

최근 연삭기술의 발전 동향



이 종 찬

(금오공과대학교 교수)

1. 서 언

최근의 기계가공품의 고정밀화 추세에 따라 연삭가공 기술도 빠르게 발전하고 있다. 절삭가공기계들이 고속화, 고정밀화 되어가면서 과거의 연삭가공을 대체하는 경우도 많이 발생하고 있으나 한편으로는 제품의 고정밀화 요구에 따라 연삭가공의 수요가 늘어나고 있으며 높은 생산성과 고정밀, 고품위 연삭표면을 동시에 요구하고 있다. 본 고에서는 최근 연삭기술 발전동향을 연삭기, 연삭휠, 연삭기술로 구분하여 살펴보고자 한다.

2. 연삭기의 발전동향

2.1 연삭가공기의 고속화

오랫동안 유지되어온 연삭속도 30 m/s 의 영역이 무너지고 있다. 다이아몬드나 CBN과 같은 초연마재의 출현으로 생산성 향상과 정밀가공을 위하여 연삭속도가 높아지고 있으며 또한 소형제품의 연삭이 많아지면서 연삭가공기가 고속화 되고 있다. 그림 1은 20,000 rpm 급의 연삭용 스피들을 보여준다.

2.2 ATC 장착 CNC 연삭기 출현

연삭가공기가 CNC화 되기 시작한 것은 이미 오래되었으나 이제는 연삭기에 머시닝센터처럼 ATC(Automatic Tool Changer)를 부착하여 연삭휠 교환을 자동으로 하려는 시도가 이루어지고 있다. 그림 2는 JIMTOF 2000 에 Wasino에서 출품한 ATC 장착 CNC 평면연삭기(사용연삭휠수 6개)를 보여준다.

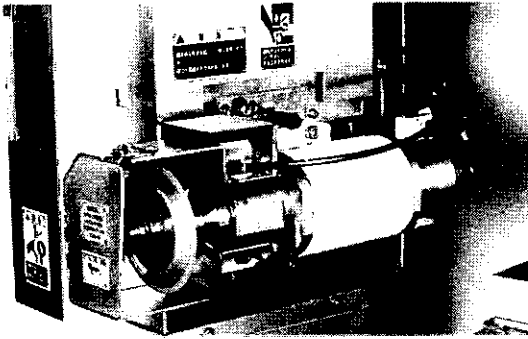


그림 1 20,000 rpm 연삭기 스피들

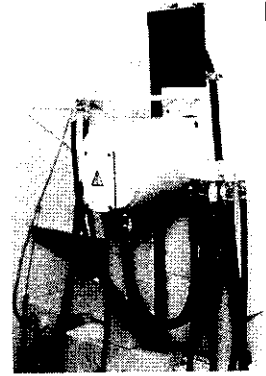


그림 3 수냉식 모터냉각 시스템

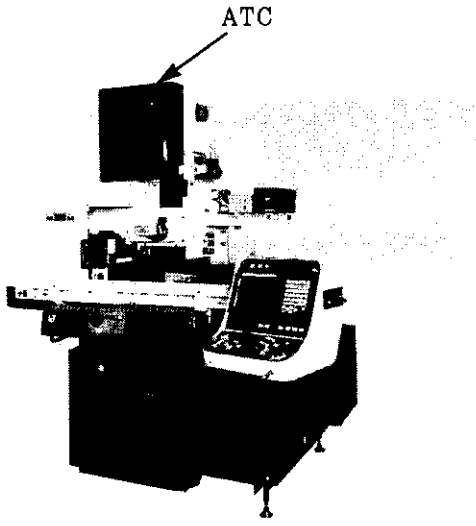


그림 2 ATC 장착 CNC 연삭기

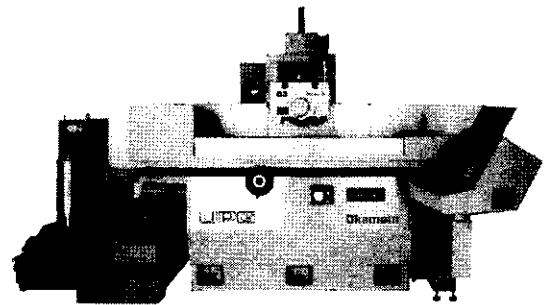


그림 4 초정밀 CNC 평면연삭기

2.3 연삭기의 고정밀화

다른 공작기계와 마찬가지로 연삭기에서도 정밀도를 높히려는 노력이 꾸준히 이루어져 오고 있다. JIMTOF 2000 에는 비접촉 유정압 습동면을 채택하고 연삭기 칼럼의 강성을 높여서 미소이송의 정도를 확보하고 모터의 발열을 억제하는 수냉식 냉각시스템(그림 3)을 채용하여 절입깊이 0.1 μ m로 향상시킨 연삭기(그림 4)가 출품되었다.

2.4 그라인딩 센터

초경합금, 경화강, 난삭재, 석영과 같은 취성재료 등의 고능률 고정도 가공을 위하여 머시닝센터 개념의 그라인딩 센터가 개발되었다. 그라인딩 센터는 절삭가공과 연삭가공을 동시에 수행할 수 있고 연삭지석의 자동교환이 가능하므로 윤곽가공, 평면가공, 복잡한 형상가공 등에 효율적으로 사용될 수 있다.

