섭무늬가 생기지 않는 것 등이 이 주반사경에 요구되는 것이다. 그래서 상당히 고정도

의 가공이 필요한 것이다.

이와 같은 대형부품의 초정밀가공에는 가공정도의 절대치보다 필요되는 가공정도와 그의 부품의 대표적인 치수와 비(相對精度)의 쪽이 실용적인 의미를 갖게 된다. 그의 비가 10⁻⁶ 이하의 경우를 초정밀가공의 가이드라인으로 하고 있다고 생각하는 사람이 있다. 대형의 부품 보다 진동, 강성, 열변형의 면에서 절대적인 가공정도를 확보하는 것은 매우 곤란하다.

또한, 초정밀 절삭가공이란, 광학, 기계, 전자 등의 부품을 수 백 나노미터의 형상정밀도와 수 십 나노미터의 표면 거칠기로 생산할 수 있는 가공방법으로 정의할 수 있다. 초정밀 절삭가공은 다이아몬드 공구의 기하학적인 형상(profile)을 공작물의 표면에 정확하게 전사시키는 것으로서 다이아몬드 공구인선의 예리함과 공작기계 회전축의 회전정밀도 및 테이블의 이송정밀도가 서브마이크로미터(sub-micrometer)의 정밀도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 현재 초정밀가공의 가공정도는 표면 거칠기가 0.01 μ mRy에 달한다. 이러한 가공정도는 일반 절삭가공정도보다 두 자리수 이상 높다.

3. 초정밀가공법의 종류

一般加工, 精密加工과 마찬가지로 초정밀가공에서도 칩의 분리 또는 에칭 등에 의한 피삭공물로부터의 재료를 제거하는 것에 의해 소망하는 형상을 얻는 제거가공(removal machining)과 素材의 表面에 膜을 形成하는 것에 의해 필요한 표면의 특성을 얻는 附着加工(deposition machining)이라는 것이 있다.

代表的인 초정밀제거가공에는 다이아몬드 단인공구(single-point diamond tool)에 의한 超精密切削(ultra-precision cutting), 메카노케미칼 폴리싱(mechano-chemical polishing)에 의한 超精密 研磨加工(ultra-precision polishing), 초정밀 부가가공에는 전자빔증착(electron beam deposition), 플라즈마 CVD(plasma-chemical vapour deposition)등이 있다.

어떠한 가공법을 적용하든지 필요로 하는 형상정도, 치

수정도 또는 표면특성을 실현하기 위해서는 어떤 형태의 공구(tool)를 사용하게 된다. 이러한 공구에는, 切削工具(cutting tool), 연삭숫돌(grinding wheel), 遊離砥粒(abrasive grain)과 같은 固休狀의 것과, 레이저光(laser beam), 電子빔(electron beam), 플라즈마빔(plasma beam)과 같이 높은 에너지를 갖는 입자상의 것, 소재와 화학반응을 일으키는 기체, 액체상의 반응성 물질 등이 있다.

반응성의 기체를 공구로서 사용하는 가공에 있어서는, 물론 화학반응에 의한 가공이 진전되고 있다.

한편, 고체상의 공구 또는 높은 에너지를 갖는 입자상의 공구를 이용한 초정밀가공에 있어서는 사정이 조금은 복잡해진다. 피가공물이 제거되는 단위가 작아서 서브미크론 이하의 영역에서의 초정밀가공에 있어서는 역학적, 열적, 電磁氣的인 소위 물리적인 에너지뿐만 아니라, 가공의 진전에 화학적 반응이 중요한 역할을 하게 된다. 가공단위가 크면($1\mu\text{m}$ 이상) 재료의 제거는 소재의 모재의 역학적인 특성에 따른다. 초정밀절삭, 초정밀연마가공에 있어서도 가공단위가 서브미크론 이하가 되면 가공되는 영역의 체적에 대하여 표면적이 커지게 된다. 그래서, 공구와 피삭재의 접촉계면에서의 화학적특성에 따르는 상호작용이 중요하게 된다. 일반적인 초정밀가공에 있어서 주된 초정밀절삭 가공법은 종래에서부터 행하여온 래핑(lapping)이나 폴리싱(polishing)에 의한 광학용의 렌즈(optical lens)의 초정밀가공과는 다르며, 동작기계의 모성원칙을 따르는 절삭 또는 연삭에 의하여 재료를 제거한다.

4. 초정밀절삭, 초정밀 연삭가공이 적용되는 가공

초정밀가공의 대상이 되는 초정밀부품은 우리들의 주변에 사용되고 있는 기계, 기구들에서 빈번히 사용되고 있으며 이런 의미에서 우리들의 일상생활에 융화되어 있다.

컴퓨터의 하드디스크용의 디스크기판, 레이저빔 프린터용 폴리곤미러, 복사기의 감광드럼 등은 알루미늄합금으로 만든다. 폴리곤미러의 가공에는 평면도 $0.08\mu\text{m}$, 표면거칠기 $5\sim 10\text{ nmRy}$ 대량생산적으로 만들어지고 있다. 래핑으

로 제작되었던 1980년경에 비해서 가격이 1/100에서 1/200로 저하되고 있다.

