

# 제 3 장 경면 연삭

## 1. 경면 연삭과 연삭 조건

종래의 경면 가공에서는 표면 거칠기만이 문제였지만, 최근에는 형상 정도까지 요구되는 경우가 많아졌다. 이것에 동반하여 종래 랩핑이나 폴리싱(POLISHING) 등 유리 저립 입자 법으로 행해지고 있었던 경면연삭을 스톤을 이용한 초정밀 경면연삭법으로 옮겨놓으려고 하는 경향이 두드러지게 되었다. 일반적으로 경면연삭은 극미세 알갱이 휠을 사용하여 행해진다. 그 때문에 저석 반경 절입량 $\Delta$ , 공작물 속도는 작은 조건으로 행해진다. 따라서 최대 저립 입자 돌진 깊이 gm, 저립 입자 절삭 1g은 함께 작아진다. 경면연삭을 성공키 위해서는, 이러한 저립 칼날의 동일조건을 만족시키는 주변장치, 환경이 필요하다. 예를 들면 연삭장치의 진동을 작게 할 필요가 있다. 그 때문에, 정압 휠축, 정압 안내면이 있는 연삭반이 이용된다. 또 휠의 정밀 트루잉, 드레싱을 기계상에서 실시하고, 그 후 동적 정밀 밸런싱을 실시할 필요가 있다. 연삭반의 작동유, 연삭액 등의 액체의 온도 관리, 연삭반 주위의 온도 관리, 방진대책도 중요하다. 이러한 환경을 정돈한 다음 연삭조건을 최적화를 실시할 필요가 있다.

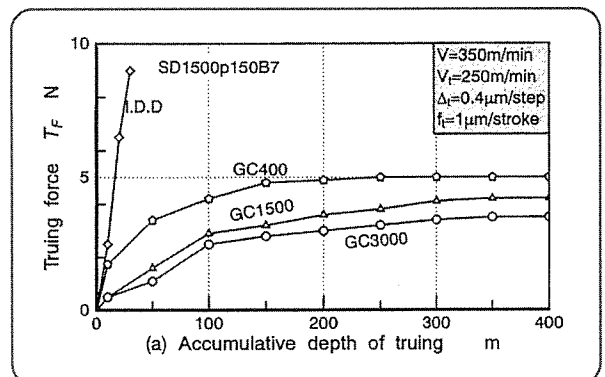


그림 1. Relationship between truing force and accumulative depth of truing

## 2. 극미세 알갱이 휠의 트루잉과 연삭 예

초정밀 경면연삭에서는 일반적으로 레진 본드의 초저립 입자 휠이 이용되는 경우가 많다. 하지만 이 경우 문제가 되는 것은 트루잉의 정도이다. 지금까지는