2.5 환경친화적 연삭기의 상품화

전 세계적인 환경 우선적인 생산분위기에 따라 연삭가공도 환경친화적으로 하는 방안이 학문적으로 계속 연구되고 있으나 그 성능이 아직 뚜렷히 입증되지는

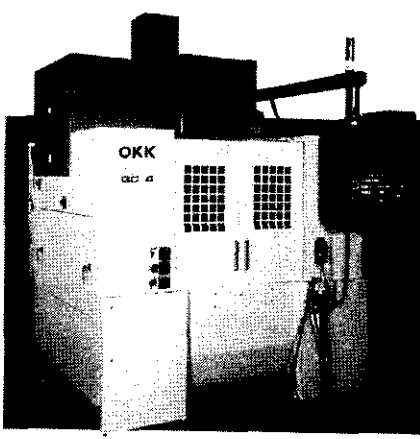


그림 5 그라인딩 센터



(a) 세라믹스 (b) 질화규소 (c) 석영

그림 6 그라인딩 센터로 가공된 사례

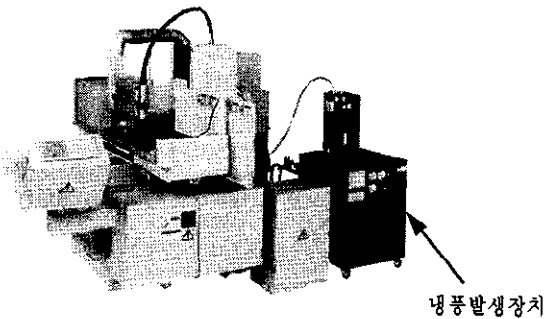


그림 7 냉풍연삭기

못하였다. 그럼에도 불구하고 벌써 연삭유 대신에 찬 공기를 불어넣어 연삭하는 냉풍연삭기가 상품화되어 시장에 나오고 있다. 그림 7은 Okamoto에서 JIMTOF2000에 출품한 냉풍연삭기를 보여준다.

2.6 휠 밸런싱 시스템

연삭기의 성능에 큰 영향을 미치는 것이 연삭기 주축의 진동과 연삭휠의 불균형(imbalance)이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 진동센서로 진동을 감지하여 증폭기로 증폭한 후 이 신호를 밸런싱헤드에 전달하여 자동으로 밸런싱을 유지하게 하는 밸런싱 시스템이 상품화되어 사용되고 있다(그림 8).



그림 8 밸런싱 유닛을 장착하여 연삭하는 모습

3. 연삭휠의 발전동향

3.1 초연마재 휠의 특성

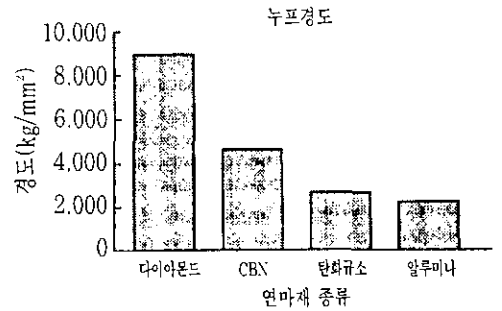
천연상태의 연마재를 본드로 결합한 최초의 연삭휠이 19세기 초에 만들어졌다는 기록이 있긴 하나, 19세기 후반까지 연마재 공구는 자연적으로 형성된 연마재에 의존했다. 연마재 지립을 대량생산하기 위해 엄격하게 제어된 공정이 요구되었고, 이것은 탄화규소(silicon carbide) 생산을 위한 전기로 공정이 도입되면서 가능해졌다. 그 후 산화 알루미늄(aluminium oxide)이 개발되었으며 오늘날에는 다양한 연삭환경과 작업조건에 맞추어 알루미늄과 실리콘 카바이드 지립을 규격, 강도별로 완벽하게 제공할 수 있게 되었다. 그러나 점차 산업이 발달해감에 따라 산업계에 필요한 많은 물질들을 가공하는대는 산화

표 1 연마재의 개발년도 및 개발회사

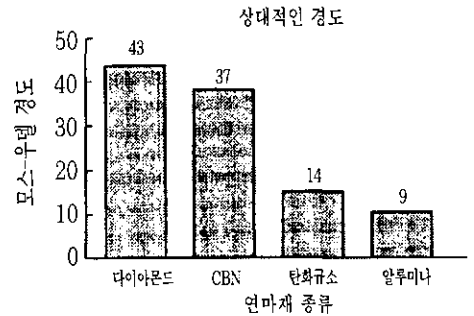
연도	연마재	상품명	회사
1891	SiC	Carborundum	Carborundum
1897	Al ₂ O ₃	Alundum	Norton
1910	Al ₂ O ₃	38Alundum	Norton
1925	SiC	Green Grit	Carborundum
1946	Al ₂ O ₃	32 Alundum	Norton
1954	Al ₂ O ₃	44Alundum	Norton
1954-1957	Diamond	Man-Made Diamond	GE
1954-1969	CBN	Borazon	GE

알루미늄이나 탄화규소보다 더 단단하고 강한 연마재가 필요하게 되었다. 1955년에 미국의 제너럴일렉트릭(General Electric)사는 다이아몬드 제조에 성공했음을 발표했다. GE사는 그 이후로 초연마재(superabrasives)로 명명되는 일련의 많은 제품군을 개발하였다. 또한 다이아몬드 합성제조법 연구에 부가하여 독특한 물질인 CBN(입방정 질화붕소, Cubic Boron Nitride)의 합성이 이루어졌다. 표 1은 각 연마재가 개발된 연도 및 개발한 회사를 나타낸다.