또한 레이저가공기용의 반사경은 무산소동(oxygen-free copper)로 만들어지고 있는데, 어쨌든 피삭성이 매우 좋은 재료로 알려져 있다. 초정밀선반(ultra-precision lathe) 또는 초정밀 구면가공기(ultra-precision spherical surface machine)으로 초정밀절삭가공 된다. 렌즈 또는 磁氣헤드용 플라스틱, 그라스, 세라믹 등의 비금속재료는 초정밀 비구면가공기에 의한 연삭가공, 초정밀연삭기에 의해 평면연삭으로 가공되고 있다.

이러한 부품의 요구되는 표면거칠기는 $0.01\sim 0.05\ \mu\text{ mRy}$ 이하, 형상정도는 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m p-v}$ 정도이다.

5. 초정밀가공시스템의 기술적인 기초

5.1 기술적인 기초

초정밀절삭가공 또는 연마가공의 기본원리는 매우 정도가 높은 가공기계의 운동을 매우 예리한 공구에 의해 매우 피삭성이 좋은 공작물의 표면에 전사하는 것이다. 이러한 가공을 실현하기 위해 필요되는 기술적인 기초는 다음과 같다.

우선 첫째로 매우 정도가 높은 가공기계의 운동을 얻는 것은 가공기계를 구성하고 있는 여러 가지의 기기요소의 고정도화를 빼놓는 것은 있을 수 없다. 이를 위해서는 높은 형상정도, 고강성의 주축받침 및 정압부상으로 안내정도가 높은 테이블, 피삭재와 공구의 사이에 상대적인 위치관계를 고정도로 제어할 수 있는 미동기기요소가 필요하게 된다. 더욱이 나노미터 정도로 계측이가능한 레이저간섭계를 응용한 계측, 제어시스템도 필요하다.

다음에는 매우 절삭날이 예리한 공구와 매우 피삭성이 좋은 피삭재에 의해 가공현상을 고정도로 제어하는 것에는 우수한 절삭날 특성과 높은 내마멸성을 갖는 다이아몬드공구와 고정도의 재료의 개발이 불가결하다.

5.2 가공환경

초정밀가공을 실현하는 것은, 그와 같은 조건이 갖춰진 다음에 가공환경을 충분히 제어하지 않으면 안 된다. 예를 들면, 절삭에 수반되는 혹은 환경의 온도변화를 0.1°K(절대 온도)이하로 유지하고, 공구와 피삭재의 사이의 상대진동의 진폭을 나노미터 오더로 억제하지 않으면 안된다. 열팽창계수가 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{K}$ 의 강재의 부재에 대해서 생각해 보자. 환경온도가 가정하여 0.1K 만 변화되었을 때의 열팽창 또는 수축량을 0.1 μm 이하로 억제한다는 것은 이 부재의 길이를 고작해야 80 mm 로 제한하지 않으면 안 된다. 이것으로부터도 여하한 온도변화가 가공정도에 미치는 영향이 크다는 것이 잘 이해될 것이다.

그러므로, 초정밀가공기에는 각부의 구동기구에 있어서 마찰에 의한 발열, 절삭에 수반되어 발생하는 가공열을 극력 작게하지 않으면 안된다. 또한 가공을 행하고 있는 분위기가 이상적인 경우는 적지만 다소나마 분위기온도의 변화를 따라가는 것이 많다. 초정밀온도제어를 할 것인가 또는 분위기온도의 변화에 따라 열변위를 인프로세스로 계측하여 리얼타임으로 이것을 보정하는 것에 의해 분위기온도의 영향을 보정하지 않으면 안 된다.

또한 서브미크론정도의 가공을 행하려면 공기청정기술도 필요하다. 가공환경을 청정하게 보존하려면 초정밀가공기 전체를 크린룸(clean room)에 넣는 것이 요망된다. 크린룸의 속에는 공기 중의 먼지(육안으로는 보이지 않는 0.5 μm 이하의 크기의 미소한 먼지), 미립자, 실내의 압력, 온도, 습도, 기류의 분포와 그의 형상과 속도 등을 일정한 범위내로 제어하는 것이 가능하다. 미세한 먼지가 1개라도 안내면에 침입하면 초정밀가공기의 운동정도는 크게 영향을 받아서, 가공정도는 당연히 떨어지게 된다.

가공정도의 향상을 위해서 지금까지 지나치게 주의를 기울여도 이와같은 미소진동의 문제가 크로즈업되어, 생산성의 향상, 기기의 정도향상, 가동률에 크게 영향을 주고 있다. 소위 暗振動(background vibration)이라고 불리우는 진동가속도, 진동진폭이 매우 작은 건물의 진동이 이런 부류에 들어가는 문제이다. 지진, 바람등과 같은 자연현상에 의한 진동, 자동차, 전차등의 교통기관에서 생기는 진동,

인간의 보행에 의한 진동, 공장내의 설비기구에 의한 진동, 이러한 것들이 건물의 내부로 들어와 미진동을 싫어하는 초정밀가공기에 까지 전파되지 않도록 진동을 차단하지 않으면 안된다.