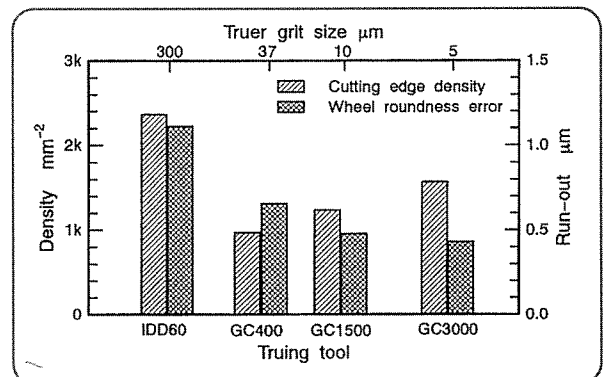


그림 2. Relationship between density and truing tool

연삭반의 고정밀화라고 하는 면에서는, 매우 많은 관심을 갖고 연구 또는 실시한 예가 보고되고 있다. 그러나 앞에서 소개한 정밀 트루잉, 드레싱에는 별로 주위를 기울이지 않은 듯 한 감이 있다. 휠은 초정밀 가공을 하기 위한 공구이기 때문에, 이것을 성형(트루잉)하는 기계도 정밀할 필요가 있다. 앞에서 소개한 캡 툴은 이 점을 고려해 설계되고 있기 때문에, 극미세 알갱이 휠의 트루잉에도 최적이다. 종래의 다이아몬드 공구를 이용한 트루잉에서는 트루잉 저항이 큰데다가 드레싱이 필요하기 때문에 요구되는 트루잉 정도를 확보할 수 없다. 캡 툴 법에서는 휠과 동일한 정도 혹은 한층 더 미립의 비트리파이드 GC 저석을 이용하는 것에 의해서, 레진 본드 극미세 알갱이 휠의 트루잉에 처음으로 성공했다. 그림 1은 종래에 사용되고 있던 인프리 드렛사 및 캡 툴로 SD1500N150B를 트루잉했을 때의 트루잉 저항을 비교한 결과이다. 인프리 드렛사의 경우는 절삭을 주어도 휠이 거의 제거되지 않고 트루잉 저항이 급증했다. 그에 대한 캡 툴의 경우는 트루잉 저항이 작고, 트루잉 양의 증가에 동반하여 어느 값에 포화한다. 게다가 그 값은 사용하는 GC 저석의 입도가 세해질 정도로 작아졌다.

그림 2는 각각의 트루잉 공구를 사용했을 때의 트루잉 정도(휠의 진원도) 및 단위 표면적 당의 저립 입자 밀도에 대해 조사한 결과이다. 그림 1에 나타내 보인 트루잉 저항이 큰 공구의 경우는, 다이아몬드 저립 입자의 탈락이 격렬하고, 휠 표면의 칼날 밀도가 드문드문하게 되는 경향이 있다(인프리 다이아몬드 드렛사의 경우는, 제거 능력이 없기 때문에 저립 입자 밀도는 커지지만, 저립 입자 돌출량이 거의 없다). 더욱이 공구 지지계의 진동에 의해, 트루잉 정도도 저하된다. 그 점에서 캡 툴은 GC 저석으로부터의 탈락 입자의 랩핑 작용으로 트루잉을 실시하기 위해, 트루잉 저항을 작게 할 수 있다. 트루잉 조건을 적절히 선택하면, 진원도 오차가 0.1 $\mu\text{m}$  이하의 고정밀도 트루잉이 생긴다. 매트릭스 타입의 조립 휠의 경우, 휠의 연삭성능은 주로 초기의 본드 베이스면으로부터의 저립 입자 내며, 양에 의해서 정해진다. 이것에 대해서 #1500 보다 세세한 극미세 알갱이 휠의 경우는, 저립 입자 돌출 양이 2 $\mu\text{m}$  이하의 범위 내에 집중해 분포하기 때문에, 저립 입자 돌출 양보다 오히려 단위면적의 저립 칼날 밀도가 중요하다. 그림 3은 SD1500N150B의 휠의 연삭제 성능에 대한 저립 칼날 밀도의 영향을 나타내고 있다. 연삭저항, 휠의 반경 마모량 및 마무리면 거칠기 모두가 저립 칼날이 조밀하게 되는 만

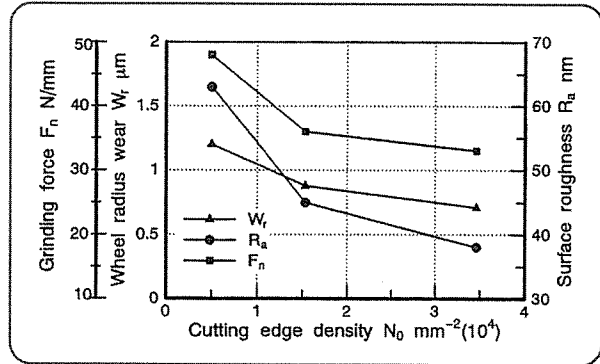


그림 3. Relationship between cutting edge density and grinding force, wheel radius wear

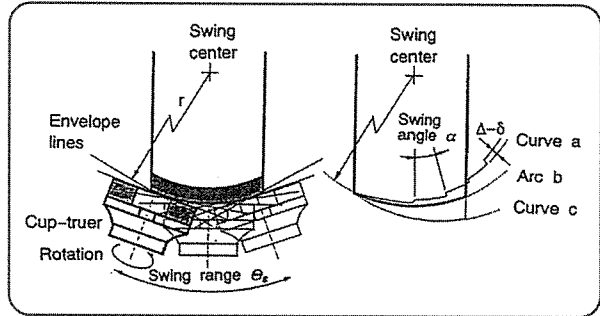


그림 4. Schematic of truing

큼 좋아졌다. 따라서 이 점에 대해서도, 캡 툴이 뛰어난 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