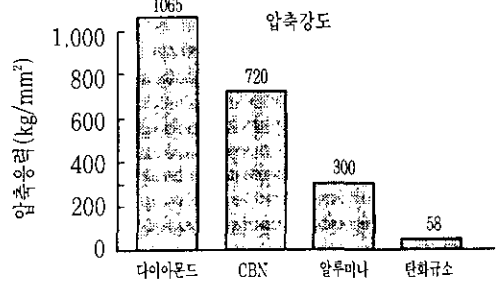
다이아몬드나 CBN과 같은 초연마재는 산화알루미늄(aluminum oxide)이나 탄화규소(silicon carbide)와 같은 일반 연마재와는 매우 다른 특성을 갖는다. 초연마재는 경도, 내마모성, 압축강도, 열전도성 등이 우수해 각종 난삭재의 연삭, 절단, 래핑, 절삭, 드릴링, 연마휠 드레싱, 인발공정의 공구 소재로 적합하다. 초연마재는 인간에게 알려진 가장 단단한 물질까지 가공할 수 있어서 난삭작업도 평범한 작업이 되도록 한다. 그림 9에 초연마재의 중요한 특성을 산화알루미늄이나 탄화규소와 같은 일반 연마재와 비교하였다.



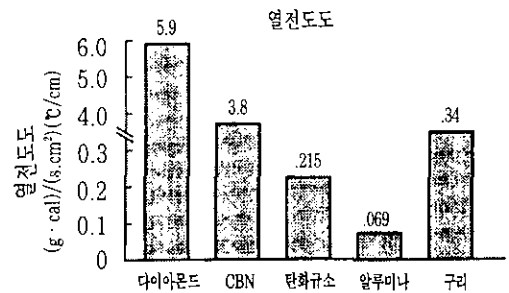
(a) 경도



(b) 내마모성



(c) 압축강도



(d) 열전도성

그림 9 초연마재의 물리적 성질

위에서 살펴본 바와같이 CBN 연삭휠은 난삭 철계 재료 연삭에 사용되는 일반 연마재 휠보다 경도가 2 배 이상 높다. 연마재 지립이 취약하여 가공압력과 연삭열을 견디지 못한다면 연마재의 경도는 무의미하다. CBN 결정은 우수한 경도에 상응하는 인성도 갖추었기 때문에, 일반 연마재보다 오랫동안 날카로운 절삭날을 유지하고 절삭날 마모도 느리게 진행된다. 일반 연삭휠로 난삭재료를 연삭할 때는 입자가 빠르게 마모되어 날끝이 무너지며, 이로 인하여 높은 연삭열이 발생한다. 연마재 지립이 무너짐에 따라 재료계구율은 감소하므로 부품 정밀도와 형상치수도 유지하기 어렵다. CBN 휠은 향상된 연삭능력과 높은 열전도율로 열의 축적을 방지하여 휠의 눈막힘(Glazing) 현상과 피삭재의 금속학적 손상을 줄인다.

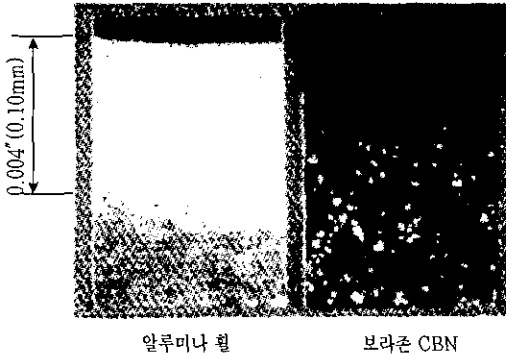


그림 10 알루미나휠과 CBN휠로 연삭한 부품

그림 11은 알루미늄 휠과 CBN휠로 연삭한 부품을 비교한 것이다. 알루미늄휠로 연삭한 왼쪽부품에서는 금속학적 손상을 보이는 반면 CBN휠로 연삭한 오른쪽 부품은 손상이 없다. 연삭에서 일반적으로 발생하는 온도인 1,000℃ 이상에서도 CBN은 열적, 화학적으로 안정하다. 이는 연삭휠 마모량 감소를 의미하고, 따라서 정밀한 피삭재 형상과 정밀도를 쉽게 얻을 수 있다.

일반적으로 다이아몬드는 강의 연삭에 사용되지 않는데, 왜 다이아몬드가 강(steel)의 연삭에 사용되지 않는지 의문을 가질 수 있다. 다이아몬드는 비철계 재료의 가공에만 유용하게 사용될 수 있음을 이해하는 것이 중요하다. 대부분의 강(특히 저탄소강)은 탄소용해 잠재력(carbon solubility potential)이라는 화학적 특성(그림 9)을 가지고 있다. 즉, 탄소를 함유한 모든 물질과 반응하여 탄소를 표면에 흡수하려는 성질이 있다. 이 반응은 연삭이나 절삭과정 중 발생하는 고온과 고압 하에서 쉽게 진행된다. 예를 들면, 소금을 연마재로 하는 연삭숫돌로 얼음을 연삭하는 경우 소금은 기계적으로 마모되는 것보다 얼음 속에 용해되므로 인해 마모되는 양이 훨씬 많다. 마찬가지로, 다이아몬드를 사용해 강을 연삭하거나 절삭할 때, 경제성은 다이아몬드의 우수한 경도나 강도에 의해서 결정되는 것이 아니라 철에 대한 화학적 용해성이라는 아킬레스건에 의해 결정된다. 철에 대한 화학적 용해성이 다이아몬드를 과다하게 마모시켜 비경제적이 되게 한다.

