

광학소자가공방법(절삭②)

무전해 니켈 도금막의 초정밀 경면 절삭

프로젝션 TV, 비디오 카메라나 CD 등과 같은 전자 광학(Electro-optics) 제품 시장이 확대되고 있다. 이들 제품의 광학 부품을 소형경량화·고성능화·저가격화 하기 위해 각 제조업체에서 독자적인 비구면 가공 기술을 개발하고 있으며, 종전의 유리 렌즈에서 좀더 가벼운 플라스틱 렌즈로 이동하고 있다. 이 광학 부품들의 요구 정밀도는 형상 정밀도, 면 거칠기 모두 요구값이 높아지고 있으며 초정밀 비구면 경면 절삭 기술이 이용되고 있다. 본 고에서는 프로젝트 TV 및 비디오 카메라의 비구면 플라스틱용 금형을 대상으로 무전해 니켈 도금막의 초정밀 경면 절삭 기술에 대해 소개한다.

편집자 주

1. 실험방법

1.1 금형 가공의 개요

(1) 목표 사양

표 2는 대상이 되는 비구면 금형(入駒) 구조와 이들의 가공 정밀도 목표 사양을 나타낸 것이다. 프로젝트 TV용 금형의 입구는 비구면부가 접히는 부분이 있는 복잡한 형상으로 되어 있으며 비디오 카메라용 금형의 입구는 비구면 경사가 최대 35도로 크다는 점이 특징이다. 이렇게 복잡한 비구면 금형을 형상 정밀도 2 μ m, 면 거칠기 0.01 μ mRmax 이하로 가공하는 것을 목표로 한다.

(2) 가공법 비교

크롬 합금 스테인리스 공구강(HRC53)을 재질로 하는 금형재를 가공하는 방법으로는 표 3에 제시한 가공법을 생각할 수 있다.

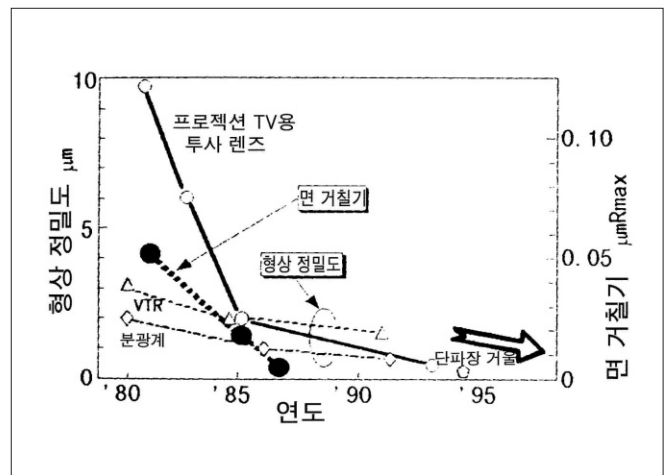


그림 1. 비구면 금형, 거울의 가공 정밀도

과거부터 실적이 있는 연삭에 의한 비구면 절삭의 경우에는

표 1. 광학 렌즈의 개요


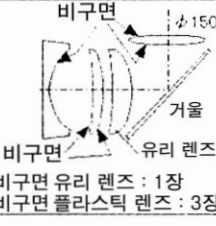
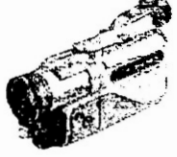
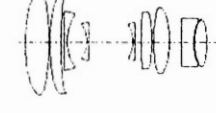
	제 품	광 학 계
프로젝션 TV		 <p>비구면 거울 유리 렌즈 비구면 유리 렌즈 : 1장 비구면 플라스틱 렌즈 : 3장</p>
VTR 카메라		 <p>비구면 카메라 렌즈 : 4장 비구면 플라스틱 렌즈 : 6장</p>