이상과 같이 초정밀가공기계는 모든 면에 있어서 매우 고정도를 필요로 하는 시스템이다. 이와 같은 시스템을 작업자가 매뉴얼로 조작하는 것은 도저히 불가능하다. 가공기계의 운동상태를 자동적으로 센싱하여 얻어지는 데이터를 고속으로 연산처리하고, 동시에 초고정도의 가공기계의 위치제어를 하는 것은 고속의 계산기의 지원이 필요하게 되며, 이를 위해 가공용의 소프트웨어의 개발도 필수적이다.

6. 나노테크놀로지

나노가공은 나노테크놀로지의 한 분야라고 할 수 있다. 나노테크놀로지(nanotechnology)의 기본 개념은 1974년 Tokyo에서 열린 생산공학국제회의(ICPE)의 key note paper에서 Taniguchi에 의해 소개되었다. 이 학술회의는 일본정밀공학회(JSPE)와 국제생산공학 연구회(CIRP)의 후원으로 열렸다.

나노테크놀로지는 초정밀 미러 가공; 광자, 전자, 그리고 이온빔등을 이용한 여러 종류들의 에너지 빔가공, 얇은 필름의 증발, 초정밀 에칭 등의 고정밀 표면 다듬질 작업을 수반한 생산프로세스들에 대하여 구체적인 목표 정밀도를 달성하기 위하여 처음으로 도입되었다;

나노테크놀로지의 기초가 된 개념은 재료가공에 있어서 필요한 정밀도는 궁극적으로 1 nm (nanometer, 0.001 μm) 정도의 최고의 수준에 도달할 것이라는 예언으로부터 거슬러 올라간다. 왜냐하면, 측정 가능한 분해능의 한계 또는 고체 재료들의 확증할 수 있는 길이인, 원자 격자들 사이의 그 거리가 0.3 μm 정도이기 때문이다. 원자단위의 가공은 위치결정과 측정의 분해능은 적어도 sub-nanometer 이어야 한다는 것을 의미한다. 따라서, 나노테크놀로지는 sub-nanometer 정도의 측정, 위치 제어, 그리고 가공기술을 통합한 가공시스템에 관련되어 있으며, 그래서 초정

밀하고 정교한 부품의 제조에 중요한 역할을 할 것이다.

그러나, 원자단위의 가공에는 심각한 문제가 제기된다 : 표준 재료의 제거를 위한 일 또는 가공 에너지밀도는 원자 결합에너지에 상응해야만 하며 그 에너지는 기존의 절삭 과정들에 있어 일어나는 에너지와 비교해서 아주 크다. 이것은 일본 물리화학 연구소(IPCR)에서 1963년에 발표된 논문에서 서술되어 있다.

그러므로 원자단위 가공에 있어서는 마멸이 상당히 빠르게 진행되기 때문에 기존의 solid tool을 사용할 수 없다.

나노테크놀로지에서의 재료가공은 마모가 적은 다이아몬드공구와 미세입자를 사용하는 정밀 랩핑이나 폴리싱 그리고 광자, 전자, 이온, 중성자 그리고 중성원자 뿐만 아니라 화학적으로 반응하는 원자와 같은 고에너지 입자를 이용하는 물리화학적 가공을 해야 할 것이며, 그리고 곧 원자 결합력 기술도 사용되어지게 될 것이다.

재료가공 정밀도의 역사적인 발전과정을 도표로 표시하면 그림 1과 같다. 여기에는 공작기계, 가공장치와 그에 상응하는 상대 위치 정밀도와 측정 분해능을 갖는 측정기구나 검사장치를 볼 수 있다.

최근에, 집적회로(IC), 특히 VLSI(대규모 집적회로:1000에서 1000만개의 엘리먼트) 그리고 ULSI(초대규모 집적회로: 1000만개 이상의 엘리먼트)들의 밀도는 매우 높게 되었다. IC에 대한 설계 척도, 예를 들어서 전자회로의 최소선폭의 경우, 일반적으로 0.5에서 0.3 μm 이다. IC에서의 고집적화는 오늘날 수십 퍼센트의 생산증가 요구에 수반하여 이루어지고 있다. 그러므로 수 나노미터에 이르는 IC의 가공 정밀도 개선은 활발하게 수행되고 있으며, IC 생산라인에서의 나노테크놀로지의 필요성은 더 말할 나위가 없다.

게다가, 폭과 깊이가 수십 나노메타인 매우 미세한 홈을 갖고 있는 레이저 비디오 디스크와 콤팩트 디스크가 개발되어 현재 널리 사용되고 있다. 또한, 나노테크놀로지에 대한 지식은 이들 광학 신호 기억 장치의 생산에서도 필요하다.

