

## 초정밀가공의 현재와 미래(II)



元鍾虎

충남대학교 기계공학과

### 8. 超精密研削加工 또는 超精密研磨加工

#### 8.1 研削加工과 研磨加工

기계생산 시스템 용어사전에 의하면 '研削은 다수의 입자를 결합하여 연삭숫돌에 강제로 절삭깊이 이송을 주고 공작물을 절삭한다' 라고 정의되어 있다. 한편 研磨라고 하는 용어는 사전에는 없고, 가까운 용어로서 研磨 (polishing)가 있고, '미세한 유리입자를 이용하여 재료의 표면을 다듬질하는 것을 말한다. 이것에는 버핑, 바렐연마, 액체 호닝 등이 있다' 라고 되어 있다.

母性原則에 따르면 불필요한 부분의 재료를 제거가공에 의해서 除去하고, 공작물의 표면에 소망하는 형상을 소정의 정도로 창성하는 가공법이라는 점에 연삭과 연마에 공통되어 있다. 모성원칙에는 운동전사원칙과 압력전사원칙이 있다. 연삭가공은 절삭가공과 같은 운동전사원칙에 의한 가공법이다.

유리입자 또는 고정입자에 의한 가공에는 탄성적으로 지지된 숫돌에 의한 연마가공은 압력전사원칙에 따르는 가공

법이다. 램핑, 폴리싱, 호닝 등도 연마가공에 포함된다. 입자와 공작물의 접촉압력이 높은 부분에서 우선적으로 재료가 제거되고 가공이 진전한다.

가공면의 역사는 고대로부터 연마가공이 등장하였다. 신석기 시대 이후에 마제석기 제작, 경옥제의 勾玉, 금속거울 제작에는 연마가공이 중요한 가공법이 된다.

종래의 연삭가공은 고속으로 회전하는 숫돌을 사용하여, 숫돌을 구성하고 있는 단단한 입자에 의하여 공작물을 조금씩 절삭을 취하는 가공법이다. 일반 절삭가공과 비교하여 다음과 같은 특징이 있다. 단단한 입자로 절삭하는 것은 일반 금속뿐만 아니라 담금질강, 초경합금 등의 가공도 가능하다. 작은 입자로 절삭하기 때문에 칩은 극히 작다. 연삭 다듬질면은 표면조도가 양호하고, 또한 치수정도도 높다. 연삭속도는 일반절삭속도의 10~~~~~ ~50배이다. 그러나 각각의 칩은 작지만 가공능률은 상당히 높다. 단위 체적당 칩을 제거하는데 필요한 동력은 일반 절삭가공의 10배이다. 또한 절삭속도도 높고, 연삭에 의한 발열량도 많고, 연삭온도도 높다. 그래서 연삭가공면의 변질이 격하고,

연삭균열 같은 문제가 생기기 쉽다. 입자의 절삭날 모서리가 마모되면 큰 연삭저항이 작용한다. 입자의 강도가 그 연삭저항에 견딜 수 없게 되면 벽개되거나 또는 입자 그 자체가 탈락하고, 새로운 예리한 절삭날 모서리 또는 새로운 입자가 스톨의 표면에 나타나서 연삭을 행한다. 이것이 스톨 입자의 자생작용이라 한다.

연삭스톨은 입자를 결합제로 고정하고, 여러 가지 현상으로 소결시키는 것이다. 예리한 절삭날 모서리를 갖는 입자와 결합제 또는 그 사이에 분포하는 공극이 있다. 입자, 결합제, 공극을 스톨의 3요소라 한다.

입자는 스톨표면에 불규칙하게 나열되어 있지만 평균적으로 보면 입자의 평균거리(b)를 간격으로, 연삭방향에 입자가 나타나고, 각각의 입자상호의 간격은 연속절인간격(a)이다. 연삭가공은 간격 a로 하고, 미세한 입자군에 의한 밀링절삭과 유사한 절삭가공으로 고찰된다.

이렇게 하여 연삭가공에 의한 운동전사정도와 재료제거 분해능 즉 절삭깊이 최소단위를 결정하는 입자절삭깊이를 구할 수 있게 된다.

실제로 스톨은 각각의 입자절삭날의 높이 방향의 분포오차가 재료제거 분해능의 크기를 결정한다. 통상 연삭가공은 취성모드로 드레싱이 행해지고, 입자의 파쇄성에 의해 스톨절삭날이 자생작용을 하면서 연삭스톨이 사용되어 지고 있으며, 입자절인의 높이는 분포 또는 절인 간격을 제어하는 기능은 조금도 고려되어 있지 않기 때문에, g 또는 a의 값은 넓은 범위로 흩어져 있다. 그러나 연삭가공에 의해 초정밀가공을 실현하려면, 새로운 발상에 의한 연삭가공의 혁신이 필요하다. 그러므로 새로운 발상으로 개발된 연삭가공법에 대하여 지금부터 서술하려 한다.

ELID 연삭은 연성모드연삭이라고 할 수 있다. 입자의 높이를 분포를 제어하는 것으로 입자의 선단을 맞추고 미소한 절삭깊이의 조건으로 연삭가공을 행하여, 취성재료로도 금속과 같은 연성적인 칩이 생성되고 경면을 얻는 것이 가능하다. 이것이 연성모드연삭(ductile mode grinding)이라 불리는 가공법이다. 이때 임계입자절삭깊이는 0.1 $\mu$ m이하로 생각되어진다.

ELID연삭에서는 주철파이버본드나 메탈본드스톨을 사용하고, 전해 드레싱법에 의해 초정밀경면 연삭이 행해지

고 있다. 물론 연성모드 연삭을 실현하는데는 입자절삭깊이를 임계입자절삭깊이보다 작게 할 필요가 있다. 극미세한 입자가 사용된다. 인프로세스 전해드레싱을 이용하는 하는 연삭법을 ELID연삭이라 부른다.

ELID연삭에서 스톨에는 주철 본드 또는 철계본드의 초미립의 다이아몬드스톨이 사용된다. 스톨은 브러쉬와 접촉하여 양(+)극이 되고, 스톨의 하부 또는 측면에 설치된 전극이 음(-)극이 된다. 2개의 전극은 0.1mm 정도 떨어져 놓고 이 틈에 약도전성의 수용성 연삭액이 공급되어 진다. 직류의 전원장치에 의해 고주파 펄스전압이 인가되면, 전해현상에 의해 철 원자가 스톨로부터 용출된다.

초기 드레싱을 개시할 때 스톨표면의 도전성은 양호하다. 전해에 의해 스톨본드의 표면이 용출되고, 대부분이 Fe<sup>+3</sup>로 된다. 이 Fe<sup>+3</sup>는 물의 전기분해에 의해 생긴 OH<sup>-</sup>와 결합하고, Fe(OH)<sub>3</sub>로 변화한다. 결과적으로 철 원자는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 형태로 스톨표면에 부착하고 부도체의 피막을 형성한다.

여기서 ELID연삭을 개시하면 미세한 입자가 공작물과 접촉을 시작하고, 돌출한 입자가 마모된다. 입자가 마모됨에 따라 부도체피막도 조금씩 박리한다. 부도체피막의 두께가 감소하고 다시 전도성이 증가하면 전해가 시작되고, 입자가 돌출하지만 위에서 설명한 메커니즘에 의해 부도체 피막이 다시 생긴다. 이것이 ELID연삭에 의한 입자의 자율적 제어기능이고, ELID연삭은 이러한 기구를 반복하여 가공이 진전되어 지는 것이다.

ELID연삭으로는 철계모드스톨, 직류펄스전원, 수용성 연삭액의 3구성요소를 조합시켜, 부도체피막을 형성하는 것에 의해, 미세입자의 정상적 돌출을 확보하고 연성모드의 연삭가공을 행하는 것이 가능하다.

ELID연삭에서 평균직경이 약 4 $\mu$ m의 극미세립의 철 또는 주철계의 메탈본드를 사용한다면 비교적 용이하게 고품질의 경면을 얻는 것이 가능하다. 평면연삭, 원통연삭 또는 구면, 비구면연삭에 의해 경면을 만드는 것에 ELID연삭의 적용이 행해지고 있다.