표 2. 금형 가공 정밀도의 목표 사양


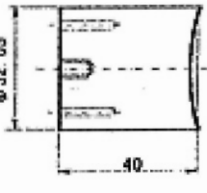
	프로젝션 TV용	VTR 카메라용
입구 구조 (대표 예)		
목: 형상 정밀도	2 μm	
표: 표면 거칠기	0.01 μmRmax	
사: 평탄도	0.3 μm/2 mm	
양: 가공 일수	3 일	

표 3. 금형 가공법의 비교

평가 항목	가공법	연삭	CBN 절삭	다이아몬드 절삭
가공면성상	형상 정밀도	2μm가 한계(기기 상 계측 보정 필요)	2μm가 한계(기기 상 계측 보정 필요)	≤1μm 가능
	표면 거칠기	0.6~1.0μmRmax 스크래치 다수 발생	≥0.2μmRmax 스크래치 없음	0.2μmRmax 가능 스크래치 없음
	평탄도	지식의 편마모, 지식 간섭에 의해 최대 2μm정도 발생	≤5μm	기계 정밀도에 따라 다르지만 ≤0.1μm 가능
	그 외	연마 가공에 대한 부담이 크다.	공구 수명이 매우 짧다.	
공정	(블랭크 NC 가공)→(열처리)→ (기준면 생성)→(NC 연삭)→(형상 계측) →(NC 연마)→(형상 계측)	왼쪽과 동일	(블랭크 NC 가공)→(열처리)→(기준면 생성)→(무전해 Ni 도금)→(NC 절삭) →(형상 계측)→(NC 연마)→(형상 계측)	
비용	스크래치를 제거하기 위해 연마 공수가 많이 필요함(긴 납기)	CBN 바이트 교환에 의한 준비 작업이 빈번해져 비용이 많이 소요됨	다이아 바이트 및 도금 경비 증대 절삭, 연마 공정이 대폭적으로 단축 가능	
종합 평가	X	△	○	

(i) 기기 상 계측 보정 기법을 이용해도 지식의 성형 정밀도나 편마모에 의한 2μm의 형상 정밀도 확보가 한계일 것으로 예측되고 가공면의 물결도 서브 마이크론 오더로 제어하는 것은 곤란하다.

(ii) 0.6~1.0μm 스크래치로 인해 면성상이 열화되는 것은 물론 이 스크래치를 없애기 위해 많은 연마 공수가 필요하다.

이상과 같은 문제를 비롯하여 납기면에서도 실용적이지 못할 것으로 판단된다.

한편, 끝 부분이 예리한 공구를 이용해 선삭하는 경우 기본적으로는 공구 형상 정밀도나 가공기의 운동 정밀도로 가공 정밀도가 정해진다. 이러한 면에서는 내마모성이 높은 CBN 공구나 다이아몬드 바이트를 이용한 절삭 가공이 유망하지만 크롬 합금 스테인리스 공구 강재를 서브 마이크론으로 절삭하기에는 아직 수명이 긴 단결정 CBN 공구가 개발되지 않았고³⁾ 또 다이아몬드 바이트로는 다이아몬드의 탄화를 제어하는 기술이 개발되지 않는 등 실용화 하기에는 아직 많은 기술 과제가 남아 있다.

표 4. 무전해 니켈 도금의 조성 및 성질

항 목		사 양
조성	Ni	90~92%
	P	8~10%
성질	비중	7.9
	용융 온도	890℃
	전기 저항	60 μΩ/cm/cm ²
	열팽창 계수	13×10 ⁻⁶ cm/cm/℃
	열전도도	0.0105~0.0135cal/cm/sec℃
	경도	도금 상태 550Hv 400℃ × 1Hr 열처리 700Hv

따라서 금형에 표 4와 같은 성질의 무전해 니켈 도금⁴⁾ (상표 : 카니켈 도금) 처리를 하고 다이아몬드 바이트로 절삭하는 것이 일반적이다. 이 도금은 도금 상태일 경우 완전한 비정질(非晶質)이며 결정 단차 등의 영향이 없고 좀더 양호한 절삭면 거칠기를 얻을 가능성이 있다.