나노테크놀로지는 각각 sub-nanometer 분해능 그리고 산란 오류에 extra-high-precision 처리 기술뿐만 아니라 측정도 그리고 위치 결정 기술을 포함하고 있다. 그러므로, 나노테크놀로지는 재료가공, 거리측정과 위치제어기술의 통합 시스템으로 발전해야만 한다. 위치제어기술은

나노미터 정밀도를 갖는 초정밀, sub-nanometer 분해능과 최신 프로세스 피드백과 피드 포워드 네트워크를 이루어져야 한다.

일본에서, 1985년에 정부기구인 탐험적 진보기술개발연구협력체의 후원을 받아 Yoshida Nano-mechanisms 이라고 불린 연구 그룹이 설립되었다. 이와 같은 시기에, 일본정밀공학회(JSPE)는 나노테크놀로지 위원회를 설립하였다. 나노테크놀로지는 용어는 일본에서 사용되기 시작하였으나, 현재는 유럽과 미국에서 더 많이 통용되고 있다. 최근에 유럽과 미국에서 나노테크놀로지라는 용어는 atomic-scale 현상의 과학에 일반적으로 통용되기에 이르렀다. 혁신적인 atomicbit 가공시스템으로서의 나노테크놀로지는 atomicscale 현상의 기초 과학적인 이해 없이는 존속할 수 없다.

7. 초정밀절삭가공기술의 현재와 미래

7.1 초정밀 가공기의 개발

초기의 초정밀 절삭 가공기는 루링엔진의 개발로부터 이루어졌다고 할 수 있다. 루링엔진 (ruling engine)을 사전에서 찾으면 정밀한 회절 격자등을 제작할 때에 이용하는 패션제작기라고 되어 있다. 회절 격자는 평면이나 요철형 구면의 기판상에 다수의 평행 홈(溝)를 새긴 광학 소자이고, 각 홈에 반사하는 빛이 간섭하여 만나고, 파장에 따라 각자 다른 방향에 회절되기 때문에, 입사광이 스펙트럼으로 분산한다.

회절 격자의 주된 용도는, 분광 분석이라고 불리는 스펙트럼을 이용한 물질의 분석이다. 발광체로부터의 빛을 분석하는 발광 스펙트럼 분석, 물질에 따른 빛의 흡수를 조사하는 흡수 스펙트럼 분석, 빛의 조사에 의해 발생한 형광을 분석하는 형광스펙트럼분석등에 의해 빛의 방사, 흡수와 파장의 관계를 조사하는 것에 의해, 물질의 성분이나 구조가 해명된다. 회절 격자는 발광체의 방사 파장을 상세히 조사하기 위해, 또는 물질에 조사하여 순수한 단색광을 발생시키기 위해 사용되고 있다. 회절 격자의 형태는 용도에 의

해 서로 다르지만, 일반적인 분광 분석에 사용되는 회절 격자는 브레즈형 반사 회절격자이다. 여기에서 격자구 간격은 어떤 대상으로하는 스펙트럼 파장에 비례하고, 가시 자외선스펙트럼 용도의 경우 약 1μ , 적외선스펙트럼의 용도의 경우 수 μm 로부터 수십 μm 가 있다.

회절 격자에 의한 스펙트럼 분산 기능은 격자구 간격에 의하여 정해지지만, 분광장치에 있어서 분광 성능은 격자구의 배열 정밀도에 의존한다. 회절 격자구의 누적적 구위치 정밀도는, 근접한 복수파장성분의 분리 능력(분해능: 파장/최소파장차)에 관계되고, 구체적 예로서, 1,200개/mm 회절 격자의 1차 스펙트럼에 따르는 이론적 분해능을 실현하기 위한 누적적 구위치 오차 허용치는 약 $0.1\mu\text{m}$ 이다. 격자구에 주기적 구위치 오차가 있는 경우, 고스트라 불리는 스펙트럼을 발생시킨다. 이 고스트를 실용적으로 무시하고 얻을수 있는 강도에 멈추게 하기 위해서는 주기적 구위치 오차허용치는 $0.01\mu\text{m}(10\text{nm})$ 이하이다. 회절격자 루링엔진이 예전부터 고도의 초정밀 공작 기계라고 평가되고 있었던 이유는, 배열한 격자구 간격이 아주 미세한 것이기도 하지만, 격자구에 요구되는 배열 정밀도에 있다.

실용적 회절격자의 제작은, 19세기말, 미국 Johns Hopkins 대학의 Rowland 에 의한 루링엔진의 개발에 의하여 시작됐다. 1880년대에 Rowland는, 나사에 의한 정밀이송대와 다이아몬드공구 왕복기구를 갖춘 셰이퍼 형태의 루링엔진을 제작하고, 최대폭 6", 격자구 갯수 100,000개 이상의 실용적 회절격자를 완성시켰다. Rowland 는 1901년까지 합계 3 대의 루링엔진을 완성시키고, 요철면 회절격자를 합한 다수의 회절격자를 제작하고 분광학의 발전에 막대한 공적을 쌓았다.