## 8.2 종래방식의 연마가공

공작물을 공구에 문질러가면서 압력전사원리에 의해 표

면을 갈아서 다듬질하는 연마가공에는 遊離粒子和 工作液을 이용하는 랩핑과 폴리싱, 슷돌에 의한 연마가공인 호닝 등이 있다.

연마가공은 마제석기를 갈기 위한 신석기시대에 이미 실용화되었다. 청동기시대가 되면서 勾玉이나 청동거울을 연마하고 광택면, 경면을 얻는 기술도 사용되어 졌다. 현대에 이르러서도, 렌즈, 프리즘 등의 광학기구나, 블록게이지, 정밀정반과 같은 특히 높은 형상정도, 치수정도가 요구되어지는 기구의 제작에는 꼭 필요한 기술이다. 반도체 실리콘웨이퍼, 비디오용 고정도 기록자기드럼 등의 전자부품이나 탄산가스 레이저용 금속반사경 등의 제작에는 이미 정도가 높은 초정밀연마가공이 사용되어지고 있다.

### 8.2.1 랩핑

주철, 동합금 등의 연금속이나, 경목, 목탄 등의 비금속 재료로 만들어진 랩에 공작물의 표면을 눌러 부착하고, 랩과 공작물의 사이에 직경 수 $\mu\text{m}$ 의 미세한 입자의 랩핑파우더를 가하여 상대운동시키면, 랩제에 의해 공작물 표면부터 미량의 칩이 제거되어 평활한 표면이 얻어지는 가공법을 랩핑이라 한다.

랩핑다듬질을 행할 때 공작액을 사용하는 습식법과 사용하지 않는 건식법이 있다. 습식법에서 랩제는 공작액에 둘러싸여 있고, 공작물과 랩의 사이를 轉動運動한다. 이때 입자는 예리한 절삭날에 의해 공작물을 깎아 낸다. 따라서 다듬질면은 배깅질 모양의 광택이 없는 표면이 된다.

건식법은 가능하게 파쇄된 랩제가 랩의 표면에 묻혀 있어 전동하지 않고 미소절삭을 행하게 된다. 가공면은 극히 미세한 굵힌 자국이 생기나 광택의 경면을 얻을 수 있다.

랩핑의 대표적인 통용 예는 블록게이지의 다듬질가공이다. 열처리, 연삭가공, 시즈닝 처리를 행하는 블록게이지가 높은 치수정도와 밀착이 가능한 측정면을 만들기 위해서 랩핑가공을 한다.

블록게이지의 랩핑가공은 거친, 중다듬질, 다듬질의 공정이다. 순차입도의 세밀한 입자를 사용한다. 거친, 중간다듬질은 습식랩핑을, 다듬질에는 건식랩핑이 이용된다. 랩핑게이지에 요구되는 치수공차, 표면조도는 등급, 호칭치수에 따라 다르다. 00급(최고급)의 호칭치수가 150mm이

하의 블록게이지에서는 평면도의 허용치 0.05 $\mu\text{m}$ , 표면조도 0.06 $\mu\text{m}$  R<sub>y</sub>로 되어 있다.

### 8.2.2 폴리싱

랩핑에 있어서의 입자를 고르고 미세하게 하고, 공구인 랩도 연질의 것으로 바꾸면, 연마면을 아주 평활하게 하면 경면다듬질이 용이하게 된다. 이것이 폴리싱이라 하는 가공법이다. 랩핑의 최소가공단위는 0.1 $\mu\text{m}$ 정도이지만, 폴리싱의 최소가공단위는 나노미터 오더 까지 접근하고 있다.

회전운동을 하고 있는 폴리셔에 글라스를 눌러주면서, 요동운동을 한다. 렌즈의 경면가공에 사용되어지는 폴리싱은 경질발포 폴리우레탄이 사용될 때가 많다. 특히 고정도가 요구되어지는 경우에는 천연수지로 된 피치가 사용된다. 연마제에는 오래전엔 산화티탄과 벤골라(주성분이 산화제2철)가 사용되어졌으나, 현재는 산화세슘에 왕좌를 양보하고 있다.

폴리싱에 의해 경면이 생성되어지는 메카니즘은 완전히 밝혀져 있지 않다. 기계적인 작용과 화학적인 작용이 조합되어 鏡面化가 진행된다고 이해되어지고 있다. 기계적인 작용에는 입자의 미소한 절삭에 의한 재료제거와 칩의 凹部에의 재부착, 소성유동에 의한 평활화가 있다. 화학적인 작용에는 연마액속의 수분 등과의 화학반응에 의한 재료의 용출작용과 수화막의 생성 등이 있다.

폴리싱에 의해 가공된 경면을 현미경으로 관찰하면 전면이 미소한 굵힘으로 덮여져 있는 면으로부터 오철이 전혀 인식되지 않는 면까지 여러 가지가 있다. 미소한 굵힘 흔적은 폴리셔에 지지된 입자의 절삭작용의 흔적이라 생각되어진다. 이러한 흔적은 비교적 큰 입자에 의해 폴리싱이 행하여진 것으로 보여진다.

연마제중의 큰 입자의 흔재나 폴리싱의 먼지 같은 것의 부착이 연마면의 품질저하를 초래한다. 초정밀가공을 실현하려면 연마장치를 청정한 환경에 설치하지 않으면 안 된다.

그런데 굵힘이 있는 폴리싱면에는 연마에 의해 가공변질층이 발생하고 있다. 기계적인 작용에 의한 가공변질층의 발생을 감소하고, 폴리싱에 의해 생성된 경면의 품질을 높이기 위해서 몇 가지 연구가 되어져서, 새로운 폴리싱가공법이 개발되고 실용화되었다.

### 8.3 새로운 연마가공

#### 8.3.1 플로트 폴리싱(float polishing)

일렉트로닉스, 오토 일렉트로닉스의 발전에 의해 Si, GaAs, 등의 단결정소자를 기하학적으로 고정도 뿐만 아니라 결정에 일그러짐(변형)이 남아 있지 않게 하기 위해 초정밀가공을 하는 것이 요구되어진다. 이 요구에는 통상 폴리싱(광학폴리싱)만 하는 것으로는 불가능하다.

그러한 높은 형상정도의 실현이 가능하고 가공변질층이 생기지 않는 가공법으로 플로트 폴리싱법이 개발되었다. 純水中에서 이온 교환후 0.2 $\mu$ m의 필터에 통과시킨 물 속에 통하여 수중의 SiO<sub>2</sub>의 초미립자를 현탁시켜 가공액으로 사용한다. 이 가공액중에서 폴리싱 플레이트의 회전축과 공작물 홀더의 회전축을 편심시켜 회전시킨다. 공작물 홀더를 축방향에 플로팅의 형태로하여 토크만이 공작물의 회전축에 전달되도록 해놓으면 폴리싱 플레이트와 공작물 사이에 있는 가공액에 동압효과에 의해 가공액에 압력이 생긴다. 이 때문에 공작물이 폴리싱 플레이트로부터 아주 잘 떼어온다. 따라서 폴리싱플레이트와 공작물이 비접촉의 상태로 가공이 행해진다.

폴리싱은 폴리셔의 표면형태를 공작물의 표면에 전사하는 가공법이기 때문에 폴리셔의 평면도가 높은 것이 높은 가공정도를 얻기 위한 기본이 된다. 높은 평면도의 폴리셔를 얻기 위해서 초정밀 폴리싱머신에는 다이아몬드 바이트에 의한 초정밀절삭기능을 갖고 있다. 피삭성이 좋은 공업용 주석폴리셔로서 사용된다. 주석의 표면에 흠을 절삭한 후, 표면을 초정밀 절삭하여 폴리셔의 표면으로 하고 있다.

공작물의 표면조도가 크면 공작물이 朱錫製의 폴리셔를 절삭하는 것이 되므로 공작물의 표면조도가 충분히 작게 하기 위한 전가공이 필요하다.

