

광학소자 가공방법(절삭③)

경취 재료의 초정밀 경면 가공

최근 실리콘 웨이퍼 등 취성 재료에 있어 표면 거칠기나 마이크로 크랙 등 표면 품질과 함께 형상 정밀도에 대한 요구가 높아지고 있다. 본 고에서는 경취 재료의 초정밀 가공으로서 광학 유리재를 대상으로 하여 다이아몬드 절삭에 의한 임계 절입 깊이를 실험적으로 조사한 결과와 메탈 본드 다이아몬드 지석을 이용한 초정밀 경면 절삭 기술에 대해 소개한다.

편집자 주

1. 머리말

최근 실리콘 웨이퍼 등 취성 재료에 있어 표면 거칠기나 마이크로 크랙 등 표면 품질과 함께 형상 정밀도에 대한 요구가 높아지고 있다¹⁾. 지금까지 취성 재료의 다듬질 가공으로 사용되어온 연마 가공은 형상 창성 능력이 낮고, 형상 정밀도를 향상시키기 위해서는 형상 측정·연마 가공의 프로세스를 반복할 필요가 있으며 소정의 형상 정밀도를 얻을 수 없는 경우도 많다.

이 때문에 압력 전사형인 형상 창성 정밀도에 한계가 있는 연마 가공이 아닌 운동 전사형 절삭, 연삭 가공을 다듬질 공정에 적용하고 취성 재료를 높은 형상 정밀도로 가공하려는 움직임이 있다. 이것을 실현하려면 고정 절삭날을 이용한 절삭 및 연삭 가공에 있어 가공 표면에 생기는 크랙을 억제하고 취성 재료를 연성 모드로 가공하는 것이 필수적이다.

연성 모드 가공을 실현시키기 위해서는 공구인 바이트 혹은 지립 절삭날과 피삭재의 실 간섭량을 연성·취성의 천이점인 임계

절입 깊이 이하로 항상 제어할 필요가 있다²⁾. 이를 위해 각종 미세 절입 절삭 조건 혹은 미세 지립 지석을 이용, 작용 지립수를 증가시킴으로써 각각의 지립 절입 깊이를 미세화하고, 취성 재료를 경면 가공한 예가 보고되고 있다^{3~9)}.

2. 광학유리의 초정밀 절삭

본 고에서는 유리재 절삭을 대상으로 하고, 임계 절입 깊이 즉 취성 파괴 절삭에서 소성 유동 절삭으로 옮겨가는 경계의 절입 깊이에 미치는 공구 날 경사각의 영향에 대해 소개한다.

2.1 실험 방법

그림 1은 절삭 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 사용한 가공 장치는 정면 선반 형식의 비구면 가공기이며, 같은 기기의 툴

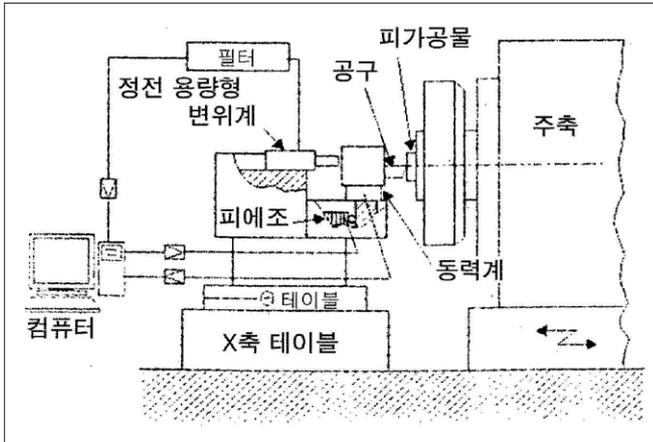


그림 1. 절삭 실험 장치 개략도

표 1. 실험 조건

시험에 사용한 재료	재질	광학 유리 (F2)
절삭 공구	형상	$\phi 30 \times 10$
	재질	단결정 천연 다이아몬드
	형상	원호 절삭날
	노즈 반경	1mm
	날 경사각	$-40^\circ -20^\circ 0^\circ 10^\circ$
회피각	5°	
주축 회전수	400r/min	
절삭유	없음	
절삭 방법	플랜지 컷	

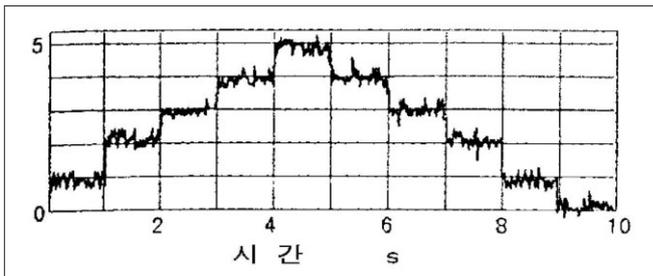


그림 2. 미세 절입 기구에 의한 스텝 이송(이송 스텝 : 1nm)