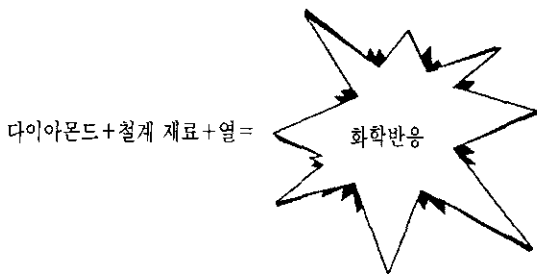


그림 11 다이아몬드의 탄소와 철의 반응

3.2 다양한 초연마재 휠의 개발 및 활용

앞서 설명했던 바와 같은 초연마재의 우수성 때문에 다양한 형태의 초연마재 휠이 개발되고 있고 그 활용 또한 급격하게 확산되고 있다. 초연마재휠이 효과적으로 사용되고 있는 다양한 예는 다음과 같다.

3.2.1 자동차 및 기계전기부품 산업

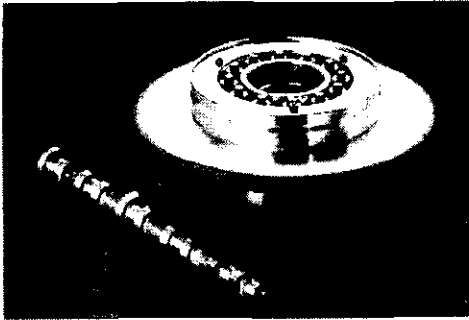


그림 12 Cam shaft 연삭용 비트리화이드본드 CBN 휠
(종래의 재래식 연삭휠로 연삭하던 캠샤프트 연삭을 비트리화이드 CBN 연삭휠로 대체하고 있다.)

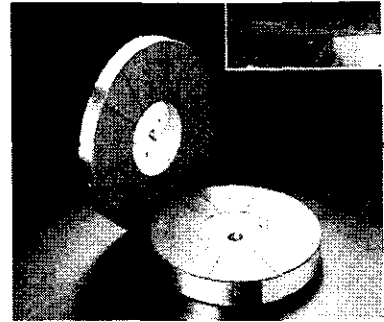


그림 15 레진본드 CBN 더블 디스크 그라인딩 휠
(베어링, 트랜스미션기어, 컴프레서 부품, 베인펌프 등에 더블디스크 연삭에 사용된다.)

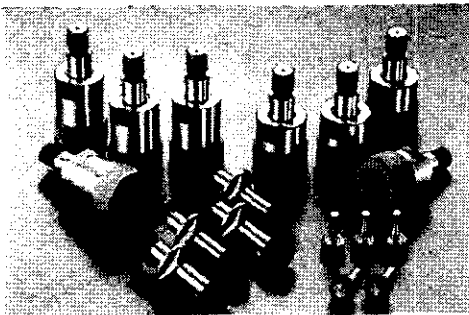


그림 13 내경 연삭용 비트리화이드본드 CBN 휠
(트랜스미션 기어, 커넥팅로드, 베어링 레이스, 컴프레서부품 등에 사용된다.)

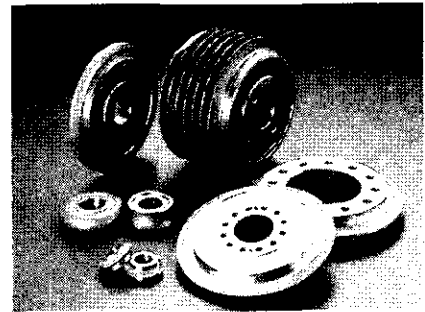


그림 16 전착 CBN 휠
(강으로 된 코어 위에 CBN 입자 함층을 전기도금하여 입힌 것으로 입자 돌출이 좋기 때문에 질삭능력이 좋아 성형연삭에 사용되며 코어의 좋은 강성 때문에 고속가공에 활용된다.)

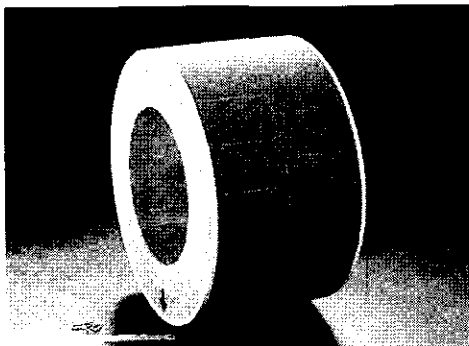


그림 14 센터리스 연삭용 비트리화이드 CBN 휠
(전체 무게를 줄이고 열변형을 방지하기 위하여 세라믹 코어를 사용한다.)