결정표면에는 마이크로한 다수의 격자가 존재한다. 이러한 부분에는 모재보다 결합에너지가 작다. 공작액의 비중이 다른 초미립자입자가 유선을 벗어나 공작물의 표면을 얇은 각도로서 비비며 원자 또는 분자오더의 재료를 제거한다. 그러므로 공작물에 가공변질층을 남기지 않고 최표면에 있는 원자만을 제거하여 가공이 진행된다.

#### 8.3.2 메카노 케미칼 폴리싱

메카노케미스트리(mechano-chemistry)는 인장, 압축, 전단, 굴곡, 소성변형 등의 가공을 통하여 가공하는 기계적인 에너지보다는, 고체표면의 물리적 또는 화학적 특성을 변화시키기도 하고, 고체의 주변에 존재하는 기체와 액체 물질에 화학적인 변화를 주거나, 또는 주위의 물질과의 직접화학반응을 촉진시키는 등의 일련의 물리적 화학적 현상을 나타내는 단어이다.

특히 초미세입자가 관여하는 경우에는 초미세입자의 표면적이 크기 때문에 재료의 물리적인 특성에서도 접촉의 경계면이 화학적인 상호작용 쪽이 물질변화에 대하여 영향이 크게 된다. 이와 같은 초미립자의 화학적인 작용을 이용하여 가공변질층이 없는 초평활면을 만드는 가공법이 메카노 케미칼 폴리싱이다.

폴리셔와 공작물의 틈에 공작물과 화학반응을 생기게 하여 초미세입자를 건식 또는 적당한 폴리싱액을 조합한다. 가공변질층을 생기지 않게 하기 위해서는 공작물과의 사이에 기계적인 상호작용으로 재료제거가 일으키지 않는 것이 중요하다. 공작물보다도 연질의 입자를 사용하여 주로 화학적인 작용으로 재료를 제거하는 것이 메카노 케미칼 폴리싱의 특징이다.

연질입자와 공작물과의 사이의 접촉에서 공작물보다도 입자의 쪽이 연하기 때문에 입자에 변형이 일어난다. 양자의 접촉부에는 화학반응이 일어나 미소한 반응부가 마찰력의 작용에 의해 웅그스트롬으로부터 나노메타 오더의 극히 미소단위로 제거한다. 결정입자의 기예를 드는 것이 어렵지 않다 화학적인 작용이 크면 클수록 가공 능률이 높고 가공변질층, 결정격자의 騷擾가 적다.

메카노 케미칼 폴리싱의 기본적인 가공의 메카니즘은 다음과 같다.

입자와 가공물의 사이에 미소한 접촉부에서는 화학반응이 생기고 반응층이 마찰력에 의해 제거된다. 노출된 화학적으로 활성인 신생면이 공기나 물 등의 분위기와 급격히 반응하여 산화층, 수화층이 생성된다. 이 생성층이 위와 동일한 메카니즘으로 제거된다. 연질입자의 촉매작용에 의해 공작물의 표면이 산화된다. 이 산화생성물이 입자의 찰과

작용으로 제거된다.

메카노케미칼 폴리싱에서 대표적인 가공 예로는 사파이어 단결정의 초정밀연마가공이 있으며, 간단히 설명하면 다음과 같다.

$Al_2O_3$ 와 고(固)상(相)에 의해서 화학반응으로 생긴  $SiO_2$ 나  $\alpha-Fe_2O_3$ 의 초미세한 입자를 통상의 폴리싱가공과 같은 형식으로 공급한다. 이러한 미세한 입자는 어느 것도, 사파이어 경도의 반분이하의 경도이다. 입자와 사파이어의 국부적인 접촉면에 고상의 화학반응이 생기고, 이 반응에 의해 생성된 층이 미소한 단위로 제거된다. 공급된 초미세한 입자가  $SiO_2$ 의 경우에는 멀라이트(mullite,  $Al_6Si_2O_{13}$ )가,  $\alpha-Fe_2O_3$ 의 경우에는 고용체가 생성된다.

입자를 폴리싱액에 현탁시켜 사용한 습식과, 입자의 상태로 연마하는 건식이 있다. 사파이어의  $SiO_2$ 나  $\alpha-Fe_2O_3$ 에서 메카노 케미칼 폴리싱은 건식의 경우에서 가공능률이 높다. 또한 입자의 입도가 작은 것이 가공능률이 높게 되고, 연마에 있어서 화학작용의 중요성이 확인 될 수 있다.

Si 웨이퍼, GaAs 등의 화합물반도체웨이퍼, 다이아몬드 박막 등, 다수의 공작물이 메카노 케미칼 폴리싱으로부터 초정밀연마가공하는 예가 될 수 있다.

### 8.3.3 플라나리제이션가공

차세대 초 LSI디바이스는 높은 집적화와 복잡한 신호의 초고속처리를 위한 다층배선구조를 지나는 지극히 복잡한 구조로 되고 있다. 이 배선구조를 배선금속층 상호간에 전기적으로 절연하는 절연막을 끼우고, 4~5 또는 7층 이상으로 적층하는 것도 있다. 적층수가 증가할수록 복잡한 배선구조를 확실하게 실현하는 구조가 어려워 진다. 그리고, 적층과정의 각각에 관해 표면형상을 평탄화하는 플라나리제이션기술의 확립이 필요해졌다. 이 플라나리제이션에 폴리싱 기술이 응용되어 큰 성과를 올리고 있다.

초정밀 폴리싱을 응용하고 다층배선구조를 만드는 대표적인 과정은 다음과 같다. 제1층을 평탄화한 후, 층간에 절연막을 형성하고, 다시 평탄화를 행한다. 각 배선층을 접속하기 위해서 콘택트 홀을 뚫고, 제2층의 금속을 퇴적시키고, 또 한번 평탄화를 행한다. 이러한 반복에 의해 다층화가 이루어진다.

LSI디바이스는 가공 마진이  $0.5\sim 1\mu m$ 로 작아지고, 이 범위 중에 평탄화를 행하고, 변형이 없는 경면을 얻지 않으면 안 된다. 가공압력과 폴리셔-공작물간의 상대속도에 2종류의 파라메타가 폴리싱에 의해 가공량을 규제하고 있다. 웨이퍼전면의 플라나리제이션을 실현하기 위해서는 공작물의 전면에 가공압력과 상대속도가 균일하게 되지 않으면 안 된다.

이를 위해 고안된 플라나리제이션 폴리싱기구에는 디바이스에 붙인 실리콘웨이퍼의 다른 측면부터 고무 등의 탄성박막을 끼우고 또는 수압에 의해 전면에 정수압을 걸어서 웨이퍼의 휘어진 모양을 교정하고 압력분포를 균일하게 한다. 웨이퍼 위에 있는 어떤 점에서도 폴리셔와의 상대속도가 동일해지도록 하면 편심기구보다 작은 직경의 원운동 궤적을 묘사할 수 있다.

적절한 강성을 가지고 있는 입자를 공작물의 표면에 상시 균일하게 공급할 수 있는 것처럼 플라스틱제로 스프이럴함을 갖는 폴리샤가 사용되어 지고 있다. 플라나리제이션가공은  $0.01\mu m$ 이하로 평탄도가 실현되고 있다.

### 8.3.4 電氣泳動法에 의한 切斷과 研磨

산화물의 초미립자는 알칼리 수용액 중에 수산화기를 흡착하고, (-)부에 대전한다. 이 수용액에 전장을 걸면 부에 대전한 초미립자는 양극으로 끌려주고, 전극표면에 밀착한 다분자흡착층을 형성한다. 이 현상을 전기영동현상이라 한다.

전기영동현상에 의해 형성된 초미립자의 흡착층을 스텝로하는 연삭 도는 연마가공이 개발되었다. 치핑을 생기지 않게 하면서, 글라스를 연삭절단으로 잘라지게 하고, 실리콘의 경면마모에도 유효하게 이용되고 있다.