또 입径이 5 $\mu\text{m}$  이하의 극미세 알갱이 다이아몬드 휠을 이용한 초정밀 경면연삭에서는 저립 입자의 매몰 현상이 일어난다. 이것은 연삭 시에 저립 입자에 큰 연삭력이 작용하면 그 때의 연삭 열로 결합제가 연화하는 것이 원인이다. 이러한 매몰 현상을 막기 위해서는 주축진동이 작은, 미소 절입이 가능한 초정밀 연삭반이 반드시 필요하다. 게다가 트루잉이나 드레싱 과정에서의 탈락 입자를 억제하고 연삭저항을 가능한 한 많은 저립 칼날로 균일하게 분담하는 것이 극미세 알갱이 휠의 연삭성능을 충분히 활용하는 것이고, 여러 문제를 해결하는 열쇠이다.

### 3. 원호 트루아와 연삭 예

#### 3.1 원호 트루잉의 원리와 장치

초저립 입자 휠은 생산성이 높은 다량 생산형 가공에 이용되는 경우가 많기 때문에, 모든 형태의 휠이 사용되는 경

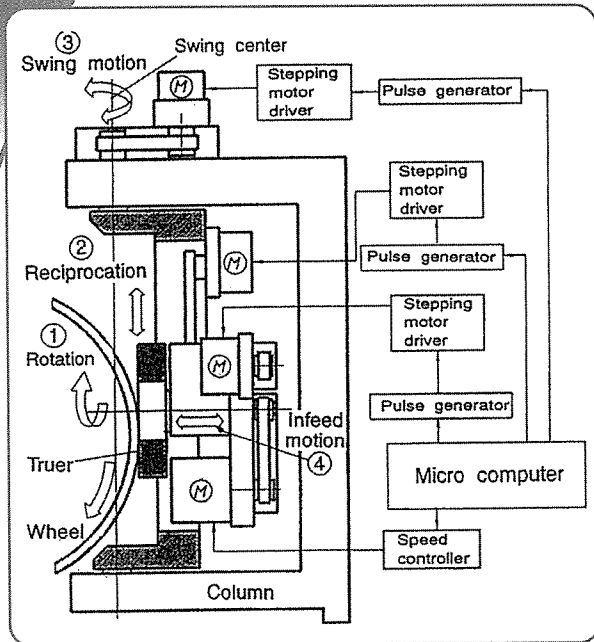


그림 5. Schematic of truer for cylindrical grinder

우가 많다. 여기에서 캡 틀법으로 진직도가 높은 트링이 가능한 것을 응용하여, 직선 포락에 의해서 초저립 입자 휠을 원호단면에 성형하는 기술을 개발했다.

그림 4는 트링 원리를 나타낸다. 캡 틀을 지면에 수직으로 왕복시키면서 중심 O의 주위로 왼쪽에서 오른쪽으로 선회시키고 트링을 실시하는 경우를 생각한다. 이 경우 트리아에 절입을 주지 않으면 휠 단면의 곡률 반경은 트리아의 마모분 만큼 커져, 그림 4 (b)의 곡선 c와 같이 된다. 한편 스트로크마다 절입을 주면, 절입량  $\Delta$ 으로부터 트리아의 마모량  $\delta$ 를 공제했다.  $\Delta - \delta$ 만 트리아가 전진하므로, 휠 단면은 곡선 a와 같이 된다. 그러나 트리아의 마모량이 크게  $\Delta \approx \delta$ 이면, 휠 단면은 한정되어 없고 곡선 b에 가까워질 것이다.

캡 틀에서는 탈락한 저립 입자의 램핑 작용에 의해서 트링이 진행하기 때문에 결합도가 낮은 GC 슷돌이 트리아로서 사용된다. 따라서 절입량의 대부분이 소모되어  $\Delta - \delta$ 는 충분히 작아진다. 이 때문에 선회 중심으로부터 트리아 공구 표면까지의 거리는 거의 일정

표 1. Specifications of truer

Tool unit		Reciprocation	
Drive	AC motor	Drive	Stepping motor
GC wheel size	90D*50H*20Tmm	Stroke	40mm
Speed	45-700mp	Speed	3.8-9.0m/min
Face camming	0.003mm/90mm	Straightness	0.003mm/40mm
Perpendicularity	0.005mm/90mm	Perpendicularity	0.005mm/40mm
Stiffness	10N/um		