포스트에 森脇¹⁰⁾ 등의 논문과 유사한 피에조 구동 방식의 미동 기구를 설치하고 공구의 고속 미동 절입을 실시했다. 공구는 일체 절절 스프링 구조와 피에조로 구동되고 그 이동량은 공구 홀더 뒷면의 변위를 정전 용량 변이계로 측정했다. 임계 절입 깊이를 정확히 구하기 위해 절삭은 플랜지 컷 방식으로 하고 피가공재가 1회전하는 동안 공구의 절입·후퇴가 끝나도록 했다. 또 절입 깊이는 피가공재의 면 흔들림과 공구의 절입량에 따라 제어했다. 공구의 절입 제어에는 그림 1에 나타난 대로 컴퓨터를 사용했다. 표 1은 실험 조건을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 재료는 광학 유리 F2(경도 Hk \approx 500)이다. 공구는 단결정 다이아몬드 바이트 노즈 반경이 1mm이다. 날 경사각은 4종류로 나누었다. 절삭 속도는 약 0.5m/s이다.

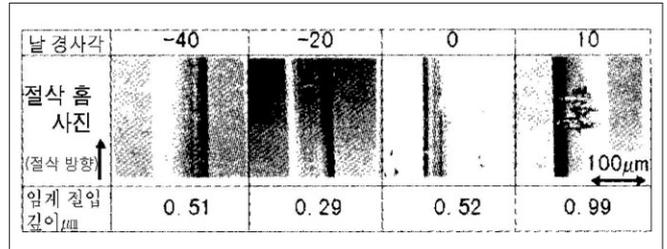


그림 3. 임계 절입 깊이 부근의 절삭 홈과 크랙 발생 상황

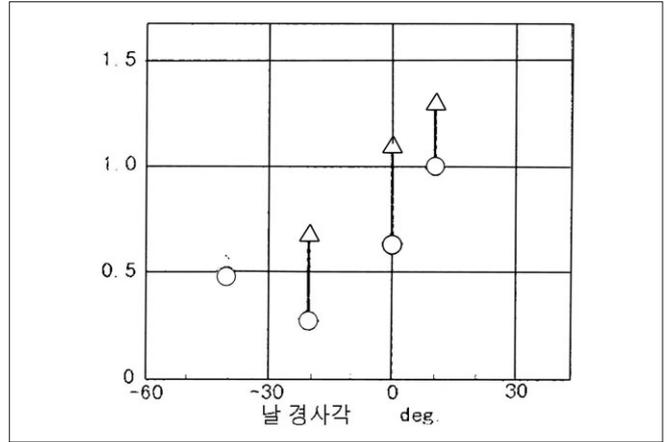


그림 4. 날 경사각의 임계 절입 깊이에 대한 영향

임계 절입 깊이 측정에는 비접촉 표면 조도계(WYKO사 TOPO-3D)를, 홈형상 측정에는 미분 간섭형 금속 현미경을 이용했다. 또 절삭분 관찰에는 SEM을 이용했다. 그림 2는 본 실험에 이용한 미세 절입 기구에 의한 1nm 스텝 이송 예를 나타낸 것이다. 이 기구 단독의 변위 피드백을 걸지 않은 상태에서 정강성은 20N/ μ m, 최대 응답 주파수는 500Hz이다. 또한 본 실험에서 절입이 1 μ m일 때 최대 배분력은 2N 정도로 예상되기 때문에 본 기구는 수 μ m 정도의 미세 절입 절삭에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 실험 결과와 검토

그림 3은 날 경사각 α 를 변화시켜 유리재(F2)를 절삭했을 때의 임계 절입 깊이 부근을 금속 현미경으로 본 사진이다. 그림 3의 아래쪽이 절삭 개시측으로 절입 깊이는 그림 위로 갈수록 깊어진다. 그림 3에서 $\alpha=10^\circ, 0^\circ$ 일 때는 취성 파괴 절삭·소성 유동 절삭의 천이점이 명료하지만 $-20^\circ, -40^\circ$ 일 때는 미세한 크랙이 관찰되는 정도이다. 그러나 $\alpha=-20^\circ, -40^\circ$ 일 경우에도 절입 깊이가 깊은 부분에서는 $\alpha=0^\circ$ 의 경우와 같은 크랙이 발생한다. 그림 3에서 날 경사각 10° 에서만 절삭 홈 폭 전체에 이르는 크랙이 발생하지만 날 경사각 $0 \sim 40^\circ$ 에서는 홈 폭 도중에 소멸된다. 또 $\alpha=0^\circ$ 에선 홈 아래부분에 박편상으로 박리한 듯한 변형이 보인다. 이것은 공구 통과 후에 잔류 응력 작용에 따