표 5. 초정밀 비구면 가공기 사양

항 목	사 양
가공 가능 형상	평면, 볼록·오목 구면 및 비구면
동작범위	400mm
공작물 최대 중량	130kg f
주축 모터	2.2Kw/0.2Kw, 1500rpm
주축 베어링 방식	공기 정압 베어링 (강성 40kg f/ μ m)
구동 테이블	X, Z축 분리 안내
안내 방식	유정압 베어링(강성 50kg f/ μ m)
스트로크	X축 300mm, Z축 200mm
구동 방식	특수 삼각 나사+정압 조인트(이송 강성 70kg f/ μ m)
회전 테이블	유정압 베어링(강성 50kg f/ μ m)
안내 방식	
스트로크	120°
구동 방식	원판-롤러 마찰 구동, 차동 롤러 감속 모터
온도 제어	초정밀 부분 공조(0.1℃)

표 6. 절삭 제원

항 목	사 양
공 구	재료 : 단결정 천연 다이아몬드 날끝 : 노즈 R = 3mm, 날 경사각 = 0°
절삭 조건	주축 회전수 : N = 400rpm
	이송 : f = 20 μ m/rev
	절입 : d = 5 μ m
	절삭액 : 백등유 (A 솔벤트)

1.2 실험 장치 및 방법

여기에서 실험에 사용한 가공기는 비구면 금형 및 거울용으로 개발한 [초정밀 비구면 가공기]이다. 사양은 표 5와 같다.

본 가공기는 비구면 가공시 동시에 3축 제어로 처리할 수 있도록 되어 있지만 여기에서는 2축 제어로 표 6과 같은 절삭 제원에 따라 실험했다.

다이아몬드 공구는 필립스사 제품이며 절단면의 결정 방위는 (110)면이다. 주축 회전수(N=400rpm)는 공구 수명 및 가공기의 진동⁵⁾을 고려해 정했다.

또한 면 거칠기 측정에는 talysulf를 사용하고, 비구면 형상 정밀도 측정에는 삼차원 측정기(ZEISS사 제품 UMM500)를 이용했다. 또 평탄도 측정에는 면 경사에 따라 talysulf와 로터리 talysulf를 구분해 사용했다.

2. 검토결과

2.1 절삭면 성상

원판상 금형 소재(직경 60mm)의 평면에 무전해 니켈 도금을 하고 다이아몬드 바이트를 이용해 경면 절삭했을 때의 절삭면 거칠기

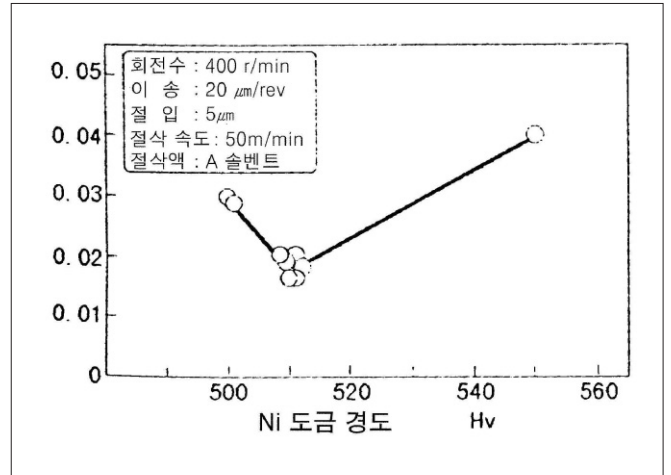


그림 2. Ni 도금 경도와 절삭면 거칠기

표 7. Ni 도금 경도와 가공면 성상

경도	가공면 사진	단면 곡선
490		
515		
550		

는 그림 2, 절삭면의 미분 현미경 관찰 결과 및 단면 형상은 표 7과 같다. 이 데이터는 도금 후에 하는 열처리 조건을 바꿔 얻을 수 있는 3종류의 경도(Hv = 490, 515, 510)의 도금면을 절삭한 결과이다. 또한 본 실험 조건에서의 이론적인 면 거칠기는 0.017 μ mRmax이다. 이 실험 결과에서 알 수 있는 사실은 다음과 같다.