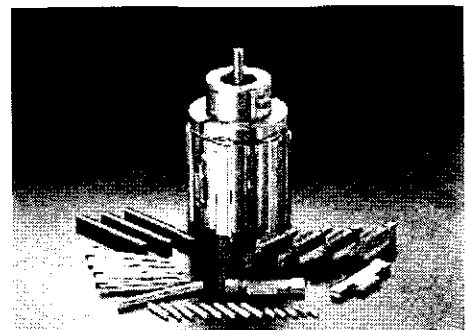


그림 17 다이아몬드, CBN 호닝스톤
(자동차 엔진 실린더, 유압실린더의 호닝가공에 효율적으로 사용된다.)

3.2.2 금형 및 공구산업

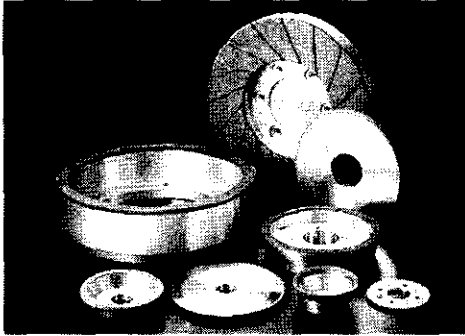


그림 18 다이아몬드 휠
(초경합금, 씨멧, 세라믹 등의 공구재료 연삭에 사용된다.)

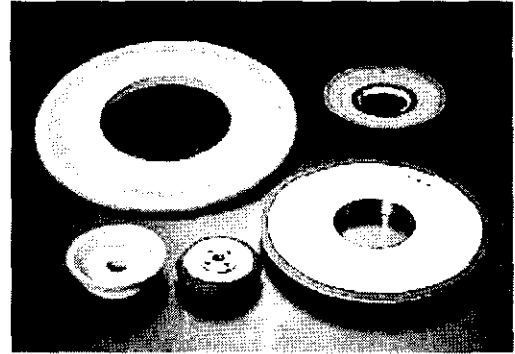


그림 21 비트리화이드 본드 CBN 휠
(롤링다이, 볼스크류, 다이펀치 등의 성형연삭에 사용된다.)

3.2.3 반도체 산업

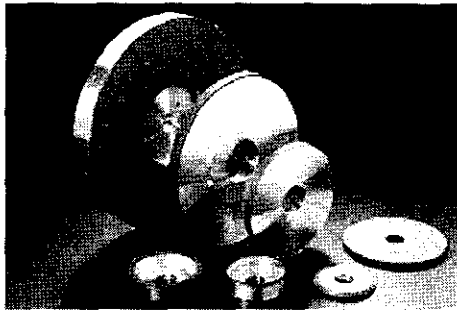


그림 19 레진 본드 CBN 휠
(탭, 엔드밀, 드릴, 밀링커터등의 절삭날을 세우는데 활용된다.)

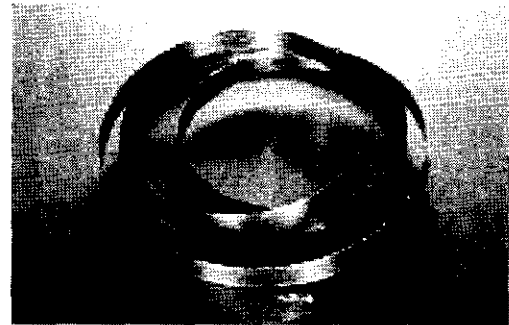


그림 22 전착 다이아몬드 톱날
(직경이 큰 실리콘 잉곳을 절단하거나 재단할 때 사용한다.)

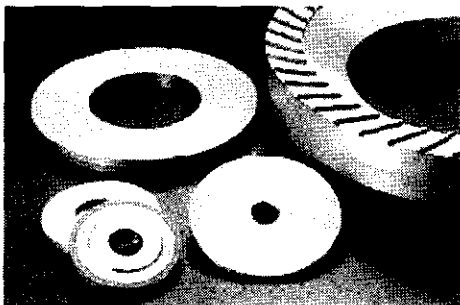


그림 20 메탈본드 CBN 휠
(공구재료의 수직형 평면연삭이나 엔드밀의 풀루트나 틱새 (gash)가공 그리고 프로파일 연삭과 같이 공작물의 형상이 중요한 곳에 사용된다.)

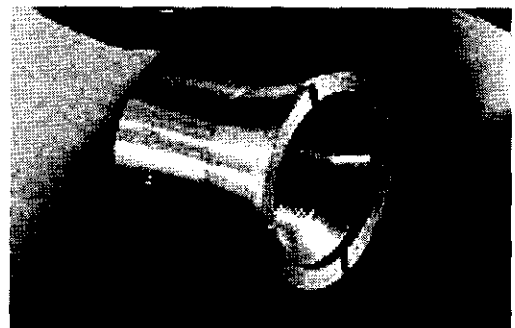


그림 23 컵타입 다이아몬드 휠
(실리콘 잉곳의 외경을 연삭하는데 사용한다.)

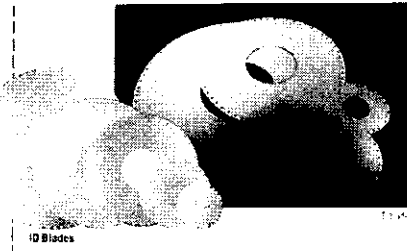


그림 24 다이아몬드 ID블레이드
 (실리콘 잉곳을 정밀하게 슬라이싱 하는데 사용한다. 실리콘 뿐만 아니라 유리, 세라믹 등과 같은 경한 재료의 절단에도 사용된다.)