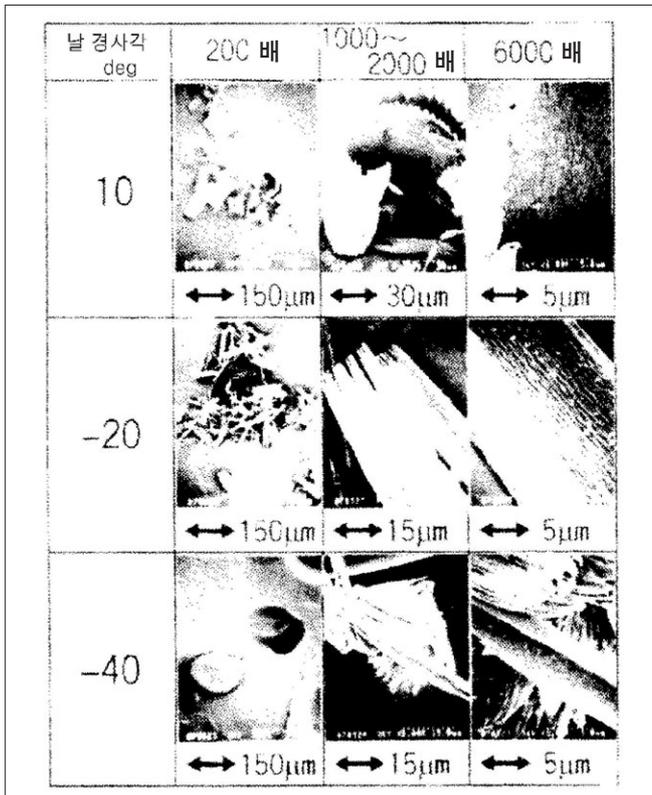


그림 5. 절삭분과 비교 사진

라 발생한 것으로 보인다.

그림 4는 날 경사각이 임계 절입 깊이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 날 경사각이 클수록 임계 절입 깊이가 δ_c 는 커지고, 날 경사각 10° 일 때 $1\mu\text{m}$ 정도가 된다.

그림 5는 $\alpha=10^\circ, -20^\circ, -40^\circ$ 일 때 절삭분의 SEM 사진이다. $\alpha=10^\circ$ 에서는 금속 재료의 절삭분과 같은 쉘 상의 절삭분이 보이지만 $\alpha=-10^\circ, -40^\circ$ 에서는 쉘의 크기가 작아진다. 어떤 절삭분 이든지 쉘 안쪽이 라메라상이 되고 바깥쪽이 매우 평활한 면이 된다. 쉘 바깥쪽 면은 공구와의 접촉면이다. 또 $\alpha=-40^\circ$ 의 절삭분 일부에 Cu의 초미세 절삭분과 유사한 형태도 관찰된다. 또한 그림 5의 절삭분은 가공 후 공구에 부착된 것을 관찰해서인지, 파쇄형의 절삭분은 관찰할 수 없었다.

2.3 맺음말

유리재 F2 절삭에서 임계 절입 깊이에 미치는 공구 날 경사각의 영향과 절삭분의 형태를 밝혔다.

3. 광학유리의 초정밀 경면 연삭 기술

본 고에서는 취성 재료의 연삭 가공에 의한 형상 정밀도 및 표면

거칠기의 고정밀도화를 목적으로 광학 유리를 연성 모드로 연삭 가공한 결과를 소개한다. 광학 유리의 경면 연삭에 미세 지립 지석을 이용한 경우 가공 중에 지립 탈락이 불가피하고 이 때문에 절삭날 위치가 변하여 지립 사이즈의 가공 치수 오차가 발생한다. 특히 탄성 계수가 작은 레지노이드 본드를 지석 결합체로 이용한 경우 지립에 연삭력이 작용하면 결합체가 탄성 변형하고 그 지립의 절입 깊이가 작아짐으로써 연성 모드 가공면을 비교적 얻기 쉽지만 탄성 변형의 영향에 따라 가공 치수 오차가 발생한다.

연삭 가공에서 이상적인 운동 전사를 하기 위해서는 연성 모드 연삭의 실현과 함께 가공 시 지립 탈락과 결합체의 탄성 변형을 제어할 필요가 있다.

한편 지립경을 크게 하고 지립 유지력과 지립 지지 강성이 높은 메탈 본드 지석을 이용하면 지립 탈락을 방지할 수 있고 결합체의 탄성 변형도 작게 할 수 있기 때문에 이상적인 운동 전사 원리를 기본으로 한 연삭이 가능한 것으로 추정된다. 그러나 이 경우에 연성 모드 연삭을 실현하기 위해서는 다음과 같은 지석 틀링 기술과 연삭반이 필요하다.

- (1) 지석의 외주 흔들림 등의 형상 오차를 수정하고 지립의 절삭날 높이를 맞춤으로써 지석 작업면 상의 많은 절삭날이 가공에 관여하는 절삭날 상태를 만드는 틀링 기술
- (2) 저진동으로 회전 정밀도가 높은 회전축과 미세한 절입이 가능한 테이블을 구비하고 공구·피삭재 사이의 강성을 높이는 초정밀 연삭반

전자에 비해 메탈 본드 다이아몬드 지석의 지립 절삭날 높이를 맞추는 틀링법이 중요하므로¹¹⁾ 다음에 틀링법에 대해 소개한다.