- 도전성이 있는 결합제를 포함한 다이아몬드 블레이드를 공구로 사용한다. 이 블레이드를 양극화하고, 이 주변에 음극화한 커버를 설치한다. 양전극의 틈에 초미립의 실리콘 입자를 포함한 가공액을 유입시키고, 부에 대전했던 실리콘 입자가 전기영동현상에 의해 다이아몬드 블레이드 쪽으로 이동하고, 그 표면에 흡착한다.

鏡面切斷面이 만들어지는 메커니즘은 다음과 같이 설명할 수 있다. 공작물의 흡착성에는 절삭이 잘되는 다이아몬드

드 입자가 주요한 역할을 하고 있다. 흡착된 실리콘입자는 다이아몬드입자의 過剩切削깊이를 물리적으로 저지하고, 게다가 브레이드의 회전진동에 대한 댐퍼로 된다. 창성된 흡 측면의 연마를 흡착한 실리카입자가 행하기 때문에 치핑이 없는 경면절단면이 얻어진다. 양극과 음극사이에는 電壓을 적정하게 조정하고 흡착하는 실리카입자의 支持強度가 입자의 磨耗速度와 잘 조화되어 외관상의 슛들마모가 없고, 항상 새로운 절삭날이 존재하게 된다. 소다 글라스, 페라이트 등이 이러한 방법에 따라 치핑 없이 절단된다.

칼륨산화물의 초미립자 표면에 흡착하고, 산화물의 초미립자와 함께 電場의 가운데에서 電氣泳動하는 고분자재료가 발견되었고, 고분자재료를 결합제로 하는 초미립자 슛들을 만들 수 있다는 가능성이 있다.

직경이 10nm 오더의 초미세 실리카 입자와 결합제가 되는 알긴산나트륨의 조합으로 소기의 목적이 달성되었다. 주변에 알긴산나트륨을 흡착시킨 실리카 입자가 전기영동에 의해 陽極에 이끌리고 치밀한 흡착층을 형성한다. 이 흡착층을 페레트상으로 잘라내어 건조시키면 슛돌이 될 수 있다. 이외에도 다이아몬드입자도 같은 방법으로 슛돌이 만들어진다. 알긴산나트륨 본드 실리카입자스�돌에 의해 실리콘 표면의 연마를 행하면 10nm Ry의 표면조도를 얻을 수 있다.

## 9. 에너지빔가공의 현재와 미래

### 9.1 레이저·전자빔가공의 특징과 적용

에너지빔 가공은 가공에너지를 빔상으로 하여 가공물에 쏘여 목적하는 형상을 부여하는 가공법 또는 재료에 새로운 특성을 추가하는 가공법을 총칭한다. 레이저나 전자빔 가공기술은 주로 가공에너지를 열에너지 또는 화학에너지의 형태로 이용한다. 한편 용융, 발열, 화학반응에 의한 가공도 있다.

이러한 가공법이 실용화 된 것은 1960년대부터 1970년에 걸쳐서 인데, 여러 가지 優劣을 논의 하는 기회가 많았다. 그러나, 이들이 가공법으로 우수하다는 것은 아니고,

여러 가지 장점이 있지만, 단점도 있어서 일반적인 목적에 부응하는 가공법으로는 채택되지 않았다.

두 빔의 가공원으로서의 특징은 고파워밀도빔이라고 하는 용어를 사용하는 경우가 많다. 종래 전자빔 가공의 결점은 X선의 발생이라고 말하여져 왔다. 인체에 주는 영향이 매우 크므로 매우 주의하여야 한다. 그러나, 이것은 납이나 납유리로서 철저히 차단시키면 완전히 해결될 수 있다. 그것보다도, 현재의 생산라인은 컴퓨터로 제어되고, 자동화, 무인화가 진행되어 전자빔의 照射位置, 파형, 에너지의 제어성, 가공환경의 클린성(진공중의 가공) 등 기술적인 점을 더욱 중요시하고 있을 뿐이다.

기계가공을 행할 때 기준이 되는 기준면이 있으면, 가공량은 이 면으로부터 정해져 나간다. 한편, 에너지빔 가공은 가공에너지를 빔상으로 가공물에 照射하기 때문에 이들에 는 가공기준면이 존재하지 않는다. 그렇기 때문에 정도를 내기 위해서는 빔의 위치결정의 고정도화, 1회 가공량의 미세화, 장치의 안정화가 필요하다.

열가공에 있어서는 빔을 가늘게 收束하여 파워밀도를 높이고 열전도에 의해 주변으로 열을 확산하기 전에 가공을 종료시킬 필요가 있다. 그렇기 위해서는 높은 퍼크치로 짧은 폭의 펄스빔이 필요하다. 소위 고파워밀도 펄스빔가공이다.

가공의 자동화가 필요한 것은 가공 상황을 감시하는데 있다. 예를 들면, 대기중의 레이저가공(제거, 용접)에 대해서는 가공중에 생기는 AE신호(大氣中の 音, 재료중의 歪波), 반사레이저광, 고온상태의 재료에서 방사광 등의 검출에 의해, 가공의 상황을 감시할 수 있다. 이들은 레이저가공의 초기에 경험적으로 알려진 사실이지만 실용적으로는 이용되고 있지는 않다. 이런 점에 관해서는 전자빔가공(제거, 용접)에 있어서도 마찬가지이다.

레이저빔, 전자빔은 계측수단으로도 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라, 공업적으로 안정된 가공을 실현하기 위한 기초적 지식으로서도 중요하다. 그렇지만, 미소영역에 고파워밀도로 빔에 의한 단시간의 현상은 물론이거니와 현상의 직접관찰은 행할 수 없기 때문에 2차적인 현상의 관찰, 또는 가공흔적의 관찰에 의해서 加工機構의 추정을 할 수 있을 뿐이다. 그러나, 비교적 큰 영역에 생기는 현상인 용접

에서는 X선을 측면에서 조사하여 재료내부에 생기는 용접 현상의 관찰 등을 할 수 있다.

## 9.2 레이저 가공 기술

1960년, 나이만이 루비 레이저(레이저의 명칭에는 발전 매질의 재료를 붙이는 것이 일반적이고, 이 경우는 루비를 사용하고 있다)의 발전에 성공한 이래 레이저 가공기술의 진보는 놀라운 것이었다. 그러나 최초의 레이저인 루비 레이저는 안정성, 발전반복주기 등 여러 문제를 갖고 있었다. 그런 이유로 오늘날과 같이 광범위에 걸쳐 생산 현장에 적용되기 위해서는 레이저 장치의 안정화, 다른 아닌 Nd:YAG 레이저(일반적으로 YAG 레이저라고 쓴다)와 CO<sub>2</sub> 레이저의 개발이 큰 요인이 되었다. 물론 가공기로서 이용하기 위해서는 고출력화(고휘도화)나 발전 조건(펄스 폭이나 펄스 주파수)을 제어할 수 있는 것이 절대적이고, 이런 것을 포함한 장치가 진보해온 것이 중요하다.

현재, 정밀 가공에 사용되는 것은 YAG 레이저, CO<sub>2</sub> 레이저, 아르곤이온 레이저, 엑시마 레이저가 있다. 엑시마 레이저는 紫外光 레이저로 광양자 에너지는 분자의 결합 에너지와 거의 같다. 이를테면, C-C 결합은 4.6 eV, KrF 레이저의 광자 에너지는 5.0 eV로 직접 분자 결합에 작용할 수 있다.

아르곤이온 레이저는 출력 파워가 낮아 주로 반도체 재료의 레이저 원용 화학가공 등에 사용된다. 일반적으로 널리 쓰이고 있는 것은 YAG 레이저, CO<sub>2</sub> 레이저가 있다. 특히 YAG 레이저는 연속발전, 펄스발전, Q스위치 발전 등의 발전동작을 취한 것이 가능하고 고피크화가 가능하다. 그러므로 금속 등 비교적 열 전도율이 높은 재료에 대해서도 전도에 의해 열이 주위에 확산하는 것을 방지해 레이저광을 조사한 부분을 고온 상태로 만들어, 그곳에 용접, 증발을 일으키는 것이 가능하다. YAG 레이저광은 석영제의 파이버를 통해 임의의 위치까지 유도하는 것이 가능하다.