- (1) 경도 Hv = 515의 무전해 니켈 도금면의 경우 공구 날끝 형상이 높은 정밀도로 가공면에 전사되어 있고 이론적인 면 거칠기와 거의 같은 절삭면 거칠기(0.02 μ mRmax)를 얻을 수 있다. 또 절삭면 전면에 걸쳐 일정한 절삭면 거칠기를 얻을 수 있다.
- (2) 이에 반해 Hv=490 및 550의 도금면은 공구 날끝 형상의 전사 정밀도가 좋지 않고 특히 Hv = 490일 때는 절입 변동에 기인하는 것으로 보이는 간격이 같지 않은 피치의 피드 마크가 가공면에서 관찰된다.
- (3) Hv =550의 도금면에서는 절삭 방향과 직각 방향으로 수많은 짧은 선이 관찰된다.

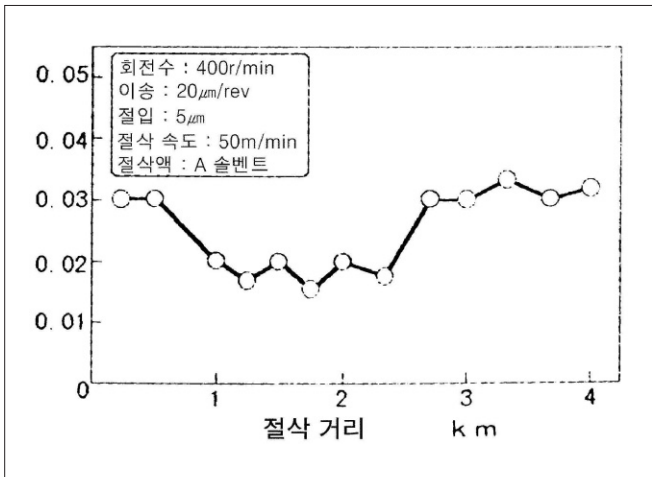


그림 3. 절삭 거리와 절삭면 거칠기

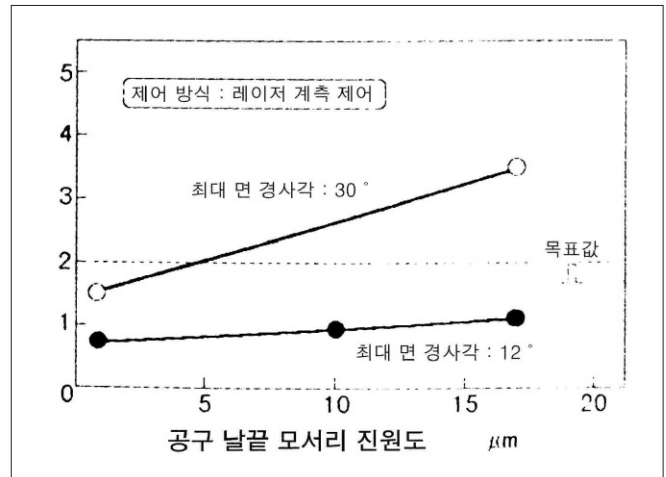


그림 4. 공구 날 끝 모서리 진원도와 가공 형상 정밀도의 관계

위 (3)의 선의 발생 원인은 절삭 가공에서 생기는 연삭 균열이 연삭 방향과 직각 방향으로 발생하는 것과 같은 이유에 의한 것으로 추정된다. 즉 절삭시 압축 응력 상태에서 절삭되고, 가공 후 가공 표면에 인장 응력이 작용해 마이크로 크랙이 절삭 표면에 생기는 것으로 추정된다. 이 마이크로 크랙은 축침식 면 조도계로는 검출할 수 없을 정도로 작은 것인데 금형 기계상의 문제일 것으로 보인다. 이러한 상태에서는 절삭면 거칠기도 좋지 않다. 즉,

- (i) 금형 표면상의 이 선은 성형한 렌즈의 표면에 전사되어 성형 표면을 불투명하게 하고
- (ii) 금형 표면상의 선을 기점으로 성형 시에 니켈층이 깨지거나 벗겨져 금형 수명을 단축할 우려가 있다.