3.1 메탈 본드 다이아몬드 지석의 틀링법

메탈 본드 다이아몬드 지석의 지립 절삭날 높이를 매우 정밀하게 맞추기 위해 개발한 틀링법의 개념도는 그림 6과 같다. 연삭 지석 작업면 상에 있는 다이아몬드 지립의 절삭날 높이를 서브 마이크론의 정밀도로 맞추려면 다이아몬드 지립 자체를 고정밀도로 가공할 필요가 있다. 이 때문에 최초에 틀링 공구에도 다이아몬드 지석(여기서는 틀링 지석이라고 한다)을 이용, 컵형 지석 단면의 흔들림을 서브 마이크론 오더로 줄인다. 이 틀링법을 이하 [가공형 틀링]이라고 한다. 다음으로 전해 드레싱법을 이용하여 지립 절삭날 높이에 영향을 미치지 않고 결합체만 소정량 제거했다. 또한 지립 절삭날 높이를 고정밀도로 맞추기 위해서 컵형 지석 단면에 있는 지립 절삭날에 대해 다이아몬드 바이트의 다듬질 연마 기술을 응용하여 주철원반을 이용한 메카노케미컬 연마를 했다. 이 틀링법을 이하 [연마형 틀링]이라 한다. 이상의 3 공정으로 구성되는 틀링법을 이용하여 컵형 지석 단면의 지립 절삭날 높이를 서브 마이크론 오더로 만들기 위한 검토를 했다.

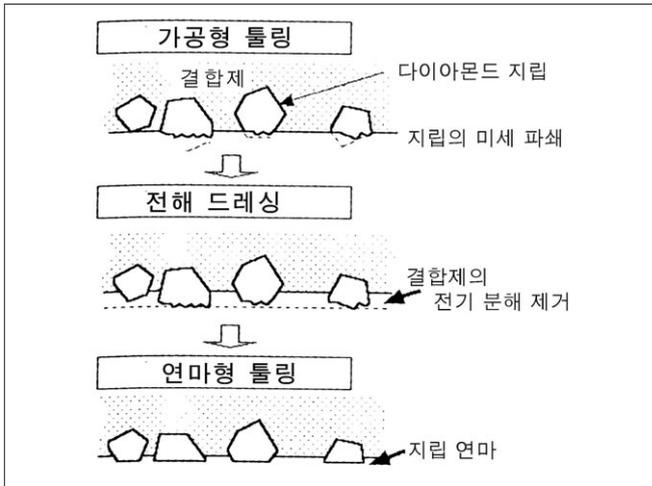


그림 6. 지석의 툴링법 개념도

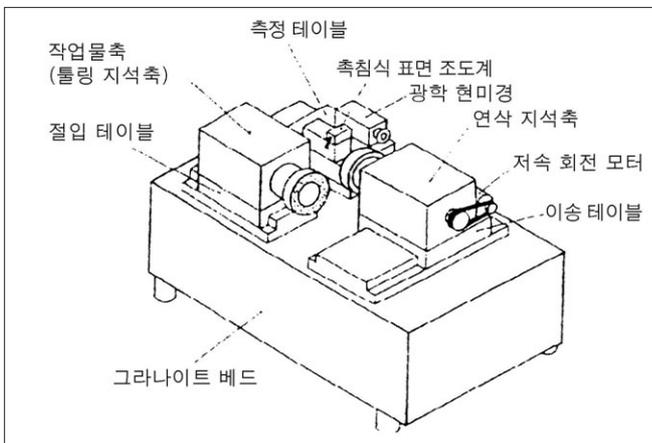


그림 7. 평면 연삭반 구조도

3.2 실험 방법

(1) 실험 장치

실험 장치로 상기의 툴링법을 기계 위에 적용할 수 있는 연삭반을 개발하고 실험에 사용한다. 그림 7은 그 구조, 표 2는 주요 사양을 나타낸 것이다.

연삭 지석축, 작업물축과 함께 같은 구조의 공기 정압 베어링을 사용하고, 작업물축은 툴링 지석축을 겸한다. 작업물축을 설치한 절입 테이블 및 연삭 지석축을 설치한 이송 테이블 구동에는 볼나사를 이용하고 그 안내 방식으로는 전자에 유정압 안내, 후자에 동압 안내를 이용한다.

이 연삭반에는 다음과 같은 특징이 있다.

- (i) 연삭력의 변화에 따른 지석·작업물 사이의 대상 위치 변화를 억제하고 동시에 가공형 툴링을 할 때와 작업물 가공 시에 생기는 큰 연삭력에 견디기 위해 연삭 지석축, 작업물축을 함께 정강성 1kN/μm로 강성을 높였다. 이와 같은 고강성화는 베어링부의 클리어런스를 최적화하고 공기 공급 압력을 1.3MPa

표 2. 평면 연삭반 사양

항 목	사 양
지석축 • 회전수 • 회전 정밀도 • 정강성	100~6000r/min 0.05μm 이하 1kN/μm
작업물축(툴링축) • 회전수 • 회전 정밀도 • 정강성	30~3000r/min 0.05μm 이하 1kN/μm
설정 절입 분해능(X축)	0.01μm
테이블 운동 정밀도(Y축)	0.05μm/100mm
지석축 측정 회전 • 회전수	0.1~0.001r/min

로 고압화함으로써 실현했다.

- (ii) 회전수 300~6000r/min의 고속 회전계와 달리 회전수 0.1~0.001r/min의 초저속 회전 구동계를 연삭 지석축에 추가하고 축침식 표면 조도계를 측정 테이블 위에 설치함으로써 툴링 후 연삭 지석의 지립 절삭날 높이를 기기 상에서 계측할 수 있게 했다.