판재의 절단 등에는 고파워가 필요하기에 그 때에는 YAG 레이저와 같은 고체 레이저는 레이저 매질 내에 생기는 온도 확산에 의해 굴절률 분포가 불균형하게 되고 발전이 멀티모드가 되어 집광성이 나쁘다. 그러므로 이 파워 영

역(평균출력 1kw이상)에는 빔 품질은 CO<sub>2</sub> 레이저 쪽이 뛰어나다. 그러나 YAG 레이저는 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 발전 파장이 짧고 집광반경도 작게 할 수 있고, 고파워 밀도를 실현하기 쉬워 저파워로 가능한 미세 가공에 적용하고 있다.

더욱이 YAG 레이저의 에너지 효율의 향상, 結晶의 열외곡의 저감, 勵起源의 長壽命化, 장치의 소형화를 목적으로 한 LD(Laser Diode) 勵起固體 레이저 개발도 진행되고 있다. 이것은 레이저 발전기가 장치→ 부품→ 소자로 변화해가고 있는 것에 대응한 것이고, 레이저광에 의한 미세 가공의 적용범위가 한층 더 넓어지고 있다고도 생각된다.

## 9.3 전자빔 가공기술

전자빔에 의한 구멍내기(穿孔), 용접 기술이 개발된 것은 1950년대이다. 특히 원자력 관계의 특수한 금속의 용접 요구에 있어서의 용접, 용해, 천공, 증착 등의 실용화 연구가 시작되고, 용접을 중심으로 1960년대에는 방대한 데이터가 축적되었다. 또한 60년대 후반으로부터 전자빔 리소그라피 기술의 개발이 매우 빠르게 진행되었다. 전자빔의 적용 분야는 거의 레이저 가공과 같다. 그러나 전자빔 열가공이 실용적으로 이용되고 있는 것은 증착, 용접, 천공 등이 주체이다. 화학 반응에는 리소그라피, 큐어링(curing)이 있다.

電子는 외부로부터의 電磁界에 따라 용이하게 정밀 위치 제어가 가능하다. 이 특성을 이용해서 패턴을 描畵하는 것이 전자 빔 리소그라피이다. 뿐만 아니라, 이 리소그라피 기술을 이용해서 마이크로 머신의 제작도 시도되고 있다. 기계적인 가공에서는 불가능한 미소한 기구를 제작할 수 있다.

또한, CVD의 여기에 전자빔을 이용하는 것에 의해 미세 패턴이나 간단한 형상물을 기판 상에 퇴적(堆積)하는 것도 시도되고 있다. 이를 위해 가속 전압이나 전류는 낮아도 충분하다. SEM(주사형 전자현미경)을 이용하여 가공 장치로 하는 것이 가능하다. 저전류 전자빔의 경우 빔 지름을 10nm 정도까지 收束하는 것이 용이하기 때문에 매우 가는 堆積物을 제작할 수 있다.

## 9.4 자외선 레이저 가공의 특징과 적용

### 9.4.1 마이크로 가공, 고분자 재료에 적용되는 자외선 레이저 광원

가공용 레이저는, 赤外線域의 빔이 열에너지원으로 사용된다. 증발제거작용을 이용한 절단, 구멍뚫기, 마킹(marking), 스크라이빙, 용융작용을 이용한 용접, 表面肉盛, 그리고 열처리에는 표면경화, 어닐링 등의 응용이 있고, 이것들은 이미 생산라인에 실용되고 있다.

이것에 반하여, 紫外線域의 고출력을 얻는 엑시머레이저와 Nd:YAG 레이저의 第4高調波 출력을 이용한 가공이 실용화되고 있다. 파장 300nm이하의 레이저는 전자, 반도체 장비의 마이크로 가공, 특히 고분자의 가공, 레이저 의료 같은 분야에 응용되고 있다. 특히, 고분자 재료에 대응한 가공열의 영향이 작은 가공용 레이저 광원에 대하여 그 필요성이 높아지고 있다.

가공용 자외선 레이저와 기체 레이저는 펄스발진의 엑시머레이저가 알려져 있다. 엑시머레이저는 펄스폭이 20ns 정도로 작고, 펄스에너지가 높은 것이 특징이다. 가공에 사용될 경우 피가공물의 마스크 등을 이용한 대면적 照射로 처리하여 열영향이 작은 가공이 이루어진다. 이와는 달리 Nd:YAG 레이저에는 第4高調波(FHG)의 파장 266nm의 출력이 사용되어진다. 파장 1.06 $\mu$ m의 기본파로부터 2단계의 高調波變換 非線型結晶으로의 FHG출력을 얻는다.

펄스여기 Q 스위치 동작의 FHG-YAG 출력 파형은 비교적 짧은 펄스폭이 높은 피크파워의 출력이 얻어지고, 반복수(주기)가 50Hz 정도로 낮다. 한편, 連續勵起(CW), 초음파(AO) Q 스위치 동작 FHG-YAG 출력 펄스파형은 비교적 긴 펄스의 피크파워에는 비교적 낮고, 수 KHz의 고반복의 동작이 가능하다.

AO-Q 스위치 FHG-YAG 레이저는 저차발진 모드에 CW勵起 Nd:YAG 레이저를 기본으로 하고 꺾인 모형의 공진기내에 비선형결정 LBO를 배치한 것과 같이, 램프입력 3.4Kw에 평균출력10w 이상의 SHG 출력을 얻는다. 공진기에는 3장의 거울로 구성된 L자형 공진기를 사용하고 있다. 고효율과 동시에 안정된 SHG를 실현하기 위해, 광학

적 온도계수를 무시할 수 없었으며 결정 온도제어를 행하고, 출력안정화를 이룬다. FHG출력은 공진기의 외부에 BBO를 설치하고 파장변환해서 얻는다. FHG 평균출력은 반복주기 4KHz에, 1.7W의 최대치를 얻는다. 펄스에너지는 주파수가 낮을수록 높고, 펄스폭은 좁아 약 100ns 정도이다.

엑시머레이저는 엑시머라고 불리우는 여기상태로 형성하고 준안정상태의 화합물을 이용한 가스레이저의 일종이다. 시판되는 엑시머레이저는 희 가스원자(Ar, Kr, Xe)와 할로젠 원자(Cl, F)로부터 생기는 희가스 할로젠 엑시머레이저이다.

F<sub>2</sub>레이저(158nm)는 엑시머레이저와 유사한 레이저고, 펄스방전으로 여기한 펄스발진 레이저이다. 가스압력이 대기압보다 높고, 횡여기방향이 이용되어진다.

빔단면형상은 방전방향으로 긴 장방형을 하고 있다. 방전가스는 화학적으로 활성화한 할로젠가스를 포함하고 있었으면서, 방전횟수를 거듭하거나 불순물이 혼입되면 레이저 발진 출력이 저하된다. 여기서 가스 순화재생장치를 사용한 장수명화가 이루어진다. 출력펄스에너지 수 mJ부터 3J 까지 평균출력은 200W 정도까지 실용화되고 있다. 시판되는 펄스 반복(주기)율은 500Hz 정도이다. 대형프로젝트의 연구개발에 가공 프로세스의 고속, 고능률, 고성능화를 향하고 최고출력 2kw, 최고주기 5khz의 기초발진기술이 개발된 예도 있다.

### 9.4.2 가공장치와 가공예

#### 9.4.2.1 자외선 빔 전송

광섬유 빔전송의 가능성은 가공시스템의 플렉시빌리티를 향상됨이 유효하다. 그러나 자외선 레이저에는 비전형 흡수손실과 같은 투과율의 저하가 Nd : YAG 레이저보다 크지만, 전송거리에 한계가 있다.