Infeed mechanism		Swing motion	
Drive	Stepping motor	Drive	Stepping motor
Stroke	40mm	Swing Range	180(+90-90)deg
Minimum infeed	1um/pulse	Resolution	0.1deg/pulse
Pushing force	620N	Swing radius	0-25mm
Straightness	0.003mm/40mm	Lost motion	0-0.5deg
Parallelism	0.005mm/40mm	Perpendicularity	0.005mm/40mm

표 2. Truing conditions

Machine	Cylindrical grinder
Grinding wheel	CBN80M200VB1(350D-18T-3X)
Workpiece	S45C
Coolant	Noritake COOL SA-02
Truing conditions	Truer : GC80H(90D-20T-55H) Truer speed $V_t$ : 106m/min Wheel speed $V$ : 660m/min Recipro. speed $V_R$ : 4.7m/min Depth of cut $\Delta$ : 2.2~5.0 $\mu$ m/stroke

으로 유지되어 휠 단면은 곡선 b에 접근한다. 이상은, 간단하기 때문에 원호 단면의 트링에 대해서 생각했지만, NC 장치에 의해서 선회와 동기하여 선회 중심을 변경하면, 임의의 볼록형 단면을 트링 할 수 있다.

그림 5는 앞에서 서술한 트링 원리에 근거하고, 시작한 원통 연삭용의 원호 단면 휠 용의 트링 장치 및 제어 계통의 개략도를 나타낸다. 캡트리아를 상하로 왕복 운동시켜, 각 스트로크마다 일정량의 절삭 깊이를 주면서, 트리아 전체를 선회시키는 것이 본 장치의 기본 동작으로, 이하의 4개의 운동 기구로부터 된다.

- ① 트리아 회전부 : AC 스피드 컨트롤 모터를 사용하여 회전수 가변(50~700rpm)으로 했다.
- ② 절삭부 : 볼 나사와 스텝 모터로, 최소 1 $\mu$ m/step의 절입을 가능하게 했다.
- ③ 상하 왕복 운동부 : 스트로크 길이 40mm의 크랭크를 사용하여 스텝 모터 구동 그리고 3.8~9.0m/min의 속도를 얻을 수 있다.
- ④ 선회부 스텝 모터에 1/7.2의 감속 기어를 조합시켜서 최소 0.1°의 선회 이송각도의 제어가 가능하다.

트링 시에는, 회전하는 캡 트리아를 일정한 속도로 상하 왕복 운동시켜, 그 상사점을 근접 센서로 감지하고, 소정의 절입  $\Delta$ 와 선회 이송 각도  $\alpha$ 를 주는 구조로 되어있다. 또 선회 범위에 대해서는 선회용 스텝 모터의 출력 펄스 수를 카운트하는 것으로써 오픈 루프로  $0.1^\circ$ 로 제어할 수 있도록 했다. 트링 장치의 상세한 사양은, 표 1에 나타낸다.

지지계에 대해서는, 양단 지지의 상하 왕복 이동 테이블을 이용하여 지지 강성을 높게 했다. 절입 동작에 대해서는 프로그램의 변경만으로, 선회 이송 각도  $\alpha$ 에 동기, 비동기의 변환이 생겨 절입의 동작 범위를 선회 범위와 별도로 설정할 수 있도록 양단에 있어서의 과잉인 절입을 하지 않게 고안했다.

### 3.2 트링 능력과 정도

기본적으로는, 선회 범위 및 선회 중심 위치의 3축 동시 제어 기능을 본 장치에 부여하면, 임의의 블록 곡선의 단면 형상을 가지는 휠의 트링 및 드레싱이 가능하다. 그러나 전술한 것처럼, 실험의 편의상, 이번은 원호 단면으로 한정했다. 이 경우, 트리아의 선회 중심을 소기의 원호 단면의 중심 위치로 설정하고 트링을 실시하면, 휠 단면은 원호에 접근하여, 휠 외주 면이 한결같이 트링 되는 원호의 단면 형상을 얻을 수 있다. 실험은 폭 18mm의 비트리파이드 CBN 휠을 이용하였다. 트링 조건을 표 2에 나타낸다.