Rowland 이후도 루링엔진과 회절격자 제작기의 개발의 중심은 미국이었고, Johns Hopkins 대학(Anderson, Wood), Chicago 대학(Michelson, Gale), Mt. Wilson 천문대 (Babcock 부자) 등이 회절격자의 공급원이었다. 이러한 루링엔진은 모두 순 기계적 정밀도에 의존한 격자구 배열을 하고 있고, 주로 하고 스페큐람메탈($\text{Cu}68\%$, $\text{Sn}32\%$ 의 연질합금) 기판을 사용하고, 다이아몬드 절삭으로 격자구를 형성시켰다.

순 기계적 정밀도에 의존하여 정밀 위치 결정을 한 경우,

그 정밀도는 이송나사계의 정밀도에 의존한다. 고 분해능의 회절격자의 제작에는, 누적적 피치오차가 제거된 이송나사가 필요하고, 그 때문에 루링엔진용 이송나사, 래핑에 의한 기계 가공 오차의 수정과 피치의 평균화가 행해졌다.

Chicago 대학의 Michelson 엔진은, 최대 14"의 고 분해능 회절격자의 제작을 목표로 하고,

1915년까지 최대 9.3"의 회절격자를 제작했지만, 이 루링엔진의 20" 이송나사의 제작에는 15년의 래핑을 필요로 했다고 되고 있다.

이처럼, 1950년대까지의 회절격자 제작기술은, 순 기계적 정밀가공기술에 의존하고 있고, 송사 나사, 축반이, 안내 등의 제작과 조정은 명인들의 장인기술이 최고도에 발휘되고, 이러한 기계요소기술은 오늘의 정밀기구기술의 기초를 만들었다. 그렇지만, 격자구의 주기적 배열 정밀도 요구인 $0.01\mu\text{m}(10\text{nm})$ 이하를 달성한 것은 불가능한 것이고, 이송나사의 주기적 피치 오차에 기인하는 Rowland 고스트를 완전 제거한 것이 가능하지는 않았다.

그 때문에, 고스트는 회절격자에 피할 수 없는 본질적 결함 이 되고, 분광 분석 장치에는 프리즘이 분광 분산 소자로서 사용되고, 회절격자의 용도는, 진공 자외선 분광과 프리즘의 사용이 곤란한 파장 영역에 한정되고 있다.

Rowland 에서 시작하여, 1세기 이상을 경과한 초정밀 가공기의 전형이라고 할 수 있는 회절격자용 Ruling Engine의 역사는 크게 3개의 시대로 분류된다.

제1기는, 단순 기계적 정밀가공 장치로 하는 Ruling Engine의 시대이고, 나사, 치차, 축수, 안내 등의 제작과 조정되는 기계 기능자의 명인의 예술적 기능이 발휘되어, 현재의 정밀 기구·가공 기술의 기초를 만들었고, 회절격자에 요구되는 격자 홈 배열 정도를 완전히 만족시키기에 이르렀다.

제2기는, 광파 간섭제어 Ruling Engine의 시대로, 광파장이 위치결정에 기준이 되는 결과, 격자 홈 배열 오차가 심분 무시되어 얻어지는 미소 량까지 저감시켜, 회절격자가 Prism에 대신하여 분광 분산 소자로 하여 널리 보급되도록 하였다. 또한 Ruling Engine으로 개발된 광파 간섭제어기술은, 현재의 초정밀 공작기계, 계측기계의 기초를 만들었다.

Table.1 Positioning accuracy of machine tools and processing equipment and resolution of measuring instruments.

Positioning accuracy or measuring resolution	Machine tools, etc. and tool positioning devices. Lathes, milling machines, Precision Lathes, grinding machine, lapping & honing machine	Measuring instruments and data processing devices, Vernier Calipers Mechanical comparator, Micrometer, dial indicator
10 μm	Curve generator, precision jig borer, jig grinding machine, super finishing machine	Electric or pneumatatic micrometer, optical comparator
1 μm	precision grinding machine, precision lapping machine, optical lens grinding machine, precision diamond lathe	Optical or magnetic scales, electrical comparator, electronic comparator (noncontact), X-ray microscope
10 ¹ μm	D.U.V. mask aligner, optical lens finish grinding, lapping machine, precision diamond grinding machine	Laser measuring instruments, optical fiber system, Talysurfs, Talyronds
10 ² μm	Diffraction grating ruling engine, electron beam lithographer, super high precision grinding, lapping and polishing machine, chemical etching and deposion equipment, step-and-repeat exposing machine	High-precision laser measuring instruments (Doppler, Hiposs), multi-reflection laser instruments, heterodyne roughness measuring instruments(Zygo, Wypo)
10 ³ μm (lattice distance)	Nano-servo positioning system, atom or molecular and ion beam machining apparatus, nanochemical etching and deposition equipment, substance synthesis equipment, substance synthesis equipment (super lattice)	Scanning electron microscope, transmission electron microscope, electron diffraction equipment, X-ray microscope (2 nm), ion analyser, scanning tunnelling microscope (STM), SIM(scanning ion microscope), AFM (atomic force microscope), Auger analyser, ESCAR, X-ray microanalyser

제3기는, 수치제어 Ruling Engine에 의해 가변 Pitch 격자 홈 각선의 시대이다. 회절 격자의 설계에 홈 간격 변화와 홈 곡률의 Parameter가 새롭게 추가됨으로써, 분광 장치의 사양에 합해져 회절격자를 최적으로 설계하는 것이 가능하게 되어, 분광 분석과 분광 계측 분야에 기술 혁신을 이루었다.