또한 연삭 지석축, 작업물축의 축 방향 회전 정밀도는 각각 6000r/min, 3000r/min 이하의 회전수 범위에서 0.05μm 이하이다.

연삭 지석은 시판되는 컵형 메탈 본드 다이아몬드 지석(외경 160mm, 지석폭 2.0mm)인 SD400P100MM SD800P100M, SD1500P75M 3종류를 이용하여, 툴링 정밀도에 대해 검토했다. 또한 결합재 재질에는 전해 드레싱 시에 부도체 피막이 형성되는 경우가 없고 비교적 경도가 높은 Cu-Fe계를 이용했다.

(2) 툴링 실험

툴링 실험 순서는 그림 8, 툴링 조건은 표 3과 같다. 가공형 툴링의 경우, 작업물축에 입도 #200, 외경 160mm, 지석폭 2.5mm의 툴링용 컵형 메탈 본드 다이아몬드 지석을 설치하고 이에 따라 연삭 지석을 인피드 연삭했다. 또 비교하기 위한 입도 #200의 GC지석도 툴링 지석으로 이용했다.

전해 드레싱의 경우, 약 0.1mm 떨어진 연삭 지석·전극 사이에 화학 솔루션 타입의 연삭액을 넣고 연삭 지석과 전극 사이에 직류 전압을 인가해 결합제를 전기 분해·제거했다. 이 때 전류값을 1A로 일정하게 하고, 통전 시간 관리에 따라 제거량을 연삭 지석 평균 지립경의 1/3~1/4로 했다.

연마형 툴링의 경우, 주철 원반(FC20)을 툴링 지석 안쪽에 설치한 후 주철 원반과 다이아몬드 지석을 상대 슬립시키고 다이아몬드와 철과의 화학 반응을 이용해 지립 날끝을 미소량만 연마하여 지립 절삭날 높이를 맞췄다. 또한 주철 원반에는 다이아몬드 바이트의 연마 상태와 동일하게 미리 입경 1μm의 다이아몬드

▶▶▶ 지상 공개 강좌

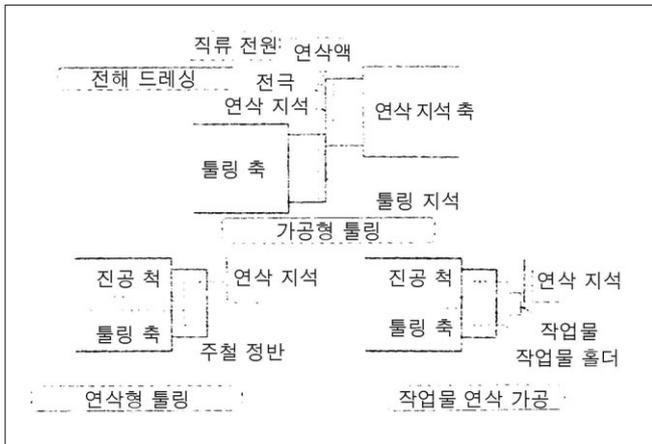


그림 8. 톨링 실험 순서

표 3. 톨링 조건

	가공형 톨링	전해 드레싱	연마형 톨링
공구	메탈 본드 다이아몬드 지석 SD200Q125M		주철 정반 (FC20)
연삭 지석축 회전수	300r/min	300r/min	300r/min
톨링축 회전수	2700r/min		2700r/min
절입 속도	1 μ m/min		1 μ m/min
스파크 아웃	0min		6min
전류값		1A	
드레싱 시간		2~10min	
가공액	JC 707	JC 707	랩액

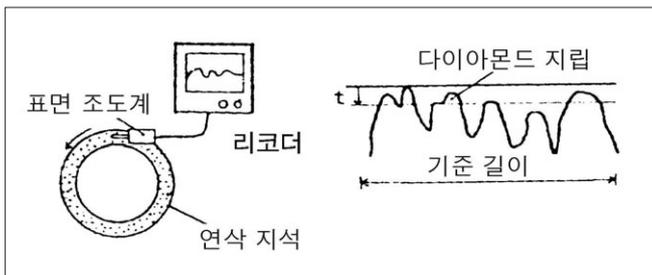


그림 9. 지립 절삭날 높이 측정법

페이스트를 미량 도포하여 고르게 편 상태에서 이용했다. 또 톨링 후의 연삭 지석에 대해 기기 상의 표면 조도계를 이용해 지립 절삭날 높이를 측정하고 결합제로부터 절삭날이 돌출된 정도 및 지립 절삭날 수를 평가했다. 지립 절삭날 높이 측정법은 그림 9와 같다. 측정법에 따라 연삭 지석의 단면을 원주 방향으로 일정 길이(약 10 mm)를 측정하고 그 가운데 가장 돌출된 절삭날의 선단을 기준(t=0)으로 임의의 깊이 t에 포함된 절삭날 수를 측정하고 이것을 단위 치수 당 지립 절삭날 수로 보았다. 측정에 이용한 측정 형상에 따라서는 지석 폭 방향의 많은 절삭날을 동시에 측정할 수도 있다. 여기에서 이용한 연삭 지석의 평균 지립경은 10~40 μ m이고 이것들을 지석 폭 방향으로 1개의 절삭날을 측정하기 위해 선단 반경 5 μ m, 폭 20 μ m의 측침을 이용했다. 이 측침을 연삭 지석에 접촉시키고 연삭 지석을 0.006r/min의

초저속으로 회전시키므로써 지석 원주 방향의 지립 절삭날 깊이를 측정했다.