자외선용으로 개발된 OH기를 적게한 UV 글레이드 석영 파이버를 사용한 FHG-Nd : YAG 레이저의 투과특성을 실험한 결과 코어系 0.6mm, 길이 5m의 것으로, 入射端에 10mJ/cm<sup>2</sup>의 플루언스(fluence)에는 투과율이 70%로, 100mJ/cm<sup>2</sup>에는 투과율이 20%로 플루언스의 증가에 따라, 급격히 저하된다. KrF레이저는 더욱이 투과율이 낮



다. 이것은 KrF레이저의 피크치가 크기 때문이다. 따라서 파워밀도를 낮은 조건으로 전송하려면, 대구경 광섬유를 사용하는 것이 유리하다.

전송의 파워밀도를 높이기 위하여는 가공물에 縮小結像光學界로 集光할 필요가 있으며, 집광점에 더욱 큰 집광심도를 얻게 되며, 파이버쪽의 입사조건을 낮은 NA조건으로 설계한 광학계로 전송파이버의 近軸光線을 사용하는 구성이 유효하다.

#### 9.4.2.2 가공방법, 광학계, 가공예

##### (1) 집광점에 의한 미세한 원형가공

FHG-Nd:YAG 레이저 출력은 發振橫모드가 단일 가우스분포의 發振強度分布이다. 그대로 빔 전체를 렌즈로 집광하고 원형초점을 얻어 미세한 원형의 가공을 할 수 있다. 한편 엑시머레이저 빔의 강도분포는 통상단면의 XY 방향 특성이 다르기 때문에, 빔을 그대로 집광해 쓰는 것보다 목적의 가공구멍에 斷面形狀을 갖는 마스크등의 일종의 開口를 통과시켜 開口形狀을 통과한 광선으로 가공물에 開口像을 투영하고, 그 부분을 가공하여 목적의 形狀을 얻는다. 원형이나 異形구멍의 가공에도 사용된다.

FHG -Nd:YAG 레이저로 가공점으로 에너지 밀도  $20\text{J}/\text{cm}^2$ , 반복수 1 KHz의 소다유리를 가공하는 경우에는 입사경  $30\mu\text{m}/\mu\text{m}/\mu\text{m}$ , 깊이 4nm의 구멍을 가공할 수 있다. 가공물 표면부근의 구멍내벽에 반사된 빔이 깊은 곳으로 전파되어 가늘고 깊은 가공이 이루어진다. 이 때, 최대 가공깊이는 입사 파워 밀도가 일정한 조건에서는, 평균파워의 크기 조건, 또 반복 주파수가 큰 출력 쪽이 최대 도달 깊이가 큰 결과를 얻을 수 있다.

KrF 엑시머레이저도, 펄스 반복수(주기)가 높은 조건 쪽이 1펄스당 가공깊이가 커진다. 그러나, 소오다유리 가공에는 에너지가 너무 높고, 가공충격이 커서, 마이크로크랙이 관찰되며, 실용상으로는 파워를 낮추고, 조사파워밀도를 조절하는 등의 조건설정이 필요하다. 미세가공용의 고해상도 結像에는 석영계 렌즈외에 슈발츠실드 형의 대물렌즈를 사용하고, 마스크를 대신해서 가변아파처의(apparcher) 형상을 축소투영하는 광학계가 사용되며, 축소배율 74배의 대물광학계로  $0.8\mu\text{m}$ 의 最小像이 얻어진다.

##### (2) 패턴 마스크 2차원 가공

엑시머레이저 출력에너지는 FHG: YAG 레이저 출력보다 크고, 대면적 일괄가공으로 적합하다. 마스크 패턴에 단면적이 큰 균일 강도의 빔을 비추고, 그 마스크 패턴투과 빔을 가공 대상물에 결상조사하여 가공하는 것이 가능하다. 미세한 패턴 가공에 있어서는 광학계의 결상성능이 영향을 준다.

가공 정도는 집광 광학계의 NA(렌즈의 開口數)에 반비례하고, 파장에 비례한다. 따라서 엑시머레이저와 같은 단파장 레이저는 미세가공이 유리하다. 한편 초점심도는 NA의 2승에 반비례한다. 집광광학계의 NA는 작은 쪽이 초점심도는 크며 집광점 초점 지름은 크고 像의 예지는 흐려진다.

大面積走査投影轉寫加工法이라고 불리우는 방법이 있는데, 이것은 패턴 전면적을 일괄 투영전사하여 가공하는 것은 빔에너지가 부족할 경우, 패턴의 일부분마다 빔을 비추고, 가공 표면을 부분적으로 가공하는 반면, 마스크와 가공물을 광학적으로 동기 주사하여 넓은 면적을 가공하는 방법이다.

##### (3) 고분자 재료의 가공

폴리머의 미세 가공은 자외선 레이저 주가공대상으로 되고 있으며, 폴리이미드, PET, PMMA 등도 연구되고 있다. 적외선 레이저는 물질의 진동이 레이저광에 의해 활발해지고, 이때 발생하는 열로 가공을 한다. 그에 반하여 엑시머 레이저 가공은 직접 레이저 광에 의해 물질의 화학 결합을 절단하는 비열가공작용이 수반된다.

전자 부품에 이용되는 폴리이미드는 XeCL, KrF 등의 엑시머레이저로 가공이 가능하고, 에너지 밀도는 약  $1\text{J}/\text{cm}^2$  로 깊이 방향의 가공속도는  $0.3\sim\sim 0.4\mu\text{m}/\text{펄스}$  이다. 폴리이미드 필름의 어브레이션 가공에는 XeCL, KrF의 파장은  $1\text{J}/\text{cm}^2$ 의 에너지 밀도로  $0.4\mu\text{m}/\text{펄스}$ 의 깊이 방향의 속도가 얻어지나, ArF 레이저는  $0.15\mu\text{m}$ 정도이다. ArF 엑시머 레이저를 사용하면 어브레이션에 의해 PMMA의 에칭속도의 값이 시료흡수 계수의 차에 따라 어브레이션이 일어나는 한계치는 조금은 달라지지만, 그 한계치는  $0.1\text{J}/\text{cm}^2$  이하이다.

폴리이미드의 가공에서 가공부의 절연성이 문제가 되는

경우는, 가공 주변부의 탄소가 부착되는 경우가 있기 때문에, 가공후 알코올로 소독하고 초음파로 세정하는 것이 필요하다. 실험적으로는 헬륨가스로 불면서 어브레이션가공을 하면 탄소의 부착량을 격감시키는 것이 가능하다. 한편 Ar 가스를 이용하면 오히려 증가한다. 헬륨가스는 가공속도에는 영향을 주지 않으면서 탄소부착현상의 발생저감에 는 효과가 있다.

에너지 밀도는 800mJ로 반복수는 1Hz로 하고, Cu 폴리이미드의 플렉시블 기판을 패턴마스크 전사법으로 가공하면, 에지의 미세가공이 가능하다.

다른 용도로는 銅線의 폴리우레탄 피복의 면상에 조사하여 피복을 제거시키는 와이어스트리핑, 銅基板위에 폴리이미드 슬릿가공, 실화 규소 세라믹의 홈가공, 플러머 와이어에 패턴 전사법에 의한 마킹, 폴리카보네이트, 카프톤, 지르코니아, 頭髮, 유리에폭시 기판과 銅箔의 복합재등에의 어브레이션 가공, 기판의 폴리이미드性 絶緣層의 작은 관통구멍뚫기, 잉크젯 프린터의 노즐의 구멍뚫기, 의료용분야의 카테테로 이용되는 광섬유의 관통구멍가공, 塗裝面의 선택적 제거 가공 등의 실용화가 시작되고 있다.

#### (4) 3차원 가공

자외선레이저에 의한 어브레이션 제거가공에는, 펄스당 가공깊이가 일정하기 때문에, 펄스수로 가공깊이의 제어가 가능하다. 따라서 조사위치를 XY 평면과 원통좌표로 제어하면 목표가공깊이에 비례한 펄스수를 조사하는 것으로 3차원 가공형상을 얻는 것이 가능해진다.