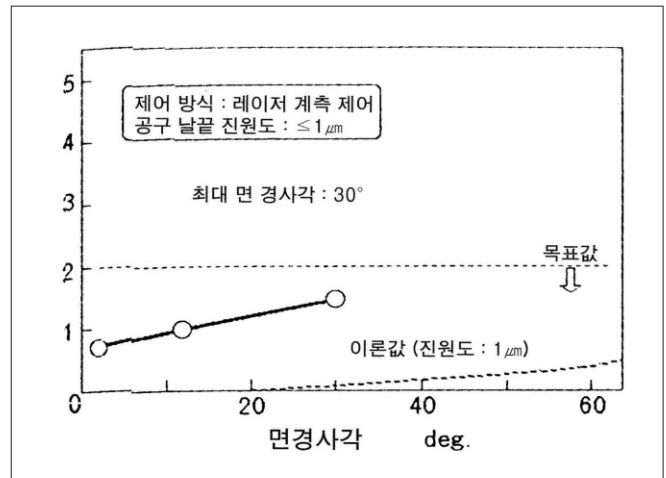


그림 5. 비구면 경사각과 가공 형상 정밀도의 관계

이와 관련해 금형 경도가 높은 쪽이 금형의 수명이 길 것이라는 관점에서 니켈 도금 후 300℃, 2Hr로 열처리하여 경도를 Hv=700으로 높인 금형의 경우 절삭하기 이전의 도금면에도 명료한 크랙이 많이 관찰돼 금형 기능상 경면 절삭을 단념했다. 즉 니켈 도금층의 경도가 높을수록 잘 부서지기 때문에 열응력에 기인하는 것으로 보이는 크랙이 생기기 쉬운 점, 또 그다지 경도가 높지 않아도 금형 모재와 니켈 도금층 사이에 열처리 경화 시의 열응력이 잔류 응력으로 잔존하기 때문에 절삭 가공을 하면 절삭력 혹은 절삭 열에 의해 절삭면에 크랙이 발생하는 것으로 보인다. 따라서 플라스틱 금형으로서의 기능 상, 경도는 Hv=550 이상 필요할 것으로 추측되기 때문에 경도가 높으면서 크랙이 생기지 않는 도금 조건 및 열처리 조건, 무전해 니켈 도금에 적합한 금형 모재를 이용하는 것이 중요하다.

그림 3은 절삭 거리에 대한 절삭면 거칠기의 추이를 나타낸 것이다. 절삭 초기에는 다소 면 거칠기가 좋지 않지만 절삭이 진행됨에 따라 절삭면 거칠기는 향상된다. 게다가 절삭을 계속 진행하면 절삭 거리가 2.5km를 넘는 부근부터 다시 절삭면 거칠기

가 열화된다.

절삭 거리 L은

$$L = n(n + 1)\pi f$$

이며, 여기에서

n : 절삭 종료까지의 작업물 총회전수

(= R/f, R: 작업물 반경)

f : 작업물 1회전 당 이송량

이다. 예를 들어 $\phi 60\text{mm}(R=30\text{mm})$ 의 작업물을 이송 $f=20\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 단면 절삭한 경우에는 절삭 거리 $L=135\text{m}$ 가 되고 그림 3에 나타낸 절삭 거리 2.5km는 작업물 단면을 18회 가로지르는 것에 해당하여 공구 수명을 실제 사용에 충분할 만큼 확보할 수 있다.

2.2 가공 형상 정밀도

각종 금형을 날끝 모서리 진원도가 다른 R 형상 다이아몬드 바이트로 가공했을 때 가공 형상 정밀도와와의 관계는 그림 4와 같다. 여기에서 대상으로 한 금형은 최대 비구면 경사각이 12°와 30°이다.