(3) 연삭 가공 실험

가공 대상으로 직경 30mm, 두께 10mm의 광학 유리 BK7을 이용했다. 가공 실험에서는 톨링 지석 안쪽에 작업물 홀더로 고정된 BK7을 진공 척으로 작업물축에 설치하고, 인피드 연삭으로 평면 가공을 했다. 연삭 가공 후의 가공 정밀도는 측정식 표면 조도계(Nanostep : 랭크 테일러 흡슨사 제품)로 표면 거칠기를, 레이저 간섭계(ZYGO mark4 : ZYGO사 제품)로 평면도를 측정·평가했다.

3.3 실험 결과 및 고찰

(1) 톨링 정밀도

그림 10은 가공형 톨링 후의 입도 #1500 컵형 지석 단면의 흔들림을 측정한 예를 나타낸 것이다. 측정에는 직경 2mm의 구상 측침을 부착한 차동 트랜스형 변위계를 이용하고 10~30r/min으로 지석을 회전시켜 연삭 지석 단면의 흔들림을 측정했다. 가공형 톨링을 함으로써 단면의 흔들림을 0.2 μ m로 낮출 수 있다. 톨링 후 입도가 #1500인 연삭 지석 단면의 지립 절삭날 높이를 측정한 결과는 그림 11과 같다. 비교하기 위해 기존 방법인 GC

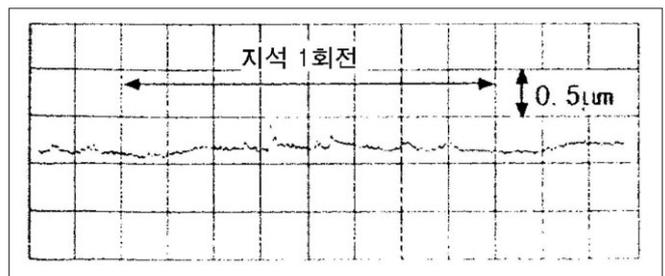


그림 10. 지석 단면 흔들림 측정 예

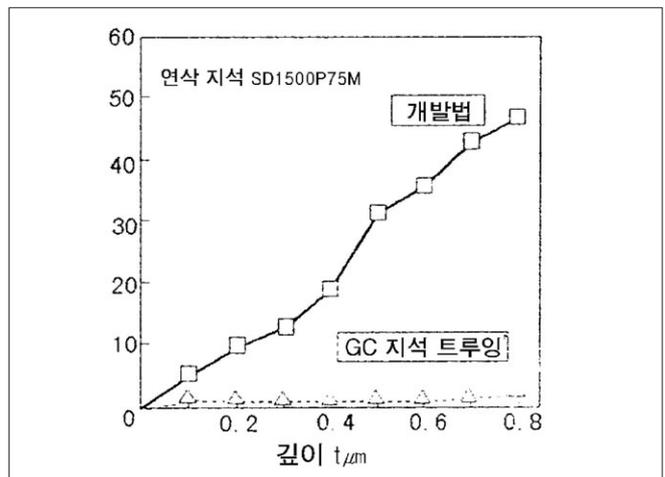


그림 11. 연삭 지석 단면의 지립 절삭날 높이 측정 결과



그림 12. 지석 표면의 SEM 관찰 사진 예

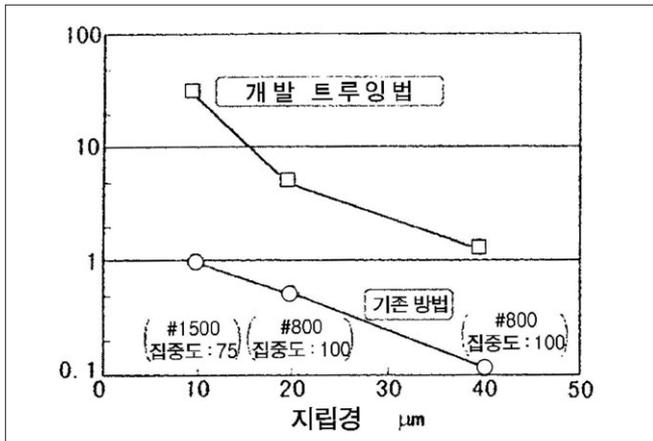


그림 13. 지립경과 지립 절삭날 수

#200 지석을 이용하여 틀링한 결과도 나타났다. $t = 0 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 영역에 포함된 지립 절삭날 수는 개발한 방법의 경우에는 32개가 되는 것에 비해 GC지석을 이용하여 틀링한 경우에는 다른 절삭날과 비교해 돌출량이 큰 절삭날이 흩어져 있기 때문에 1개가 됐다. 이 결과에 따라 칩형 지석의 경우, 개발한 틀링법에 의해 지립 절삭날 높이를 맞춘 지석 작업면을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 12는 상기 방법을 이용해 틀링한 메탈 본드 다이아몬드 지석(SD400P100M)의 표면 SEM 관찰 사진이다. 지석의 다이아몬드 절삭날 선단을 연마 가공함으로써 평탄화하고 지립 절삭날 높이를 매우 정밀하게 맞출 수 있음을 확인할 수 있다.