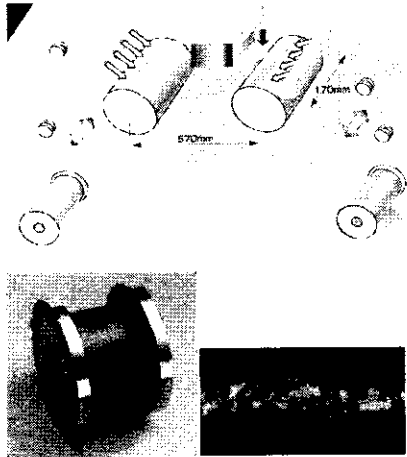


그림 25 다이아몬드 와이어 소를 이용한 슬라이싱
 (다이아몬드를 전착한 와이어 소를 이용하여 실리콘 잉곳을 슬라이싱 하는 기술이 개발되었다.)

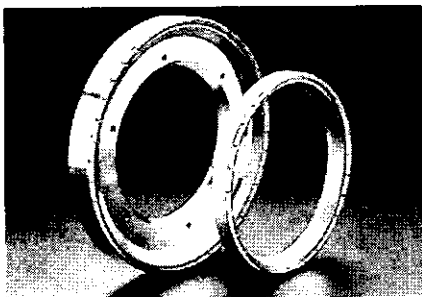


그림 26 Wafer back grinding 용 다이아몬드
 (실리콘 웨이퍼의 백 그라인딩에 사용된다.)

3.2.4 세라믹 및 유리산업

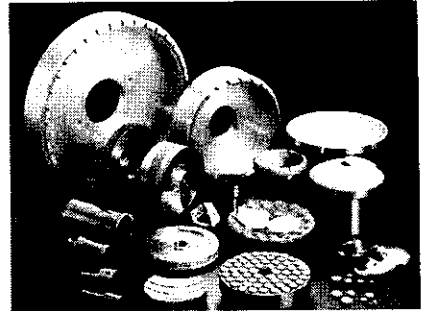


그림 27 세라믹 및 유리가공용 다이아몬드 휠
 (세라믹 및 유리가공용으로 다양한 휠이 개발되어 사용되고 있다.)

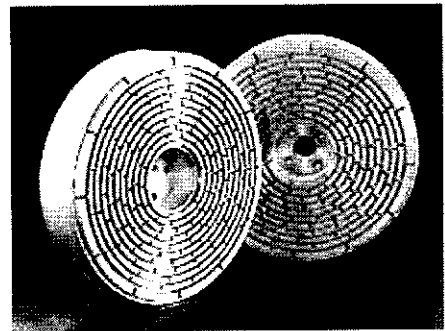


그림 28 자성재료용 메탈본드 더블디스크 그라인딩 휠

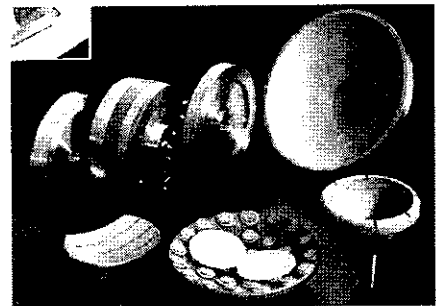
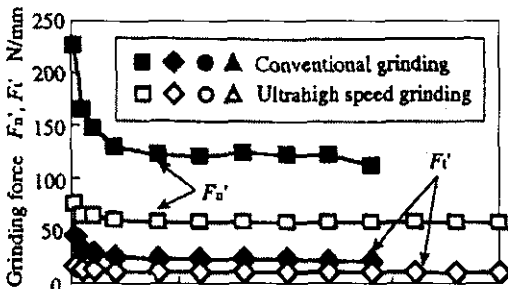


그림 29 안경렌즈 가공용 다이아몬드 휠
 (렌즈는 유리, 플라스틱 혹은 유리와 플라스틱의 복합재료로 만드는데 이들 구면 혹은 비구면의 렌즈 가공용으로 전착 혹은 금속본드의 휠들이 개발되어 사용되고 있다.)

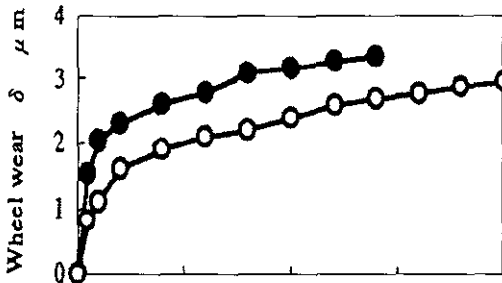
4. 연삭기술의 최근 연구동향

4.1 고속연삭

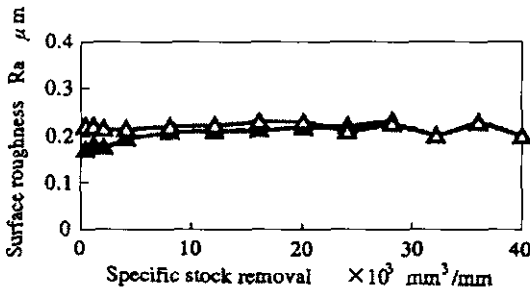
고속연삭은 오래전부터 생산라인에서 생산성 향상을 위한 가장 효과적인 방법중에 하나로 인식되어왔