#### (5) 表面改質

엑시머 레이저로 표면을 露光하면, 세라믹스와 플러머의 표면 개질이 관찰된다. PVC 1.06J/cm<sup>2</sup>의 플루언스로 ArF 레이저광을 조사하면 표면부터 평탄하게 제거되지만 0.11J/cm<sup>2</sup>의 조사 조건으로는 표면에 많은 원추형 돌기가 형성된다. PET, PVDF, PEEK 등은 수 $\mu$ m의 미세한 결정립을 포함하고 있다. 이 결정 부분은 주변의 비정질의 저밀도 부분보다 에칭율이 낮기 때문에 돌기가 생긴다. 플루언스를 강화하면 평탄한 에칭은 가능하지만, 일단 원추형 형상이 조사 표면에 형성되고, 斜面에의 입사각이 커지기 때문에, 플루언스가 작아지고 그 원인으로 형상은 원추형으로 안정화 되어 진다. 폴리카보네이트(PC)는, 제조과정에

서 방향성을 갖는 응력이 잔류된 경우에는 표면에 파형의 요철이 형성된다. PVDF에 ArF 레이저를 조사하면 평탄면을 얻을 수 있지만, KrF 레이저는 아이스크림형태의 원추형 모양이 나온다. 폴리스틸렌 표면에 ArF를 조사하면 纖維毛와 같은 부드러운 표면이 형성된다.

#### (6) 接着性的 향상

강력한 접착력을 얻기 위해서는 표면에 맞물림 작용을 하여 요철형상이 있을 것이 필요하다. 플라즈마 에칭, 화학처리, 기계적 처리 등을 고려할 수 있지만, 표면 조직이 접합전에 약체화되어 접착력이 약해진다. 그것에 반하여 카본파이버의 에폭시 복합 구조재에 엑시머 레이저를 조사하면 에폭시材 만이 제거되고 카본파이버는 상하지 않은 상태로 남는다.

엑시머 레이저를 조사하면 크리닝작용이 있고, 표면을 세척함으로써 표면적이 증가하고 마찰계수를 증가시키는 것이 가능하다. 또 화학적으로 표면이 활성화하여 성분이 변화하고, 접착제의 접착력이 증가되는 것을 볼 수 있다.

#### (7) 表面親水性的의 증가

엑시머 레이저를 조사하면, 표면에서 탄화수소 오염층이 제거되고, 그 후의 화학적 활성인 층을, 조사 조건을 바꿈으로서 비활성화된 표면층으로 형성시킬 수 있다. 높은 플루언스의 빔을 조사하면 조건에 맞는 親水性 또는 發水性으로 변질된다. 예를 들면 폴리카보네이트에 KrF 레이저를 조사한다면 친수성을 증가할 수 있다. 이현상을 선택적인 페인트 도포나 색소의 부착장소제어에 사용할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 이 밖의 응용으로 가스분위기 안에서 성능, 에칭, 표면개질등의 연구도 이루어진다.

## 9.5 이온빔 가공기술의 개발

정밀기기부품의 이온빔 가공에 관한 연구는 강 및 초경합금 이온빔 가공과 다이아몬드 및 다이아몬드 공구의 이온빔 가공의 2가지로 분류할 수 있다. 이온빔가공(리액티브 이온빔 가공도 포함함)의 개략과 카우프만형 이온빔 가공장치등에 대하여 상술한 2 가지 항목에 대해서 그 개발경위 결과에 대해서 설명한다.

### 9.5.1 이온빔 가공에 대하여

이온빔 가공은 이온을 고체시료에 조사시켰을 때 시료의 구성원자가 시료 표면으로부터 진공중으로 방출되는 소위 스퍼터링(sputtering)현상을 이용해서 피가공물의 표면을 원자, 분자의 수준으로 조금씩 제거하는 가공법으로 다이아몬드와 초경합금 등 경취재료의 초정밀 미세가공에 극히 적합하다고 생각된다.

이온빔 가공특성중 가장 중요한 것은 스퍼터율  $S(\text{atoms/ion})$ 로서, 스퍼터율은 입사 이온수와 그것에 의해 스퍼터 되어진 원자 또는 분자와의 비로서 정의 한다. 그것은 피 가공 물질과 입사이온을 조합시켜 이온·에너지  $E(\text{eV})$  이온 입사각(피가공물에 들어간 법선과 입사 이온의 이론각)  $\theta$ , 피가공물의 절정방위 가공시 피가공물의 온도, 나아가서는 잔류가스중 산소농도 등에 의해 크게 달라진다. 여기서는 다이아몬드와 초경합금 금형등의 가공에 있어서 가장 중요한 인자인 스퍼터율  $S$ 의 이온 입사 의존성에 관하여 설명한다.

스퍼터율  $S$ 는 가공속도  $V(\mu\text{m}/\text{h})$ 에 의해 구해지고, 가공속도는 이온 입사각에 따라 변화된다. 아르곤 이온으로 다이아몬드를 가공하는 경우 이온입사각  $\theta$ 가  $0^\circ$  일 때 가공속도는 낮고 이온 입사각  $\theta$ 가 증가함에 따라서 점점 그것은 증가한다. 그러나 이온입사각  $\theta$ 가  $60^\circ$  전후를 넘으면 가공속도는 급격히 감소한다. 이것은 직관적으로 추측해서 얻어지는 바와 같이, 이온가공물의 표면에 수직으로 입사하는 것보다 비스듬히 입사하는 쪽이 가공물 표면부근에 이온으로부터 고정원자로 에너지 전이가 많게 되어 가공물표층의 원자가 스퍼터되기 쉬워지기 때문이다. 물론 이온이 가공물표면에 평행 가까이 입사되면 될수록 입사 이온중 가공물의 표면에 반사되는 것이 많게 되고 그 때문에 가공속도는 오히려 감소한다.

이에 대하여 산소이온으로 다이아몬드를 가공하는 경우 이온에너지가 낮아지면 가공속도는 이온입사각 증가와 함께 서서히 감소한다. 이것은, 이 경우의 가공이 주로 화학작용에 의한 것파, 실질적인 이온전류가 이온입사각 증가와 함께 감소하기 때문이다.

다이아몬드 이온빔 가공에 사용되어지는 카우프만형 이

온원을 구비한 이온빔 가공장치는 가공실 상부에 설치한 이온源에 아르곤가스(0.1 Pa 정도)를 주입해서 그 중에 직류방전을 행하여 Ar가스를 이온화하여 플라즈마 상태로 되게 하고, 거기서 3개의 정전 전극의 구멍을 통해 이온만을 인출하고 가속해서 가공실에 설치된 시료에 이것을 충돌시켜 가공을 행한다. 이 장치에는 반응성가스를 이용한 열전자 발생용 필라멘트(이것은 고온으로 되어서 가스와 반응하기 쉽게 된다)의 열화가 심하기 때문에 다이아몬드를 가공하기 위해서 산소 등 활성가스를 이용하는 경우에는 ECR형 이온 원을 구비한 이온빔 가공장치를 이용할 필요가 있다.

### 9.5.2 초경합금의 이온빔 가공

초미립자 초경합금을 시료로 이용함으로써, 다물질 표면 거칠기가 우수하고, 기공이 없는 표면을 얻을 수 있다. 최근에는 초경합금 금형이 이용되고 있는데, 여기에는 상술한 것 보다 미세한 패턴을 유리 등에 전사(轉寫)하는 기술도 요구되어지게 되었다. 이온빔 등을 이용해서 미세 패턴을 초경합금으로 전사하는 경우, 가공한 초경합금의 표면이 거칠어지는 것이 고려되어 지기 때문에, 초경합금의 표면에 귀금속성 경질막을 형성하여, 그 경질막에 미세 패턴을 전사하는 방법이 생각되어 지고 있다. 그러나, 귀금속성 경질막을 코팅한 초경합금을 이용하지 않더라도, 가공물에 회전 요동을 동시에 가하면서 초경합금을 가공하고, 평균 입자 지름의 미세한 초경합금을 선택해서, 직접 초경합금 상에 미세 패턴을 이온빔으로 전사하는 것도 가능하다고 생각된다. 거기에서, WC의 평균 입경이  $0.5\mu\text{m}$ 의 시료에 전자빔 노광법(露光法)에 의해 미세 hot-mask( $0.2\sim 10\mu\text{m}$ )를 형성해서, 그 초경합금 상에 초미세 패턴을 형성할 수 있다는 것이 알려졌지만, hot-mask의 내(耐)에칭성이 문제가 되었다. 더욱이, 최근에는 텅스텐 가는 선을 마스크로  $100\mu\text{m}$  전후의 패턴을 초경합금에 전사하는 방법 등도 검토되고 있다.