지금까지 절삭날 1개당 절입 깊이를 나타낸 지석의 절삭날 상태의 파라미터로서 연속 절삭날 간격이 이용되었는데 연속 절삭날 간격은 모두 절삭날 높이가 일정하게 이상화되어 있다. 이에 비

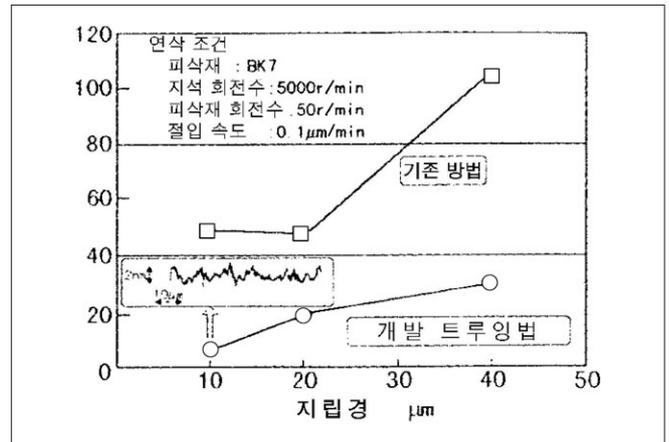


그림 14. 지립경과 연삭면 거칠기

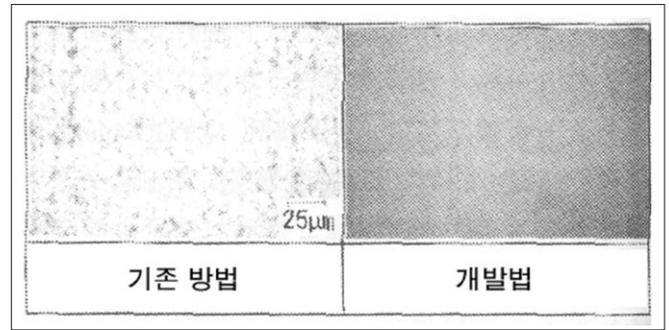


그림 15. 연삭면의 미분 간섭 현미경 사진

해 앞에서 서술한 깊이 t 에 포함된 지립 절삭날수는 절삭날 높이의 파라미터를 포함하고, 가공에 관여하는 절삭날수와 상관 있기 때문에 각각 절삭날의 절입 깊이를 나타내는 하나의 파라미터가 되는 것으로 생각된다. 따라서 다시 지립 절삭날수에 관한 검토를 했다. 지립경이 다른 연삭 지석을 틀링하고, $t=0 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 영역에 포함된 지립 절삭날수를 측정된 결과는 그림 13과 같다. 여기에서 연삭 지석의 집중도는 입도 #800, #400의 경우는 100, 입도 #1500의 경우는 75이다. 모든 지립경에 있어서 기존 방법보다 개발법 쪽이 지립 절삭날 개수가 1자리 높아져 개발한 방법의 경우 지립 절삭날 높이를 맞추는 효과가 있다고 할 수 있다.

(2) 광학 유리의 연삭 가공 결과

개발한 순서에 따라 그림 13과 같이 지립 절삭날 높이를 맞춘 틀링을 한 연삭 지석을 이용하여 광학 유리 BK 7을 연삭했다. 연삭면 표면 거칠기의 측정 결과는 그림 14와 같다. 이 중 입도 #1500 지석으로 연삭한 연삭면의 미분 간섭 현미경 사진은 그림 15와 같다. 중전의 틀링을 한 지석으로 BK7을 연삭한 경우에는 어떤 연삭 지석을 이용하더라도 미세한 크랙이 생기고 취성·연성 모드가 혼재하는 연삭면이 된다. 연삭 지석의 평균 지립경을 $40 \mu\text{m}$ 에서 $20 \mu\text{m}$ 및 $10 \mu\text{m}$ 로 작게 함으로써 표면 거칠기가 향상되지만 평균 지립경이 $20 \mu\text{m}$ 과 $10 \mu\text{m}$ 인 연삭 지석일 경우 표면 거칠