통상적으로 가공에서 문제가 되는 오차 요인으로는

- (1) 가공기의 운동 오차
- (2) 공구 날끝 모서리의 진원도
- (3) 공구 날끝 모서리의 노즈 R 판독 오차
- (4) 금형 회전 중심과 노즈 R 중심의 축심 편차 등이 있지만 여기에서는 (3) 및 (4)에 대해서는 보정 가공했다.

그림에서도 알 수 있듯이 공구 날끝 모서리 진원도가 나뉠수록 가공 형상 정밀도도 나빠진다. 이것은 2축 제어로 비구면 가공을 한 경우 금형을 절삭하는 공구 날끝 모서리의 접촉 부분 즉 절삭점이 이동해 공구 날끝 모서리의 형상이 가공면에 전사되기 때문이다.

비디오 카메라용 금형의 경우 비구면의 경사각은 최대 35°에 달하지만 이 경우 소용되는 가공 형상 정밀도 2 μ m를 확보하려면 날끝 모서리 진원도가 5 μ m 이내인 공구가 필요하다는 것을 알 수 있다. 또 프로젝션 TV용 금형처럼 최대 비구면 경사각이 10° 부근인 경우에는 날끝 모서리 진원도는 10 μ m 정도로 충분함을 알 수 있다.

날끝 모서리 진원도가 1 μ m인 공구를 이용해 비구면 가공한 경우의 비구면 경사각과 가공 형상 정밀도의 관계는 그림 5와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 기하학적으로 구한 이론값에 비해 먼 경사각 30°의 범위에서 0.6~1.3 μ m의 편차가 발생하지만 이 편차에는 앞에서 서술한 (1)의 운동 오차 외에 레이저 계측계의 불안정 요인이 포함되어 있는 것으로 보인다.

2.3 평탄도

비구면을 창성할 때의 윤곽 제어 정밀도를 보정하기 위한 가공기의 제어 방식으로 레이저 피드백 방식과 인코더 피드백 방식 2가지에 대해 검토하고 양자의 가공면에 발생하는 물결을 그림 6에 나타냈다. 전자는 레이저 측정기를 이용해 테이블 이동을 실측해 보정 제어하는 방식이고, 후자는 어미 나사(Lead Screw)를 끼워 테이블을 구동하는 구동 모터의 회전각을 검출하고 테이블 이동을 간접적으로 측정해 보정 제어하는 방식이다.

그림에서도 알 수 있듯이 가공면에는 0.1~0.2mm 파장과 1~2mm 파장 등 2종류의 물결이 발생한다. 이 중 1~2mm 파장의 물결은 제어 방식에 상관없이 0.08 μ m/2mm~0.12 μ m/1mm 범위에서 일정하다. 이것은 어미 나사(피치 2mm)의 흔들림 등 진행 방향에 직각(수평 방향)인 테이블 운동 오차, 즉 테이블 요