반도체 공업을 중심으로 하는 현대의 전자, 정보 산업은, Ruling Engine에서부터 파급된 초정밀 가공, 계측 기술을 구사하여 Sub.Micron의 미세, 정밀 가공 기술을 확립하였다. 그렇지만, Ruling Engine은 아직도, Nanotechnology의 전형으로, 현대의 초정밀 가공기술을 끌어올리는 것을 계속하고 있다.

7.2 초정밀 다이아몬드 절삭기술

최근의 전자산업, 정보산업, 광산업 분야 등에 사용되는 기기나 그 구성요소부품은 輕薄短小의 경향이 있다. 기능이 고도화되고 제작 정도도 서브미크론 또는 나노미터오더가 요구될 만큼 되었다 더구나 다량으로 생산되는 것, 또한 재료에 제약이 있는 것 등, 그 외의 조건이 첨가되자 그 제작방법도 각각의 요구에 따라 달라지고 어려움이 증대되고 있다.

이와 같은 기기나 구성요소 부품 예를 들면 광학계관련 부품 등을 만들기 위해 요구되는 기술의 첫째는 정밀한 가공이다.

최근의 정밀부품으로써는 (1) 형태가 평면이나 구면과 같은 단순한 것, 특히 형상정도, 거칠기가 우수한 것 (2) 비구면 상태의 것 (3) 미소형태의 수법, 표면거칠기에 따른 정

도가 필요한 것 (4) 다량생산성, 정밀도가 높으며 값이 싼 것 (5) 사용환경에서 재로나 중량의 제한이 있는 것 등이 있다. 이런 것에 대한 가공법으로써는 고도의 절삭, 연삭, 연마, 이온가공, 레이저 가공 등이 있다.

여러 가지 요구에 대해서 사양을 만족하는 가공법이 선정된다. 경우에 따라 복합적인 가공이 사용된다. 요구정도가 높게 됨에 따라 가공 시스템으로써 새로운 연구개발을 행할 필요도 있다.

이와 같은 상태에 정밀가공기술의 연구 개발이 진작되고 있지만 여기에도 특히 대표적인 초정밀가공의 하나인 다이아몬드 공구를 사용한 절삭기술을 들어 진전의 상태나 최근의 연구발전의 방향등에 대해 기술해 본다.

7.2.1 연구발전의 배경

세상의 요구가 다양화되어 그것에 수반하며 여러 가지 부분의 기술진보와 가공요소부분의 기술진보와 가공요소기술(가공기·가공공구·가공물·가공조건·환경)자신의 진보가 정밀가공 기술 발전 진보가 정밀가공 기술 발전에 기여하고 있다.

정밀가공법이 진보해 간 배경으로써 첫째 세상이 변화나 여러 가지 부문기술이 아래와 같이 진전되었다.

- (1) 가시광선 이외의 적외선, 자외선, 레이저의 발전과 용도확대로부터, 그 빛을 반사, 투과하는 재료가 사용되어지고 있다. 새로운 결정물질등도 출현하고 있다. 이와같은 결정물질에 대해 새로운 고정도 가공방법이 필요하게 되었다. 더구나 파장이 짧은 X선영역등에는 (SOR을 포함)을 반사, 집광시킬 때에 표면의 반사효율을 향상시키는 목적으로 표면 거칠기가 무수한 광학부품이 요구되어지고 있다
- (2) 광학계의 성능 향상과 경량화 및 cost down(비용절감)을 위해, 렌즈 매수의 절감)을 위해 렌즈 매수의 절감이나 성형등의 제작방법이 검토되어 그 하나의 방법으로 비구면형태의 렌즈 또는 미러가 채용되고 있다.
- (3) 더구나 광학설계 상에서 축 비대칭 렌즈나 미러가 요구되는 바, 고정도 3-6축 CNC머신이 개발되고, 그 머신에 의한 가공이 검토되고 있다. 21세기를 내다

볼 때에 마이크로머신의 연구가 성행하게 되어 그 요소부품의 가공법 되어 그 요소부품의 가공법의 하나로써 초정밀가공기계에 따른 마이크로머신이 검토되고 있다.

- (4) 미세 홈이 있는 그레이팅 렌즈(확대렌즈) 등의 제작 요구에서 예리한 다이아몬드 공구의 검토가 행해지고 있다.