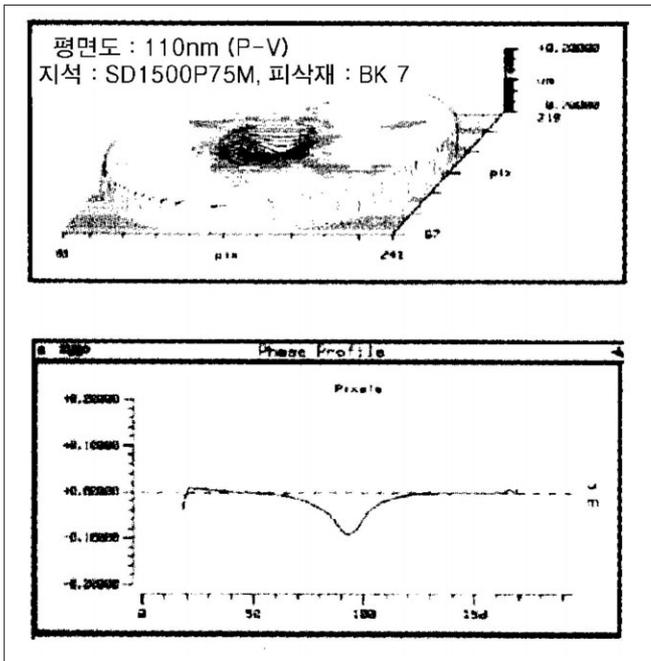


그림 16. 연삭면의 평면도 측정 예



그림 17. BK 7 연삭 가공 샘플 사진

기에 큰 차이가 없었다. 종전의 툴링법은 극단적으로 돌출된 절삭날이 흩어져 있기 때문에 가공에 관여하는 절삭날수가 적고, 이들 돌출된 절삭날로 인해 연삭면에 크랙이 생긴다고 할 수 있다. 그러나 연삭 지석의 평균 지립경을 $40\mu\text{m}$ 에서 $20\mu\text{m}$ 로 작게 하면 지립 절삭날수는 5배 증가하고 이것에 대응해 연삭면의 표면 거칠기가 크게 향상된다. 이에 비해 평균 지립경이 $20\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 인 지석의 경우는 BK7을 가공했을 때 표면 거칠기에 큰 차이가 없었던 것으로 생각된다.

이에 반해 개발한 툴링법은 연삭 지석의 지립 절삭날 높이를 맞출 수 있고, 입도가 #400~#1500일 때 표면 거칠기를 30nmRmax 이하로 할 수 있다. 특히 평균 지립경 $10\mu\text{m}$ 의 연삭 지석(입도 #1500)은 개발한 툴링법에 따라 $t = 0\sim 0.5\mu\text{m}$ 영역에 포함된 지립 절삭날수를 32개로 대폭 향상할 수 있기 때문에 크랙이 없는

연성 모드 연삭면을 얻을 수 있으며 표면 거칠기는 7nmRmax 가 된다.

개발한 툴링법을 적용한 입도 #1500의 컵형 메탈 본드 다이아몬드 지석을 이용하여 BK7을 연삭했을 때의 연삭면 평면도 측정 예는 그림 16과 같다. 탄성 변형하기 어려운 메탈 본드를 결합제로 사용하기 때문에 가공면에 늘어짐이 없고, 평면도 110nm (P-V)와 종전의 연삭 가공면과 비교해 약 1자리 높은 형상 정밀도를 얻을 수 있다.

또한 이 평면도 값은 작업물 회전 중심부에 있는 80nm 정도의 움푹 패인 곳에 크게 영향을 받고, 이 특이점을 없앴으로써 평면도를 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그림 17은 BK7의 연성 모드 연삭면 샘플을 나타낸 것이며, 연성 모드가 된 BK7의 표면은 투명해짐을 알 수 있다.

3.4 맺음말

이상과 같이 취성 재료의 연삭 가공의 경우 툴링을 이용하여 메탈 본드 지석의 지립 절삭날 높이를 맞추고, 큰 연삭력에 대처할 수 있는 고강성 연삭반을 이용함에 따라 형상 정밀도가 높아지는 것은 물론 표면 거칠기가 양호한 연삭면을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. 安永暢男: 각종 초정밀 가공법의 특징과 과제, 1993년도 지립 가공 학회 학술 강연 논문집, (1993) 1.
2. 宮下政和: 취성 재료의 연성 모드 연삭 가공 기술, 정밀 공학회지, 56, 5 (1990) 782.
3. H. Ohmori and T. Nakagawa: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing, Annals of the CIRP, 39, 1 (1990) 329.
4. 難波義治: 초정밀 평면 연삭반을 이용한 광학 유리의 연삭, 응용 기계 공학, 9 (1990) 115.
5. 阿部耕三, 安永暢男, 宮下政和, 吉岡潤一, 大東聖昌: 취성 재료의 초정밀 연삭 가공기술 연구, 정밀 공학회지, 59, 12 (1993) 1985.
6. 杉田忠彰 외: 정밀 공학회지, 52, 12 (1986) 144.
7. M. Miyashita: Ultraprecision in Manufacturing Engineering, (1989) 14, Springer-Verlag.
8. K. E. Puttick, et al.: Proc. R. Soc. Lond., A426 (1989), 19
9. C. K. Syn, et al.: ASPE/IPSE Conf. (1989)
10. 森脇俊道 외: 1988년도 정밀 공학회 춘기 대회 학술 강연회 논문집 377
11. 田村利夫, 山倉英雄, 田正美: 절삭날 선단을 연마 다듬질한 메탈 본드 다이아몬드 지석의 고정밀도 툴링, 정밀 공학회지, 59, 12 (1993) 1979.