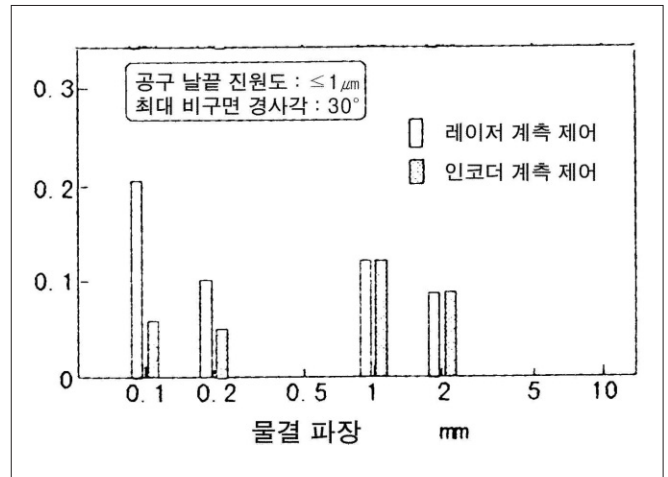


그림 6. 제어 방식에 따른 물결 비교

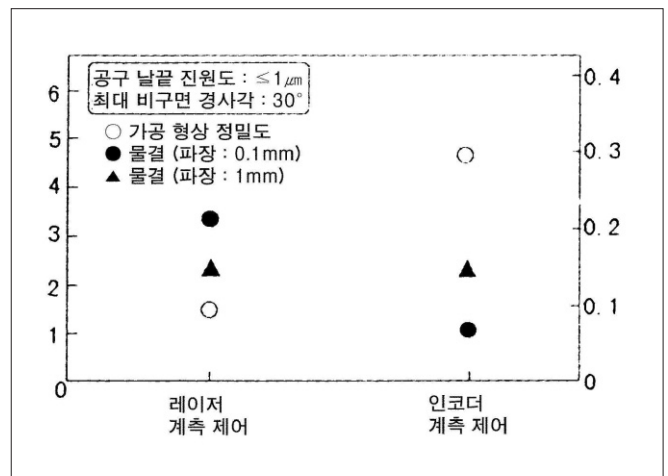


그림 7. 제어 방식의 가공 형상 정밀도, 물결에 미치는 영향

잉(Yawing)에 의한 오차이다. 이런 종류의 운동 오차는 레이저 측정기나 인코더 등 테이블 위치를 검출해 보정하는 피드백 방식으로는 측정이 불가능하기 때문에 운동 방식 자체를 향상시키든지 다른 검출·보정 수단을 마련할 필요가 있다.

한편 0.1~0.2mm 파장의 물결은 레이저 피드백 방식의 경우 0.1 μ m~0.2 μ m의 진폭에 달하지만 인코더 피드백 방식을 이용하여 0.05 μ m 진폭으로 낮추었다. 0.1mm의 파장은 비구면 제어 정보의 직선 보간 간격 0.1~0.15mm와 거의 일치하는지 확인했다. 그 결과 궤적 제어를 0.1~0.15mm 간격으로 하기 때문에 레이저 피드백 방식의 경우 이 사이의 오차가 크고, 연속하는 직선 보간이 매끄럽지 않다. 한편 인코더 피드백 방식에서는 구동 모터의 회전이 안정되어 있기 때문에 외견상으로는 궤적 오차가 거의 발생하지 않는다.

인코더 피드백 방식은 물결을 줄이는 데 적합한 방식이지만 그림 6에 나타난 대로 가공 형상 정밀도 면에서는 반드시 적합하다고 할 수 없어 제어 방식을 최적화하고 가공 형상 정밀도 향상과 미세한 물결을 줄이는 것이 중요하다.