(a) 연삭저항력



(b) 휠마모



(c) 표면거칠기

그림 30 고속연삭과 일반연삭의 비교

다. 지금까지 고속연삭에 관한 많은 연구가 있어왔지만 WA와 GC와 같은 보통지석을 이용한 당시의 고속연삭에서는 지석강도가 낮아 지석주삭 면에서 제한이 있었다. 그러나 지석강도가 우수한 CBN 휠의 출현으로 지석주삭을 비약적으로 높일 수 있게 되었다. 또한 과거에는 연삭기제조기술 등 제반기술이 따라주지 못하여 종래의 연삭가공은 대부분의 경우 휠주속이 30m/s 이 표준이었으나 최근들어 CBN입자의 개발 및 연삭기제조기술의 발달로 1986년에 비트리파이드 CBN휠을 이용하여 80m/s가 가능하였고, 1989년에 지석주속 160m/s가 가능하게 되었으며 현재는 휠주속이 200m/s 까지 가능한 연삭반이 시장에 출현하여 실용화되고 있다. 그리고 앞으로 지석주속 500m/s의 연삭을 실현하기 위하여 주요 요소기술의 과제에 대하여 연구하고 있다. 고속연삭의 적용이 가장 진전된 부분은 자동차 엔진용 캠샤프트의 프로파일연삭인데 이러한 고속연삭기술은 자동차부품등의 양산라인의 생산성을 향상시키는 기술의 하나로서 주목받고 있다. 지금은 양산라인에 실용화되고 있는 지석의 주속도 160m/s까지를 단순히 고속연삭이라고 하고 그 이상을 초고속연삭이라고 부르기도 한다. 그럼 30은 일반연삭과 고속 연삭을 비교한 것이다. 고속연삭의 경우 일반연삭의 경우보다 연삭저항력이 작게 작용하였고 휠마모도 감소하였으며 표면조도값은 일반 연삭과 거의 같은 수준의 표면을 얻을 수 있는 것을 볼 수 있다.

4.2 냉풍연삭

일반적으로 연삭작업에 있어서는 냉각과 윤활의 목적으로 연삭유가 사용되고 있다. 특히 그 윤활작용을 향상시키기 위하여 유황, 인, 염소 등의 극압첨가제를 포함시키게 되는데 작업중에 그 첨가제를 포함한 미스트가 비산하여 작업환경을 악화시키고

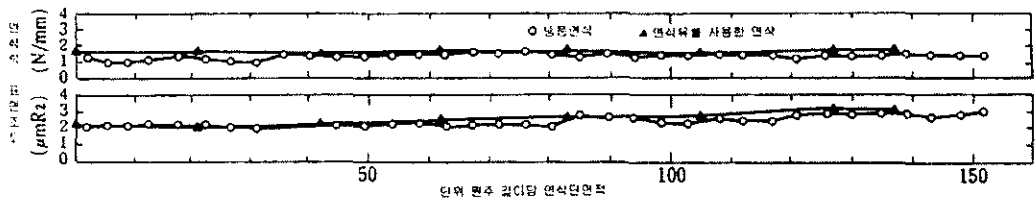


그림 31 냉풍연삭과 연삭유를사용한 연삭의 비교

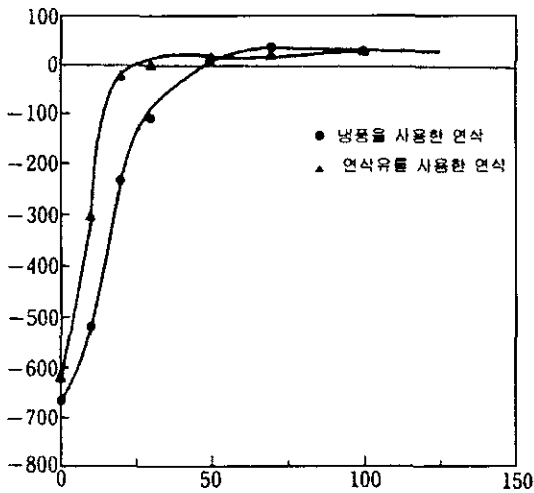


그림 32 냉풍연삭과 연삭유를사용한 연삭의 비교

사용한 연삭유의 처리는 막대한 비용이 들게된다. 이에 대하여 연삭유를 사용하지 않고 연삭성능을 유지하기 위한 일환으로 냉풍연삭이 등장하게 되었다. CBN휠의 특성인 연삭시의 발열이 작아 연삭유제를 사용하지 않고 냉풍을 연삭유 대신에 공급하면서 연삭하여 인체에 좋은 분위기와 환경적인 문제도 해결할 수 있는 연삭법이 개발되고 있다. 본 가공법은 연삭유제를 사용한 경우 보다 높은 연삭성을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 연삭점에 냉풍(-30 ~ -35℃)을 공급하고 휠주속을 1800 m/min로 하고 단위시간당 연삭량은 90 mm²/min으로

연삭한 결과를 그림 31에서 보여준다. 냉풍연삭을 한 경우가 연삭유를 사용한 경우보다 연삭저항력은 작고 표면조도는 우수한 것을 볼 수 있다. 또한 연삭비도 연삭유제를 사용한 경우보다 냉풍을 사용한 경우가 2배 이상 높게 나타났다. 즉 냉풍연삭이 2배 이상의 연삭성능을 나타내는 것을 알 수 있었다.