그림 6은 스트레이트 휠을 반경 30mm의 원호에 트링했을 때의 휠 단면 형상의 변화를 나타낸다. 휠의 제거는 바깥 부분에서 시작되어, GC 트리아의 소비량이 약 117mm일 때에 전체 외주면이 균일하게 트링 되었다. 그림 7은 휠 단면을 최소 제공법으로 원호에 근사해 산출한 반경의 값의 변화이다. 반경  $r$ 이 설정치 30mm에 접근해 가는 상태를 알 수 있다. 또한 이 경우는 스트레이트 휠로부터 원호 단면을 성형했지만 실제로는 저석 메이커에 있어서는 이미 원호를 성형되고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 실제의 트링 작업은 보다 간단하고, 트리아의 소비량도 적다. 또 본 실험에서는 트리아로서 GC80H를 이용했지만, 한층 더 입도가 거친 스톨을 사용하면, 트리아의 소비량을 줄일 수 있다.

그림 8은 트링으로 얻을 수 있던 휠 단면 형상의 대표 예이다. 형상 오차는 수  $\mu\text{m}$ 이지만, 파장이 일정하고 비교적

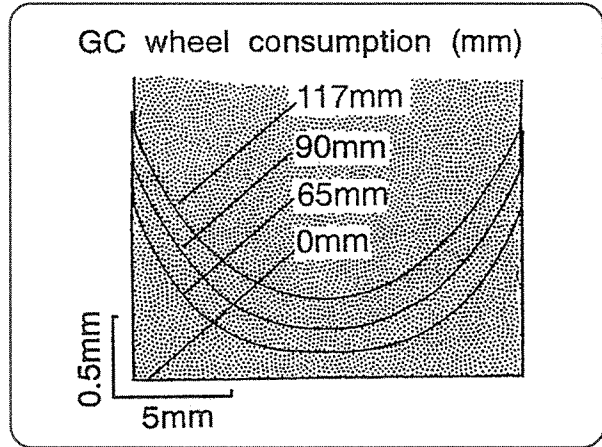


그림 6. Cross sectional profile of grinding wheel

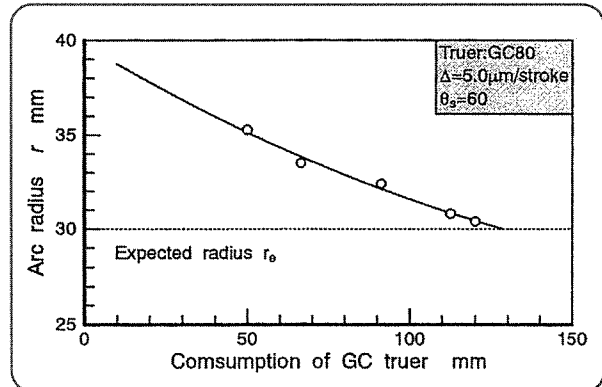


그림 7. Relationship between arc radius and consumption of GC truer

주파수의 높은 성분과 주파수가 낮은 파도 성분이 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

### 3.3 연삭 사례

그림 9는 자동차용 CVJ(등속 조인트)이다. 이 부품은 3개의 원호를 매끄럽게 연결하는 고딕아치이지만, 원호 트리아를 이용하면 선회 중심을 바꾸는 것만으로 트링할 수 있다. 그림 10은 CBN 휠의 트링 결과로, 강철 구조 접촉하는 좌우 2개의 원호의 형상 오차는 모두가  $2\mu\text{m}$ 이다. 종래는 A계 저석을 사용하고 있었지만, CBN화로 드레서 인터벌이 수십 배 길어졌다. 또 전술한 극미세 알갱이 휠의 트링 기술을 응용하고, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹제 베어링의 이너 레이스의 프랜지 경면 원통 연삭을 시도했다. 그림 11, 그림 12는 각각 연삭해 얻을 수 있던 레이스 면