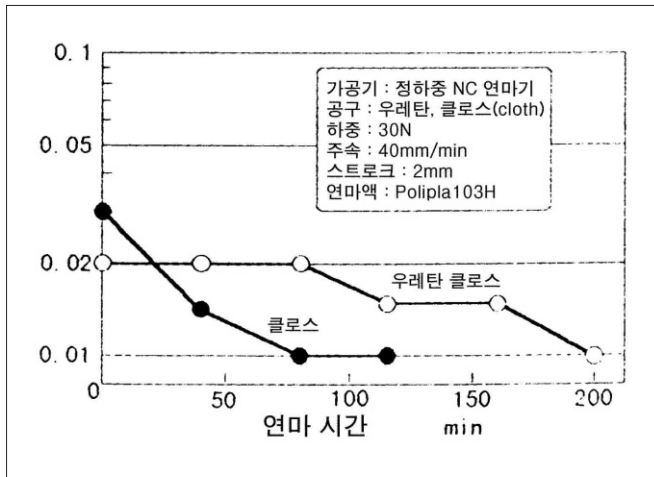


그림 8. 연마 시간과 연마면 거칠기

표 8. Ni 도금 금형 가공면

	가공면 사진	단면 곡선
절삭 후		
연마 후		

2.4 면 거칠기 향상 대책

오목면에서는 가공면의 최대 곡률보다 큰 곡률 (즉 좀더 작은 반경)의 공구, 볼록면에서는 가공면의 최대 곡률보다 작은 곡률의 공구를 이용하는 것이 필수 조건이다. 이 때문에 평면의 경면 절삭에 비해 곡면의 경면 절삭은 피드 마크가 절삭면에 남기 쉽고 면 거칠기의 저하를 초래한다. 여기에서는 절삭 후의 후공정으로 니켈 도금면을 연마하고 소요 면 거칠기 0.01 μ mRmax를 확보하기로 한다.

그림 8은 면 거칠기 0.03 μ mRmx에 비구면 절삭한 면을

- (1) 우레탄 패드로 연마한 후 크로스 로 연마
- (2) 크로스 로만 연마

등 2가지 방식에 따라 연마한 경우의 면 거칠기를 나타낸 것이다. 두 연마 방식 중 어느 것을 이용하든 150~200분 동안 연마하여 소요 면 거칠기 0.01 μ mRmax를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 표 8은 다듬질 가공 전의 절삭면 및 상기 (2)의 연마 방식에 의한 다듬질면에 대한 미분 간섭 현미경의 관찰 사진 및 단면 형상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 단시간에 공구 피드 마크가 사라지고 양호한 다듬질면을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

중전의 연삭·연마 금형 가공 공정에서는 제작에 약 1주일간의

준비 기간이 필요했지만 위에서 설명한 절삭·연마 공정을 채용함에 따라 약 0.5일로 단축할 수 있다.

또한 절삭에 있어서도 이송 피치를 작게 하는 등 가공 라인에서의 절삭 공정과 연마 공정의 총 비용이 최소화되는 최적의 가공법을 지향하는 것이 중요하다.

3. 맺음말

니켈 도금 금형을 비구면 렌즈용에 적용하기 위해 금형 제작상의 기술 과제인 니켈 도금면의 초정밀 경면 절삭에 대해 실험 검토한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 니켈 도금면의 절삭면 거칠기를 최소화하는 최적의 니켈면 경도가 존재하고 다이아몬드 공구의 마모는 작아, 직경이 작은 금형에 대한 소요 정도를 얻는 데는 거의 만족할 만한 공구 수명을 확보할 수 있다.
- (2) 절삭면 상에 1 또는 2mm 피치 및 0.1~0.15mm의 2종류의 미세한 물결이 존재하는데 전자는 테이블 구동용 리드나사의 흔들림에 기인하고, 후자는 위치 검출·피드백에 기인한다.
- (3) 절삭에 의한 피드 마크는 클로스(cloth) 또는 우레탄 패드와 클로스를 조합하여 연마함으로써 제거할 수 있고, 소요 다듬질면 거칠기는 0.01 μ mRmax를 확보할 수 있으며 중전의 연삭·연마 공정에 비해 가공 공수를 훨씬 단축(중전 대비 1/10)할 수 있다.

참고문헌

1. 石灰 외 : 최근의 고정밀도 플라스틱 광학 렌즈 (비구면) 개발과 성능 평가 : 제10회 고정밀도 플라스틱 광학 렌즈 개발과 성능 평가 기술 강연회 자료, 플라스틱 공업 기술 연구회 (1986.6).
2. 道正田 : 복합 비구면 렌즈 : Minolta Techno Report, No.2, 15-24(1985).
3. 西口隆 외 : 단결정 CBN 공구에 의한 철계통 재료의 정밀 절삭, 정밀 공학회지, 54, 2 (1988) 140.
4. 기술 자료 : 무전해 니켈 도금 - 카니젠법 - 일본 카니젠
5. S. Takasu et. al. : Influence of steady Vibration with Small Amplitude on Surface Roughness in Diamond Machining : Annals of the CIRP, 34, 1, (1985) 463.