말하자면 고도의 비구면 형상을 제작 하는 것은 종래에는 장기간에 걸쳐 수작업으로 연마하던 것이었다. 그러나 NC기계나 레이저 길이측정시스템의 진보, 또한 직진 회전 기구요소의 진보 등에 의해 정밀공작기계를 만드는 요소의 입수가 용이해졌다. 고도의 형상정도, 표면 거칠기를 얻기 위해 이런 요소가 조합되고 시스템화된 초정밀의 가공장치가 개발되었다. 이 장치의 사용에 의해 가공의 전사성이 향상되었고, 더구나 고정도의 가공이 연구되었다. 긴 수명을 갖는 다이아몬드공구 칼날의 결정방위 선정, 공구 날의 정밀한 제작방법이나 측정방법 등, 다이아몬드공구의 품질이나 성능향상에 대한 연구가 수행되어 진보되고 있다.

새로운 재료에 대한 기초적 가공특성의 연구가 행해졌다. 항온실 등, 온도변화를 적게 하는 기기의 성능이 좋아졌고, 손에 넣기가 쉬워졌다. 이와 같이 세상의 기술진보에 의 요구와 정밀한 공작기계를 개발하는 등의 조건이 맞아 떨어지게 되어 정밀가공기술이 크게 발전했다.

요구 정도가 고도화됨에 따라 국가 프로젝트 등에 의해 중지를 모아 급속히 기술을 발전시키기 위해 산관학 일체의 프로젝트가 모아졌다. 초정밀가공기술의 선행 연구 개발국인 미국에는 정부에너지국(DoE)특 중심이로한 핵융합 프로젝트를, 이것은 육해공군에 걸친 제조기술 개발 프로그램을 통해 국가의 연구소나 정밀기기 메이커가 참가하여 다액의 자금으로 다이아몬드 절삭기술을 포함한 정밀 가공 기술이나 정밀 가공장치 또는 그 기술을 사용한 적용 제품에 관한 연구개발이 진행되어, 1970년대에 큰 발전을 했다. 이런 양상에 대해서 고바야시의 최근의 초정밀절삭기술에 소개되어 있다

일본에 있어서 초정밀가공기술에 관련한 국가 프로젝트는 통상산업성 공업기술원 대형프로젝트 “초고성능레이저 응용복합생산 시스템 연구의 발전”(1977-83年)이 있고 그

중에 레이저용 광학부품의 개발에 금속 미러의 초정밀 가공기술로써 연구개발이 진전되었다.

여기에서 다이아몬드 절삭가공을 포함한 초정밀 가공연구가 행해져 그 성과는 1984년에 ICALEO '84 (Internal Congress on the Applications of Laser and Electro-Optics)등에 발표되었다.

또한 경질금속을 초정밀 다이아몬드공구로 절삭했을 때의 표면 품질이 다이아몬드공구 재료의 결정방위에 따라 여러 종류를 선택하고 절삭날끝의 상태에 관계가 있다고 추측되어, 그 연구에 대해 일본정밀공학회 산학협동연구협의회에서 채택되었다. 분과회로서 초정밀 다이아몬드공구의 절삭날 평가방법의 연구프로젝트가 1986년에 발족되어 1989년 종료되었다. 이 프로젝트에는 다이아몬드공구의 재료, 결정 방위 등 여러 종류를 선정하고 공구를 제작하기 위해 공구 칼날 모서리 반경의 측정정에 관한 장치개발, 측정법을 개발하여 각종 조건에서 제작된 다이아몬드 공구가 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해 조사했다. 또한 회원회사인 古河알루미늄공업에 주야 연속에 가까운 절삭운전이 행해져 다이아몬드 공구의 수명시험이 행해졌다. 여기에는 다이아몬드의 재질, 결정방위 등과 공구수명과의 관계가 밝혀졌다. 그 이외에도 그 프로젝트로부터 다음과 같은 유효한 성과가 얻어져 참가 회원들에게 환원 되어졌다.

또한 최근에는 일본 통상산업성 공업기술원 대형 프로젝트인 초선단 가공 시스템이 있다(1986-1994). 여기에는 초정밀기계가공, 계측기술과 응용기술의 연구개발이 행해져 많은 성과가 발표되고 있다. 이와 같이 산관학 일체로 진행되고 있는 연구가 일본의 초정밀가공기술의 발전에 크게 기여하고 있다.

7.3 최근의 초정밀 다이아몬드 절삭기술연구의 진전

7.3.1 연구개발의 진행방향

정밀 다이아몬드 절삭가공이 동, 알루미늄 등 경질재료의 가공에 적합하다는 것 때문에 초기에는 경질금속의 가공 및 그 재료를 사용한 응용연구가 많이 행해졌다.

또한 편흔이 없는 양질의 무전해 니켈 도금이 얻어졌기

때문에 각종재료에 무전해 니켈도금을 해 그 부분을 다이아몬드로 절삭하는 연구가 진행되어 대량생산용 플라스틱 광학부품의 금형 등에 실용화되어 응용 범위도 넓어졌다.

그 후 세라믹, 실리콘재료 등의 다이아몬드절삭 가공연구가 계속되어 적외선용 게르마늄렌즈 등의 가공에 실용화되었다.