### 9.5.3 다이아몬드 및 다이아몬드 공구의 이온빔가공

이온빔 가공의 특징은, 높은 에너지를 가진 이온으로 가공물의 표면에서 그 구성 원자를 하나하나 탄성 충돌로 박

으로 두드려 빼내는 가공법이다. 따라서, 본 가공법은, 특히 수  $\mu\text{m}$ 의 패턴과 형상의 초미세 가공 혹은 다이아몬드 등의 경취 재료 가공에 적합한 것을 고려하여, 먼저 다이아몬드 가공 속도와 가공 거칠기 등의 이온빔 가공 특성에 관하여 검토해 본다.

이온빔 가공을 다이아몬드 공구의 가공에 적용하는 경우, 이온 충돌의 목적으로 생기는 시료 표면의 가공 변질층, 이른바 프로세스 誘起損傷이 문제가 된다. 또한, 가공실의 벽이나 가공대 등에서 스퍼터(sputter)된 물질이 가공물의 표면에 부착하는 재부착 등의 오염도 문제로 된다. 특히, 가공 시료에 비하여 큰 지름의 이온빔을 사용하는 경우에는 주의가 필요하다. 한편, 산소 등을 사용하는 반응성 이온빔 가공은, 화학적 작용으로 다이아몬드 가공이 진행되고, 유기 손상이 경감될 수 있는 것도 고려할 수 있다.

우선 문제가 되는 것은, 다이아몬드의 前加工이다. 일반적으로, 다이아몬드 가공은 Olive油에 研磨 다이아몬드 微粉末과 주철의 랩판을 사용하는 기계적인 연마를 하고 있다. 그러나, 연구실에는 다이아몬드 연마 전용기가 없었으므로, 투과형 전자 현미경 시료 작성용의 연마기로 다이아몬드 微粉末(입자지름 :  $0.5\sim 1\mu\text{m}$ )을 사용하고, 주철의 연마판에 흠이 만들어, 다이아몬드 시료의 표면을 다듬질할 수 있다. 이 방법으로, 다듬질한 다이아몬드 시료는, Kaufman형 이온원을 설치한 이온빔 가공 장치를 사용하여 가능하였다.

이온빔 가공에서 매우 중요한 스퍼터율(제거되는 원자의 수/조사되는 이온의 수)을 구하기 위해서는, 가공 깊이(未加工面과 加工面과의 단차는  $1\mu\text{m}$  이하)를 정도 높게 측정할 필요가 있다. 초고진공의 가공 장치(이온빔源, 전자빔源과 엑시머 레이저)와 평가 장치(오오제, Rheed, AFM 등)가 합체된 복합 빔가공·평가 장치 등에 의하면, 반응성 이온빔 가공 등의 가공 기구를 해명하는 것이 가능하다.

다이아몬드는 절연물이므로, 이온빔으로 가공하려면 가공물의 표면이 대전되어, 가공이 진행되지 않을 우려가 있으므로, 일반적으로는 이온빔과 거의 같은 양(절연물의 2차 전자 방출율에 따라 다르다)의 저속 전자선( $100\text{ eV}$  이하의 열전자)을 동시에 가공물에 조사시켜 대전(帶電)을 막는다. 그러나, 이 경우에 이온의 정(正)전하량과 전자의 부

(負)전하량의 차가 측정되지 않고, 더구나, 이온 전류와 저속 전자선 전류가 시간에 따라 변동하므로, 정확한 가공물에서의 이온 조사량을 구하는 것이 곤란하다.

더우기 실제로는, 이온빔의 중화(中和)를 행하지 않더라도, 다이아몬드의 표면이 이온 조사(照射)로 흑연화하여 전도성을 가지는 것, 가공대에서 날라 나오는 2차 전자가 다이아몬드 표면의 정전하를 중화시키는 것 등의 이유로 인하여, 중화를 수행하는 경우와 같은 가공 속도를 얻는 것이 가능하다. 그래서, 이온 전류를 정확하게 구하고, 보다 정확한 스퍼터율을 산출하기 위하여, 실험에서는, 이온빔의 전자빔에 의한 중화를 수행하지 않는다.

탄소가 지구상에 존재하는 물질 가운데 가장 낮은 스퍼터율을 가진 물질로서 알려져 있는데, 실제로 가공해 보면 다이아몬드의 가공 속도( $1\text{ keV}$ 의 Argon 이온으로 가공)는 실리콘의 그것의  $1/2$  정도로, 충분히 실용적인 가공 속도가 얻어진다는 것이 밝혀졌다. 마모된 비커스 압자 다이아몬드를 재연마하는 경우에 가공 시료인 다이아몬드 압자 날 끝 부분에 가공대 등으로부터 스퍼터시킨 원자가 부착하는, 이른바 재 부착이 문제되었다. 이 재부착이 발생한다면, 시료가 가공되지 않기도 하고, 가공되기도 하거나 하여 가공물의 표면 성상이 나빠지게 된다. 그래서, 이 재부착을 방지하는 방법을 여러 가지로 시험한 결과 원통형의 시료 홀더를 이용하여 가공하는 것으로 재 부착을 방지할 수 있었다.

일반적으로, 각종 재료의 가공 속도가 결정면 방위나 이온 입사각에 의존되므로, 이온빔으로 가공시킨, 강(鋼) 등의 다결정 재료의 표면은 거칠게 된다. 다시 말하면, 이 경우, 가공 속도가 이온 입사각에 의존하는 것은 결점으로 생각될 수 있다. 그러나, 다이아몬드 촉침 날끝의 先銳化에서 이 결점을 역으로 이용하게 된다.

이온빔은, 다이아몬드 공구의 날끝이나 절삭날을 예리하는 것 뿐만 아니라, 공구에 조사하는 이온의 입사각을 적당하게 선택하는 것에 의해, 다소의 形狀創成機能을 갖을 수 있게 되었다. 예를 들면, 다이아몬드 촉침(날끝이 球狀)에 회전과 요동을 동시에 가하면서 이온을 조사하는 것에 의해, 촉침의 날끝을 상사적으로 작아지게 하는 것이 가능하다. 또한, 초정밀 절삭용 다이아몬드 공구의 절삭날을 이온

빔으로 예리하게(날의 모서리부분 반경 : 20nm 전후) 한 후에, 이온을 경사면에 어떤 각도에 조사하는 것에 의해, 절삭날에 파세토(fasseto)를 형성하는 것이 가능하다.

에너지가 수십 eV 이상의 이온빔으로 단결정 다이아몬드를 가공하면, 반드시 조사 유기(照射 誘起) 損傷이 발생한다. 따라서, 조사 유기 손상이 일어나지 않도록 하든지, 혹은 일어난다고 하여도 다이아몬드공구와 절삭날의 절삭 성능에 영향을 미치지 않는 프로세스(플라즈마 가공이나 반응성 이온빔 가공 등)나 혹은 그러게 되는 가공 조건, 또는 이온빔 가공이나 반응성(reactive)이온빔 가공 등의 프로세스로 생긴 照射 損傷層을 제거하는 방법 등을 검토할 필요가 있다.

장래의 가공프로세스에는, 기계 연마, 빔 가공의 여하를 불문하고, 기계적(물리적) 작용과 화학적 작용을 어느 정도 복합시켜 행하는 것이 중요하고, 「화학적 작용」이 초정밀·

초미세 가공의 keyword로 되어 간다고 생각할 수 있다.

---

#### 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.
- (5) オプトメカトロニクス時代の超精密切削技術, 日本オプトメカトロニクス協會, 光技術コンタクト, 1991.