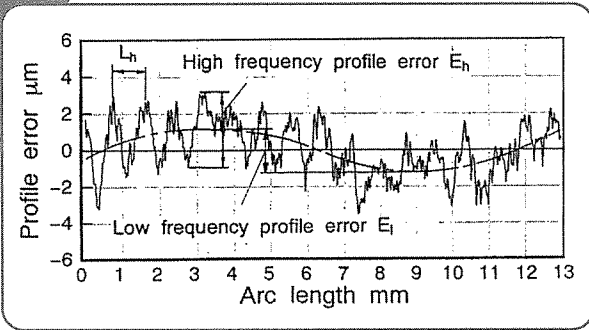


그림 8. Sample of trued surface

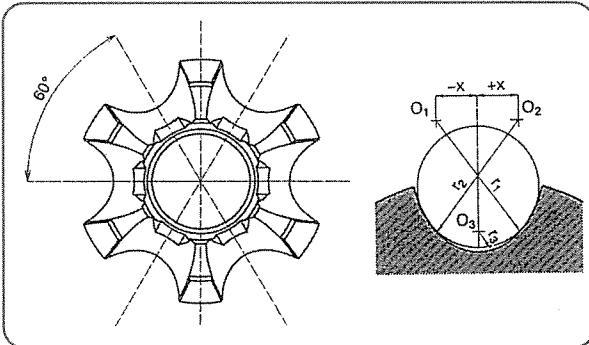


그림 9. Schematic of CVJ

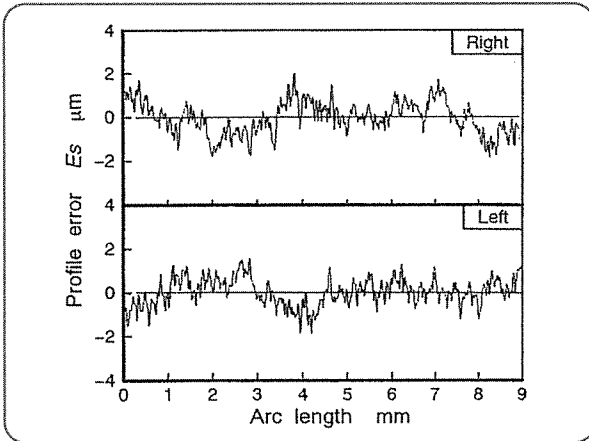


그림 10. Profile error of trued wheel

의 단면 형상, 마무리면 거칠기를 나타낸 것이다. SD5000P150B의 다이아몬드 휠로 형상 오차가 1 $\mu$ m 이내 거칠기가 50nm (Rmax)의 결과를 얻을 수 있었다.

또한 이 생각은

NC 테이블과 조합하는 것으로, 임의의 볼록 단면의 트루이그에 발전시킬 수 있다. 이것에 의해서, 모든 형태의 로터리 드레서에서는 드레스간 수생이 짧게 실용화가 진행되지 않았던 초저립 입자 휠에 의한 모든 형태의 연삭 실용화가 향후 한층 더 가속되는 것이라고 생각한다.

#### 4. 비축 대칭 비구면 연삭

최근, 원호 포락에 의한 비구면 미러라는 새로운 연삭 가공법이 개발되었다. 이것은 앞에서의 서술대로 원호 트루아로 얻을 수 있던 원호 단면을 가지는 극미세 알갱이 다이아몬드 휠과 CNC 초정밀 평면 연삭반을 이용하여 가능해진 것이다. 종래의 연삭 방법을 그림 13에, 새로운 연삭 방법을 그림 14에 나타낸다. 종래의 방법에서는 날 부서짐이 현저하고, 연삭량을 취하지 못하고 연삭 불능이 되었