최근의 초정밀절삭 가공연구는 초정밀 가공기의 발전에 맞추어 다음과 같은 방향으로 진행되고 있다.

- (1) 마이크로머신에 사용하는 작은 부품가공
- (2) 정보기기의 광학계 등에 이용되는 축 비대칭 곡면가공
- (3) 위성통신이나 천체 망원경 등에 사용되는 대형반사, 집광계 광학부품의 비구면 형상가공
- (4) 자외선이나 X선 등 단파장의 광선을 효율적으로 반사시키는 고정밀 광학부품의 가공(연마 등의 전가공으로써 복합 가공에 이용된다)
- (5) 가공이 어려운 재료의가공

7.3.2 작은 부품의 가공

초정밀 다이아몬드 공구를 사용한 미세 가공의 시험에 대하여 東芝會社 에서 1986년에 그레이팅렌즈의 미세 홈가공을 하였다. 그 형상은 직경5.2 mm, 두께2 mm의 원판에 부등 간격의 동심원상의 미세구를 가공한 것이다. 홈의 최소 형상은가장 바깥 부분의 깊이 1.6 μm , 폭 6 μm 의 틈날 형상이다. 다이아몬드 공구의 선단이 너무 날카로와 도강도나 수명상에도 문제가 있으므로 강도도 충분하고 미세구의 가공에도 정밀성이 좋은 정도의 절삭날을 형성하는 것이 중요하다. 이 경우의 선단은 0.4 μm 의 폭으로 커트되어 있다. 이 형상은 당시 동경 다이아몬드 공구제작소 岡谷 공장에서 가공되었다.

최근 통상산업성 공업기술원이 1991년도부터 10년 계획으로 산업과학기술 연구개발제도에 따라 마이크로머신 기술의 연구개발을 산관학 일체로 진행하여 각 할당 부서에서 학회의 발표가 활발히 진행되었다.

사와타라는 선반계의 초정밀 가공기와 다이아몬드공구를 개량한 의사 볼랜드밀에 의한 3차원 미세 절삭을 시험하였다.

직경 3 mm의 모서리면의 초정밀 밀링가공을 시뮬레이

선하면서 최적의 공구형상이나 가공조건을 찾아내고 표면 거칠기와 형상정밀도의 향상을 도모하여 표면거칠기 69nm의 양호한 가공면을 얻을 수 있었다

7.3.3 축 비대칭 곡면가공

광학부품 등의 비대칭 광학부품에 대해서는 다이아몬드 절삭, 연삭 등의 가공에 따라 근년 고정밀도의 부품 생산기술 확립이 진전어가고 있다. 축비대칭 곡면 가공에 대해서는 각종 방식을 모색중이다. 東芝會社에서는 축대칭 곡면 가공 외에 축비대칭 곡면 가공에도 적용할 수 있는 초정밀 가공장치가 개발되었는데, 이 장치는 직선 2축 및 회전1축의 동시 3축 제어가 가능하다.

위성통신용 광안테나나, X선 망원경 광학계 등에는 대형이고 고정도의광학부품이 사용된다. 각종재료에 대하여 고정도로 가공이 가능한 다이아몬드 절삭 외에 연삭이나 폴리싱도 가능한 초정밀비구면 가공장치가 개발되었다. 형상정밀도 컨트롤러의 능력이 2.5nm이고, 직경 650 mm까지의 대형부품의 고정도가공이 가능하다. 직경 600 mm, 곡률반경1,400 mm의 요면경(재료: 알루미늄 합금)을 다이아몬드 절삭 가공하고 형상정도 0.1 μm pv, 표면거칠기 2 nmRa를 얻었다.

세계의 제품군이 경박단소를 지향하고, 이것과 관련된 첨단기술로써 초정밀 가공의 진전이 크게 기대되고 있다.

여기에 초정밀 다이아몬드 절삭이라고 하는 분야에서의 최근의 연구, 개발의 진전상황등에 대해 기술한다.

최근에는 각종재료의 발전, 사용파장영역의 확대, 미세화의 경향, 정도의 고도화의 경향, 저가격 정밀가공 등의 환경에서, 초정밀가공은 각종 새로운 방식의 정밀가공의 진전과 동시에 각각의 방식을 조합한 복합적인 가공 등의 연구개발이 행해져 실용화되고 있다.

여기서는 측정기술에 관해서는 다루지 않고, 가공의 고도화에 동반하여 정밀계측은 차의 양바퀴와 같이 진전하고 있다는 것을 말하여 두며, 앞으로도 더욱 진보해 갈 것을 확신한다.

참 고 문 헌

1. Nakazawa, Principles of Precision Engineering, Oxford, New York, Tokyo, 1994.
2. 丸井悦男, 超精密加工學, コロナ社, 1997.
3. 日本學術振興會, 精密加工の最先端技術, 工業調査會, 1996.
4. Taniguchi., Nanotechnology, Oxford New York. Tokyo, 1996.