또 다른 연구에서는 CBN휠을 이용하여 단위시간당 연삭면적을 900mm²/min로 휠표면냉풍연삭을 한 경우와 에멀전형 연삭유제(1:20)을 사용하여 연삭한 경우의 공작물의 잔류응력을 그림 32에서 보여준다. 압축잔류응력이 연삭유를 사용한 경우 20μm의 깊이인데 반해 냉풍연삭을 사용한 경우 50μm의 깊이를 나타냈다. 이를 통하여 냉풍연삭의 경우가 연삭유를 사용한 연삭에 비해 피로강도가 큰 공작물이 얻어진다는 것을 알 수 있었다.

4.3 ELID 연삭

최근에 초정밀 경면 연삭기술로 개발된 전해 인프로세스드레싱(ELID:Electrolytic In-Process Dressing) 연삭은 다른 연삭 가공법에 비하여 가공효율 및 표면품질이 뛰어나 각종 마이크로 형상부품의 연삭가공에 이용되고 있다. 그림33은 ELID 연삭가공법의 원리를, 그림34는 슛돌에서의 ELID 현상을 설명하는 메카니즘을 나타내었다.

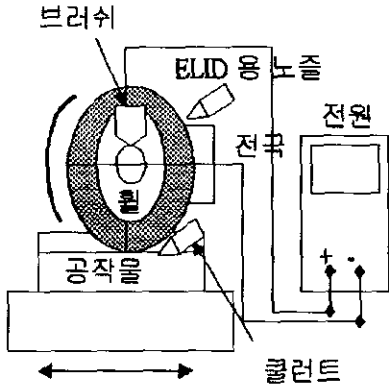


그림 33 슷돌에서의 ELID

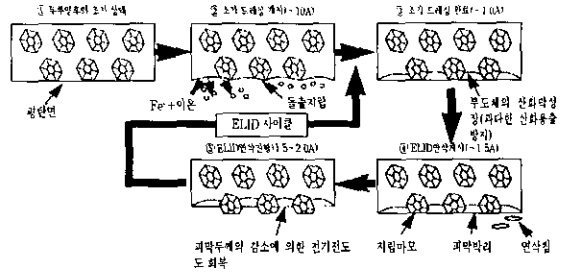


그림 34 슷돌에서의 ELID 메카니즘

미) 니) 상) 식)

DNC 기능

DNC기능이라 하면 적게는 외부운전기능(Direct Numerical Control)과 크게는 분산제어기능(Distribute Numerical Control)을 말하는데, 공작기계의 단독장비에서 일반적으로 이야기하는 DNC기능은 외부운전기능을 말한다.

1) 외부운전기능(Direct Numerical Control)
외부의 데이터 저장장치(일반 컴퓨터 등)에서 가공프로그램을 기계로 전송과 동시에 가공하는 기능. 주로 CAM데이터와 같이 기계가 수용하기 어려운 대량의 프로그램을 가공하는 경우에 사용

2) 분산제어기능(Distribute Numerical Control)

하나의 CELL(중앙컴퓨터)에서 각 장비의 작동현황을 모니터링하면서 상태에 맞게 제어하

는 기능. 주로 FMS, CIM 등에서 사용되는 기능으로 시스템 개념임.

3) 외부운전기능(Direct Numerical Control)의 효율적인 이용방법

■ 가공물과 통신속도의 관계
가공속도보다 통신속도가 느릴 경우 중간중간 가공이 정지하는 현상이 발생하므로 통신속도는 빠를수록 유리함. 참고로 통신속도는 bps로 결정되나 통신프로그램의 효율에 따라 최종 통신속도가 줄어들 수도 있음.

■ 미세 연속블록(주로 금형가공)이 많은 경우 고속 금형가공과 같이 미세 연속블록이 많은 경우 중간중간 통신속도가 가공속도에 미치지 못하는 경우가 발생하는데 이 경우에는 Remotebuffer를 사용하여야 함.

■ 통신 거리와 통신속도의 관계
통신 거리가 길면 길수록 통신 속도가 크면 클수록 에러발생확률이 높아진다. 따라서 통신속도를 높이려면 가능한 통신 거리를 짧게

할 필요가 있다. 현재 펜티엄급 PC와 일반 공작기계와의 통신을 예로 들면 통신거리 10m 이내에서 통신속도 19,200bps로 무난히 통신할 수 있다.

4) 관련 용어해설

■ RS232C(비동기식 시리얼 통신)
일반 공작기계의 표준 부착 통신기능으로 IBM호환 PC에도 표준으로 장착되어 있음.

- 최대 통신속도 : 19200 bps
- 최대 통신거리 : 이론상 100m
- 주변 노이즈가 적고 통신속도가 낮을 때 (2400bps 이하)
- 일반 통신거리 : 15m 이내

■ RS422A

RS232C와 동일한 기능으로 통신거리가 길 경우 사용(최대 1km) 일반적으로 시중에서 RS232C ↔ RS422A 변환기 구입가능 함.

■ bps(Bit Per Second)초당 전송하는 비트 수