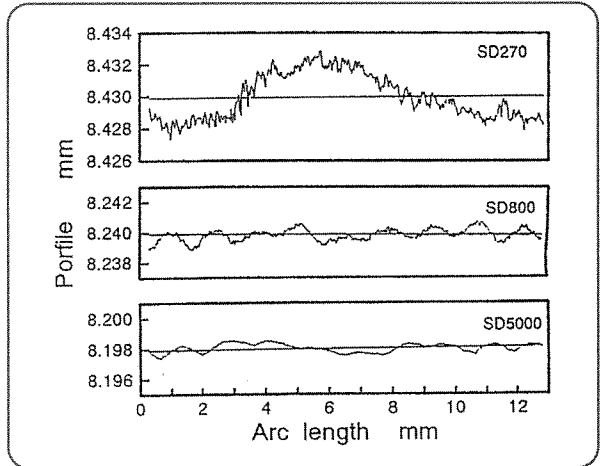


그림 11. Profile of inner lace of bearing

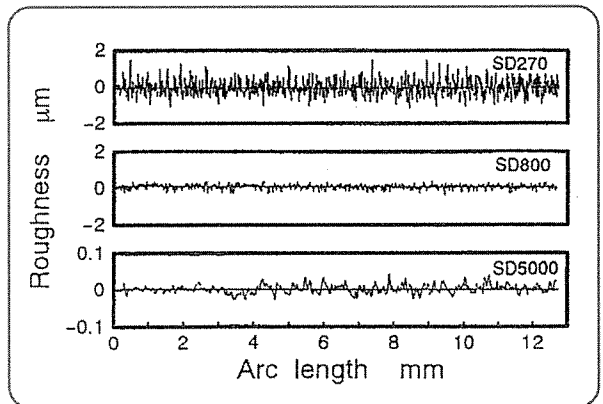


그림 12. Roughness of inner lace of bearing

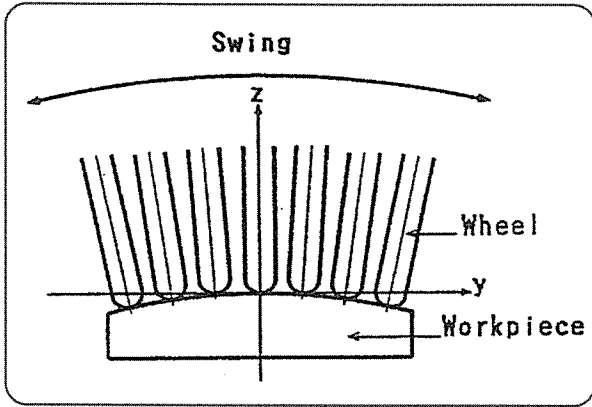


그림 13. Conventional grinding method

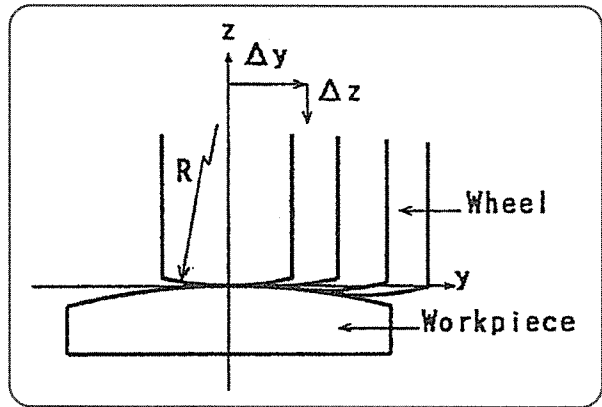


그림 14. Proposed grinding method

다. 이것은 연삭점이 한 점으로, 휠 마모가 거기에 집중했기 때문이다.

그러나 새로운 방법에서는 연삭점이 휠 단면 위를 이동하기 때문에, 날 부서짐이 발생하기 어렵고, 양호한 연삭이 지속된다. 게다가 저속 손상마모가 원호 단면에 걸쳐 균일하고, 휠 형상의 붕괴도 적다. 원호 반경 50mm의 단면

을 가지는 휠을 트르잉하여 SiC, 50mm×100mm의 오목형 포물면을 연삭했다. SD800B의 휠로 판 모양 공작물로부터 포물면을 깎고, SD3000B 호이프로 마무리 연삭을 실시했다. 휠의 트르잉 정도는 모두 0.5 $\mu$ m로 최종적인 공작물의 형상 정도는 0.5 $\mu$ m, 마무리면 거칠기는 0.1 $\mu$ m 이하였다.

### 한국광학기기협회 회원 가입안내

한국광학기기협회는 산업발전법에 의하여 설립된 산업자원부 산하단체로서 우리나라 광학산업 발전을 위한 공익사업 및 회원사 지원업무를 수행하고 있습니다. 21세기 첨단기술산업으로 각광을 받고 있는 국내 광학산업의 공동발전을 위해 회원가입을 안내하오니 희망업체에서는 신청해 주시기 바랍니다.

#### 1. 회원구성 : 정회원 및 특별회원

#### 2. 회원 서비스 및 특전

- 국내외 광산업 관련 정보 및 자료제공
- 동종업계 공동사업 참여 및 교류
- 정책지원 대상업체 추천, 확인 및 수혜 안내
- 기술개발지원 자금안내 및 사업참여
- 협회발간 '광학세계'에 업체 및 생산제품 홍보

#### 3. 가입금 및 기본회비 : 업체규모에 따라 차등

#### 4. 가입신청 및 문의

- 전화 : (02)3481-8931
- 홈페이지 : www.koia.or.kr